

MAEKAS

Initiative zur nachhaltigen Schienenlogistik

Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und überregionalen
Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski • Dipl.-Kff. Alexandra Saur

Vermeidung von Leerfahrten für Eisenbahnverkehrsunternehmen durch „intelligente“ Nachfragebündelung

– eine Beurteilung der ökonomischen und ökologischen Effizienz –

MAEKAS-Projektbericht Nr. 8
ISSN 1866-9255

Abstract

Vor dem Hintergrund des Verbundprojekts MAEKAS zur Förderung kooperativer Schienengütertransporte durch kleine und mittelgroße Unternehmen ist es von großem Interesse, die Effekte einer kooperativen Transportabwicklung im Schienengüterverkehr mithilfe von theoretischen Modellen zu messen, zu analysieren und zu verbessern („optimieren“).

Der vorliegende Projektbericht stellt einerseits die qualitativen Effekte einer solchen Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen vor. Andererseits diskutiert er die quantifizierbaren Effekte hinsichtlich des Ziels, Leerfahrten der beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen so weit wie möglich zu vermeiden und hierdurch die anfallenden Leertonnenkilometer zu reduzieren. Sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht werden mehrere spezielle Facetten des Realproblems, schienengebundene Gütertransporte innerhalb einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu koordinieren, adressiert. Dazu gehört beispielsweise der Sachverhalt, dass der trivial anmutende Begriff der Leerfahrten weder in theoretischer Hinsicht präzise bestimmt noch von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS in einheitlicher Weise verwendet wird. Daher kommt der Klärung dieses zentralen Begriffs der Güterverkehrslogistik eine wichtige Rolle im hier vorgelegten Projektbericht zu. Des Weiteren wird das Problem aufgegriffen, dass in einem Verkehrsnetz in manchen Fällen einzelne Strecken nicht befahren werden können. In solchen Fällen kann ein Anstieg der – „eigentlich“ vermeidenswerten – Leertonnenkilometer dazu führen, dass die zusätzlich erwirtschafteten Erlöse über den zusätzlich verursachten Kosten liegen, sodass die Wirtschaftlichkeit des Gütertransports trotz steigender Leertonnenkilometer zunimmt.

Der hier präsentierte erste und noch grobe Modellentwurf bildet die Grundlage für weitere Modellierungs- und Optimierungsüberlegungen. Diese weitergehenden Überlegungen umschließen beispielsweise die Reduzierung von umweltschädlichen CO₂-Emissionen sowie die modellgestützte Quantifizierung von Effekten der kooperativen Transportentwicklung mittels realer Betriebsdaten, die von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS zur Verfügung gestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
1 Probleme beim Gütertransport mit der Bahn	1
1.1 Aktuelle Probleme regionaler Eisenbahnverkehrsunternehmen	1
1.2 Hemmnisse für den Gütertransport mit der Bahn	2
1.2.1 Überblick.....	2
1.2.2 Gütertransportprobleme für den Bereich Qualität.....	5
1.2.3 Gütertransportprobleme für den Bereich Service	5
1.2.4 Gütertransportprobleme für den Bereich Flexibilität.....	6
1.2.5 Gütertransportprobleme für den Bereich Preis	6
2 Abgrenzungsmöglichkeiten des Begriffs Leerfahrten	8
2.1 Definition von Leerfahrten.....	8
2.2 Operationalisierung durch Leertonnenkilometer.....	11
2.3 Fahrendes versus stehendes Equipment	13
2.4 Kapazitätsauslastung des Equipments.....	17
3 Ermittlung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern	21
3.1 Überblick	21
3.2 Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH (MVG).....	23
3.3 Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG (NDH).....	25
3.4 Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH (WHE)	27
3.5 SBB Cargo GmbH (SBB).....	30
3.6 Zusammenfassung	33
4 Probleme bei der Vermeidung von Leerfahrten	35
4.1 Einführung.....	35
4.2 Güterwagen	35
4.3 Güterarten.....	41
4.4 Regionale Nähe	42
4.5 Sonstige Aspekte	45

5	Beurteilung der Kooperationseffekte.....	47
5.1	Überblick.....	47
5.2	Generelle Kooperationseffekte.....	53
5.2.1	Quantitative Effekte	53
5.2.1.1	Leerfahrten- und Leertonnenkilometereffekte	53
5.2.1.2	Kosteneffekte	55
5.2.1.3	Akquisitionseffekt.....	60
5.2.1.4	Deckungsbeitragseffekt.....	66
5.2.1.5	Emissionseffekt.....	72
5.2.2	Qualitative Effekte	74
5.3	Exemplarische Kooperationseffekte.....	78
5.3.1	Theoretische Optimierungsbeispiele.....	78
5.3.2	Praktisches Optimierungsbeispiel	84
6	Das Realproblem der Vermeidung von Leerfahrten aus der Perspektive von Formalproblemen der Tourenplanung.....	89
6.1	Grundlagen.....	89
6.2	Konventionelle Tourenplanung.....	91
6.2.1	Eine Standardmodell der konventionellen Tourenplanung.....	91
6.2.1.1	Graphentheoretische Grundlagen.....	91
6.2.1.2	Vehicle-Routing-Probleme als basaler Formalproblemtyp.....	101
6.2.1.2.1	Grundlagen der Modellierung von Vehicle-Routing-Problemen.....	101
6.2.1.2.2	Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung.....	105
6.2.1.2.3	Implementierungsprobleme des Standardmodells.....	109
6.2.2	Algorithmen zur Lösung des Standardmodells.....	112
6.2.2.1	Überblick.....	112
6.2.2.2	Exakte Algorithmen	115
6.2.2.3	Heuristische Algorithmen	116
6.2.3	Realproblembezogene Unzulänglichkeiten des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung	120

7	Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern	137
7.1	Grundlagen	137
7.2	Komponenten des Tourenplanungsmodells	149
7.2.1	Verkehrsnetz	149
7.2.2	Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment	169
7.2.3	Transportnachfrage	174
7.2.4	Touren	180
7.2.5	Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers	190
7.2.6	Spielraumeinschränkungen durch Restriktionen aus dem Entscheidungsumfeld.....	196
7.2.7	Zielfunktionen	238
7.3	Gesamtdarstellung des Tourenplanungsmodells	251
7.3.1	Mathematische Modellformulierungen	251
7.3.2	Computergestützte Modellimplementierung.....	286
7.4	Desiderata für die Weiterentwicklung des Tourenplanungsmodells.....	303
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	309
9	Literaturverzeichnis	312
10	Anhang.....	320

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
Aufl.	Auflage
BME	Bundesverband Materialwirtschaft Einkauf und Logistik e.V.
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CFRS	Cluster-First-Route-Second
Co.	Compagnie
CO ₂	Kohlendioxid
DB	Deutsche Bahn
d.h.	das heißt
DM	Distanzmatrix
et al.	und andere
e.V.	eingetragener Verein
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
f.	folgende
ff.	fort folgende
FOM	Fachhochschule für Ökonomie und Management
G	Graph
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Hrsg.	Herausgeber
Inc.	Incorporated
Jg.	Jahrgang
JIT	Just in time
KCL	Kompetenz-Center Logistik
KG	Kommanditgesellschaft
KLM	Kononklijke Luchtvaart Maatschappij
km	Kilometer
KMU	kleine und mittelgroße Unternehmen
Lato·km	Lasttonnenkilometer
Leto·km	Leertonnenkilometer
Lkw	Lastkraftwagen
LZ	Lokzug
MAEKAS	Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und überregionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien
MDVRPTW	Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows

MVG	Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH
NDH	Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG
No.	Number
NO _x	Stickoxid
NP	non-deterministic polynomial-time
Nr.	Nummer
o.a.	oben angeführt
o.ä.	oder ähnliches
PDVRP	Pickup-&-Delivery-Vehicle-Routing-Problems
q.e.d.	quod erat demonstrandum
QR	Qualitative Reasoning
RFCFS	Route-First-Cluster-Second
S.	Seite
SBB	Schweizer Bundesbahn
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer francais
SZ	Subzyklus
to·km	Tonnenkilometer
to	Tonne
TPP	Tourenplanungsproblem
TS	Toursegment
TSP	Travelling Salesman Problem
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
VM	Verknüpfungsmatrix
Vol.	Volume
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
WHE	Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH
z.B.	zum Beispiel

Symbolverzeichnis

Vorbemerkung: Hinter den Definitionen einzelner Symbole, die für das Tourenplanungsmodell aus betriebswirtschaftlicher Sicht besondere Bedeutung besitzen, wird die Dimension, in der das Symbol gemessen wird, in der Notation „,[Maßgröße]“ angefügt.

a) Deskriptive Symbole:

A	Anzahl der Lokomotivtypen $LT_{die.a}$ mit Dieselantrieb
$anz_{lok.die.a.e}$	Anzahl der Diesel-Lokomotiven vom Typ $LT_{die.a}$ des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$anz_{lok.ele.b.e}$	Anzahl der Elektro-Lokomotiven vom Typ $LT_{ele.b}$ des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$anz_{lok.e}$	Anzahl der Lokomotiven beliebigen Typs des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$anz_{nel.e.q}$	Anzahl der nicht vollständig elektrifizierten Gleisstrecken entlang einer Tour $T_{e.q}$
$anz_{wag.e}$	Anzahl der Güterwagen beliebigen Typs des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$anz_{wag.sta.c.e}$	Anzahl der Standard-Güterwagen vom Typ $GT_{sta.c}$ des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$anz_{wag.gef.d}$	Anzahl der Gefahrgut-Güterwagen vom Typ $GT_{gef.d}$ des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
B	Anzahl der Lokomotivtypen $LT_{ele.b}$ mit Elektroantrieb
C	Anzahl der Güterwagentypen $WT_{sta.c}$ für Standard-Transporte mit $c = 1, \dots, C$
C_k	zur Verfügung stehende Kapazität
D	Anzahl der Güterwagentypen $WT_{gef.d}$ für Gefahrgut-Transporte mit $d = 1, \dots, D$
$d_{i,j}$	Distanz zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j [km]
$dce_{die.a}$	durchschnittliche CO_2 -Emissionen einer Diesel-Lokomotive vom Typ $LT_{die.a}$ [kg CO_2 / to]
$dce_{ele.b}$	durchschnittliche CO_2 -Emissionen einer Elektro-Lokomotive vom Typ $LT_{ele.b}$ [kg CO_2 / to]
$DE_{e.q}$	Durchschnittsemissionen je Tonnenkilometer auf einer Tour $T_{e.q}$ [kg CO_2 / to·km]
DEP_e	Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
$dhp_{e.n}$	Depot-Haltepunkt für das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e im Haltepunkt HP_n
DM	Distanzmatrix
DGM	Durchschnittsgeschwindigkeitsmatrix
€	Euro
E	Anzahl unterschiedlicher Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e
$eg_{gef.d}$	Eigengewicht eines Güterwagens für Gefahrgut-Transporte vom Typ $GT_{gef.d}$ [to]
$eg_{sta.c}$	Eigengewicht eines Güterwagens für Standard-Transporte vom Typ $GT_{sta.c}$ [to]

EM	Elektrifizierungsmatrix
EVU _e	Eisenbahnverkehrsunternehmen
gg _{die.a}	Gesamtgewicht einer Diesel-Lokomotive vom Typ LT _{die.a} [to]
gg _{ele.b}	Gesamtgewicht einer Elektro-Lokomotive vom Typ LT _{ele.b} [to]
GTM	Gefahrguttauglichkeitsmatrix
gmb _{gef.d.i}	Beladungsmenge für Güterwagen des Typs GT _{gef.d} für Gefahrgut-Transporte am Haltepunkt HP _i [to]
gmb _{sta.c.i}	Beladungsmenge für Güterwagen des Typs GT _{sta.c} für Standard-Transporte am Haltepunkt HP _i [to]
gme _{gef.d.i,j}	Entladungsmenge für Güterwagen des Typs GT _{gef.d} für Gefahrgut-Transporte vom Haltepunkt HP _i zum am Haltepunkt HP _j [to]
gme _{sta.c.i,j}	Entladungsmenge für Güterwagen des Typs GT _{sta.c} für Standard-Transporte vom Haltepunkt HP _i zum Haltepunkt HP _j [to]
GT _{gef.d}	Güterwagen-Typ für Gefahrgüter mit $d = 1, \dots, D$
GT _{sta.c}	Güterwagen-Typ für Standardgüter mit $c = 1, \dots, C$
hgg _{gef.d}	höchstzulässiges Gesamtgewicht eines Güterwagens vom Typ GT _{gef.d} für Gefahrgut-Transporte [to]
hgg _{sta.c}	höchstzulässiges Gesamtgewicht eines Güterwagens vom Typ GT _{sta.c} für Standard-Transporte [to]
HP	Haltepunkt für Güterzüge
hpi _{e,q,p}	Haltepunkt-Index für denjenigen Haltepunkt HP _n , der sich an der p-ten Position einer Tour T _{e,q} mit dem Tourvektor TV _{e,p} = (hpi _{e,q,1} , ..., hpi _{e,q,p} , ..., hpi _{e,q,P}) befindet
id	(zweistellige) identische Relation
K	eine beliebig große Zahl
k	Transportmittel im Standardmodell der Tourenplanung mit $k = 1, \dots, K$
KA	Kantenmenge
KN	Knotenmenge
KNxKN/id	Trägermenge für die Kantenmenge KA
lg _{sta.c.e,q,p}	aktuelles Ladegewicht aller Güterwagen für Standard-Transporte vom Typ GT _{sta.c} an der Position p einer Tour T _{e,q} des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU _e [to]
lg _{gef.d.e,q,p}	aktuelles Ladegewicht aller Güterwagen für Gefahrgut-Transporte vom Typ GT _{gef.d} an der Position p einer Tour T _{e,q} des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU _e [to]
lk _{sta.c}	Ladungskapazität eines Güterwagens für Standard-Transporte vom Typ GT _{sta.c} [to]
lk _{gef.d}	Ladungskapazität eines Güterwagens für Gefahrgut-Transporte vom Typ GT _{gef.d} [to]
LT _{die.a}	Lokomotiv-Typ mit Dieselantrieb und $a = 1, \dots, A$
LT _{ele.b}	Lokomotiv-Typ mit Elektroantrieb und $b = 1, \dots, B$
LTK _{e,q}	Leertonnenkilometer einer Tour T _{e,q} [to·km]

m	Menge aller Fahrzeuge
N	Anzahl aller Haltepunkte im Verkehrsnetz VN
$P_{e,q}$	Anzahl der Haltepunkte HP_n der Tour $T_{e,q}$
p	Positionsindex im charakteristischen Vektor für die Tour $T_{e,q}$
PAS	Positionsabständesumme zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten von zu transportierenden Gütermengen
$PAS_{grö}$	größerer Wert als die Positionsabständesumme zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten von zu transportierenden Gütermengen
Q_e	Anzahl der für das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e maximal möglichen Touren $T_{e,q}$
RT_x	Tour- und EVU -spezifischer Restriktionstyp
$real_{e,q}$	endogene Variable für die Realisierung der Tour $T_{e,q}$
$rel_{wag.sta.c.n}$	endogene Variable für Standard-Transporte
$rel_{wag.gef.d.n}$	endogene Variable für Gefahrgut-Transporte
$relb_{sta.c.i.}$	beladungsbezogene Relevanzvariable für Standard-Transporte
$relb_{gef.d.i.}$	beladungsbezogene Relevanzvariable für Gefahrgut-Transporte
S	Subtour-Elimination
$s_{i,j}$	Gleisstrecke, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum anderen Haltepunkt HP_j führt
$se_{i,j}$	Streckenelektrifizierung, d.h. der Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum anderen Haltepunkt HP_j führt
$sdg_{i,j}$	Streckendurchschnittsgeschwindigkeit, d.h. die durchschnittliche Geschwindigkeit für Güterzüge, die auf einer Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j verkehren [km/h]
$sgt_{i,j}$	Streckengefahrguttauglichkeit, d.h. die Gefahrguttauglichkeit einer Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum anderen Haltepunkt HP_j führt
$sl_{i,j}$	Streckenlänge, d.h. die Länge der Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum anderen Haltepunkt HP_j führt [km]
$ss_{i,j}$	Streckensteigung, d.h. die durchschnittliche Steigung der Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum anderen Haltepunkt HP_j führt [%]
SZ	Subzyklus
$T_{e,q}$	eine einzelne „q-te“ Tour für ein einzelnes Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e
$TE_{e,q}$	Tourendevektor für eine Tour $T_{e,q}$
$te_{e,q,p}$	Komponente des Tourendevektors $TE_{e,q}$ für eine Tour $T_{e,q}$
TF	Familie aller Touren $T_{e,q}$ von Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mit $e = 1, \dots, E$ und $q = 1, \dots, Q_e$
TF_e	Familie aller Touren $T_{e,q}$ eines einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e
TGE	Tourengeamtmission [kg CO_2 / to]
TGL	Tourengeamtlänge [km]
TGL_{dff}	durchfahrtenfreie Tourengeamtlänge [km]
$TGLTK$	Tourengeamtleertonnenkilometer [to·km]

TL	Tourlänge
TL_k	Tourlänge einer Tour k
TLS	Tourlängensumme
$TV_{e,q}$	Tourvektor für eine Tour $T_{e,q}$
$v_{i,j}$	Verknüpfungskoeffizient für die Haltepunkte HP_i und HP_j
VM	Verknüpfungsmatrix
VN	Verkehrsnetz
vel	Statusvariable zur Anzeige der vollständigen Elektrifizierung aller Verbindungsstrecken einer Tour
$wl_{e,q}$	Weglänge einer Tour $T_{e,q}$ [km]
$x_{e,p,q,n}$	Entscheidungsvariable für die Zuordnung des Haltepunkts HP_n zur p-ten Position der Tour $T_{e,q}$
$x_{i,j,k}$	Entscheidungsvariable für die Bedienung der Verbindungsstrecke $s_{i,j}$ zwischen dem Haltepunkt HP_i und dem Haltepunkt HP_j durch das Fahrzeug k
$y_{i,k}$	Entscheidungsvariable für die Bedienung des Haltepunkts HP_i durch das Fahrzeug k
$y_{die.a.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Zuordnung einer Diesel-Lokomotive vom Typ $LT_{die.a}$ zur Tour $T_{e,q}$
$y_{ele.b.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Zuordnung einer Elektro-Lokomotive vom Typ $LT_{ele.b}$ zur Tour $T_{e,q}$
$y_{n,k}$	
$y_{sta.c.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Zuordnung eines Standard-Güterwagen vom Typ $GT_{sta.c}$ zur Tour $T_{e,q}$
$y_{gef.d.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Zuordnung eines Gefahrgut-Güterwagen vom Typ $GT_{gef.d}$ zur Tour $T_{e,q}$
$zb_{sta.c.i.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Beladung von Güterwagen des Typs $GT_{sta.c}$ mit Standardgütern im Haltepunkt HP_i während einer Tour $T_{e,q}$
$zb_{gef.d.i.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Beladung von Güterwagen des Typs $GT_{gef.d}$ mit Gefahrgütern im Haltepunkt HP_i während einer Tour $T_{e,q}$
$ze_{sta.c.i.j.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Entladung von Güterwagen des Typs $GT_{sta.c}$ im Haltepunkt HP_j hinsichtlich einer Gütermenge von Standardgütern, die während der Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_i aufgeladen wurden
$ze_{gef.d.i.j.e,q}$	Entscheidungsvariable für die Entladung von Güterwagen des Typs $GT_{gef.d}$ im Haltepunkt HP_j hinsichtlich einer Gütermenge von Gefahrgütern, die während der Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_i aufgeladen wurden
$ZG_{e,q,p}$	effektives Zuggewicht auf einer Tour $T_{e,q}$ im p-ten Tourabschnitt [to]
$zk_{die.a}$	Zugkraft (Traktionskapazität) einer Diesel-Lokomotive vom Typ $LT_{die.a}$ [to]
$zk_{ele.b}$	Zugkraft (Traktionskapazität) einer Elektro-Lokomotive vom Typ $LT_{ele.b}$ [to]

b) Logisch-mathematische Symbole:

$\%$	Prozent
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen einschließlich der Null (nicht-negative Ganzzahlen)
\mathbb{N}_+	Menge der natürlichen Zahlen ausschließlich der Null (positive Ganzzahlen)
$\#(M)$	Kardinalitätsfunktion, die einer Menge M die Anzahl ihrer Elemente zuordnet
$M_1 \times M_2$	kartesisches Produkt zweier Mengen M_1 und M_2
$=$	Gleichungsrelation
\neq	Ungleichungsrelation
\subseteq	unechte Teilmengenrelation
\subset	echte Teilmengenrelation
\geq	Größer-oder-gleich-Relation
\leq	Kleiner-oder-gleich-Relation
\forall	Allquantor („für alle ... gilt: ...“)
\exists	Existenzquantor („für mindestens ein ... gilt: ...“)
$\dot{\exists}$	Einsquantor („für genau ein ... gilt: ...“)
\neg	logisches „nicht“ (Negat)
\wedge	logisches „und“ (Konjugat)
\vee	logisches „oder“ (Adjugat)
$\underline{\vee}$	logisches „entweder ... oder“ (Disjugat)
\rightarrow	logisches „wenn ..., dann ...“ (Subjugat)
\leftrightarrow	logisches „... genau dann, wenn ...“ (Bijugat)
$F(\dots)$	immer ungültige Formel ... (Kontradiktion)
\sum	Summenzeichen

1 Probleme beim Gütertransport mit der Bahn

1.1 Aktuelle Probleme regionaler Eisenbahnverkehrsunternehmen

Bei regionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) handelt es sich zum größten Teil um kleine und mittelgroße Unternehmen (KMU), die bis zum heutigen Zeitpunkt oftmals noch über keinen großen Erfahrungsschatz in der Neukundenakquisition verfügen. Infolge ihrer relativ geringen Unternehmensgröße stehen ihnen nicht immer die Ressourcen im Vertrieb zur Verfügung, die erforderlich wären, um am Markt aktiv agieren und neue Kunden akquirieren zu können. Stattdessen fühlen sich diese regionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen wegen ihrer beschränkten Ressourcen im Vertrieb des Öfteren auf die Rolle des Reagierenden festgelegt. Aufgrund ihrer Größe, Ressourcen und Kapazitäten wird von ihnen nicht immer die Möglichkeit gesehen, so auf individuelle Kundenwünsche einzugehen, wie es von manchen Kunden erwartet wird. Daher fühlen sich Kunden mitunter unangemessen behandelt und in der Kundenbetreuung durch Eisenbahnverkehrsunternehmen vernachlässigt.¹⁾

Sowohl aus umweltpolitischer als auch aus kostenpolitischer Sicht wäre es sinnvoll, die Kompetenzen der regionalen EVU dahingehend zu erweitern, dass ein Großteil der Güterverkehre von der Straße auf die Bahn verlagert wird.

Aus einer Statistik für das Güterverkehrsaufkommen aus den Jahren 1952-2008 (Abbildung 1) zeigt sich deutlich, dass seit dem Jahr 2000 die Inanspruchnahme des Verkehrsträgers Straße („Lkw“) nicht mehr steigt, sondern zum Teil bereits zurückgegangen ist. Genau diesen Trend gilt es u.a. mit Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen weiter auszubauen.

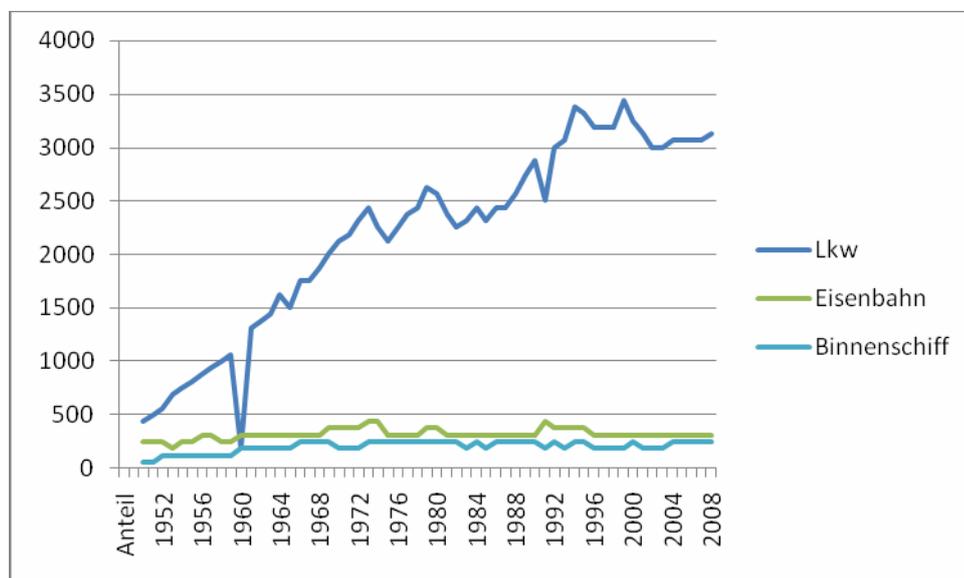


Abbildung 1: Güteraufkommen ausgewählter Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950-2008²⁾

1) Vgl. Anhang A.

2) Quelle: DIW, Berlin; ifo, München; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; Prognose/ProgTrans, Basel und Berechnungen des BGL.

1.2 Hemmnisse für den Gütertransport mit der Bahn

1.2.1 Überblick

Wie sich aus der nachstehenden Abbildung 2 erkennen lässt, findet ein Großteil der Gütertransporte in Deutschland derzeit immer noch auf der Straße statt.

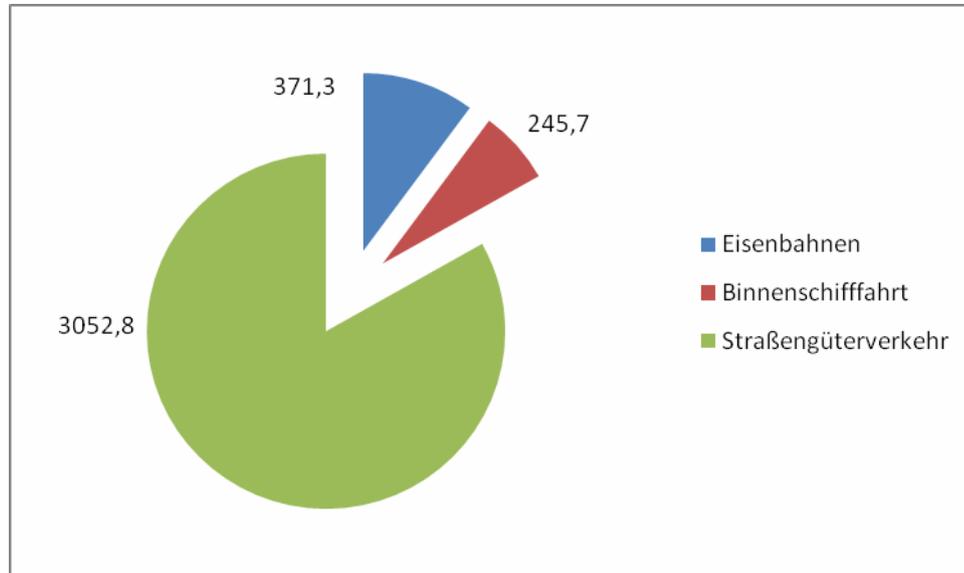


Abbildung 2: Güterverkehrsaufkommen in Mio. Tonnen für das Jahr 2008 in Deutschland¹⁾

Obwohl die Eisenbahn im Güterverkehr mit 371,3 Mio. transportierten Tonnen (ca. 10 % des gesamten Güterverkehrsaufkommens) immer noch den zweiten Platz im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern erreicht, lässt sich der schienengebundene Güterverkehr mit Gütertransporten über die Straße, die ein Volumen von 3.052,8 Mio. Tonnen (ca. 83 % des Güterverkehrsaufkommens) erreichen, nicht ansatzweise vergleichen. Der Anteil am gesamten Güterverkehrsaufkommen derjenigen Güter, die über die Schiene abgewickelt werden, erweist sich – je nach Bezugszeitraum – als stagnierend oder sogar als leicht rückläufig.²⁾

Ein rückläufiger Anteil des Verkehrsträgers Bahn am gesamten Güterverkehrsaufkommen kann zum einen daran liegen, dass Unternehmen, die vor einigen Jahren noch ihre Güter mit der Bahn transportierten, mittlerweile ihren Gütertransport auf die Straße verlagert haben, weil sie ihre Lagerhaltung nach Gestaltungsprinzipien des „Just-in-time“ (JIT)³⁾ ausgerichtet haben. Die Bahn ist aus Sicht der KMU für diese Art der Lagerhaltung zu unsicher und zu unpünktlich.

Zum anderen kommen aber auch weitere Effekte in Betracht. So sieht PFOHL einen weiteren Grund im Güterstruktureffekt. Der Güterstruktureffekt resultiert aus der Veränderung der Kundenansprüche in den letzten Jahren und begünstigt mit seinen Auswirkungen auf den Verkehr vorrangig den

1) Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an das BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR (2009), S. 7.

2) Vgl. EWERS/ILGMANN (2001), S. 14 f.

3) JIT ist eine Bereitstellungsstrategie, bei der das Material oder die Ware bedarfssynchron angeliefert und ohne Zwischenlagerung vor der Weiterverarbeitung bereitgestellt wird. Vgl. MARTIN (2006), S. 6.

Straßengüterverkehr.¹⁾ Die Kundenwünsche und -ansprüche haben sich auf der einen Seite aufgrund der stärkeren wirtschaftlichen Integration Europas und aufgrund von Folgen der Globalisierung gewandelt.²⁾

Kunden wünschen sich für ihre Gütertransporte immer öfter ganzheitliche Lösungen, die nicht nur den reinen Gütertransport umfassen, sondern auch Dienstleistungen und Gütertransporte über die gesamte Supply Chain garantieren. Zugewiesene Ansprechpartner sollen nicht ständig wechseln, wie es vermehrt aus der Vergangenheit in der Eisenbahnbranche bekannt ist. Kunden wünschen sich einen festen Ansprechpartner über die gesamte Supply Chain, der ihnen zu jeder Zeit Auskunft über den Status der zu transportierenden Güter erteilen kann. Auch wenn bei vielen Eisenbahnverkehrsunternehmen ein solcher Statusbericht noch nicht die Regel ist, so ist es doch nicht unmöglich, und er wird bereits von einigen kleineren Eisenbahnverkehrsunternehmen erfolgreich praktiziert.

Weiterhin hat sich das Anforderungsprofil an Transportmittel hinsichtlich der Beschaffenheit der zu transportierenden Güter in den letzten Jahren stark verändert. Kunden von Transportdienstleistungen fragen nicht mehr vorrangig Transporte von geringwertigen, transportkostenintensiven Massengütern nach, wie es in der Vergangenheit üblich war. Stattdessen hat sich die Nachfrage immer weiter in Richtung individueller, hochwertiger Transportgüter verschoben.³⁾ In diesem Rahmen ist es für Unternehmen oftmals unwirtschaftlich, Güter von der Bahn transportieren zu lassen, die lediglich ein kleines Volumen aufweisen und zudem teuer sowie zeitsensibel sind. Schließlich bestehen bei Einzelwagenverkehren besondere Schwierigkeiten darin, Transportnachfragen derart „intelligent“ zu bündeln, dass die resultierenden Züge möglichst vollständig ausgelastet werden.⁴⁾

Empirische Untersuchungen zu den Hemmnissen, die einem Gütertransport mit der Bahn entgegenstehen, geben Aufschluss über eine Vielfalt von retardierenden Momenten. Zum Teil überraschen sie aber auch, weil einige mutmaßliche Hemmnisse aus der Perspektive potenzieller Verlader nicht das Gewicht zu besitzen scheinen, das ihnen oftmals prima facie zugeschrieben wird.

Beispielsweise wurde vom Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik (BME) eine Studie „CO₂ und Modal Split“ durchgeführt.⁵⁾ Ihre Ergebnisse werden in der Abbildung 3 auf der nächsten Seite zusammenfassend dargestellt.

Aus der BME-Studie geht u.a. hervor, dass nicht – wie vielfach gedacht – die hohen oder intransparenten Kosten beim Gütertransport mit der Bahn eine große retardierende Rolle spielen. Vielmehr besitzen der teilweise nicht vorhandene oder als schlecht empfundene Kundenservice und die zu geringe Flexibilität der Bahn eine ausschlaggebende Bedeutung. Die Verlader erwarten schnelle Reaktionen auf ihre Transportanfragen. Stattdessen haben sie im Umgang mit der Bahn schon oft die Erfahrung gesammelt, ihren Transportbedarf schon Wochen vorher bei einem Eisenbahnverkehrsunternehmen ankündigen zu müssen. Der Lkw scheint in den bemängelten Bereichen die besseren Chancen zu bieten, auf spontane Kundenanfragen für Gütertransporte positiv reagieren zu können.

1) Vgl. ABERLE (1994), S. 6 f.

2) Vgl. PFOHL (2004). S. 144.

3) Vgl. RICHTER (2005), S. 11.

4) Vgl. SIEGMANN/HEIDMEIER (2006), S. 8 f.

5) Vgl. WITTENBRINK (2008), S. 6.

Der zweithäufigste Aspekt „kein Gleisanschluss vorhanden“, der von 53 % der Befragten als Hinderungsgrund für Gütertransporte mit der Bahn angegeben wurde, stellt jedoch keinen wirklichen Hinderungsgrund dar. Grundsätzlich steht einem Gütertransport mit der Bahn auch ohne vorhandenen eigenen Gleisanschluss meistens nichts im Wege. Im besten Fall besteht die Möglichkeit, den in der Nähe liegenden Gleisanschluss eines Nachbarunternehmens zu benutzen. Des Weiteren kann mithilfe des kombinierten Verkehrs für den Vor- oder Nachlauf eine Verlagerung auf den Verkehrsträger Schiene erfolgen, wenn die betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen entsprechende Unterstützung bei der reibungsfreien Verkehrsträgerkombination leisten.

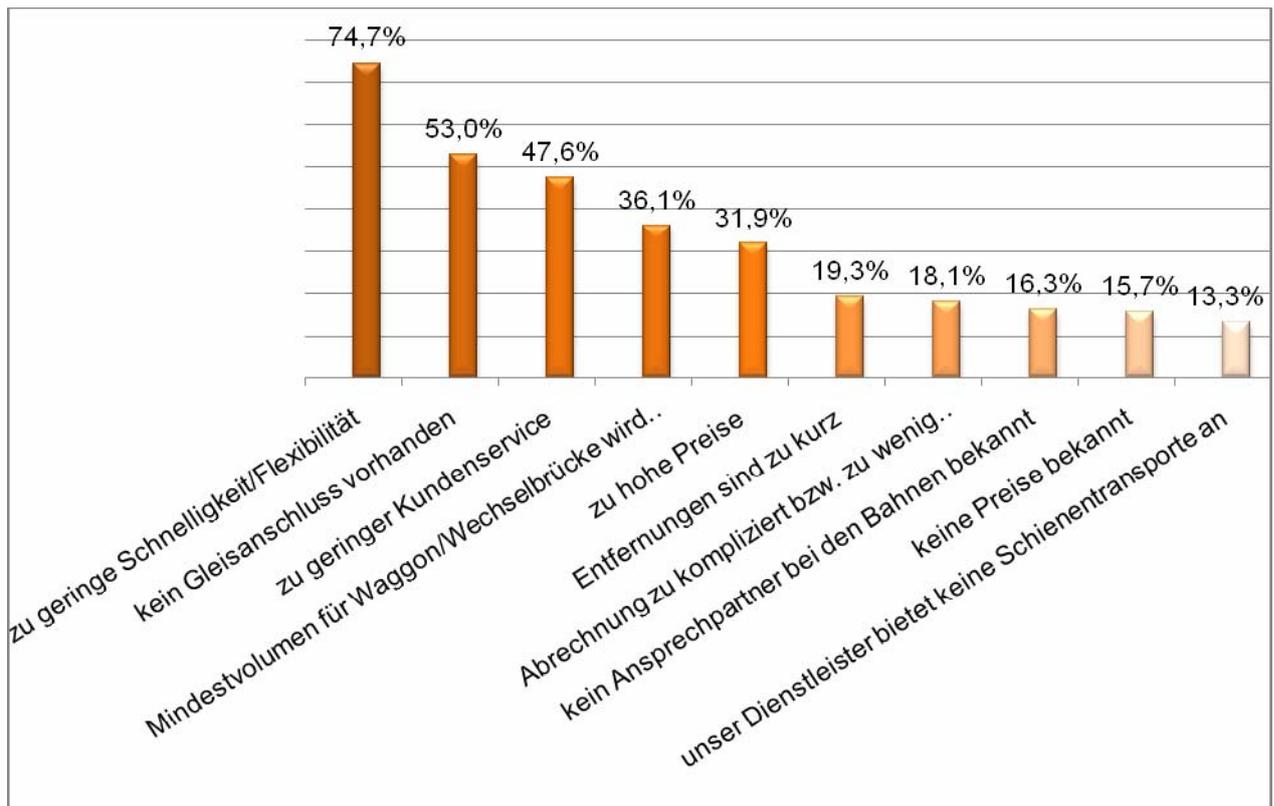


Abbildung 3: Hindernisse für einen Transport mit der Bahn¹⁾

In einem aktuell ausgewerteten Fragebogen zum Thema „Probleme des Gütertransports mit der Bahn“, der im Rahmen eines Arbeitstreffens des Verbundprojekts MAEKAS an der Universität Duisburg-Essen²⁾ durch potenzielle Verloader ausgefüllt wurde, hat sich darüber hinaus herausgestellt, dass sich Verloader vor allem eine individuellere Beratung und Zusatzleistungen wünschen. Weiterhin fehlt ihrer Ansicht nach ein Produktmanagement, das auf die speziellen Bedürfnisse der Kunden ausgelegt ist. Der nicht unwesentliche zeitliche Aspekt, wie z.B. die Garantie für einen schnellen Gütertransport, kann zurzeit bei Nicht-Massengütern nur vom Verkehrsträger Straße zu akzeptablen Preisen garantiert werden.

In diesem ersten Arbeitstreffen des Verbundprojekts MAEKAS am 24.06.2008 wurden die teilnehmenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus Eisenbahnverkehrsunternehmen und Verloader gebe-

1) Quelle: WITTENBRINK (2008), S. 6.

2) Vgl. Anhang A.

ten, Gütertransportprobleme zu identifizieren, die Verlader davon abhalten, Gütertransporte mit der Bahn durchzuführen.¹⁾ Um die Probleme, die in den nächsten Kapiteln ausführlicher vorgestellt werden, innerhalb einer späteren Auswertung besser voneinander trennen zu können, wurden sie in die vier Bereiche Qualität, Service, Flexibilität und Preis eingeteilt.

1.2.2 Gütertransportprobleme für den Bereich Qualität

Im Bereich Qualität kommt es den Verladern in erster Linie darauf an, dass sie sich bezüglich eines fest vorgegebenen Termins für die Anlieferung auf die Pünktlichkeit eines Eisenbahnverkehrsunternehmens verlassen können. Weiterhin sollten die zugestellten Güterwagen keine Defekte aufweisen. Wenn es dennoch – was in der Praxis häufig der Fall sein soll – zu der Zustellung eines beschädigten Güterwagens kommt, sollte dieser so schnell wie möglich wieder abgeholt werden. In dieser Angelegenheit haben einige der Anwesenden bereits schlechte Erfahrungen mit der Bahn hinter sich. Weiterhin wick die gelieferte Anzahl der bestellten Güterwagen in der Vergangenheit vielfach von der gewünschten Anzahl ab.

Zudem wird erwartet, dass im Falle eines Einlassens auf die Bahn die Informationsqualität gesteigert wird. Zur Steigerung der Informationsqualität wird vielfach eine bisher fehlende Informationskette genannt. Mit Hilfe einer Informationskette könnte bspw. zu jeder Zeit vom Kunden ein Statusbericht der Dienstleistung abgefragt werden und somit auf eventuelle Verspätungen direkt reagiert werden. Auch sollte der Informationsfluss zwischen einem Eisenbahnverkehrsunternehmen und seinen Kunden leicht möglich sein, sodass auch auf kurzfristige Änderungen im Transportauftrag in Zukunft schneller reagiert werden kann.

Als letzter Punkt wurde die fehlende Transportsicherheit kritisiert. In dieser Hinsicht wurde von Verladern der Vorschlag geäußert, Eisenbahnverkehrsunternehmen sollten Instrumente des Risikomanagements einführen.

1.2.3 Gütertransportprobleme für den Bereich Service

Im Bereich Service, bei dem es zu Überschneidungen mit dem zuvor erläuterten Bereich Qualität kommt, wurde von den Verladern sehr viel bemängelt und vermisst. Ähnlich zum Bereich Qualität wurden auch beim Service die schlechten Kommunikationswege von Lieferanten über Eisenbahnverkehrsunternehmen bis hin zu Kunden vielfach genannt. Im Regelfall erfolgt bisher noch keine ganzheitliche Betrachtung der Prozessketten.

Zudem werden eine angemessene Kundenbetreuung und für jeden Kunden ein fester Ansprechpartner vermisst. Ein fester Ansprechpartner gibt den Verladern Sicherheit, dass sich im Falle der Änderung eines Transportauftrags oder des Mangels einer Transportdienstleistung eine Mitarbeiterin oder ein Mitarbeiter in einem Eisenbahnverkehrsunternehmen direkt angesprochen fühlt.

Außerdem wird kritisiert, dass es im Gegensatz zu anderen Verkehrsträgern noch kaum möglich sei, den aktuellen Standort und den zurückgelegten Transportweg einer Sendung zu verfolgen. Durch

1) Vgl. Anhang A.

das Einführen einer solchen Zugverfolgung kann es auch nicht mehr zu den oftmals veralteten Informationen über den Transportverlauf eines Zugs („Geisterzüge“) kommen.

Die Anzahl und der Umfang der offerierten Nebenleistungen werden als zu gering empfunden. Hinzu kommt, dass die von den Verladern bestellte Güterwagenanzahl selten korrekt gestellt wird. Auch das immer noch wesentlich höhere Ausmaß an Bürokratie (zu viele Formalitäten) im Vergleich zum Lkw steht im Fokus der Kritik.

Für die Zukunft wird insgesamt erwartet, dass Informationen über Abweichungen im Transportplan so schnell wie möglich an die Kunden weitergegeben werden. Dazu ist es notwendig, eine *aktive Informationspolitik* einzuführen, die es ermöglicht, zeitnahe Informationen in der gesamten Transportkette zur Verfügung zu stellen.

1.2.4 Gütertransportprobleme für den Bereich Flexibilität

Im Bereich Flexibilität wird die Vorlaufzeit kritisiert, die zum Ankündigen eines Gütertransports im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern als viel zu lange (z.B. eine Woche) empfunden wird. Mengenschwankungen könnten vielfach nicht berücksichtigt werden. Es gibt keine Vorabinformationen durch die Eisenbahnverkehrsunternehmen über die Destinationen. Auf Engpässe oder Transportänderungen kann demnach nur schlecht reagiert werden. Gewünscht wäre eine Reaktionszeit der Eisenbahnverkehrsunternehmen von nur ca. 12 Stunden.

Weiterhin werden kleine Transportaufträge aufgrund „fehlender Kapazitäten“ vielfach abgelehnt. Mit fehlenden Kapazitäten ist nicht gemeint, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen keine Transporte mehr annehmen können, weil der Raum fehlt, vielmehr sind mit fehlenden Kapazitäten wirtschaftliche Gründe gemeint. Meist lohnt es sich nicht, einzelne Kleintransporte anzunehmen, die nicht mehrere Güterwagen füllen können, da der Aufwand für einen solchen Transport mit der Bahn viel zu groß wäre und sich deshalb in einem wesentlich höheren Preis als bei einem Transport mit dem Lkw niederschlagen würde. Daher vertreten Eisenbahnverkehrsunternehmen größtenteils noch die Meinung, dass nur durch Ganzzüge ein wirtschaftlicher Gütertransport ermöglicht werden kann. Dies führt zur Forderung nach Mindesttransportmengen, wie z.B. eine Mindesttransportmenge von 300 Tonnen pro Tour. Wenn eine solche Mindesttransportmenge von Verladern nicht garantiert werden kann, müssen sie auf andere Verkehrsträger, wie etwa auf den Verkehrsträger Straße, ausweichen.

Auch im Bereich der Flexibilität ist eine deutliche Steigerung der Zuverlässigkeit seitens der Eisenbahnverkehrsunternehmen zukünftig erwünscht.

1.2.5 Gütertransportprobleme für den Bereich Preis

Auch wenn der Preis im Vergleich zu den Bereichen Qualität, Service und Flexibilität für Verladern eine eher untergeordnete Rolle spielt, gab es auch hier einige Kritikpunkte. Es wurde vielfach bemängelt, dass die Abrechnung der Frachten meist viel zu kompliziert und in einigen Fällen zudem auch noch fehlerhaft sei. Das Preis-/Leistungsverhältnis wird im Vergleich mit anderen Verkehrsträgern als schlecht empfunden. Obendrein erschwert die geringe Preistransparenz einen Preisvergleich mit dem Lkw. Die Verteuerung im Nahverkehr kommt erschwerend hinzu. Auch die Nebengebühren und Standgelder, die bei einem Gütertransport mit der Bahn zusätzlich anfallen, wurden

bemängelt. Ein Gutschriftenverfahren wie bei vielen anderen Verkehrsträgern ist bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen bisher noch nicht möglich. Die im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern als höher empfundene Bürokratie (zu viele Formalitäten) steht ebenfalls im Fokus der Kritik. Ein angeführtes Beispiel ist die Einteilung als A-, B- oder C-Kunde, die aufgrund der Höhe der Frachtzahlung getroffen wird und bis heute noch von einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen praktiziert wird. Diese Einteilung in Kundenklassen ist fließend. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass der „Wert“ eines Kunden mit der Höhe seiner Frachtzahlungen streng korreliert. Eine solche Einteilung kann für Kunden mit Kleintransporten und im Einzelwagenverkehr jedoch zu einer „gefühlten“ Benachteiligung und deshalb zu einem Verbleib bei oder einem Wechsel zu einem anderen Verkehrsmittel, wie bspw. dem Lkw, führen.¹⁾

Für die Zukunft wird von Verladern gewünscht und erwartet, dass vor allem die Preise der Eisenbahnverkehrsunternehmen deutlich transparenter sein müssen, damit neues Vertrauen in den Verkehrsträger Schiene gesetzt werden kann.

1) Interviewpartner: Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb), vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

2 Abgrenzungsmöglichkeiten des Begriffs Leerfahrten

2.1 Definition von Leerfahrten

Für den Begriff Leerfahrt innerhalb des Schienengüterverkehrs gibt es in der einschlägigen Fachliteratur keine gängige Begriffsdefinition. Deshalb ist es vor Feststellung der aktuellen Leerfahrten bei den teilnehmenden Eisenbahnverkehrsunternehmen im Verbundprojekt MAEKAS wichtig, eine zustimmungsfähige, von den Projektpartnern akzeptierte Definition für eine Leerfahrt zu finden. Gleiches gilt für das Konstrukt der „Leertonnenkilometer“, das zur Operationalisierung und damit konkreten Messung des Begriffs „Leerfahrten“ herangezogen wird.

Generell lässt sich sagen, dass eine Fahrt zu einem Kunden hin oder von einem Kunden zurück zum Depot ohne Schwierigkeiten als *physikalische Leerfahrt* identifiziert werden kann, wenn diese Fahrt entweder ohne angekoppelte Güterwagen oder mit zwar angekoppelten, aber leeren Güterwagen erfolgt. Im letztgenannten Fall verkehrt die Lokomotive auf höchstens einer von zwei Fahrten mit (zumindest teilweise) beladenen Güterwagen. Während der jeweils anderen Fahrt werden von der Lokomotive dagegen leere Güterwagen gezogen.

Hinzu kommt – zwar intuitiv nicht unmittelbar naheliegend, aber aus betriebswirtschaftlicher Perspektive mindestens ebenso bedeutsam – das Phänomen kapazitiver Leerfahrten. Eine solche *kapazitative Leerfahrt* kann aus zwei unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Aus der Güterzugperspektive kommt eine kapazitative Leerfahrt zustande, wenn die angekoppelten Güterwagen die maximal verfügbare Traktionskraft (Traktionskapazität) der Lokomotive¹⁾ oder die höchstzulässige Zuglänge (Abmessungskapazität) nicht vollständig ausschöpfen. Aus der Güterwagenperspektive liegt dagegen eine kapazitative Leerfahrt vor, wenn die Ladungskapazität von mindestens einem der angekoppelten Güterwagen nicht vollständig in Anspruch genommen wird. In den beiden vorgenannten Fällen erfolgt zwar keine Leerfahrt im rein physikalischen Sinne, die sich in der Gestalt von „leeren“ Lokomotiven ohne angekoppelte Güterwagen oder in der Gestalt von leeren Güterwagen manifestiert. Aber aus betriebswirtschaftlicher Sicht werden die verfügbaren Kapazitäten an Traktionskraft, Zuglängen und Güterladungen nicht vollständig ausgeschöpft, sodass freie Kapazitäten entstehen. Diese freien Kapazitäten lassen sich in unkonventioneller, aber plastischer Diktion als *Leerkapazitäten* bezeichnen. Sie entsprechen den Leerkosten für nicht ausgelastete Kapazitätsanteile, die in der betriebswirtschaftlichen Fachliteratur seit langem etabliert sind.

1) Die maximal verfügbare Traktionskraft einer Lokomotive erstreckt sich auf das höchstzulässige Gesamtgewicht der ankoppelbaren Güterwagen. Das Eigengewicht der Lokomotive wird daher bei der maximal verfügbaren Traktionskraft nicht berücksichtigt. Das *tatsächliche (geplante)* Gesamtgewicht eines Güterwagens ist die Summe aus seinem Eigengewicht und dem Gewicht der mit diesem Güterwagen transportierten (zu transportierenden) Gütermenge. Diese Gütermenge wird auch als das *Frachtgewicht* eines Güterwagens bezeichnet. Das *höchstzulässige* Gesamtgewicht eines Güterwagens ist die Summe aus seinem Eigengewicht und dem Gewicht der maximal mit dem Güterwagen transportierbaren Gütermenge. Die Gütermenge, die mit einem Güterwagen maximal transportiert werden kann, wird als dessen *Ladungskapazität* bezeichnet.

Zwecks begrifflicher Präzisierung werden im Verbundprojekt MAEKAS vier unterschiedliche Arten von Leerfahrten unterschieden, die auf den vorgenannten Differenzierungen unmittelbar aufbauen.¹⁾

1. Leerfahrt *im engsten Sinne*: eine Lokomotive, die *ohne Güterwagen* verkehrt.²⁾
Diese Definition trifft auch auf den Begriff „Lokzug-Fahrt“ zu, der oftmals auch als „LZ-Fahrt“ angesprochen wird. Seitens der Praxispartner wird die letztgenannte Redeweise bevorzugt. Sie wird daher im Verbundprojekt MAEKAS als Synonym zur Leerfahrt im engsten Sinne verwendet.
2. Leerfahrt *im engeren Sinne*: ein Güterzug aus einer Lokomotive mit angekoppelten, aber in ihrer Gesamtheit *leeren Güterwagen*. Es handelt sich also um einen Güterzug, der ohne Ladung verkehrt.
3. Leerfahrt *im weiteren Sinne*: ein Güterzug aus einer Lokomotive mit angekoppelten Güterwagen, deren *Ladungskapazitäten nicht vollständig ausgeschöpft* sind. Es spielt dabei keine Rolle, ob einzelne (aber nicht alle) der angekoppelten Güterwagen leer verkehren oder ob zwar alle angekoppelten Güterwagen beladen sind, aber die Ladungskapazität von mindestens einem der angekoppelten Güterwagen nicht vollständig ausgeschöpft wird.
4. Leerfahrt *im weitesten Sinne*: ein Güterzug aus einer Lokomotive mit angekoppelten Güterwagen, wenn der Güterzug durch Ankoppeln *zusätzlicher Güterwagen erweitert* werden könnte, ohne hierdurch technische oder administrative Höchstgrenzen zu überschreiten. Dies ist der Fall, wenn durch die angekoppelten Güterwagen die maximal verfügbare Traktionskraft der Lokomotive oder die höchstzulässige Zuglänge nicht vollständig ausgeschöpft werden. Dabei ist es unbeachtlich, ob die Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen vollständig ausgeschöpft werden oder nicht.

In der nachstehenden Abbildung 4 werden die voranstehend eingeführten und definierten Varianten des Begriffs „Leerfahrt“ in ihren wechselseitigen Über- und Unterordnungsbeziehungen dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber werden die inhaltlichen Begriffsdefinitionen auf das Wesentliche verkürzt wiedergegeben. Die ausführlichen Begriffsdefinitionen sind den oben erfolgten Ausführungen zu entnehmen.

-
- 1) Die Eisenbahnverkehrsunternehmen, die am Verbundprojekt MAEKAS als Projektpartner teilnehmen, haben sich nur auf die beiden erstgenannten Arten einer Leerfahrt geeinigt. Die beiden letztgenannten, primär betriebswirtschaftlich motivierten Arten einer Leerfahrt werden vom Universitätspartner aus Gründen der systematischen Vollständigkeit ergänzt. Darüber hinaus bestehen Überlegungen, physikalische oder kapazitative Leerfahrten in verschiedene denkbare Leerfahrtenprobleme auszudifferenzieren. Dies bleibt späteren Arbeiten im Verbundprojekt vorbehalten.
 - 2) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (SBB Cargo GmbH, Key Account Manager), Herr Dieter Schulten (Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Eisenbahnbetriebsleiter), Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb) sowie Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

Leerfahrt	physikalische Leerfahrt	Leerfahrt im engsten Sinne	eine Lokomotive, die ohne Güterwagen verkehrt Synonyme: Lokzug-Fahrt und LZ-Fahrt
		Leerfahrt im engeren Sinne:	ein Güterzug mit leeren Güterwagen
	kapazitative Leerfahrt	Leerfahrt im weiteren Sinne	ein Güterzug mit Güterwagen, deren Ladungskapazitäten nicht vollständig ausgeschöpft sind
		Leerfahrt im weitesten Sinne	ein Güterzug, der durch Ankoppeln zusätzlicher Güterwagen erweitert werden könnte

Abbildung 4: Begriffsabgrenzung zum Terminus technicus „Leerfahrt“

In der nachfolgenden Abbildung 5 werden in schematischer Weise einige¹⁾ Varianten des Begriffs „Leerfahrt“ exemplarisch verdeutlicht.

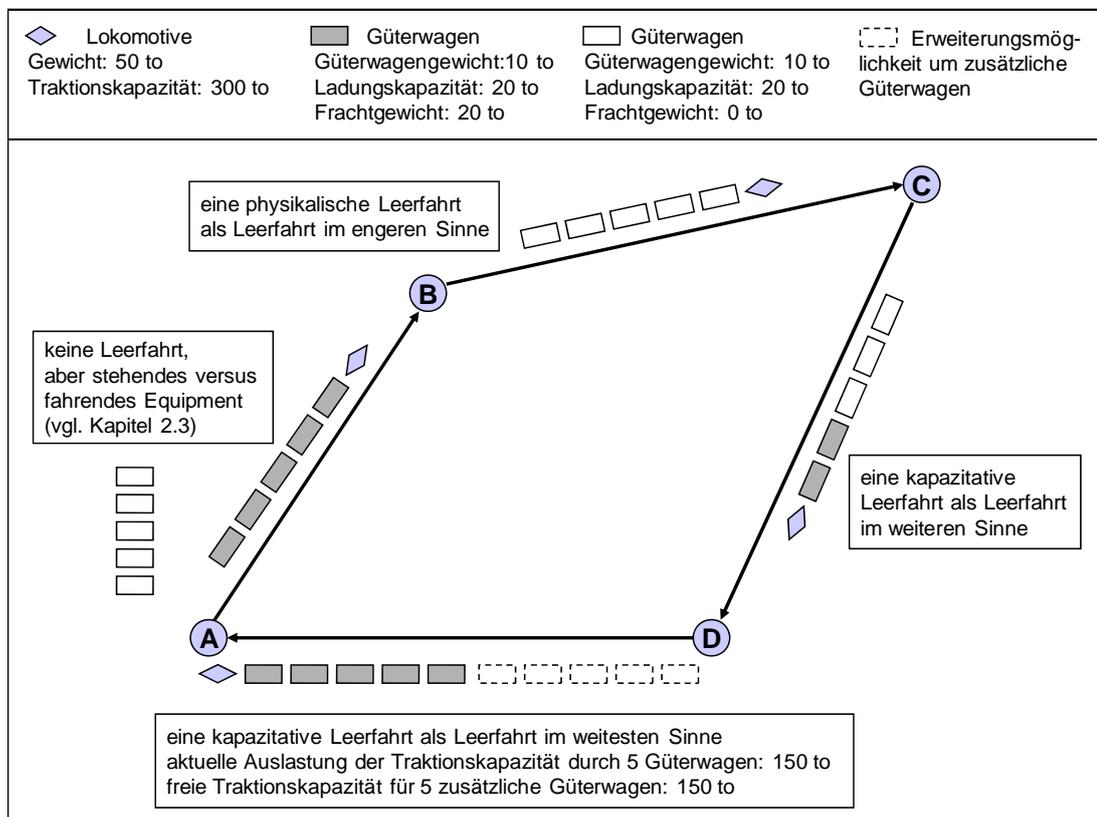


Abbildung 5: Beispiele für Varianten des Begriffs „Leerfahrt“

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS arrangieren sich laut Selbstauskunft in der Praxis derart, dass sie die Kosten, die durch Leerfahrten entstehen, bereits in ihren Preisforderungen an ihre Kunden weitergeben.²⁾ Auf diese Weise müssen die Eisenbahnverkehrs-

1) Lokzug-Fahrten als Leerfahrten im engsten Sinne werden in der Abbildung 5 nicht dargestellt.
2) Darauf wird später im Kapitel 2.4 aus der Perspektive der Kapazitätsauslastung des Equipments von Eisenbahnverkehrsunternehmen ausführlicher zurückgekommen.

ternehmen die Kosten von Leerfahrten nicht tragen, weil ihre Kunden die anfallenden Leerfahrten finanzieren. Daher werden die tatsächlich anfallenden Leerfahrten seitens der Praxispartner nicht oder nur rudimentär erfasst. Außerdem werden die oben vorgestellten begrifflichen Differenzierungen von den Praxispartnern nicht angewendet, weil sie diese Nuancierungen wegen der Überwälzung der Kosten von Leerfahrten auf ihre Kunden für unerheblich erachten.

Dennoch erscheint es aus betriebswirtschaftlicher Perspektive als vorteilhaft, sowohl Leerfahrten „an sich“ als auch in differenzierter Weise zu erfassen. Dafür spricht vor allem, dass Eisenbahnverkehrsunternehmen ihre wettbewerbsstrategische Positionierung im Güterverkehrsmarkt verbessern können, wenn es ihnen gelingt, bislang anfallende Leerfahrten zu reduzieren oder ganz zu vermeiden. Auf diese Weise ließen sich *einerseits* die *Produktionskosten* auf Seiten der Eisenbahnverkehrsunternehmen verringern, und zwar aufgrund der Einsparung von Kosten für unproduktive Lokzug-Fahrten oder aufgrund der Einsparung von Energiekosten sowie von nutzungsbedingten Abschreibungen und Instandhaltungskosten für Fahrten mit leeren oder unvollständig beladenen Güterwagen. Diese Kosteneinsparungen könnten an die Kunden in der Form von niedrigeren Transportpreisen weitergegeben werden und damit die relative Wettbewerbsposition der Eisenbahnverkehrsunternehmen gegenüber anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen (brancheninterner Wettbewerbsvorteil) und gegenüber anderen Verkehrsträgern (branchenübergreifender Wettbewerbsvorteil gegenüber Substitutionskonkurrenz) verbessern. *Andererseits* wäre es möglich, die *Deckungsbeiträge* der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu erhöhen, indem vorhandene Transportkapazitäten höher ausgelastet werden (unter der Voraussetzung, dass zusätzliche Transportnachfragen mit positiven Deckungsbeiträgen existieren und nur zusätzliche Transportaufträge mit solchen positiven Deckungsbeiträgen akquiriert werden). Solche zusätzlichen Deckungsbeiträge erhöhen aus wettbewerbsstrategischer Perspektive das Drohpotenzial der Eisenbahnverkehrsunternehmen gegenüber ihren branchenin- und -externen Konkurrenten, ihre Preisforderungen gegenüber potenziellen Kunden zu reduzieren, ohne selbst in die Verlustzone zu geraten. Auch hierdurch wird die wettbewerbsstrategische Positionierung der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Güterverkehrsmarkt gestärkt.

2.2 Operationalisierung durch Leertonnenkilometer

Der Begriff „Leertonnenkilometer“ wird sowohl von Unternehmen in der betrieblichen Praxis untereinander als auch seitens der betriebswirtschaftlichen Theorie unterschiedlich verwendet. Beispielsweise verstehen die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS unter Leertonnenkilometern vornehmlich die Strecken und Ladungskapazitäten von Güterwagen, die an eine Lokomotive angehängt, aber leer verkehren.¹⁾ Reine Lokzug-Fahrten, bei denen überhaupt keine Güterwagen angehängt sind, werden dagegen von den Praxispartnern mehrheitlich nicht als Ursache von Leertonnenkilometern wahrgenommen. Kapazitative Leerfahrten sind als betriebswirtschaftliches Konzept in der Unternehmenspraxis weitgehend unbekannt, sodass sie von den Praxispartnern a fortiori auch nicht als Ursachen von Leertonnenkilometern in Betracht gezogen werden.

1) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (SBB Cargo GmbH, Key Account Manager), Herr Dieter Schulten (Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Eisenbahnbetriebsleiter), Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb) sowie Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

Für das Verbundprojekt MAEKAS wird jedoch aus betriebswirtschaftlicher Perspektive empfohlen, für alle Analysen und Handlungsempfehlungen grundsätzlich von einem weit gefassten Leertonnenkilometer-Begriff auszugehen. Für diese Empfehlung sprechen im Wesentlichen zwei Gründe. Erstens sollten Erkenntnispotenziale nicht dadurch frühzeitig aufgegeben werden, dass zwar „etablierte“, aber unnötig eng gefasste Begriffsverständnisse vorausgesetzt werden. Zweitens bietet sich der Begriff „Leertonnenkilometer“ in vorzüglicher Weise an, um den zuvor diskutierten Begriff der Leerfahrten zu operationalisieren, d.h. mit einer konkreten Messvorschrift zu assoziieren. Da der Begriff der Leerfahrten in seiner vierfachen Ausdifferenzierung inhaltlich sehr weit aufgespannt wurde, erscheint es angemessen, auch den korrespondierenden, zur Operationalisierung dienenden Begriff der Leertonnenkilometer entsprechend offen für unterschiedliche Interpretationen zu halten.

Leertonnenkilometer stellen im weitesten, d.h. für alle „sinnvoll“ erscheinenden Interpretationen offenen Sinn dasjenige potenzielle Ladungsgewicht in Tonnen dar, das von einer Lokomotive auf einer vorgegebenen, entweder geplanten oder aber realisierten Tour mit einer tourspezifischen Weglänge transportiert werden könnte, aber auf dieser Tour nicht transportiert wird. Auf dieser Grundlage ist der Begriff „Tonnenkilometer“ definiert als das Produkt aus einer Menge, dem potenziellen, aber nicht genutzten Ladungsgewicht [to], und einer Distanz, der tourspezifischen Weglänge [km]. Dieses Produkt ist in der Dimension [to-km] zu messen.¹⁾

Aufgrund dieser Festlegung lässt sich das Ausmaß der o.a. vier Arten von Leerfahrten in einheitlicher Weise auf einer quantitativen – „metrischen“ – Skala durch diejenigen Leertonnenkilometer messen, die durch eine Leerfahrt verursacht werden. Dies bedeutet konkret für die vier Leerfahrarten:

1. Die Leertonnenkilometer einer Leerfahrt im engsten Sinne sind das Produkt aus dem Ladungsgewicht [to], das eine Lokomotive aufgrund ihrer Traktionskraft und der höchstzulässigen Güterzuglänge transportieren könnte, aber wegen ihrer Fahrt ohne Güterwagen (Lokzug-Fahrt) tatsächlich nicht transportiert, und aus der Weglänge der betroffenen Leerfahrt [km].²⁾
2. Die Leertonnenkilometer einer Leerfahrt im engeren Sinne sind das Produkt aus dem Ladungsgewicht [to], das ein Güterzug mit angekoppelten, aber in ihrer Gesamtheit leeren Güterwagen transportieren könnte, und aus der Weglänge der betroffenen Leerfahrt [km].
3. Die Leertonnenkilometer einer Leerfahrt im weiteren Sinne sind das Produkt aus dem nicht ausgeschöpften Ladungsgewicht [to] derjenigen Güterwagen, die an eine Lokomotive angekoppelt sind, und aus der Weglänge der betroffenen Leerfahrt [km].

1) Vgl. <http://www.transportberater.portal-c.info/glossar.html>.

2) Eine weitergehende Präzisierung ist einzelfallspezifisch erforderlich. Sie erstreckt sich auf die Spezifizierung der Ladungskapazitäten derjenigen Güterwagen, die von einer Lokomotive auf der jeweils betrachteten Leerfahrt unter Einhaltung der höchstzulässigen Güterzuglänge grundsätzlich bewegt werden könnten. Seitens der Praxispartner wurde angeregt, Lokzug-Fahrten bei der Ermittlung von Leertonnenkilometern grundsätzlich nicht zu berücksichtigen. Als wesentliche Argumente wurden angeführt, dass das Ladungsgewicht [to], das eine Lokomotive zu ziehen vermag, im Einzelfall sehr stark variieren kann und dass das maximale Ladungsgewicht beim Ankoppeln von Güterwagen nur selten erreicht wird. Das erstgenannte Argument spricht jedoch nicht dagegen, dass in detaillierten Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Modellierungen die stark variierenden Traktionsfähigkeiten der einzelnen Lokomotiven realitätsnah erfasst werden. Das zweitgenannte Argument erscheint wenig überzeugend, weil das faktisch häufige Nichterreichen von maximalen Ladungsgewichten keinen zureichenden Grund darstellt, das Ausmaß dieser Nichterreichung in Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Modellierungen zu ignorieren.

4. Die Leertonnenkilometer einer Leerfahrt im weitesten Sinne sind das Produkt aus dem nicht ausgeschöpften Ladungsgewicht [to] derjenigen Güterwagen, um die ein Güterzug durch Ankoppeln zusätzlicher Güterwagen erweitert werden könnte, ohne hierdurch technische oder administrative Höchstgrenzen zu überschreiten, und aus der Weglänge der betroffenen Leerfahrt [km].

Zu beachten ist, dass sich die voranstehenden Definitionen von Leertonnenkilometern in Abhängigkeit von der jeweils zugrunde gelegten Leerfahrtenart zum Teil gegenseitig ausschließen, zum Teil aber auch gegenseitig ergänzen können. Beispielsweise können im Hinblick auf physikalische Leerfahrten Leertonnenkilometer per definitionem *nicht* zugleich für eine Leerfahrt sowohl im engsten Sinne als auch im engeren Sinne anfallen, weil in den beiden vorgenannten Fällen eine Leerfahrt nur *entweder* ohne *oder* aber mit angekoppelten Güterwagen erfolgen kann. Dagegen ist es im Hinblick auf kapazitative Leerfahrten z.B. möglich, dass Leertonnenkilometer für eine Leerfahrt im weiteren *und* im weitesten Sinne simultan anfallen, weil *derselbe* Güterzug *sowohl* mindestens einen Güterwagen umfasst, dessen Ladungskapazität auf einer Tour nicht vollständig ausgeschöpft wird, *als auch* durch zusätzliche Güterwagen erweitert werden könnte, ohne die Traktionskraft der involvierten Lokomotive oder die höchstzulässige Güterzuglänge zu überschreiten.

Aus den vorgenannten Gründen ist bei jeder Analyse von Leerfahrten oder Leertonnenkilometern großer Wert darauf zu legen, dass sowohl die jeweils berücksichtigten Arten von Leerfahrten als auch die Leertonnenkilometer, die zur Messung der Leerfahrten zu erfassen sind, präzise und explizit spezifiziert werden. Dies betrifft einerseits Kalküle von Wirtschaftlichkeitsrechnungen, in denen die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsträgers Schiene gegenüber alternativen Verkehrsträgern oder die Wirtschaftlichkeit der Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen des Verbundprojekts MAEKAS gegenüber isolierten, nicht-kooperativen Aktivitäten von Eisenbahnverkehrsunternehmen beurteilt wird. Andererseits ist diese präzise und explizite Spezifizierung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern ebenso in quantitativen Modellen des Operations Research einzuhalten, die im Verbundprojekt entwickelt werden, um die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer „intelligenten“ Bündelung von Einzelwagenverkehren der teilnehmenden Praxispartner zu untersuchen. Darauf wird in späteren Kapiteln dieses Projektberichts zurückgekommen.

2.3 Fahrendes versus stehendes Equipment

Das *Equipment* – oder synonym: der Fuhrpark – eines Eisenbahnverkehrsunternehmens erstreckt sich im hier vorgelegten Beitrag ausschließlich auf Lokomotiven¹⁾ und Güterwagen. Andere Infrastruktureinrichtungen, wie z.B. Gleisanlagen, Be- und Entladevorrichtungen sowie Lagerhallen, werden nicht zum Equipment gerechnet. Das *fahrende* Equipment umfasst alle Lokomotiven und Güterwagen, die für die Durchführung von Transportaufträgen aktuell genutzt werden oder zumindest für die Auftragsdurchführung eingeplant sind. Das *stehende* Equipment stellt hingegen denjenigen „unproduktiven“ Teil des Fuhrparks dar, der zwar für die „Produktion“ von Gütertransporten verwendet werden könnte, aber weder aktuell genutzt wird noch für eine zukünftige Nutzung eingeplant ist. Die Lokomotiven und Güterwagen des stehenden Equipments befinden sich in der Regel

1) Als Lokomotiven werden hier nur „Streckenlokomotiven“ erfasst, die dazu vorgesehen sind, Güterzüge über „größere“ Distanzen hinweg zu bewegen. Dagegen bleiben reine Rangierlokomotiven unberücksichtigt, die lediglich dazu dienen, Güterwagen auf „kürzeren“ Distanzen zu bewegen.

in einem Depot. Bei einem solchen Depot kann es sich beispielsweise um einen „Lokomotivschuppen“ oder um Abstellgleise handeln.

Stehendes Equipment bedeutet aus betriebswirtschaftlicher Sicht ungenutzte – oder synonym: freie – Transportkapazität. Sie ist nicht „per se“ vermeidenswert. Stattdessen kann die temporäre Nichtnutzung von Transportkapazität aus mindestens zwei Gründen¹⁾ als betriebswirtschaftlich vorteilhaft erscheinen. Erstens ist es möglich, dass am Gütertransportmarkt keine Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen angeboten werden. In diesem ersten Fall könnte eine höhere Auslastung der verfügbaren Transportkapazität nur durch die Akquisition von verlustverursachenden Transportaufträgen erfolgen (Verlustfall). Dies ist für Eisenbahnverkehrsunternehmen, die nicht primär auf Ziele wie Beschäftigungssicherung ausgerichtet sind, sondern Gewinnerzielung oder ähnliche erwerbswirtschaftliche Ziele anstreben, grundsätzlich zu vermeiden. Zweitens kann ein Eisenbahnverkehrsunternehmen freie Kapazität vorhalten und hierdurch bewusst auf Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen verzichten, wenn es damit rechnet, in „absehbarer“ Zukunft andere Transportaufträge mit noch höheren (ebenso positiven) Deckungsbeiträgen akquirieren zu können. In diesem zweiten Fall dient die freie Kapazität als eine Flexibilitätsreserve zum Ausschöpfen künftig erwarteter Marktchancen (Flexibilitätsfall). Mithilfe der betriebswirtschaftlichen Theorie der *Real-Optionen* lässt sich analysieren, in welchem konkreten Ausmaß es vorteilhaft ist, auf gegenwärtige Kapazitätsauslastung zu verzichten, um Spielräume für zukünftig erwartete Kapazitätsauslastung mit höherem Gewinnpotenzial zu schaffen.

Im Folgenden wird davon ausgegangen das weder der Verlust- noch der Flexibilitätsfall gegeben sind. Unter dieser Voraussetzung erweist sich die freie Transportkapazität des stehenden Equipments nicht nur als *unproduktiv* im Sinne einer fehlenden aktuellen oder geplanten Verwendung für Gütertransporte, sondern auch als *ineffektiv* im Hinblick auf ein angestrebtes Gewinnziel²⁾. Folglich sollten Eisenbahnverkehrsunternehmen – unter der vorgenannten, fortan nicht mehr wiederholten Prämisse – grundsätzlich darum bemüht sein, freie Kapazitäten³⁾ im stehenden Equipment⁴⁾ zu vermeiden.

-
- 1) Ein dritter Grund kann darin gesehen werden, dass am Gütertransportmarkt aktuell überhaupt keine Transportaufträge angeboten werden. In diesem dritten Fall besitzt ein Eisenbahnverkehrsunternehmen jedoch keinen Entscheidungsspielraum, über die Auslastung freier Kapazität mittels zusätzlicher Transportaufträge zu disponieren. Da kein Entscheidungsspielraum vorliegt, erscheint es nicht sinnvoll, über die betriebswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit dispositiven Handelns zu sprechen. Daher wird dieser dritte Fall im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.
 - 2) Der Übersichtlichkeit halber wird hier nur von einem Gewinnziel gesprochen. Es dient als *pars pro toto* für eine breite Palette anderer erwerbswirtschaftlicher Ziele, die vor allem auch Deckungsbeitrags- und Renditeziele sowie eine Vielzahl von zahlungsstromorientierten Erfolgszielen – z.B. Cash-Flow-, Kapitalwert- und Economic-Value-Added-Ziele – umfassen.
 - 3) Zwecks sprachlicher Vereinfachung wird im Folgenden die Transportkapazität des Equipments nur kurz als Kapazität angesprochen. Darüber hinaus wird auch von „Kapazitäten“ im Plural geredet, wenn entweder die Transportkapazitäten der Equipments mehrerer Eisenbahnverkehrsunternehmen gemeint sind oder wenn im aktuellen Argumentationskontext die Kapazitäten einzelner Lokomotiven oder Güterwagen assoziiert werden.
 - 4) Die hier vorgetragene Argumentation zu freien Kapazitäten wird der Anschaulichkeit halber zunächst nur auf das stehende Equipment bezogen. Dies ist jedoch nicht notwendig. Stattdessen trifft die Argumentation in analoger Weise auch auf diejenigen Kapazitätsanteile des fahrenden Equipments zu, die weder aktuell genutzt noch für zukünftige Nutzungen eingeplant sind. Auf freie Kapazitäten im fahrenden Equipment wird am Ende des Kapitels zurückgekommen.

Durch die Kooperation mehrerer Eisenbahnverkehrsunternehmen, wie im vorliegenden Verbundprojekt MAEKAS, können die freien Kapazitäten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens den übrigen Kooperationspartnern angeboten werden. Voraussetzung ist, dass die verfügbaren Lokomotiven und Güterwagen aufgrund ihrer Beschaffenheit für die Transportaufträge der Kooperationspartner technisch geeignet sind. Den Eisenbahnverkehrsunternehmen wird dadurch die Möglichkeit eröffnet, Transportaufträge anzunehmen und Kunden zu akquirieren, die ansonsten infolge von Kapazitätsmängeln hätten abgelehnt werden müssen.

Im Ergebnis handelt es sich um eine „Win-Win-Situation“, da sowohl das eine Eisenbahnverkehrsunternehmen, das sein stehendes Equipment mit freier Kapazität zur Verfügung stellt, als auch das andere Eisenbahnverkehrsunternehmen, welches die freie Kapazität nutzt, wirtschaftliche Vorteile aus der Kooperation hat. Das letztgenannte Eisenbahnverkehrsunternehmen, das als Kooperationspartner zusätzliche Transportkapazität erhält, kann einen ansonsten wegen Kapazitätsmangels abgelehnten Transportauftrag doch entgegennehmen und dadurch einen zusätzlichen, laut der o.a. Prämisse positiven Deckungsbeitrag erwirtschaften. Das erstgenannte Eisenbahnverkehrsunternehmen vermag prima facie nur die Kapazitätsauslastung seines Equipments zu erhöhen. Dies stellt aus betriebswirtschaftlicher Perspektive noch keinen Vorteil dar, sofern nicht eine möglichst hohe Kapazitätsauslastung als „Selbstzweck“ verfolgt wird.¹⁾ Aber es liegt nahe, den zusätzlich erwirtschafteten (positiven) Deckungsbeitrag des einen Eisenbahnverkehrsunternehmens unter beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen so aufzuteilen, dass jedes der beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen einen positiven Anteil am erwirtschafteten Deckungsbeitrag erhält und beide Eisenbahnverkehrsunternehmen die Aufteilung dieses Deckungsbeitrags als fair empfinden.²⁾ Unter dieser Voraussetzung, von der im Folgenden stets ausgegangen wird, ist für die beiden kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen tatsächlich eine „Win-Win-Situation“ eingetreten.

Mittels der Kooperation zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen, die gemeinsam ein virtuelles Unternehmen bilden, wird nicht nur der Deckungsbeitrag und somit auch der *Gewinn* jedes beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmens erhöht. Vielmehr steigt auch die *Effizienz* der Leistungserstellung im virtuellen Unternehmen, weil mit unverändertem Input des verfügbaren Equipments ein größerer Output an Transportdienstleistungen realisiert wird.³⁾ Hinzu kommt, dass durch diese Form des Austauschs von Lokomotiven oder Güterwagen innerhalb eines virtuellen Unternehmens

-
- 1) Das Ziel, eine möglichst hohe Kapazitätsauslastung anzustreben, wird zwar in der betrieblichen Praxis des Öfteren wie ein „Selbstzweck“ verfolgt. Aber dabei wird übersehen, dass ein solcher „Selbstzweck“ auch dazu verführen kann, verlustverursachende Zusatzaufträge anzunehmen, nur um eine möglichst hohe Kapazitätsauslastung zu realisieren. Davon wird im Folgenden abgesehen, weil grundsätzlich davon ausgegangen wird, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen ein Gewinnziel im oben eingeführten, inhaltlich breit interpretierten Verständnis verfolgt.
 - 2) Die faire Aufteilung von Deckungsbeiträgen, Effizienzgewinnen o.ä. von gemeinsam erwirtschafteten Erfolgsbeiträgen spielt nicht nur für die hier betrachtete Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen, sondern allgemein für zwischenbetriebliche Kooperationen eine große Rolle. Sie wird im hier vorgelegten Projektbericht nicht näher diskutiert, weil sie von einem der Autoren an anderer Stelle – aus der Perspektive der fairen Aufteilung von Effizienzgewinnen in Supply Webs – ausführlich behandelt wurde. Vgl. ZELEWSKI (2007) und ZELEWSKI (2009).
 - 3) Streng genommen müsste in die Effizienzbetrachtung auch der erhöhte Input solcher Ressourcen einbezogen werden, die mit dem Volumen der realisierten Transportdienstleistungen variieren. Dazu gehören z.B. der Energieverzehr der Lokomotiven sowie der leistungsabhängige Verschleiß von Lokomotiven und Güterwagen. Von solchen Komplikationen, die eine Effizienzanalyse bei gleichzeitig ansteigenden Input- und Outputmengen erschweren, wird hier der Einfachheit halber abgesehen, zumal sie die grundsätzliche Tendenzaussage einer Effizienzsteigerung nicht verändern würden.

sowohl das Vertrauen zwischen den Kooperationspartnern als auch ihr kooperatives Denken gestärkt und gefestigt werden. Beides – Vertrauen und kooperatives Denken – ist in virtuellen Unternehmen nur sehr schwer zu bilden und hat daher für Kooperationen in Form eines virtuellen Unternehmens einen besonders hohen Stellenwert.¹⁾

Die voranstehende Argumentation zu freien Kapazitäten, die in Gestalt des stehenden Equipments vorliegen, trifft ebenso auf Kapazitätsanteile des *fahrenden* Equipments²⁾ zu, die weder aktuell genutzt werden noch für zukünftige Nutzungen eingeplant sind. Dabei kann es sich beispielsweise um den nicht ausgeschöpften Teil der Traktionskraft einer Lokomotive handeln, an die sich noch zusätzliche Güterwagen ankoppeln lassen, oder auch um den nicht ausgeschöpften Teil der Ladungskapazität von Güterwagen, die in einem Güterzug nur teilweise beladen verkehren. Leerfahrten und Leertonnenkilometer sind sogar nur im Hinblick auf fahrendes Equipment definiert. Denn es wäre sinnlos, von leeren *Fahrten* bzw. von Leertonnenkilometern als Gütervolumina, die auf einer *Fahrt* transportiert werden könnten, aber infolge unvollständiger Nutzung der Transportkapazität „leer“ bleiben, in Bezug auf *stehendes* Equipment zu sprechen.

Im vorliegenden Projektbericht geht es primär um die Vermeidung von Leerfahrten und die damit verbundene Reduzierung von Leertonnenkilometern. Daher sind in erster Linie freie Kapazitätsanteile des fahrenden Equipments gemeint, die mittels einer „intelligenten“ Bündelung von Transportnachfragen zumindest teilweise ausgelastet werden sollen.

Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass diese Nachfragebündelung in einem virtuellen Unternehmen aus mehreren Eisenbahnverkehrsunternehmen auch dazu führt, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen freie Kapazität seines stehenden Equipments in der oben beschriebenen Weise einem Kooperationspartner temporär zur Verfügung stellt. In diesem Fall käme es zu betriebswirtschaftlich wünschenswerten Gewinn- und Effizienzsteigerungen, die über die Vermeidung von Leerfahrten und die Reduzierung von Leertonnenkilometern hinausgehen. Sie könnten einerseits durch ein erweitertes Zielsystem berücksichtigt werden, in dem neben Leerfahrten bzw. Leertonnenkilometern ebenso Gewinn oder Effizienz eine Rolle spielen. Andererseits wäre es ebenso möglich, Leerfahrten bzw. Leertonnenkilometer zu „bepreisen“ und somit als Kostenkomponenten z.B. in ein Gewinnziel zu integrieren. Auf solche Erweiterungen oder Modifizierungen des Zielsystems wird im vorliegenden Projektbericht noch nicht näher eingegangen; sie bleiben späteren Projektberichten vorbehalten.

Um die Diktion zu vereinfachen, wird im Folgenden nur noch von freier Kapazität des Equipments eines Eisenbahnverkehrsunternehmens die Rede sein. Im Regelfall wird es sich dabei um freie Kapazität des fahrenden Equipments handeln, weil die Vermeidung von Leerfahrten und die Reduzierung von Leertonnenkilometern im Vordergrund der Betrachtungen stehen. Allerdings kann in Sonderfällen auch freie Kapazität des stehenden Equipments betroffen sein. Auf diese Weise lässt sich die Option offen halten, dass die „intelligente“ Bündelung von Transportnachfragen auch zur Nut-

1) Vgl. FLADNITZER (2006), S. 149 f.

2) Auch in der einschlägigen Fachliteratur wird überwiegend auf das fahrende Equipment eingegangen; vgl. IRELAND/CASE/FALLIS et al. (2004), S. 5 (speziell für schienengebundene Gütertransporte); JOBORN/CRAINIC/GENDREAU et al. (2004), S. 121 (speziell für schienengebundene Gütertransporte); SLAGER/KAPTEIJNS (2004), S. 81 (allgemein für Gütertransporte).

zung des stehenden Equipments eines Eisenbahnverkehrsunternehmens durch einen seiner Kooperationspartner führt.

2.4 Kapazitätsauslastung des Equipments

Die Kapazitätsauslastung des Equipments eines Eisenbahnverkehrsunternehmens kann grundsätzlich auf zwei Weisen gesteigert werden.¹⁾ Entweder bleibt die Kapazitätsnachfrage durch auszuführende Transportaufträge konstant und das verfügbare Kapazitätsangebot wird durch Desinvestitionen reduziert. Oder das verfügbare Kapazitätsangebot bleibt konstant und die Kapazitätsnachfrage wird durch auszuführende Transportaufträge erhöht. Im hier vorliegenden Projektbericht wird nur der zweite Fall betrachtet, d.h., alle Aspekte von Desinvestitionen bleiben unberücksichtigt.

Zur Erhöhung der Kapazitätsauslastung des Equipments bei konstantem Kapazitätsangebot kommen grundsätzlich die nachfolgenden Optionen in Betracht:

1. Option der *Güterzugerweiterung*: Ein Güterzug wird durch Ankoppeln zusätzlicher Güterwagen erweitert, ohne hierdurch technische oder administrative Höchstgrenzen zu überschreiten.²⁾ Dies entspricht im Wesentlichen³⁾ einer Verminderung von Leerfahrten im weitesten Sinne. Allerdings wird zusätzlich vorausgesetzt, dass die Ladungskapazitäten der zusätzlichen Güterwagen zumindest teilweise durch Transportaufträge ausgelastet sind.⁴⁾
2. Option der *höheren Güterwagenauslastung*: Ein Güterzug mit einer konstanten Anzahl von angekoppelten Güterwagen übernimmt zusätzliche Transportaufträge, indem noch freie Ladungskapazitäten der vorhandenen Güterwagen ausgelastet werden. Dabei kann es sich einerseits um Güterwagen handeln, die zuvor schon beladen verkehrten, deren Ladungskapazität aber noch nicht vollständig ausgeschöpft wurde (*graduelle* Auslastungszunahme). Andererseits kommen ebenso Güterwagen in Betracht, die zuvor leer verkehrten, weil ihre Ladungskapazität überhaupt nicht in Anspruch genommen wurde (*totale* Auslastungszunahme). In beiden Fällen führt

-
- 1) Die beiden nachfolgend angesprochenen Alternativen werden nur im Interesse der analytischen Klarheit voneinander unterschieden. In der betrieblichen Praxis können sie auch miteinander kombiniert werden.
 - 2) D.h., durch die angekoppelten Güterwagen werden weder die maximal verfügbare Traktionskraft (Traktionskapazität) der Lokomotive noch die höchstzulässige Zuglänge (Abmessungskapazität) überschritten. Das Ankoppeln zusätzlicher Güterwagen führt zu einer höheren Auslastung der Traktionskapazität der jeweils betroffenen Lokomotive oder der Abmessungskapazität des jeweils betroffenen Güterzugs.
 - 3) Darüber hinaus umfasst dies auch eine Verminderung von Leerfahrten im engsten Sinne, bei denen eine Lokomotive ohne Güterwagen verkehrt („Lokzug-Fahrt“). Denn durch das Ankoppeln von mindestens einem Güterwagen an eine Lokomotive, die zuvor ohne Güterwagen verkehrte, entfällt die frühere „Lokzug-Fahrt“ und wird durch einen „normalen“ Güterzug ersetzt.
 - 4) Andernfalls wäre zwar die Traktionskapazität der jeweils betroffenen Lokomotive oder die Abmessungskapazität des jeweils betroffenen Güterzugs höher ausgelastet, ohne dass die Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen durch zusätzliche Transportaufträge höher ausgelastet werden. Aber nur zusätzliche Transportaufträge führen unter der o.a. Prämisse der Irrelevanz von Verlust- und Flexibilitätsfall zu zusätzlichen Deckungsbeiträgen und somit zu den intendierten Gewinnsteigerungen. Daher werden hier nur solche Zunahmen der Auslastung von Traktions- oder Abmessungskapazitäten betrachtet, die mit einer erhöhten Auslastung der Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen durch zusätzliche Transportaufträge einhergehen.

die Übernahme zusätzlicher Transportaufträge in der Regel¹⁾ zu einer Verminderung von Leerfahrten im weiteren Sinne.

3. Option der *kooperativen Kapazitätsnutzung*: Die freien Kapazitäten von Lokomotiven oder Güterwagen eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, die sich bislang in einem Depot dieses Eisenbahnverkehrsunternehmens befanden, weil sie weder für einen aktuellen Transportauftrag genutzt wurden noch für einen zukünftigen Transportauftrag eingeplant waren, werden einem kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen zur Verfügung gestellt. Das kooperierende Eisenbahnverkehrsunternehmen nutzt dieses zusätzliche Equipment für die Durchführung von mindestens einem Transportauftrag mit positivem Deckungsbeitrag, den es andernfalls wegen Kapazitätsmangels hätte ablehnen müssen. Auf diese Weise wird die Kapazitätsauslastung des Equipments des erstgenannten Eisenbahnverkehrsunternehmens erhöht, ohne dass es zu einer komplementären Vermeidung von Leerfahrten oder Reduzierung von Leertonnenkilometern kommt.

Seitens der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS wird nur die Option einer Güterzugerweiterung durch Ankoppeln zusätzlicher Güterwagen als eine relevante und deshalb intensiver zu analysierende Handlungsweise zur Steigerung der Kapazitätsauslastung ihres Equipments wahrgenommen.²⁾ Daher steht diese Option für die Vermeidung von Leerfahrten und die hiermit verknüpfte Reduzierung von Leertonnenkilometern im Zentrum des Verbundprojekts MAEKAS. Sie berücksichtigt den Sachverhalt, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS nach ihrem eigenen Bekunden hauptsächlich Ganzzüge betreiben und ihr wesentlicher Handlungsspielraum darin besteht, über die Zusammenstellung von Güterwagen zu solchen Ganzzügen zu disponieren. Für diese Fokussierung auf Ganzzüge spricht, dass die Durchschnittskosten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens pro transportierte Tonne und pro zurückgelegtem Kilometer bei einem Ganzzug im Vergleich zu Einzelwagenverkehren relativ niedrig ausfallen.³⁾ Daher erweist sich der Ganzzugverkehr für Eisenbahnverkehrsunternehmen aus betriebswirtschaftlicher Perspektive in der Regel als am attraktivsten.⁴⁾

-
- 1) Darüber hinaus umfasst der zweitgenannte Fall als Grenzfall auch eine Verminderung von Leerfahrten im engeren Sinne, bei denen alle Güterwagen eines Güterzugs leer sind. Aus der Gesamtheit dieser leeren Güterwagen wird im hier betrachteten, zweitgenannten Fall die bislang überhaupt nicht genutzte Ladungskapazität mindestens eines Güterwagens für die Durchführung eines Transportauftrags zumindest teilweise in Anspruch genommen. Dadurch wird eine Leerfahrt im engeren Sinne vermieden (und zumeist durch eine Leerfahrt im weiteren Sinne ersetzt).
 - 2) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (SBB Cargo GmbH, Key Account Manager), Herr Dieter Schulten (Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Eisenbahnbetriebsleiter), Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb) sowie Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 3) Nur am Rande sei erwähnt, dass die Verwendung von *Durchschnittskosten* in Kostenminimierungs- oder Gewinnmaximierungskalkülen aus betriebswirtschaftlich-theoretischer Perspektive verfehlt ist. Denn Durchschnittskosten beruhen stets auf der *nicht verursachungsgerechten Proportionalisierung* insbesondere von Fixkosten, darüber hinaus aber auch von zwar variablen, jedoch nicht-proportionalen Gemeinkosten. Eine verursachungsgerechte Kostenrechnung würde dagegen die Verwendung von Grenzkosten oder – noch besser – von relativen Einzelkosten im Sinne der entscheidungsorientierten Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung von RIEBEL erfordern. Von diesem grundsätzlichen Einwand wird aber an dieser Stelle abgesehen, weil es nicht um die Empfehlung eines theoretisch „angemessenen“ Kostenrechnungssystems geht, sondern nur um eine Rekonstruktion der Argumentationsweise der Projektpartner aus der betrieblichen Praxis.
 - 4) Vgl. MÜHLHANS (1997), S. 301.

In der Praxis kommt es häufig vor, dass zwar einzelne, zahlreiche oder sogar alle Güterwagen eines Ganzzugs vollständig beladen, ihre Ladungskapazitäten also vollständig ausgeschöpft sind, aber die maximale Traktionskraft der Lokomotive des Ganzzugs und dessen höchstzulässige Gesamtlänge noch nicht vollständig in Anspruch genommen sind. Das bedeutet, dass vom betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen noch mindestens ein weiterer Transportauftrag angenommen werden könnte, wenn die zusätzlichen Güterwagen, die für das nachgefragte Transportvolumen erforderlich sind, bei ihrer Ankopplung die noch freie Abmessungs- und Traktionskapazität des Ganzzugs bzw. seiner Lokomotive nicht überschreiten.

Die Option einer höheren Güterwagenauslastung wird von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS für unbeachtlich gehalten.¹⁾ Dies liegt daran, dass die Ladungskapazitäten der Güterwagen in der Regel jeweils komplett an einen Kunden verkauft werden (Komplettverkaufsstrategie). Daher besteht bei vorausgesetzter Vertragstreue eines Eisenbahnverkehrsunternehmens überhaupt kein wirtschaftlich vertretbarer Spielraum, die noch nicht vollständig ausgelastete Kapazität eines Güterwagens durch zusätzliche Transportaufträge höher auszulasten. Bei dieser Komplettverkaufsstrategie wird der Preis der Güterwagennutzung im Hauptlauf nicht anhand des transportierten Gütervolumens [to] berechnet, sondern vielmehr pro Güterwagen oder pro Güterzug (Ganzzug) sowie in Bezug auf die im Hauptlauf insgesamt zurückzulegende Fahrstrecke [km]. Sofern ein Güterwagen auf einem Teil einer Tour im Vor- oder Nachlauf leer gefahren wird, gibt es für das betroffene Eisenbahnverkehrsunternehmen die Möglichkeit, in den Preis der Güterwagennutzung einen Zuschlag für die anfallenden Leertonnenkilometer einzubeziehen. In den beiden vorgenannten Fällen freier Ladungskapazitäten im Hauptlauf einerseits sowie im Vor- oder Nachlauf andererseits bezahlt der Kunde die durch ihn verursachten Leertonnenkilometer über den Preis für die Transportdienstleistung. Aus der Sicht der Eisenbahnverkehrsunternehmen tragen also ihre Kunden im Preis für die Transportdienstleistung die Kosten²⁾ sowohl für nicht vollständig ausgenutzte Ladungskapazitäten von beladenen Güterwagen auf Fahrstrecken im Hauptlauf (Nutzstrecken) als auch für überhaupt nicht ausgenutzte Ladungskapazitäten von leeren Güterwagen auf Fahrstrecken im Vor- oder Nachlauf (Leerstrecken). Daher erscheint es prima facie folgerichtig, dass die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS die Option einer höheren Güterwagenauslastung für sich als irrelevant erachten.

Dieser erste Anschein trägt jedoch. Die Praxispartner unterstellen offensichtlich, dass sich die Höhe ihrer Preisforderungen nicht auf ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen (brancheninterne Konkurrenz) und im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern

1) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (SBB Cargo GmbH, Key Account Manager), Herr Dieter Schulten (Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Eisenbahnbetriebsleiter), Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb) sowie Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

Die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS äußerten jedoch die Ansicht, dass die Option einer höheren Güterwagenauslastung durchaus in Betracht käme, wenn nicht die zuvor erläuterte Fokussierung auf Ganzzüge vorherrsche, sondern ein Eisenbahnverkehrsunternehmen reine Einzelwagenverkehre oder Stückgutverkehre durchführen würde. Allerdings ist schwer nachzuvollziehen, warum ein Eisenbahnverkehrsunternehmen in den beiden letztgenannten Fällen nicht ebenso die o.a. Komplettverkaufsstrategie verfolgen sollte. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf reine Einzelwagenverkehre.

2) Bei diesen Kosten handelt es sich im hier erörterten Kontext um Opportunitätskosten für positive Deckungsbeiträge von Transportaufträgen, die mithilfe der freien Ladungskapazitäten der Güterwagen durchgeführt werden könnten, aber faktisch nicht durchgeführt werden.

(Substitutionskonkurrenz) auswirkt. Diese Unterstellung wirkt jedoch auf konkurrenzintensiven Märkten wie dem Markt für Gütertransporte befremdlich. Denn es ist damit zu rechnen, dass die Wettbewerbsfähigkeit eines Eisenbahnverkehrsunternehmens zunimmt und somit das Potenzial akquirierbarer Transportaufträge tendenziell ansteigt, wenn es dem Eisenbahnverkehrsunternehmen gelingt, seine Preisforderungen für die offerierten Transportdienstleistungen ceteris paribus – d.h. vor allem bei unveränderter Transportqualität und -flexibilität – zu senken. Eine solche Senkung der eigenen Preisforderungen kann u.a. dadurch erreicht werden, dass die Kosten für nicht vollständig ausgenutzte Ladungskapazitäten von beladenen Güterwagen auf Fahrstrecken im Hauptlauf oder für überhaupt nicht ausgenutzte Ladungskapazitäten von leeren Güterwagen auf Fahrstrecken im Vor- oder Nachlauf nicht im geforderten Preis auf die Kunden überwält werden. Stattdessen bemüht sich das betroffene Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen der jeweils noch freien Ladungskapazitäten darum, durch Reduzierung seiner Preisforderungen zusätzliche Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen zu akquirieren. Dadurch wird nicht nur eine höhere Güterwagenauslastung erzielt, sondern es werden auch zusätzliche Deckungsbeiträge erwirtschaftet.

Es lässt sich nicht allgemeingültig oder „theoretisch“ beantworten, ob die zusätzlichen Deckungsbeiträge aus den zusätzlich akquirierten Transportaufträgen (Deckungsbeitragsmehringseffekt) größer sind als der Erlösausfall, der daraus resultiert, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen darauf verzichtet, in seinen Preisforderungen Kosten für nicht vollständig oder für überhaupt nicht ausgenutzte Ladungskapazitäten auf seine Kunden zu überwälzen (Erlösminderungseffekt). Vielmehr handelt es sich um eine empirisch zu klärende Frage, die von den Einflussgrößen des Einzelfalls – insbesondere von der Preisreagibilität der Kunden, von den Preisniveaus der Konkurrenten und von der Existenz von Transportaufträgen mit positiven Deckungsbeiträgen – abhängt. Aber die Frage, ob der Deckungsbeitragsmehringseffekt den Erlösminderungseffekt überwiegt, kann nur dann im Einzelfall beantwortet werden, wenn die Option einer höheren Güterwagenauslastung grundsätzlich in Betracht gezogen wird. Daher wird vom Universitätspartner diese Option in seine Analyse der Vermeidung von Leerfahrten und der Reduzierung von Leertonnenkilometern bewusst einbezogen, auch wenn dies von der Irrelevanzvermutung auf der Seite der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS abweicht.

Die Option einer kooperativen Kapazitätsnutzung wurde von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS in der Vergangenheit ebenso wenig betrachtet. Es gehört jedoch zu den ausdrücklichen Projektzielen, im Rahmen eines virtuellen Unternehmens aus Eisenbahnverkehrsunternehmen die Auslastung der Kapazitäten des insgesamt vorhandenen Equipments zu erhöhen, indem zusätzliche Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen durch eine kooperative Nutzung von freien Kapazitäten akquiriert werden. Daher findet auch die Option einer kooperativen Kapazitätsnutzung – wiederum abweichend von den bisherigen Verhaltensweisen der Praxispartner – in theoretischen Analysen Berücksichtigung, in denen untersucht wird, wie sich das Ziel einer höheren Kapazitätsauslastung der Eisenbahnverkehrsunternehmen erreichen lässt. Da die kooperative Kapazitätsnutzung jedoch „nur“ zu einer höheren Kapazitätsauslastung und (unter den voranstehend erläuterten Voraussetzungen) zu zusätzlichen Deckungsbeiträgen führt, jedoch weder zu einer Vermeidung von Leerfahrten noch zu einer Reduzierung von Leertonnenkilometern beiträgt, wird diese Option im hier vorgelegten Projektbericht, wie schon früher angemerkt wurde, nicht weiter verfolgt.

3 Ermittlung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern

3.1 Überblick

In diesem Kapitel wird das Aufkommen an Leerfahrten bei denjenigen Eisenbahnverkehrsunternehmen ermittelt, die als Praxispartner am Verbundprojekt MAEKAS teilnehmen.¹⁾ Wie schon im Kapitel 2.2 ausgeführt, wird der Begriff „Leerfahrt“ mithilfe der unmittelbar messbaren Leertonnenkilometer operationalisiert.

Zur Ermittlung von Leertonnenkilometern wurde bereits die Maßeinheit „to·km“ eingeführt. Allerdings verhält sich diese Maßeinheit neutral gegenüber der Frage, ob sie entweder dazu verwendet wird, um die freie Ladungskapazität eines Transportmittels – wie z.B. eines Güterzugs oder eines Güterwagens – entlang einer Fahrstrecke zu messen (Leertonnenkilometer), oder ob sie dazu dient, die Auslastung der Ladungskapazität eines Transportmittels entlang einer Fahrstrecke zu erfassen (Nutztonnenkilometer). Sofern diese Unterscheidung im aktuellen Argumentationskontext betont werden soll, können die numerisch identischen, aber semantisch aussagekräftigeren Maßeinheiten „Leto·km“ zur Erfassung von Leertonnenkilometern und „Lato·km“ zur Erfassung von Nutztonnenkilometern verwendet werden.

Die nachfolgenden Ausführungen zu Leerfahrten und Leertonnenkilometern der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS stehen unter drei einschränkenden Vorbehalten.

Erstens haben die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS relevante Informationen zur Ermittlung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern in unterschiedlichem Umfang und in unterschiedlicher Qualität zur Verfügung gestellt. Daher ist es nicht immer möglich, eine einheitliche Darstellung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern zu gewährleisten. Stattdessen lässt es sich nicht vermeiden, dass im Folgenden Umfang und Qualität der Angaben leider partiell variieren.

Zweitens handelt es sich bei den Kilometerangaben jeweils um Auskünfte des betroffenen Praxispartners oder – ersatzweise, falls solche Auskünfte nicht erfolgten, – um Berechnungen seitens des Universitätspartners, die sich auf das Trassenpreisinformationssystem der DB Netz AG stützten. In beiden Fällen können die Kilometerangaben geringfügig von den tatsächlich gefahrenen Kilometern abweichen, da es sich bei den Kilometerangaben jeweils um normierte Werte handelt. Beispielsweise kann eine Strecke zwischen zwei Haltepunkten bei einer einzelnen Fahrt tatsächlich länger ausgefallen sein, als es in der Datenbank eines Praxispartners oder im Trassenpreisinformationssystem der DB Netz AG als normierte Streckenlänge hinterlegt ist, weil der betroffene Güterzug infolge einer Gleisbaustelle einen Umweg fahren musste.

Drittens bestehen bei den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS Akzeptanzprobleme hinsichtlich der beiden weit gefassten Varianten des Leerfahrtenbegriffs, die im Kapitel 2.1 als Leerfahrten im weiteren oder im weitesten Sinne eingeführt wurden. Stattdessen verwenden die Praxispartner den Begriff „Leerfahrt“ nach eigenem Bekunden nur in den beiden eng gefassten Varianten. Sie berücksichtigen also nur Leerfahrten im engeren Sinne, bei denen ein Güterzug aus einer Lokomotive mit angekoppelten, aber in ihrer Gesamtheit leeren Güterwagen besteht, sowie Leerfahrten im engsten Sinne, bei denen eine Lokomotive ohne Güterwagen als „Lokzug-Fahrt“ verkehrt.

1) Der Inhalt dieses Kapitels basiert im Wesentlichen auf der Seminararbeit JENTJENS (2008), S. 3-10.

Aufgrund der Nichtbeachtung von Leerfahrten im weiteren Sinne, bei denen die Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen nicht vollständig ausgelastet sind, überrascht es nicht, dass die Praxispartner keine Informationen über die Kapazitätsauslastungen ihrer Güterwagen zur Verfügung gestellt haben. Dieser Informationsmangel kann auch auf den Sachverhalt zurückgeführt werden, dass die Praxispartner bemüht sind, die Ladungskapazitäten ihrer Güterwagen in der Regel jeweils komplett an einen Kunden zu verkaufen. Auf diese Komplettverkaufsstrategie wurde bereits im Kapitel 2.4 ausführlicher eingegangen. Da die Praxispartner nicht vollständig ausgelastete Ladungskapazitäten von Güterwagen in der Regel nicht berücksichtigen, unterscheiden sie zumeist nur in dichotomer Weise zwischen beladenen und leeren Güterwagen. Dabei gilt ein Güterwagen als „beladen“, wenn seine Ladungskapazität entweder vollständig oder auch nur teilweise ausgeschöpft wird.¹⁾

Darüber hinaus führt die Nichtbeachtung von Leerfahrten im weiteren Sinne dazu, dass es unmöglich war, von den Praxispartnern Informationen über Möglichkeiten zu erhalten, die Traktionskapazität der Lokomotiven von Güterzügen oder die Abmessungskapazität von Güterzügen durch zusätzlich angekoppelte Güterwagen stärker auszuschöpfen.

Die beiden zuvor angesprochenen Informationsdefekte, die aus dem Außerachtlassen von Leerfahrten im weiteren und im weitesten Sinne resultieren, verursachen eine *systematische Informationsverzerrung* („bias“) derart, dass die tatsächlich angefallenen Leerfahrten und die hiermit verknüpften tatsächlich entstandenen Leertonnenkilometer von den Praxispartnern grundsätzlich unterschätzt werden. Daher kann ein Beitrag der Forschungs- und Transferaktivitäten, die im Verbundprojekt MAEKAS dem Universitätspartner obliegen, unter anderem auch darin gesehen werden, die Sensibilität („awareness“) der Praxispartner für bislang nicht wahrgenommene, aber tatsächlich anfallende Leerfahrten und Leertonnenkilometer zu stärken.

Darüber hinaus dient ein anderes Arbeitspaket des Verbundprojekts dazu, eine „logistische“ Spezialsoftware auf der Basis des Softwareprodukts SIMULA zu entwickeln, die u.a. eine detaillierte, umfassende und präzise Ermittlung der tatsächlich anfallenden Leerfahrten und Leertonnenkilometer ermöglichen soll. Die erfolgreiche Implementierung dieser Spezialsoftware setzt allerdings die Bereitschaft der Praxispartner voraus, entsprechend aussagekräftige Informationen über tatsächlich ausgeführte oder tatsächlich geplante Touren für die Erfüllung von Transportaufträgen zur Verfügung zu stellen. Über diese Entwicklungs- und Implementierungsarbeiten wird in einem späteren Projektbericht referiert werden.

Infolge der voranstehenden drei grundsätzlichen Vorbehalte sind die nachfolgenden „empirischen“ Informationen zu Leerfahrten und Leertonnenkilometern der Praxispartner mit der gebührenden wissenschaftlichen *Vorsicht* zu *interpretieren*. Insbesondere gilt es zu beachten, dass die Angaben der Praxispartner wegen der Gefahr einer *systematischen Unterschätzung* von Leerfahrten und Leertonnenkilometern vermutlich des Öfteren keine „Realdaten“ darstellen, sondern „nur“ die Qualität von realistischen *Untergrenzen* für die tatsächlich angefallenen Leerfahrten und Leertonnenkilometer besitzen.

1) Ein Güterwagen wird dagegen in unproblematischer Weise als leer eingestuft, wenn seine Ladungskapazität überhaupt nicht in Anspruch genommen wird.

3.2 Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH (MVG)

Die MVG¹⁾ transportiert mit ihrer Eisenbahn zurzeit überwiegend Schrott, Öl, Bleche, Stahl und Rohre. Die Informationen der MVG über die Transporte dieser Güter beruhen auf Tonnageblättern für den Monat August 2008. Tonnageblätter geben einen detaillierten Überblick, wie viele Güterwagen täglich entweder beladen oder aber leer am Standort der MVG ein- und ausgegangen sind. Zusätzlich werden auf Tonnageblättern die transportierten Güterarten und die Gesamtgewichte²⁾ der beladenen Güterwagen vermerkt.

Aus Effizienzgründen ist ein Eisenbahnverkehrsunternehmen wie die MVG bestrebt, jede Fahrt mit möglichst viel Ladung zu versehen. Güterzüge bestehen aber in der Praxis oft sowohl aus beladenen als auch aus leeren Güterwagen. Dabei kann der Anteil der beladenen Güterwagen in Abhängigkeit von den konkret vorliegenden Transportaufträgen einerseits relativ groß, andererseits aber auch relativ klein ausfallen. Einen Sonderfall stellen bei der MVG Güterzüge für den Transport von Öl dar. Sie bestehen ausschließlich aus Spezialgüterwagen für den Öltransport („Ölwaggons“) und werden immer entweder als reine Lastfahrten (alle Güterwagen sind beladen) oder als reine Leerfahrten (alle Güterwagen sind leer) durchgeführt.

Die MVG fährt vier verschiedene Strecken („Verkehre“) jeweils mehrmals in der Woche und deckt dabei vier Güterbahnhöfe als Haltepunkte ab. Die zeitliche Frequenz und die konkreten Zeitpunkte der Touren, mit denen eine Strecke bedient wird, hängen davon ab, ob an den angefahrenen Güterbahnhöfen Ladung bereitsteht oder benötigt wird.

Die folgenden Informationen über Leerfahrten und Leertonnenkilometer der MVG wurden anhand der Tonnageblätter dieses Eisenbahnverkehrsunternehmens ermittelt. Hierbei gilt es einige Besonderheiten zu berücksichtigen.³⁾ Da die Tonnageblätter der MVG Güterzüge der gleichen Strecke zusammenfassen und nur die Anzahlen der gefahrenen Güterwagen pro Strecke und Tag ausweisen, bezieht sich die nachfolgende Tabelle 1 primär auf Anzahlen von entweder beladenen oder aber leeren Güterwagen⁴⁾ der MVG. Ein separater Ausweis von Leerfahrten ist nicht möglich, weil Güterzüge der gleichen Strecke zusammengefasst werden und somit Informationen über Fahrten einzelner Güterzüge nicht zur Verfügung stehen. Stattdessen legte die MVG deutlichen Wert darauf, dass nicht nur in „negativer“ Weise Leertonnenkilometer erfasst werden, die durch Verkehre leerer Güterwagen verursacht werden. Vielmehr sollten diesen Leertonnenkilometern in „positiver“ Weise die Lasttonnenkilometer gegenübergestellt werden, die auf Verkehren von beladenen Güterwagen

-
- 1) Interviewpartner: Herr Dieter Schulten (Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Eisenbahnbetriebsleiter); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 2) Das Gesamtgewicht eines Güterwagens wird hierbei als Summe aus seinem Eigengewicht und dem Frachtgewicht berechnet. Das Frachtgewicht ist das Gewicht der Gütermenge, die mit dem betroffenen Güterwagen transportiert wird oder transportiert werden soll.
 - 3) Sofern diese Besonderheiten auch auf andere Praxispartner zutreffen, werden sie in den anschließenden Kapiteln nicht wiederholt dargestellt. Stattdessen werden dort nur solche Besonderheiten erläutert, welche sich für die anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen als spezifisch erweisen.
 - 4) Vgl. zu dieser dichotomen Erfassungsweise „beladen“ versus „leer“ die Ausführungen im Kapitel 3.1. Sie beruhen im Wesentlichen darauf, dass seitens der Praxispartner Leerfahrten im weiteren Sinne nicht erfasst werden, sodass sie keine Informationen über die tatsächlichen oder geplanten Auslastungen der Ladungskapazitäten ihrer Güterwagen zur Verfügung stellen können.

beruhen. Diesem Wunsch wurde durch die nachfolgende Tabelle 1 mit einem Ausweis von sowohl Leer- als auch Lasttonnenkilometern entsprochen.¹⁾

Bezugszeitraum: August 2008	absolut	relativ
leere Güterwagen [Anzahl]	833	48,91 %
beladene Güterwagen [Anzahl]	870	51,09 %
Summe Güterwagen [Anzahl]	1.703	100,00 %
Leertonnen Ölwegons [to]	4.168,85	0,98 %
Leertonnen andere Güterwagen [to]	422.852,82	99,02 %
Summe Leertonnen [to]²⁾	427.021,67	100,00 %
Leertonnenkilometer Ölwegons	39.148,69	0,43 %
Leertonnenkilometer andere Güterwagen	9.137.290,46	99,57 %
Summe Leertonnenkilometer [to·km]³⁾	9.176.439,15	100,00 %
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
Lasttonnen Ölwegons [to]	25.744,40	3,60 %
Lasttonnen andere Wagen [to]	690.165,46	96,40 %
Summe Lasttonnen [to]⁴⁾	715.909,86	100,00 %
Lasttonnenkilometer Ölwegons[to·km]	790.198,42	5,28 %
Lasttonnenkilometer andere Güterwagen [to·km]	14.171.742,36	94,72 %
Summe Lasttonnenkilometer [to·km]⁵⁾	14.961.940,78	100,00 %
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
Summe Tonnen (Leertonnen und Lasttonnen) [to]	1.143.248,83	
Summe Tonnenkilometer (Leertonnenkilometer und Lasttonnenkilometer [to·km])	24.138.379,93	

Tabelle 1: Ermittlung von Leer- und Lasttonnenkilometern für die Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH⁶⁾

- 1) Dies gilt auch für die späteren Tabellen zur Ermittlung von Leer- und Lasttonnenkilometern der anderen Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS.
- 2) Exemplarische Berechnung für angefallene Leertonnen am Freitag, dem 01.08.2008. Zugnummer: 54206/8. 17 leere Güterwagen, die jeweils 312,65 to beladen könnten, ergeben $17 \cdot 312,65 \text{ to} = 5.315,05 \text{ to}$. Die Leertonnen jedes Tages des Monats August 2008 für Ölwegons und andere Güterwagen wurden in gleicher Weise aufsummiert und ergaben zusammen 427.021,67 to. Vgl. dazu Anhang B.
- 3) Exemplarische Berechnung für angefallene Leertonnenkilometer am Freitag, dem 01.08.2008. Zugnummer: 54206/8. 17 leere Güterwagen, die jeweils 312,65 to beladen könnten und ohne Güter eine Strecke von 23,05 km zurücklegen, ergeben $17 \cdot 312,65 \cdot 23,05 = 122.485,33 \text{ to·km}$. Die Leertonnenkilometer jedes Tages des Monats August 2008 für Ölwegons und andere Güterwagen wurden in gleicher Weise aufsummiert und ergaben zusammen 9.176.439,15 to·km. Vgl. dazu Anhang B.
- 4) Exemplarische Berechnung für angefallene Lasttonnen am Freitag, dem 01.08.2008. Zugnummer: 54206/8. 7 beladene Güterwagen, die mit jeweils 312,65 to beladen sind, ergeben $7 \cdot 312,65 \text{ to} = 2.188,55 \text{ to}$. Die Lasttonnen jedes Tages des Monats August 2008 für Ölwegons und andere Güterwagen wurden in gleicher Weise aufsummiert und ergaben zusammen 715.909,86 to. Vgl. dazu Anhang B.
- 5) Exemplarische Berechnung für angefallene Lasttonnenkilometer am Freitag, dem 01.08.2008. Zugnummer: 54206/8. 7 beladene Güterwagen, die mit jeweils 312,65 to beladen sind und eine Strecke von 23,05 km zurücklegen, ergeben $7 \cdot 312,65 \text{ to} \cdot 23,05 \text{ km} = 50.435,13 \text{ to·km}$. Die Lasttonnenkilometer jedes Tages des Monats August 2008 für Ölwegons und andere Güterwagen wurden in gleicher Weise aufsummiert und ergaben zusammen 14.961.940,78 to·km.
- 6) Vgl. Anhang B.

Aus der Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass bei der MVG im Monat August 2008 insgesamt 833 leere und 870 beladene Güterwagen verkehrten. Der Anteil von leeren Güterwagen beträgt 48,91 %, stellt also ein großes Potenzial für Verbesserungen der Kapazitätsauslastung der Güterwagen dar.

Berechnet mit dem jeweiligen Frachtgewicht pro Fahrt, das in der Regel ständig variiert, ergeben sich für den Monat August 2008 rund 9.176.439,15 Leertonnenkilometer¹⁾ und ca. 14.961.940,78 Lasttonnenkilometer. Dies entspricht einem Leertonnenkilometeranteil von 38,02 % und einem Lasttonnenkilometeranteil von 61,98 %.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass sowohl für die MVG als auch für alle folgenden Praxispartner nicht jede Leerfahrt und nicht jeder leere Güterwagen ohne Weiteres mit Gütern aus zusätzlichen Transportaufträgen beladen werden kann.²⁾ Im Falle der MVG befinden sich unter den leeren Güterwagen nicht nur eigene Güterwagen, sondern auch Güterwagen der Railion Deutschland AG, der SBB Cargo GmbH und der französischen SNCF. Auf deren Beladung hat die MVG keinen Einfluss.

3.3 Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG (NDH)

Die Informationen der NDH³⁾ über Leer- und Lasttonnenkilometer, die in der Tabelle 2 auf der nächsten Seite wiedergegeben sind, beruhen auf Durchschnittswerten für einen Monat⁴⁾. Die Betrachtung tatsächlicher Werte für einen speziellen Monat erschien nicht sinnvoll, weil im Falle der NDH kein Monat für die durchgeführten oder geplanten Verkehre als repräsentativ erachtet wird. Dies liegt vor allem daran, dass es bei den verschiedenen Verkehren immer wieder zu Änderungen oder Ausfällen kommt. Solche Komplikationen können z.B. daraus resultieren, dass die Nachfrage nach den zu transportierenden Gütern bei den Kunden der NDH mitunter erheblich schwankt oder dass Betriebsschließungen zu einem plötzlichen Nachfrageeinbruch führen.

Im Gegensatz zur MVG stehen bei der NDH auch Informationen über einzelne Fahrten von Güterzügen zur Verfügung. Daher ist ein separater Ausweis von Leerfahrten bei der NDH möglich. Allerdings unterscheidet die NDH nur zwischen Leer- und Lastfahrten.⁵⁾

-
- 1) Die Ermittlung von Leertonnenkilometern erstens auf der Basis von Güterwagen anstelle von Leerfahrten sowie zweitens auf der Basis von durchschnittlichen Frachtgewichten von Güterwagen erweist sich grundsätzlich als problematisch. Darauf wird im Kapitel 3.4 in exemplarischer Weise näher eingegangen. Daher wird hier im Kapitel 3.2 darauf verzichtet, diese beiden Probleme zu thematisieren.
 - 2) Vgl. Kapitel 4.2.
 - 3) Interviewpartner: Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 4) Aufgrund der wechselnden Auslastungen im Monat bei den Fahrten wurden Angaben zum Durchschnittswert gemacht. Interviewpartnerin Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 5) Dies entspricht abermals der dichotomen Erfassungsweise von „beladenen“ versus „leeren“ Güterwagen, die im Kapitel 3.1 erläutert wurde.

Die Leerfahrten der NDH entsprechen den oben definierten Leerfahrten im engeren Sinne, bei denen ein Güterzug ausschließlich mit leeren Güterwagen verkehrt.¹⁾ Die Lastfahrten der NDH stellen dagegen ein komplexes Gemenge dar. Sie können sich einerseits auf Fahrten erstrecken, bei denen die Ladungskapazitäten aller Güterwagen voll ausgeschöpft sind (Lastfahrten im engeren Sinne). Andererseits können die Lastfahrten der NDH auch Leerfahrten im weiteren oder im weitesten Sinne darstellen, bei denen die Ladungskapazitäten der Güterwagen nicht vollständig ausgelastet sind bzw. bei denen ein Güterzug um zusätzliche Güterwagen erweitert werden könnte.

Bezugszeitraum: ein durchschnittlicher Monat	absolut	relativ
Leerfahrten [Anzahl]	88	47,83 %
Lastfahrten [Anzahl]	96	52,17 %
Summe Fahrten [Anzahl]	184	
leer zurückgelegte Fahrstrecken [km]	1.412	34,44 %
beladen zurückgelegte Fahrstrecken [km]	2.688	65,56 %
Summe Fahrstrecken [km]	4.100	
Leertonnen [to]	84.800	48,40 %
Leertonnenkilometer [to-km]	16.445.000	45,10 %
Lasttonnen [to]	90.400	51,60 %
Lasttonnenkilometer [to-km]	20.017.800	54,90 %
Summe Tonnen [to]	175.200	
Summe Tonnenkilometer [to-km]	36.462.800	

Tabelle 2: Ermittlung von Leer- und Lasttonnenkilometern für die Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG²⁾

Insgesamt werden pro Monat im Durchschnitt 184 Fahrten durchgeführt, darunter 88 Leerfahrten. Der Leerfahrtenanteil an den Fahrten insgesamt entspricht also 47,83 %. Pro Monat werden ca. 4.100 km gefahren, von denen 1.412 km auf leer zurückgelegte Fahrstrecken entfallen. Dies entspricht einem Anteil von 34,44 %. Durchschnittlich ergeben sich 20.017.800 Lasttonnenkilometer und 16.445.000 Leertonnenkilometer im Monat, was einem Leertonnenkilometeranteil von 45,10 % entspricht.³⁾

Demnach scheint bei der NDH auf den ersten Blick ein großes Potenzial zu bestehen, um Leerfahrten zu vermeiden und die damit verknüpften Leertonnenkilometer zu verringern. Dieser oberflächliche Eindruck täuscht jedoch, wie eine nähere Analyse der Verkehre zeigt.

In sechs von sieben analysierten Verkehren fallen für die NDH sowohl Last- als auch Leerfahrten an. Die Last- und die Leerfahrten laufen komplementär. Dies bedeutet am Beispiel einer Fahrt von Frimmersdorf zum Hafen Neuss / Düsseldorf, dass der Güterzug zunächst voll beladen den Hafen

1) Konkrete Angaben zu Leerfahrten im engeren Sinne („Lokzug-Fahrten“) waren von der NDH nicht erhältlich. In diesem Zusammenhang wurde seitens der NDH darauf hingewiesen, dass zurzeit Umstrukturierungen des Angebots von Güterverkehren erfolgten, die in naher Zukunft Lokzug-Fahrten verhindern würden.

2) Vgl. Anhang B zu den konkreten Berechnungen.

3) Vgl. für die genaue Berechnung der Leer- und Lasttonnenkilometer den Anhang B.

Neuss / Düsseldorf anfährt, aber für die Rückfahrt nach Frimmersdorf keine Güter zum Wiederbeladen bereitstehen, sodass es sich bei der Rückfahrt um eine Leerfahrt im engeren Sinne handelt. In der Summe ergeben sich etwa gleich viele Hin- wie Rückfahrten. Bei den sechs hier angesprochenen Verkehren werden vorrangig die Güterarten Kalk, Gips, Kohlenstaub, Zement und Sand transportiert. Die Transporte dieser Güterarten lassen sich laut Auskunft der NDH nur schwer während der Tour eines Güterzugs miteinander kombinieren. Kalk und Gips werden in separaten Zügen gefahren. Empfänger der Kalktransporte sind Kraftwerke. Die Gipszüge verkehren nach Neuss und die Kohlenstaubwagen nach Trompet. Aufgrund solcher Schwierigkeiten bieten die vorgenannten Güterarten nur wenig Potenzial zur Verringerung von Leerfahrten. Die Sand- und die Zementtransporte werden bereits innerbetrieblich „optimiert“.¹⁾

Eine Ausnahme bildet der siebte Verkehr, in dem Salz und Salzschlacke im Auftrag eines Aluminiumwerks transportiert werden. Das Salz wird benötigt, um die Temperatur bei der Aluminiumproduktion zu steigern. Als Restprodukt ergibt sich noch während der Produktion die Salzschlacke. Damit die Ladungskapazitäten der Güterwagen so hoch wie möglich ausgelastet werden, wird in denselben Güterwagen sowohl das Salz zum Aluminiumwerk hin transportiert als auch die Schlacke abtransportiert. Anzumerken ist an dieser Stelle allerdings, dass diese Verkehre parallel durchgeführt werden und nicht jeweils abgewartet wird, bis das antransportierte Salz in abzutransportierende Schlacke umgewandelt wurde. Die Salzschlacke kann wieder zu Salz aufgearbeitet und zum Aluminiumwerk zurücktransportiert werden. Speziell für die Salzschlacke wurden Container umgebaut, die den Ansprüchen des Auftraggebers genügen, also z.B. sehr heiße Salzschlacke aufnehmen können. Für diesen siebten Verkehr wurde seitens der NDH eine Möglichkeit gefunden, die Transporte der Güterarten Salz und Salzschlacke während der Tour eines Güterzugs auf „intelligente“ Weise miteinander zu kombinieren. Daher stellt dieser siebte Verkehr den einzigen von den sieben analysierten Verkehren der NDH dar, bei dem keine Leerfahrten entstehen.

3.4 Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH (WHE)

Die WHE²⁾ führte im Erhebungszeitraum vom 01.01.2008 bis zum 30.09.2008 nur einen regionalen Verkehr mit einem Kunden durch. Der Rest der Verkehre der WHE findet entweder nur lokal auf dem eigenen Gleisnetz im Wanne-Herner Hafen statt oder wird nicht eigenständig, sondern in Kooperation mit anderen Verkehrsunternehmen durchgeführt. Die Informationen der WHE über ihre Leer- und Lasttonnenkilometer, die in der Tabelle 3 auf der nächsten Seite zusammengefasst sind, beruhen ausschließlich auf ihrem einen regionalen Verkehr. In diesem Verkehr wird Schrott von Wanne-Herne bis Mülheim-Heißen und zurück befördert. Da sich der Erhebungszeitraum über neun Monate erstreckte, wurden monatliche Durchschnittswerte ermittelt, um den Vergleich der Angaben der WHE mit den Angaben der übrigen Praxispartner zu vereinfachen.

1) Vgl. Kapitel 5.3.2.

2) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

Bezugszeitraum: neun Monate	absolut		relativ
	Gesamtwerte für neun Monate	Durchschnittswerte pro Monat	
Leerfahrten [Anzahl]	53	5,89	63,13 %
Lastfahrten [Anzahl]	31	3,44	36,87 %
Summe Fahrten [Anzahl]	84	9,33	100,00 %
leere Güterwagen [Anzahl]	95	10,56	52,49 %
beladene Güterwagen [Anzahl]	86	9,56	47,51 %
Summe Güterwagen [Anzahl]	181	20,11	100,00 %
leer zurückgelegte Fahrstrecken [km] ¹⁾	1.060	117,78	63,10 %
beladen zurückgelegte Fahrstrecken [km] ²⁾	620	68,89	36,90 %
Summe Fahrstrecken [km]	1.680	186,67	100,00 %
Leertonnen [to] ³⁾	4.940	548,89	52,49 %
Leertonnenkilometer [to·km]⁴⁾	98.800	10.977,78	52,49 %
Lasttonnen [to]	4.472	496,89	47,51 %
Lasttonnenkilometer [to·km]	89.440	9.937,78	47,51 %
Summe Tonnen [to]	9.412	1.045,78	
Summe Tonnenkilometer [to·km]	188.240	20.915,56	

Tabelle 3: Ermittlung von Leer- und Lasttonnenkilometern für die Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH¹⁾

Das Transportaufkommen der WHE umfasste vom Januar 2008 bis zum September 2008 insgesamt 84 Fahrten. Davon entfielen 53 auf Leerfahrten und 31 auf Lastfahrten. Die 53 Leerfahrten bestehen zum einen aus 33 Lokzug-Fahrten (Leerfahrten im engsten Sinne) und zum anderen aus 20 Fahrten jeweils einer Lokomotive mit leeren Güterwagen (Leerfahrten im engeren Sinne). Daraus ergibt sich ein Leerfahrtenanteil von 63,13 %.⁵⁾

Allerdings betrachtet die WHE die Lokzug-Fahrten nicht als Leerfahrten. Daher möchte sie bei der Berechnung ihres Leerfahrtenanteils nur die 20 Leerfahrten im engeren Sinne berücksichtigen.⁶⁾ Hierüber lässt sich trefflich streiten. Wenn der Ansicht der WHE gefolgt wird, sinkt ihr Leerfahr-

-
- 1) Exemplarische Berechnung: 53 Leerfahrten mit einer Länge von durchschnittlich 20 km ergeben insgesamt leer zurückgelegte Fahrstrecken im Umfang von $53 \cdot 20 \text{ km} = 1.060 \text{ km}$.
 - 2) Exemplarische Berechnung: 31 Lastfahrten mit einer Länge von durchschnittlich 20 km ergeben insgesamt beladen zurückgelegte Fahrstrecken im Umfang von $31 \cdot 20 \text{ km} = 620 \text{ km}$.
 - 3) Exemplarische Berechnung: 95 leere Güterwagen mit einem durchschnittlichen Frachtgewicht von 52 to ergeben insgesamt Leertonnen im Umfang von $95 \cdot 52 \text{ to} = 4.940 \text{ to}$.
 - 4) Exemplarische Berechnung: 95 leere Güterwagen mit einem durchschnittlichen Frachtgewicht von 52 to ergeben bei einer durchschnittlich zurückgelegten Fahrstrecke von 20 km insgesamt Leertonnenkilometer im Umfang von $95 \cdot 52 \text{ to} \cdot 20 \text{ km} = 98.800 \text{ to·km}$.
 - 5) Vgl. Anhang B.
 - 6) In die anschließenden Berechnungen der leer zurückgelegten Fahrstrecken und der Leertonnenkilometer werden die 33 Lokzug-Fahrten jedoch einbezogen, sodass wieder von insgesamt 53 Leerfahrten ausgegangen wird.

tenanteil von zunächst 63,13 % auf nur noch 39,29 %.¹⁾ Trotz dieser „berechnungstechnischen“ Reduzierung des ausgewiesenen Leerfahrtenanteils besteht auch bei der WHE immer noch ein deutliches Potenzial zur Vermeidung von Leerfahrten. Allerdings wird seitens der WHE betont, dass es wegen der speziellen Struktur der Transportaufträge – es wird Schrott von Wanne-Herne bis Mülheim-Heißen und zurück in Spezialgüterwagen befördert – grundsätzlich schwerfalle, Leerfahrten zu vermeiden.²⁾

Von den Güterwagen, die im eingangs erwähnten Erhebungszeitraum vom Januar 2008 bis zum September 2008 seitens der WHE erfasst wurden, waren insgesamt 86 beladen und 95 leer. Pro Monat ergibt dies im Durchschnitt 10,56 beladene bzw. 9,56 leere Güterwagen. Der Anteil der leeren Güterwagen an den insgesamt verkehrenden Güterwagen liegt daher im Fall der WHE bei 52,49 %.

Die 86 beladenen Güterwagen transportierten im Erhebungszeitraum ein Frachtgewicht von durchschnittlichen ca. 52 to pro Güterwagen. Dies entspricht einem Frachtgewicht von insgesamt 4.472 to für die 31 durchgeführten Lastfahrten. Die Güterwagen legten in dem einen erfassten regionalen Verkehr eine Fahrstrecke von jeweils ca. 20 km zurück. Daraus ergeben sich Lasttonnenkilometer von 89.440 km im gesamten Erhebungszeitraum sowie von durchschnittlich ca. 9.938 km pro Monat. Der Anteil von Lasttonnenkilometern am gesamten regionalen Verkehrsaufkommen der WHE beträgt 47,51 %.

Zur Ermittlung der Leertonnenkilometer wurde in Interviews³⁾ mit der WHE das durchschnittliche Frachtgewicht von 52 to pro Güterwagen zugrunde gelegt, das von den insgesamt 95 leeren Güterwagen im Erhebungszeitraum nicht transportiert wurde. Auch hierüber lässt sich aus zwei Gründen streiten.

Erstens werden Leertonnenkilometer nicht nur durch Verkehre von Güterzügen mit leeren Güterwagen verursacht, sondern ebenso durch Lokzug-Fahrten. Denn die Lokomotiven könnten bei solchen Leerfahrten im engsten Sinne durchaus Güterwagen mit entsprechenden Ladungskapazitäten bewegen, worauf aber faktisch verzichtet wird. Aufgrund dieses Verzichts entstehen auch bei einer Lokzug-Fahrt entsprechende Leertonnenkilometer. Dieser Effekt wird durch den Ansatz der WHE, bei der Ermittlung von Leertonnenkilometern grundsätzlich nur Leerfahrten im engeren Sinne zu berücksichtigen, bei denen Güterzüge mit leeren Güterwagen verkehren, von vornherein ausgeblendet.⁴⁾

Zweitens hängen Leertonnenkilometer aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht von dem tatsächlich durchschnittlich transportierten Frachtgewicht eines Güterwagens ab, sondern von den maximal

1) Auf diese Weise wird die systematische Unterschätzung von Leerfahrten (und Leertonnenkilometern) durch die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS, die bereits im Kapitel 3.1 erläutert wurde, um einen weiteren Einflussfaktor verstärkt.

2) Vgl. Kapitel 4.2.

3) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

4) Auf diese Weise wird die systematische Unterschätzung von (Leerfahrten und) Leertonnenkilometern durch die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS, die bereits im Kapitel 3.1 erläutert wurde, abermals verstärkt. Der hier angesprochene Effekt beruht – wie kurz zuvor angesprochen – auf einer Ausblendung von Lokzug-Fahrten als Leerfahrten im engsten Sinne, bezieht sich hier jedoch nicht auf die Ermittlung des Leerfahrtenanteils, sondern auf die Ermittlung von Leertonnenkilometern.

möglichen Frachtgewichten der Güterwagen, also von ihren Ladungskapazitäten. Diese Ladungskapazitäten konnten im Fall der WHE für den Erhebungszeitraum jedoch nicht konkret ermittelt werden. Daher wird im Sinne einer „Faute-de-mieux“-Argumentation ersatzweise dem vorgenannten Ansatz gefolgt, für die Ermittlung der Leertonnenkilometer vom tendenziell niedrigeren durchschnittlichen Frachtgewicht von 52 to pro Güterwagen als „proxy“ auszugehen.¹⁾ Bei 95 leeren Güterwagen, einem durchschnittlichen Frachtgewicht von 52 to pro Güterwagen und einer durchschnittlich zurückgelegten Fahrstrecke von 20 km ergeben sich im Erhebungszeitraum insgesamt 98.800 Leertonnenkilometer sowie ca. 10.978 Leertonnenkilometer pro Monat. Das entspricht einem Leertonnenkilometeranteil am gesamten regionalen Verkehrsaufkommen der WHE von 52,49 %.

3.5 SBB Cargo GmbH (SBB)

Aufgrund der hohen Anzahl bedienter Verkehrsverbindungen (Relationen)²⁾ und der oftmals international durchgeführten Verkehre sah sich die SBB³⁾ außerstande, Informationen über Leerfahrten und Leertonnenkilometer in ähnlicher Weise wie die anderen Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS zur Verfügung zu stellen. Eine computergestützte Ermittlung von Leertonnenkilometern lässt sich trotz der umfangreichen Datenbanken, auf die sich die SBB bei ihren Tourenplanungen stützen kann, laut Auskunft der SBB ebenso wenig durchführen.

Deswegen wurde vereinbart, eine erhebliche vergrößerte Ermittlung von Leerfahrten – oder entsprechenden Surrogaten – auf den Standort Duisburg-Rheinhausen zu beschränken. Die Fokussierung lag nahe, weil alle Transporte, die von der SBB im Rahmen des Verbundprojekts MAEKAS durchgeführt werden, über den Güterbahnhof Duisburg-Rheinhausen laufen. Der Erhebungszeitraum erstreckt sich auf den Monat September 2008. In diesem Zeitraum wurden seitens der SBB alle Güterwagen erfasst, die in Güterzügen ab oder nach Duisburg-Rheinhausen verkehrten.

Im September 2008 sind 1.138 Güterwagen in Duisburg-Rheinhausen eingegangen und 1.121 Güterwagen von Duisburg-Rheinhausen ausgegangen. Unter den insgesamt 2.259 Güterwagen befanden sich laut Einschätzung der SBB ca. 3 % leere Güterwagen. Das entspricht knapp 68 Güterwagen. Ihre Ladungskapazität beträgt jeweils durchschnittlich ca. 56 to. Daraus ergeben sich insgesamt 3.808 Leertonnen für den Standort Duisburg-Rheinhausen.

-
- 1) Das durchschnittliche tatsächliche Frachtgewicht pro Güterwagen kann allenfalls zufällig mit dessen Ladungskapazität als maximal möglichem Frachtgewicht übereinstimmen. In der Regel wird das durchschnittliche tatsächliche Frachtgewicht pro Güterwagen jedoch niedriger als dessen Ladungskapazität ausfallen. Daher führt dieser Ansatz für die Ermittlung der Leertonnenkilometer abermals zu einer systematischen Unterschätzung von (Leerfahrten und) Leertonnenkilometern.
 - 2) Eine Verkehrsverbindung – oder im Güterverkehrswesen synonym: eine Relation – ist eine Verbindung zwischen zwei Orten oder Haltepunkten in einem Verkehrsnetz, die von einem Güterverkehrsunternehmen, wie z.B. einem Eisenbahnverkehrsunternehmen, durch Touren seiner Transportmittel bedient wird, um zwischen den beiden verbundenen Orten bzw. Haltepunkten Güter zu transportieren. Die Länge einer Verkehrsverbindung ist gleich der Länge einer Tour, die ein Transportmittel auf den Strecken des Verkehrsnetzes durchführt, um vom einen der beiden verbundenen Orte bzw. Haltepunkte zum jeweils anderen der beiden verbundenen Orte bzw. Haltepunkte zu gelangen.
 - 3) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (SBB Cargo GmbH, ehemals Key Account Manager); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

Die nachfolgende Tabelle 4 gibt diese Überschlagsrechnung für die Ermittlung der Leertonnen wieder.

Bezugszeitraum: September 2008	
Bezugsort: Duisburg-Rheinhausen	
eingehende Güterwagen [Anzahl]	1.138
ausgehende Güterwagen [Anzahl]	1.121
Summe Güterwagen [Anzahl]	2.259
Leerwagenanteil	ca. 3 %
leere Güterwagen [Anzahl]	ca. 68
durchschnittliche Ladungskapazität [to]	ca. 56
Leertonnen [to]¹⁾	3.808

Tabelle 4: Ermittlung von Leertonnen für die SBB Cargo GmbH²⁾

Der relativ geringe Leerwagenanteil der SBB am Standort Duisburg-Rheinhausen von nur ca. 3 % lässt sich im Wesentlichen auf zwei Gründe zurückführen:

- Der Standort Duisburg-Rheinhausen ist in den kombinierten Verkehr eingebunden. Die Güter werden im kombinierten Verkehr im Hauptlauf per Güterzug am Standort Duisburg-Rheinhausen angeliefert und dort auf Lastkraftwagen für den Nachlauf verladen. Anschließend werden die Güterwagen, die zuvor entladen wurden, am Standort Duisburg-Rheinhausen mit anderen Gütern beladen, die von Lastkraftwagen im Vorlauf angeliefert wurden. Diese miteinander abgestimmten Ent- und Beladeaktivitäten in Duisburg-Rheinhausen als einem Knotenpunkt des kombinierten Verkehrs haben für die SBB den positiven Effekt, dass ihre Güterwagen am Standort Duisburg-Rheinhausen nur sehr selten leer ein- oder ausgehen.
- Auf die Stahltransporte, die von der SBB über den Standort Duisburg-Rheinhausen durchgeführt werden, wirken sich kontingente Randbedingungen besonders günstig aus. Im Ruhrgebiet befinden sich auf der einen Seite Unternehmen, die Stahlprodukte aus dem Süden beziehen und weiterverarbeiten, sowie auf der anderen Seite Stahlproduzenten, die Abnehmer ihrer Produkte im Süden beliefern. Daher ist es der SBB durch eine „intelligente“ Kombination³⁾ von Güterwagen am Standort Duisburg-Rheinhausen möglich, von der einen Kundengruppe eingehende Güterwagen direkt wieder mit Gütern für die andere Kundengruppe zu beladen.

Die 68 Güterwagen, die pro Monat durchschnittlich am Standort Duisburg-Rheinhausen leer eingehen oder vom Standort Duisburg-Rheinhausen leer ausgehen, werden zum größten Teil⁴⁾ in Pendel-

1) Exemplarische Berechnung: 68 leere Güterwagen mit einer Ladungskapazität von durchschnittlich 56 to ergeben insgesamt Leertonnen im Umfang von $68 \cdot 56 \text{ to} = 3.808 \text{ to}$.

2) Vgl. Anhang B.

3) Hierbei handelt es sich um eine ähnliche Kombination, wie sie im Kapitel 3.3 für die NDH im Hinblick auf Transporte der Güterarten Salz und Salzschlacke skizziert wurde.

4) Weiterhin befinden sich unter den leeren Güterwagen Kesselwagen, die nur mit demselben Gut wiederbeladen werden können, da sie meist noch Reststoffe enthalten. Das Hinzufügen anderer Stoffe würde zu ungewollten, oftmals schädlichen chemischen Reaktionen führen.

verkehren mit Containern eingesetzt.¹⁾ Bei einem Pendelverkehr bewegt sich ein Güterzug immer zwischen zwei fest vorgegebenen Orten. Die Güterwagen befinden sich oftmals im Eigentum anderer Unternehmen, sodass die SBB auf die Beladung dieser Güterwagen keinen unmittelbaren Einfluss nehmen kann. Einen direkten Zugriff hat die SBB nur auf 15 der 68 leeren Güterwagen. Diese 15 Güterwagen gehören zu Güterzügen, die Güterbahnhöfe in Köln oder Rotterdam bedienen. Die anderen Güterwagen lassen sich seitens der SBB nur bis Basel verfolgen und werden von dort aus an andere Eisenbahnverkehrsunternehmen vermittelt.

Im Folgenden werden in exemplarischer Weise die Leertonnenkilometer ermittelt, die für die zuvor betrachteten 68 leeren Güterwagen ausschließlich im deutschen Streckennetz der SBB anfallen. Die Ermittlung der Leertonnenkilometer beruht auf der bereits oben eingeführten Ladungskapazität von durchschnittlich ca. 56 to pro Güterwagen. Hinzu kommen die Längen der Verkehrsverbindungen zwischen dem Bezugsort Duisburg (Rheinhausen) einerseits sowie den Start- oder Zielhaltepunkten Basel, Köln und Rotterdam andererseits. Im Falle von Rotterdam wird allerdings wegen der Beschränkung auf das deutsche Streckennetz der SBB nur die Fahrstrecke vom oder bis zum Grenzbahnhof Emmerich berücksichtigt. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die SBB die Leertonnenkilometer im deutschen Streckennetz, die in der nachstehenden Tabelle 5 wiedergegeben sind.

Bezugszeitraum: September 2008 Bezugsort: Duisburg-Rheinhausen	Güterwagen [Anzahl]	Ladungskapazität je Güterwagen [to]	Transport- strecke [km]	Leertonnen- kilometer [to·km]
Relation Duisburg-Basel	53	56	549	1.629.432
Relation Duisburg-Köln	8	56	66	29.568
Relation Duisburg-Emmerich	7	56	64	25.088
Summe	68			1.684.088

Tabelle 5: Ermittlung von Leertonnenkilometern für die SBB Cargo GmbH²⁾

Die voranstehend ermittelten Leertonnenkilometer stellen nur eine grobe Überschlagsrechnung für die SBB dar. Auf die grundsätzlichen Schwierigkeiten, die der Ermittlung von Leerfahrten und Leertonnenkilometern bei der SBB entgegenstehen, wurde bereits zu Beginn dieses Kapitels hingewiesen. Darüber hinaus sind zwei weitere Einschränkungen bei der Interpretation der Angaben der Leertonnenkilometer für die SBB zu beachten.

Erstens handelt es sich um keine „flächendeckende“ Erfassung derjenigen Leertonnenkilometer, die für die SBB in einem Monat insgesamt anfallen. Vielmehr wurde aufgrund der eingangs erläuterten Ermittlungsschwierigkeiten lediglich ein „regionaler“ Ausschnitt betrachtet, der sich einerseits auf Güterzüge fokussiert, die den Standort Duisburg-Rheinhausen passieren, und dessen Reichweite auf das deutsche Streckennetz der SBB limitiert wurde.

Zweitens wurden Leertonnenkilometer der SBB streng genommen nur für einen sehr speziellen Fall von Leerfahrten erfasst: Es handelt sich um Leerfahrten im weiteren Sinne, bei denen ein Güterzug neben mehreren, in der Regel sogar zahlreichen beladenen Güterwagen auch einzelne leere Güter-

1) Diese Pendelverkehre sind in der Regel in den bereits oben erwähnten kombinierten Verkehr eingebettet.

2) Vgl. Anhang B.

wagen umfasst. Solche Leerfahrten im weiteren Sinne, bei denen die Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen teilweise, aber nicht vollständig ausgeschöpft werden, wurden bei der Ermittlung der Leerfahrten und Leertonnenkilometer der übrigen Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS nicht berücksichtigt, weil sich diese übrigen Praxispartner vor allem auf Leerfahrten im engeren Sinne konzentrieren und nur zum Teil auch Leerfahrten im engsten Sinne erfassen.¹⁾ Dagegen werden in den o.a. Beispielrechnungen der SBB weder Leerfahrten im engeren Sinne, bei denen ein Güterzug ausschließlich aus leeren Güterwagen besteht, noch Lokzug-Fahrten als Leerfahrten im engsten Sinne²⁾ beachtet. Aufgrund dieser unterschiedlichen Arten von Leerfahrten, die den Ermittlungen von Leertonnenkilometern bei der SBB einerseits und bei den übrigen Praxispartnern andererseits zugrunde liegen, sind die Angaben für die Leertonnenkilometer der Praxispartner mit der gebührenden wissenschaftlichen Vorsicht zu interpretieren.

3.6 Zusammenfassung

Zur besseren Übersicht und zur leichteren Vergleichbarkeit³⁾ der Angaben der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS werden in der nachfolgenden Tabelle 6 diejenigen Leertonnenkilometer zusammengefasst, die für den Zeitraum eines konkreten oder eines durchschnittlichen Monats für die Praxispartner ermittelt wurden.⁴⁾

Bezugszeitraum: ein Monat	Leertonnenkilometer pro Monat [to-km]	Anteil der Leertonnenkilometer am gesamten Verkehrsaufkommen während eines Monats
Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH (MVG)	9.176.439	38,02 %
Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG (NDH)	16.445.000	45,10 %
Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH (WHE)	10.978	52,49 %
SBB Cargo GmbH (SBB)	1.684.088	–

Tabelle 6: Leertonnenkilometer der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS

Die *absoluten* Angaben zu den Leertonnenkilometern eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, das als Praxispartner am Verbundprojekts MAEKAS teilnimmt, erweisen sich als wenig aussagekräftig, weil eine Relativierung im Hinblick auf das jeweils insgesamt bewältigte Verkehrsaufkommen fehlt. Beispielsweise ist schwer zu beurteilen, was die geringe Anzahl von nur 10.978 Leertonnen-

1) Vgl. dazu die Erläuterungen in den Kapiteln 3.2 bis 3.4.

2) Lokzug-Fahrten werden seitens der SBB als sehr seltene Ereignisse betrachtet. Da Güterzüge am Standort Duisburg-Rheinhausen starten und enden, werden eingehende Lokomotiven dort abgestellt und für einen nachfolgenden Güterzug wieder eingesetzt. Dadurch kommt es kaum zu Lokzug-Fahrten zwischen unterschiedlichen Haltepunkten. Deshalb wurden sie in den o.a. Beispielrechnungen nicht berücksichtigt.

3) Allerdings ist im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Angaben der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS zu beachten, dass den Ermittlungen von Leertonnenkilometern bei der SBB einerseits und bei den übrigen Praxispartnern andererseits in der Regel unterschiedliche Arten von Leerfahrten zugrunde liegen. Vgl. dazu die Erläuterungen am Ende des Kapitels 3.5.

4) Hinsichtlich der einschränkenden Prämissen, die den oben aufgelisteten Angaben für Leertonnenkilometer jeweils zugrunde liegen, wird auf die Ausführungen in den voranstehenden Kapiteln verwiesen.

kilometern pro Monat der WHE im Vergleich zur hohen Anzahl von 16.445.000 Leertonnenkilometern pro Monat der NDH aus betriebswirtschaftlicher Sicht auszudrücken vermag.

Dagegen erweisen sich die *relativen* Angaben zu den Leertonnenkilometern eines Eisenbahnverkehrsunternehmens als aufschlussreich. Sie lassen erkennen, dass drei von vier Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS *ähnliche Anteile von Leertonnenkilometern* am gesamten Verkehrsaufkommen während eines Monats aufweisen. Diese Leertonnenkilometeranteile variieren mit nur geringfügigen Abweichungen zwischen ca. 38 % und weniger ca. 52 %, liegen also – grob gesprochen – nahe am Mittelwert von ca. 45 %¹⁾. Hinzu kommt, dass diese Leertonnenkilometeranteile erstaunlich hoch liegen, weil sie nahezu die Hälfte des gesamten Verkehrsaufkommens während eines Monats ausmachen. Dies deutet darauf hin, dass grundsätzlich ein hohes Potenzial zur Vermeidung von Leerfahrten besteht, deren Ausmaß mithilfe von Leertonnenkilometern gemessen wird.²⁾

Als Wermutstropfen erweist sich, dass die Leertonnenkilometer der SBB nur in exemplarischer und stark vergrößernder Weise für den Standort Duisburg-Rheinhausen erfasst werden konnten. Daher war es nicht möglich, in der o.a. Tabelle 6 einen „belastungsfähigen“ Wert für den Anteil von Leertonnenkilometern am gesamten Verkehrsaufkommen der SBB anzugeben. Zwar hätte der Leerwagenanteil der SBB am Standort Duisburg-Rheinhausen von ca. 3 % angeführt werden können. Dagegen sprechen aber zumindest zwei Gründe. Erstens stimmen Leerwagenanteile mit den Anteilen von Leertonnenkilometern am gesamten Verkehrsaufkommen eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, die hier interessieren, inhaltlich nicht überein. Zweitens zeigt allein schon der Größenvergleich zwischen dem Wert von ca. 45 % für die Anteile von Leertonnenkilometern am gesamten Verkehrsaufkommen der Eisenbahnverkehrsunternehmen MVG, NDH und WHE auf der einen Seite sowie dem Wert von ca. 3 % für den Leerwagenanteil der SBB am Standort Duisburg-Rheinhausen, dass die beiden Anteilswerte vermutlich auf unterschiedliche Sachverhalte bezogen sind und daher nicht „sinnvoll“ miteinander verglichen werden können. Aus den beiden vorgenannten Gründen bleibt es ein Desiderat für das Verbundprojekt MAEKAS, die Leerfahrten und die damit einhergehenden Leertonnenkilometer der SBB umfassender – also nicht nur auf den Standort Duisburg-Rheinhausen beschränkt und von weniger vereinfachenden Annahmen restringiert – zu berücksichtigen, als es bislang geschehen ist.

1) Der ungewichtete arithmetische Mittelwert beträgt exakt 45,20 %.

2) Allerdings sind auch die Vorbehalte zu beachten, die von den Praxispartnern hinsichtlich der Vermeidbarkeit von Leerfahrten geäußert und in den voranstehenden Kapiteln 3.2 bis 3.5 festgehalten wurden.

4 Probleme bei der Vermeidung von Leerfahrten

4.1 Einführung

Bei der Vermeidung von Leerfahrten muss berücksichtigt werden, dass es auf der einen Seite Bereiche gibt, in denen ein großes Potenzial besteht, Leerfahrten zu unterbinden. Auf der anderen Seite existiert jedoch auch eine Vielzahl von Hemmnissen, die eine Vermeidung von Leerfahrten behindern können. In diesem Kapitel¹⁾ werden einige wesentliche Varianten dieser Hemmnisse beispielhaft erläutert.

4.2 Güterwagen

Güterwagen zählen zu den wichtigsten Betriebsmitteln eines Eisenbahnverkehrsunternehmens. In der Praxis befinden sich die meisten Güterwagen im Eigentum eines Eisenbahnverkehrsunternehmens. Allerdings sind Güterwagen mit sehr hohen Anschaffungs- und auch Wartungskosten verbunden. Daher besteht aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein hoher Anreiz, die Ladungskapazitäten der Güterwagen möglichst hoch mit Transportaufträgen auszulasten, um nicht nur, aber insbesondere die Anschaffungs- und Wartungskosten zu decken. Dabei werden, wie im gesamten hier vorgelegten Projektbericht, Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen vorausgesetzt, die zur vollständigen Kostendeckung erforderlich sind.

In seltenen Fällen kommt es vor, dass einzelne Kunden eines Eisenbahnverkehrsunternehmens eigene Güterwagen besitzen. Gängiger ist die Alternative, dass Kunden Güterwagen von einer spezialisierten Equipment-Vermietungsgesellschaft mieten und ihre Güter durch ein Eisenbahnverkehrsunternehmen mit diesen Mietgüterwagen befördern lassen.²⁾ Aber auch in diesen beiden Fällen des Fremdeigentums an Güterwagen besteht das Problem der hohen Anschaffungs- und Wartungskosten. Es findet lediglich eine Problemverschiebung derart statt, dass jetzt die Kunden eines Eisenbahnverkehrsunternehmens oder die Equipment-Vermietungsgesellschaften an einer möglichst hohen Auslastung der Ladungskapazitäten ihrer Güterwagen interessiert sind.

Das Streben nach einer möglichst hohen Kapazitätsauslastung von Güterwagen hängt sehr eng mit dem Bemühen zusammen, Leerfahrten von Güterwagen so weit wie möglich zu vermeiden. Beides wird einerseits von technischen Güterwagenmerkmalen und andererseits von ökonomischen Randbedingungen des Marktes für Gütertransporte wesentlich beeinflusst. Die zugrunde liegenden Zusammenhänge werden im Folgenden näher erläutert.

Aufgrund unterschiedlicher Bauarten können Güterwagen verschiedene technische Merkmale aufweisen. Güterwagen, die sich hinsichtlich einer typischen Kombination technischer Merkmale ähneln, werden unter einen Güterwagentyp subsumiert. Die zu transportierenden Güterarten benötigen

1) Dieses Kapitel basiert zu größeren Teilen auf der Seminararbeit JENTJENS (2008), S. 11-13.

2) Vgl. BERNDT (2001), S. 145 f.

oftmals eine güterartspezifische Bauart von Güterwagen, sodass sie nur von einem speziellen Güterwagentyp transportiert werden können.¹⁾

Das Potenzial eines Eisenbahnverkehrsunternehmens zur Vermeidung von Leerfahrten hängt im Hinblick auf seine Ausstattung mit Güterwagen im Wesentlichen davon ab, in welchem Ausmaß es mit seinen Güterwagen unterschiedliche Güterarten zu transportieren vermag. Denn Leerfahrten (im engeren oder im weiteren Sinne) werden oftmals dadurch verursacht, dass für den Transport einer Güterart in einem Segment (Hauptlauf) einer Tour ein bestimmter, güterartspezifischer Güterwagentyp erforderlich ist. Die Güterwagen dieses Güterwagentyps verkehren dann auf vor- oder nachgelagerten Segmenten derselben Tour (Vor- bzw. Nachlauf) leer²⁾, wenn es nicht gelingt, sie im Vor- oder Nachlauf mit den Gütern anderer Transportaufträge zu beladen. Falls für den Vor- oder Nachlauf zwar andere Transportaufträge (mit positiven Deckungsbeiträgen) vorliegen, sich aber auf Güterarten erstrecken, die vom Güterwagentyp des Hauptlaufs aufgrund bautechnischer Inkompatibilitäten nicht transportiert werden können, entsteht für die Güterwagen des für den Hauptlauf güterartspezifischen Güterwagentyps eine *vermeidbare* Leerfahrt. Dies wäre nicht der Fall, wenn die Güterwagen, die im Hauptlauf eingesetzt werden, zu einem Güterwagentyp gehören würden, der bautechnisch so flexibel ausgelegt ist, dass mit seiner Hilfe auch die Güterarten der anderen Transportaufträge des Vor- oder Nachlaufs transportiert werden können.

Das Vermeidungspotenzial für Leerfahrten fällt also umso größer aus, je vielfältiger das Spektrum unterschiedlicher Güterarten ist, das sich mit Güterwagen eines gegebenen Güterwagentyps transportieren lässt. Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive betrifft dies die variationale Kapazität – als einen Teil der qualitativen Kapazität – des Güterwagentyps. Des Öfteren wird in dieser Hinsicht auch von der Einsatzbreite, dem Anwendungsspektrum oder der Universalität eines Güterwagentyps gesprochen.

Zugleich verspricht eine große Einsatzbreite des Güterwagentyps eine höhere Auslastung der Ladungskapazitäten des zugehörigen Güterwagens. Denn für einen Güterwagen, der typbedingt eine große Vielfalt unterschiedlicher Güterarten zu transportieren vermag, besteht oftmals eine größere Chance, für die Durchführung unterschiedlicher Transportaufträge eingesetzt und entsprechend ausgelastet zu werden. Fokussiert sich dagegen ein Eisenbahnverkehrsunternehmen innerhalb seines Güterwagenparks (als Teil seines Equipments) auf hochspezialisierte Güterwagentypen mit jeweils nur geringer Einsatzbreite, führt dies tendenziell zu einer Vermehrung von Leerfahrten.³⁾ Wegen der Spezialisierung der Güterwagentypen im eigenen Fuhrpark muss auf Transportaufträge verzichtet werden, die zwar freie Ladungskapazitäten der betroffenen Güterwagen auslasten könnten, deren Güterarten aber nicht zum Anwendungsspektrum des eingesetzten Güterwagentyps passen.

Die voranstehenden Ausführungen erweisen sich nicht als allgemeingültig, sondern gelten nur unter bestimmten, zu explizierenden Randbedingungen („situativer Kontext“) und besitzen nur die Qualität von Tendenzaussagen. Sie beruhen auf der impliziten Voraussetzung, dass die Transportaufträge, um die sich ein Eisenbahnverkehrsunternehmen bewirbt, durch eine große Vielfalt unterschied-

1) Vgl. BERNDT (2001), S. 140 f.; MÜHLHANS (1997), S. 303. Interviewpartner: Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

2) Vgl. MÜHLHANS (1997), S. 303.

3) Vgl. MÜHLHANS (1997), S. 303.

licher Güterarten gekennzeichnet sind. Diese Präsupposition muss jedoch in der betrieblichen Praxis keineswegs erfüllt sein. Im Extremfall verfügt ein Eisenbahnverkehrsunternehmen über einen stabilen Kundenkreis, der Transporte von großen Mengen derselben Güterart oder sehr ähnlicher Güterarten über lange Zeiträume nachfragt. Ein solcher Extremfall liegt z.B. vor, wenn ein Eisenbahnverkehrsunternehmen auf Transporte von Massengütern wie Erzen, Kokskohle oder Schrott spezialisiert ist und auf einem langfristigen stabilen Transportmarkt agiert, auf dem die Transportnachfragen der Kunden keinen starken Schwankungen unterliegen. Solche Verhältnisse herrschten in der Vergangenheit für Eisenbahnverkehrsunternehmen des Ruhrgebiets vor, die vornehmlich für Unternehmen der Montanindustrie Massengüter transportierten.

Die Montanindustrie des Ruhrgebiets ist jedoch einer schwerwiegenden Strukturkrise weitgehend zum Opfer gefallen. Daher stehen die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Ruhrgebiets (und darüber hinaus), die als Praxispartner im Verbundprojekt MAEKAS kooperieren, vor der Herausforderung, nicht mehr von den – aus ihrer Sicht – „paradiesischen“ Verhältnissen eines stabilen Transportmarktes für Massengüter profitieren zu können. Stattdessen sehen sie sich mit radikalen Strukturveränderungen des Transportmarktes konfrontiert, die sich im Wesentlichen durch drei Merkmale kennzeichnen lassen. Erstens hat die Vielfalt der zu transportierenden Güterarten stark zugenommen (Güterheterogenität). Zweitens sind die durchschnittlichen Gütermengen je Transportauftrag drastisch gesunken (Kleinteiligkeit) und schwanken von Transportauftrag zu Transportauftrag mitunter erheblich (Volatilität). Drittens hat sich der Wettbewerb auf der Anbieterseite von Transportdienstleistungen deutlich verschärft (Wettbewerbsintensität). Dies gilt sowohl innerhalb der Branche der Eisenbahnverkehrsunternehmen (Branchenwettbewerb) als auch zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen und Verkehrsunternehmen, die sich auf andere Verkehrsmittel – wie z.B. Lastkraftwagen – stützen (Substitutionswettbewerb). Aufgrund dieser hohen Wettbewerbsintensität besitzt der Markt für Transportdienstleistungen die Qualität eines Käufermarktes, auf dem die Kunden der nachgefragten Transportdienstleistungen gegenüber den Dienstleistungsanbietern eine relativ große Marktmacht besitzen. Folglich sehen sich die Eisenbahnverkehrsunternehmen einem hohen Marktdruck ausgesetzt, sich „marktaktiv“ zu verhalten, also von sich aus auf potenzielle Kunden zuzugehen und sich aktiv um die Akquisition von Transportaufträgen zu bemühen.

In diesem situativen Kontext, der zuvor in der hier gebotenen Kürze nur grob skizziert werden konnte, treffen die o.a. Tendenzaussagen zu, dass das Vermeidungspotenzial für Leerfahrten und die Auslastung der Ladungskapazitäten umso größer ausfallen, je vielfältiger das Spektrum unterschiedlicher Güterarten ist, die sich mit Güterwagen eines gegebenen Güterwagentyps transportieren lassen. Dies liegt vor allem an der Randbedingung der Güterheterogenität. Aber auch die Randbedingungen der Kleinteiligkeit, der Volatilität und der Wettbewerbsintensität tragen indirekt dazu bei, Güterwagentypen mit großer Einsatzbreite im Hinblick auf Leerfahrtenvermeidung und Kapazitätsauslastung zu bevorzugen.

Besonders vielfältig einsetzbar sind gedeckte Güterwagen und Flachwagen, da sie für ein breites Spektrum unterschiedlicher Güterarten geeignet sind.¹⁾

1) Vgl. BERNDT (2001), S. 153-156.

Gedekte Güterwagen (vgl. Abbildung 6) besitzen breite Schiebetüren an den Seiten, die eine einfache Be- und Entladung mit dem Gabelstapler ermöglichen. Sie können daher für eine Vielzahl von unterschiedlichen Güterarten verwendet werden. Dazu gehören auch empfindliche Schüttgüter, wie z.B. denaturiertes Getreide und Maiskleber.



Abbildung 6: gedeckter Güterwagen mit Schwerkraftentladung

Offene Flachwagen (vgl. Abbildung 7) eignen sich hingegen besonders für Güterarten, die wegen ihrer großen Abmessungen durch die Türen eines gedeckten Güterwagens nur schwer be- und entladen werden können, sich aber leicht über die niedrigen Stirn- und Seitenborde eines offenen Flachwagens heben lassen. Dazu zählen besonders unempfindliche Güter, wie z.B. Stammholz und Rohre.



Abbildung 7: offener Flachwagen

Eine Voraussetzung zur Verwendung von offenen Flachwagen ist allerdings, dass die Güterarten für ihren Transport mit niedrigen Stirn- und Seitenborden auskommen. Die Stirn- und Seitenborden dienen der Ladungssicherung und begrenzen die Kipp- und Verrutschgefahr für die transportierten

Güter. Weiterhin müssen die zu transportierenden Güterarten gegenüber Witterungseinflüssen relativ unempfindlich sein. Diese Anforderungen werden z.B. von Stahlcoils erfüllt.¹⁾

Es gibt zahlreiche weitere Güterwagenarten (siehe Abbildungen 8, 9 und 10), die nur wenige Güterarten transportieren können oder sogar auf nur eine Güterart spezialisiert sind. Hierunter fallen z.B. Schüttgutkippwagen, die zur Entladung seitlich gekippt werden oder mit einem Kran entladen werden müssen, sowie Kesselwagen, die nur für spezielle Güterarten, wie etwa Mineralöle und Gase, verwendet werden können.



Abbildung 8: Silowagen mit pneumatischer Entleerung
speziell für Schüttgüter wie Zement, Kalk oder Dolomit

Bei den letztgenannten weiteren Güterwagenarten ist das Vermeidungspotenzial für Leerfahrten wesentlich geringer als bei vielfältig einsetzbaren Güterwagen, wie z.B. den zuvor angeführten gedeckten Güterwagen und offenen Flachwagen.

1) Vgl. BERNDT (2001), S. 156.



Abbildung 9: vierachsiger offener Flachwagen mit festen Rungen
besonders geeignet für unempfindliche Güter wie bspw. Stammholz und Rohre



Abbildung 10: vierachsiger gedeckter Güterwagen mit Lademulden und Schiebedach
speziell geeignet für nässempfindliche Blechrollen

4.3 Güterarten

Einige Güterarten weisen bestimmte physikalische oder chemische Merkmale auf, die nicht nur den Transport mit einem bestimmten Güterwagentyp erfordern¹⁾, sondern es darüber hinaus auch erschweren, einen bereits entladene Güterwagen mit Gütern derselben oder einer anderen Güterart erneut zu beladen. Solche Schwierigkeiten drohen vor allem dann, wenn sich nach der Entladung eines Güterwagens in diesem noch Reststoffe der zuvor transportierten Güter befinden. Diese Reststoffe können beim nächsten Beladen mit Gütern derselben oder einer anderen Güterart zu einer unerwünschten, unter Umständen sogar gefährlichen physikalischen oder chemischen Reaktion führen.²⁾ Daher müssen die betroffenen Güterwagen zunächst gründlich gereinigt, d.h. vor allem von Reststoffen befreit werden, damit eine sichere Beladung mit Gütern derselben oder einer anderen Güterart gewährleistet werden kann. Das Reinigen der Güterwagen nimmt allerdings nicht nur sehr viel Zeit in Anspruch, sondern verursacht auch erhebliche Kosten.³⁾ Deshalb ist stets abzuwägen, ob sich im Einzelfall eine Reinigung als wirtschaftlich vorteilhaft erweist – oder ob eine Leerfahrt zwecks Vermeidung größerer wirtschaftlicher Nachteile bewusst in Kauf genommen wird.

Die vorgenannten Verhältnisse liegen vor allem in der chemischen Industrie vor. Zum Transport einer chemischen Güterart wird in der Regel ein spezieller Güterwagentyp – wie z.B. ein Kesselwagen – benötigt, der nur mit gleichartigen oder ähnlichen Gütern beladen werden kann und beim Wechsel zu einer ähnlichen Güterart umfangreicher Reinigungsarbeiten bedarf. In diesem Fall werden Güterzüge oftmals im Pendelverkehr eingesetzt. Die Güterwagen verkehren hierbei in einer Richtung beladen (Hauptlauf) und in der jeweils entgegengesetzten Richtung (Nebenlauf) leer.⁴⁾ Eine Reduzierung von Leerfahrten erweist sich bei einem solchen Pendelverkehr oftmals nur dann als wirtschaftlich vorteilhaft, wenn für den Nebenlauf andere Transportaufträge für die gleiche Güterart vorliegen, sodass auf Reinigungsarbeiten zwischen den Durchführungen der verschiedenen Transportaufträge verzichtet werden kann. Derart „glückliche“ Umstände liegen in der betrieblichen Praxis jedoch nur selten vor.

Neben Güterarten der chemischen Industrie zählen auch staubige Güterarten, wie z.B. Kohle und Gips, zu jenen Fällen, in denen Güterwagen vor einer Beladung mit einer anderen Güterart gründlich gereinigt werden müssen. Würde beispielsweise ein Güterwagen, der vorher mit Kohle beladen war, nach seiner Entladung ohne zwischenzeitliche Reinigung Gips transportieren, wäre der Gips mit Kohlenstaub verschmutzt und könnte unter Umständen nicht mehr weiterverarbeitet werden.⁵⁾ Wenn die Zwischenreinigung zu viel Zeit benötigt oder zu hohe Kosten verursacht, ist es wirtschaftlich vorteilhaft, auf die Wiederbeladung des Güterwagens mit Gips nach einem Kohletrans-

-
- 1) Darauf wurde schon im voranstehenden Kapitel 4.2 eingegangen.
 - 2) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (ehemals SBB Cargo GmbH, Key Account Manager); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 3) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (ehemals SBB Cargo GmbH, Key Account Manager); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 4) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.
 - 5) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (ehemals SBB Cargo GmbH, Key Account Manager); Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb); Herr Mirko Straus (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

port zu verzichten, obwohl der Güterwagen aufgrund seines Typs technisch in der Lage wäre, sowohl Kohle als auch Gips zu transportieren. In diesem Fall wird eine technisch vermeidbare Leerfahrt des Güterwagens nach der Kohleentladung aus wirtschaftlichen Gründen in Kauf genommen.

Die voranstehenden Erläuterungen verdeutlichen, dass die Vermeidung von Leerfahrten aus betriebswirtschaftlicher Perspektive keinen Selbstzweck darstellt. Vielmehr erweist es sich als (betriebs-) wirtschaftlich vorteilhaft, Leerfahrten immer dann hinzunehmen, wenn die wirtschaftlichen Folgen einer Leerfahrt weniger Bedeutung besitzen als die wirtschaftlichen Folgen derjenigen Aktivitäten, die zur Vermeidung dieser Leerfahrt ergriffen werden müssten. Beispielsweise können die Reinigungskosten für einen Güterwagen größer sein als die (positiven) Deckungsbeiträge, die aufgrund des Verzichts auf zusätzliche Transportaufträge als Opportunitätskosten entgehen, weil die Güterwagenreinigung unterlassen wird. In einem solchen Fall ist es betriebswirtschaftlich rational, anstelle der Güterwagenreinigung eine Leerfahrt des Güterwagens durchzuführen. Daher kann betriebswirtschaftliche Rationalität ein weiteres Hemmnis im Hinblick auf die Vermeidung von Leerfahrten darstellen.

Aus den vorgenannten, sowohl im Kapitel 4.2 als auch im Kapitel 4.3 erläuterten Gründen eignen sich für eine Vermeidung von Leerfahrten am ehesten Güterarten, die zwei Bedingungen erfüllen. Erstens müssen sie eine feste Konsistenz aufweisen und zweitens dürfen sie keine oder nur geringfügige Anforderungen an die technischen Merkmale von Güterwagen stellen. Die feste Konsistenz einer Güterart führt in der Regel dazu, dass vor ihrem Be- oder nach ihrem Entladen Reinigungsarbeiten nicht oder nur in geringfügigem Umfang erforderlich sind. Dies trifft im Allgemeinen auf Stück- und Schüttgüter zu, aber nicht auf Fließgüter und gasförmige Güter. Wenn die Anforderungen an technische Merkmale von Güterwagen keine nennenswerte Rolle spielen, lässt sich die Güterart mit einer Vielzahl unterschiedlicher Güterwagentypen transportieren, insbesondere gestatten sie den Einsatz von Güterwagentypen mit großer Einsatzbreite, wie z.B. die oben erwähnten gedeckten Güterwagen und offenen Flachwagen. Die beiden voranstehenden Bedingungen werden insbesondere von palettierten Gütern erfüllt¹⁾, daneben aber auch von Holz, Stahl, Rohren, Schrott und ähnlichen Güterarten.

4.4 Regionale Nähe

Die Vermeidung von Leerfahrten stellt auch ein regionales Problem dar. Dies ist der Fall, wenn mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen mehrere Transportaufträge, die sie eigenständig durchführen könnten, in einer Kooperation zum wechselseitigen Vorteil so miteinander bündeln möchten, dass bei den Touren für die kooperative Durchführung der Transportaufträge insgesamt weniger Leerfahrten anfallen, als bei der jeweils eigenständigen Transportdurchführung entstanden wären. Wenn dies gelingt, liegt ein „klassischer“ Synergieeffekt oder – mit anderen Worten – eine „intelligente“ Bündelung von Transportaufträgen vor. In den beiden Abbildungen 11 und 12 auf der nächsten Seite wird dieser Synergie- oder Bündelungseffekt in idealtypischer Weise verdeutlicht.²⁾

1) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

2) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

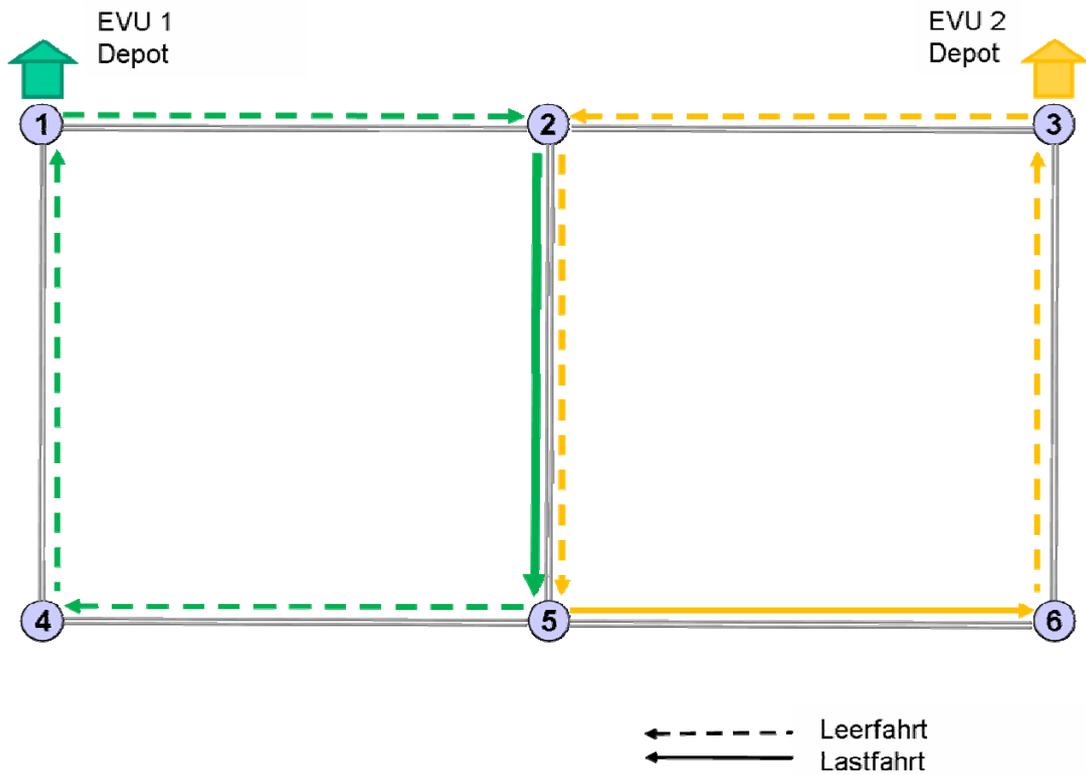


Abbildung 11: Synergie- oder Bündelungseffekt – Situation vor der Bündelung von Transportaufträgen

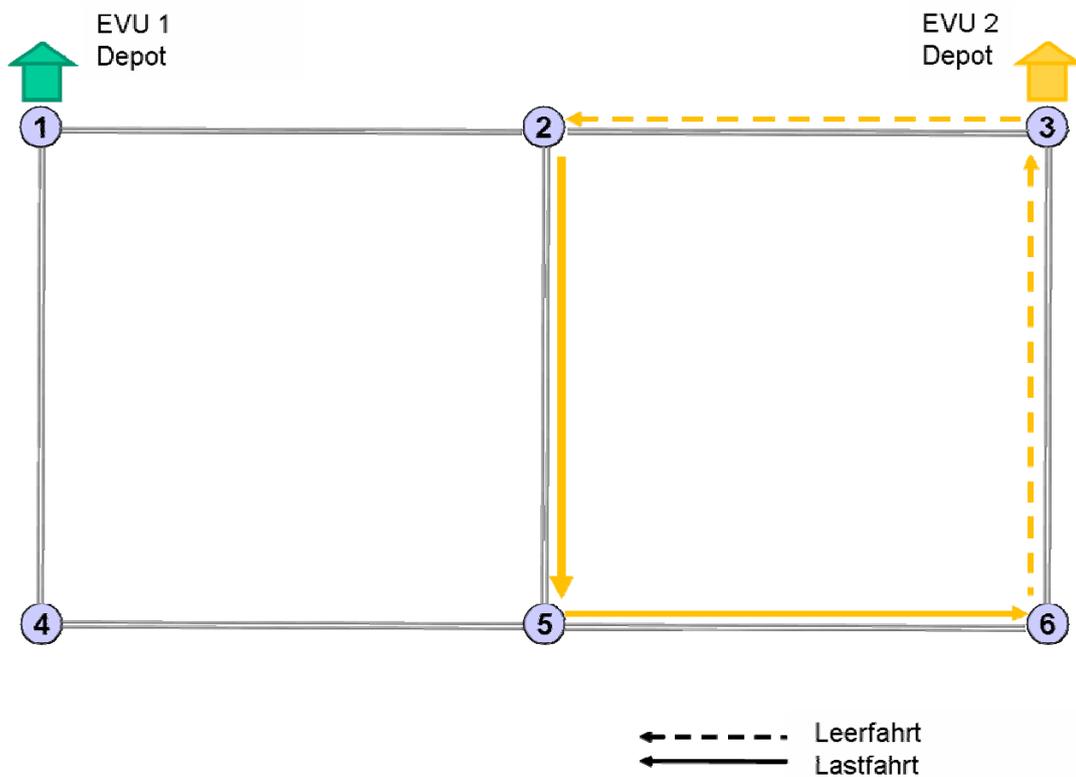


Abbildung 12: Synergie- oder Bündelungseffekt – Situation nach der Bündelung von Transportaufträgen

Im Beispiel der Abbildungen 11 und 12 wird der Synergie- oder Bündelungseffekt dadurch realisiert, dass die Leerfahrt¹⁾ eines der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU 2) zwischen zwei Haltepunkten (2 und 5) durch eine Lastfahrt eines anderen der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU 1) zwischen denselben Haltepunkten substituiert wird und hierbei die ansonsten eigenständigen Touren der beiden betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen zu nur noch einer gemeinsamen, kooperativ durchgeführten Tour zusammengelegt werden. Auf jeden Fall wird die Leerfahrt des erstgenannten Eisenbahnverkehrsunternehmens (EVU 2) zwischen den zwei Haltepunkten (2 und 5) vermieden. Unter günstigen Umständen kann das zweitgenannte Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU 1) sogar eine Leerfahrt zum ersten Haltepunkt (2) hin und vom zweiten Haltepunkt (5) fort vermeiden. Dies ist in der nachstehenden Abbildung 12 der Fall.

Eine derart „intelligente“ Bündelung von Transportaufträgen bietet sich für überwiegend *regional tätige*²⁾ Eisenbahnverkehrsunternehmen nur dann an, wenn sie überwiegend Transportaufträge aus derselben Region als Einzugsgebiet³⁾ akquirieren und durchführen. Eine Bündelungsvoraussetzung besteht also in der *regionalen Nähe* der an der Bündelung teilnehmenden Eisenbahnverkehrsunternehmen. Falls diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, wäre es nicht möglich, gemeinsame Fahrstrecken zwischen jeweils zwei gleichen Haltepunkten zu identifizieren, die eine Substitution von Leerfahrten des einen Kooperationspartners durch Lastfahrten eines anderen Kooperationspartners gestatten.

Daher erweist es sich als ein Hemmnis für die spezielle Variante einer kooperationsinduzierten Vermeidung von Leerfahrten, wenn überwiegend regional tätige Eisenbahnverkehrsunternehmen zwar grundsätzlich miteinander kooperieren möchten, sich aber ihre Einzugsgebiete nur wenig oder überhaupt nicht überschneiden.

Allerdings stellt die regionale Nähe der an einer Kooperation teilnehmenden Eisenbahnverkehrsunternehmen nur eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für die Realisierbarkeit der o.a. Synergie- oder Bündelungseffekte dar. Um diese Effekte tatsächlich realisieren zu können, müssen die Güterarten, die von den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen auf einer gemeinsam durchgeführten Tour mit denselben Güterwagen transportiert werden, hinsichtlich des erforderlichen Güterwagentyps übereinstimmen (vgl. Kapitel 4.2) und sie dürfen keine oder nur geringfügige Reinigungsaktivitäten zwischen Ent- und Beladungen der betroffenen Güterwagen erfordern (vgl. Kapitel 4.3). Diese Voraussetzungen lassen sich in der betrieblichen Praxis oftmals nur

-
- 1) Grundsätzlich kommen dafür alle vier Arten von Leerfahrten in Betracht, die im Kapitel 2.1 vorgestellt wurden. Es kann sich also um Leerfahrten im engsten, im engeren, im weiteren oder auch im weitesten Sinne handeln.
 - 2) Die Voraussetzung überwiegend regionaler Geschäftstätigkeit ist im Verbundprojekt MAEKAS erfüllt, weil drei (MVG, NDH und WHE) der vier Praxispartner Eisenbahnverkehrsunternehmen darstellen, die einen regionalen Schwerpunkt ihrer Geschäftstätigkeiten in der Region Ruhrgebiet und „angrenzenden Arealen“ (vor allem im Hinblick auf die NDH) aufweisen.
 - 3) Das Einzugsgebiet eines Eisenbahnverkehrsunternehmens ist derjenige geografisch spezifizierbare Bereich, aus dem die potenziellen und tatsächlichen Kunden des Eisenbahnverkehrsunternehmens stammen. Bei überwiegend regional tätigen Eisenbahnverkehrsunternehmen sind die meisten Kunden in der geografischen Nähe (Region) der Eisenbahnverkehrsunternehmen angesiedelt, weil die Stärken dieser Eisenbahnverkehrsunternehmen in den hervorragenden Kenntnissen der Region liegen. Das betrifft sowohl Kenntnisse über die Eigenarten der Strecken des regionalen Verkehrsnetzes als auch Kenntnisse über die speziellen Transportanforderungen von sowohl potenziellen als auch aktuellen Kunden, die in der Region angesiedelt sind.

dann erfüllen, wenn von den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen gleichartige Güter transportiert werden.¹⁾

Darüber hinaus wird zuweilen als weitere Voraussetzung für kooperationsinduzierte Synergie- oder Bündelungseffekte angeführt, dass die Gütermengen (Gewichte) derjenigen Transportaufträge, die bei der kooperativen Durchführung einer Tour mit denselben Güterwagen erfüllt werden sollen, weitgehend übereinstimmen müssen, um leere Güterwagen zu vermeiden.²⁾ Die Erfüllung dieser Anforderung ist zwar hilfreich, aber keineswegs unter allen vorstellbaren Auftragskonstellationen notwendig. Beispielsweise lässt sich vorstellen, dass die Ladungskapazität eines Güterwagens durch den Transportauftrag für ein erstes Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht vollständig ausgeschöpft wird. Wenn die Güter dieses Transportauftrags in einem Haltepunkt entladen sind und derselbe Güterwagen mit den Gütern eines anderen Transportauftrags für ein zweites, kooperierendes Eisenbahnverkehrsunternehmen beladen werden kann, dann ist es nicht nur unschädlich, sondern im Interesse einer möglichst hohen Kapazitätsauslastung sogar erwünscht, dass die Gütermenge des Transportauftrags für das zweite Eisenbahnverkehrsunternehmen größer ausfällt als die Gütermenge des Transportauftrags für das erste Eisenbahnverkehrsunternehmen (solange die Ladungskapazität des betroffenen Güterwagens nicht überschritten wird).

4.5 Sonstige Aspekte

Wenn eine Leerfahrt von Güterwagen auf einem Toursegment dadurch vermieden werden soll, dass die Güterwagen auf diesem Toursegment zur Erfüllung eines zusätzlichen Transportauftrags eingesetzt werden, dann müssen die Güterwagen im Haltepunkt zu Beginn des Toursegments mit den Gütern beladen und im Haltepunkt am Ende des Toursegments entsprechend entladen werden. Diese Be- und Entladevorgänge erfordern Zeit und verursachen zusätzliche Kosten.³⁾

Die Be- und Entladezeiten können sich als prohibitiv erweisen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Be- und Entladezeiten dazu führen, dass der Güterzug auf seiner Tour einen späteren Haltepunkt nicht mehr zu einem Zeitpunkt zu erreichen vermag, der mit einem (anderen) Kunden fest vereinbart wurde, und wenn das Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht bereit ist, bei einer entsprechenden Terminüberschreitung den Goodwillverlust auf Kundenseite oder eine unter Umständen fällige Konventionalstrafe hinzunehmen. Ebenso lässt sich vorstellen, dass die zusätzlich anfallenden Be- und Entladezeiten eine gravierende Verlängerung der Tourdauer bewirken und das betroffene Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht bereit ist, diese Verlangsamung der Tourdurchführung auf sich zu nehmen, weil es sich einem intensiven Zeitwettbewerb ausgesetzt fühlt.

Darüber hinaus könnte das Eisenbahnverkehrsunternehmen die Zusatzkosten für die erforderlichen Be- und Entladeaktivitäten scheuen. Dieses potenzielle Argument zugunsten eines Verzichts auf eine Leerfahrtvermeidung vermag jedoch nicht zu überzeugen. Denn es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass zusätzliche Transportaufträge nur dann in Erwägung gezogen werden, wenn sie

1) Interviewpartner: Herr Mirko Strauss (Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, Prokurist); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

2) Vgl. MÜHLHANS (1997), S. 303.

3) Interviewpartner: Herr Michael Kirschner (ehemals SBB Cargo GmbH, Key Account Manager); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels.

einen positiven Deckungsbeitrag aufweisen. In die Berechnung des Deckungsbeitrags eines Transportauftrags gehen auch die Kosten für die erforderlichen Be- und Entladeaktivitäten ein. Daher sollten diese be- und entladebedingten Zusatzkosten nicht abschrecken, da sie durch einen insgesamt positiven Deckungsbeitrag auf jeden Fall kompensiert werden.

Bei Pendelverkehren, bei denen fest konfigurierte Güterzüge zwischen zwei Haltepunkten hin und her pendeln, kann die zu transportierende Gütermenge von Tour zu Tour schwanken. Daher ist es möglich, dass sich innerhalb der fest konfigurierten Güterzüge immer wieder einzelne leere Güterwagen befinden. Wenn keine andere Auslastung dieser leeren Güterwagen durch zusätzliche Transportaufträge gefunden wird, ließen sich die Leerfahrten dieser einzelnen Güterwagen nur dadurch vermeiden, dass die Konfiguration der Güterzüge von Tour zu Tour neu geplant wird. Die zusätzlichen Zeitbedarfe und Kosten für die wiederholten Neuplanungen werden von Eisenbahnverkehrsunternehmen mitunter als inakzeptabel empfunden. Dies wirkt sich hemmend auf die grundsätzlich mögliche Vermeidung der Leerfahrten bei Pendelfahrten mit fest konfigurierten Güterzügen aus.

Ein weiteres Hemmnis, das der Vermeidung von Leerfahrten im Wege stehen kann, ist die „Marktpassivität“ von Eisenbahnverkehrsunternehmen. Im Kapitel 4.2 wurde der situative Kontext skizziert, in dem sich die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS in der Region Ruhrgebiet (einschließlich „angrenzender Areale“) zurzeit befinden. In diesem Zusammenhang wurde erläutert, dass sich Eisenbahnverkehrsunternehmen in dieser Region darum bemühen müssen, auf potenzielle Kunden von sich aus zuzugehen und aktiv Transportaufträge zu akquirieren. Falls ein Eisenbahnverkehrsunternehmen dieses „marktaktive“ Verhaltensrepertoire noch nicht beherrscht oder aus sonstigen Gründen nicht anwenden möchte, ist es unter den aktuell obwaltenden Marktbedingungen kaum in der Lage, diejenigen zusätzlichen Transportaufträge zu gewinnen, die zur Vermeidung von Leerfahrten erforderlich wären.

5 Beurteilung der Kooperationseffekte

5.1 Überblick

Im Verbundprojekt MAEKAS kooperieren sowohl mehrere überwiegend regional tätige als auch ein international agierendes Eisenbahnverkehrsunternehmen miteinander in der Gestalt eines virtuellen Unternehmens. Um die „Wirksamkeit“ oder *Effektivität* einer solchen Kooperation betriebswirtschaftlich seriös beurteilen zu können, werden *Kriterien* benötigt, anhand derer sich beurteilen lässt, ob einzelne Auswirkungen – oder synonym: Effekte – der Kooperation als wirtschaftlich vorteilhaft oder nachteilhaft einzustufen sind.¹⁾ Als solche Beurteilungskriterien bieten sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht stets (*Formal-*) *Ziele* an, die das Handeln der betrieblichen Entscheidungsträger faktisch leiten oder leiten sollten.²⁾

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS verfolgen mit ihrer Kooperation vor allem zwei *strategische Ziele*.

Erstens möchten die Eisenbahnverkehrsunternehmen ihre *Wettbewerbsfähigkeit* am Markt für schienegebundene Gütertransporte nachhaltig stärken. Die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit stellt allerdings keinen Selbstzweck dar. Vielmehr dient sie als Mittel zum Zweck, für die Eisenbahnverkehrsunternehmen sowohl Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen von neuen Kunden (Neukundenakquisition) als auch zusätzliche Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen von bereits vorhandenen Kunden zu gewinnen (Geschäftsausbau mit Bestandskunden). Diese beiden eng verwandten Ziele, die sich gemeinsam auf die *Akquisition* von zusätzlichen *Transportaufträgen* mit jeweils positiven Deckungsbeiträgen erstrecken, werden in der betrieblichen Praxis zu meist als Ziel der *Kundenakquisition* thematisiert.³⁾ Das Ziel der Kundenakquisition dient seinerseits als Mittel zum Zweck, nicht nur kurzfristig, sondern nachhaltig die Deckungsbeiträge zu erhöhen, die von den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen erwirtschaftet werden, und dadurch mittelbar die Realisierung *erwerbswirtschaftlicher Erfolgsziele* – wie z.B. Gewinn- oder Renditeziele – zu fördern. Erwerbswirtschaftliche Erfolgsziele erweisen sich jedoch von derart allgemeiner („generischer“) Bedeutung für jegliches betriebswirtschaftliches Handeln, dass ihre Realisierung hier nicht in den Vordergrund der speziellen Argumentation zu Kooperationen von Eisenbahnverkehrsunternehmen gerückt wird.

-
- 1) Die Kriterien werden ebenso benötigt, um die Gesamtwirkung (den Gesamteffekt) der Kooperation zu beurteilen. Hierzu muss aber ein weiteres betriebswirtschaftliches Problem gelöst werden. Es handelt sich um die Aggregation der einzelnen Auswirkungen zur Gesamtwirkung. Dieses Aggregationsproblem stellt ein allgemeines betriebswirtschaftliches Problem dar, das keinen speziellen Bezug zur hier betrachteten Analyse der Effekte einer Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen hat. Daher wird es hier nicht weiter beachtet. Aber in einem später folgenden Projektbericht soll darauf ausführlicher eingegangen werden.
 - 2) Im hier vorliegenden Projektbericht wird nicht darüber diskutiert, ob die Ziele, die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen faktisch verfolgt werden (deskriptive Perspektive), eventuell von jenen Zielen abweichen, die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen verfolgt werden sollten (normative Perspektive). Auch wird nicht der Frage nachgespürt, wer im Fall der normativen Perspektive die Ziele vorgibt (faktische Normativität) oder vorgeben sollte (Normativität zweiter Stufe). Stattdessen wird eine pragmatische Perspektive eingenommen. Sie geht von denjenigen Zielen aus, die im Projektantrag („Vorhabensbeschreibung“) für das Verbundprojekt MAEKAS im Fokus der Argumentation standen.
 - 3) Im Interesse der Anschlussfähigkeit an die betriebliche Praxis wird dieser Redeweise im hier vorliegenden Projektbericht gefolgt.

Aus der Perspektive der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS wird das Ziel der *Kundenakquisition* am stärksten betont. Dies ist verständlich, weil im „operativen“ Geschäft oder „Tagesgeschäft“ die Gewinnung neuer Kunden und die Gewinnung zusätzlicher Aufträge von Bestandskunden oftmals eine ausschlaggebende Rolle spielen. Für diese hohe operative Bedeutung des Ziels der Kundenakquisition lassen sich zumindest zwei Gründe anführen. Erstens werden große Teile der Kosten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, insbesondere die hohen Kosten für die transporttechnische Infrastruktur sowie für das Personal, als nicht oder zumindest nicht unmittelbar beeinflussbar empfunden (Fixkostenargument), sodass es als Erfolg versprechender erscheint, sich durch Aktivitäten der Kundenakquisition um eine Steigerung des Umsatzes – oder synonym: der Erlöse – zu kümmern. Zweitens setzen Vergütungssysteme der betrieblichen Praxis oftmals Anreize, die einseitig auf erlösseitige Kriterien wie Umsatzsteigerungen oder Anzahlen von Neukunden setzen. Ohne die große Bedeutung zu leugnen, die dem Kundenakquisitionsziel in der betrieblichen Praxis zukommt, stellt es ein vornehmlich operatives Ziel dar. Im hier vorgelegten Projektbericht betonen die Verfasser dagegen eine strategische Managementperspektive, aus der das Ziel, die eigene *Wettbewerbsfähigkeit* zu stärken, eine größere Bedeutung besitzt. Es schließt das operative Ziel der Kundenakquisition über die o.a. Mittel-Zweck-Argumentation ein, reicht aber inhaltlich weit darüber hinaus. Beispielsweise lenkt das Denken in der Kategorie der Wettbewerbsfähigkeit das Agieren der Unternehmensführung auch auf den Aspekt, die langfristige Überlebensfähigkeit (Viabilität) ihrer Eisenbahnverkehrsunternehmen zu sichern. Derart strategische Überlegungen werden in operativen Zielen wie dem der Kundenakquisition in der Regel nicht reflektiert.

Zweitens zielen die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS darauf ab, maßgebliche Beiträge zur *Reduzierung* der *Emission* von klimaschädlichen *Treibhausgasen* zu leisten, und zwar insbesondere durch eine Reduzierung von transportbedingten CO₂- und NO_x-Emissionen. Aus umweltpolitischen Gesichtspunkten werden Kooperationen in einzelnen Branchen immer wichtiger. In Zeiten der wirtschaftlichen Globalisierung, in der die Güter über immer größere Distanzen transportiert werden müssen und die Umwelt deutlich stärker durch Treibhausgasemissionen – und auch durch andere transportbedingte Emissionen¹⁾ – belastet wird, erscheint es als sehr wichtig, sich auch über einen ökologisch verträglichen Gütertransport („Green Logistics“)²⁾ Gedanken zu machen. Wenn man davon ausgeht, dass der Umfang an Gütertransporten auf lange Sicht – von der aktuellen Wirtschaftskrise allenfalls temporär unterbrochen – weiter massiv ansteigen wird,

1) In diesem Projektbericht wird ausschließlich auf die Emission von Treibhausgasen eingegangen. Sie spielen die Rolle eines „pars pro toto“. Weitere transportbedingte Emissionen stellen insbesondere Schallemissionen dar. Die Lärmbelastigung der Anwohner von Eisenbahntrassen gehört zu den gravierendsten Problemen von schienengebundenen Gütertransporten.

2) Vgl. SCHMIED/ZIMMER (2007), S. 5 ff.; KRANKE (2008), S. 12 ff. (dort vor allem im Hinblick auf den sogenannten „CO₂-Footprint“ von Gütertransporten in Supply Chains und der prägnanten Rede über „saubere und grüne Supply Chains“ [S. 13] sowie über einen notwendigen „Kompromiss zwischen ‚Lean und Green‘...“ [S. 18]); BÜHLER/JOCHEM (2008), S. 1 ff.; o.V. (2009), o.S. Vgl. auch in allgemeiner, nicht speziell auf die Logistik zugeschnittener Weise zur stark zunehmenden Bedeutung von „green management“ und „green efforts“ YU/TING/WU (2009), S. 1067 ff.; MOLINA-AZORÍN/CLAVER-CORTÉS/LÓPEZ-GAMERO et al. (2009), S. 1080 ff. (siehe u.a. die plakative Aussage auf S. 1081: „Firms are facing growing pressure to become responsible and greener.“).

muss auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht mit einer erheblich zunehmenden Bedeutung des Ziels einer Reduzierung von Treibhausgasemissionen gerechnet werden.¹⁾

Es lässt sich trefflich darüber streiten, ob das Ziel der Reduzierung von Treibhausgasemissionen ein selbstständiges strategisches Ziel der Eisenbahnverkehrsunternehmen darstellt. Einerseits lassen sich nachweisliche Erfolge bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen vor dem Hintergrund aktueller Diskussionen zu „Green Logistics“ nutzen, um im Wettbewerb mit anderen Anbietern von Gütertransportdienstleistungen einen Differenzierungsvorteil als „ökologischer Nutzenführer“ o.ä. zu erlangen.²⁾ Aus diesem Blickwinkel stellt das Ziel der Reduzierung von Treibhausgasemissionen kein selbstständiges strategisches Ziel dar, sondern dient lediglich als ein Mittel zum Zweck, die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen einer Differenzierungsstrategie nach PORTER zu stärken. Andererseits lässt sich nicht ausschließen, dass die Unternehmensführungen der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen eine eigenständige ökologische Verantwortlichkeit empfinden, der sie unabhängig von einer wettbewerbsstrategischen Zweck-Mittel-Rationalität gerecht werden wollen. Dies entspräche beispielsweise dem originären, noch nicht instrumentell „pervertierten“ Konzept der Corporate Social Responsibility (CSR), das auch in der jüngeren betriebswirtschaftlichen Diskussion zunehmend Beachtung findet. Im hier vorliegenden Projektbericht kann und soll nicht über die „wahren Motive“ der Eisenbahnverkehrsunternehmen spekuliert werden. Daher wird lediglich um der analytischen Klarheit willen davon ausgegangen, dass es sich bei der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen um zwei voneinander unabhängige strategische Ziele der Eisenbahnverkehrsunternehmen handelt.

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS sind bestrebt, durch ihre Kooperation im Rahmen eines virtuellen Unternehmens die beiden wesentlichen strategischen Ziele der Stärkung ihrer Wettbewerbsfähigkeit und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen besser zu erreichen, als es – aus ihrer Sicht – ohne diese Kooperation möglich wäre. Als primäres *Kooperationsinstrument* sehen die Eisenbahnverkehrsunternehmen die „intelligente“ Bündelung von

-
- 1) Zu den Vorreitern von Unternehmen, die sich besonders intensiv mit einem ökologisch verträglichen Gütertransport auseinandersetzen, gehört Procter & Gamble; vgl. o.V. (2009), o.S.: Dieser bedeutende Hersteller von Konsumgütern lässt nach eigenen Angaben seine Produkte in Westeuropa über Distanzen von jährlich ca. 200 Mio. km transportieren. Derzeit werden noch über 90 % dieser Güterverkehre mit Lastkraftwagen und weniger als 10 % mit der Eisenbahn als Transportmittel durchgeführt. Im Kontext der Bemühungen, den „ökologischen Fußabdruck“ (o.V. (2009), o.S.) oder „CO₂-Footprint“ der eigenen Produkte im Interesse eines nachhaltigen Wirtschaftens zu verbessern, hat sich Procter & Gamble jedoch zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2015 den Anteil seiner Gütertransporte, die mittels des Verkehrsträgers Schiene abgewickelt werden, von 10 auf 30 % zu erhöhen. Dies soll einer Reduzierung von klimaschädlichen CO₂-Emissionen in der Größenordnung von jährlich 67.500 to entsprechen; vgl. o.V. (2009), o.S.
 - 2) Dieses gilt einerseits für die direkte Konkurrenz durch Anbieter von Gütertransportdienstleistungen, die in der Branche der schienenengebundenen Gütertransporte agieren. Andererseits können solche Differenzierungsvorteile auch im Hinblick auf die Substitutionskonkurrenz eine wettbewerbsstrategische Rolle spielen. Die Substitutionskonkurrenz der Eisenbahnverkehrsunternehmen umfasst alle Anbieter von Gütertransportdienstleistungen (als gleichartiges Kundenbedürfnis), die ihre Gütertransportdienstleistungen mit anderen technischen Mitteln (Transportmitteln im Allgemeinen oder Verkehrsmitteln im Speziellen) realisieren. Dazu gehören vor allem Güterverkehrsunternehmen, die sich auf die Verkehrsmittel Lastkraftwagen, Frachtschiff und Frachtflugzeug stützen. Aber auch andere, prima facie „exotisch“ anmutende Transportmittel kommen in Betracht, wie z.B. Pipelines für den Gütertransport durch Rohrleitungen sowie das innovative Projekt „Cargo Cup“.

Nachfragen ihrer Kunden nach Transportdienstleistungen an.¹⁾ Durch diese „intelligente“ Nachfragebündelung sollen vor allem *Leerfahrten vermieden* werden. Daher steht das Ziel der Leerfahrtenvermeidung im Zentrum des hier vorgelegten Projektberichts.

Mittels der Vermeidung von Leerfahrten sollen einerseits die Transportkosten gesenkt werden, um über diesen *Kostenvorteil* die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahnverkehrsunternehmen auf dem Markt für Gütertransportdienstleistungen zu stärken, der sich durch eine relativ große Kundenmacht und einen ausgeprägten Kostenwettbewerb charakterisieren lässt. Daneben spielen auch ergänzende *Akquisitions- und Deckungsbeitragsvorteile* eine Rolle. Sie sind aber nicht Mittel zur Erreichung des intendierten Zwecks, die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu stärken, sondern stellen vielmehr eine Folge erhöhter Wettbewerbsfähigkeit dar. Dieser Folgeeffekt ist zwecks Realisierung der o.a. erwerbswirtschaftlichen Erfolgsziele – wie z.B. Gewinn- oder Renditezielen – hochgradig erwünscht und ist daher als *intendierter Folgeeffekt*²⁾ der Vermeidung von Leerfahrten ebenso zu berücksichtigen. Andererseits stellt die Vermeidung von Leerfahrten auch einen *Ökovorteil* dar, weil wegen des Entfalls von Leerfahrten Antriebsenergie für Lokomotiven eingespart wird und über den geringeren Energieverbrauch auch ein Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen erfolgt, die bei der Energieproduktion anfallen.

Aufgrund der voranstehenden, lediglich überblicksartigen Ausführungen lässt sich das hier entfaltete, „erkenntnisleitende“ *Analysekonzept zur Beurteilung der Kooperationseffekte* im Verbundprojekt MAEKAS wie folgt zusammenfassen: Die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen verfolgen vor allem die beiden strategischen Ziele, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Als Kooperationsinstrument zur Erreichung dieser Ziele dient ihnen primär die „intelligente“ Bündelung von Kundennachfragen für Transportdienstleistungen, die vor allem darauf abzielt, Leerfahrten zu vermeiden. Die Vermeidung von Leerfahrten wirkt

1) Die Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen kann durchaus auch weitere, „sekundäre“ Instrumente umfassen. Beispielsweise lässt sich vorstellen, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen gegen ein entsprechendes Entgelt auf Teile des Equipments eines kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmens – also auf dessen Lokomotiven oder Güterwagen – zugreifen darf, die vom kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen aktuell nicht eingesetzt werden. Als Kooperationsinstrument dient in diesem Fall also der temporäre Zugriff auf Transportmittel eines anderen Kooperationspartners, der mitunter auch als „Kapazitätsleihe“ bezeichnet wird. Eine Bündelung von Kundennachfragen nach Transportdienstleistungen erfolgt hierbei nicht.

Wenn es dem erstgenannten der beiden kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen durch eine solche Kapazitätsleihe gelingt, einen temporären Kapazitätsengpass zu überwinden und auf diese Weise Neukunden zu akquirieren oder zusätzliche Transportaufträge aus dem Kreis der Bestandskunden zu gewinnen, die andernfalls wegen mangelnder Transportkapazitäten nicht akquiriert bzw. gewonnen worden wären, dann entsteht eine „Win-Win-Situation“ für die beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgrund ihrer Kooperation: Einerseits erzielt das erstgenannte Eisenbahnverkehrsunternehmen einen positiven Deckungsbeitrag aus den zusätzlichen Transportaufträgen der Neu- oder Bestandskunden. Andererseits erhält das zweitgenannte Eisenbahnverkehrsunternehmen ein Entgelt für die temporäre Überlassung von Teilen seines Equipments, das ihm sonst wegen mangelnder Auslastung durch eigene Kundenaufträge entgangen wäre. Folglich profitieren beide Eisenbahnverkehrsunternehmen von der Kooperation.

2) In diesem Fall wäre es verfehlt, von einem intendierten „Nebeneffekt“ zu sprechen, weil die Realisierung der o.a. erwerbswirtschaftlichen Erfolgsziele für ein privatwirtschaftlich verfasstes Eisenbahnverkehrsunternehmen in einer Marktwirtschaft eines der wichtigsten nicht nur kurz-, sondern insbesondere auch langfristigen Unternehmensziele darstellt. Nur mittels nachhaltiger Erfolgserzielung kann ein solches Unternehmen seine Existenz am Markt auf lange Sicht sichern. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Existenzsicherung eines Unternehmens als ein Selbstzweck gilt oder ob ein Unternehmen als erhaltenswerte Quelle für die Erwirtschaftung von Einkommen zugunsten einer Vielzahl seiner Stakeholder (insbesondere Arbeitnehmer, Eigentümer, Kreditgeber und Lieferanten) betrachtet wird.

ihrerseits über sowohl Kosten- als auch Ökovorteile in positiver Weise auf die beiden vorausgesetzten strategischen Ziele zurück, die Wettbewerbsfähigkeit der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen zu stärken bzw. ihre transportbedingten Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Die nachfolgenden Kapitel dienen dazu, das zuvor skizzierte Analysekonzept zu konkretisieren und anhand von realitätsnahen Kooperationsbeispielen zu veranschaulichen. Einerseits geht es darum, die oben angesprochenen Kosten- und Ökovorteile, die aus einer „intelligenten“ Bündelung von Transportnachfragen durch die Vermeidung von Leerfahrten resultieren, durch konkret messbare *Bündelungseffekte* zu operationalisieren. Andererseits soll mithilfe von zwei *Beispielen* exemplarisch aufgezeigt werden, wie sich die Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen im Hinblick auf die hier besonders interessierende Vermeidung von Leerfahrten konkret auszuwirken vermag.

Bevor auf die vorgenannten Bündelungseffekte und Beispiele näher eingegangen wird, sei auf zwei *Besonderheiten* hingewiesen, die es bei der Beurteilung der Kooperationseffekte für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS zu berücksichtigen gilt.

Kooperationseffekte stellen aus betriebswirtschaftlicher Sicht kein neuartiges Phänomen dar. Sie werden schon seit langem erforscht. Insbesondere im Kontext des Supply Chain Managements spielt die Analyse von Kooperationseffekten in Supply Chains oder Supply Webs (Wertschöpfungs- oder Transportketten bzw. -netzen) eine herausragende Rolle.¹⁾ Positive Kooperationseffekte äußern sich dort vor allem in einer Reduzierung des „berüchtigten“ Bullwhip-Effekts²⁾. Sie kann sich z.B. in einer Verringerung von Lagerhaltungsbeständen und Erhöhungen der durchschnittlichen Kapazitätsauslastung von Produktions- und Transportmitteln manifestieren.

Kooperationseffekte des Supply Chain Managements gehören zum Typ der *vertikalen* Kooperation, weil die kooperierenden Unternehmen auf *verschiedenen*, „vertikal“ aufeinanderfolgenden Stufen entlang einer Supply Chain tätig sind. Dagegen handelt es sich bei der Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS, die in diesem Projektbericht hinsichtlich ihrer Kooperationseffekte analysiert wird, um eine *horizontale* Kooperation. Denn die Kooperationspartner stellen Eisenbahnverkehrsunternehmen dar, die sich auf *derselben* Stufe einer Supply Chain befinden. Für die Analyse der Effekte von horizontalen Unternehmenskooperationen stehen weitaus weniger Analysekonzepte zur Verfügung, als es für die Analyse vertikaler Kooperationen im „modernen“ Supply Chain Management der Fall ist. Erschwerend kommt hinzu, dass spezielle Analysekonzepte für die Beurteilung der Effekte horizontaler Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen weitgehend unbekannt sind. Daher wird auch in dieser Hinsicht im Verbundprojekt MAEKAS „Neuland“ beschritten.

Darüber hinaus muss bei der Beurteilung von Kooperationseffekten zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen beachtet werden, dass solche Kooperationen *branchenspezifischen Besonderheiten* unterliegen. Dies gilt beispielsweise für Aspekte wie *Kooperationsintensität* einerseits und *Vertrauen* als „enabler“ von Kooperationen andererseits. Die Kooperationskultur von Eisenbahnverkehrsunternehmen weist im Hinblick auf solche Aspekte eine ausgeprägte *Pfadabhängigkeit* auf, hinsicht-

1) Vgl. als aktuelle Überblicke ZELEWSKI (2009), S. 10 ff., sowie ZELEWSKI/KOPPERS/KLUMPP (2009), S. 1 ff, und die dort jeweils angeführte vertiefende Literatur.

2) Vgl. ZÄPFEL/WASNER (1999), S. 298; MCCULLEN/TOWILL (2002), S. 164; KELLER (2004); FAWCETT/ELLRAM/OGDEN (2007); ZELEWSKI (2007), S. 570; KLUMPP/KOPPERS (2008), S. 170; SPEH (2008), S. 243.

lich derer sich die meisten Unternehmen aus der Branche des schienengebundenen Gütertransports stark ähneln. Dies liegt daran, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen in ihrer wirtschaftshistorischen Genese ähnliche Entwicklungspfade durchlaufen haben, die jahrzehntlang von einer weitgehend monopolistischen Branchenstruktur geprägt waren.

In den meisten europäischen Ländern wurde in der Vergangenheit der Gütertransport mit der Bahn von Gebietsmonopolen der großen nationalen Bahngesellschaften dominiert, die sich in der Regel im Staatseigentum befanden. Relativ kleine, privatwirtschaftlich verfasste Eisenbahnverkehrsunternehmen konnten sich allenfalls in „überschaubaren“ regionalen Nischen etablieren. Sie waren aufgrund der überragenden Marktmacht der großen nationalen Bahngesellschaften auf deren Duldung angewiesen. In diesem Branchenumfeld, das vor der Liberalisierung des europäischen Marktes für schienengebundene Gütertransporte herrschte, waren Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen kaum üblich. Folglich verfügen Eisenbahnverkehrsunternehmen auch heute noch oftmals nur über geringe „historische“ Erfahrungen mit *horizontalen* Kooperationen mit anderen Unternehmen ihrer *eigenen* Branche.¹⁾

Aufgrund dieser Pfadabhängigkeit ist es nicht verwunderlich, dass Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen auch heutzutage noch unter erheblichen Akzeptanzproblemen auf der Seite der potenziellen Kooperationspartner leiden können. Das Bewusstsein für Vertrauen als notwendiger Voraussetzung für Erfolg versprechende Kooperationen und für positive Kooperationseffekte ist oftmals bei weitem geringer ausgeprägt als das Gefühl, in anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen lediglich Wettbewerber zu sehen, denen grundsätzlich mit Misstrauen zu begegnen ist.

Vor diesem Hintergrund erscheint es umso wichtiger, die *Effekte* einer *Kooperation* zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen sorgfältig zu *analysieren* und ergebnisoffen zu *beurteilen*. Wenn sich dabei zeigen lassen sollte, dass z.B. aus der Vermeidung von Leerfahrten deutliche positive Kooperationseffekte in der Gestalt von Kosten- und von Ökovorteilen erzielt werden können, so ist es hierdurch – hoffentlich – möglich, die vergangenheitszentrierte Pfadabhängigkeit in der Wahrnehmungsweise und im Entscheidungsverhalten der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu durchbrechen, um ihr zukunfts zugewandtes Bewusstsein („awareness“) für die *wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit* von Kooperationen zu stärken. Die *Grundlagen* hierfür werden im hier vorgelegten Projektbericht gelegt, indem das *Instrumentarium* zur Verfügung gestellt wird, das es gestattet, die Effekte einer Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen in Einzelfällen konkret zu beurteilen.²⁾

-
- 1) Güterverkehrsunternehmen, die sich auf andere Transportmittel – wie insbesondere Lastkraftwagen, Frachtschiffe oder Frachtflugzeuge – stützen, sind in der Vergangenheit schon wesentlich früher Kooperationen eingegangen. Dazu gehören z.B. Subunternehmer im Lkw-Verkehr sowie sogenannte „Konferenzen“ als Fahrgemeinschaften von Seeverkehrsreedereien. Diese Tatsache kann man als wesentlichen, historisch bedingten oder pfadabhängigen, wettbewerbsstrategischen Nachteil für Eisenbahnverkehrsunternehmen im Vergleich zu ihrer Substitutionskonkurrenz ansehen. Eisenbahnverkehrsunternehmen können diesen Wettbewerbsnachteil nur mit einiger Verzögerung (einem „time lag“) ausgleichen, indem sie die „Lernkurve“ anderer Güterverkehrsunternehmen im Hinblick auf Kooperationskompetenzen („networking capabilities“) durch eine bewusste Intensivierung ihrer Kooperationsprojekte mit anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen möglichst schnell und möglichst effektiv nachzuvollziehen versuchen.
 - 2) Um „Enttäuschungen“ vorzubeugen, sei betont, dass im vorliegenden Projektbericht „nur“ das analytische Instrumentarium erarbeitet wird, mit dessen Hilfe sich die Effekte einer Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen – insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von Leerfahrten – beurteilen lassen. Dieses Instrumentarium umfasst insbesondere die sorgfältige und variantenreiche Definition des Leerfahrtenbegriffs (begriffsanalytisches Instrumentarium; vgl. Kapitel 2) sowie die Modellierung des Realproblems der Vermeidung von Leerfahrten



Auf den ergänzenden, in der betrieblichen Praxis ebenso wichtigen Aspekt, wie das kooperationsnotwendige *Vertrauen* zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen geschaffen, gesichert und möglichst auch vertieft werden kann, wird im hier vorliegenden Projektbericht nicht näher eingegangen. Dieser Vertrauensaspekt wird in anderen Projektberichten des Verbundprojekts MAEKAS ausführlich behandelt.¹⁾

5.2 Generelle Kooperationseffekte

5.2.1 Quantitative Effekte

5.2.1.1 Leerfahrten- und Leertonnenkilometereffekte

Der erste quantitative Effekt einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die auf „intelligente“ Weise die Transportnachfragen ihrer Kunden bündeln, erstreckt sich auf die Vermeidung von Leerfahrten (*Leerfahrteffekt*). Die Vermeidung von Leerfahrten steht im Fokus des hier vorgelegten Projektberichts. Sie bedarf allerdings einer Operationalisierung sowohl im Hinblick auf den jeweils zugrunde liegenden Leerfahrtenbegriff als auch hinsichtlich des Maßstabs, anhand dessen die Vermeidung von Leerfahrten konkret zu messen ist. Wie schon früher angesprochen, wird die Erreichung des Ziels, Leerfahrten zu vermeiden, durch die *Reduzierung* von *Leertonnenkilometern* [to·km] gemessen. Daher wird der Leerfahrteffekt in der Gestalt eines *Leertonnenkilometereffekts* operationalisiert. Darüber hinaus wird dieser Effekt in zwei verschiedenartige Leertonnenkilometereffekte ausdifferenziert, weil sich güterwagen- und güterzugbezogene Leertonnenkilometer unterscheiden lassen.²⁾

Die *güterwagenbezogenen* Leertonnenkilometer verursachen einen *Leertonnenkilometereffekt erster Ordnung*, bei dem die Ladungskapazität von mindestens einem der tatsächlich angekoppelten Güterwagen nicht vollständig ausgeschöpft wird. Die güterwagenbezogenen Leertonnenkilometer setzen sich aus einem Kapazitäts- und einem Streckeneffekt zusammen. Der *güterwagenbezogene Kapazitätseffekt* wird durch die ungenutzten Teile der Ladungskapazitäten von Güterwagen eines Gü-

durch eine „intelligente“ Bündelung von Kundennachfragen für Transportdienstleistungen (modellanalytisches Instrumentarium; vgl. Kapitel 7). Das zur Verfügung gestellte analytische Instrumentarium kann aber aufgrund seiner allgemeingültigen, „generischen“ Struktur keine Auskunft darüber erteilen, ob in einem konkreten Einzelfall die positiven Effekte einer Kooperation (z.B. durch die nachweisbare Vermeidung von Leerfahrten) die negativen Kooperationseffekte (z.B. durch die kooperationsbedingten Koordinierungskosten) übersteigen und somit einen positiven Gesamteffekt – eine „Kooperationsrendite“ – ergeben. Für eine solche Auskunft sind Einzelfallstudien („case studies“) erforderlich, die das allgemeingültige analytische Instrumentarium, das hier vorgestellt wird, auf den jeweils betrachteten Einzelfall konkret anwenden. Solche Einzelfallstudien können nur durch die Praxispartner des Verbundprojekts durchgeführt werden, da nur sie über die einzelfallspezifischen Informationen verfügen, die erforderlich sind, um die Ausprägungen der Parameter aus den hier vorgestellten Modelle einzelfallspezifisch festzulegen.

- 1) Vgl. dazu die Projektberichte Nr. 7, 9, 10 und 11, die im Anhang der MAEKAS-Projektberichte aufgeführt sind.
- 2) Die Unterscheidung zwischen güterwagen- und güterzugbezogenen Leertonnenkilometern, die hier vorgestellt wird, fällt nicht mit der früher erörterten Differenzierung zwischen physikalischen und kapazitiven Leerfahrten zusammen. Denn eine physikalische Leerfahrt wurde als eine Leerfahrt definiert, bei der eine Lokomotive entweder ohne angekoppelte Güterwagen verkehrt (Lokzug-Fahrt) oder mit zwar angekoppelten, aber leeren Güterwagen. Wie im Folgenden gezeigt wird, entstehen im ersten Fall nur güterzugbezogene Leertonnenkilometer. Dagegen fallen im zweiten Fall mit Gewissheit güterwagenbezogene Leertonnenkilometer an, unter Umständen (wenn noch zusätzliche Güterwagen angekoppelt werden könnten) kommen auch güterzugbezogene Leertonnenkilometer hinzu.

terzugs in Tonnen [to] gemessen. Er betrifft entweder teilbeladene Güterwagen, deren Ladungskapazitäten auf der Tour eines Güterzugs nur unvollständig ausgeschöpft werden (Leerfahrt im weiteren Sinne), oder aber Güterwagen, die auf einer Tour leer mitfahren (Leerfahrt im engeren Sinne, sofern alle Güterwagen eines Güterzugs leer bleiben). Der *güterwagenbezogene Streckeneffekt* wird durch die Längen derjenigen Strecken des Verkehrsnetzes in Kilometern [km] gemessen, entlang derer die teilbeladenen oder sogar leeren Güterwagen eines Güterzugs jeweils verkehren.

Die *güterzugbezogenen* Leertonnenkilometer bewirken einen *Leertonnenkilometereffekt zweiter Ordnung*, bei dem die maximale Traktionskraft (Traktionskapazität) der Lokomotive oder die höchstzulässige Zuglänge (Abmessungskapazität) nicht vollständig ausgeschöpft wird. Auch die güterzugbezogenen Leertonnenkilometer lassen sich in einen Kapazitäts- und einen Streckeneffekt aufspalten. Der *güterzugbezogene Kapazitätseffekt* wird durch die ungenutzten Teile der Traktionskapazität der Lokomotive eines Güterzugs oder der höchstzulässigen Zuglänge gemessen. Diese ungenutzten Kapazitätsanteile lassen sich in den beiden vorgenannten Fällen durch die Ladungskapazitäten derjenigen Güterwagen in Tonnen [to] erfassen, die an die Lokomotive eines Güterzugs hätten zusätzlich – also kontrafaktisch – angekoppelt werden können, ohne die maximale Traktionskraft der Lokomotive oder die höchstzulässige Zuglänge zu überschreiten.¹⁾ Dies schließt einerseits den Normalfall ein, dass ein Güterzug, der bereits mindestens einen Güterwagen umfasst, um mindestens einen zusätzlichen Güterwagen erweitert werden könnte (Leerfahrt im weitesten Sinne). Andererseits wird auch der Grenzfall berücksichtigt, dass eine Lokomotive ohne angekoppelte Güterwagen als eine Lokzug-Fahrt verkehrt (Leerfahrt im engsten Sinne). Der *güterzugbezogene Streckeneffekt* wird durch die Längen derjenigen Strecken des Verkehrsnetzes in Kilometern [km] gemessen, entlang derer ein Güterzug verkehrt, ohne seine Traktions- oder Abmessungskapazität vollständig auszuschöpfen.

1) Diese Ladungskapazitäten von Güterwagen, die an die Lokomotive eines Güterzugs zusätzlich angekoppelt werden können, liegen keineswegs „objektiv“ und eindeutig fest, sondern lassen sich nur mittels zusätzlicher, letztlich *subjektiver* („willkürlicher“) *Annahmen* bestimmen.

Erstens wird hier von einer Art „Durchschnittsgüterwagen“ ausgegangen, der eine durchschnittliche oder typische, vom betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen unternehmensindividuell festzulegende Ladungskapazität und Gesamtlänge aufweist. Damit wird in bewusst vereinfachender Weise von Komplikationen abgesehen, die daraus resultieren, dass ein Güterzug mit bereits angekoppelten Güterwagen durch unterschiedliche Kombinationen zusätzlicher Güterwagen ergänzt werden könnte, um die noch nicht vollständig ausgeschöpfte maximale Traktionskraft der Lokomotive und die noch nicht vollständig in Anspruch genommene höchstzulässige Zuglänge so weit wie möglich auszufüllen. Falls solche Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt werden sollten, dann müsste ein *kombinatorisches Optimierungsproblem* sui generis gelöst werden, um die Ladungskapazitäten derjenigen Güterwagen, die an die Lokomotive eines Güterzugs zusätzlich angekoppelt werden können, „bestmöglich“ zu ermitteln. Zweitens sind Ganzzahligkeitsbedingungen derart zu berücksichtigen, dass ein Güterzug immer nur um eine „ganze“ Anzahl zusätzlicher Güterwagen erweitert werden kann. Kontinuierliche Modellierungen, die eine komplette Ausfüllung noch nicht ausgeschöpfter Traktions- oder Abmessungskapazitäten mit der Hilfe von „Güterwagenanteilen“ (wie z.B. „3,6 Güterwagen“) zulassen, sind realitätsfremd und werden daher hier von vornherein ausgeschlossen.

Drittens wird es in der Regel so sein, dass die noch nicht ausgeschöpfte Traktionskapazität einer Lokomotive und die noch nicht vollständig in Anspruch genommene Abmessungskapazität eines Güterzugs es erlauben würden, unterschiedliche Anzahlen zusätzlicher Güterwagen anzukoppeln. In diesem Fall muss eine Festlegung erfolgen, welche der beiden unterschiedlichen Güterwagenanzahlen für die Ermittlung der Ladungskapazitäten von Güterwagen, die an die Lokomotive eines Güterzugs zusätzlich angekoppelt werden können, maßgeblich ist. Aus der Definition einer Kapazität als *maximalem* Leistungsvermögen einer Einheit ergibt sich unmittelbar, dass jeweils die *kleinere* von den beiden Güterwagenanzahlen als „bottleneck“ oder „Engpassfaktor“ ausschlaggebend dafür ist, um wie viele zusätzliche Güterwagen ein Güterzug erweitert werden kann, ohne die maximale Traktionskraft der Lokomotive oder die höchstzulässige Zuglänge zu überschreiten.

Die Leertonnenkilometereffekte erster und zweiter Ordnung treten im selben Güterzug auch oftmals miteinander kombiniert auf. Dies ist immer dann der Fall, wenn ein Güterzug auf seiner Tour mindestens einen Güterwagen umfasst, dessen Ladungskapazität nicht vollständig ausgeschöpft wird (Leertonnenkilometereffekt erster Ordnung), und wenn die Traktionskapazität seiner Lokomotive oder seine Abmessungskapazität nicht vollständig ausgenutzt wird (Leertonnenkilometereffekt zweiter Ordnung).

Ein reiner Leertonnenkilometereffekt erster Ordnung würde nur dann vorliegen, wenn keine zusätzlichen Güterwagen angekoppelt werden können, ohne die Traktions- oder Abmessungskapazität des Güterzugs zu überschreiten, jedoch die Ladungskapazität von mindestens einem der angekoppelten Güterwagen nicht vollständig ausgeschöpft wird.

Ein reiner Leertonnenkilometereffekt zweiter Ordnung fände hingegen nur dann statt, wenn entweder eine Lokzug-Fahrt erfolgt oder ein Güterzug mit angekoppelten Güterwagen verkehrt, deren Ladungskapazitäten jeweils vollständig ausgeschöpft sind, jedoch noch zusätzliche Güterwagen angekoppelt werden können, ohne die Traktionskapazität der Lokomotive oder die Abmessungskapazität des Güterzugs zu überschreiten.

5.2.1.2 Kosteneffekte

Der zweite quantitative Effekt ergibt sich als ein Folgeeffekt aus der Vermeidung von Leerfahrten, also aus der zuvor erläuterten Reduzierung von Leertonnenkilometern. Es handelt sich um einen Effekt der *Kostenreduzierung*. Die Kostenreduzierung beruht auf zwei Teileffekten.

Zunächst gilt es, einen *direkten Kosteneffekt*¹⁾ zu berücksichtigen. Er erstreckt sich auf die Verringerung derjenigen *Transportkosten*, die von der Durchführung von Touren *verursacht* werden (*direkte Transportkosten*) und daher bei der Vermeidung von Leerfahrten abnehmen. Als wichtigste

1) Als *direkte* Kosten werden hier Kosten in Bezug auf eine jeweils betrachtete Einflussgröße bezeichnet, wenn ein *Verursachungszusammenhang* zwischen Veränderungen der Einflussgröße und „entsprechenden“ (vor allem proportionalen, unter Umständen aber auch nicht-proportionalen) Veränderungen der hiervon abhängigen Kosten besteht oder zumindest mit „hinreichender“ Plausibilität vermutet wird. Ohne an dieser Stelle auf kostenrechnerische Details eingehen zu wollen, stimmt dieser Begriff direkter Kosten weitgehend mit dem Begriff der *Grenzkosten* von KILGER sowie mit dem Begriff der relativen oder entscheidungsorientierten *Einzelkosten* von RIEBEL überein. Von *indirekten* Kosten wird dagegen im Folgenden gesprochen, wenn es sich um keine direkten Kosten handelt. Dies ist zunächst eine triviale definitorische Setzung. Sie wird „mit Leben erfüllt“, wenn nicht nur „negativ“ festgestellt wird, dass keine direkten Kosten vorliegen, sondern in „positiver“ Weise nach den Gründen geforscht wird, warum *kein Verursachungszusammenhang* zwischen den Veränderungen einer Einflussgröße und den Veränderungen der hiervon abhängigen Kosten besteht und auch nicht mit „hinreichender“ Plausibilität vermutet werden kann. Als Hauptgrund lässt sich in der kostenrechnerischen Praxis die Verteilung eines Kostenblocks auf alle Einheiten einer Einflussgröße mittels einer schlichten Divisionskalkulation identifizieren. Diese Operation ist unter zahlreichen Bezeichnungen bekannt, wie z.B. als Proportionalisierung, Schlüsselung oder Variabilisierung von Fix- und Gemeinkosten. Keine dieser Varianten hat etwas mit einer verursachungsgerechten Kostenzurechnung zu tun und ist daher – aus dem Blickwinkel einer streng verursachungsgerechten Kostenrechnung – als „Todsünde“ stigmatisiert. Trotzdem spielen die vorgenannten Varianten einer Divisionskalkulation in der betrieblichen Praxis – leider immer noch – eine große Rolle. Daher werden im Interesse der Anschlussfähigkeit an die kostenrechnerischen Usancen der betrieblichen Praxis im Folgenden auch solche indirekten Kosten betrachtet.

Bestandteile dieser direkten Transportkosten werden im Folgenden die Energie- und die nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten¹⁾ eines Eisenbahnverkehrsunternehmens betrachtet.²⁾

Auf jeden Fall sinken die energie- und die nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, wenn es gelingt, *physikalische* Leerfahrten zu vermeiden. Dies betrifft einerseits Lokzug-Fahrten sowie andererseits Fahrten von Güterzügen, die nur mit leeren Güterwagen verkehren. In beiden Fällen lassen sich die gesamten Energiekosten für den Antrieb der Lokomotive einsparen. Nutzungsinduzierte Instandhaltungskosten werden im erstgenannten Fall nur für die betroffene Lokomotive, im letztgenannten Fall neben der Lokomotive auch für die Fahrten der leeren Güterwagen eingespart.

Auch bei der Vermeidung von *kapazitativen* Leerfahrten können die energie- und die nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens sinken. Dies trifft zumindest dann zu, wenn es gelingt, die Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs dadurch höher auszuschöpfen, dass Güterwagen, die in einem Güterzug zuvor leer verkehrten, aus diesem Güterzug herausgenommen („ausgekoppelt“) werden. In diesem Fall wird der lastabhängige Anteil der Antriebskosten für die Lokomotive eingespart, der sonst für die Traktion der leeren Güterwagen entstanden wäre. Ebenso entfallen die nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten für die Güterwagen, die nicht mehr leer verkehren.

Ansonsten führt jedoch die Vermeidung von kapazitativen Leerfahrten zu einem entgegengerichteten *Anstieg* der energie- und der nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens. Denn die größere Ausschöpfung der Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs erhöht das Gesamtgewicht, das von seiner Lokomotive gezogen werden muss (Anstieg der antriebsnotwendigen Energiekosten), und über das zunehmende Frachtgewicht der einzelnen Güterwagen tendenziell auch deren nutzungsabhängigen Verschleiß (Anstieg der nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten).

Am Beispiel des direkten Kosteneffekts zeigt sich, dass die Vermeidung von Leerfahrten keineswegs einen Selbstzweck darstellt, sondern – wie auch alle anderen Kooperationseffekte – hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf übergeordnete Ziele kritisch beurteilt werden muss. Dies betrifft zunächst die angestrebten Kosten- und Ökovorteile, aber letztlich auch die o.a. strategischen Ziele der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Speziell im Hinblick auf die Vermeidung von kapazitativen Leerfahrten konnte zumindest tendenziell aufgezeigt werden, dass ein *nicht-intendierter Nebeneffekt* auftritt, weil es nicht zu dem angestrebten Kostenvorteil und deshalb auch nicht zu einer Stärkung der kostenbezogenen Wettbewerbsfähigkeit kommt, sondern im Gegenteil zu unerwünschten Zusatzkosten.

1) Nutzungsinduzierte Instandhaltungskosten werden in der betrieblichen Praxis oftmals überhaupt nicht oder nur „versteckt“ als leistungsabhängiger Anteil von Abschreibungen erfasst. Auf solche Erfassungsdefekte wird hier nicht näher eingegangen. Sie sollten nicht zum Anlass genommen werden, die aufgezeigten Kooperationseffekte zu ignorieren. Vielmehr sollten die Kooperationseffekte, die in diesem Projektbericht vorgestellt werden, ein Eisenbahnverkehrsunternehmen motivieren, seine Kosten- und Leistungsrechnung, sein Controlling, sein betriebliches Informationssystem – oder wie auch immer sein System zur Versorgung mit entscheidungsrelevanten Informationen bezeichnet werden mag – so auszubauen, dass sich mithilfe dieses Systems diejenigen Informationen erfassen lassen, die zur Messung der Kooperationseffekte erforderlich sind.

2) Es können auch weitere, hinsichtlich ihrer Bedeutung untergeordnete Bestandteile der direkten Transportkosten berücksichtigt werden. Auf diese Kostenbestandteile treffen die nachfolgenden Argumente, die sich nur auf die energie- und die nutzungsinduzierten Instandhaltungskosten erstrecken, in analoger Weise zu.

Diese Einsicht sollte aber nicht sofort zum Anlass genommen werden, auf die Vermeidung kapazitiver Leerfahrten zu verzichten. Gegen einen solchen vorschnellen Schluss sprechen zwei Gründe. Erstens führt die Vermeidung kapazitiver Leerfahrten, die sich nur auf das Auskoppeln von zuvor leer gefahrenen Güterwagen beschränkt, nicht zum zuvor angesprochenen, nicht-intendierten Nebeneffekt eines Anstiegs der direkten Kosten. Zweitens stellt der direkte Kosteneffekt nur einen von mehreren Kooperationseffekten dar, die aus der Vermeidung von Leerfahrten resultieren. Insbesondere gilt es auch den indirekten Kosteneffekt, den Erlöseffekt und den Emissionseffekt zu berücksichtigen, die durch die Vermeidung von Leerfahrten ebenso bewirkt werden können und im Folgenden erläutert werden. Oftmals wird es so sein, dass sich diese zusätzlichen Kosten-, Erlös- und Emissionseffekte nicht nur jeweils positiv auf die angestrebte Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und auf die ebenso verfolgte Reduzierung von Treibhausgasemissionen auswirken, sondern in ihrem Gesamteffekt¹⁾ den nicht-intendierten Effekt des Anstiegs der direkten Kosten überkompensieren.²⁾

Der *indirekte Kosteneffekt* spielt ausschließlich für die Vermeidung von kapazitiven Leerfahrten eine Rolle, weil er auf einer *veränderten Kapazitätsauslastung* der Güterwagen eines Güterzugs beruht. Der indirekte Kosteneffekt wird hier der Übersichtlichkeit halber nur im Hinblick auf zwei Fälle betrachtet:³⁾ Im ersten Fall werden die noch nicht vollständig ausgeschöpften Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs durch die zusätzlichen Gütermengen aus der Akquisition neuer Transportaufträge höher ausgelastet, ohne hierbei die Anzahl der angekoppelten Güterwagen zu verändern. Im zweiten Fall werden die noch nicht vollständig ausgeschöpften Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs trotz konstanter Gütermengen aus unveränderten Transportaufträgen höher ausgelastet, indem die Anzahl der angekoppelten Güterwagen verringert wird. In bei-

-
- 1) Dies unterstreicht die Bedeutung der Analyse der Gesamtwirkung (des Gesamteffekts) einer Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen. Darauf wurde schon in einer voranstehenden Fußnote hingewiesen.
 - 2) Ob eine solche Überkompensation stattfindet, kann nicht mit dem Anspruch auf Allgemeingültigkeit beantwortet werden. Vielmehr sind Einzelfallstudien – z.B. bei den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS – erforderlich, um empirisch zu analysieren, wie groß die einzelnen Effekte im konkreten Einzelfall sind und wie sie sich zu einem Gesamteffekt aggregieren lassen. Solche Einzelfallstudien können aber nicht vom Universitätspartner allein durchgeführt werden. Er ist hierzu auf die Zusammenarbeit mit den Praxispartnern angewiesen. Dies setzt vor allem die Fähigkeit („Können“) und auch die Bereitschaft („Wollen“) der Praxispartner voraus, konkrete Informationen („Daten“) über die – vor allem kostenrechnerischen – Details des Einzelfalls zugänglich zu machen.
 - 3) Die beiden Fälle können in der betrieblichen Praxis auch miteinander kombiniert auftreten, indem ein Güterzug zusätzliche Transportaufträge mit einer kleineren Anzahl an Güterwagen erfüllt. In diesem kombinierten Fall verstärken sich die beiden nachfolgend erläuterten Argumentationen gegenseitig, sodass ein besonders großer indirekter Kosteneffekt eintritt. Der weitere denkmögliche Fall, dass die Anzahl der angekoppelten Güterwagen erhöht wird, um die Gütermengen aus zusätzlichen Transportaufträgen transportieren zu können, wird hingegen nicht betrachtet, weil sich sein indirekter Kosteneffekt nicht allgemeingültig, sondern nur für konkrete Einzelfälle bestimmen lässt. Dies liegt daran, dass beim zuletzt erwähnten Fall die Auswirkung auf die Kapazitätsauslastung aller Güterwagen des betrachteten Güterzugs unbekannt ist. Gleiches gilt für die hier besonders interessierenden, von der Kapazitätsauslastung abhängigen indirekten Kosten. Denn im Hinblick auf die Kapazitätsauslastung aller Güterwagen des betrachteten Güterzugs lässt sich nicht allgemeingültig feststellen, welcher der beiden nachgenannten Teileffekte überwiegt: entweder die auslastungsvermindernde Zunahme der Ladungskapazitäten aller Güterwagen durch die zusätzlich angekoppelten Güterwagen – oder aber die auslastungsvermehrten Gütermengen aus den zusätzlichen Transportaufträgen.

den Fällen steigt die Auslastung der Ladungskapazitäten aller Güterwagen des Güterzugs, sodass für diesen Güterzug die Leerfahrten im weiteren Sinne per definitionem abnehmen.¹⁾

Wesentlich für den indirekten Kosteneffekt ist, dass *Fixkosten*²⁾ für die eingesetzten Güterwagen auf die jeweils transportierten Gütermengen verrechnet – „umgelegt“, „geschlüsselt“, „verteilt“, „angelastet“, „proportionalisiert“ o.ä. – werden. Bei diesen Fixkosten handelt es sich insbesondere um zeitabhängige Abschreibungen auf die Anschaffungswerte der Güterwagen und um kalkulatorische Zinskosten auf das Kapital, das durch die Anschaffung der Güterwagen gebunden wurde. Daneben kommen auch andere, aber in der betrieblichen Praxis weniger bedeutsame Fixkosten in Betracht, wie z.B. für nutzungsunabhängige Instandhaltungskosten, die anfallen, wenn Güterwagen unabhängig von ihrer Laufleistung und von den transportierten Gütermengen vorbeugend instandgehalten werden. Da die verrechneten Fixkosten von der Durchführung eines Transports nicht verursacht, aber qua Verrechnung dennoch den durchgeführten Touren zugerechnet werden, spricht man im Allgemeinen von *indirekten Transportkosten*.

Wenn die Fixkosten eines Güterwagens auf diejenigen Gütermengen verrechnet werden, die mit diesem Güterwagen transportiert werden, dann sinken einerseits „rein rechentechnisch“ die durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit umso stärker, je größer die Gütermenge ist, die mit dem betrachteten Güterwagen transportiert wird. Da die Ladungskapazität eines Güterwagens kon-

1) Nur am Rande sei angemerkt, dass für diesen Güterzug die Leerfahrten im weitesten Sinne ansteigen können. Dieser abermals *nicht-intendierte Nebeneffekt* tritt im zweiten Fall im Hinblick auf die Abmessungskapazität des Güterzugs ein, weil die Abkopplung von Güterwagen dazu führt, dass der Güterzug danach um zusätzliche Güterwagen erweitert werden könnte, ohne hierdurch die höchstzulässige Zuglänge zu überschreiten. Dieser Nebeneffekt ist in zweifacher Hinsicht bemerkenswert.

Erstens verdeutlicht der Nebeneffekt in exemplarischer Weise, dass das Ziel, Leerfahrten zu vermeiden, keineswegs ein homogenes Ziel darstellt. Vielmehr kann es zu partiellen Zielkonflikten oder „trade offs“ zwischen unterschiedlichen Varianten des Leerfahrtenvermeidungsziels kommen. Denn im hier betrachteten Fall werden einerseits Leerfahrten im weiteren Sinne – wie gemeinhin angestrebt – teilweise vermieden, indem der Anteil nicht vollständig ausgeschöpfter Ladungskapazitäten der Güterwagen verringert wird. Andererseits steigen aber in unerwünschter Weise die – ebenfalls zu vermeidenden – Leerfahrten im weitesten Sinne an.

Zweitens führt dieser Nebeneffekt vor Augen, dass das Ziel, Leerfahrten im weitesten Sinne zu vermeiden, wegen seiner doppelten Bezugnahme sowohl auf die Traktionskapazität einer Lokomotive als auch auf die Abmessungskapazität eines Güterzugs streng genommen nicht „ein“ Ziel, sondern ein Konglomerat aus zwei Teilzielen darstellt. Denn im hier betrachteten, speziellen Fall nimmt durch das Abkoppeln von Güterwagen die Ausschöpfung der Abmessungskapazität des Güterzugs notwendig ab. Dagegen wird die Traktionskapazität der Lokomotive des Güterzugs in unveränderter Weise ausgeschöpft, weil sich die Menge der zu transportierenden Güter laut Voraussetzung nicht verändert. Folglich ist nicht klar definiert, ob Leerfahrten im weitesten Sinne zunehmen, weil zwar die Ausschöpfung der Abmessungskapazität sinkt, jedoch die Ausschöpfung der Traktionskapazität unverändert bleibt. Diese Ambivalenz hinsichtlich der Beurteilung von Leerfahrten im weitesten Sinne ließe sich nur dadurch unterbinden, dass der Begriff der Leerfahrten im weitesten Sinne seinerseits in zwei neuartige Leerfahrtenbegriffe ausdifferenziert wird. Der eine neuartige Leerfahrtenbegriff dürfte sich nur noch auf die unvollständige Ausschöpfung der Abmessungskapazität eines Güterzugs beziehen, während sich der andere neuartige Leerfahrtenbegriff nur noch auf die unvollständige Ausschöpfung der Traktionskapazität einer Lokomotive erstrecken dürfte. Dann wäre aber zwischen zwei Leerfahrten im „weitesten“ Sinne zu unterscheiden, was angesichts des Superlativs semantische Schwierigkeiten bereitet. Sie ließen sich nur durch eine Neubenennung der betroffenen Leerfahrten vermeiden. Dadurch würde aber auch die übersichtliche Systematik der Leerfahrtenbegriffe hinfällig, die im zweiten Kapitel entfaltet wurde. Daher wird im vorliegenden Projektbericht darauf verzichtet, eine noch komplexere Systematik für Leerfahrtenbegriffe zu entwickeln.

2) Die Argumentation, die hier vorgetragen wird, gilt ebenso für variable Gemeinkosten. Die explizite Berücksichtigung von variablen Gemeinkosten würde aber die Diktion erheblich verkomplizieren, ohne interessante Zusatzkenntnisse zu vermitteln. Daher wird im Folgenden explizit nur von Fixkosten gesprochen, aber variable Gemeinkosten gelten jeweils als implizit eingeschlossen.

stant ist, steigt andererseits die Kapazitätsauslastung des Güterwagens umso mehr, je größer die Gütermenge ist, die mit dem betrachteten Güterwagen transportiert wird. Nimmt man beide vorgenannten Effekte zusammen, so ergibt sich unmittelbar, dass die durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit als sogenannte „Leerkosten“ sinken, wenn die Kapazitätsauslastung eines Güterwagens ansteigt. Gleiches trifft auch auf einen Güterzug zu, der aus mehreren Güterwagen besteht.¹⁾

Der Zusammenhang zwischen ansteigender Kapazitätsauslastung und sinkenden durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht *trivial*, weil er sich rein analytisch aus den Begriffen der Fixkosten und der Kapazitätsauslastung ableiten lässt. Als sogenannter *Fixkostendegressionseffekt* gehört dieser Zusammenhang zu einer der „grundlegenden“ Einsichten der „altehrwürdigen“ Nationalökonomie und ist mittlerweile seit ca. einem Jahrhundert bekannt. Dennoch spielt er auch noch heute für betriebswirtschaftliche Analysen eine bemerkenswerte, da *ambivalente* Rolle.

Einerseits beruht der hier angeführte, indirekte Kosteneffekt ausschließlich auf dem zuvor skizzierten Effekt der Fixkostendegression. Der indirekte Kosteneffekt lässt sich nicht abstreiten, weil er auf dem analytisch wahren Fixkostendegressionseffekt beruht. Der indirekte Kosteneffekt führt dazu, dass die verrechneten, also durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit umso niedriger ausfallen, je größer die Kapazitätsauslastung eines Güterzugs ist. Folglich *scheint* es für Eisenbahnverkehrsunternehmen möglich, einen *Kostenvorteil* in der Gestalt von sinkenden durchschnittlichen Fixkosten dadurch zu realisieren, dass sie die Kapazitätsauslastungen ihrer Güterzüge erhöhen, indem sie – wie zuvor erläutert – Leerfahrten im weiteren Sinne vermeiden. Diese Argumentationskette zugunsten höherer Kapazitätsauslastungen, die sich nur auf den Fixkostendegressionseffekt stützt, ist in der betrieblichen Praxis weitverbreitet. Daher wurde sie hier ausdrücklich angeführt.

Andererseits handelt es sich bei der Fixkostendegression um einen *rein verrechnungstechnischen* Effekt, der *nichts* mit einer *verursachungsgerechten* Kostenrechnung gemeinsam hat. Denn die Verrechnung von Fixkosten auf eine variable Anzahl von Gütermengeneinheiten verstößt gegen elementare Prinzipien der Verursachungsgerechtigkeit: Auch wenn die Gütermengen variieren, die mit einem einzelnen Güterwagen oder mit einem ganzen Güterzug transportiert werden, so ändern sich dadurch *per definitionem* nicht die *fixen* Kosten des Güterwagens bzw. des Güterzugs. Dies ist keine Behauptung, die „a posteriori“ durch empirische Untersuchungen be- oder widerlegt werden könnte, sondern es stellt eine „analytische Wahrheit a priori“ dar.

Daher mutet es höchst befremdlich an, wenn in der betrieblichen Praxis immer noch und sogar recht häufig mit durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit gerechnet wird, die *scheinbar* in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung eines Güterwagens oder Güterzugs variieren, aber als Fixkosten tatsächlich immer in derselben Höhe anfallen – ganz unabhängig davon, wie hoch die aktuelle Kapazitätsauslastung eines Güterwagens oder Güterzugs ausfällt. Der wesentliche *Denkfehler* von Verteidigern der Praxis, mit durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit zu rechnen, besteht darin, dass dann, wenn mit der Technik der Fixkostenproportionalisierung gearbeitet wird, nicht nur mit den proportionalisierten Fixkosten, sondern auch mit komplementären Nutzkosten zu rechnen ist. Diese Nutzkosten variieren ebenso, aber in umgekehrter Richtung proportional zur Kapazitätsauslastung. Daher gilt: Wenn die Kapazitätsauslastung eines Güterwagens oder Güterzugs

1) Im Falle eines Güterzugs sinken die durchschnittlichen Fixkosten je Gütermengeneinheit, wenn die Auslastung der Ladungskapazitäten aller zugehörigen Güterwagen ansteigt.

ansteigt, so sinken zwar dessen *Leerkosten* als durchschnittliche Fixkosten je Gütermengeneinheit, aber im exakt gleichen Ausmaß steigen auch seine *Nutzkosten*. Da sich beide Kosteneffekte exakt kompensieren, bleiben die Fixkosten eines Güterwagens oder Güterzugs konstant, und zwar unabhängig von seiner Kapazitätsauslastung. Etwas anderes hätte angesichts des Charakters von *fixen* Kosten eigentlich auch nicht erwartet werden können. Umso mehr überrascht es, dass diese elementaren Einsichten zu einer verursachungsgerechten Kostenrechnung in der betrieblichen Praxis kaum Gehör finden. Stattdessen sind Vollkostenrechnungen an der Tagesordnung, die im Allgemeinen zu einer Proportionalisierung von Fixkosten in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung führen.

Angesichts der zuvor skizzierten, einander widersprechenden Argumente erweist es sich als eine schwierige Frage, ob der indirekte Kosteneffekt in die Beurteilung von Kooperationseffekten einbezogen werden sollte oder nicht. Im Interesse der Anschlussfähigkeit an kostenrechnerische Usancen der betrieblichen Praxis ist der indirekte Kosteneffekt zu berücksichtigen. Aus dem Blickwinkel der Betriebswirtschaftslehre, insbesondere aus der Perspektive einer verursachungsgerechten Kostenrechnung, sollte dagegen von der „Todsünde“ des indirekten Kosteneffekts mit seiner Fixkostenproportionalisierung größtmöglicher Abstand genommen werden. Welche dieser beiden Antworten bevorzugt wird, das braucht im hier vorgelegten Projektbericht nicht entschieden zu werden. Vielmehr reicht es aus, um für eine Beurteilung der Kooperationseffekte im konkreten Einzelfall zu wissen, welche Argumente für und wider die beiden Antwortoptionen sprechen.

5.2.1.3 Akquisitionseffekt

Ein dritter quantitativer Effekt, der aus der Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen resultieren kann, ist der *Akquisitionseffekt*. Er hängt zwar in der Regel¹⁾ nicht mit der Vermeidung von Leerfahrten zusammen, die im Fokus dieses Projektberichts stehen, resultiert aber ebenso aus der „intelligenten“ Bündelung der Transportnachfragen von Kunden. Aus dem Blickwinkel der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS miteinander kooperieren, stellt dieser Akquisitionseffekt sogar das ausschlaggebende Kooperationsmotiv dar. Darauf wurde schon im Kapitel 5.1 kurz eingegangen.

Ein Akquisitionseffekt tritt immer dann ein, wenn es durch die „intelligente“ Bündelung von Transportnachfragen gelingt, zusätzliche Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen zu gewinnen (zu „akquirieren“), die ohne die Nachfragebündelung nicht erlangt worden wären. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Transportaufträge entweder von neuen Kunden (Neukundenakquisition) oder aber als zusätzliche Transportaufträge von bereits vorhandenen Kunden (Geschäftsausbau mit Bestandskunden) gewonnen werden. Da für die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS besonderes Interesse an der Gewinnung von Neukunden besteht, wird im Folgenden nur auf diesen erstgenannten Fall explizit eingegangen, um die Erläuterungen zu vereinfachen. Der Geschäftsausbau mit Bestandskunden ist aber stets implizit ebenso gemeint.

Im Zentrum des Akquisitionseffekts steht die Bündelung von Transportnachfragen mithilfe des virtuellen Unternehmens, in dem die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS als einer „projektbezogenen Allianz zwischen lokalen und überregionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien“ miteinander kooperieren. Der „intelligente“

1) Auf Ausnahmen wird in Kürze eingegangen.

Bündelungseffekt tritt immer dann ein, wenn das *virtuelle Unternehmen* aus *mehreren* kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen einen Transportauftrag gewinnt, den ein *einzelnes* dieser Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht zu akquirieren vermocht hätte. Hierbei kann ein virtuelles Unternehmen einige spezifische Vorteile gegenüber Einzelunternehmen ausspielen.¹⁾

Dazu gehört zunächst der *Kapazitätsbündelungsvorteil*. Er liegt unmittelbar auf der Hand, weil ein virtuelles Unternehmen über eine größere Gesamtkapazität als jedes seiner einzelnen Mitgliedsunternehmen verfügt. Beispielsweise kann die freie Kapazität der Lokomotiven und Güterwagen eines einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmens zu gering sein, um den Kapazitätsbedarf eines großen Transportauftrags zu decken, während die Summe der freien Kapazitäten aller Eisenbahnverkehrsunternehmen eines virtuellen Unternehmens hierfür ausreicht.

Weniger offensichtlich, aber mindestens ebenso bedeutsam für ein virtuelles Unternehmen ist der *Kompetenzbündelungsvorteil*. Er tritt immer dann auf, wenn für die Akquisition eines Transportauftrags mehrere spezielle Kompetenzen²⁾ erforderlich sind, über die zwar ein virtuelles Unternehmen insgesamt verfügt, nicht jedoch jedes einzelne Eisenbahnverkehrsunternehmen. Beispielsweise lässt sich vorstellen, dass für einen Transportauftrag im kombinierten Verkehr benötigt werden:

- ein spezieller Hafenzugang, der in der Regel den Betreibern von Hafeneisenbahnen mit einem eng begrenzten Gebietsmonopol vorbehalten bleibt,
- spezielle Ent- und Verladegeräte (z.B. Hafenkräne),
- Güterwagen mit speziellen Abmessungen, Tragfähigkeiten oder auch Schutzvorrichtungen (zum Schutz der Fracht oder zum Schutz der Umwelt vor der Fracht),
- der Zugang zu mehreren regionalen Verkehrsnetzen mit entsprechenden regionalen Netzexpertisen,
- die Fähigkeit zur Durchführung internationaler Gütertransporte,
- die Fähigkeit zur Koordinierung mehrerer Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im virtuellen Unternehmen miteinander kooperieren („networking capability“),

1) Auf die Eigenarten eines virtuellen Unternehmens wird in diesem Projektbericht nur kurz und nur insofern eingegangen, wie es für die Erläuterung von Kooperationseffekten erforderlich erscheint. Zur vertieften Behandlung von virtuellen Unternehmen vgl. den Projektbericht Nr. 6 zum Konzept virtueller Unternehmen, konkretisiert für projektbezogene strategische Allianzen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen der Art, wie sie dem Verbundprojekt MAEKAS zugrunde liegen.

2) Um die Diktion zu vereinfachen, werden im Folgenden als Kompetenzen auch materielle Ressourcen angesprochen. Es geht dabei aber nicht nur um die „schlichte“ Verfügbarkeit dieser materiellen Ressourcen, sondern um alle Kompetenzen, die zum produktiven Einsatz dieser materiellen Ressourcen erforderlich sind. Dazu gehören z.B. die professionelle Bedienung der Ressourcen (sofern es sich um Betriebsmittel handelt), die Planung des effizienten Ressourceneinsatzes (z.B. als Ressourcen-Scheduling) und die Sicherstellung der Ressourcenverfügbarkeit durch professionelles Instandhaltungsmanagement. Im Folgenden ist stets ein solches *Bündel* aus materiellen Ressourcen und immateriellen Fähigkeiten (Kompetenzen) gemeint, wenn der Einfachheit halber nur die betroffene Ressource als „pars pro toto“ explizit angesprochen wird. Darüber hinaus wird der Übersichtlichkeit halber in diesem Projektbericht nicht zwischen Kompetenzen und Kernkompetenzen unterschieden. Stattdessen wird stets nur von Kompetenzen gesprochen, auch wenn es sich in Einzelfällen aus betriebswirtschaftlicher Sicht um Kernkompetenzen handeln kann. Vgl. zur vertieften und differenzierten Erörterung von sowohl Kompetenzen als auch insbesondere Kernkompetenzen den Projektbericht Nr. 5, der sich speziell mit Kernkompetenzen von Eisenbahnverkehrsunternehmen auseinandersetzt.

- die Fähigkeit zur Koordinierung mehrerer Transportaktivitäten, die im kombinierten Verkehr mittels unterschiedlicher Verkehrsträger ausgeführt werden,
- sowie – zwar zuletzt angeführt, aber mitunter von überragender Bedeutung – auch einschlägige Marketingfähigkeiten, die u.a. dazu benötigt werden, potenzielle Kunden zu identifizieren und einem potenziellen Kunden zu verdeutlichen, dass ein Transportauftrag professionell durchgeführt werden kann.

Kompetenzen umfassen spezielles, anwendungsbezogenes *Wissen*, das für den Erfolg versprechenden Einsatz von Ressourcen in Geschäftsprozessen erforderlich ist. Dies trifft nicht auf die zuvor exemplarisch angeführten Kompetenzen zu, sondern ist eine allgemeingültige Einsicht aus den betriebswirtschaftlichen Analysen des sogenannten Resource-based View. Aus dieser Perspektive, die vor allem von Vertretern des Wissensmanagements eingenommen wird, lässt sich der Kompetenzbündelungsvorteil eines virtuellen Unternehmens auch als ein Wissensbündelungsvorteil charakterisieren. Die Unternehmen, die in einem virtuellen Unternehmen miteinander kooperieren, profitieren aus diesem Blickwinkel von ihren unterschiedlichen, sich gegenseitig ergänzenden (komplementären) Wissensbeständen.¹⁾

Ein dritter Bündelungsvorteil, der *Regionenbündelungsvorteil*, trifft nur auf ein virtuelles Unternehmen zu, in dem mehrere Unternehmen mit regional voneinander abgegrenzten Einzugsgebieten kooperieren. Diese Voraussetzung wird im Verbundprojekt MAEKAS auf jeden Fall von den drei Eisenbahnverkehrsunternehmen erfüllt, die unterschiedliche Regionen im Ruhrgebiet (die Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH und die Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH) sowie im angrenzenden Umfeld (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG – Neusser Eisenbahn) bedienen. Die SBB Cargo GmbH als viertes kooperierendes Eisenbahnverkehrsunternehmen ist zwar auf kein regional abgegrenztes Einzugsgebiet spezialisiert, sondern agiert als ein international aufgestelltes Eisenbahnverkehrsunternehmen Regionen übergreifend. Aber die SBB Cargo GmbH lässt sich in die Erläuterung des Regionenbündelungsvorteils einbeziehen, indem ihr vorrangiges, international ausgedehntes Einzugsgebiet als diejenige „Komplementregion“ aufgefasst wird, welche die Regionen der drei vorgenannten Eisenbahnverkehrsunternehmen umgibt.

Zur Erläuterung des Regionenbündelungsvorteils sei ein exemplarisches Eisenbahnverkehrsunternehmen betrachtet, das – „historisch gewachsen“, also „pfadabhängig“ – über hervorragende Marktexpertise in einem regionalen Güterverkehrsmarkt verfügt. Im Rahmen einer regionalen Differenzierungs- oder auch Nischenstrategie fokussiert es sich auf aktuelle und potenzielle Kunden in seiner „angestammten“ Region, dem Einzugsgebiet des Eisenbahnverkehrsunternehmens. Wird nun ein zusätzlicher Transportauftrag an das betrachtete Eisenbahnverkehrsunternehmen herangetragen, der zwar hinsichtlich des Transportstarts oder des Transportziels zum Einzugsgebiet des Eisenbahnverkehrsunternehmens gehört, dessen Transportziel bzw. Transportstart jedoch außerhalb dieses Einzugsgebiets liegt, so würde das bislang ausschließlich regional tätige Eisenbahnverkehrsunternehmen in der Regel auf den Zusatzauftrag verzichten. Allerdings eröffnet ihm die Kooperation mit einem anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen, das entweder ebenso regional tätig ist, aber in seinem Einzugsgebiet das Transportziel bzw. den Transportstart des zusätzlichen Transportauftrags abdeckt oder das überregionale Verkehre durchführt, die Möglichkeit, in der Kooperation der bei-

1) Vgl. THALER (2003), S. 25 u. 67.

den Eisenbahnverkehrsunternehmen den zusätzlichen Transportauftrag zu akquirieren und mithilfe des kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmens zu realisieren.

Der Regionenbündelungsvorteil eines virtuellen Unternehmens fällt umso größer aus, je größer das geografische Gebiet ist, in dem Gütertransporte durch die Kooperation mehrerer Eisenbahnverkehrsunternehmen „aus einer Hand“ angeboten werden können.¹⁾ Daher wirkt es sich für das Verbundprojekt MAEKAS als ein besonderer Vorteil aus, dass die SBB Cargo GmbH komplementär zu den drei anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen, die mit geografisch stark fokussierten Einzugsgebieten überwiegend regional aktiv sind, eine geografisch weit ausgedehnte Komplementregion bedient, die sich – grob gesprochen – von Norddeutschland und den Niederlanden über das Ruhrgebiet sowie weite Gebiete Mittel- und Süddeutschlands bis in die Schweiz und nach Norditalien erstreckt. Zugleich folgt aus der „immanenten Logik“ des Regionenbündelungsvorteils, dass er sich umso stärker auswirkt, je mehr Eisenbahnverkehrsunternehmen mit unterschiedlichen, aber zusammenhängenden regionalen Einzugsgebieten kooperieren. Daher wurde das Verbundprojekt MAEKAS von vornherein „kooperationsoffen“ ausgelegt. Das bedeutet, dass von Anfang an die Option vorgesehen war, mit weiteren regional tätigen Eisenbahnverkehrsunternehmen als Kooperationspartnern zusammenzuarbeiten. Hierfür wurde der spezielle Status eines „assoziierten Partners“ eingerichtet.

Der Akquisitionseffekt, der aus den zuvor erläuterten Kapazitäts-, Kompetenz- oder Regionenbündelungsvorteilen in einem virtuellen Unternehmen resultieren kann, lässt sich vor allem anhand von *Einzelwagenverkehren* illustrieren.²⁾ Sie stellen für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS ein zentrales Kooperationsmotiv dar.³⁾ Ein herausragendes Anliegen dieser Eisenbahnverkehrsunternehmen besteht darin, zusätzliche Transportaufträge zu akquirieren, die wegen ihres relativ geringen Transportvolumens nicht für die Bildung eines Ganzzugs ausreichen, sondern nur im Einzelwagenverkehr mit einem oder einigen wenigen Güterwagen erfüllt werden können. Der Transportauftrag eines einzelnen Kunden lässt sich im Rahmen eines isolierten Einzelwagenverkehrs oftmals nicht wirtschaftlich realisieren, weil der Einsatz einer Lokomotive für die Traktion der geringen Anzahl von Güterwagen weit höhere Kosten verursachen würde, als Erlöse aus der Durchführung des Transportauftrags verdient werden können. Folglich ist es betriebswirtschaftlich rational für Eisenbahnverkehrsunternehmen, auf solche „kleinvolumigen“ Transportauf-

1) PERONA/CIGOLINI/ADANI et al. (2001), S. 236.

2) Die Aktivitäten zum wirtschaftlichen Betrieb von Güterzügen, die im Folgenden vor allem als Ganzzugsergänzungs- und als Ganzzugsoption erläutert werden, können im Prinzip auch von einem einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen ergriffen werden. In diesem Fall würden aber keine Kooperationseffekte vorliegen, die den Gegenstand dieses Kapitels darstellen. Daher wird auf solche Aktivitäten eines einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmens hier nicht weiter eingegangen.

3) Die Verkehre von *Ganzzügen* sind zwar für Eisenbahnverkehrsunternehmen im Allgemeinen attraktiver als Einzelwagenverkehre, weil Ganzzüge in der Regel zu einer höheren Kapazitätsauslastung des Equipments führen, sich mit höheren Deckungsbeiträgen für das eingesetzte Equipment betreiben lassen und einen geringeren Koordinierungsaufwand bereiten. Aber gerade wegen dieser Attraktivität von Ganzzügen sind Eisenbahnverkehrsunternehmen bestrebt, diese nach Möglichkeit in eigener Regie zu betreiben. Daher bleiben als Kooperationsobjekte oftmals nur die „weniger geliebten“ *Einzelwagenverkehre* übrig. Das gilt insbesondere dann, wenn sich ein Einzelwagenverkehr von einem einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht wirtschaftlich durchführen ließe. Aber auch für Ganzzüge kann in Ausnahmefällen eine Kooperation zustande kommen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn die Kapazitäten oder Kompetenzen eines einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmens nicht ausreichen, um alle Anforderungen eines potenziellen Kunden an den Betrieb eines Ganzzugs zu erfüllen.

träge von vornherein zu verzichten. Diese Transportaufträge werden in der Regel nur mit Lastkraftwagen durchgeführt. Da der Anteil von „kleinvolumigen“ Transportaufträgen an der gesamten Gütertransportnachfrage tendenziell steigt und auch in Zukunft weiter zunehmen wird,¹⁾ führt dieser Struktureffekt der Gütertransportnachfrage zu einem – zumindest aus umwelt- und verkehrspolitischer Sicht – unerwünscht hohen und sogar „ungebremst“ anwachsenden Marktanteil des Verkehrsträgers Straße zu Lasten des Verkehrsträgers Schiene.

Die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS hegen aus den vorgenannten Gründen ein großes Interesse daran, mittels ihrer Kooperation in einem virtuellen Unternehmen zusätzliche Transportaufträge, auf die sie andernfalls infolge Unwirtschaftlichkeit hätten verzichten müssen, zu akquirieren und im Einzelwagenverkehr auch wirtschaftlich zu betreiben.²⁾ Kerngedanke der Kooperation ist stets, mehrere Transportaufträge zu einem wirtschaftlich betreibbaren Güterzug zusammenzufassen (zu „bündeln“). Dafür kommen grundsätzlich zwei Bündelungsoptionen in Betracht:

- *Ganzzugsergänzungsoption*: Es verkehrt bereits ein Ganzzug, der von einem oder mehreren der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen betrieben wird, dessen Traktions- oder Abmessungskapazität aber noch nicht vollständig ausgeschöpft ist (Leerfahrt im weitesten Sinne). In diesem Fall ist es möglich, die Güterwagen³⁾, die zur Erfüllung eines zusätzlichen Transportauftrags im *Einzelwagenverkehr* erforderlich sind, an den schon bestehenden Ganzzug anzukoppeln (sofern seine Traktions- und Abmessungskapazitäten nicht überschritten werden).⁴⁾
- *Ganzzugbildungsoption*: Die Güterwagen aus zusätzlichen Transportaufträgen, die mehrere Kooperationspartner jeweils im *Einzelwagenverkehr* durchführen könnten, sich bei der jeweils isolierten Transportdurchführung aber nicht wirtschaftlich erfüllen lassen, werden zu einem

1) Dies liegt vor allem an „modernen“ Managementkonzepten wie Just in Time Production and Delivery, Lean Production / Lean Management, Agile Manufacturing, Quick Response usw. Sie stimmen alle darin überein, die Transportvolumina bei Beschaffungs- und Absatzprozessen zu verringern und stattdessen die Transportfrequenz zu erhöhen.

2) An dieser Stelle sei nochmals betont, dass stets nur von zusätzlichen Transportaufträgen *mit positiven Deckungsbeiträgen* die Rede ist. Dadurch ist die *Wirtschaftlichkeit* der Auftragsdurchführung von vornherein gesichert, wenn ein solcher zusätzlicher Transportauftrag akquiriert wird. Hiermit soll den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen von vornherein die Sorge genommen werden, sie könnten dazu „gedrängt“ werden, Einzelwagenverkehre zu übernehmen, die sich nur mit Verlust (negativen Deckungsbeiträgen), also nur auf unwirtschaftliche Weise betreiben lassen. Solche Sorgen waren vor allem zu Beginn der Laufzeit der Verbundprojekts MAEKAS bei einigen der Praxispartner deutlich zu beobachten.

Für den Grenzfall eines Transportauftrags mit den Deckungsbeiträgen Null wird – letztlich willkürlich – davon ausgenommen, dass dieser Transportauftrag nicht angenommen wird. Dies bestärkt die Eisenbahnverkehrsunternehmen in ihrem Gefühl, ausschließlich wirtschaftlich *vorteilhafte* Transportaufträge zu akquirieren.

3) Es kann sich auch um einen einzelnen Güterwagen handeln. Es würde aber die Diktion erheblich komplizieren, wenn stets von *dem* oder *den* Güterwagen gesprochen werden müsste, *der* bzw. *die* für die Durchführung eines Transportauftrags im Einzelwagenverkehr erforderlich *ist* bzw. *sind*. Daher wird hier der Einfachheit halber explizit nur von „den“ Güterwagen gesprochen. Der Grenzfall von nur einem Güterwagen wird darunter stets implizit subsumiert.

4) In diesem ersten Fall ist die Akquisition zusätzlicher Transportaufträge „nebenbei“ auch mit einer Vermeidung von Leerfahrten verknüpft, und zwar mit der Vermeidung eines Teils der Leerfahrten im weitesten Sinne.

neuen Ganzzug zusammengestellt, der als Ganzes wirtschaftlich vorteilhaft betrieben werden kann.¹⁾

Die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS betonen vor allem die Ganzzugsergänzungsoption. Aus ihrer Sicht ist es weniger wahrscheinlich, mehrere Einzelwagenverkehre zu einem neuen Ganzzug zusammenstellen zu können.

Der Akquisitionseffekt tritt aber nicht nur als „intelligente“ Bündelung von Transportaufträgen im Einzelwagenverkehr auf. Vielmehr kann er auch *unabhängig von Einzelwagenverkehren* realisiert werden. Dies ist immer dann der Fall, wenn es einem oder mehreren Eisenbahnverkehrsunternehmen *aufgrund* seiner bzw. ihrer Kooperation im virtuellen Unternehmen²⁾ gelingt, zusätzliche Transportaufträge zu akquirieren, die – im Gegensatz zum Einzelwagenverkehr – nicht den Einsatz zusätzlicher, auftragspezifischer Güterwagen erfordern. Diese Voraussetzung ist insbesondere dann erfüllt, wenn die zusätzlichen Transportaufträge mit den noch nicht vollständig ausgeschöpften Ladungskapazitäten der – zumindest teilweise beladenen – Güterwagen aus einem bereits verkehrenden Güterzug bewältigt werden können. In diesem Fall kommt es zu einer teilweisen, im Grenzfall sogar vollständigen Vermeidung von Leerfahrten im weiteren Sinne. Darüber hinaus ist es unter Umständen auch möglich, mit den zusätzlichen Transportaufträgen wenigstens einen Teil der Ladungskapazitäten der Güterwagen bei einer Leerfahrt im engeren Sinne auszulasten, bei der alle Güterwagen eines Güterzugs leer verkehren. Im letztgenannten Fall werden Leerfahrten im engeren Sinne zumindest teilweise vermieden.

Für die *Messung* des Akquisitionseffekts in einem jeweils vorzugebenden Zeitraum kommen unabhängig davon, ob er mit oder ohne Bezug auf Einzelwagenverkehre zustande kommt, mindestens drei Alternativen in Betracht. Erstens ist es möglich, die *Anzahl* der *zusätzlichen Transportaufträge* zu erfassen. Zweitens kann daran gedacht werden, die *Anzahl* der akquirierten *Neukunden* festzuhal-

1) In diesem zweiten Fall werden – mit einer Ausnahme – keine Leerfahrten vermieden. Allerdings wird die *Kapazität des vorhandenen Equipments höher* – und auch besser, weil mit den zusätzlichen Transportaufträgen positive Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden, – *ausgelastet*, sofern für die Durchführung der zusätzlichen Transportaufträge keine neuen Lokomotiven oder Güterwagen angeschafft werden müssen. Die letztgenannte Prämisse ist in der Praxis zumeist erfüllt. Sollte sie in Sonderfällen verletzt sein, so ist stets zu prüfen, ob die positiven Deckungsbeiträge aus den zusätzlichen Transportaufträgen ausreichen, um die Anschaffung der neuen Lokomotiven oder Güterwagen wirtschaftlich zu rechtfertigen. In der Regel werden die zusätzlichen Transportaufträge allein hierfür nicht ausreichen. Unter Umständen können aber Prognosen des Eisenbahnverkehrsunternehmens über die zukünftige Auftragsentwicklung es nahelegen, in neue Lokomotiven oder Güterwagen zu investieren. Dann kann der Kapazitätsbedarf für die Durchführung der zusätzlichen Transportaufträge einen Auslöser für die Anschaffung neuer Lokomotiven oder Güterwagen darstellen.

Es lässt sich eine Ausnahmesituation vorstellen, in der es auch im o.a. zweiten Fall der Ganzzugsbildungsoption zur Vermeidung einer Leerfahrt kommt. Diese Ausnahmesituation liegt vor, wenn zunächst eine Lokzug-Fahrt zwischen zwei Knoten eines Verkehrsnetzes als Leerfahrt im engsten Sinne erfolgte. Gelingt es in dieser Situation, zusätzliche Transportaufträge zu akquirieren, die Einzelwagenverkehre zwischen den beiden vorgenannten Knoten des Verkehrsnetzes erfordern, so lässt sich durch die Güterwagen, die für die Durchführung der Einzelwagenverkehre benötigt werden, die ehemalige Lokzug-Fahrt in einen „normalen“ Güterzug transformieren. Dadurch wird die Leerfahrt im engsten Sinne vermieden. An ihre Stelle tritt jedoch eine andere Leerfahrt, nämlich eine Leerfahrt im weiteren oder im weitesten Sinne, sofern es nicht gelingt, durch die zusätzlichen Transportaufträge die Ladungskapazitäten der angekoppelten Güterwagen bzw. die Traktionskapazität der Lokomotive oder die Abmessungskapazität des Güterzugs vollständig auszuschöpfen.

2) Die Kooperation im virtuellen Unternehmen muss hier vorausgesetzt werden, weil andernfalls kein Kooperations-effekt vorliegen würde.

ten. Drittens lassen sich die Deckungsbeiträge registrieren, die durch die zusätzlichen Transportaufträge erwirtschaftet werden.

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive ist die letztgenannte, dritte Alternative vorzuziehen. Denn nur sie gestattet es, die betriebswirtschaftlich interessanten Konsequenzen der Auftragsakquisition im Hinblick auf Erfolgsziele und auf monetärer Ebene zu erfassen. Davon wird jedoch bewusst abgesehen, weil die monetären Konsequenzen der Auftragsakquisition nachfolgend durch einen separat betrachteten Deckungsbeitragseffekt berücksichtigt werden. Von den beiden verbleibenden, nicht-monetären und somit rein mengenmäßigen Messoptionen für den Akquisitionseffekt ist „eigentlich“ die erstgenannte Alternative zu bevorzugen, die Anzahl der zusätzlichen Transportaufträge zu erfassen. Dies hat den Vorteil, sowohl zusätzliche Transportaufträge berücksichtigen zu können, die durch die Akquisition von Neukunden erlangt wurden, als auch zusätzliche Transportaufträge, die aus einem erweiterten Geschäft mit Bestandskunden stammen. Allerdings erweist es sich in der betrieblichen Praxis als sehr schwer, Informationen über die Anzahl zusätzlicher Transportaufträge zu erhalten, die in einem jeweils vorzugebenden Zeitraum akquiriert wurden. Stattdessen ist bei den meisten Eisenbahnverkehrsunternehmen nur bekannt, wie viele Neukunden in einem solchen Zeitraum gewonnen werden konnten. Daher wird angeregt, den Akquisitionseffekt aus „pragmatischen“ Gründen lediglich durch die Anzahl derjenigen Neukunden zu messen, die sich in einem vorgegebenen Zeitraum akquirieren ließen.

5.2.1.4 Deckungsbeitragseffekt

Ein vierter *quantitativer Effekt* der Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen ist der *Deckungsbeitragseffekt*. Er bedarf hier insofern keiner ausführlichen Erläuterung, als er unmittelbar aus dem Akquisitionseffekt resultiert: Wenn zusätzliche Transportaufträge akquiriert werden, die – wie stets vorausgesetzt – jeweils positive Deckungsbeiträge aufweisen, so steigt der Deckungsbeitrag eines Eisenbahnverkehrsunternehmens mit der Akquisition zusätzlicher Transportaufträge notwendig an. In diesem Fall wird von einem *akquisitionsinduzierten* Deckungsbeitragseffekt gesprochen. Er ist unmittelbar offensichtlich. Allerdings erscheinen einige Klarstellungen zum akquisitionsinduzierten Deckungsbeitragseffekt angebracht.

Zunächst könnte der Einwand erhoben werden, dass die Erfassung eines separaten Deckungsbeitragseffekts überflüssig sei, weil der Akquisitionseffekt ohnehin berücksichtigt wird und sich der Deckungsbeitragseffekt aus dem Akquisitionseffekt „unmittelbar“ ergebe. Dieser denkmögliche Einwand geht jedoch in zweifacher Hinsicht fehl.

Erstens „ergibt“ sich die *monetäre* Dimension von Deckungsbeiträgen in keiner Weise aus der *rein mengenmäßigen* Dimension der Anzahl von Neukunden (oder von zusätzlich akquirierten Transportaufträgen). Vielmehr müsste diese Kundenanzahl (bzw. Auftragsanzahl) mit den Deckungsbeiträgen gewichtet werden, die sich mit den neu gewonnenen Kunden (bzw. Aufträgen) durchschnittlich erwirtschaften lassen. Diese monetäre Gewichtungsinformation fehlt bei der Messung des Akquisitionseffekts durch Anzahlen von Neukunden (bzw. von zusätzlichen Transportaufträgen) jedoch vollkommen.

Zweitens wurde zur Messung des Akquisitionseffekts kurz zuvor aus „pragmatischen“ Gründen festgelegt, lediglich die Anzahl der *Neukunden* in einem vorgegebenen Zeitraum zu erfassen. Zusätzliche Transportaufträge, die aus einem Ausbau der Geschäftstätigkeit mit *Bestandskunden* resultieren, werden daher bei der vorgenannten Messung des Akquisitionseffekts überhaupt nicht be-

rücksichtigt. Dies wird erst dadurch ermöglicht, dass die (positiven) Deckungsbeiträge zusätzlicher Transportaufträge von Bestandskunden im Rahmen des Deckungsbeitragseffekts erfasst werden.

Des Weiteren könnte es Befremden erregen, einen Deckungsbeitrags- und nicht einen Erlöseffekt messen zu wollen. Denn prima facie läge es näher, neben den o.a. direkten und indirekten Varianten des Kosteneffekts einen komplementären Erlöseffekt zu betrachten. Dies unterbleibt hier aber bewusst. Dafür sprechen im Wesentlichen zwei Gründe.

Einerseits wird bei zusätzlich akquirierten Transportaufträgen ein Erlöseffekt im Deckungsbeitrags-effekt bereits implizit berücksichtigt, weil der Deckungsbeitrag als Differenz aus denjenigen Erlösen und Kosten definiert ist, die durch die Annahme und Durchführung eines zusätzlichen Transportauftrags verursacht werden. Daher würde es bei zusätzlichen Transportaufträgen zu einem „double accounting“ führen, wenn sowohl ein Deckungsbeitrags- als auch ein Erlöseffekt erfasst würden. Falls nur ein Erlöseffekt berücksichtigt würde, müsste bei zusätzlichen Transportaufträgen ein komplementärer Kosteneffekt Beachtung finden, der dem Erlöseffekt in Bezug auf betriebswirtschaftliche Erfolgsziele entgegengerichtet wäre. Da in Bezug auf diese Erfolgsziele nur der Gesamt- oder Nettoeffekt aus denjenigen zusätzlichen Erlösen und zusätzlichen Kosten interessiert, die durch zusätzliche Transportaufträge verursacht werden, erscheint es einfacher, im Deckungsbeitragseffekt von vornherein nur die Deckungsbeiträge zu berücksichtigen, die durch zusätzliche Transportaufträge verursacht werden.

Andererseits brauchen bei Transportaufträgen, die auch schon vor dem Eingehen einer Kooperation durchgeführt wurden oder ohne Eingehen einer Kooperation durchgeführt worden wären, nur diejenigen Kosten als Kooperationseffekte berücksichtigt zu werden, die bei der Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen durch das Vermeiden von Leerfahrten eingespart werden. Genau das geschieht durch die direkten und indirekten Varianten des o.a. Kosteneffekts. Ein komplementärer, kooperationsbedingter Erlöseffekt spielt dagegen bei der kooperativen Erfüllung von Transportaufträgen, die auch schon vor dem Eingehen einer Kooperation durchgeführt wurden oder ohne Eingehen einer Kooperation durchgeführt worden wären, keine Rolle. Zumindest wurden hierfür seitens der Praxispartner des Verbundprojekts keine einschlägigen Beispiele präsentiert.

Aus den vorgenannten Gründen erscheint es gerechtfertigt, zur monetären Beurteilung von Kooperationseffekten wie folgt zu verfahren: Im Hinblick auf Transportaufträge, die auch schon vor dem Eingehen einer Kooperation durchgeführt wurden oder ohne Eingehen einer Kooperation durchgeführt worden wären, werden nur die Kosten erfasst, die durch das kooperationsbedingte Einsparen von Leerfahrten reduziert werden (Kosteneffekt). Bei zusätzlichen Transportaufträgen, die ohne Kooperation nicht akquiriert worden wären, werden die Deckungsbeiträge berücksichtigt, die mit den zusätzlichen Transportaufträgen erwirtschaftet werden (Deckungsbeitragseffekt), und zwar unabhängig davon, ob sich hierbei Leerfahrten vermeiden lassen oder nicht.

Darüber hinaus kann die Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen unabhängig von zusätzlichen Transportaufträgen zur Quelle weiterer Deckungsbeiträge werden. In diesem Fall wird von einem *akquisitionsunabhängigen* Deckungsbeitragseffekt gesprochen. Seine Ursachen können vielfältiger Art sein. Sie werden im Folgenden nur kurz skizziert, weil der akquisitionsunabhängige

Deckungsbeitragseffekt bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS eine weitaus geringere Bedeutung als der akquisitionsinduzierte Deckungsbeitragseffekt besitzt.¹⁾

Als Quelle des akquisitionsunabhängigen Deckungsbeitragseffekts kommen vor allem *Qualitätsverbesserungen* bei der Leistungserstellung der Eisenbahnverkehrsunternehmen in Betracht. Dies trifft aber nur unter drei einschränkenden Voraussetzungen zu. Erstens darf es sich nicht um Qualitätsverbesserungen handeln, die zur Akquisition zusätzlicher Deckungsbeiträge führen. In diesem Fall läge „nur“ eine weitere, oben noch nicht explizit gewürdigte Ursache für den akquisitionsinduzierten Deckungsbeitragseffekt vor, die nicht unter den akquisitionsunabhängigen Deckungsbeitragseffekt subsumiert werden darf. Zweitens wird stets davon ausgegangen, dass ein akquisitionsunabhängiger Deckungsbeitragseffekt für die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen wirtschaftlich vorteilhaft ist, also ein positiver Deckungsbeitrag erwirtschaftet wird. Dies setzt voraus, dass die Zusatzerlöse, die mithilfe der Qualitätsverbesserung erzielt werden können, größer sind als die Zusatzkosten, die von qualitätsverbessernden Aktivitäten verursacht werden. Drittens sind hier im Kapitel zu Kooperationseffekten nur solche Qualitätsverbesserungen von Interesse, die sich auf die Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen in einem virtuellen Unternehmen zurückführen lassen.

Qualitätsverbesserungen bei der Leistungserstellung lassen sich unter den drei vorgenannten Voraussetzungen vor allem dadurch erzielen, dass den Kunden des virtuellen Unternehmens ein Service geboten wird, zu dem sich die beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen vor ihrer Kooperation – also auf sich allein gestellt – nicht in der Lage sahen. Zur Verdeutlichung seien zwei Beispiele angeführt.

Erstens lässt sich vorstellen, dass durch die Kooperation mehrerer Eisenbahnverkehrsunternehmen ein Transportauftrag *schneller* durchgeführt werden kann, als es einem einzelnen Eisenbahnverkehrsunternehmen möglich gewesen wäre (Verbesserung der Zeitqualität). Dazu kann es z.B. kommen, weil mithilfe eines Kooperationspartners Rangier- oder Umschlagaktivitäten in kürzerer Zeit erfolgen oder weil sich durch die Mitnutzung einer „Express-Verbindung“, die nur vom Kooperationspartner angeboten wird, ein Transportauftrag rascher erfüllen lässt. Sofern der Kunde bereit ist, im Auftragsentgelt eine „Beschleunigungs-“ oder „Geschwindigkeitsprämie“ zu entrichten, wächst – unter Berücksichtigung der Zusatzkosten, die für die schnellere Auftragsdurchführung verursacht werden,²⁾ – der Deckungsbeitrag des betrachteten Transportauftrags.

1) Ein strenger Beleg für diese These einer geringeren Bedeutung des akquisitionsunabhängigen Deckungsbeitragseffekts kann nicht angeführt werden, weil die Eisenbahnverkehrsunternehmen über keine Aufzeichnungen in ihrem Rechnungswesen verfügen, die es gestatten würden, sowohl den akquisitionsinduzierten als auch den akquisitionsunabhängigen Deckungsbeitragseffekt numerisch exakt zu messen und alsdann diese beiden Effekte miteinander zu vergleichen. Vielmehr beruht die o.a. These auf einer groben Einschätzung der Eisenbahnverkehrsunternehmen. Sie kann aber auch einer systematischen Wahrnehmungsverzerrung unterliegen, die daraus resultiert, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen ein besonders großes Interesse an der Akquisition zusätzlicher Transportaufträge hegen (darauf wurde schon oben hingewiesen). Dieses Interesse kann dazu führen, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen Deckungsbeiträge aus zusätzlichen Transportaufträgen stärker wahrnehmen als Deckungsbeiträge, die aus anderen Quellen stammen.

2) Diese Zusatzkosten umfassen zumindest die Kosten, die für die Koordinierung der Transportaktivitäten der beiden kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen anfallen.

Ein zweites Beispiel stellt der Service dar, potenzielle Kunden bei der *Reaktivierung* ihrer bereits vorhandenen, aber *passiven Gleisanschlüsse* zu *beraten*.¹⁾ Dieser zusätzliche Beratungsservice wurde von den Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts bislang nicht angeboten, weil sie nicht über das entsprechende Beratungs-Know-how verfügten und weil sie sowohl die zeitlichen als auch die personellen Ressourcen für den Erwerb dieses Know-hows scheuten. Erst im Rahmen des Verbundprojekts MAEKAS erscheint es den Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgrund des „gebündelten“ Know-how-Erwerbs, bei dem der Ressourceneinsatz, der für den Know-how-Erwerb erforderlich ist, auf mehrere Kooperationspartner verteilt wird,²⁾ als wirtschaftlich vertretbar, die entsprechende Beratungsexpertise *gemeinsam* zu erwerben.

Der zusätzliche Beratungsservice, der zur Unterstützung eines potenziellen Kunden bei der Reaktivierung seines passiven Gleisanschlusses offeriert wird, erschließt den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen eine neuartige Erfolgsquelle. Es geht hierbei nicht mehr – wie im ersten Beispiel – um die Qualitätsverbesserung von Leistungen (Transportleistungen), die schon seit jeher erbracht wurden. Vielmehr stellt der zusätzliche Beratungsservice eine neuartige Dienstleistung *sui generis* dar, die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS bislang überhaupt noch nicht offeriert wurde. Dadurch wird das Leistungsspektrum, das die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen im virtuellen Unternehmen gemeinsam anbieten, in qualitativer Hinsicht verbreitert. Aus dieser qualitativen Erweiterung des Leistungsspektrums können zwei Effekte resultieren.

Einerseits lassen sich mit der neuartigen Dienstleistung des Beratungsservices *eigenständige* Deckungsbeiträge generieren. Das heißt, bereits mit der Durchführung eines Beratungsauftrags für die Gleisanschlussreaktivierung werden Deckungsbeiträge verdient, und zwar unabhängig davon, ob das beratene Unternehmen später einen Transportauftrag an das beratende Eisenbahnverkehrsunternehmen erteilt. Dieser erste Effekt interessiert hier als akquisitionsunabhängiger Deckungsbeitrags-effekt.

Andererseits liegt es nahe, dass ein Unternehmen, das Gütermengen transportieren lassen möchte (Verlader) und sich von einem der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der Reaktivierung seines passiven Gleisanschlusses beraten lässt, während der Beratung so großes Vertrauen in die Kompetenzen des Eisenbahnverkehrsunternehmens oder des „dahinter“ stehenden virtuellen Unternehmens gewonnen hat, dass es später einen Transportauftrag an das Eisenbahnverkehrsunternehmen vergibt. In diesem Fall wurde nicht nur ein zusätzlicher Transportauftrag, sondern auch ein Neukunde für das Eisenbahnverkehrsunternehmen gewonnen. Dies schlägt sich als akquisitions-

1) Auf diesen Beratungsservice wird im Projektbericht Nr. 13 ausführlicher eingegangen, in dem ein 4-Phasen-Vorgehensmodell für die Gleisanschlussreaktivierung präsentiert wird.

2) Nur am Rande sei vermerkt, dass diese „wohlwollende“ Formulierungsweise eine zusätzliche Einflussgröße verdeckt. Zwar setzen die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen Personalressourcen ein, um ihre Mitarbeiter das Beratungs-Know-how für die Reaktivierung von passiven Gleisanschlüssen erwerben zu lassen (sekundärer Wissenserwerb). Allerdings erfolgt der primäre Wissenserwerb nicht durch die Praxispartner selbst, sondern wird durch den Universitätspartner geleistet, der das zur Beratung erforderliche Wissen akquiriert, in leicht verständlicher Form aufbereitet und an die Praxispartner in entsprechenden Unterlagen, Vorträgen und Workshops vermittelt. Da der Universitätspartner aus Fördermitteln des BMWi für das Verbundprojekt MAEKAS bezahlt wird, trifft es streng genommen nicht zu, dass der Ressourceneinsatz, der für den Know-how-Erwerb erforderlich ist, auf die Kooperationspartner vollständig verteilt wird. Stattdessen kommt neben dem Verteilungseffekt innerhalb eines virtuellen Unternehmens auch ein Fördereffekt seitens der öffentlichen Hand hinzu.

induzierter Deckungsbeitragseffekt bzw. als Akquisitionseffekt nieder, die beide schon an früherer Stelle erläutert wurden.

Bemerkenswert ist, dass in dem zuletzt skizzierten Fall der akquisitionsinduzierte und der akquisitionsunabhängige Deckungsbeitragseffekt nicht mehr isoliert nebeneinander stehen. Vielmehr besteht eine Dependenz zwischen beiden: Der zusätzliche Beratungsservice generiert nicht nur einen direkten, akquisitionsunabhängigen Deckungsbeitragseffekt, sondern stellt ein Instrument dar, mit dessen Hilfe sich ein indirekter, akquisitionsinduzierter Deckungsbeitrag bewirken lässt.

Darüber hinaus zeigt der zusätzliche Beratungsservice bei der Gleisanschlussreaktivierung in exemplarischer Weise auf, dass Eisenbahnverkehrsunternehmen ihr *Geschäftsmodell* durch ihre Kooperation in einem virtuellen Unternehmen beträchtlich *erweitern* können: Neben die reinen Transportdienstleistungen, die bislang das Geschäftsmodell der Eisenbahnverkehrsunternehmen dominierten, treten zusätzliche Dienstleistungen, wie z.B. der zuvor erläuterte Beratungsservice. Solche zusätzlichen Dienstleistungen können maßgeblich dazu beitragen, die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen aus der Sicht ihrer Kunden von anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen zu differenzieren und somit den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen einen *strategischen Wettbewerbsvorteil* zu verschaffen. Auch hierdurch kann die Wettbewerbsfähigkeit dieser Eisenbahnverkehrsunternehmen nachhaltig gestärkt werden.

Aus der Perspektive des strategischen Managements besitzt der zusätzliche Service, potenzielle Kunden bei der Reaktivierung ihrer bereits vorhandenen, aber passiven Gleisanschlüsse zu beraten, einen weiteren, *strukturellen Vorteil*, der über den vorgenannten Differenzierungsvorteil einzelner Eisenbahnverkehrsunternehmen hinausgeht. Dieser strukturelle Vorteil gehört zum Typ der *Netzwerkeffekte*. Er beruht darauf, dass die Vorteilhaftigkeit von Gütertransporten aus Kundensicht sehr stark von einer schnellen und effizienten Durchführung der sogenannten ersten und letzten Meile im Transportablauf abhängt. Daher nimmt die Attraktivität eines Verkehrsmittels aus Kundensicht umso mehr zu, je weniger Umladeaktivitäten zur Bewältigung der ersten und letzten Meile erforderlich sind.

Solche Umladeaktivitäten werden immer dann erforderlich, wenn der Verkehrsträger eines Verkehrsmittels, das einen Gütertransport im Hauptlauf durchführt, am Beginn oder am Ende einer Tour im Vor- bzw. Nachlauf nicht unmittelbar an den Versender bzw. den Empfänger der zu transportierenden Güter¹⁾ angeschlossen ist, sondern zum Erreichen des Senders bzw. des Empfängers ein Umladen der Güter auf die Transportmittel eines anderen Verkehrsträgers erforderlich wird. Dies stellt ein *typisches Problem* des Verkehrsträgers Schiene dar,²⁾ weil der Versender oder der Empfänger von zu transportierenden Gütern (oder beide) oftmals über keinen eigenen oder nur über einen passiven Gleisanschluss verfügt, sodass in der Regel ein Umladen der Güter auf Lastkraftwagen erforderlich wird.³⁾ Daher steigt die Wahrscheinlichkeit der schnellen und effizienten

1) Wenn zwischen dem Versender und dem Empfänger von zu transportierenden Gütern nicht ausdrücklich unterschieden werden soll, ist oftmals auch von einem Verloader der jeweils betroffenen Güter die Rede. Entsprechend wird nicht mehr zwischen Vor- bzw. Nachlauf differenziert, sondern in unterschiedsloser Weise vom Nebenlauf eines Gütertransports gesprochen.

2) Gleiches trifft auf den Verkehrsträger Wasserstraße zu. Dieser wird hier im Kontext des Verbundprojekts MAEKAS aber nicht weiter betrachtet.

3) In dieser Hinsicht leidet der Verkehrsträger Schiene unter einem strukturellen („strategischen“) Nachteil gegenüber dem Verkehrsträger Straße, bei dem sich in der Regel Haus-zu-Haus-Verkehre problemlos durchführen lassen.

Durchführbarkeit von Gütertransporten mit dem Verkehrsmittel Bahn, wenn in einem Verkehrsnetz möglichst viele Knoten als Standorte von potenziellen Versendern oder Empfängern über einen eigenen, aktiven Gleisanschluss verfügen. Diese Wahrscheinlichkeit wird insgesamt erhöht, wenn es den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen gelingt, durch eine intensive Beratungstätigkeit möglichst viele Unternehmen (Netzwerkeffekt) davon zu überzeugen, ihre passiven Gleisanschlüsse zu reaktivieren oder neue Gleisanschlüsse einzurichten¹⁾. Auf diese Weise steigt der „Vernetzungsgrad“ des Verkehrsmittels Bahn in einem gegebenen Verkehrsnetz und somit auch seine Attraktivität aus Kundensicht, weil das Risiko, auf geschwindigkeits- und effizienzmindernde Umladeaktivitäten zur Bewältigung der ersten oder letzten Meile angewiesen zu sein, tendenziell sinkt.

Die Attraktivität des Verkehrsmittels Bahn kann auch auf andere Weise gesteigert werden. In diesem Fall wird nicht darauf abgezielt, Umladeaktivitäten zur Bewältigung der ersten oder letzten Meile zu vermeiden, indem die Anzahl aktiver Gleisanschlüsse bei potenziellen Verladern und Empfängern von zu transportierenden Gütern erhöht wird. Stattdessen werden bei dieser Alternative solche Umladeaktivitäten als „notwendiges Übel“ akzeptiert. Es geht dann vielmehr darum, die Umladeaktivitäten so zu organisieren, dass möglichst geringe Geschwindigkeits- oder Effizienzverluste auftreten. Dieser Gestaltungsansatz liegt dem Konzept der Einrichtung sogenannter „Hubs“ oder „Rail-Ports“ zugrunde.²⁾ Sie dienen dem *multimodalen Gütertransport* („modal split“), bei dem die Transportmittel unterschiedlicher Verkehrsträger bewusst miteinander kombiniert werden („kombinierter Verkehr“), um – im Vergleich zur Nutzung nur eines Verkehrsträgers – insgesamt eine Steigerung der Transportgeschwindigkeit und Transporteffizienz zu erzielen.

Solche multimodalen Gütertransporte erweisen sich insbesondere für Logistikkonzepte im Business-to-Business-Bereich von Industrie- und Handelsunternehmen oftmals als unerlässlich. Daher sollte der Beratungsservice von Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht ausschließlich darauf ausgerichtet sein, Versender und Empfänger von Gütertransporten hinsichtlich der Reaktivierung passiver und der Einrichtung neuer Gleisanschlüsse zu beraten. Vielmehr gebietet es der anhaltende und zukunftsweisende Trend zu multimodalen Güterverkehren, in das Beratungsangebot auch die Nutzung von oder sogar Beteiligung an „Hubs“ und „Rail-Ports“ im kombinierten Verkehr aufzunehmen.

1) Die Einrichtung neuer Gleisanschlüsse wurde bislang nicht erwähnt, weil lediglich auf Unterstützung bei der Reaktivierung von passiven Gleisanschlüssen Bezug genommen wurde. Diese Reaktivierung von passiven Gleisanschlüssen steht im Vordergrund des Verbundprojekts MAEKAS, weil sich die Gleisanschlussreaktivierung mit wesentlich geringerem finanziellen und zeitlichen Aufwand realisieren lässt als das Verlegen neuer Gleisanschlüsse. Aber die letztgenannte Option soll nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Daher empfiehlt es sich, den angebotenen Beratungsservice von vornherein inhaltlich so breit anzulegen, dass er auch die Beratung hinsichtlich der Einrichtung neuer Gleisanschlüsse umfasst.

2) Vgl. RODRIGUE/SLACK/COMTOIS (2001), S. 343; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2008), S. 13 f.

5.2.1.5 Emissionseffekt

Einen *fünften quantitativen Effekt*, der aus der Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen in einem virtuellen Unternehmen resultieren kann, stellt der *Emissionseffekt* dar. Es handelt sich im Allgemeinen um einen *Folgeeffekt* der Vermeidung von Leerfahrten.¹⁾ Somit wird eine „große Klammer“ zur Reduzierung von Leertonnenkilometern geschlagen, die im Kapitel 5.2.1.1 aus der Perspektive der Leertonnenkilometereffekte erster und zweiter Ordnung thematisiert wurde.

Um den Emissionseffekt einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu messen, kann auf zwei unterschiedliche Weisen vorgegangen werden. Erstens ist es möglich, diejenigen Emissionen miteinander zu vergleichen, die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der Realisierung ihrer Touren einerseits ohne und andererseits mit Kooperation verursacht werden. Zweitens bietet es sich an, die Leertonnenkilometer, die mithilfe einer Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen vermieden werden, mit einem durchschnittlichen Emissionskoeffizienten je Leertonnenkilometer zu multiplizieren.

Die erste Messmethode ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht grundsätzlich zu bevorzugen. Denn nur sie gestattet es, in „ganzheitlicher“ Weise alle Emissionsveränderungen zu berücksichtigen, die durch eine Kooperation zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen verursacht werden. Das schließt beispielsweise auch den kooperationsbedingten Einsatz von Lokomotiven mit geringeren spezifischen Emissionswerten ein,²⁾ der sich nicht auf die Vermeidung von Leerfahrten zurückführen lässt. Hinzu kommt, dass die erste Messmethode auf der problematischen Anwendung von durchschnittlichen Emissionskoeffizienten beruht, denen eine grobe Proportionalisierung zugrunde liegt.³⁾

Allerdings stellt es sich in der betrieblichen Praxis als ein nahezu unüberwindliches Problem heraus, für ein virtuelles Unternehmen aus kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen Informationen über den *kontrafaktischen* Alternativfall zu erhalten, in dem die gleichen Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht miteinander kooperieren. Aufgrund dieses Informationsakquisitionsproblems begnügt man sich im Verbundprojekt MAEKAS mit der zweiten Messmethode im Sinne eines „faute de mieux“. Der Emissionseffekt wird daher nur in einer groben Annäherung durch das Produkt aus denjenigen Leertonnenkilometern, die mithilfe der Kooperation zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen vermieden werden, und aus einem durchschnittlichen Emissionskoeffizienten je Leertonnenkilometer gemessen. Selbst dann verbleibt das nicht-triviale Problem, einen „validen“ durchschnittlichen Emissionskoeffizienten je Leertonnenkilometer zu ermitteln, der nach Ansicht der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen die tatsächlich vermiedenen Emissionen „realistisch“ wiedergibt.

-
- 1) Es lassen sich auch Ausnahmen vorstellen. Ein solcher Ausnahmefall liegt z.B. vor, wenn ein Eisenbahnverkehrsunternehmen für die Durchführung einer Tour seine eigene Lokomotive mit relativ hohen spezifischen Emissionswerten durch die Lokomotive eines kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmens mit relativ niedrigen spezifischen Emissionswerten substituiert, die das kooperierende Eisenbahnverkehrsunternehmen in der aktuellen Situation für keine anderen Touren einzusetzen vermag.
 - 2) Vgl. dazu die Erläuterung in der unmittelbar voranstehenden Fußnote.
 - 3) Vgl. dazu die kritischen Anmerkungen, die im Kapitel 5.2.1.2 zur Proportionalisierung von Fixkosten im betrieblichen Rechnungswesen erfolgten.

Des Weiteren ist fraglich, welche *Emissionsarten* bei der quantitativen Ermittlung des Emissionseffekts berücksichtigt werden sollen. Angesichts der aktuellen Diskussion über die Klimaschädlichkeit von Treibhausgasen erscheint es auf jeden Fall erforderlich, den transportbedingten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu erfassen. Darüber hinaus liegt es nahe, den transportbedingten Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) ebenso zu würdigen.¹⁾ Um beiden Aspekten gerecht zu werden, kann auf zwei unterschiedliche Weisen vorgegangen werden. Entweder werden die CO₂- und die NO_x-Emissionen separat erfasst. Oder die NO_x-Emissionen werden mit der Hilfe von sogenannten CO₂-Äquivalenten in CO₂-Emissionen umgerechnet.²⁾

Die separate Erfassung von CO₂- und die NO_x-Emissionen liegt immer dann nahe, wenn bei der Planung von Touren zur Erfüllung von Transportaufträgen spezielle Emissions- oder Immissionsrestriktionen („Grenzwerte“) zu berücksichtigen sind, die nur für einzelne Treibhausgasarten gelten. Dagegen empfiehlt sich die Verwendung von CO₂-Äquivalenten, wenn es vorrangig interessiert, den *gesamten* Emissionseffekt in Bezug auf eine *Vielzahl* von Treibhausgasen in einer möglichst übersichtlichen Kennzahl zu erfassen. Im vorliegenden Projektbericht wird davon ausgegangen, dass Eisenbahnverkehrsunternehmen noch keine Emissions- oder Immissionsrestriktionen für einzelne Treibhausgasarten beachten müssen. Daher reicht es aus, den gesamten Emissionseffekt einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen mittels der aggregierenden Messgröße „CO₂-Äquivalente“ zu erfassen.

Aufgrund der voranstehend erläuterten Entscheidungen, den Emissionseffekt einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen einerseits in Bezug auf eingesparte Leertonnenkilometer [to-km] und andererseits mittels der aggregierenden Messgröße „CO₂-Äquivalente“ [to CO₂-Äquivalente / to-km] zu erfassen, wird der kooperationsbedingte Emissionseffekt hier in der Dimension [to CO₂-Äquivalente] gemessen. Der Kürze halber kann der Emissionseffekt auch in der Dimension [to] gemessen werden, wenn dabei als implizit vereinbart gilt, dass jeweils Tonnen von CO₂-Äquivalenten gemeint sind.

-
- 1) Neben dem hauptsächlich erfassten Kohlenstoffdioxid (CO₂) und den hier ebenso berücksichtigten Stickoxiden (NO_x) können noch weitere Emissionsarten einbezogen werden. Dazu gehören vor allem Schwefeloxide (SO_x), Methan (CH₄), flüchtige organische Substanzen sowie Abfallstoffe im weitesten Sinne, wie etwa Abrieb von Rädern und Bremsen. Vgl. dazu YU/TING/WU (2009), S. 1071 (allerdings ohne Bezug auf Eisenbahnverkehrsunternehmen).
 - 2) Vgl. zur Anwendung von CO₂-Äquivalenten in betriebswirtschaftlichen Analysen von ökologisch relevanten Entscheidungs- und Gestaltungsproblemen beispielsweise AKCA (2008), S. 2 ff. u. 38 f.

5.2.2 Qualitative Effekte

Die Identifizierung und Beurteilung qualitativer Kooperationseffekte¹⁾ bereitet im Vergleich zu quantitativen Kooperationseffekten erheblich größere Schwierigkeiten. Diese Schwierigkeiten beginnen schon damit, dass sich qualitative Kooperationseffekte per definitionem nicht im konventionellen Sinne messen lassen, weil jede Messung als Abbildung auf eine reellzahlige Skala eine Quantifizierung bedeuten würde.

Da qualitative Kooperationseffekte sich grundsätzlich einer Quantifizierung entziehen, stoßen sie vielerorts auf Akzeptanzbarrieren.²⁾ Des Öfteren werden Meinungen der Art geäußert, dass alles, was nicht präzise gemessen werden kann, unbeachtlich oder irrelevant sei. Solche Ansichten lassen sich nicht nur unter Anhängern eines quantitativ-empirischen Wissenschaftsverständnisses finden, sondern sind ebenso in der betrieblichen Praxis weitverbreitet. Dies trifft insbesondere auf Unternehmensbereiche zu, die von Denkweisen des Controllings, des Finanzmanagements und des Rechnungswesens geprägt sind. Selbst „moderne“ Managementinstrumente einer „ganzheitlichen“ und strategisch ausgerichteten Unternehmensführung, wie beispielsweise die Balanced Scorecard, bestehen darauf, dass sich letztlich alles, was als betriebswirtschaftlich beachtenswert akzeptiert werden soll, in der Gestalt von „harten“ Kennzahlen ausdrücken lassen muss, also quantifiziert werden kann.

Trotz dieser weit verbreiteten Dominanz rein quantitativer Denk- und Argumentationsweisen werden im vorgelegten Projektbericht bewusst auch qualitative Kooperationseffekte beleuchtet. Sie sollten aufgrund eines „offenen“ und „ganzheitlichen“ Wissenschaftsverständnisses der Verfasser auf keinen Fall vernachlässigt werden. Dies entspricht dem Forschungsansatz des „Mixed Method Research“, der neben quantitativen Forschungsmethoden prinzipiell gleichberechtigt auch qualitative Forschungsmethoden zulässt. Erst anhand einer Beurteilung der Erkenntnisse, die sich mit diesen Forschungsmethoden gewinnen lassen, kann *a posteriori* darüber diskutiert werden, ob sich eine der Forschungsmethoden für ein spezielles Forschungsobjekt eventuell als überlegen erwiesen hat. Daher lehnen die Verfasser eine *A-priori-Ausgrenzung* qualitativer Forschungsmethoden, die lediglich auf einer wenig überzeugenden Stigmatisierung qualitativer Denk- und Argumentationsweisen beruht, grundsätzlich ab.

Hinzu kommt, dass *qualitative* Effekte im *strategischen Management* eine herausragende Rolle spielen. Sie übertrifft oftmals die Bedeutung quantitativer Effekte – zumindest in langfristiger Wirkungsperspektive – bei Weitem. Diese Einsicht ist in der Betriebswirtschaftslehre unumstritten. Sie

1) Kein Kooperationseffekt ist „an sich“ qualitativer oder quantitativer Natur. Vielmehr hängt es von skalierungstechnischen *Vorentscheidungen* ab, ob ein Kooperationseffekt entweder so konzeptualisiert wird, dass er sich auf einer reellzahligen *Kardinalskala* messen lässt (*quantitativer* Effekt), oder aber so konzeptualisiert wird, dass er nur auf nicht-reellzahligen *Ordinal-* oder *Nominalskalen* beurteilt werden kann (*qualitativer* Effekt). Solche *Vorentscheidungen* werden hier nicht näher diskutiert, sondern als „gegeben“ vorausgesetzt. Das schließt jedoch nicht aus, dass die *Vorentscheidungen* im Verlauf des Verbundprojekts oder durch interessierte Dritte kritisch in Frage gestellt und unter Umständen sogar revidiert werden. Daher ist es beispielsweise durchaus möglich, einen ursprünglich qualitativ konzeptualisierten Kooperationseffekt durch Entwicklung einer reellzahligen, kardinalen Messskala nachträglich in einen quantitativen Kooperationseffekt zu transformieren.

2) Daher sollte es nicht überraschen, dass von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS kaum Informationen über qualitative Kooperationseffekte erlangt werden konnten.

besitzt auch für das Verbundprojekt MAEKAS hohe Relevanz.¹⁾ Dies kann u.a. darauf zurückgeführt werden, dass in diesem Projekt *strategische Ziele* verfolgt werden. Dazu gehört vor allem das Ziel der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen, ihre *Wettbewerbsfähigkeit* am Markt für schienengebundene Gütertransporte nachhaltig zu stärken; vgl. Kapitel 5.1.²⁾

Die Erreichung des strategischen Ziels einer Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit lässt sich nur schwer vollständig quantifizieren. Zwar ist es möglich, Teilaspekte einer Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit mithilfe quantitativer Subziele zu erfassen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn am relevanten Markt ein ausgeprägter *Kostenwettbewerb* herrscht. Dann kann eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit auf das quantitative Subziel der Kostensenkung zurückgeführt werden. Aber es wurde schon aufgezeigt,³⁾ dass sich die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS *auch* in einem *Differenzierungswettbewerb* befinden. Das strategische Instrument der Differenzierung gegenüber direkten Wettbewerbern (Konkurrenz in der eigenen Branche) und indirekten Wettbewerbern (Substitutionskonkurrenz) entzieht sich aber weitgehend einer Quantifizierung. Daher lassen sich zur Beurteilung, ob die Wettbewerbsfähigkeit von Eisenbahnverkehrsunternehmen im Rahmen eines Differenzierungswettbewerbs gestärkt wurde, im Allgemeinen nur qualitative Kooperationseffekte heranziehen.

Allerdings muss eingeräumt werden, dass wegen der eingangs angesprochenen Schwierigkeiten, qualitative Kooperationseffekte zu identifizieren und zu beurteilen, bislang nur wenige gehaltreiche Erkenntnisse zu dieser Art von Kooperationseffekten vorliegen. Die nachfolgenden Ausführungen fallen daher sehr knapp und „ausbaufähig“ aus. Sie besitzen nur den Charakter einer ersten Gedankensammlung, die in ergänzenden Seminar-, Diplom- und vielleicht sogar Dissertationsprojekten inhaltlich fortentwickelt werden sollte.

Ein *erster* qualitativer Kooperationseffekt besteht in der *Verbesserung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur* der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die in einem virtuellen Unternehmen miteinander kooperieren. Es ist bereits im Konzept virtueller Unternehmen angelegt, zur flexiblen Koordinierung der Aktivitäten aller realen Unternehmen, die in einem virtuellen Unternehmen miteinander kooperieren, auf „moderne“, die realen Unternehmensgrenzen überwindende Informations- und Kommunikationssysteme zu setzen. Dies bedeutet für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS, dass sie ihre bislang genutzten, oftmals inkompatiblen Informations- und Kommunikationssysteme im Interesse einer gemeinsamen Informations- und Kommunikationsinfrastruktur entweder aufeinander abstimmen (Interoperabilität) oder sogar zu einem einheitlichen Gesamtsystem integrieren müssen.

Von einer gemeinsamen und verbesserten Informations- und Kommunikationsinfrastruktur werden mehrere positive *Folgeeffekte* erwartet. Grundsätzlich soll es möglich sein, Informationsdefizite,

-
- 1) Vgl. zur Erörterung qualitativer, strategisch bedeutsamer Effekte für das Verbundprojekt MAEKAS die ausführlichen Darstellungen in den Projektberichten Nr. 5, 6, 7, 9, 10 und 11.
 - 2) Das zweite strategische Ziel der Eisenbahnverkehrsunternehmen, das im Kapitel 5.1 ebenso angeführt wurde, erstreckt sich darauf, maßgebliche Beiträge zur Reduzierung der Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen zu leisten. Dieses strategische Ziel spielt jedoch hier im Kontext qualitativer Kooperationseffekte keine Rolle, weil sich seine Erreichung ohne gravierende Probleme auf einer reellzahligen Kardinalskala messen, also quantifizieren lässt: z.B. mithilfe der vermiedenen Treibhausgasemissionen, gemessen in Tonnen CO₂-Äquivalenten.
 - 3) Vgl. beispielsweise die Ausführungen, die in Kapitel 5.2.1.4 im Zusammenhang mit dem Angebot eines zusätzlichen Beratungsservices erfolgten.

fehlerhafte Informationsverarbeitungen und fehlerhafte Informationsweitergaben (Kommunikationsfehler) entlang der Transportkette zu vermeiden, die von den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der gemeinsamen Durchführung eines Transportauftrags gebildet werden. Des Weiteren lassen sich sowohl zeit- als auch ressourcenintensive Übersetzungsroutinen vermeiden, die sonst an den Systemgrenzen zwischen inkompatiblen Informations- und Kommunikationssystemen erforderlich wären. Dadurch lässt sich die Geschwindigkeit, mit der kooperationsrelevante Informationen verarbeitet und weitergegeben werden, erhöhen. Zugleich sinken tendenziell die Informations- und Kommunikationskosten, weil Fehler vermieden und Übersetzungsroutinen eingespart werden.¹⁾ Schließlich können die Vermeidung von Informations- und Kommunikationsfehlern sowie die Erhöhung der Geschwindigkeit, mit der kooperationsrelevante Informationen verarbeitet und weitergegeben werden, auch dazu führen, dass die Attraktivität des Verkehrsmittels Bahn aus der Sicht potenzieller Kunden steigt. Denn gravierende Mängel im Informationsfluss entlang der Transportkette („Supply Chain“) werden des Öfteren als einer der maßgeblichen Gründe genannt, die einer Erteilung von Transportaufträgen an Eisenbahnverkehrsunternehmen aus Kundensicht entgegenstehen.²⁾

In welchem Ausmaß es im Verlauf der Durchführung des Verbundprojekts tatsächlich gelingen wird, den qualitativen Kooperationseffekt einer verbesserten Informations- und Kommunikationsinfrastruktur zu realisieren, wird sich in Zukunft zeigen müssen. Praktische Erfahrungen mit Bemühungen anderer Unternehmen, ihre Informations- und Kommunikationssysteme z.B. in Lieferanten- und Produktionsnetzwerken aufeinander abzustimmen oder sogar miteinander zu integrieren, begründen zumindest eine gewisse Skepsis gegenüber allzu euphorischen Erwartungen.

Ein *zweiter* qualitativer Kooperationseffekt erstreckt sich auf die *Erhöhung des Service-Levels*³⁾ aus *Kundensicht*. Da der Kundenservice ein komplexes, facettenreiches Konstrukt darstellt, können vielfältige Einflüsse dazu beitragen, den Service-Level von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die miteinander kooperieren, aus Kundensicht zu erhöhen.

Beispielsweise kann es von den Kunden der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen als eine Verbesserung des Kundenservices wahrgenommen werden, wenn es mithilfe des erstgenannten qualitativen Kooperationseffekts gelingt, Informations- und Kommunikationsfehler bei der Zusammenarbeit der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu vermeiden sowie die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und -weitergabe auf Seiten der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunterneh-

1) Nur am Rande sei darauf hingewiesen, dass hier anhand der Verbesserung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur exemplarisch deutlich wird, dass sich ein qualitativer Kooperationseffekt auch auf quantitative Kooperationseffekte – wie die Geschwindigkeit sowie die Kosten für Informations- und Kommunikationsaktivitäten – auszuwirken vermag. Quantitative und Qualitative Kooperationseffekte stehen also nicht notwendig isoliert nebeneinander, sondern können auch miteinander interagieren, indem sie sich einseitig (Dependenzen) oder wechselseitig (Interdependenzen) beeinflussen.

2) Vgl. Kapitel 1.2.3.

3) Da hier *qualitative* Kooperationseffekte betrachtet werden, ist mit dem Service-Level keine quantitative Größe gemeint, sondern eine qualitative, nur ordinal skalierte Größe, die beschreibt, auf welchem „Niveau“ der Service von Kunden der Eisenbahnverkehrsunternehmen wahrgenommen wird. Die Niveaubeschreibungen beschränken sich aufgrund der vorausgesetzten Ordinalskalen darauf, dass Kunden in der Lage sind anzugeben, ob sie den offerierten Service als „besser“ oder „schlechter“ als den Service eines Vergleichsobjekts wahrnehmen. Das Vergleichsobjekt kann sowohl das gleiche Eisenbahnverkehrsunternehmen, aber zu einem früheren Zeitpunkt sein (Zeitvergleich) als auch ein anderes Unternehmen, das im selben Zeitraum einen Wettbewerber des betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens darstellt (Konkurrenzvergleich).

men zu erhöhen. Auf diese Weise fällt die Kommunikation der Kunden mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der Erteilung und der Durchführung eines Transportauftrags wesentlich „kundenfreundlicher“ aus.

Des Weiteren erhöht sich der Service-Level aus Kundensicht, wenn ein Kunde den Eindruck erhält, nicht mit mehreren, jeweils eigenständig agierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen kommunizieren zu müssen, sondern sich so fühlt, als ob er nur mit einem Unternehmen eine Geschäftsbeziehung unterhalten würde. Dadurch lassen sich aus Kundensicht Missverständnisse bis hin zu Widersprüchen vermeiden, die immer dann drohen, wenn sich ein Kunde mit mehreren Kommunikationspartnern über denselben Transportauftrag verständigen muss. Diesem ausgeprägten Kundenbedürfnis nach nur einem, sich „selbst-konsistent“ verhaltenden Ansprechpartner entspricht das „One-face-to-the-customer“-Konzept. Es trägt wesentlich dazu bei, die Komplexität der Kommunikation aus Kundensicht zu reduzieren. Mit guten Gründen kann davon ausgegangen werden, dass sich das „One-face-to-the-customer“-Konzept im Verbundprojekt MAEKAS als ein wichtiger qualitativer Kooperationseffekt realisieren lässt.¹⁾ Denn die beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen kooperieren im Rahmen eines virtuellen Unternehmens miteinander, das von vornherein darauf ausgelegt ist, an der Schnittstelle zur „Außenwelt“, also auch zu seinen Kunden, so zu *erscheinen, als ob* es sich um nur *ein* Unternehmen handeln würde. Darin liegt eines der charakteristischen Merkmale *virtueller* Unternehmen.

Ein *dritter* qualitativer Effekt besteht in der *Verbesserung des Images* der Eisenbahnverkehrsunternehmen. Das Image eines Unternehmens kann durchaus einen signifikanten – sowohl positiven als auch negativen – Einfluss auf seine Wettbewerbsfähigkeit ausüben. Im Verbundprojekt MAEKAS können qualitative Imageverbesserungen der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen aus mehreren Anlässen resultieren.

So erscheint es plausibel anzunehmen, dass die Wahrnehmung eines gut koordinierten²⁾ und kundenorientierten³⁾ Dienstleistungsnetzwerkes auf der Seite von Industrie, Handel und Speditionsunternehmen dazu führt, das Image der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen als Anbieter von Transportdienstleistungen nachhaltig zu verbessern. Diese Imageverbesserung kann dazu beitragen, Akzeptanzprobleme gegenüber Gütertransporten auf dem Verkehrsträger Schiene, die in der Vergangenheit vielfach bestanden, abzubauen oder sogar zu überwinden. Entsprechend steigt die

-
- 1) Allerdings sollten auch Gegenargumente nicht ausgeblendet werden. Insbesondere zeigten sich im Verlauf der Durchführung des Verbundprojekts MAEKAS mehrfach Schwierigkeiten, zwischen den Praxispartnern eine Übereinkunft darüber zu erzielen, wer von ihnen in welchen Situationen mit welchen Kunden kommuniziert. Die Praxispartner konnten sich zunächst nicht auf allgemein verbindliche Kommunikationsregeln einigen, um das „eigentlich“ angestrebte „One-face-to-the-customer“-Konzept im betrieblichen Alltag regelgebunden umzusetzen. Nach einigen Diskussionsrunden, die nicht immer frei von Irritationen und Missverständnissen waren, einigte man sich unter den Praxispartnern schließlich auf eine Art regionaler Abgrenzung von Zuständigkeiten für die Kommunikation mit aktuellen und potenziellen Kunden.
 - 2) Die Wahrnehmung, dass die Aktivitäten der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen gut miteinander koordiniert sind, lässt sich vor allem auf den qualitativen Kooperationseffekt einer Verbesserung ihrer Informations- und Kommunikationsinfrastruktur zurückführen.
 - 3) Die Wahrnehmung, dass die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen ein hohes Ausmaß an Kundenorientierung realisieren, hängt vor allem mit dem qualitativen Kooperationseffekt zusammen, den Service-Level aus Kundensicht zu erhöhen.

Wettbewerbsfähigkeit der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen auf dem Markt für Gütertransportdienstleistungen.

Hinzu kommt, dass die aktuelle Diskussion über „Green Logistics“, die schon an früherer Stelle angesprochen wurde, speziell Eisenbahnverkehrsunternehmen einen besonderen *Imageschub* verleiht. Denn Eisenbahnverkehrsunternehmen können – neben der Binnenschifffahrt – für sich in Anspruch nehmen, Gütertransporte auf relativ umweltfreundliche Weise durchzuführen. Dieses Argument gilt jedoch allgemein zugunsten von Eisenbahnverkehrsunternehmen, stellt also noch keinen speziellen Bezug zur Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen her. Ein qualitativer Kooperationseffekt kommt erst dadurch zustande, dass im Verbundprojekt MAEKAS großer Wert darauf gelegt wird, *mittels* der *Kooperation* zwischen den beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen Leerfahrten einzusparen und vor allem dadurch die Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase nachhaltig zu reduzieren. Folglich trägt die Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen *verstärkt* dazu bei, das umweltfreundliche Image der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu fördern und so ihren Beitrag zu „Green Logistics“ in den Vordergrund der öffentlichen Aufmerksamkeit zu rücken.

5.3 Exemplarische Kooperationseffekte

5.3.1 Theoretische Optimierungsbeispiele

Die Optimierungsbeispiele, die im Folgenden präsentiert und kurz erläutert werden, sollen für die Existenz von *Zielkonflikten* oder sogenannten „*trade offs*“ sensibilisieren. Ein Zielkonflikt oder „*trade off*“ liegt in einer speziellen, optimierungsrelevanten Situation¹⁾ immer dann vor, wenn es in dieser Situation unmöglich ist, mehrere (Formal-) Ziele zugleich in bestmöglicher Weise zu erfüllen. Stattdessen müssen sich Entscheidungsträger in dieser Situation damit zufriedengeben, nur eines der Ziele zu Lasten der jeweils anderen Ziele bestmöglich erreichen zu können. Darüber hinaus dienen die Optimierungsbeispiele dazu aufzuzeigen, dass die *Vermeidung von Leerfahrten* für die Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen *keineswegs* ein *selbstverständliches* Ziel darstellt. Vielmehr kann es angesichts von Zielkonflikten durchaus angemessen erscheinen, die Erstrebenswertheit (Dignität) des Ziels, Leerfahrten zu vermeiden, kritisch zu hinterfragen.

Bevor auf die Optimierungsbeispiele im Einzelnen eingegangen wird, erscheinen einige vorbereitende Anmerkungen grundsätzlicher Art angebracht.

Erstens handelt es sich um keine realistischen, sondern um fiktive oder „theoretische“ Beispiele. Sie wurden gegenüber Realproblemen der Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen extrem vereinfacht, um die eingangs angesprochenen Zielkonflikte umso transparenter herausarbeiten zu können.

Zweitens erstrecken sich die Optimierungsbeispiele nicht auf eine Optimierung im betriebswirtschaftlich strengen Wortsinn. Denn bei einer Optimierung im strengen Sinne müsste aus *allen* zulässigen Handlungsalternativen diejenige Menge zulässiger Handlungsalternativen ausgewählt wer-

1) Wegen dieses expliziten Situationsbezugs wird keineswegs der Anspruch erhoben, *grundsätzlich* bestehende Zielkonflikte zu thematisieren, die in der Betriebswirtschaftslehre als sogenannte „Dilemmata“ bekannt sind. Vielmehr geht es nur um *situativ bedingte* Zielkonflikte zwischen Zielen, die sich in anderen Entscheidungssituationen auch als komplementär oder indifferent erweisen können.

den, zu denen *keine* ebenso zulässigen, aber – nach Maßgabe der jeweils vorausgesetzten Optimierungsziele – *echt besserstellenden* Handlungsalternativen existieren (Dominanzkonzept der multiattributiven Optimierung oder Vektoroptimierung). Bei den hier betrachteten Optimierungsbeispielen wird aber nicht untersucht, wie groß die Menge aller zulässigen Handlungsalternativen tatsächlich ist. Stattdessen wird stets von nur zwei zulässigen Handlungsalternativen ausgegangen und ermittelt, wie zwei Optimierungsziele im Hinblick auf diese beiden Handlungsalternativen erfüllt werden.¹⁾

Drittens können sich Optimierungsbeispiele nur auf *quantitative* Kooperationseffekte beziehen, die in Kapitel 5.2.1 vorgestellt wurden. Denn der Optimierungsbegriff setzt Minimierungs- oder Maximierungsoperationen voraus, die sich nur auf quantitative Ziele oder Effekte anwenden lassen.

Viertens werden als exemplarische Optimierungsziele nur zwei (Formal-) Ziele betrachtet. Es handelt sich einerseits um das Ziel, *Leerfahrten* so weit wie möglich zu *vermeiden*, und andererseits um das Ziel, die *Umsatzrendite* von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu *maximieren*.

Das erstgenannte Ziel knüpft unmittelbar an den quantitativen Kooperationseffekt der Leerfahrtenvermeidung an, der in Kapitel 5.2.1.1 ausführlicher erörtert wurde. Wie dort schon erläutert wurde, bedarf der Leerfahrteneffekt einer Operationalisierung. Dies geschieht in den nachfolgenden Optimierungsbeispielen in einer speziellen Weise, um die Beispiele möglichst einfach und somit anschaulich zu halten. Die Leerfahrten von Güterzügen werden der Übersichtlichkeit halber nur auf Güterzüge bezogen, die ausschließlich mit leeren Güterwagen verkehren. Es werden also nur Leerfahrten im engeren Sinne berücksichtigt. Darüber hinaus wird der Einfachheit halber nur zwischen Güterwagen unterschieden, die zwischen jeweils zwei Haltepunkten eines Verkehrsnetzes entweder leer oder aber vollständig beladen verkehren. Von den zu transportierenden Gütermengen und den Ladungskapazitäten der Güterwagen wird hierbei vollkommen abstrahiert. Deshalb wird im Folgenden nur noch von leeren versus beladenen Güterwagen gesprochen. Des Weiteren treten an die Stelle der gehaltvolleren, aber auch komplexer zu ermittelnden Maßgrößen der Last- und Leertonnenkilometer (jeweils in [to·km] gemessen) die einfacher und anschaulicher handhabbaren Maßgrößen der Last- bzw. Leerkilometer (jeweils in [km] gemessen), die von einem Güterzug zurückgelegt werden. Folglich wird das Ziel, Leerfahrten so weit wie möglich zu vermeiden, zunächst durch das Ziel operationalisiert, die *Leerkilometer* zu *minimieren*, die von einem Güterzug auf seiner Tour zurückgelegt werden. Darüber hinaus besteht ein Interesse daran, Handlungsalternativen „sinnvoll“ miteinander vergleichen zu können, bei denen die Güterzüge Touren unterschiedlicher Längen fahren. Bei Handlungsalternativen mit unterschiedlichen Tourlängen würde jedoch die Betrachtung der absoluten Angaben für die jeweils anfallenden Leerkilometer keinen aussagekräftigen Vergleich gestatten, weil eine Reduzierung der Leerkilometer um *denselben* Wert für Touren *unterschiedlicher*

1) Da nur untersucht wird, in welchem Ausmaß die beiden Handlungsalternativen zu einer *Verbesserung* (oder *Verschlechterung*) der zwei zugrunde gelegten Ziele beitragen, handelt es sich streng genommen nicht um Optimierungs-, sondern um Meliorierungsbeispiele und dementsprechend nicht um Optimierungs-, sondern um Meliorierungsziele. Allerdings wird die Unterscheidung zwischen Optimierung und Meliorierung sowohl in der betriebswirtschaftlichen Theorie als auch in der betrieblichen Praxis kaum zur Kenntnis genommen. Daher wird im hier vorgelegten Projektbericht im Interesse der Anschlussfähigkeit an die betriebswirtschaftliche Fachliteratur und an sprachliche Usancen der betrieblichen Praxis – trotz aller theoretischen Vorbehalte – von Optimierungsbeispielen und Optimierungszielen geredet. Darüber hinaus lässt sich diese Redeweise auch dann rechtfertigen, wenn davon ausgegangen wird, dass in den hier betrachteten Beispielen grundsätzlich nur zwei Handlungsalternativen zulässig sind. Unter dieser Prämisse fallen Optimierung und Meliorierung inhaltlich zusammen.

Länge nicht denselben Optimierungserfolg ausdrückt. Um die Verzerrung von Optimierungsergebnissen durch unterschiedliche Tourlängen auszuschließen, werden die anfallenden Leerkilometer im Hinblick auf die Länge der jeweils zurückgelegten Tour relativiert. Folglich werden die Leerkilometeranteile [%] gemessen, die sich als Quotienten aus den insgesamt anfallenden Leerkilometern und der Länge der jeweils betrachteten Tour ergeben. Daraus ergibt sich schließlich als Optimierungsziel, den *Leerkilometeranteil* einer Handlungsalternative zu *minimieren*.

Das zweitgenannte Ziel der Umsatzrenditemaximierung lässt sich im Prinzip auf den quantitativen Kooperationseffekt zurückführen, die erwirtschafteten Deckungsbeiträge zu mehr. Aber von dem nahe liegenden Optimierungsziel der Deckungsbeitragsmaximierung wird in mehrfacher Hinsicht abgewichen, um die Optimierungsbeispiele an Usancen der betrieblichen Praxis anzunähern und damit ihre Anschlussfähigkeit zur betrieblichen Praxis zu erhöhen. Zunächst wird der Deckungsbeitragsbegriff, der vor allem in der Betriebswirtschaftslehre aus der theoretischen Perspektive streng verursachungsgerechter Kosten- und Leistungsrechnungen bevorzugt wird, durch den weiter verbreiteten Gewinnbegriff ersetzt. Des Weiteren werden – ebenso im Interesse einer Annäherung an die betriebliche Praxis – Fixkosten berücksichtigt, obwohl sie in Optimierungsrechnungen für die Ermittlung optimaler Handlungsalternativen streng genommen keine Relevanz besitzen. Schließlich wird dem Ansinnen gefolgt, Handlungsalternativen unterschiedlicher „Größe“ abermals „sinnvoll“ miteinander vergleichen zu können, indem die Gewinne, die sich mit den Handlungsalternativen erzielen lassen, hinsichtlich dieser Alternativgrößen relativiert werden. In der betrieblichen Praxis ist es oftmals üblich, die Größe einer Handlungsalternative anhand der Erlöse („Umsatz“) zu messen, die sich mit dieser Handlungsalternative erwirtschaften lassen. Daher wird im Folgenden der relative Gewinn einer Handlungsalternative anhand ihrer Umsatzrendite ermittelt, die als Quotient aus dem erzielten Gewinn und den anfallenden Erlösen festgelegt ist. Daraus ergibt sich schließlich als Optimierungsziel, die *Umsatzrendite* einer Handlungsalternative zu *maximieren*.

Das Optimierungsbeispiel (I) erstreckt sich auf ein Gütertransportszenario, das in der Abbildung 13 auf der nächsten Seite verdeutlicht wird. Das Gütertransportszenario betrifft nur ein Eisenbahnverkehrsunternehmen und nur eine Lokomotive. Zunächst ist eine Lastfahrt mit beladenden Güterwagen vom Haltepunkt A zum Haltepunkt B, alsdann eine Leerfahrt von Haltepunkt B zum Haltepunkt C sowie schließlich erneut eine Lastfahrt vom Haltepunkt C zurück zum Haltepunkt A durchzuführen. Daraus resultiert als erste Handlungsalternative die Tour $T_1 = (A-B-C-A)$. Zusätzlich erhält das Eisenbahnverkehrsunternehmen den Transportauftrag, einen zusätzlichen Gütertransport vom Haltepunkt D, der im Verkehrsnetz zwischen den beiden Haltepunkten B und C liegt, zum Haltepunkt C durchzuführen. Das Eisenbahnverkehrsunternehmen erwägt, diesen zusätzlichen Transportauftrag in die bereits existierende Tour T_1 zwischen den Haltepunkten B und C zu integrieren, sodass sich als zweite Handlungsalternative die Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ ergibt.

Aus der Kalkulationstabelle, die in die nachstehende Abbildung 13 integriert ist, lässt sich unmittelbar erkennen, dass sich das Optimierungsbeispiel (I) „gutmütig“ verhält. Die beiden Optimierungsziele, einerseits den Leerkilometeranteil zu minimieren und andererseits die Umsatzrendite zu maximieren, werden beide durch die zweite Handlungsalternative mit der Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ jeweils bestmöglich erfüllt: Gegenüber der ersten Handlungsalternative sinkt der Leerkilometeranteil von 33,3 % auf 26,7 % und die Umsatzrendite steigt von 20,0 % auf 24,5 %. Daher besteht zwischen diesen beiden Zielen im Optimierungsbeispiel (I) *kein Konflikt*, sondern die beiden Optimierungsziele verhalten sich komplementär. Darüber hinaus verhält sich das Optimierungsbeispiel (I) sogar so „gutmütig“, dass sich die zweite Handlungsalternative ohne Relativierung der Leerkilometer und Gewinne als optimale Alternative erweist. Denn der Übergang von der ersten zur zweiten

Handlungsalternative lässt sowohl die anfallenden Leerkilometer sinken (von 50 km auf 40 km) als auch den erzielten Gewinn ansteigen (von 100 € auf 130 €). Es gibt also keinen rationalen Grund, die zweite Handlungsalternative nicht gegenüber der ersten Handlungsalternative vorzuziehen.

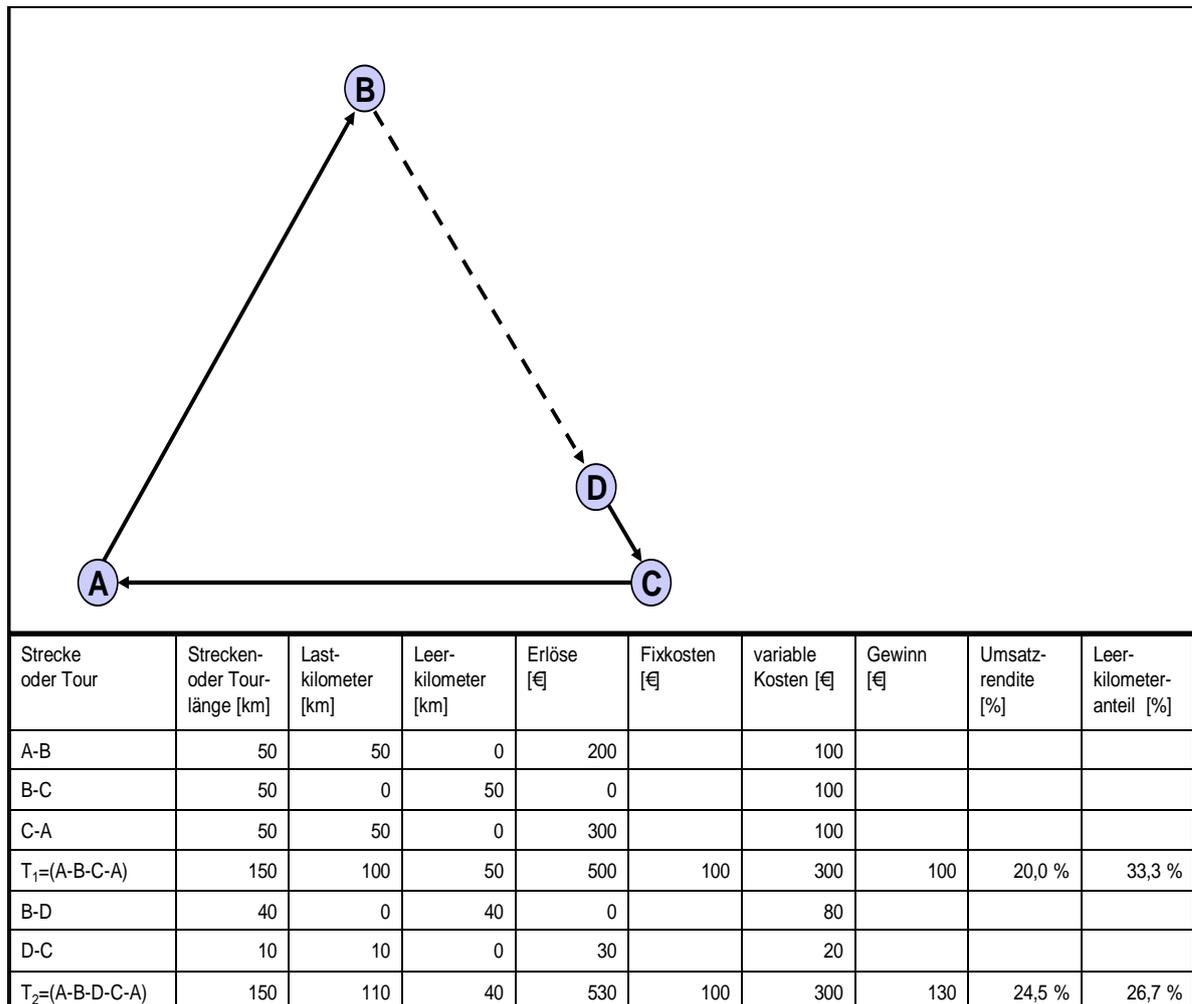


Abbildung 13: Optimierungsbeispiel (I)

Das Optimierungsbeispiel (II) erstreckt sich auf ein verändertes Gütertransportzenario, das in der Abbildung 14 auf der nächsten Seite verdeutlicht wird. Es stimmt mit dem Gütertransportzenario aus dem Optimierungsbeispiel (I) hinsichtlich der ersten Handlungsalternative, also der Tour $T_1 = (A-B-C-A)$, überein. Aber es wird nicht mehr der alte Transportauftrag offeriert, einen zusätzlichen Gütertransport vom Haltepunkt D, der im Verkehrsnetz zwischen den beiden Haltepunkten B und C liegt, zum Haltepunkt C durchzuführen. An seine Stelle tritt der neue Transportauftrag, einen zusätzlichen Gütertransport vom Haltepunkt E, der im Verkehrsnetz außerhalb der Strecke zwischen den beiden Haltepunkten B und C liegt, zum Haltepunkt C durchzuführen. Diese neue, dritte Handlungsalternative erfordert eine längere Leerfahrt vom Haltepunkt B zum Haltepunkt E, als sie im Optimierungsbeispiel (I) für die analoge zweite Handlungsalternative vom Haltepunkt B zum Haltepunkt D angefallen ist. Daraus resultiert im Optimierungsbeispiel (II) für die dritte Handlungsalternative mit der Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ ein wesentlich größerer Betrag an Leerkilometern, als er für die zweite Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ im Optimierungsbeispiel (I) angefallen ist. Allerdings zeichnet sich die dritte Handlungsalternative im Optimierungsbeispiel (II) auch dadurch aus, dass sie zu einem wesentlich höheren Gewinn führt als die zweite Handlungsalternative im Optimierungsbeispiel (I).

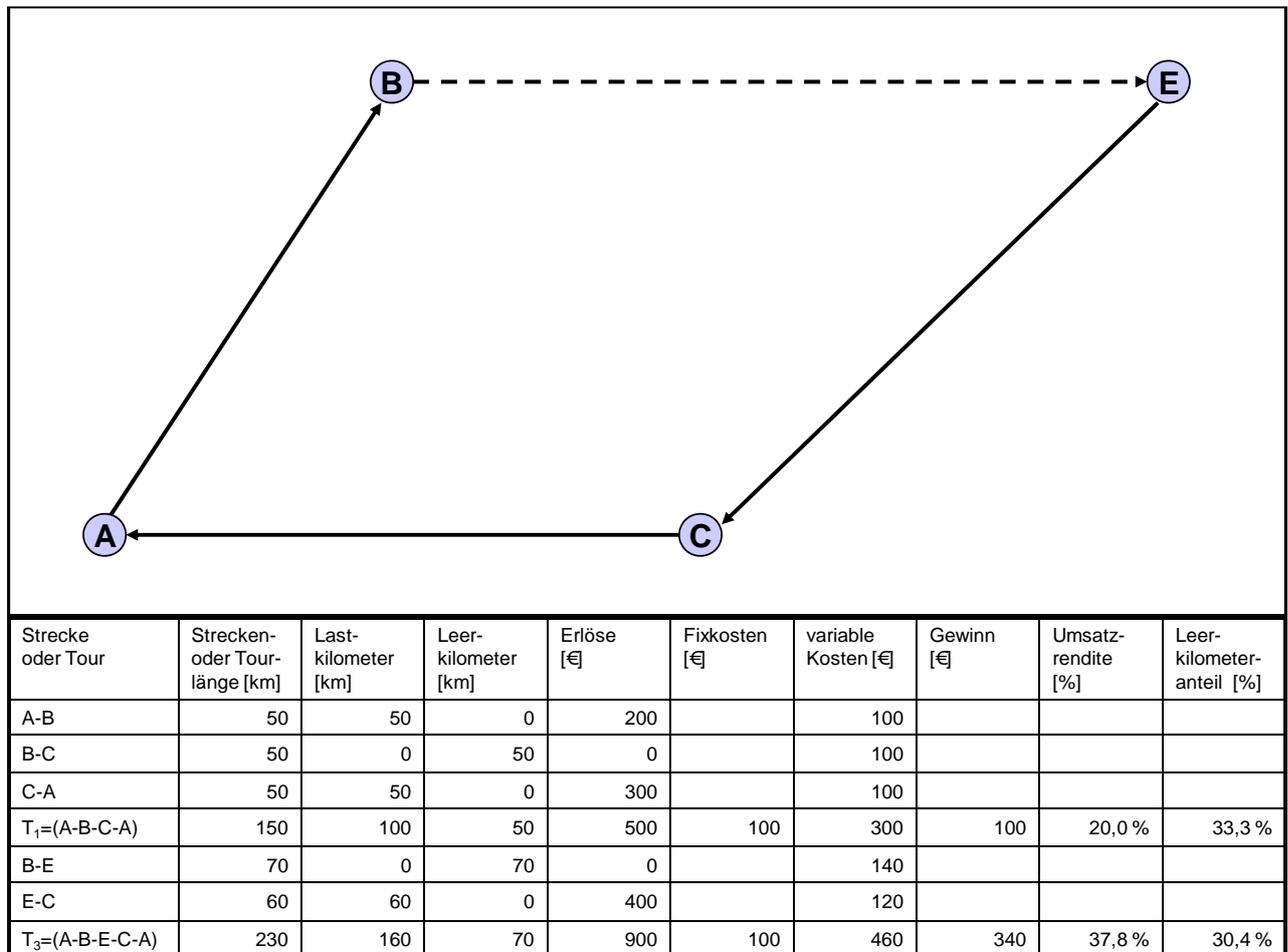


Abbildung 14: Optimierungsbeispiel (II)

Aus der Kalkulationstabelle, die in die voranstehende Abbildung 14 integriert ist, lässt sich erkennen, dass sich das Optimierungsbeispiel (II) weiterhin „gutmütig“ verhält. Die beiden Optimierungsziele, einerseits den Leerkilometeranteil zu minimieren und andererseits die Umsatzrendite zu maximieren, werden auch von der dritten Handlungsalternative jeweils bestmöglich erfüllt: Gegenüber der ersten Handlungsalternative sinkt der Leerkilometeranteil von 33,3 % auf 30,4 % und die Umsatzrendite steigt von 20,0 % auf 37,8 %. Daher besteht zwischen diesen beiden Zielen auch im Optimierungsbeispiel (II) *kein Konflikt*, sondern die beiden Optimierungsziele verhalten sich abermals komplementär.

Wirklich interessant im Sinne eines Zielkonflikts wird die Optimierungssituation erst dann, wenn die beiden Optimierungsbeispiele (I) und (II) zu einem „kombinierten“ Optimierungsbeispiel (III) zusammengeführt werden. Das Optimierungsbeispiel (III) besteht aus einem Gütertransportzenario, das die zwei Gütertransportzenarien der Optimierungsbeispiele (I) und (II) in sich vereinigt: Es umfasst die drei Handlungsalternativen mit den Touren $T_1 = (A-B-C-A)$, $T_2 = (A-B-D-C-A)$ und $T_3 = (A-B-E-C-A)$. In dem derart erweiterten Optimierungsbeispiel (III) sind zwar die zweite Handlungsalternative mit der Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ und die dritte Handlungsalternative mit der Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ gegenüber der ersten Handlungsalternative mit der Tour $T_1 = (A-B-C-A)$ weiterhin eindeutig vorzuziehen. Aber das Verhältnis zwischen den beiden „optimierten“ Touren T_2 und T_3 ist nicht mehr eindeutig, sondern ändert sich je nachdem, welches der beiden Optimierungsziele priorisiert wird. Dies liegt daran, dass sich die beiden Optimierungsziele, einerseits den Leerkilometeranteil zu minimieren und andererseits die Umsatzrendite zu maximieren, durch keine Handlungs-

alternative zugleich bestmöglich erfüllen lassen. Stattdessen besteht zwischen diesen beiden Optimierungszielen ein *Zielkonflikt* oder „trade off“: Im Hinblick auf das Optimierungsziel, den Leerkilometeranteil zu minimieren, erweist sich die zweite gegenüber der dritten Handlungsalternative als überlegen, weil der Leerkilometeranteil von 30,4 % für die Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ auf nur noch 26,7 % für die Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ reduziert wird. Dagegen stellt sich im Hinblick auf das Optimierungsziel, die Umsatzrendite zu maximieren, die dritte gegenüber der zweiten Handlungsalternative als überlegen heraus, weil die Umsatzrendite von nur 24,5 % für die Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ auf 37,8 % für die Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ erhöht wird. Folglich ist es in der hier betrachteten Optimierungssituation unmöglich, sowohl das Ziel der Leerkilometeranteilsminimierung als auch das Ziel der Umsatzrenditemaximierung simultan optimal zu erfüllen.

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive können gute Gründe dafür angeführt werden, das Ziel der Umsatzrenditemaximierung gegenüber dem Ziel der Leerkilometeranteilsminimierung zu priorisieren. Hierfür spricht, dass es sich bei dem Ziel, die Umsatzrendite zu maximieren, um ein *wertbezogenes* Optimierungsziel handelt, das in einem unmittelbaren Zusammenhang mit betriebswirtschaftlichen Erfolgs-, insbesondere Gewinn- und Renditezielen steht. Dagegen handelt es sich bei dem Ziel, den Leerkilometeranteil zu minimieren, um ein rein *mengenbezogenes* Optimierungsziel, das sich nicht unmittelbar auf betriebswirtschaftliche Erfolgsziele zurückführen lässt. Daher sollte sich ein Entscheidungsträger, sofern er an *betriebswirtschaftlich begründetem* Orientierungswissen interessiert ist und sofern Zielkonflikte der zuvor skizzierten Art auftreten, im Zweifelsfall nicht darauf einlassen, das Ziel der Leerkilometeranteilsminimierung – oder allgemeiner: das Ziel der Vermeidung von Leerfahrten – einseitig zu bevorzugen. Stattdessen sollte er sich bewusst sein, dass dieses Ziel in Konflikte mit betriebswirtschaftlich besser begründbaren Zielen treten kann und dass im Falle eines solchen Konflikts den betriebswirtschaftlich ausgerichteten, in Wertgrößen gemessenen Zielen Vorrang gewährt werden sollte.

Zur Verdeutlichung sei noch einmal auf das o.a. Optimierungsbeispiel (III) kurz eingegangen. Aus *betriebswirtschaftlicher* Perspektive erscheint es empfehlenswert, eine *größere Leerfahrt* vom Haltepunkt B zum Haltepunkt E für die *dritte* Handlungsalternative mit der Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ als vom Haltepunkt B zum Haltepunkt D für die zweite Handlungsalternative mit der Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ *bewusst in Kauf zu nehmen*. Dadurch steigt zwar der Leerkilometeranteil von nur 26,7 % für die Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ auf 30,4 % für die Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$. Dennoch erweist sich die dritte Handlungsalternative gegenüber der zweiten Handlungsalternative als *wirtschaftlich vorteilhaft*, weil die Umsatzrendite von nur 24,5 % für die Tour $T_2 = (A-B-D-C-A)$ auf 37,8 % für die Tour $T_3 = (A-B-E-C-A)$ deutlich gesteigert wird. Wohl kaum ein rational agierender betrieblicher Entscheidungsträger wäre bereit, auf einen derart beträchtlichen Anstieg der Umsatzrendite zu verzichten, nur um die insgesamt zurückgelegten Leerkilometer und die daraus ermittelten Leerkilometeranteile zu verringern.

Anhand dieses Beispiels sollte deutlich geworden sein, dass längere Leerfahrten einem Eisenbahnverkehrsunternehmen keineswegs immer schaden müssen, sondern ihm in speziellen Situationen auch Nutzen, etwa im Sinne einer höheren Umsatzrendite, stiften können.

5.3.2 Praktisches Optimierungsbeispiel

Auch die *Praxispartner* des Verbundprojekts MAEKAS sind bestrebt, die Touren ihrer Güterzüge „optimal“¹⁾ zu planen.²⁾ Dabei verfolgen sie in der Regel als Optimierungsziele die Absicht, die Kosten der Tourdurchführung und die Tourdauern möglichst gering zu halten sowie die Erwartungen ihrer Kunden an die Art der Tourdurchführung möglichst gut zu erfüllen. Zur Verdeutlichung wird im Folgenden ein *praktisches* Optimierungsbeispiel vorgestellt, das auf einem *realen* Tourenplanungsproblem beruht.

Das praktische Optimierungsbeispiel betrifft die Tourenplanung eines Praxispartners, der Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG – Neusser Eisenbahn (NDH).³⁾ Auch die Neusser Eisenbahn ist ständig bemüht, die Touren ihrer regelmäßig verkehrenden Güterzüge zu „optimieren“, d.h. hier: zu verbessern. Ein wesentliches Optimierungsinstrument erstreckt sich darauf zu versuchen, mehrere Touren simultan zu planen (zu „kombinieren“) und dabei möglichst gut – im Sinne der vorgeannten Optimierungsziele – aufeinander abzustimmen. Im hier betrachteten, praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn geht es konkret darum, Sand- und Zementtransporte auf „intelligente“ Weise miteinander zu kombinieren und dadurch Leerfahrten so weit wie möglich zu vermeiden. Darüber hinaus ist man bestrebt, weitere Ziele bei der Tourenplanung zu berücksichtigen. Dazu gehören insbesondere die Flexibilität, mit der auf Schwankungen der Transportnachfrage reagiert werden kann, sowie eine Kapazitätsbereitstellung, die zur Kompensierung von „normalen“ Nachfrage- und Produktionsschwankungen ausreicht.

In der nachfolgenden Abbildung 15 wird das zugrunde liegende reale Tourenplanungsproblem der Neusser Eisenbahn grafisch veranschaulicht. Ausgangspunkt für die optimale Tourenplanung ist ein einfaches Verkehrsnetz mit nur vier Knoten, die im Folgenden aufgrund des unmittelbaren Realproblembezugs als Haltepunkte bezeichnet werden. Im Haltepunkt *Deuna* wird aus Sand und weiteren Rohstoffen Zement hergestellt (Produktionsort). Der Sand zur Zementherstellung stammt von Lieferanten, die in den Haltepunkten *Oberhausen* und *Beddingen* angesiedelt sind (Beschaffungsorte). Der Zement soll schließlich zum Haltepunkt *Neuss* transportiert werden, weil er dort von den Kunden des Zementwerks nachgefragt wird (Absatzort).

-
- 1) Wie schon zu Beginn des Kapitels 5.3.1 verdeutlicht, liegt den hier betrachteten Optimierungsbeispielen kein strenger betriebswirtschaftlicher Optimierungsbegriff zugrunde. Dies wird hier durch die distanzierenden Anführungszeichen noch einmal hervorgehoben. Trotzdem wird zwecks Anschlussfähigkeit an die sprachlichen Usancen der betrieblichen Praxis in Kapitel 5.3 generell von „Optimierung“ gesprochen, obwohl es sich streng genommen nur um eine Verbesserung gegenüber einem – jeweils näher zu bestimmenden – Referenzpunkt, also nur um eine *Meliorisierung* handelt.
 - 2) Eine solche Tourenplanung kann einerseits computergestützt mithilfe einer speziellen Tourenplanungssoftware erfolgen. Andererseits lässt sich ein Tourenplan – unter Umständen in persönlicher Absprache mit den jeweils betroffenen Kunden – „manuell“, d.h. ohne Computerunterstützung, erstellen. Die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS fokussieren sich derzeit (noch) auf die rein manuelle Tourenplanung.
 - 3) Interviewpartner: Frau Ute Paul (Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Absatz und Vertrieb); vgl. das Verzeichnis der durchgeführten Interviews am Ende des 9. Kapitels. Vgl. auch JENTJENS (2008), S. 16.

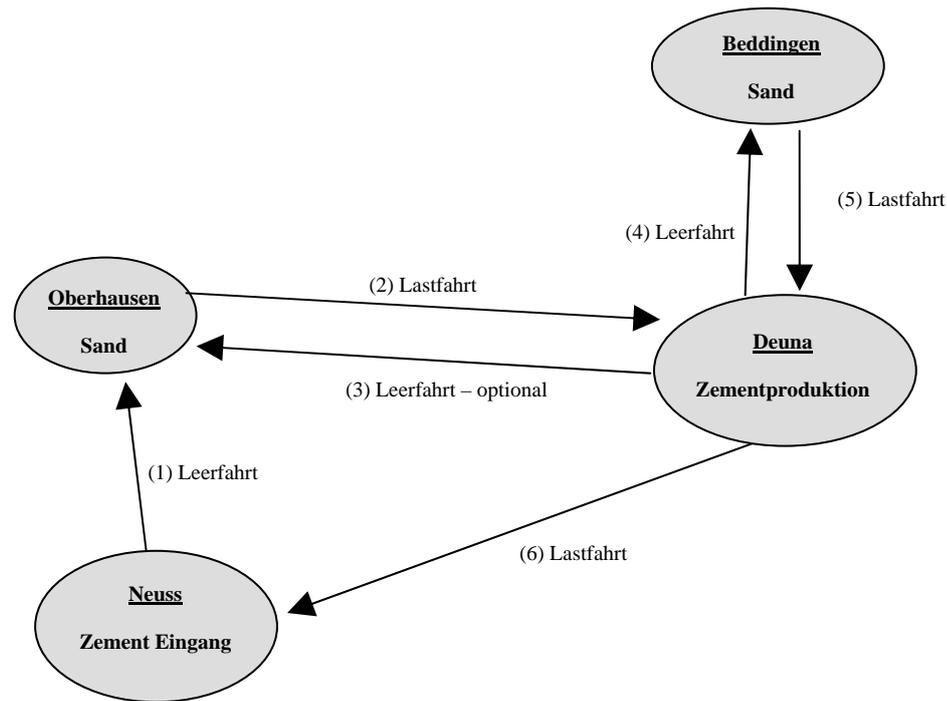


Abbildung 15: praktisches Optimierungsbeispiel für die
Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG – Neusser Eisenbahn

Touren, die als optimale Lösungen für das reale Tourenplanungsproblem aus der Abbildung 15 in Betracht kommen, lassen sich aus den nachfolgend angeführten sechs Toursegmenten zusammensetzen („komponieren“), die überwiegend obligatorischen Charakter besitzen, jedoch in einem Ausnahmefall auch fakultativer Natur sind:

- (1) Der Güterzug beginnt seine Tour, indem er von Neuss nach Oberhausen fährt. Es handelt sich hierbei um eine kurze Leerfahrt im engeren Sinne, weil der Güterzug auf diesem Toursegment ausschließlich leere Güterwagen umfasst.
- (2) Der Güterzug fährt von Oberhausen weiter nach Deuna. Er umfasst sowohl Güterwagen, die in Oberhausen mit Sand beladen wurden, als auch Güterwagen, die von Oberhausen nach Deuna leer verkehren. Aufgrund des Transports von Sand wird von einer Lastfahrt gesprochen.¹⁾ In Deuna werden die beladenen Güterwagen, die den Sand transportiert haben, vollständig entladen, um das Zementwerk ein erstes Mal mit dem benötigten Rohstoff zu versorgen. Je nachdem, ob das optionale Toursegment gemäß Absatz (3) realisiert wird oder nicht, fährt der Güterzug von Oberhausen nach Deuna mit zwei Lokomotiven bzw. mit nur einer Lokomotive.

1) Dem hier betrachteten praktischen Optimierungsbeispiel liegt eine Terminologie zugrunde, die – in Übereinstimmung mit dem Sprachgebrauch der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS – etwas von derjenigen Terminologie abweicht, die im Kapitel 2.1 zur Präzisierung und Ausdifferenzierung des Leerfahrtenbegriffs eingeführt wurde. Beim Optimierungsproblem wird schon dann von einer *Lastfahrt* gesprochen, wenn mindestens ein Güterwagen aus einem Güterzug mit zu transportierenden Gütern beladen ist. Dabei braucht die Ladungskapazität mindestens eines Güterwagens nicht ausgeschöpft zu werden. Im Sinne der Terminologie aus Kapitel 2.1 handelt es sich jedoch um eine *Leerfahrt* im weiteren Sinne, weil zumindest im Hinblick auf die Güterwagen, die im Güterzug leer von Oberhausen nach Deuna verkehren, die Ladungskapazitäten der Güterwagen nicht vollständig ausgeschöpft werden.

- (3) Von Deuna *kann* eine Rückfahrt nach Oberhausen erfolgen, um dort jederzeit über eine möglichst große Ladungskapazität von Güterwagen für den Sandtransport zu verfügen. Wenn von dieser Option Gebrauch gemacht wird, kehrt eine der zwei Lokomotiven, die den Güterzug von Oberhausen nach Deuna gezogen haben, mit denjenigen Güterwagen, die in Deuna vom dorthin transportierten Sand entladen wurden, nach Oberhausen zurück. Es handelt sich dabei abermals um eine Leerfahrt im engeren Sinne, weil der zurückkehrende Güterzug ausschließlich leere Güterwagen umfasst.
- (4) Der Güterzug setzt seine Tour nach Verlassen von Deuna – gegebenenfalls ohne den Teilzug, der nach Oberhausen zurückkehrt, – nach Beddingen fort. Da die Lokomotive wiederum nur mit leeren Güterwagen verkehrt, erfolgt abermals eine Leerfahrt im engeren Sinne. In Beddingen werden die leeren Güterwagen mit Sand beladen.
- (5) Der Güterzug fährt mit seiner Sandfracht von Beddingen nach Deuna. Es handelt sich daher um eine Lastfahrt.¹⁾ Der transportierte Sand wird nach der Ankunft in Deuna vollständig entladen, um das Zementwerk ein zweites Mal mit dem benötigten Rohstoff zu versorgen. Danach werden die Güterwagen, mit denen zuvor Sand transportiert wurde, in Deuna mit dem Zement beladen, der dort vom Zementwerk produziert wurde.
- (6) Schließlich kehrt der Güterzug von Deuna nach Neuss zurück. Dort wird der Zement direkt vom Güterwagen in die Silos des Empfängers umgeladen. Vom Empfänger aus erfolgt dann schlussendlich die Bedienung der Endkunden (Baustellen) per Lkw in kleineren Mengen. Es erfolgt also zuletzt abermals eine Lastfahrt. Der Zement wird in Neuss aus den Güterwagen entladen, sodass am Tourende die Güterwagen wieder leer zur Verfügung stehen, um auf einer neuen Tour eingesetzt zu werden.

In diesem praktischen Optimierungsbeispiel fällt es der Neusser Eisenbahn schwer, Leerfahrten (im engeren Sinn) auf den Toursegmenten (1), (3) und (4) zu vermeiden. Dies liegt einerseits daran, dass es zurzeit keine Transportaufträge für Güter gibt, die von Neuss nach Oberhausen zu transportieren wären, sowie andererseits daran, dass am Standort des Zementwerks in Deuna keine anderen Güter hergestellt werden, die an den Haltepunkten Oberhausen oder Beddingen benötigt werden.

Für die Tourenplanung verfügt die Neusser Eisenbahn *prima facie* nur über einen Freiheitsgrad, der – je nach seiner Ausübung – zu zwei unterschiedlichen Touren führt.

Entweder verzichtet die Neusser Eisenbahn auf das optionale Toursegment (3). Bei dieser *ersten Touralternative* verkehrt auf den Toursegmenten (1) und (2) ein „normaler“ Güterzug, der aus nur einer Lokomotive mit angekoppelten Güterwagen besteht. Diese eine Lokomotive wird für die Durchführung der gesamten Tour eingesetzt, die sich aus den Toursegmenten (1), (2), (4), (5) und (6) zusammensetzt. Mit den Symbolen B, D, N und O für die Haltepunkte Beddingen, Deuna, Neuss bzw. Oberhausen wird die erste Touralternative als $T_1 = (N-O-D-B-D-N)$ notiert.

1) Im Sinne der Terminologie, die im Kapitel 2.1 eingeführt wurde, kann es sich weiterhin um eine Leerfahrt im weiteren Sinne handeln. Dies ist dann der Fall, wenn die Ladungskapazitäten der angekoppelten, mit Sand beladenen Güterwagen durch die insgesamt transportierte Sandfracht nicht vollständig ausgeschöpft werden. Darüber hinaus kann auch eine Leerfahrt im weitesten Sinne vorliegen, sofern sich an den Güterzug noch weitere Güterwagen an koppeln lassen, ohne die Traktionskapazität der eingesetzten Lokomotive und die höchstzulässige Zuglänge zu überschreiten. Im Folgenden wird darauf verzichtet, auf die Abweichungen zwischen den beiden Terminologien einzugehen, von denen die eine für das hier betrachtete praktische Optimierungsbeispiel gilt und die andere im Kapitel 2.1 eingeführt wurde.

Oder die Neusser Eisenbahn nutzt das optionale Toursegment (3), um leere Güterwagen von Deuna nach Oberhausen zurückzutransportieren. Bei dieser *zweiten Touralternative* verkehrt auf den Toursegmenten (1) und (2) ein „besonderer“ Güterzug, der aus zwei Lokomotiven mit angekoppelten Güterwagen besteht. Eine von diesen beiden Lokomotiven wird in Deuna samt derjenigen Güterwagen, mit denen Sand von Oberhausen nach Deuna transportiert wurde, aus dem ursprünglichen Güterzug ausgekoppelt und bildet einen Teilzug, der von Deuna nach Oberhausen zurückkehrt. Der andere Teilzug, der von der zweiten der beiden Lokomotiven gezogen wird, setzt seine Fahrt mit den übrigen Güterwagen, die von Oberhausen nach Deuna leer verkehrten, nach dem Verlassen von Deuna nach Beddingen fort. Auf diese Weise entsteht eine komplex aufgebaute Kombi-Tour, bei der zunächst nur ein Güterzug verkehrt, der aber von zwei Lokomotiven gezogen wird, und die am Haltepunkt Deuna in zwei separat verkehrende Teilzüge aufgespalten wird. Um solche Kombi-Touren kompakt darstellen zu können, wird die Notation „ $X\oplus X-Y\oplus Y$ “ eingeführt. Sie drückt aus, dass zwei Lokomotiven, die denselben Güterzug ziehen, gemeinsam („ \oplus “) von einem Haltepunkt X zu einem Haltepunkt Y fahren. Mithilfe dieser Notationskonvention lässt sich die zweite Touralternative als eine Kombination der $T_{2,0} = (N\oplus N-O\oplus O-D\oplus D)$ mit der Tour $T_{2,1} = (D-O)$ für den Teilzug, der von Deuna nach Oberhausen zurückkehrt, und mit der Tour $T_{2,2} = (D-B-D-N)$ für den Teilzug, der von Deuna nach Beddingen weiterfährt, darstellen.

Bei näherer Analyse des praktischen Optimierungsbeispiels zeigt sich, dass die voranstehende Skizze des realen Tourenplanungsproblems der Neusser Eisenbahn auf der Grundlage der Abbildung 10 unvollständig ist.¹⁾ Falls die Kombi-Tour im Sinne der zweiten Touralternative mehrfach durchgeführt wird, trifft die o.a. Darstellung nur auf die erste Tourdurchführung zu. Danach befindet sich die Lokomotive, die vom Haltepunkt Deuna mit einem Teilzug zum Haltepunkt Oberhausen zurückgekehrt ist, im letztgenannten Haltepunkt. Sie steht daher im Haltepunkt Neuss am Beginn einer erneuten Tourdurchführung nicht mehr zur Verfügung, sodass es verfehlt wäre, eine erneute Durchführung der Kombi-Tour im Haltepunkt Neuss abermals mit einem Güterzug zu beginnen, der aus zwei Lokomotiven besteht. Stattdessen startet bei einer erneuten Durchführung der Kombi-Tour der Güterzug im Haltepunkt Neuss nur noch mit einer Lokomotive.

Bei einer erneuten Durchführung der Kombi-Tour besteht der zusätzliche, zweite Freiheitsgrad, die Lokomotive, die zuvor zum Haltepunkt Oberhausen zurückgekehrt ist und dort vorübergehend „geparkt“ wurde, entweder mit der Lokomotive, die bei einer erneuten Durchführung der Kombi-Tour vom Haltepunkt Neuss zum Haltepunkt Oberhausen gefahren ist, zusammenzukoppeln, sodass ein Güterzug resultiert, der mit zwei Lokomotiven von Oberhausen nach Deuna weiterfährt. Oder es wird auf das Zusammenkoppeln der beiden vorgenannten Lokomotiven im Haltepunkt Oberhausen verzichtet. Dann kann die erste Lokomotive, die im Haltepunkt Oberhausen vorübergehend „geparkt“ wurde, unabhängig von der zweiten Lokomotive, die bei einer erneuten Durchführung der Kombi-Tour vom Haltepunkt Neuss zum Haltepunkt Oberhausen gefahren ist und von dort mit leeren Güterwagen nach Deuna weiterfährt, ihre Güterwagen im Haltepunkt Oberhausen mit Sand be-

1) Um diese Unvollständigkeit zu beseitigen, sind leistungsfähigere Modellierungsinstrumente erforderlich als die Visualisierung von Touren in einem Verkehrsnetz, wie sie in der Abbildung 15 erfolgt ist. Als ein solches Modellierungsinstrument kommen vor allem PETRI-Netze vom Typ der „High Level Nets“ in Betracht, weil sie es gestatten, den Fluss komplex zusammengesetzter Objekte durch ein Netzwerk sowohl mathematisch zu analysieren als auch computergestützt zu simulieren und dabei anschaulich zu visualisieren. Daher wird in einem separaten (Dissertations-) Projekt untersucht werden, welchen Beitrag PETRI-Netze vom Typ der „High Level Nets“ zur Lösung von Tourenplanungsproblemen für Eisenbahnverkehrsunternehmen leisten können.

laden lassen und mit den derart beladenen Güterwagen ebenso nach Deuna fahren. Auf diese Weise entstehen auch auf dem Toursegment (2) zwei voneinander unabhängige Teilzüge, die im Fall der ersten Lokomotive eine Lastfahrt und im Fall der zweiten Lokomotive eine Leerfahrt durchführen. Diese Unabhängigkeit der beiden Teilzüge auf dem Toursegment (2) verschafft der Neusser Eisenbahn eine größere Flexibilität bei ihrer Tourenplanung im Vergleich zu der zunächst erläuterten Alternative, die beiden vorgenannten Lokomotiven im Haltepunkt Oberhausen zu einem Güterzug zusammenzukoppeln.

Aufgrund dieser *größeren Flexibilität* kann die Neusser Eisenbahn nach einer ersten Durchführung der Kombi-Tour situationsabhängig darüber entscheiden, wann sie die Lokomotive, die im Haltepunkt Oberhausen vorübergehend „geparkt“ wurde, einsetzen wird, um Sand mit Güterwagen von Oberhausen nach Deuna zu transportieren. Diese Flexibilität lässt sich insbesondere nutzen, wenn die Kundennachfrage nach Zement so kräftig ansteigt, dass sie nicht mehr aus Lagerbeständen des Zementwerks in Deuna bedient werden kann und deshalb das Zementwerk in Deuna seine Zementproduktion erhöht. Dies führt aber auch zu einem erhöhten Bedarf für den Rohstoff Sand. Der hochschnellende Sandbedarf lässt sich ganz im Sinne eines Angebots von hochflexiblen, kundenorientierten Transportdienstleistungen durch einen Güterzug erfüllen, der aus der Lokomotive, die im Haltepunkt Oberhausen vorübergehend „geparkt“ wurde, sowie aus dort mit Sand beladenen Güterwagen zusammengestellt wird und den dringend benötigten Sand von Oberhausen nach Deuna transportiert. Diese hohe Transportflexibilität lässt sich so lange aufrechterhalten, wie die Lokomotive, die den mit Sand beladenen Güterzug von Oberhausen nach Deuna gebracht hat, nach dem Entladen des Sandes in Deuna nicht an den Heimatstandort Neuss zurückkehrt, sondern mit den entladenen Güterwagen und somit auf einer Leerfahrt im engeren Sinne zum Haltepunkt Oberhausen zurückkehrt, um dort erneut „geparkt“ zu werden.

Das praktische Optimierungsbeispiel, das auf der Grundlage eines realen Tourenplanungsproblems der Neusser Eisenbahn grob skizziert wurde, lässt trotz seiner Kompaktheit deutlich erkennen, dass die Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen ein überaus komplexes Realproblem darstellt. Komplikationen, wie das hier beschriebene *Zusammenkoppeln* von *zwei Lokomotiven* in einem Güterzug und wie die ebenso angesprochene Option, einen Güterzug während seiner Tour in unabhängig voneinander verkehrende *Teilzüge zu zerlegen*, stellen eine große Herausforderung an Formalprobleme dar, mit denen „das“ Realproblem der Tourenplanung für Eisenbahnverkehrsunternehmen modelliert wird. Die meisten Tourenplanungsmodelle, die seitens des Operations Research entwickelt wurden, werden dieser Herausforderung nicht gerecht. Auch das Tourenplanungsmodell, das in diesem Projektbericht zur Reduzierung von Leertonnenkilometern vorgestellt wird, vermag die beiden vorgenannten Komplikationen nicht zu bewältigen. Sie bleiben eine Herausforderung an anspruchsvollere, zukünftig noch zu entwickelnde Tourenplanungsmodelle.

6 Das Realproblem der Vermeidung von Leerfahrten aus der Perspektive von Formalproblemen der Tourenplanung

6.1 Grundlagen

Das *Realproblem* der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS in der Art eines virtuellen Unternehmens miteinander kooperieren, erstreckt sich darauf, die Fahrten ihrer Güterzüge so miteinander zu koordinieren (oder plakativ gesprochen: auf „intelligente“ Weise so zu bündeln), dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen. Dieses Realproblem lässt sich durch einige wenige Problemeterminanten charakterisieren.

Im Vordergrund steht die reale Erfahrung, dass der Wettbewerb unter Eisenbahnverkehrsunternehmen im Zuge der Liberalisierung des Eisenbahnverkehrsmarktes erheblich zugenommen hat. Hinzu kommen weitere Veränderungen im Marktumfeld von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die bereits im Kapitel 4.2 als Phänomene wachsender Heterogenität, Kleinteiligkeit und Volatilität der Nachfrage nach Transportdienstleistungen im Güterverkehrsmarkt skizziert wurden. Diese Veränderungen führen dazu, dass sich Eisenbahnverkehrsunternehmen einem verstärkten Druck zu „marktaktivem“ Verhalten ausgesetzt sehen. Dies bedeutet, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen mit steigender Intensität von sich aus auf potenzielle Kunden zugehen und sich um die Akquisition neuer Transportaufträge selbstständig bemühen müssen. Dieser erhebliche Akquisitionsdruck konfrontiert die Eisenbahnverkehrsunternehmen zunehmend mit der Herausforderung, immer flexibler und serviceorientierter auf die Wünsche ihrer Kunden eingehen zu müssen.

Insbesondere kleine und mittelgroße Eisenbahnverkehrsunternehmen fühlen sich jedoch mitunter kaum in der Lage, diesen vielfältigen Herausforderungen eines sich stark verändernden Güterverkehrsmarktes jederzeit und umfassend aus eigener Kraft gerecht zu werden. Daher erwägen solche Eisenbahnverkehrsunternehmen immer häufiger, ihren Marktauftritt durch Kooperationen mit anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen nachhaltig zu stärken und auf diese Weise auch mit den Angeboten von größeren Eisenbahnverkehrsunternehmen mithalten zu können.¹⁾ Auf diesen Trend intensiver Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen zur Stärkung ihrer nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit zielt das Verbundprojekt MAEKAS. In seinem Fokus steht eine Kooperation aus drei überwiegend regional tätigen und einem international aufgestellten Eisenbahnverkehrsunternehmen. Sie bilden ein virtuelles Unternehmen, um aus der Sicht potenzieller und aktueller Kunden einen wettbewerbsstarken, marktaktiven, flexibel und serviceorientiert auftretenden Anbieter von Transportdienstleistungen zu formen, der die Transportnachfragen seiner Kunden „aus einer Hand“ zu erfüllen vermag.

Das zuvor skizzierte Realproblem der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die als Praxispartner im Verbundprojekt MAEKAS mitwirken, lässt sich durch zwei wesentliche Einflussgrößen charakterisieren. Auf der einen Seite besteht die Notwendigkeit, die Fahrten der Güterzüge, mit denen die Eisenbahnverkehrsunternehmen ihre Transportdienstleistungen erbringen, so zu planen, dass auf zunehmend heterogene, kleinteilige und volatile Transportnachfragen von Kunden flexibel und serviceorientiert eingegangen werden kann. Andererseits gilt es aber auch, die Fahrten von Güterzügen, die von den kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen zunächst eigenständig und ohne

1) Vgl. PROKSCHI (2008), S. 10.

wechselseitige Abstimmung durchgeführt wurden, zwecks Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit so miteinander zu koordinieren, dass die – vor allem im Kapitel 4.4 beschriebenen – Synergie- oder Bündelungseffekte realisiert werden können.

Die beiden vorgenannten Einflussgrößen stimmen in einem zentralen Bezugsobjekt überein. Es handelt sich um die *Fahrten von Güterzügen*, die im Hinblick auf Kundenwünsche *geplant* bzw. im Hinblick auf Kooperationsvorhaben *koordiniert* werden müssen. Die „tiefere“ Struktur dieses Planungs- bzw. Koordinierungsproblems stellt aus betriebswirtschaftlicher Perspektive kein Novum dar. Vielmehr handelt es sich um eine wohlvertraute Problemstruktur, die in der Betriebswirtschaftslehre zumeist unter dem Stichwort der *Tourenplanung* thematisiert wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Touren z.B. einzelner Handelsreisender, von Lastkraftwagen oder auch von Güterzügen geplant werden. Ebenso wenig kommt es darauf an, ob von „Fahrten“, „Touren“, „(Rund-)Reisen“ o.ä. die Rede ist. Schließlich hängt die Problemstruktur auch nicht wesentlich davon ab, ob entweder von einem Planungs- oder aber von einem Koordinierungsproblem ausgegangen wird, weil – zumindest im hier betrachteten Kontext des Realproblems von Eisenbahnverkehrsunternehmen – das Problem der Koordinierung von Touren (Güterzugfahrten) stets auf ein Problem der Tourenplanung zurückgeführt werden kann.

Im hier vorgelegten Projektbericht wird das Realproblem der Tourenplanung für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS nicht in seiner vollen inhaltlichen Breite entfaltet. Dies kann von einem ersten Projektbericht zu dieser Thematik nicht erwartet werden.¹⁾ Stattdessen wird nur die *Vermeidung von Leerfahrten* als eine der charakteristischen Hauptaufgaben der Tourenplanung explizit erörtert und vertieft behandelt. Diese Aufgabe dient als ein *pars pro toto* mit „paradigmatischer“ Qualität, um wesentliche *Determinanten des Realproblems*, wesentliche Ansätze zur *Modellierung* dieses Realproblems in der Gestalt eines *Formalproblems* sowie wesentliche *Algorithmen* (Lösungsverfahren) zur Lösung des Formalproblems vorzustellen. In späteren Arbeiten soll auf diesem „paradigmatischen“ Fundament aufgebaut werden, um auch andere Aufgaben der Tourenplanung abzudecken. Dazu gehören z.B. die Planung gewinn- oder deckungsbeitragsmaximaler („optimaler“) Touren sowie die Planung von Touren, die zu möglichst geringen klimaschädigenden CO₂- und NO_x-Emissionen führen.

Um Realprobleme der Tourenplanung mit formalsprachlich-analytischen Erkenntnisinstrumenten systematisch strukturieren, untersuchen und schließlich auch bewältigen zu können, wurde eine breite Palette von Formalproblemen zur Modellierung von Realproblemen und von Algorithmen zur Lösung der Formalprobleme entwickelt. In großenteils interdisziplinärer Zusammenarbeit waren daran vor allem die Betriebswirtschaftslehre mit Schwerpunkten in Logistik-Management und -Theorie, das Operations Research, die Angewandte Mathematik sowie die Angewandte Informatik beteiligt.

Abermals kann es nicht das Anliegen eines Projektberichts sein, diese Vielfalt von Formalproblemen und Algorithmen umfassend zu würdigen. Stattdessen verfolgt dieser Projektbericht einen anderen Argumentations- und Denkansatz: Zunächst wird von einem *Basistyp* von Formalproblemen – und den darauf zugeschnittenen Algorithmen – ausgegangen, der entwickelt wurde, um Realprobleme der Tourenplanung „in den Griff zu bekommen“. Es handelt sich um *Formalprobleme*

1) In späteren Projektberichten und weiteren Publikationen soll die inhaltliche Breite, mit der das Realproblem der Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen behandelt wird, deutlich ausgebaut werden.

vom *Typ* der klassischen oder konventionellen *Tourenplanung*, die im Folgenden auch kurz als konventionelles Tourenplanungsproblem¹⁾ (TPP) bezeichnet werden. In späteren Kapiteln wird dieses Tourenplanungsproblem um eine Vielzahl von Einflussgrößen erweitert. Die Erweiterungen zielen darauf ab, die Strukturen des konventionellen Tourenplanungsproblems schrittweise so zu erweitern, dass Formalprobleme resultieren, die möglichst weitgehend mit dem *Realproblem* der Eisenbahnverkehrsunternehmen übereinstimmen, die im Verbundprojekt MAEKAS miteinander kooperieren. In dem hier vorgelegten Projektbericht lässt sich dieses realproblembezogene Übereinstimmungsziel nur ansatzweise erreichen. Es bleibt späteren Projektberichten und weiteren Publikationen vorbehalten, Modelle – d.h. Formalprobleme – zu konstruieren, die sich möglichst weit an das reale Tourenplanungsproblem der Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS annähern.

Trotz dieser einschränkenden Vorbehalte wird die formalsprachliche Modellierung des Realproblems der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen von vornherein so „*generisch*“ ausgelegt, dass sie keineswegs auf die „*idiosynkratischen*“ Randbedingungen des Verbundprojekts MAEKAS beschränkt bleibt. Vielmehr wird bei der Rekonstruktion des Realproblems als ein Modell (Formalproblem) von vornherein großer Wert darauf gelegt, dass sich das resultierende Modell auch auf andere Tourenplanungsprobleme übertragen lässt. Dies betrifft insbesondere Kooperationen zwischen anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen. Dadurch wird die *Wiederverwendbarkeit* der hier vorgestellten formalsprachlichen Modellierung in anderen Modellierungskontexten unterstützt. Auf diese Weise wird den Zielen von „*knowledge reuse*“ (aus der Perspektive des betriebswirtschaftlichen Wissensmanagements) und „*Nachnutzung*“ von Projektergebnissen (aus der Perspektive des Finanziers von Drittmittelprojekten, hier konkret des BMWi) Rechnung getragen.

6.2 Konventionelle Tourenplanung

6.2.1 Ein Standardmodell der konventionellen Tourenplanung

6.2.1.1 Graphentheoretische Grundlagen

Formalprobleme der konventionellen Tourenplanung lassen sich in der Regel auf eine gemeinsame formalsprachliche Problemstruktur zurückführen. Sie wird im Folgenden der Einfachheit halber als Standardmodell der konventionellen Tourenplanung bezeichnet. Charakteristisch für diese formalsprachliche Problemstruktur ist es, dass sie auf Ausdrucksmitteln der mathematischen Graphentheorie beruht.

1) Streng genommen wird im Folgenden auf der Typ- oder Klassenebene argumentiert, es werden also stets Typen oder Klassen gleichartiger Formalprobleme angesprochen, wie z.B. die hier thematisierten Formalprobleme vom Typ „Tourenplanung“. Zwar ist es vielfach verbreitet, nur von „dem“ Tourenplanungsproblem zu sprechen. Damit ist aber nicht eine konkrete Instanz aus der Klasse der Formalprobleme vom Typ „Tourenplanung“ gemeint. Vielmehr dient die singularische Rede als eine verkürzte und somit vereinfachte Ausdrucksweise, wenn im jeweils aktuellen Argumentationskontext die semantisch präzise Unterscheidung zwischen dem Typ oder der Klasse gleichartiger Formalprobleme auf der einen Seite und einzelnen Instanzen oder Elementen dieses Problemtyps bzw. dieser Problemklasse auf der anderen Seite keine Rolle spielt. Auf diese sprachliche Vereinfachung wird auch im hier vorliegenden Projektbericht zurückgegriffen.

Ausgangspunkt der formalsprachlichen Problemstrukturierung ist ein *gerichteter Graph* G mit der Knotenmenge KN und der Kantenmenge KA :¹⁾

$$G = (KN, KA) \quad (1)$$

$$KN = \{0, 1, \dots, N\} \text{ mit } N \in \mathbb{N}_+ \text{ und } N \geq 2 \quad (2)$$

$$KA = \{(i, j) \mid i \in KN \wedge j \in KN \setminus \{i\}\} = (KN \times KN \setminus id) \quad (3)$$

Ein Charakteristikum des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung ist, dass gemäß Formel (3) ein 1-Schleifen-freier³⁾ und vollständig verknüpfter⁴⁾ Graph G vorausgesetzt wird. Diese beiden Prämissen werden als *Prämisse der Nichtexistenz von 1-Schleifen* bzw. als *Prämisse der vollständigen Verknüpftheit* bezeichnet. Sofern beide Prämissen gemeinsam angesprochen werden sollen, wird kurz von der *Verknüpftheitsprämisse* die Rede sein.

1-Schleifen-Freiheit bedeutet, dass ein Knoten i niemals mit sich selbst über genau eine Kante (i, i) verknüpft ist. Eine solche Kante würde eine „Schleife“ darstellen, die genau einen Knoten umfasst, weil sie vom Knoten i ausgeht und unmittelbar zum selben Knoten i zurückkehrt. Solche 1-Schleifen erweisen sich für Tourenplanungsprobleme als sinnlos, weil Touren, die nur einen Ort oder Haltepunkt ohne Fahrstrecke umfassen (siehe unten), zu keinem betriebswirtschaftlich gehaltvollen Realproblem gehören.

Vollständige Verknüpftheit eines gerichteten Graphen drückt unter der Voraussetzung der 1-Schleifen-Freiheit aus, dass sich zwischen zwei beliebigen, aber verschiedenen Knoten i und j des Graphen stets sowohl eine Kante (i, j) als auch eine entgegengesetzt gerichtete Kante (j, i) erstreckt. Bei der Visualisierung eines gerichteten *mathematischen Graphen* durch eine *anschauliche Grafik*⁵⁾ kann ein solches Paar aus *zwei* entgegengesetzt *gerichteten* Kanten (i, j) und (j, i) zwischen zwei verschiedenen Knoten i und j der Übersichtlichkeit halber auch vereinfacht als nur *eine ungerichtete* Kante (i, j) dargestellt werden, welche die beiden Knoten i und j miteinander verknüpft. In diesem

1) Vgl. GHIANI/IMPROTA (2000), S. 11.

2) In diesem Projektbericht wird für die größtmögliche Ausprägung einer Indexvariable grundsätzlich ein Großbuchstabe verwendet, um zwischen der klein notierten Indexvariable (hier z.B. „n“) und deren größtmöglicher Ausprägung (hier z.B. „N“) unterscheiden zu können. Im hier betrachteten Beispiel gilt also für die Indexvariable n : $n \in \{1, \dots, N\}$ sowie als äquivalente Notation: $n = 1, \dots, N$.

3) Die 1-Schleifen-Freiheit wird in der Formel (3) durch die Formelbestandteile „ $\setminus \{i\}$ “ und „ $\setminus id$ “ ausgedrückt. Sie gewährleisten jeweils, dass Kanten (i, j) mit $j = i$ unzulässig sind. Dabei bezeichnet das Symbol „ id “ die (zweistellige) identische Relation, die alle 2-Tupel der Form (i, i) , also mit identischen Komponenten „ i “, umfasst.

4) Die vollständige Verknüpftheit wird in der Formel (3) durch das Symbol „ $=$ “ der Gleichungsrelation ausgedrückt: Die Kantenmenge stimmt mit dem kartesischen Produkt $KN \times KN$ der Knotenmenge KN – also mit der Menge *aller* kombinatorisch möglichen 2-Tupel aus den Elementen der Knotenmenge KN – exakt überein, allerdings ohne die Elemente der (zweistelligen) identischen Relation „ id “ wegen des Gebots der 1-Schleifen-Freiheit.

5) In diesem Projektbericht wird bewusst von den beiden laut Duden zulässigen, aber abweichenden Schreibweisen „Graph“ versus „Grafik“ Gebrauch gemacht. Von einem Graphen oder einer graphischen Repräsentation (jeweils mit „ph“) ist immer dann die Rede, wenn auf Graphen aus der mathematischen Graphentheorie Bezug genommen wird. Dagegen wird von einer Grafik oder einer grafischen Darstellung (jeweils mit „f“) gesprochen, wenn es darum geht, einen mathematischen Graphen mittels einer „Zeichnung“ auf anschauliche Weise zu visualisieren. Entsprechend wird auch von einer Visualisierung eines mathematischen Graphen durch eine anschauliche Grafik gesprochen.

Fall der Visualisierung durch eine anschauliche Grafik mit ungerichteten Kanten gilt die Konvention, dass jede Kante (i,j) die Nebenbedingung $i < j$ erfüllt.¹⁾

Der gerichtete Graph G wird bei Tourenplanungsproblemen als ein *Verkehrsnetz* VN interpretiert.²⁾ In diesem Verkehrsnetz bewegen sich Transportagenten, um bei der Durchführung ihrer Touren Güter zu transportieren.

Ein *Transportagent* kann eine natürliche Person oder ein Verkehrsmittel sein, die einen Transport durchführt oder durchführen soll bzw. mit dessen Hilfe ein Transport durchgeführt wird oder durchgeführt werden soll.³⁾ Als paradigmatische Beispiele für natürliche Personen in der Rolle eines Transportagenten dienen im Operations Research und in der Betriebswirtschaftslehre ein *Handelsreisender* („travelling salesman“) und ein *Briefträger*. Verkehrsmittel, die für die Durchführung von Transporten Einsatz finden, werden im Allgemeinen auch als *Transportmittel* bezeichnet.⁴⁾ Als Transportmittel kommen z.B. Güterzüge, Lastkraftwagen und Frachtschiffe in Betracht.

Die Knoten des Graphen G stellen *Orte* oder *Haltepunkte* dar. Ein Transportagent, der eine Tour durchführt oder durchführen soll, kann sich in einem solchen Ort oder Haltepunkt aufhalten (wie z.B. im Fall eines Heimatstandorts oder Depots), einen solchen Ort oder Haltepunkt während seiner Tour anfahren oder von einem solchen Ort oder Haltepunkt während seiner Tour abfahren. Die Kanten des Graphen G stellen *Strecken* dar, die ein Transportagent während seiner Tour befährt. Die Gesamtheit der Strecken, die ein Transportagent zwischen zwei Orten oder Haltepunkten des Verkehrsnetzes zurücklegt, bildet seine *Fahrstrecke*.

Eine *Tour* ist ein Weg im Verkehrsnetz, auf dem ein Transportagent zu seinem Startpunkt zurückkehrt. Im gerichteten Graphen G , der das Verkehrsnetz formalsprachlich repräsentiert, stellt jede Tour T eine zusammenhängende, gleichsinnig gerichtete und zyklische Folge $(kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ von Knoten kn_p mit $p = 1, \dots, P$ als Index für die Position eines Knotens in dieser Folge (Positionsindex) sowie mit $P \in \mathbb{N}_+$ und $P \geq 2$ ⁵⁾ dar. Jede Tour T mit $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ wird also durch einen

-
- 1) Des Öfteren wird auch die Nebenbedingung $i \leq j$ verwendet. Dann wird jedoch von keinem 1-Schleifen-freien Graphen ausgegangen, weil bei einem 1-Schleifen-freien Graphen Kanten (i,j) mit $j = i$ nicht existieren können.
 - 2) Umgekehrt kann auch davon gesprochen werden, dass ein Verkehrsnetz VN durch einen gerichteten Graphen G formalsprachlich repräsentiert – oder synonym: modelliert – wird. Soll die Interpretations- bzw. Repräsentationsbeziehung zwischen einem gerichteten Graphen G und einem Verkehrsnetz VN ausgedrückt werden, so lassen sich die Notation G_{VN} für einen gerichteten Graphen mit zugrunde liegendem Verkehrsnetz VN sowie die Notation VN_G für ein Verkehrsnetz, das durch einen gerichteten Graphen G repräsentiert wird, verwenden.
 - 3) Streng genommen muss zwischen einerseits der *realen* und andererseits der *geplanten* Durchführung eines Transports unterschieden werden. Dies führt aber zu sprachlich komplizierten Formulierungen. Daher wird im Folgenden auf diese Differenzierung der Einfachheit halber verzichtet, sofern sie im aktuellen Argumentationskontext keine Rolle spielt. Da im Vordergrund Probleme der *Tourenplanung* stehen, sind im Zweifelsfall stets *geplante* Transportdurchführungen gemeint.
 - 4) Streng genommen stellen Verkehrs- und Transportmittel keine Synonyme dar. Denn es gibt durchaus Transportmittel, die – wie z.B. Pipelines – dem Transport von Gütern dienen, dabei aber nicht im Sinne eines Verkehrsmittels (synonym: Fortbewegungsmittels) zwischen zwei Orten „verkehren“, sondern ortsfest installiert sind. Wird diesem Begriffsverständnis gefolgt, ist zwar jedes Verkehrsmittel ein Transportmittel, aber die Umkehrung trifft nicht zu. Speziell im Hinblick auf den hier betrachteten Verkehrsträger Bahn können aber die Bezeichnungen Verkehrsmittel und Transportmittel synonym verwendet werden, weil jeder Güterzug, jede (einen Güterzug ziehende) Lokomotive und jeder Güterwagen sowohl ein Verkehrs- als auch ein Transportmittel darstellt.
 - 5) Die doppelte Einschränkung $P \in \mathbb{N}_+$ und $P \geq 2$ kann in einer formalsprachlichen Notation in vereinfachter, aber äquivalenter Weise auch als $P \in \mathbb{N}_+ \setminus \{1\}$ ausgedrückt werden. Darauf wird in nachstehenden Formeln zurückgegriffen.

P-stelligen Zeilenvektor oder ein P-Tupel $(kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ spezifiziert, der bzw. das auch als *Tourvektor* bezeichnet wird. Jede Tour muss die nachfolgend angeführten Eigenschaften erfüllen.

- a) Trägermenge: Eine Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ besteht aus Knoten des gerichteten Graphen G mit $G = (KN, KA)$.

$$\forall p = 1, \dots, P: kn_p \in KN \quad (4)$$

- b) Zusammenhängigkeit: Für jedes Paar aus zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Knoten kn_p und kn_{p+1} aus einer Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ existiert im zugrunde liegenden gerichteten Graphen G genau¹⁾ eine gerichtete Kante ka , die aus den beiden Knoten besteht.

$$\forall p = 1, \dots, P-1 \exists ka \in KA: ka = (kn_p, kn_{p+1}) \vee ka = (kn_{p+1}, kn_p) \quad (5)$$

- c) Gleichsinnige Gerichtetheit: Jede Kante, die zu zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Knoten kn_p und kn_{p+1} aus einer Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ gehört, ist in derselben Richtung vom Knoten kn_p mit dem kleineren Positionsindex p zum Knoten kn_{p+1} mit dem größeren Positionsindex $p+1$ gerichtet.²⁾

$$\forall p = 1, \dots, P-1 \exists ka \in KA: ka = (kn_p, kn_{p+1}) \quad (6)$$

-
- 1) In der nachstehenden Formel (5) wird kein Eins-, sondern „nur“ ein Existenzquantor verwendet. Beide Quantoren sind im Allgemeinen nicht äquivalent. Dennoch wird hier der Existenzquantor anstelle eines Einsquantors aus zwei Gründen verwendet. Erstens bereitet die „Implementierung“ des Einsquantors in formalsprachlichen Kalkülen größere Probleme, weil die konventionelle Prädikatenlogik erster Stufe nur All- und Existenzquantoren im Sinne *qualitativer* Quantifizierungen über Grundgesamtheiten, aber keine *numerischen* Quantifizierungen über Grundgesamtheiten kennt. Zweitens gilt für den hier betrachteten *speziellen* Fall von Tourenplanungsproblemen, dass die gerichteten Graphen G stets zur Klasse der gerichteten *Monographen* gehören, bei denen zwischen zwei verschiedenen Knoten i und j immer nur *höchstens* eine Kante (i,j) und *höchstens* eine Kante (j,i) existieren kann. Daher gilt für diesen speziellen Fall: Wenn zwischen zwei verschiedenen Knoten i und j überhaupt mindestens eine Kante (i,j) oder mindestens eine Kante (j,i) existiert, dann existiert wegen der Monographeneigenschaft *genau* eine Kante (i,j) bzw. *genau* eine Kante (j,i) . Folglich verhalten sich im hier betrachteten Spezialfall von Tourenplanungsproblemen mit Monographen der „eigentlich gemeinte“ Einsquantor und der tatsächlich verwendete Existenzquantor äquivalent. Zu einer Nichtäquivalenz käme es erst dann, wenn zur formalsprachlichen Repräsentation von Tourenplanungsproblemen gerichtete Graphen aus der Klasse der gerichteten *Multigraphen* benutzt würden (z.B. gehören PETRI-Netze in der Mehrzahl zur Klasse der gerichteten Multigraphen). Dies ist aber hier nicht der Fall.
- 2) Aus den Formeln (5) und (6) ist ersichtlich, dass die Eigenschaft der gleichsinnigen Gerichtetheit die Eigenschaft der Zusammenhängigkeit impliziert. Daher kann auf die explizite Anforderung, dass eine Tour die Eigenschaft der Zusammenhängigkeit im zugrunde liegenden Graphen erfüllen muss, verzichtet werden. Stattdessen könnte unter Außerachtlassung von Formel (5) direkt als Paraphrasierung der Formel (6) gefordert werden: Für jedes Paar aus zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Knoten kn_p und kn_{p+1} existiert im zugrunde liegenden gerichteten Graphen G genau eine gerichtete Kante, die aus dem erstgenannten Knoten kn_p als Kantenanfang und dem zweitgenannten Knoten kn_{p+1} als Kantenende besteht. Die Eigenschaft der Zusammenhängigkeit wird hier dennoch explizit angeführt, um zu verdeutlichen, dass es sich bei den Eigenschaften der gleichsinnigen Gerichtetheit und der Zusammenhängigkeit um zwei inhaltlich unterschiedliche Eigenschaften handelt. Die „stärkere“ Eigenschaft der gleichsinnigen Gerichtetheit impliziert zwar die „schwächere“ Eigenschaft der Zusammenhängigkeit. Aber die Umkehrung trifft nicht zu. Daher verhalten sich beide Eigenschaften nicht äquivalent zueinander.

d) Zyklizität: Für jede Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ sind der Knoten kn_1 am Beginn einer Tour (Tourbeginn) und der Knoten kn_p am Ende einer Tour (Tourende) identisch.¹⁾

$$\forall P \in (\mathbb{N}_+ \setminus \{1\}) \forall T \in (KN_1 \times \dots \times KN_p): T = (kn_1, \dots, kn_p) \rightarrow kn_p = kn_1 \quad (7)$$

Aufgrund der voranstehenden Festlegungen stellt eine Tour T einen Weg im Verkehrsnetz dar, auf dem ein Transportagent in einem Ort oder Haltepunkt als Tourbeginn startet, mindestens einen weiteren Ort oder Haltepunkt anfährt und von dort auch wieder abfährt, dabei Strecken zwischen zwei jeweils unmittelbar aufeinanderfolgenden Orten oder Haltepunkten befährt und schließlich zum Tourbeginn als Tourende im selben Ort oder Haltepunkt zurückkehrt. Dabei entsprechen die vorgeannten Orte oder Haltepunkte des Verkehrsnetzes jeweils eineindeutig den Knoten des gerichteten Graphen G , der das zugrunde liegende Verkehrsnetz repräsentiert und in der formalsprachlichen Spezifikation der Tour T durch die Knotenfolge $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ angeführt sind.²⁾

Die Länge einer Tour (*Tourlänge*) ist die Summe der Längen aller Strecken eines Verkehrsnetzes, die zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Orten oder Haltepunkten während der Tourdurchführung befahren werden. Die *Streckenlängen* werden auch als *Distanzen* bezeichnet. Die Zeitdauer oder das Zeitintervall, die bzw. das benötigt wird, um eine Strecke zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Orten oder Haltepunkten zu befahren, heißt *Streckendauer*. Die Dauer einer Tour (*Tourdauer*) ist als die Summe der Streckendauern für alle Strecken eines Verkehrsnetzes definiert, die zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Orten oder Haltepunkten während der Tourdurchführung befahren werden.

Ein *Toursegment* ist ein unvollständiger Teil einer Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$, also ebenso eine Folge von mindestens zwei Knoten kn_p , die jedoch nicht alle Knoten aus der Tour T umfasst. Beispielsweise gehören zu einer Tour $T = (1, 3, 7, 2, 1)$ mit den Knoten $kn_1 = 1$, $kn_2 = 3$, $kn_3 = 7$, $kn_4 = 2$ und $kn_5 = 1$ u.a. die Toursegmente $TS_1 = (1, 3, 7)$ und $TS_2 = (3, 7, 2, 1)$. Im degenerierten Fall eines Toursegments, das nur genau zwei Knoten umfasst, fällt das Toursegment mit einer Strecke des Verkehrsnetzes zusammen, die sich zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Orten oder Haltepunkten des Verkehrsnetzes erstreckt. Die Länge eines Toursegments (*Toursegmentlänge*) und die Dauer eines Toursegments (*Toursegmentdauer*) ergeben sich als die Summen der Streckenlängen bzw. Streckendauern aller Strecken, die zwischen jeweils zwei Orten oder Haltepunkten befahren werden, die als Knoten im Toursegment unmittelbar aufeinanderfolgen.

1) Durch diese Eigenschaft wird keineswegs ausgeschlossen, dass „innerhalb“ einer Tour derselbe Knoten aus dem gerichteten Graphen G mehrfach durchlaufen wird, weil er als Knoten kn_p an mehreren Positionen p der Tour mit $p = 2, \dots, P-1$ angeführt ist. Daher kann eine Tour durchaus auch *Subzyklen* enthalten. Auf solche Subzyklen und deren Ausschluss wird später zurückgekommen.

2) Streng genommen müsste stets unterschieden werden, ob entweder auf der *syntaktischen* Ebene über Touren als Folgen aus Knoten in einem gerichteten Graphen G gesprochen wird oder ob auf der *semantischen* Ebene von Touren als Wegen in einem Verkehrsnetz VN die Rede ist, die aus Orten oder Haltepunkten bestehen. Da im Kontext des hier betrachteten Realproblems stets ein gerichteter Graph G durch ein zugrunde liegendes Verkehrsnetz VN interpretiert wird oder – mit anderen Worten – ein Verkehrsnetz VN durch einen gerichteten Graphen G formalsprachlich repräsentiert wird, besteht eine bijektive (eineindeutige) Beziehung zwischen den Knoten einer Tour auf der syntaktischen Ebene und den Orten oder Haltepunkten einer Tour auf der semantischen Ebene. Aufgrund dieser eineindeutigen Beziehung zwischen Knoten einerseits sowie Orten oder Haltepunkten andererseits wird im Folgenden als sprachliche Vereinfachung zugelassen, von den Knoten bzw. den Orten oder Haltepunkten einer Tour in synonyme Weise zu reden, sofern im aktuellen Argumentationskontext die Unterscheidung zwischen der syntaktischen und der semantischen Betrachtungsebene keine Rolle spielt.

Als *Fahrt* eines Transportmittels wird das Befahren von zusammenhängenden, gleichsinnig gerichteten Strecken des Verkehrsnetzes bei der Durchführung einer (vollständigen) Tour oder eines (unvollständigen) Toursegments bezeichnet. Daher ergeben sich die *Fahrlänge* und die *Fahrdauer* eines Transportmittels unmittelbar als die Tourlänge bzw. Tourdauer für eine durchgeführte Tour und als die Toursegmentlänge bzw. Toursegmentdauer für ein durchgeführtes Toursegment.

Tourlängen und Tourdauern¹⁾ können im zugrunde liegenden gerichteten Graphen nicht unmittelbar ermittelt werden. Dazu reicht die Ausdruckskraft der „elementaren“ Graphentheorie nicht aus, die nur *topologische* Aussagen über Knoten und deren Verknüpfung mittels Kanten erlaubt. Daher muss zur Ermittlung von Tourlängen und Tourdauern auf *annotierte, beschriftete* oder *bewertete Graphen* übergegangen werden. Solche Graphen erlauben es, *quantitative* Aussagen über Eigenschaften von Knoten oder Kanten eines Graphen durch entsprechende Knoten- bzw. Kantenannotationen zu ergänzen und auszuwerten. Für die Ermittlung von Tourlängen und Tourdauern sind in einem gerichteten Graphen (als formalsprachlicher Repräsentation eines zugrunde liegenden Verkehrsnetzes) Kantenannotationen erforderlich, die jeder Kante (Strecke) zwischen zwei unmittelbar benachbarten Knoten (Orten oder Haltepunkten) eine Streckenlänge oder Distanz bzw. eine Streckendauer für die Fahrt während der Tourdurchführung zuordnen. Solche Knoten- oder Kantenannotationen werden in der Graphentheorie durch Beschriftungsfunktionen geleistet, welche die Knoten- bzw. die Kantenmenge in die Menge der jeweils zulässigen Annotationen abbilden. Darauf wird später zurückgekommen.

Besondere *Komplikationen* drohen bei der Analyse und Lösung von Tourenplanungsproblemen – zumindest in konventionell formulierten Standardmodellen – immer dann, wenn Touren sogenannte *Subzyklen* aufweisen können.²⁾ Eine Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ mit $P \geq 5$ besitzt genau dann mindestens einen Subzyklus, wenn sie mindestens zwei Knoten kn_p und kn_p' umfasst, die nicht mit dem Tourbeginn ($p=1$) bzw. mit dem Tourende ($p'=P$) zusammenfallen und im gerichteten Graphen G für das zugrunde liegende Verkehrsnetz identische Knoten darstellen, wenn also gilt:

1) Das nachfolgend Gesagte trifft in analoger Weise auch auf Toursegmentlängen und Toursegmentdauern sowie auf Fahrlängen und Fahrdauern zu.

2) Touren in einem gerichteten Graph G können nur dann Subzyklen enthalten, wenn dieser Graph mindestens drei Knoten umfasst, d.h. $\#(KN) \geq 3$ gilt. Bei gerichteten Graphen, die aus nur einem oder zwei Knoten bestehen, ist überhaupt keine Tour als Folge aus mehreren Knoten bzw. nur eine triviale Tour als Folge aus genau zwei Knoten möglich. Eine Tour aus genau zwei Knoten ist der kleinstmögliche Zyklus (außer den 1-Schleifen, die schon oben ausgeschlossen wurden), sodass sie keine Subzyklen enthalten kann. Folglich kann es erst bei gerichteten Graphen, die mindestens drei Knoten umfassen, zu Touren mit Subzyklen kommen. In diesem Projektbericht werden nur nicht-triviale Tourenplanungsprobleme betrachtet, bei denen ein zugrunde liegendes Verkehrsnetz durch einen gerichteten Graphen G mit mindestens drei Knoten formalsprachlich repräsentiert wird (*Nichttrivialitäts-Prämisse*). Daher ist stets damit zu rechnen, dass Touren Subzyklen umfassen können.

Eine Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ muss mindestens $P = 5$ Positionen umfassen, damit ein Subzyklus entstehen kann. Dies liegt daran, dass ein Subzyklus aus einem Toursegment besteht, das mindestens drei Positionen umfasst, wie z.B. der Subzyklus $SZ = (2,4,2)$. Kleinere Subzyklen, wie z.B. $SZ' = (2,2)$, wären nur dann möglich, wenn die bereits oben ausgeschlossenen 1-Schleifen zulässig wären. Um ein solches „subzyklisches“ Toursegment zu einer vollständigen Tour zu komplettieren, muss mindestens ein weiterer Knoten hinzukommen, wie z.B. der Knoten 1. Würde er nur entweder vorne oder aber nur hinten an den Subzyklus $SZ = (2,4,2)$ angehängt, so entstünde zwar ein Toursegment $TS_1 = (1,2,4,2)$ bzw. $TS_2 = (2,4,2,1)$, aber noch keine vollständige Tour, weil die charakteristische Toureigenschaft der Zyklizität noch nicht erfüllt wird. Erst die weitere Ergänzung des Knotens 1 am Tourende bzw. am Tourbeginn führt zu einer vollständigen Tour $T = (1,2,4,2,1)$ mit insgesamt $P = 5$ Positionen. Zugleich zeigt dieses Beispiel, dass in der Tat in gerichteten Graphen mit nur drei Knoten – d.h. hier für $KN = \{1,2,4\}$ – Touren mit Subzyklen möglich sind.

$$\exists p \in \{1, \dots, P\} \exists p' \in (\{1, \dots, P\} \setminus \{p\}): (p, p') \neq (1, P) \wedge kn_p = kn_{p'} \quad (8)$$

Ein solcher Subzyklus tritt z.B. in der Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p) = (1, 2, 4, 2, 1)$ auf, weil die zwei Knoten $kn_2 = 2$ und $kn_4 = 2$ weder mit dem Tourbeginn ($kn_1 = 1$) noch mit dem Tourende ($kn_5 = 1$) zusammenfallen, aber identisch sind ($kn_2 = kn_4$). Der Subzyklus SZ besteht in diesem exemplarischen Fall aus der Knotenfolge $SZ = (2, 4, 2)$. Sie stellt ein Toursegment dar, bei dessen Durchführung ein Transportmittel im Knoten $kn_2 = 2$ startet, über den Knoten $kn_3 = 4$ fährt und schließlich zum Knoten $kn_4 = 2$ zurückkehrt.

Die Erfüllung der Bedingung für das Vorliegen eines Subzyklus, die mithilfe der o.a. Formel (8) definiert wurde, lässt sich aber nur sehr schwer in computergestützt implementierten Modellen überprüfen. Die Überprüfungsschwierigkeiten resultieren vor allem aus den Existenzquantoren, die sich in mathematischer Modellierungssoftware im Allgemeinen nicht unmittelbar ausdrücken lassen. Hinzu kommt, dass die Anzahl P der Positionen einer Tour von Tour zu Tour variieren kann. Da von mathematischer Modellierungssoftware in der Regel nur fest spezifizierte Quantorenreichweiten verarbeitet werden können, lässt sich die variable Reichweite der Existenzquantoren in solcher Software nur schwer wiedergeben. Schließlich ist man im Standardmodell der Tourenplanung wegen der Komplikationen von Subzyklen¹⁾ nicht daran interessiert, das Vorliegen eines Subzyklus nachzuweisen. Vielmehr geht es darum, Bedingungen zu formulieren, deren Erfüllung die Nichtexistenz von Subzyklen in Touren sicherstellt. Eine solche Bedingung wird in der nachfolgenden Formel (9) vorgestellt. Sie bezieht sich auf die tourspezifische Knotenmenge KN_q , die genau alle Knoten umfasst, die aus der Knotenmenge KN eines gerichteten Graphen $G = (KN, KA)$ stammen und zugleich zu einer Tour $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p})$ ²⁾ gehören. Für jede tourspezifische Knotenmenge KN_q muss also gelten:

$$KN_q \subseteq KN \quad \wedge \quad \forall n \in KN: n \in KN_q \leftrightarrow T = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}) \wedge (\exists p = 1, \dots, P: kn_{q,p} = n) \quad (9)$$

Eine Tour T_q würde mindestens einen Subzyklus als Toursegment genau dann enthalten, wenn es mindestens eine echte Teilmenge S der tourspezifischen Knotenmenge KN_q mit $S \subset KN_q$ und $\#(S) \geq 2$ derart gäbe, dass die nachfolgenden Sachverhalte zutreffen:³⁾ Erstens muss die Teilmenge

1) Auf diese Komplikationen wird im anschließenden Kapitel konkret zurückgekommen.

2) Wenn von der Notationsweise $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ für eine „beliebige“ Tour T zur Notationsweise $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p})$ für eine „bestimmte“ Tour T_q übergegangen wird, müsste streng genommen der Positionsindex P für die letzte Position in der Tour T durch den Positionsindex P_q für die letzte Position in der Tour T_q ersetzt werden, weil die jeweils letzte Tourposition – und somit die Anzahl der Positionen, die zu einer bestimmten Tour T_q gehören, – von Tour zu Tour schwanken kann. Daher müsste es „eigentlich“ heißen: $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,P_q})$. Von dieser korrekten, aber infolge der doppelten Tiefstellung von Indizes schwerfälligen Notationsweise wird im Folgenden der Einfachheit halber zunächst abgesehen, solange es im jeweils aktuellen Argumentationskontext keine Rolle spielt, dass der Positionsindex P_q für die letzte Position in der Tour T_q keine für alle Touren konstante Größe darstellt, sondern von Tour zu Tour variieren kann.

3) In den nachfolgenden Formeln (10) bis (14) wird implizit vorausgesetzt, dass nur Tourenplanungsprobleme mit gerichteten Graphen betrachtet werden, die aus mindestens drei Knoten bestehen. Diese Prämisse nicht-trivialer Tourenplanungsprobleme mit $\#(KN) \geq 3$ für die zugehörigen gerichteten Graphen G mit $G = (KN, KA)$ wurde bereits an früherer Stelle aufgestellt (Nichttrivialitäts-Prämisse). Sie wird im Folgenden implizit stets als bekannt und erfüllt vorausgesetzt, auch wenn nicht immer explizit darauf hingewiesen wird.

Wegen $KN_q \subseteq KN$ gemäß Formel (9) und wegen der Nicht-Trivialitäts-Prämisse $\#(KN) \geq 3$ gilt, dass Touren T_q mit tourspezifischen Knotenmengen KN_q und mit $\#(KN_q) \geq 3$ grundsätzlich möglich sind. Folglich können echte Teilmengen S der tourspezifischen Knotenmengen KN_q mit $S \subset KN_q$ und $\#(S) \geq 2$ vorkommen.

S die spezifische Knotenmenge desjenigen Toursegments darstellen, das aus der Tour T_q stammt und einen Subzyklus bildet (toursegment- oder subzyklusspezifische Knotenmenge¹⁾). Dies bedeutet, dass der Subzyklus nur aus den Knoten der Teilmenge S besteht und zugleich jeden Knoten der Teilmenge S umfasst. Zweitens muss das Transportmittel, das die Tour T_q durchführt, auf dem betrachteten Toursegment des Subzyklus jeden Knoten n aus der Teilmenge S nacheinander anfahren, an einem beliebigen Knoten \tilde{n} aus der Teilmenge S starten und am Ende des Toursegments zu diesem Knoten \tilde{n} zurückkehren. Der Subzyklus des betrachteten Toursegments umfasst dabei jeden Knoten n aus der Menge $S \setminus \{\tilde{n}\}$ genau einmal, den Knoten \tilde{n} am Beginn und am Ende des Subzyklus genau zweimal und keine anderen Knoten aus der tourspezifischen Knotenmenge KN_q . Folglich besteht der Subzyklus aus genau $\#(S)+1$ Knoten, die jeweils aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge S stammen. Des Weiteren folgt daraus, dass die $\#(S)+1$ Knoten aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge S , die zum betrachteten Subzyklus gehören, durch genau $\#(S)$ Kanten zwischen jeweils zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Knoten des Subzyklus verknüpft werden. Schließlich wird mithilfe der Binärvariablen $x_{i,j,q}$ ausgedrückt, dass zwei Knoten i und j aus der tourspezifischen Knotenmenge KN_q in der Tour T_q mit $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p})$ entweder unmittelbar aufeinanderfolgen und durch eine Kante (i,j) im gerichteten Graphen G miteinander verknüpft sind ($x_{i,j,q} = 1$) oder aber in der Tour T_q nicht unmittelbar aufeinanderfolgen ($x_{i,j,q} = 0$). Die Summe aller $x_{i,j,q}$, die für Knoten i und j aus der tourspezifischen Knotenmenge KN_q und somit auch für jede subzyklusspezifische Knotenmenge S mit $S \subset KN_q$ mit dem Wert 1 die Zugehörigkeit einer Kante (i,j) zur Tour T_q anzeigen, misst die Anzahl aller Kanten, die zu einer Tour T_q mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_q bzw. zu einem Subzyklus dieser Tour mit der subzyklusspezifischen Knotenmenge S gehören.

Unter diesen Voraussetzungen muss drittens für jeden Subzyklus mit $\#(S)+1$ Knoten, die jeweils aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge S stammen, sowie mit $\#(S)$ Kanten zwischen diesen Knoten gelten:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,q} = \#(S) \quad (10)$$

Beispielsweise gilt für die o.a. Tour T_q mit $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p}) = (1,2,4,2,1)$: Ihre tourspezifische Knotenmenge ist $KN_q = \{1,2,4\}$. Für die echte Teilmenge $S = \{2,4\}$ mit $S \subset KN_q$ und $\#(S) = 2$ gibt es einen Subzyklus SZ als Toursegment der Tour $T_q = (1,2,4,2,1)$ mit $SZ = (2,4,2)$ mit der subzyklusspezifischen Knotenmenge $S = \{2,4\}$. Dieser Subzyklus umfasst genau zwei Kanten $(2,4)$ und $(4,2)$ zwischen den Knoten 2 und 4 aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge $S = \{2,4\}$. Es gilt also: $x_{2,4,q} = 1$ und $x_{4,2,q} = 1$ für die beiden Knoten 2 und 4 aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge $S = \{2,4\}$. Da diese Knotenmenge S genau zwei Knoten umfasst, gilt ebenso: $\#(S) = 2$. Folglich wird die Bedingung aus der o.a. Formel (10) für das Vorliegen eines Subzyklus erfüllt:

$$\sum_{i \in \{2,4\}} \sum_{j \in \{2,4\} \setminus \{i\}} x_{i,j,q} = \underbrace{x_{2,4,q}}_{=1} + \underbrace{x_{4,2,q}}_{=1} = \#(\{2,4\}) = 2 \quad (11)$$

1) Von einer subzyklusspezifischen (toursegmentspezifischen) Knotenmenge wird im Folgenden dann gesprochen, wenn das betrachtete Toursegment einen (keinen) Subzyklus der jeweils betrachteten Tour T_q darstellt.

Da die Bedingung aus der Formel (10) für *jeden* Subzyklus mit Knoten aus der subzyklusspezifischen Knotenmenge S mit $S \subset KN_q$ für eine vorgegebene Tour T_q mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_q erfüllt sein muss, gilt umgekehrt, dass eine Tour T_q mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_q *keinen* Subzyklus enthalten kann, wenn für jede echte Teilmenge S der tourspezifischen Knotenmenge KN_q mit $S \subset KN_q$ und $\#(S) \geq 2$ folgender Sachverhalt zutrifft: Die Anzahl aller Kanten, die zu einem Toursegment der Tour T_q mit der toursegmentspezifischen Knotenmenge S gehören, ist für jedes Toursegment *kleiner* als die Anzahl $\#(S)$ der Knoten dieser Menge S .

Folglich kann ein Toursegment aus einer Tour T_q mit der toursegmentspezifischen Knotenmenge S keinen Subzyklus darstellen, wenn für jedes Toursegment mit der toursegmentspezifischen Knotenmenge S gilt:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,q} < \#(S) \quad (12)$$

Da die Erfüllung einer strikten Ungleichungsrelation („<“) in Software für die computergestützte Implementierung formalsprachlicher Modelle nur schwer exakt überprüft werden kann, wird die Formel (12) auf äquivalente Weise in der Gestalt einer schwachen Ungleichungsrelation („≤“) reformuliert, die als Grenzfall auch die Erfüllung der Gleichungsrelation („=“) zulässt. Eine solche äquivalente Reformulierung ist möglich, weil die Anzahl $\#(S)$ der Knoten in der toursegmentspezifischen Knotenmenge S nur ganzzahlige Werte anzunehmen vermag:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,q} \leq \#(S) - 1 \quad (13)$$

Auf dieser Grundlage lässt sich nun eine operationale, d.h. „im Prinzip“ computergestützt implementierbare Bedingung dafür aufstellen, dass eine vorgegebene Tour $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p})$ mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_q keine Subzyklen enthält:

$$\forall S \subset KN_q \wedge \#(S) \geq 2: \sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,q} \leq \#(S) - 1 \quad (14)$$

Diese Bedingung wird im Folgenden auch als Bedingung der *Subzyklenfreiheit* bezeichnet.

Tourenplanungsprobleme lassen sich in knoten- und kantenorientierte Probleme differenzieren.¹⁾

Bei *knotenorientierten* Tourenplanungsproblemen wird davon ausgegangen, dass die Kunden von Transportdienstleistungen an diskreten Punkten einer Region angesiedelt sind. Diese Punkte stimmen mit den Orten oder Haltepunkten überein, die oben als Knoten eines Verkehrsnetzes eingeführt wurden. Einen typischen Vertreter von knotenorientierten Tourenplanungsproblemen stellt das *Travelling-Salesman-Probleme* (TSP) dar. Das Travelling-Salesman-Problem wird seit geraumer Zeit intensiv erforscht, sodass auf eine reichhaltige Literaturbasis zurückgegriffen werden kann.²⁾

1) Vgl. VAHRENKAMP/MATTFELD (2007), S. 275; VAHRENKAMP (2005), S. 450.

2) Vgl. GLEYZAL (1955), S. 213; BODIN/GOLDEN (1981), S. 99 ff.; LAWLER/LENSTRA/RINNOOY et al. (1985); APPLE-GATE/BIXBY/CHAVÁTAL et al. (2006); JAILLET/WAGNER (2008), S. 221 ff.

Bei *kantenorientierten* Tourenplanungsproblemen sind die Kunden von Transportdienstleistungen gleichmäßig über zu versorgende Zonen verteilt. Diese Zonen entsprechen den Transportstrecken, die sich zwischen jeweils zwei unmittelbar benachbarten Orten oder Haltepunkten eines Verkehrsnetzes erstrecken. Zu den typischen Vertretern von kantenorientierten Tourenplanungsproblemen zählt das *Chinese-Postman-Problem* oder *Briefträgerproblem*¹⁾.

Für die betriebliche Praxis spielen die knotenorientierten Tourenplanungsprobleme eine größere Rolle.²⁾ Auch der vorliegende Projektbericht erstreckt sich auf ein knotenorientiertes Tourenplanungsproblem, weil die Vermeidung von Leerfahrten Touren betrifft, bei denen die Kunden von Transportdienstleistungen nicht gleichmäßig entlang der Strecken eines Verkehrsnetzes, sondern an diskreten Orten oder Haltepunkten angesiedelt sind. Das Realproblem der Tourenplanung für die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS lässt sich daher grundsätzlich dem Typ der Travelling-Salesman-Probleme zuordnen.

Allerdings weicht die „Semantik“, die den Travelling-Salesman-Problemen als Formalproblemen zugrunde liegt, deutlich vom Realproblem der Tourenplanung für die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS ab. Denn es geht bei einem Travelling-Salesman-Problem um die Rundreise eines Handelsvertreters, während sich das hier interessierende Realproblem von Eisenbahnverkehrsunternehmen auf die Planung der Fahrten von Güterzügen erstreckt. Daher erweist sich der eng verwandte Typ der *Vehicle-Routing-Probleme* (VRP) im Hinblick auf das zu bewältigende Realproblem als semantisch „angemessener“. Seine „Semantik“ basiert auf Transportmitteln („Vehicle“), für die es Touren („Routing“) in einem Verkehrsnetz zu planen gilt, um die Nachfrage von Kunden nach Transportdienstleistungen zu erfüllen. Die Transportmittel werden im Hinblick auf das hier betrachtete Realproblem als Güterzüge konkretisiert, die sich jeweils aus einer Lokomotive und einer variablen Anzahl von angekoppelten Güterwagen zusammensetzen.

Darüber hinaus weisen Vehicle-Routing-Probleme den Vorzug auf, im Gegensatz zu Travelling-Salesman-Problemen nicht auf nur einen Transportagenten – den Handelsvertreter – festgelegt zu sein, sondern im Allgemeinen eine beliebig große, aber endliche Anzahl von Transportmitteln berücksichtigen zu können. Dies entspricht dem hier betrachteten Realproblem, das sich vorrangig mit der Kooperation von *mehreren* Eisenbahnverkehrsunternehmen auseinandersetzt. Da jedes dieser kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen eigene Güterzüge betreibt, die es auf „intelligente“ Weise zu kombinieren gilt, muss ein Formalproblem zur Modellierung dieses Realproblems grundsätzlich in der Lage sein, *mehrere* Güterzüge als Transportmittel zu erfassen.

Aufgrund der voranstehenden Argumente erweist sich der Typ der Vehicle-Routing-Probleme als der vielversprechendste Formalproblemtyp für die Rekonstruktion und Lösung des Realproblems, die Touren – also die Güterzugfahrten – von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS in der Art eines virtuellen Unternehmens miteinander kooperieren, so miteinander zu koordinieren, d.h. „intelligent“ zu bündeln, dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen. Daher wird der Formalproblemtyp der Vehicle-Routing-Probleme im anschließenden Kapitel näher erläutert.

1) Vgl. NOBERT/PICARD (1996), S. 95; PEARN/LIU (1995), S. 479 f.

2) Vgl. VAHRENKAMP (2005), S. 450.

6.2.1.2 Vehicle-Routing-Probleme als basaler Formalproblemtyp

6.2.1.2.1 Grundlagen der Modellierung von Vehicle-Routing-Problemen

Vehicle-Routing-Probleme werden in der einschlägigen Fachliteratur zumeist als Ein-Depot-Tourenplanungsprobleme thematisiert.¹⁾ Ein-Depot-Tourenplanungsprobleme zeichnen sich dadurch aus, dass die Transportmittel, die zur Durchführung von Touren für die Erfüllung von Kundennachfragen nach Transportdienstleistungen eingesetzt werden, grundsätzlich an *genau einem* Ort – dem *Depot* – vorgehalten werden (*Ein-Depot-Prämisse*). Von diesem Depot aus starten die Transportmittel am Tourbeginn und sie kehren zu diesem Depot am Tourende auch wieder zurück.

Im Folgenden wird eine Standardformulierung für Formalprobleme der konventionellen Tourenplanung vorgestellt, die zum Basistyp der Vehicle-Routing-Probleme in der speziellen Variante der Ein-Depot-Tourenplanungsprobleme gehören. Diese Standardformulierung lehnt sich eng an einen Vorschlag von VAHRENKAMP²⁾ an, der sich seinerseits auf eine Formulierung von Ein-Depot-Tourenplanungsproblemen durch LAPORTE³⁾ bezieht. Ein Modell (Formalproblem), das dieser Standardformulierung für Formalprobleme der konventionellen Tourenplanung entspricht, wird fortan als *Standardmodell der konventionellen Tourenplanung* bezeichnet.⁴⁾

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung setzt die graphentheoretischen Grundlagen voraus, die im voranstehenden Kapitel erläutert wurden. Es wird also von einem Verkehrsnetz ausgegangen, das durch einen gerichteten, 1-Schleifen-freien und vollständig verknüpften Graphen G mit $G = (KN, KA)$ formalsprachlich repräsentiert wird. Da in einem solchen Graphen G die Tourenplanung ein triviales Problem darstellen würde, wenn er aus nur zwei Knoten bestünde, wird für das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung $\#(KN) \geq 3$ vorausgesetzt (*Nichttrivialitäts-Prämisse*).

Im Standardmodell gibt es K Transportmittel k mit $k = 1, \dots, K$ sowie $K \in \mathbb{N}_+$. Der degenerierte Fall mit $K=1$ entspricht dem „klassischen“ Travelling-Salesman-Problem.

Das Verhältnis zwischen Transportmitteln k und Touren T ist im Standardmodell nicht explizit festgelegt. Dies liegt daran, dass Touren T im Standardmodell überhaupt nicht explizit erfasst werden.⁵⁾ Allerdings wird im Standardmodell implizit unterstellt, dass von einem Transportmittel k im Planungszeitraum höchstens eine Tour T durchgeführt werden kann (*Transportmittel-Touren-Prämisse*). Dies bedeutet, dass ein Transportmittel k entweder im Depot verbleibt und deshalb überhaupt keine Tour durchführt oder aber für die Durchführung von genau einer Tour eingesetzt wird. Dadurch wird ausgeschlossen, dass ein Transportmittel im Planungszeitraum mehrere Touren durchführt. Dies muss in der Realität keineswegs der Fall sein, vereinfacht aber die Struktur des

1) Vgl. BULLNHEIMER/HARTL/STRAUSS (1997), S. 1; LAPORTE (1992), S. 345 ff.

2) Vgl. VAHRENKAMP (2007), S. 276 f.

3) Vgl. LAPORTE (1992), S. 353.

4) Die nachfolgend vorgestellte Standardformulierung für Formalprobleme der konventionellen Tourenplanung stellt streng genommen kein einzelnes Modell oder – synonym – Formalproblem dar, sondern ein Modell- bzw. Formalproblem-Schema. Aus diesem Modell- oder Formalproblem-Schema gehen einzelne Modelle bzw. Formalprobleme hervor, indem für alle symbolischen Konstanten („Parameter“) des Schemas konkrete numerische Werte eingesetzt werden.

5) Auf diesen Explizierungsdefekt in Bezug auf Touren wird später zurückgekommen; vgl. Kapitel 6.2.3 a.).

Formalproblems erheblich. Aufgrund dieser Vereinfachung kann jede Tour mit dem Bezeichner k desjenigen Transportmittels indiziert werden, das zur Durchführung dieser Tour eingesetzt wird. Die Notation einer Tour T mit $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ ist unter Einbeziehung des jeweils eingesetzten Transportmittels k entsprechend zur Notation $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,p})$ zu erweitern. Daher ist ein eigenständiger Tourindex q , der im voranstehenden Kapitel zur Unterscheidung von Touren eingeführt wurde, nicht mehr notwendig. Stattdessen können die Touren $T_q = (kn_{q,1}, \dots, kn_{q,p}, \dots, kn_{q,p})$, die dort im Hinblick auf die Definition und den Ausschluss von Subzyklen eingeführt wurden, im hier betrachteten Standardmodell als Touren T_k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,p})$ reindiziert werden.

Da das Standardmodell zum Typ der Ein-Depot-Tourenplanungsprobleme gehört, startet jedes Transportmittel k , das auf einer Tour T_k eingesetzt wird, in dem einen Depot für alle Transportmittel und kehrt nach der Durchführung der Tour in dieses Depot zurück. Das Depot kann an einem beliebigen Knoten¹⁾ des Verkehrsnetzes angesiedelt sein. Um die Formulierung des Standardmodells zu vereinfachen, wird ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit davon ausgegangen, dass sich das Depot für alle Transportmittel k mit $k = 1, \dots, K$ immer am Knoten $n=1$ (Depot-Knoten) befindet (*Depotprämiss*e).

Die *Freiheitsgrade* des Entscheidungsträgers bei der Tourenplanung werden durch jeweils binäre *Entscheidungsvariablen* $x_{i,j,k}$ mit $i, j = 1, \dots, N$ und $k = 1, \dots, K$ modelliert. Die Entscheidungsvariable $x_{i,j,k}$ nimmt genau dann den Wert 1 (0) an, wenn ein Transportmittel k die Strecke zwischen den Knoten i und j im Verkehrsnetz (nicht) befährt.

Hinzu kommen weitere binäre Variablen $y_{i,k}$ mit $i = 1, \dots, N$ und $k = 1, \dots, K$. Die Variable $y_{i,k}$ weist genau dann den Wert 1 (0) auf, wenn der Knoten i zu der Tour T_k des Transportmittels k (nicht) gehört. Die Variablen $y_{i,k}$ stellen trotz ihrer formalsprachlichen Ähnlichkeit mit den Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ aus modelltheoretischer Perspektive keine Entscheidungsvariablen dar. Vielmehr handelt es sich um sogenannte *modellendogene Variablen*. Solche modellendogenen Variablen stehen nicht zur Disposition des Entscheidungsträgers, der ein (Entscheidungs-) Modell anwendet, und gehören daher nicht zu dessen Freiheitsgraden. Stattdessen werden die Werte der modellendogenen Variablen innerhalb des Modells („modellendogen“) durch komplexe Wechselwirkungen vollständig determiniert. Diese Wechselwirkungen resultieren einerseits aus dem Versuch, die Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ so festzulegen, dass die Zielfunktion des Standardmodells minimiert wird, und andererseits diese Entscheidungsvariablen so festzulegen, dass die Gesamtheit aller Restriktionen des Modells erfüllt wird. Die besondere Qualität der modellendogenen Variablen $y_{i,k}$ äußert sich im unten formalsprachlich zusammengefassten Standardmodell darin, dass die modellendogenen Variablen nicht in der zu minimierenden Zielfunktion vorkommen und somit nicht zum Dispositionsspielraum des Entscheidungsträgers gehören.

1) Wenn im Folgenden von einem Knoten des Verkehrsnetzes gesprochen wird, ist eigentlich ein Ort oder Haltepunkt im Verkehrsnetz gemeint. Es wurde aber schon an früherer Stelle vereinbart, dass die Knoten eines gerichteten Graphen und die Orte oder Haltepunkte eines Verkehrsnetzes, das durch den gerichteten Graphen formalsprachlich repräsentiert wird, zwecks sprachlicher Vereinfachung als Synonyme behandelt werden können.

Die *symbolischen Konstanten* („Parameter“)¹⁾ des Standardmodells erstrecken sich zunächst auf die Distanzen $d_{i,j}$. Die *Distanz* $d_{i,j}$ ist die Länge einer Strecke, die im Verkehrsnetz den Knoten i mit dem Knoten j direkt verknüpft.²⁾ Sie wird auch kurz als *Streckenlänge* $d_{i,j}$ bezeichnet. Hinzu kommt für jeden Knoten n des Verkehrsnetzes die *Gütermenge* m_n , deren Transport von Kunden des betrachteten Transportunternehmens oder der betrachteten Transportunternehmen³⁾ im Knoten n nachgefragt wird.⁴⁾ Diese Gütermenge lässt sich in Abhängigkeit von der jeweils eingenommenen Perspektive auch als *Nachfragemenge* m_n von Kunden im Knoten n oder als *Transportmenge* m_n für den Knoten n ansprechen. Um Komplikationen auszuschließen, die später erläutert werden, wird für den Knoten $n=1$, in dem sich das Depot für alle Transportmittel k mit $k = 1, \dots, K$ befindet, vorausgesetzt, dass in ihm keine Nachfrage nach zu transportierenden Gütern vorliegt ($m_1 = 0$). Schließlich ist zu beachten, dass jedes Transportmittel k über die *Transportkapazität* C_k verfügt.

Als *Formalziel* wird angestrebt, die *Tourlängensumme* TLS zu minimieren. Die Tourlängensumme TLS ist die Summe der Tourlängen TL_k , die von den K Transportmitteln auf ihren Touren T_k im Verkehrsnetz insgesamt zurückgelegt werden, wenn das *Sachziel* der Nachfragedeckung erfüllt wird. Dieses Sachziel besteht darin, alle Gütermengen m_n zu transportieren, deren Transporte von Kunden in den Knoten n nachgefragt werden. Die *Tourlänge* TL_k einer Tour T_k ist hierbei als die Summe der Distanzen oder Streckenlängen $d_{i,j}$ aller Strecken definiert, die ein Transportmittel k auf seiner Tour T_k im zugrunde liegenden Verkehrsnetz insgesamt befährt.

Schließlich wird im Standardmodell die Subzyklenfreiheit aller Touren T_k vorausgesetzt, die mit jeweils einem tourspezifisch eingesetzten Transportmittel k durchgeführt werden können (*Prämisse der Subzyklenfreiheit*). Zur Formulierung dieser Voraussetzung kann auf die Formel (14) zurückgegriffen werden, die im voranstehenden Kapitel 6.2.1.1 zur formalsprachlichen Spezifikation der Subzyklenfreiheit eingeführt wurde.⁵⁾

Falls in einer T_k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,p})$ ein Subzyklus vorläge, würde ein Transportmittel während der Durchführung seiner Tour T_k einen Knoten $kn_{k,p}$ mit $1 \leq p \leq P-3$ zunächst verlassen, aber an einer späteren Tourposition mit dem Index p' ($p+2 \leq p' \leq P-1$) und dem Knoten $kn_{p'}$ noch vor dem Erreichen des Tourendes im Knoten $kn_{k,p}$ wegen $kn_{p'} = kn_p$ zu jenem Knoten $kn_{k,p}$ wieder

-
- 1) Zu den symbolischen Konstanten des Standardmodells gehören streng genommen auch die Anzahl N der Knoten des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes und die Anzahl K der Transportmittel. Da es sich hierbei aber nicht um „typische“ Konstanten, sondern um größtmögliche Indexausprägungen handelt, werden diese „atypischen“ Konstanten im Folgenden nicht weiter thematisiert.
 - 2) Die Gesamtheit aller Distanzen $d_{i,j}$ zwischen allen Knoten eines Verkehrsnetzes wird in der Distanzmatrix \underline{D} zusammengefasst. In der Regel wird davon ausgegangen, dass sich die Längen der Strecken nicht unterscheiden, die im Verkehrsnetz zwischen jeweils den gleichen Knoten i und j in entgegengesetzter Richtung befahren werden können: $d_{i,j} = d_{j,i}$ für alle $i, j \in KN$. In diesem Regelfall liegt eine symmetrische Distanzmatrix \underline{D} vor.
 - 3) Bei einem Vehicle-Routing-Problem ist nicht festgelegt, ob entweder nur ein Transportunternehmen oder aber mehrere Transportunternehmen betrachtet werden. Zwar werden im Allgemeinen beliebig viele Transportmittel zugelassen. Aber es liegt nicht fest, ob im Falle von mehreren Transportmitteln diese entweder zu genau einem oder aber zu mehreren Transportunternehmen gehören. Sofern diese Unterscheidung im jeweils aktuellen Argumentationskontext nicht relevant erscheint, wird im Folgenden zwecks Diktionsvereinfachung von mehreren Transportunternehmen ausgegangen.
 - 4) Falls in einem Knoten n keine Nachfrage nach einer zu transportierenden Gütermenge vorliegt, gilt $m_n = 0$.
 - 5) Dabei ist lediglich zu beachten, dass der Tourindex q , der oben in der Formel (14) und bei ihrer Herleitung verwendet wurde, im hier betrachteten Standardmodell durch den Index k desjenigen Transportmittels zu ersetzen ist, das die jeweils betroffene Tour durchführt.

zurückkehren. Ein solcher Subzyklus ist für Realprobleme der Tourenplanung keineswegs grundsätzlich auszuschließen, sondern durchaus möglich. Es wird später sogar gezeigt werden, dass Subzyklen für reale Tourenplanungsprobleme durchaus eine bedeutsame Rolle spielen können.¹⁾

Aber im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung wird davon ausgegangen, dass Subzyklen einer Tour grundsätzlich unzulässig sind. Für diese Prämisse der Subzyklenfreiheit spricht ein gewichtiges Argument. Es beruht im Wesentlichen²⁾ auf der Prämisse, dass jedem Knoten n des Verkehrsnetzes eine Gütermenge m_n zugeordnet ist, die von einem Transportmittel k transportiert werden muss, zu dessen Tour T_k der Knoten n gehört (*Prämisse obligatorischer Gütertransporte*).³⁾ Wenn ein Subzyklus einer Tour T_k dazu führen würde, dass noch vor dem Erreichen des Tourenendes zu einem bereits früher angefahrenen Knoten n zurückgekehrt wird, dann wäre nicht klar, ob die Gütermenge m_n , die diesem Knoten n als Transportnachfrage zugeordnet ist, durch das Transportmittel k entweder bei der ersten Anfahrt des Knotens n oder bei der zweiten Anfahrt desselben Knotens oder durch eine Kombination der beiden vorgenannten Optionen transportiert wird. Klarheit würde erst dadurch geschaffen, dass es möglich wäre zu spezifizieren, ob – oder zu welchem Anteil – eine Gütermenge m_n , die es bei Gütertransporten im Hinblick auf einen Knoten n zu berücksichtigen gilt, von einem Transportmittel auf seiner Tour $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ in einer speziellen Tourposition p transportiert, d.h. genauer: am Haltepunkt des Knotens n entweder be- oder entladen, wird. Dann wäre es möglich, auch Subzyklen zuzulassen und z.B. festzulegen, dass ein Transportmittel auf seiner Tour mit einem Subzyklus während der ersten Anfahrt des Knotens n mit der Gütermenge m_n beladen wird, aber bei der Rückkehr zu diesem Knoten n diese Gütermenge m_n für das Transportmittel keine Rolle mehr spielt. Diese Möglichkeit scheidet aber im hier betrachteten Standardmodell von vornherein aus, weil es über keine Ausdrucksmittel verfügt, um die Positionen p innerhalb einer Tour mittels entsprechender Entscheidungsvariablen zu unterscheiden.⁴⁾

Um Komplikationen der zuvor skizzierten Art zu vermeiden, wird im Standardmodell von der Prämisse ausgegangen, dass alle zulässigen Touren von Transportmitteln subzyklenfrei sind. Daraus folgt, dass ein Knoten des Verkehrsnetzes – sofern es sich nicht um den Knoten 1 für das Depot

-
- 1) Später wird verdeutlicht werden, dass es für das hier betrachtete Realproblem durchaus in Betracht kommen kann, einen Knoten als Haltepunkt des Verkehrsnetzes mehrfach anzufahren. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein Knoten ein erstes Mal mit leeren Güterwagen angefahren wird, die im betrachteten Knoten mit den Gütern eines ersten Transportauftrags beladen werden, sowie ein zweites Mal mit beladenen Güterwagen angefahren wird, die im selben Knoten von den Gütern eines zweiten Transportauftrags entladen werden. Vgl. dazu die exemplarischen Ausführungen im Kapitel 6.2.3, Abschnitt a).
 - 2) Darüber hinaus können Subzyklen im Standardmodell dazu führen, dass die insgesamt zu minimierende Tourlängensumme vergrößert wird. Dann würden sie zu keiner Verbesserung der Lösung des Standardmodells führen. Daher können sie für die Ermittlung von optimalen Modelllösungen von vornherein ausgeschlossen werden, um den abstrakten Suchraum für optimale Modelllösungen einzuschränken. Dadurch kann die Effizienz von Algorithmen für die Ermittlung von optimalen Modelllösungen tendenziell gesteigert werden, d.h., die optimalen Modelllösungen (unveränderter Output der Algorithmen) lassen sich aufgrund eines kleineren Suchraums mit tendenziell geringerem Ressourceneinsatz (verminderter Input der Algorithmen) auffinden.
 - 3) Auf die unklare Semantik der Aussage, dass „eine Gütermenge m_i ... von einem Transportmittel k transportiert werden muss“, wird später ausführlicher zurückgekommen.
 - 4) Die Notation $T = (kn_1, \dots, kn_p, \dots, kn_p)$ mit explizit ausgewiesenen Knoten kn_p an den Tourpositionen p wurde hier nur zur Verdeutlichung ergänzt. Sie ist kein Bestandteil des Standardmodells, das in Kürze als Formelsystem explizit vorgestellt wird.

handelt, der als Tourbeginn ($kn_1 = 1$) und als Tourende ($kn_p = 1$) in jeder Tour genau zweimal enthalten ist, – in einer Tour nur höchstens einmal enthalten ist.

6.2.1.2.2 Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung

Auf der Grundlage der voranstehenden Vereinbarungen lässt sich das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung in der nachstehenden Weise formulieren.

Zielfunktion:

$$\text{TLS}(x_{1.1.1}, \dots, x_{N.N.K}) \rightarrow \min! \quad (15)$$

Restriktionen:

$$\text{TLS}(x_{1.1.1}, \dots, x_{N.N.K}) = \sum_{k=1}^K \text{TL}_k(x_{1.1.k}, \dots, x_{N.N.k}) \quad (16)$$

$$\text{TL}_k(x_{1.1.k}, \dots, x_{N.N.k}) = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N d_{i,j} \cdot x_{i,j,k} \quad \text{für } k = 1, \dots, K \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{n,k} \leq K \quad \text{für } n = 1 \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{n,k} = 1 \quad \text{für } n = 2, \dots, N \quad (19)$$

$$\sum_{n=1}^N m_n \cdot y_{n,k} \leq C_k \quad \text{für } k = 1, \dots, K \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{i,j,k} = y_{i,k} \quad \text{für } i = 1, \dots, N \text{ und für } k = 1, \dots, K \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i,j,k} = y_{j,k} \quad \text{für } j = 1, \dots, N \text{ und für } k = 1, \dots, K \quad (22)$$

$$\forall S \subset KN_k \wedge \#(S) \geq 2: \sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,k} \leq \#(S) - 1 \quad \text{für } k = 1, \dots, K \quad (23)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \text{für } i = 1, \dots, N, \text{ für } j = 1, \dots, N \text{ und für } k = 1, \dots, K \quad (24)$$

$$y_{n,k} \in \{0,1\} \quad \text{für } n = 1, \dots, N \text{ und für } k = 1, \dots, K \quad (25)$$

Die Bestandteile des voranstehenden Standardmodells der konventionellen Tourenplanung, das sich aus den Formeln (15) bis (25) zusammensetzt, werden im Folgenden kurz kommentiert.

Die Formel (15) für die Zielfunktion drückt das Formalziel des Standardmodells aus. Sie expliziert unmittelbar die Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$, über deren Werte ein Entscheidungsträger zwecks

Minimierung der Tourlängensumme TLS aller durchgeführten Touren T_k mit $k = 1, \dots, K$ frei disponieren kann.

Die Formel (16) besitzt nur definitorische Qualität. Sie legt lediglich fest, wie die Tourlängensumme TLS in Abhängigkeit von den Tourlängen TL_k aller Touren T_k mit $k = 1, \dots, K$ ermittelt wird.

Die Formel (17) besitzt ebenfalls nur definitorische Qualität. Sie drückt aus, dass die Tourlänge TL_k einer Tour T_k die Summe aller Distanzen $d_{i,j}$ zwischen einem Knoten i und einem Knoten j im zugrunde liegenden Verkehrsnetz ist, sofern diese beiden Knoten i und j in der Tour T_k unmittelbar aufeinanderfolgen, sodass $x_{i,j,k} = 1$ gilt.

Die Formel (18) legt fest, dass alle Touren T_k , die überhaupt durchgeführt werden, den Knoten des Depots mit $n = 1$ auf jeden Fall umfassen. Andernfalls wäre es nicht möglich, die Voraussetzung zu erfüllen, dass jede Tour $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ im Depot-Knoten mit $n = 1$ sowohl beginnt als auch endet, also $kn_{k,1} = 1$ und $kn_{k,P} = 1$ gilt. Mitunter wird anstelle der Formel (18) auch eine analog strukturierte *Gleichung* aufgestellt:¹⁾

$$\sum_{k=1}^K y_{n,k} = K \quad \text{für } n = 1 \quad (26)$$

Bei Verwendung dieser Gleichung im Standardmodell wird jedoch gefordert, dass *jedes* der K Transportmittel k im Depot-Knoten mit $n = 1$ eine Tour T_k beginnt und auch endet sowie bei dieser Tour mindestens einen weiteren Knoten $n' \neq 1$ anfährt. Dies bedeutet, dass jedes der K Transportmittel k eine Tour T_k durchführen *muss*, die eine positive Tourlänge TL_k aufweist und damit zu einer Vergrößerung der Tourlängensumme TLS beiträgt. Dies kann angesichts der Zielfunktion, dass gemäß Formel (15) die Tourlängensumme TLS zu minimieren ist, zu suboptimalen Lösungen des Standardmodells führen. Denn es ist durchaus möglich, dass die Tourlängensumme TLS insgesamt kleiner ausfällt, wenn mindestens eines der K Transportmittel k im Depot verbleibt und keine Tour durchführt. Aus diesem Grund wurde bewusst auf die Restriktion in der Gleichungsform (26) verzichtet und stattdessen die Formel (18) als „schwache“ Ungleichung mithilfe des Relationssymbols „ \leq “ formuliert, welche die Gleichung (26) als Spezialfall umfasst („ $=$ “), aber auch als strikte Ungleichung erfüllt sein kann („ $<$ “). Folglich bietet die Formel (18) für die Lösung des Standardmodells einen größeren Spielraum zur Ermittlung optimaler Modelllösungen.

Die Formel (19) stellt sicher, dass für jeden Knoten n des Verkehrsnetzes mit $n = 2, \dots, N$ – also mit Ausnahme des Depot-Knotens mit $n = 1$ – genau eine Tour T_k mit $y_{n,k} = 1$ existiert, sodass der jeweils betrachtete Knoten n zur Tour T_k gehört. Für diese Tour T_k muss also gelten: $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ und es gibt mindestens eine Tourposition p mit $1 \leq p \leq P$ und $kn_{k,p} = n$. Da jeder Knoten n des Verkehrsnetzes mit $n = 2, \dots, N$ zu genau einer Tour T_k gehört, kann mithilfe dieser Tour T_k diejenige Gütermenge m_n transportiert werden, deren Transport im jeweils betrachteten Knoten n des Verkehrsnetzes von Kunden nachgefragt wird. Daher gewährleistet die Formel (19) „im Prinzip“, dass das Sachziel der Nachfragedeckung erfüllt wird.

Allerdings kann das Sachziel der Nachfragedeckung nur dann tatsächlich erfüllt werden, wenn die Transportkapazität C_k des Transportmittels k , das zur Durchführung der Tour T_k eingesetzt wird, für den Transport der Gütermenge m_n ausreicht, wenn also die Anforderung $C_k \geq m_n$ erfüllt ist. Die Er-

1) Vgl. LAPORTE (1992), S. 345 f.

füllung dieser Anforderung wird zwar durch die Formel (20) vorausgesetzt. Aber die Formel (20) kann nicht ausschließen, dass für einen Knoten n von Kunden eine derart große Gütermenge m_n als Transportnachfrage artikuliert wird, dass die Transportkapazität C_k des Transportmittels k , das auf seiner Tour T_k mit $y_{n,k} = 1$ den Knoten n anfährt, nicht ausreicht, um diese Gütermenge m_n zu transportieren ($C_k < m_n$). Tritt dieser Fall $C_k < m_n$ für mindestens einen Knoten n des Verkehrsnetzes ein, besitzt das Standardmodell keine zulässige Lösung. Dies kann z.B. dadurch ausgeschlossen werden, dass als zusätzliche Restriktion im Sinne einer *Integritätsbedingung* gefordert wird:

$$C_k \geq \max \{m_n \mid n = 1, \dots, N\} \quad \text{für } k = 1, \dots, K \quad (27)$$

Eine solche Integritätsbedingung ist jedoch in der einschlägigen Fachliteratur zu Tourenplanungsproblemen nach Kenntnis der Verfasser dieses Projektberichts bislang noch niemals explizit formuliert worden.

Die Formel (20), die zuvor schon kurz angesprochen wurde, sorgt dafür, dass die Summe der Gütermengen m_n , die einer Tour T_k durch die modellendogenen Variablen $y_{n,k}$ mit $y_{n,k} = 1$ zugeordnet sind, die insgesamt verfügbare Transportkapazität C_k des Transportmittels k , das zur Durchführung der Tour T_k eingesetzt wird, nicht überschreitet. Es handelt sich also um eine Kapazitätsrestriktion der Art, die aus zahlreichen betriebswirtschaftlichen Optimierungsmodellen – wie etwa der Planung eines optimalen Produktionsprogramms – wohlvertraut ist.

Die Formeln (21) und (22) stellen einen wesentlichen „Clou“ des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung dar. Beide sorgen auf „trickreiche“ Weise dafür, dass jede Tour T_k eines Transportmittels k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ *zyklisch* verläuft, also im selben Knoten sowohl beginnt als auch endet: $kn_{k,1} = kn_{k,P}$. Darüber hinaus lässt sich durch Konvention festlegen, dass es sich hierbei für jede Tour T_k um den *Depot-Knoten* mit $n = 1$ handelt, dass also für jede Tour T_k sowohl $kn_{k,1} = 1$ für den Tourbeginn als auch $kn_{k,P} = 1$ für das Tourende gilt. Dies wird im Folgenden erläutert.

Die Formel (21) drückt aus, dass für jeden Knoten i des Verkehrsnetzes, der wegen $y_{i,k} = 1$ zu einer Tour T_k gehört, genau ein weiterer Knoten j mit $x_{i,j,k} = 1$ existiert, der ebenso zur Tour T_k gehört und innerhalb dieser Tour wegen $x_{i,j,k} = 1$ unmittelbar nach dem Knoten i angefahren wird. Dies bedeutet speziell für den vorletzten Knoten $kn_{k,P-1}$, der sich in einer Tour T_k mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_k und mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ an der Position $P-1$ befindet: Die Tour T_k kann erstens vom Knoten $kn_{k,P-1}$ zu *keinem* Knoten $kn_{k,p}$ mit $1 < p < P$ aus dem Toursegment TS_k mit $TS_k = (kn_{k,2}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P-1})$ fortgesetzt werden, weil dadurch entweder ein unzulässiger Subzyklus, der durch die Formel (23) ausgeschlossen wird, oder aber eine ebenso unzulässige 1-Schleife entstehen würde. Zweitens ist es unmöglich, die Tour T_k zu einem Knoten n fortzusetzen, der *nicht* in der *tourspezifischen Knotenmenge* KN_k enthalten ist. Denn die tourspezifische Knotenmenge KN_k einer *zyklischen* Tour T_k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ ist durch die Knoten $kn_{k,p}$ an den Tourpositionen $p = 1, \dots, P-1$ bereits vollständig bestimmt. Daher kommt es drittens nur noch in Betracht, dass die Tour T_k vom vorletzten Knoten $kn_{k,P-1}$ zu einem Knoten fortgesetzt wird, der nicht zum Toursegment TS_k mit $TS_k = (kn_{k,2}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P-1})$, aber zur tourspezifischen Knotenmenge KN_k gehört. Diese doppelte Anforderung wird ausschließlich durch den Knoten $kn_{k,1}$ des Tourbeginns erfüllt, sodass stets gelten muss: $kn_{k,P} = kn_{k,1}$. Folglich erzwingt die Formel (21), dass jede Tour T_k an ihrem Tourbeginn ($kn_{k,1}$) und an ihrem Tourende ($kn_{k,P}$) denselben Knoten aufweist: $kn_{k,1} = kn_{k,P}$.

Dieser Knoten muss – allein aufgrund der Formel (21) – nicht notwendig der Depot-Knoten $n = 1$ zu sein. Aber der Verbund aus den Formeln (18), (19) und (21) stellt sicher, dass nur der Depot-Knoten mit $n = 1$ zu allen Touren T_k gehören kann, die mit den Transportmitteln $k = 1, \dots, K$ durchgeführt werden. Denn aufgrund der Formel (19) darf jeder Nicht-Depot-Knoten mit $n = 2, \dots, N$ nur in genau einer Tour T_k vorkommen. Nur der Depot-Knoten mit $n = 1$ kann wegen der Formel (18) in mehreren, maximal allen K Touren enthalten sein, die sich mit den Transportmitteln $k = 1, \dots, K$ durchführen lassen. Folglich ist der Depot-Knoten mit $n = 1$ der einzige Knoten aus dem Verkehrsnetz, durch den alle Touren T_k verlaufen. Da diese Touren qua Voraussetzung jeweils *zyklische* Touren darstellen, kann jeder Knoten, der zu einer Tour T_k gehört, als deren Tourbeginn und Tourende ausgezeichnet werden. Aber nur der Depot-Knoten mit $n = 1$ weist aufgrund der Formel (18) die Eigenschaft auf, dass er für *alle* durchgeführten Touren T_k sowohl als deren Tourbeginn als auch als deren Tourende ausgezeichnet werden kann. Daher wird als *Konvention* festgelegt, den Depot-Knoten mit $n = 1$ als Tourbeginn ($kn_{k,1}$) und Tourende ($kn_{k,P}$) jeder Tour T_k zu betrachten. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass diese Konvention im o.a. Standardmodell nicht explizit dargestellt werden kann. Denn das Standardmodell verfügt nicht über die Ausdrucksmittel, die nötig wären, um darzustellen, welche Knoten sich an welchen Positionen einer Tour T_k befinden. Auf dieses Defizit des Standardmodells wird später zurückgekommen.

Analog zur voranstehenden Formel (21) kann auch im Hinblick auf die Formel (22) argumentiert werden. Da die Argumentationsweise zur Formel (22) keine grundsätzlich neuartigen Einsichten vermittelt, wird sie im Folgenden nur kurz skizziert. Die Formel (22) drückt aus, dass für jeden Knoten j des Verkehrsnetzes, der wegen $y_{j,k} = 1$ zu einer Tour T_k gehört, genau ein weiterer Knoten i mit $x_{i,j,k} = 1$ existiert, der ebenso zur Tour T_k gehört und von dem aus innerhalb dieser Tour abgefahren wird, bevor das Transportmittel k wegen $x_{i,j,k} = 1$ zum unmittelbar folgenden Knoten j gelangt. Dies bedeutet speziell für den Knoten $kn_{k,2}$, der sich in einer Tour T_k mit der tourspezifischen Knotenmenge KN_k und mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ an der zweiten Position befindet: Die Tour T_k kann erstens in *keinem* Knoten $kn_{k,p}$ mit $1 < p < P$ aus dem Toursegment TS_k mit $TS_k = (kn_{k,2}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P-1})$ beginnen und von dort aus zum Knoten $kn_{k,2}$ fortgesetzt werden, weil dadurch entweder ein unzulässiger Subzyklus, der durch die Formel (23) ausgeschlossen wird, oder aber eine ebenso unzulässige 1-Schleife entstehen würde. Zweitens ist es unmöglich, die Tour T_k in einem Knoten n zu starten, der *nicht* in der *tourspezifischen Knotenmenge* KN_k enthalten ist. Denn die tourspezifische Knotenmenge KN_k einer *zyklischen* Tour T_k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ ist durch die Knoten $kn_{k,p}$ an den Tourpositionen $p = 2, \dots, P$ bereits vollständig bestimmt. Daher kommt es drittens nur noch in Betracht, dass die Tour T_k in einem Knoten $kn_{k,1}$ beginnt, der nicht zum Toursegment TS_k mit $TS_k = (kn_{k,2}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P-1})$, aber zur tourspezifischen Knotenmenge KN_k gehört. Diese doppelte Anforderung wird ausschließlich durch den Knoten $kn_{k,P}$ des Tourendes erfüllt, sodass stets gelten muss: $kn_{k,1} = kn_{k,P}$. Folglich erzwingt die Formel (22), dass jede Tour T_k an ihrem Tourbeginn ($kn_{k,1}$) und an ihrem Tourende ($kn_{k,P}$) denselben Knoten aufweist: $kn_{k,1} = kn_{k,P}$. Bereits im Zusammenhang mit der Formel (21) wurde aufgezeigt, dass nur der Depot-Knoten mit $n = 1$ aufgrund der Formel (18) die Eigenschaft aufweist, dass er für *alle* durchgeführten Touren T_k sowohl als deren Tourbeginn als auch als deren Tourende ausgezeichnet werden kann. Daher wird auch hier hinsichtlich der Formel (22) als *Konvention* festgelegt, den Depot-Knoten mit $n = 1$ als Tourbeginn ($kn_{k,1}$) und Tourende ($kn_{k,P}$) jeder Tour T_k zu betrachten.

Die Formeln (21) und (22) sind nicht nur dafür geeignet festzulegen, dass jede Tour T_k eines Transportmittels k mit $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ zyklisch verläuft, also im selben Knoten sowohl beginnt als auch endet: $kn_{k,1} = kn_{k,P}$. Vielmehr erfüllen sie auch eine zweite Funktion: Sie sorgen da-

für, dass in der Formel (17) die Distanz $d_{i,j}$ in die Ermittlung der Tourlänge TL_k einer Tour T_k genau dann einfließt, wenn die beiden Knoten i und j zur Tour T_k gehören, in der Tour T_k unmittelbar aufeinanderfolgen und daher bei der Durchführung der Tour T_k die Strecke zwischen den beiden Knoten i und j befahren wird. Dies wird auf folgende Weise bewirkt: Einerseits bedeutet die Formel (21), dass es dann, wenn ein Knoten i zur Tour T_k gehört ($y_{i,k} = 1$), genau einen Knoten j geben muss, der in der Tour T_k ebenso enthalten ist und in der Tour T_k auf den Knoten i unmittelbar folgt ($x_{i,j,k} = 1$). Andererseits bedeutet die Formel (22), dass es dann, wenn ein Knoten j zur Tour T_k gehört ($y_{j,k} = 1$), genau einen Knoten i geben muss, der in der Tour T_k ebenso enthalten ist und in der Tour T_k dem Knoten j unmittelbar vorangeht ($x_{i,j,k} = 1$). Beide Formeln (21) und (22) zusammen gewährleisten, dass $x_{i,j,k} = 1$ genau gilt, wenn sowohl der Knoten i zur Tour T_k gehört ($y_{i,k} = 1$) als auch der Knoten j zur Tour T_k gehört ($y_{j,k} = 1$) und diese beiden Knoten in der Tour T_k unmittelbar aufeinanderfolgen. In diesem Fall mit $x_{i,j,k} = 1$ bewirkt die Formel (17), dass in die Ermittlung der Tourlänge TL_k der Tour T_k u.a. auch die Distanz $d_{i,j}$ zwischen dem Knoten i und dem Knoten j eingeht, die in der Tour T_k unmittelbar aufeinanderfolgen.

Die Formel (23) dient dazu, die Existenz von Subzyklen für alle Touren T_k auszuschließen, die von Transportmitteln k mit $k = 1, \dots, K$ durchgeführt werden können. Die Wirkungsweise dieser Formel wurde bereits im voranstehenden Kapitel 6.2.1.1 zu den graphentheoretischen Grundlagen des Standardmodells ausführlich erläutert. Daher braucht auf diese Formel hier nicht näher eingegangen zu werden.

Die Formeln (24) und (25) erfüllen lediglich den Zweck, die Mengen der zulässigen Werte – also die sogenannten Definitionsbereiche – für die Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ bzw. für die modellendogenen Variablen $y_{n,k}$ zu spezifizieren. Mithilfe der Definitionsbereiche $\{0,1\}$ werden beide Variablenarten jeweils als Binärvariablen ausgezeichnet.

6.2.1.2.3 Implementierungsprobleme des Standardmodells

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive lässt sich ein Modell nur dann zur Bewältigung von Realproblemen Erfolg versprechend einsetzen,¹⁾ wenn sich das Modell mit der Hilfe von Software computergestützt implementieren lässt. Für diesen Zweck bietet sich vor allem Spezialsoftware an, die hier unter die Bezeichnung der mathematischen Modellierungssoftware subsumiert wird. Solche Spezialsoftware gestattet einerseits das relativ komfortable Editieren (Konstruieren und Modifizieren) von Modellen. Andererseits lässt sie sich ebenso nutzen, um zulässige, zumeist auch optimale Modelllösungen mit der Hilfe von leistungsfähigen Algorithmen zu ermitteln. Ohne die Unterstützung durch mathematische Modellierungssoftware wäre es in der betrieblichen Praxis kaum mög-

1) Ein Modell stellt zunächst „nur“ ein Formalproblem dar, sodass die Analyse oder die Lösung eines Modells keinen unmittelbaren Beitrag zur Bewältigung eines Realproblems leistet. Stattdessen wird als Modell zunächst nur ein Formalproblem analysiert bzw. gelöst. Aber bei „hinreichender“ Realitätsadäquanz des Formalproblems (Modells) ist es möglich, aus der Analyse oder Lösung des Formalproblems (Modells) Erkenntnisse über das jeweils modellierte Realproblem zu gewinnen, die sich bei „geeigneter“ Interpretation zur Bewältigung des zugrunde liegenden Realproblems anwenden lassen. Die inhärente Problematik, die in der Überwindung der Kluft zwischen Real- und Formalproblemen liegt, soll hier in keiner Weise geleugnet werden. Daher wurde zuvor mit der gebotenen Vorsicht nur mit distanzierenden Anführungszeichen von „hinreichender“ Realitätsadäquanz und „geeigneter“ Interpretation gesprochen. Diese *grundsätzliche* Problematik ist jedoch kein Gegenstand des hier vorgelegten Projektberichts. Daher wird sie im Folgenden nicht weiter reflektiert.

lich, „große“ Modelle für realistische Realprobleme zu erstellen, zu modifizieren und – vor allem – mit akzeptablem Zeitaufwand zu lösen. Daher wird kurz beleuchtet, ob sich das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung in der Form, in der es mittels der voranstehenden Formeln (15) bis (25) spezifiziert wurde, mittels mathematischer Modellierungssoftware problemlos implementieren lässt.

Insbesondere die Formel (23), die zum Ausschluss von Subzyklen dient, bereitet hinsichtlich ihrer computergestützten Implementierung gravierende Schwierigkeiten. Diese Implementierungsprobleme beruhen auf mindestens drei Ursachen. Zu ihrer Verdeutlichung wird die Formel (23) nochmals angeführt:

$$\forall S \subset \text{KN}_k \wedge \#(S) \geq 2: \sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,k} \leq \#(S) - 1 \text{ für } k = 1, \dots, K \quad (23)$$

Erstens werden durch die Ermittlung optimaler Lösungen für das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung erst diejenigen Touren T_k ermittelt, die in der Formel (23) mit ihren tourspezifischen Knotenmengen KN_k schon als bekannt vorausgesetzt werden. Diese Voraussetzung des Ergebnisses einer optimalen Modelllösung in der Formulierung des zugrunde liegenden Modells konstituiert einen „selbstbezüglichen“ Modellcharakter, dessen Handhabung eine nicht-triviale Herausforderung an den Modellanwender stellt.

Zweitens lässt sich die Formel (23), die zum Ausschluss von Subzyklen dient, kaum direkt implementieren. Zumindest sind den beiden Verfassern dieses Projektberichts keine Publikationen bekannt, in denen es gelungen wäre, die Formel (23) mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware unmittelbar wiederzugeben. Die Schwierigkeiten bestehen vor allem darin, dass in der Formel (23) über tourspezifische Knotenmengen KN_k quantifiziert wird, die von Tour zu Tour variieren können und – wie schon zuvor erläutert wurde – zu Beginn des Versuchs, eine Lösung für das Standardmodell zu ermitteln, noch gar nicht feststehen. Gängige mathematische Modellierungssoftware, wie z.B. LINGO oder CPLEX, verfügt über keine Konstrukte, die es gestatten würden, eine Quantifizierung über derart *variablen* Bezugsmengen direkt zu implementieren.¹⁾

Drittens handelt es sich bei der Formel (23) weder um eine einzelne Restriktion noch um eine „überschaubare“ Gruppe von insgesamt K Restriktionen (je eine Restriktion für jede Tour T_k mit $k = 1, \dots, K$). Vielmehr handelt es sich um eine Restriktionsgruppe mit variablem und exponentiell anwachsendem Umfang. Die Restriktionsanzahl variiert in Abhängigkeit davon, wie viele Elemente die tourspezifische Knotenmenge KN_k für jede Tour T_k umfasst: Je mehr Knoten die Menge KN_k

1) Vgl. dazu die Erläuterungen in der nächsten Fußnote zur @FOR-Funktion der mathematischen Modellierungssoftware LINGO. Sie stellt zwar das funktionale Äquivalent zu einem prädikatenlogischen Allquantor über einer *festen* Bezugsmenge dar, ist aber nicht in der Lage, eine Quantifizierung über einer *variablen* Bezugsmenge zu implementieren.

umfasst, desto mehr Restriktionen werden durch die Allquantifizierung in der Formel (23) erzeugt:¹⁾ Denn der Allquantor über der Menge S in Formel (23) bedeutet, dass für jede echte Teilmenge S der tourspezifischen Knotenmenge KN_k mit $S \subset KN_k$ und $\#(S) \geq 2$ eine eigenständige Restriktion $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,k} \leq \#(S) - 1$ zu implementieren ist. Wenn die tourspezifische Knotenmenge KN_k insgesamt $\#(KN_k)$ Knoten umfasst,²⁾ so sind für die tourspezifische Knotenmenge KN_k insgesamt $f_S(\#(KN_k))$ unterschiedliche Teilmengen S definiert, welche die Anforderungen $S \subset KN_k$ und $\#(S) \geq 2$ erfüllen. Für diese Anzahl von Teilmengen S gilt:

$$f_S(\#(KN_k)) = \underbrace{2^{\#(KN_k)}}_{\text{Anzahl aller Teilmengen der Menge } KN_k} - \underbrace{2}_{\text{Ausschluss der Teilmenge } S=KN_k \text{ wegen } S \subset KN_k \text{ und Ausschluss der Teilmenge } S=\emptyset \text{ wegen } \#(S) \geq 2} - \underbrace{\#(KN_k)}_{\text{Ausschluss aller einelementigen Teilmengen } S=\{n\} \text{ mit } n \in KN_k \text{ wegen } \#(S) \geq 2} \quad (28)$$

Aus dem ersten Term auf der „rechten Seite“ der Formel (28) wird unmittelbar ersichtlich, dass die Anzahl der Restriktionen, die jeweils für eine Teilmenge S zu implementieren sind, in Abhängigkeit von der Knotenanzahl der tourspezifischen Knotenmenge KN_k exponentiell anwächst. Der konstante zweite und der lineare dritte Term reduzieren zwar die Knotenanzahl geringfügig, können aber das grundsätzlich exponentielle Anwachsen der Restriktionsanzahl nicht verhindern. Der variable und exponentiell anwachsende Umfang der Restriktionsgruppe, die sich hinter der kompakten Notation der Formel (23) verbirgt, lässt sich selbst mit anspruchsvoller mathematischer Modellierungssoftware nicht unmittelbar beherrschen.

Aus den vorgenannten Gründen lässt sich das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung in der Form, in der es mittels der voranstehenden Formeln (15) bis (25) spezifiziert wurde, mithilfe von mathematischer Modellierungssoftware nicht unmittelbar computergestützt implementieren.³⁾

-
- 1) Allquantoren stellen zwar ein formalsprachlich hilfreiches Ausdrucksmittel dar, um Formeln kompakt notieren zu können. Aber bei der Implementierung einer Formel mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware muss ein solcher Allquantor in eine Gruppe von jeweils quantorfreen, „normalen“ Formeln aufgelöst werden. Anspruchsvolle mathematische Modellierungssoftware bietet hierfür Spezialkonstrukte an. Beispielsweise erfüllen diesen Zweck in der Modellierungssoftware LINGO sogenannte Set-Konstrukte, insbesondere die „Set Looping Functions“. Am häufigsten wird die @FOR-Funktion verwendet, um Restriktionen für *alle* Elemente aus einer *fest* vorgegebenen Bezugsmenge zu generieren. Sie stellt daher das funktionale Äquivalent zu einem prädikatenlogischen Allquantor über einer festen Bezugsmenge dar. Darauf wird später im Kapitel 7 zurückgekommen.
 - 2) Streng genommen muss bei einer Implementierung der Formel (23) zusätzlich dafür Sorge getragen werden, dass in den Restriktionen für die Formel (23) nur Touren T_k mit tourspezifischen Knotenmengen KN_k berücksichtigt werden, für die $\#(KN_k) \geq 3$ gilt. Andernfalls wäre es gar nicht möglich, dass Teilmengen S mit $S \subset KN_k$ und $\#(S) \geq 2$ existieren. Die Voraussetzung $\#(KN_k) \geq 3$ führt zu einer zusätzlichen Komplikation bei einer Implementierung der Formel (23), auf die hier nur am Rande hingewiesen wird. Allerdings braucht die Voraussetzung $\#(KN_k) \geq 3$ nicht egsondert berücksichtigt zu werden,
 - 3) Nur am Rande sei erwähnt, dass der Versuch, formalsprachlich notierte Modelle mit der Hilfe von mathematischer Modellierungssoftware computergestützt zu modellieren, einen „heilsamen Zwang“ ausübt, die Operationalität, d.h. die unmittelbare praktische Anwendbarkeit, der Formelnotationen kritisch zu reflektieren. Es bereitet im Allgemeinen keine Schwierigkeiten, „elegante“ oder „kompakte“ Notationsweisen einzuführen, mit denen sich nahezu jeder Sachverhalt formalsprachlich ausdrücken lässt. Aber diese formalsprachliche Eleganz bzw. Kompaktheit verleitet des Öfteren dazu, Schwierigkeiten der Formelanwendung zu übersehen, die sich hinter den formalsprachlichen Konstrukten verbergen. Dies wurde hier anhand der Formel (23) exemplarisch demonstriert, insbesondere im Hinblick auf die Allquantifizierung mit einer variablen, exponentiell anwachsenden Bezugsmenge. Um solche Anwendungsschwierigkeiten aufzudecken, die sich hinter Formelnotationen verbergen können, erachten die Verfasser den Einsatz von *Computern*, insbesondere den Einsatz von mathematischer Modellierungssoftware, als ein bemerkenswertes *Erkenntnisinstrument* für modellanalytische Forschungsansätze im Bereich der Betriebswirtschaftslehre.

Im Wesentlichen liegt diese keineswegs triviale Einsicht an der überaus komplexen Struktur der Formel (23) für den Ausschluss von Subzyklen. Aber diese komplexe Formelstruktur stellt – metaphorisch gesprochen – nur die „Spitze eines Eisbergs“ dar. Zwar ist die Formel (23) „nur“ dafür erforderlich, um für alle Touren aus einer zulässigen Lösung des Standardmodells die Erfüllung der Prämisse der Subzyklenfreiheit sicherzustellen. Aber diese Prämisse ist „tief“ in der Struktur des Standardmodells verankert. Denn sie ergibt sich, wie schon oben erläutert wurde, aus der Prämisse obligatorischer Gütertransporte. Dieser letztgenannten Prämisse zufolge wird im Standardmodell davon ausgegangen, dass jedem Knoten n des Verkehrsnetzes eine Gütermenge m_n zugeordnet ist, die von einem Transportmittel k transportiert werden muss, zu dessen Tour T_k der Knoten n gehört. Nur dann, wenn an dieser Prämisse obligatorischer Gütertransporte – und somit auch an der Prämisse der Subzyklenfreiheit – festgehalten wird, lassen sich die Restriktionen aus den Formeln (18), (19), (21) und (22) aufrechterhalten. Daher sind die Formeln (18), (19), (21), (22) und (23) über das Zusammenwirken der Prämisse obligatorischer Gütertransporte und der Prämisse der Subzyklenfreiheit auf komplexe Weise miteinander verwoben.

Da das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung in der Form, in der es mittels der voranstehenden Formeln (15) bis (25) spezifiziert wurde, nicht computergestützt implementiert werden kann, ist es auch nicht möglich, Standard-Algorithmen des Operations Research zur Lösung des Standardmodells anzuwenden. Solche Standard-Algorithmen werden zwar von mathematischer Modellierungssoftware für alle Modelle angeboten, die sich mit den softwarespezifischen Ausdrucksmitteln implementieren lassen. Aber der Rückgriff auf solche Standard-Algorithmen scheidet hier aus, weil sich das Standardmodell in der Gestalt der o.a. Formeln (15) bis (25) einer direkten Implementierung mithilfe von mathematischer Modellierungssoftware entzieht.

Daher ist vor allem im Bereich des Operations Research schon seit mehreren Jahrzehnten eine Vielzahl von Algorithmen entwickelt worden, die speziell auf die Lösung von Tourenplanungsproblemen zugeschnitten sind. Sie sind im Allgemeinen nicht auf die Lösung des hier vorgestellten Standardmodells der konventionellen Tourenplanung beschränkt, werden aber hier nur in Bezug auf dieses Standardmodell (kurz) betrachtet. Die Algorithmen nutzen spezielles Wissen über die Problemstruktur, um die Suche nach zulässigen oder sogar optimalen Problemlösungen zu vereinfachen. Zu diesem Wissen über die Problemstruktur gehören vor allem „Kunstgriffe“, mit denen bei der Ausführung eines Algorithmus entweder von vornherein verhindert wird, dass unzulässige Subzyklen entstehen, oder aber notfalls bereits entstandene unzulässige Subzyklen nachträglich eliminiert werden.

6.2.2 Algorithmen zur Lösung des Standardmodells

6.2.2.1 Überblick

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, das im voranstehenden Kapitel vorgestellt und erläutert wurde, umfasst zwei Teilprobleme, die miteinander verwoben sind. Auf der einen Seite besteht das *Zuordnungsproblem*, die Gütermengen m_n , bezüglich derer eine Transportnachfrage im Knoten n des Verkehrsnetzes besteht, zu Touren T_k zuzuordnen, die jeweils mit einem Trans-

portmittel k durchgeführt werden.¹⁾ Auf der anderen Seite besteht für jede Tour T_k das *Reihenfolgeproblem*, in welcher Reihenfolge die Knoten n angefahren werden sollen, die mittels der modellendogenen Variablen $y_{n,k} = 1$ der Tour T_k zugeordnet sind. Das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem können entweder simultan oder aber sukzessiv gelöst werden. Dementsprechend lässt sich zwischen parallelen bzw. sequenziellen Algorithmen für die Lösung des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung unterscheiden.²⁾

Jede Lösung eines Tourenplanungsproblems sollte als ein *Tourenplan* dargestellt werden,³⁾ weil es sich um eine „natürlich“ anmutende Form der Repräsentation des Lösungswissens handelt. Ein Tourenplan weist alle Touren aus, die gemäß der Lösung eines Tourenplanungsproblems durchgeführt werden sollen. Für das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung handelt es sich um die Touren T_k , die mit den K Transportmitteln $k = 1, \dots, K$ durchgeführt werden können. Darüber hinaus ist im Tourenplan für jede einzelne Tour anzugeben, welche Knoten des Verkehrsnetzes zu dieser Tour gehören und in welcher Reihenfolge diese Knoten bei der Durchführung der Tour angefahren⁴⁾ werden.

Ein Tourenplan kann sowohl in analytischer als auch in grafischer Weise dargestellt werden.

Bei der *analytischen* Variante wird das Lösungswissen durch eine Gruppe von geordneten P -Tupeln $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ dargestellt. Jedes dieser P -Tupel ist ein P -stelliger Zeilenvektor (Tourvektor), an dessen Positionen $p = 1, \dots, P$ jeweils die Knoten $kn_{k,p}$ angeführt werden, die bei der Durchführung der Tour T_k angefahren werden. Die Anordnung der Knoten $kn_{k,p}$ im P -Tupel entspricht genau der Reihenfolge, in der die Knoten des Verkehrsnetzes bei der Tourdurchführung angefahren werden: Ein Knoten $kn_{k,p}$ mit einem kleineren Positionsindex p wird bei der Durchführung der Tour T_k früher angefahren als ein anderer Knoten $kn_{k,p'}$ mit einem größeren Positionsindex p' ($p' > p$).

Bei der *grafischen* Variante wird das zugrundeliegende Verkehrsnetz als eine Grafik dargestellt, die der Visualisierung eines mathematischen Graphen entspricht. Jedem P -Tupel für eine Tour T_k entspricht in dieser Grafik ein gerichteter und in sich geschlossener (zyklischer) Weg, auf dem die Knoten des Verkehrsnetzes genau in der Reihenfolge angefahren werden, wie es durch das P -Tupel $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ für eine Tour T_k vorgegeben ist.

Beispielsweise sei ein Tourenplan betrachtet, der in seiner analytischen Darstellungsvariante als Lösung für ein Tourenplanungsproblem folgende drei Touren T_k mit $k = 1, 2, 3$ ausweist:

-
- 1) Das Zuordnungsproblem *entfällt* nur für den Grenzfall, dass mit $K = 1$ nur genau ein Transportmittel zur Verfügung steht. Dies entspricht dem Travelling-Salesman-Problem, bei dem für nur *einen* Transportagenten (den Handelsreisenden als Pendant zum Transportmittel) *lediglich* die *Reihenfolge* festzulegen ist, in welcher der Transportagent die Knoten eines Verkehrsnetzes anfährt.
 - 2) Vgl. VAHRENKAMP (2007), S. 227.
 - 3) Dies gilt nicht nur für das hier betrachtete Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, sondern auch für andere Tourenplanungsmodelle. Dazu gehört auch das später entwickelte Nonstandardmodell, das auf die besonderen Bedürfnisse der Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS zugeschnitten ist.
 - 4) Streng genommen wird der Knoten des Depots, von dem aus eine Tour startet, am Tourbeginn nicht „angefahren“, sondern das Transportmittel, mit dem die Tour durchgeführt wird, fährt von diesem Depot-Knoten ab. Aber am Tourende kehrt das Transportmittel wieder zu diesem Depot-Knoten zurück und fährt ihn dann auch an. Von solchen sprachlichen Feinheiten wird hier abgesehen, weil es die Diktion erheblich vereinfacht, generell vom Anfahren eines Knotens während der Durchführung einer Tour zu sprechen.

$$T_1 = (1,3,10,14,6,1)$$

$$T_2 = (1,13,4,12,2,9,1)$$

$$T_3 = (1,7,5,8,11,1)$$

Die gleiche Lösung des Tourenplanungsproblems wird bei der grafischen Darstellungsvariante als ein Tourenplan ausgewiesen, der in der nachstehenden Abbildung 16 wiedergegeben ist.

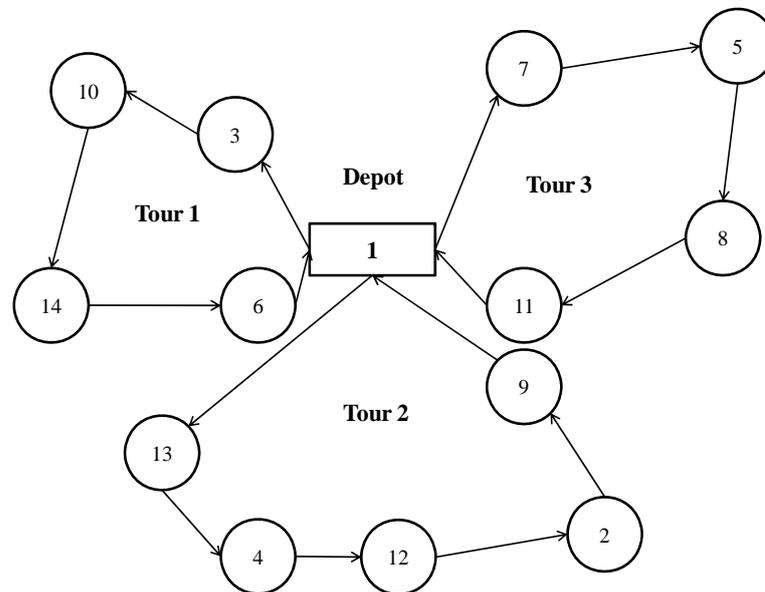


Abbildung 16: grafische Darstellung eines Tourenplans

Im Folgenden werden nur einige wenige Algorithmen vorgestellt, die sich zur Lösung des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung nutzen lassen und relativ große Bekanntheit erlangt haben. Darüber hinaus werden nur die Grundlagen dieser Algorithmen grob skizziert. Diese doppelte Einschränkung resultiert aus der Einsicht, dass sich das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung so, wie es im voranstehenden Kapitel 6.2.1 vorgestellt wurde, ohnehin nicht für das Realproblem der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Verbundprojekt MAEKAS eignet. Dies wird im späteren Kapitel 6.2.3 anhand mehrerer Unzulänglichkeiten des Standardmodells aufgezeigt. Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten wird im Kapitel 7 ein anderes Modell entwickelt. Dieses Nonstandardmodell ist auf die Besonderheiten des Realproblems für die Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS bei ihren Tourenplanungen miteinander kooperieren, zugeschnitten. Da sich die Struktur dieses Nonstandardmodells von der Struktur des bislang betrachteten Standardmodells der konventionellen Tourenplanung erheblich unterscheidet, können die Algorithmen, die sich zur Lösung des Standardmodells eignen, auf jenes Nonstandardmodell nicht mehr angewendet werden. Daher werden im Folgenden Algorithmen für das Standardmodell nur exemplarisch lediglich nur grob beschrieben.

6.2.2.2 Exakte Algorithmen

Exakte Algorithmen ermitteln für ein gegebenes Formalproblem oder Modell¹⁾ nachweislich die mathematisch exakte Problem- bzw. Modelllösung, nehmen dafür jedoch eine sehr hohe Rechenzeit in Anspruch.

Im Falle eines Optimierungsproblems²⁾ besteht die exakte Problemlösung aus der Menge *aller* optimalen Problemlösungen. Diese Menge wird zuweilen auch als „das“ Optimum des zugrundeliegenden Formalproblems bezeichnet. Die Menge aller optimalen Problemlösungen kann kein Element (Lösungsdefekt), genau ein Element (eindeutiges Optimum) oder auch mehrere Elemente (mehrdeutiges Optimum) umfassen. Zu einem Lösungsdefekt kommt es, wenn das zu lösende Formalproblem inkonsistent spezifiziert ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich die Restriktionen aus der Formalproblemspezifizierung zumindest teilweise gegenseitig ausschließen, sodass keine Lösung existieren kann, die alle Restriktionen zugleich erfüllt.

Ein wichtiges Qualitätskriterium für exakte Algorithmen besteht darin, ob ein Algorithmus im Falle eines mehrdeutigen Optimums in der Lage ist, die Menge aller optimalen Lösungen zu generieren. Zahlreiche exakte Algorithmen, vor allem in ihren computer-, d.h. softwaregestützt implementierten Varianten, enden schon nach der Ermittlung einer ersten optimalen Problemlösung. Sie können daher im Falle eines mehrdeutigen Optimums die Menge aller optimalen Lösungen nicht vollständig generieren.

Zur exakten Lösung von Tourenplanungsproblemen lässt sich insbesondere auf Algorithmen aus dem Bereich der Dynamischen Programmierung, auf Schnittebenen-Algorithmen sowie auf Branch-and-Bound-Algorithmen zurückgreifen.

Algorithmen der Dynamischen Programmierung sind in der Lage, mindestens eine optimale Lösung als einen kürzesten Weg in einem Graphen zu finden. Sie können in „natürlicher“ Weise auf die graphentheoretischen Grundlagen von Tourenplanungsproblemen, die vor allem in der Gestalt eines Verkehrsnetzes und der darin zu planenden Touren vorliegen, angewendet werden.

*Schnittebenen-Algorithmen*³⁾ zeichnen sich dadurch aus, dass bei einer nicht-ganzzahligen Problemlösung im abstrakten Lösungsraum eine Schnittebene berechnet wird, die diese nicht-ganzzahlige Problemlösung aus dem Bereich zulässiger Problemlösungen „abschneidet“, und die Schnittebene als neue Restriktion zu den bereits vorhandenen Restriktionen eines Modells hinzugefügt wird. Danach wird aufs Neue versucht, das entsprechend erweiterte Problem zu lösen. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis entweder eine ganzzahlige Problemlösung gefunden ist oder aber feststeht, dass es für das untersuchte Problem keine ganzzahlige Lösung gibt.⁴⁾

1) Da die Bezeichnungen „Formalproblem“ und „Modell“ Synonyme darstellen, können sie im Folgenden wahlfrei verwendet werden. Die Bezeichnung „Formalproblem“ wird im Kontext von anderen problembezogenen Begrifflichkeiten bevorzugt, während die Bezeichnung „Modell“ vor allem im Hinblick auf das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung verwendet wird.

2) Auch das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung stellt ein Optimierungsproblem dar, weil es gilt, einen Tourenplan aufzustellen, der die Tourlängensumme TLS minimiert.

3) Vgl. DEMPE/SCHREIER (2006), S. 197 ff.

4) Vgl. CORSTEN (2005), S. 128 ff.

Die Ganzzahligkeit von Problemlösungen spielt für das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung eine herausragende Rolle, weil sowohl die Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ als auch die modellendogenen Variablen $y_{i,k}$ nur ganzzahlige – präziser: nur binäre – Werte „0“ oder „1“ annehmen dürfen. Hinzu kommt speziell für das vorliegende Realproblem, Touren von Güterzügen zu planen, die Restriktion, dass an einen Güterzug nur eine „ganze“ Anzahl von Güterwagen angekoppelt werden kann. Wenn z.B. eine Problemlösung darin besteht, Leerfahrten einzelner Güterwagen durch eine Reduzierung der Güterwagenanzahl eines Güterzugs einzusparen, so kommt als zulässige Problemlösung beispielsweise die Einsparung von 3 „ganzen“ Güterwagen in Betracht, während die Einsparung von beispielsweise 3,46 Güterwagen keine zulässige Problemlösung darstellen würde.

Branch-and-Bound-Algorithmen gehören zu den gebräuchlichsten Verfahren für die Lösung von ganzzahligen und gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblemen. Sie werden vor allem zur Lösung von Problemen eingesetzt, für die keine schnellen, polynomial beschränkten Algorithmen bekannt sind. Dazu gehören z.B. auch die hier bereits angeführten Travelling-Salesman-Probleme¹⁾ und Vehicle-Routing-Probleme. Branch-and-Bound-Algorithmen lassen sich auch mit Schnittebenen-Algorithmen kombinieren²⁾, die kurz zuvor angesprochen wurden.

Branch-and-Bound-Algorithmen basieren auf zwei charakteristischen Operationen. Einerseits wird das jeweils zu lösende Problem in zwei oder mehr Teilprobleme zerlegt („Branching“).³⁾ Andererseits wird festgestellt, ob bestimmte Teilprobleme weiter zerlegt werden müssen oder ob sie nicht weiter untersucht zu werden brauchen, weil sich durch die Analyse dieser Teilprobleme mit Sicherheit nicht eine der gesuchten optimalen Problemlösungen finden lässt. Wenn erkannt wird, dass ein Teilprobleme nicht weiter zerlegt werden muss, wird die Suche im abstrakten Lösungsraum an dieser Stelle eingestellt, also auf noch Erfolg versprechende Teile des Lösungsraums eingeschränkt („Bounding“). Dabei wird für jedes neue Teilproblem – je nach Optimierungsrichtung – eine untere oder obere Schranke für den Zielfunktionswert der zulässigen Lösungen für das jeweils betrachtete Teilproblem berechnet und als zusätzliche Restriktion hinzugefügt. Diese Prozedur wird beendet, wenn es keine Teilprobleme mehr gibt, die weiter zerlegt werden können. Die dann gefundenen zulässigen Lösungen erweisen sich als optimale Problemlösungen.

6.2.2.3 Heuristische Algorithmen

Heuristische Algorithmen – oder kurz: Heuristiken – bieten im Vergleich zu exakten Algorithmen keine Garantie, dass eine optimale Lösung eines Problems gefunden wird.⁴⁾ Vielmehr wird die optimale Problemlösung in der Regel mehr oder weniger stark verfehlt. Daher werden heuristische Algorithmen oftmals als „suboptimal“ bezeichnet. Sie treffen das gesuchte Optimum allenfalls zufällig. Im Allgemeinen kann mit der Hilfe eines heuristischen Algorithmus noch nicht einmal er-

1) Vgl. VAHRENKAMP/MATTFELD (2007), S. 248; VAHRENKAMP (2003), S. 29.

2) Vgl. WENDT (1995), S. 15.

3) Vgl. DOMSCHKE/DREXL (2005), S. 137.

4) Im Folgenden wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass nur eine optimale Problemlösung existiert. Die Ausführungen lassen sich aber ohne Schwierigkeiten auf den Fall eines mehrdeutigen Optimums mit mehreren optimalen Problemlösungen übertragen.

kannt werden, ob dieser Zufall eingetreten ist. Der wesentliche Vorzug heuristischer Algorithmen liegt aber darin, oftmals zu „akzeptablen“ Lösungen zu gelangen und hierfür wesentlich weniger Rechenzeit zu benötigen, als für exakte Algorithmen erforderlich wäre.

Heuristische Algorithmen lassen sich grob in klassische und neuere Heuristiken, auch Metaheuristiken genannt, unterteilen. Die klassischen Heuristiken finden ihren Ursprung zwischen den Jahren 1960 und 1990. Weiterentwicklungen der klassischen Heuristiken stellen die neueren Metaheuristiken dar. Dazu gehören beispielsweise Simulated Annealing¹⁾ und Tabu Search²⁾. Die Qualität der Lösungen, die sich mit Metaheuristiken gewinnen lassen, ist im Vergleich zu den klassischen Heuristiken in der Regel wesentlich höher. Allerdings wird dies im Allgemeinen mit einem entsprechenden Anstieg der erforderlichen Rechenzeit erkauf³⁾.

Klassische Heuristiken lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen. Zum einen gibt es *Eröffnungsverfahren*. Sie suchen schrittweise nach einer ersten zulässigen, jedoch nicht notwendig optimalen Problemlösung. Zum anderen werden *Verbesserungsverfahren* eingesetzt. Sie setzen voraus, dass bereits eine zulässige Problemlösung bekannt ist, und versuchen, die Qualität dieser Ausgangslösung schrittweise zu verbessern. Oftmals werden Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren miteinander kombiniert, indem zunächst ein Eröffnungsverfahren eingesetzt wird, um eine erste zulässige Problemlösung zu erzeugen, die alsdann mithilfe eines Verbesserungsverfahrens zu verbessern versucht wird.

Eines der bekanntesten Eröffnungsverfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen geht auf CLARKE und WRIGHT zurück: Es handelt sich um den sogenannten *Savings-Algorithmus*. Er wird den einstufigen parallelen Algorithmen zugeordnet, weil er das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem der Tourenplanung nicht getrennt voneinander, sondern simultan löst⁴⁾. Bei diesem Algorithmus werden zunächst mehrere Touren gebildet, von denen jede eine bestimmte Menge an Kunden – gemeint sind eigentlich die Knoten eines Verkehrsnetzes, in denen Kunden jeweils ihre Nachfragen für zu transportierende Gütermengen artikulieren, – bedient. Von diesen Touren werden anschließend jeweils zwei Touren zusammengefasst und es wird der zugehörige Savings-Wert berechnet. Dieser Wert spiegelt wider, welche Kosteneinsparungen durch das Zusammenlegen von zwei Touren ermöglicht werden unter der Voraussetzung, dass keine Restriktion, wie z.B. die maximalen Ladungskapazitäten der eingesetzten Transportmittel, verletzt wird. Der Algorithmus wird beendet, wenn sich keine der bis dahin erzeugten Touren weiter in Kosten einsparender Weise zusammenfassen lassen.⁵⁾

Die Route-First-Cluster-Second-Algorithmen (RFCS) und die Cluster-First-Route-Second-Algorithmen (CFRS) stellen Eröffnungsverfahren dar, die zu den sequenziellen Algorithmen für die Lösung von Tourenplanungsproblemen gehören. Der Unterschied zwischen den beiden Algorithmen liegt in der Reihenfolge, in der das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem bei der Tourenplanung bearbeitet werden. Für knotenorientierte Tourenplanungsprobleme, die im Vordergrund des hier vorge-

1) Vgl. GENDREAU/LAPORTE/POTVIN (2002), S. 129 ff.

2) Vgl. GENDREAU/LAPORTE/POTVIN (2002), S. 134 ff.

3) Vgl. LAPORTE/SEMET (2002), S. 109.

4) Vgl. RIECK (2008), S. 82.

5) Vgl. WENDT (1995), S. 29.

legten Projektberichts stehen, werden vorrangig CFRS-Algorithmen vorgeschlagen, während für kantenorientierte Tourenplanungsprobleme eher RFCS-Algorithmen empfohlen werden.¹⁾

Beim *Sweep-Algorithmus* handelt es sich um ein zweistufiges Eröffnungsverfahren aus der Klasse der Cluster-First-Route-Second-Algorithmen. Der Sweep-Algorithmus wurde im Jahr 1974 von GILLET und MILLER entwickelt. Es handelt sich um einen koordinatenorientierten Algorithmus, bei dem die Kunden – gemeint sind wiederum die Knoten eines Verkehrsnetzes, in denen Kunden jeweils ihre Nachfragen für zu transportierende Gütermengen artikulieren, – nach aufsteigenden Polarwinkeln entgegen dem Uhrzeigersinn geordnet und von 1 bis N durchnummeriert werden. Es wird davon ausgegangen, dass das Depot im Ursprung des Koordinatensystems liegt. Im besten Fall ist das Depot so platziert, dass es zentral liegt und deshalb mit einer Tour so viele Kunden wie möglich bedient werden können. Für die Bedienung der Kunden muss der erste Kunde als Pendeltour eingefügt werden und die noch anzufahrenden Kunden müssen schrittweise in diese Tour integriert werden. Die Integration erfolgt so lange, bis mindestens eine Restriktion des zugrunde liegenden Problems verletzt ist. In diesem Falle wird mit dem nicht zugeordneten Kunden eine neue Pendeltour gebildet und das Verfahren beginnt von vorne.²⁾ Die beiden nachfolgenden Abbildungen 17 und 18 verdeutlichen die zuvor skizzierte Vorgehensweise beim Sweep-Algorithmus.

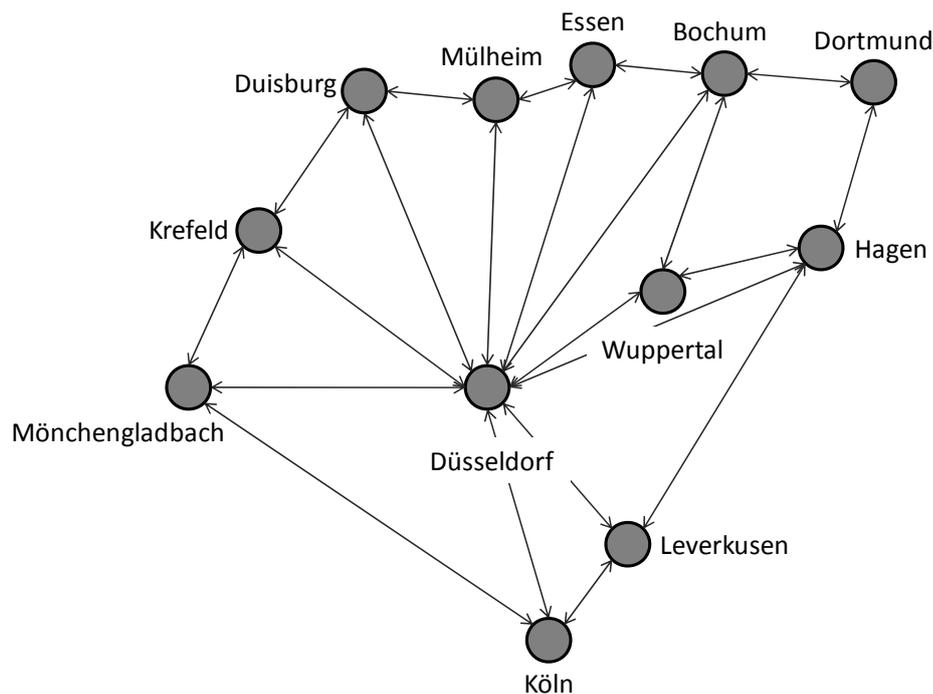


Abbildung 17: Verkehrsnetz³⁾

1) Vgl. GIETZ (1994), S. 26.

2) Vgl. RIECK (2008), S. 85 f.

3) Quelle: VAHRENKAMP (2005), S. 456 f.

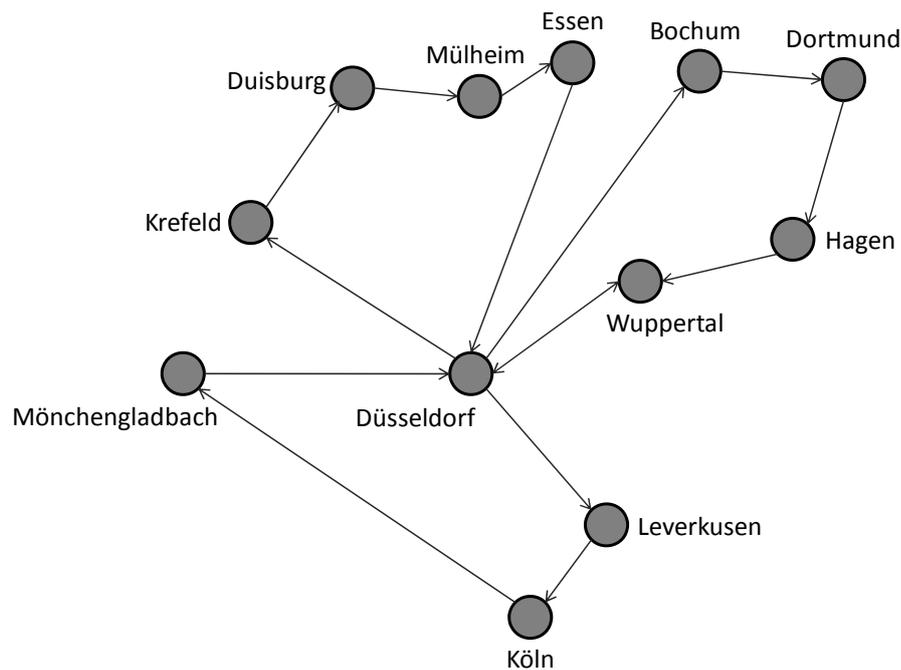


Abbildung 18: optimaler Tourenplan gemäß dem Sweep-Algorithmus¹⁾

Zur Gruppe der Verbesserungsverfahren gehören die Intertour- und die Intratour-Algorithmen.

Zu den *Intratour-Algorithmen* gehören vor allem die weit verbreiteten *k-opt-Algorithmen*. Bei diesen Algorithmen wird versucht, Touren durch den Austausch von jeweils k Kanten innerhalb derselben Tour zu verbessern, indem sie beispielsweise verkürzt werden.²⁾ Eine Tour, die sich durch keinen möglichen Austausch von k Kanten mehr verbessern lässt, bezeichnet man als *k-optimale Tour*. Praktische Relevanz für die Verbesserung von Touren besitzen nur die *2-opt-* und die *3-opt-Algorithmen*, weil für $k > 3$ die Nachbarschaften bereits erzeugter Problemlösungen schon bei mittleren Problemgrößen nur noch mit extrem hohem Zeitaufwand durchsucht werden können.

Bei *Intertour-Algorithmen* werden verschiedene Touren gleichzeitig berücksichtigt. Dies ermöglicht es, Kunden aus unterschiedlichen Touren untereinander auszutauschen. Darüber hinaus dienen die Algorithmen aber auch dazu, innerhalb einer jeden Tour die Reihenfolge zu verbessern, in der die Kunden derselben Tour angefahren werden.

1) Quelle: VAHRENKAMP (2005), S. 456 f.

2) Vgl. VAHRENKAMP (2007), S. 264.

6.2.3 Realproblembezogene Unzulänglichkeiten des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung erweist sich keineswegs als trivial. Vielmehr umfasst es einige Besonderheiten. Dazu gehören mehrere „trickreiche“ Restriktionen, insbesondere zur Gewährleistung von zyklischen Touren, die zum Depot zurückkehren, und zum Ausschluss unzulässiger Subzyklen. Hinzu kommen ganzzahlige Entscheidungsvariablen, die an Algorithmen zur Lösung des Standardmodells erhebliche Anforderungen stellen, sowie modellendogene Variablen, deren Werte durch ein komplexes Zusammenwirken von Entscheidungsvariablen und Restriktionen determiniert sind. Daher kann das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung als ein Modell „mittlerer“ Komplexität eingestuft werden.

Allerdings reicht diese mittlere Modellkomplexität bei Weitem noch nicht aus, um das hier betrachtete Realproblem, schienengebundene Gütertransporte innerhalb einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu koordinieren, „angemessen“ oder „adäquat“¹⁾ zu repräsentieren. Im Folgenden werden die *Gründe* für diese *mangelnde Realitätsadäquanz* anhand einer Reihe von *Unzulänglichkeiten* des *Standardmodells* verdeutlicht. Sie werden in synonyme Weise auch als *Modelldefekte* – oder kurz als Defekte oder Mängel – bezeichnet. Im anschließenden siebten Kapitel wird ein Modell wesentlich höherer Komplexität entwickelt, das speziell auf das Realproblem der Eisenbahnverkehrsunternehmen zugeschnitten ist, um die nachstehend angeführten Unzulänglichkeiten des Standardmodells zu vermeiden.²⁾

-
- 1) Die Adverbien „angemessen“ und „adäquat“, die hier in synonyme Weise verwendet werden, sowie auch die jeweils zugehörigen Adjektive, Substantive und Komposita (wie z.B. „realitätsadäquat“) werden in distanzierende Anführungszeichen eingeschlossen, wenn jeweils angedeutet werden soll, dass sich hinter diesen Begriffen komplexe modelltheoretische Probleme verbergen, die keineswegs ignoriert, aber im aktuellen Argumentationskontext nicht vertieft werden. Diese Probleme beziehen sich vor allem darauf, dass Kriterien angeführt werden müssten, die es gestatten, die Angemessenheit oder (Realitäts-) Adäquanz eines Modells in Bezug auf die Wahrnehmung oder Konzeptualisierung eines Realproblems zu beurteilen. Darüber hinaus müsste die Erfüllung dieser Kriterien für das jeweils betrachtete Modell beurteilt werden, um zu entsprechenden Angemessenheits- bzw. Adäquanzurteilen zu gelangen. Schließlich ließe sich die epistemische Relation zwischen dem Realproblem „an sich“ (mit allen Vorbehalten, ob sich über einen solchen Realitätsausschnitt ohne Präsupposition einer naiv-realistischen Erkenntnisposition überhaupt sinnvoll sprechen lässt) und seiner Wahrnehmung oder Konzeptualisierung durch ein erkennendes Subjekt problematisieren. Auf Probleme der vorgenannten Art wird im vorliegenden Projektbericht jedoch nicht näher eingegangen. Allerdings schwingen sie jeweils als assoziierter Kontext mit, wenn in vorsichtig distanzierter Weise von der „angemessenen“ oder „adäquaten“ Repräsentation eines Realproblems die Rede ist.
 - 2) In diesem Projektbericht wird nur eine erste Entwicklungsstufe des Modells vorgestellt. Sie reicht bei Weitem noch nicht aus, um alle für relevant erachteten Aspekte des Realproblems der Eisenbahnverkehrsunternehmen im Verbundprojekt MAEKAS in „angemessener“ Weise zu berücksichtigen. Aber das Modell wird von vornherein so konstruiert, dass seine Grundstruktur geeignet ist, die nachfolgend aufgezeigten Unzulänglichkeiten des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung zu vermeiden. In späteren Publikationen werden Weiterentwicklungen des hier präsentierten Modells zur Diskussion gestellt werden, die zusätzliche Aspekte des Realproblems einbeziehen.

a) Explizierungsdefekt für Touren:

Eine wesentliche und zugleich „natürliche“¹⁾ Komponente von Tourenplanungsproblemen sind *Touren*. Dies geht bereits aus der Bezeichnung des Problemtyps unmittelbar hervor. Auch anhand einer oberflächlichen Problembeschreibung lässt sich erkennen, dass es bei der Tourenplanung im Wesentlichen um die Aufgabe geht, die Touren zu planen, auf denen die Transportmittel eines Verkehrsunternehmens die Knoten eines Verkehrsnetzes anfahren, in denen die Transportmittel die zu transportierenden Güter be- oder entladen. Schließlich knüpft auch die Darstellung von Lösungen für Tourenplanungsprobleme unmittelbar an Touren an.²⁾ Denn jede zulässige Problemlösung ist als

-
- 1) Zumindest aus der Perspektive einer aufgeklärt-konstruktivistischen Erkenntnisposition erweist es sich als problematisch, von einer „natürlichen“ Problemkomponente zu sprechen (daher werden distanzierende Anführungszeichen verwendet). Denn bereits die Wahrnehmung oder Konzeptualisierung eines Realproblems durch ein Subjekt, das ein Modell konstruiert, analysiert oder evaluiert, unterliegt den subjektiven Einflüssen des menschlichen Erkenntnisvermögens, sodass nicht in naiver Weise davon ausgegangen werden sollte, etwas „Natürliches“, etwas in einer angeblich subjektunabhängigen „Natur“ des Realproblems Vorgegebenes als Problemkomponente aufspüren zu können. Wenn hier dennoch von einer „natürlichen“ Problemkomponente die Rede ist, so soll damit lediglich verdeutlicht werden, dass es sich um eine Problemkomponente handelt, die nach allgemeiner Erfahrung von den *meisten* Personen („Subjekten“) geteilt wird, die sich in *unvoreingenommener* Weise mit Realproblemen aus dem Bereich der Tourenplanung befassen.

Mit „unvoreingenommener Weise“ ist dabei gemeint, dass die Personen noch kein festes Schema für die „richtige“ Modellierung von Tourenplanungsproblemen verinnerlicht haben, sondern sich diesen Problemen in „naiver“ – d.h. hier in positivem Verständnis: in noch nicht vorab festgelegter – Einstellung anzunähern versuchen. Damit soll vor allem ausgeschlossen werden, dass die Personen von der „Weltsicht“ eines bestimmten Modelltyps ausgehen und ihre Wahrnehmung des Realproblems von vornherein dieser modelltechnisch geprägten Realitätswahrnehmung unterwerfen. Diese Gefahr besteht vor allem bei manchen Fachexperten aus dem Bereich des Operations Research (OR), *sofern* sie sich durch jahrelangen Umgang mit Modellen und darauf zugeschnittenen Algorithmen daran gewöhnt haben, Realität durch die „Brille“ vertrauter Modellstrukturen wahrzunehmen und reale Probleme von vornherein so zu rekonstruieren, dass sie sich im Rahmen einer „bewährten“ Modellstruktur mit leistungsfähigen Algorithmen lösen lassen. Abgesehen davon, dass keineswegs die Realprobleme, sondern nur die daraus rekonstruierten Formalprobleme gelöst werden, leidet dieser „Expertenmodus der Realitätswahrnehmung“ unter der Tendenz, sich nicht primär um die Konstruktion realitätsadäquater Modelle zu bemühen, sondern um die Wiederverwendung vertrauter Modelltypen und Algorithmen. Mitunter wird diese Einstellung, die sich bei manchen – aber keineswegs allen! – Fachexperten beobachten lässt, als „Strategie von Handwerkern“ beschrieben, die ihre wohlvertrauten Erkenntniswerkzeuge (Modelltypen und Algorithmen) möglichst oft und „erfolgreich“ anzuwenden trachten, oder – in provokant-überspitzter Diktion – als „PROKRUSTES-Bett-Modellierung“ bezeichnet. Etlichen Lesern dürfte auch die ironische Charakterisierung von OR-Experten durch Phrasen wie „Habe Modell, suche dazu passendes Problem“ oder „Kenne Algorithmus, suche dazu passendes Problem“ geläufig sein.

Von diesem „Expertenmodus der Realitätswahrnehmung“ möchte sich der hier vorgelegte Projektbericht klar abgrenzen. Stattdessen geht es den Verfassern darum, zunächst das Realproblem der Eisenbahnverkehrsunternehmen auf möglichst unvoreingenommene Weise wahrzunehmen (zu „verstehen“) und dabei im oben erläuterten Sinne „natürliche“ Komponenten zu identifizieren, die in einer realitätsadäquaten Modellierung des Realproblems in möglichst unverzerrter Weise repräsentiert sein sollten. Daher wird in der Phase der Wahrnehmung und der unmittelbar anschließenden natürlichsprachlichen Konzeptualisierung des Realproblems weder an einen bestimmten Modelltyp oder noch an bestimmte Algorithmen zur Ermittlung von Modelllösungen gedacht. Folglich besteht durchaus die „Gefahr“, dass ein Modell (Formalproblem) als Rekonstruktion des Realproblems resultiert, das nicht mit dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung übereinstimmt, sich „widrigenfalls“ noch nicht einmal mit einem der „bewährten“ Modelltypen des Operations Research zur Deckung bringen lässt. Dies wird von den Verfassern aber keineswegs als ein vermeidenswerter Nachteil betrachtet, sondern vielmehr als „epistemischer Preis“ akzeptiert, der für das Ringen um eine möglichst realitätsadäquate Modellierung zu entrichten ist. Nur dann, wenn sich später herausstellen sollte, dass sich das resultierende Modell mit verfügbaren Algorithmen und trotz computergestützter Implementierung nicht mit als „akzeptabel“ empfundenem Ressourceneinsatz (gemeint sind vor allem Rechenzeit, Prozessoransprüche und Speicherbedarf) lösen lässt, kann in Betracht gezogen werden, das Modell so weit zu modifizieren (insbesondere zu vereinfachen), dass es sich unter den realiter obwaltenden Ressourcenbeschränkungen als lösbar erweist.

- 2) Vgl. Kapitel 6.2.2.1.

ein Tourenplan darzustellen. In ihm werden die Touren, die für die Transportmittel eines Verkehrsunternehmens geplant wurden, explizit ausgewiesen: entweder in analytischer Weise durch einen Zeilenvektor (P-Tupel) je Tour oder durch eine Grafik, in der jede Tour durch einen gerichteten und in sich geschlossenen Weg in einem Verkehrsnetz wiedergegeben wird.

Angesichts dieser vielfachen Evidenz für die herausragende Rolle, die Touren in einer „natürlichen“, möglichst realitätsadäquaten Modellierung von realen Tourenplanungsproblemen spielen sollten, überrascht es, dass im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung Touren nur ein *Schattendasein* fristen. Streng genommen gibt es in diesem Standardmodell überhaupt keine Touren. Weder eine Entscheidungsvariable oder endogene Variable noch ein Parameter noch ein Index für die Variablen bzw. Parameter bezieht sich *explizit* auf die Touren eines Verkehrsunternehmens. Es ist erstaunlich, wie weit das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung vom zugrunde liegenden Realproblem der Tourenplanung entfernt ist: Von Touren als „natürlicher“ Problemkomponente wird – zumindest *prima facie* – vollkommen abstrahiert (!).

Erst bei näherem Hinsehen zeigt sich, dass Touren auch im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung „irgendwie“ Berücksichtigung finden. Dazu dienen einerseits die Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ und andererseits der Index k für die Transportmittel. Der Index k steht zwar explizit für ein Transportmittel. Aber mithilfe der zusätzlichen Prämisse, dass jedes Transportmittel im Planungszeitraum höchstens eine Tour durchführt (*Transportmittel-Touren-Prämisse*), werden durch die Indizes k auf *implizite* Weise *auch* Touren repräsentiert. Allerdings trifft dies nur dann zu, wenn ein Transportmittel k das Depot verlässt, also für mindestens eine Entscheidungsvariable $x_{i,j,k} = 1$ gilt. Andernfalls liegt ein Transportmittel k vor, das während des Planungszeitraums im Depot verbleibt und daher keine Tour durchführt. Wenn ein Transportmittel k eine Tour (mit demselben Index k) durchführt, so lässt sich aus den Werten aller Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ eine Modelllösung ableiten, welche Knoten i und j des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes vom Transportmittel k auf seiner Tour angefahren werden ($x_{i,j,k} = 1$)¹⁾ und in welcher Reihenfolge diese Knoten angefahren werden²⁾.

Diese lediglich *implizite* Repräsentation von Touren im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung erweist sich in mehrfacher Hinsicht als unzulänglich.

Erstens handelt es sich aus „modellästhetischer“ Perspektive um eine „unsaubere“, intransparente Modellierung. Ein elementares Prinzip für „saubere“ Modellierung besagt, dass unterschiedliche Komponenten eines Realproblems, die vom Modellierer („Modelldesigner“) als wesentliche Problemkomponenten eingeschätzt werden, in einem Modell des Realproblems auch durch verschiedenartige Modellkomponenten repräsentiert sein sollten. Dieses Verbot der „Mischrepräsentation“ von unterschiedlichen Problemkomponenten in derselben Modellkomponente trägt wesentlich zur Transparenz eines formalsprachlichen Modells bei. Bei Transportmitteln und Touren handelt es sich zweifellos um wesentliche Komponenten von realen Tourenplanungsproblemen. Folglich ist es „unsauber“, im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung mit derselben Modellkomponente – dem Index k – so unterschiedliche Aspekte des Realproblems wie Transportmittel und Touren zu repräsentieren.

1) Daneben gelten auch $y_{i,k} = 1$ und $y_{j,k} = 1$ für die modellendogenen Variablen.

2) Wenn $x_{i,j,k} = 1$ gilt, dann fährt das Transportmittel k auf seiner Tour den Knoten j unmittelbar nach dem Knoten i an.

Hinzu kommt zweitens, dass die Repräsentation von Touren mithilfe des Index k nur unvollständig erfolgt. Denn nicht jeder Index k repräsentiert – neben dem unmittelbar gemeinten Transportmittel – eine Tour, sondern nur der Index k eines Transportmittels, das eine Tour durchführt und dabei sein Depot verlässt, repräsentiert eine Tour. Dieser Sachverhalt kann aber dem Index k nicht unmittelbar angesehen werden, sondern muss erst aus der Interpretation einer Modelllösung durch Betrachtung der Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ erschlossen werden.¹⁾ Dadurch wird die Transparenz der Modellierung nochmals beeinträchtigt.

Drittens erweist es sich – abermals aus „modellästhetischer“ Perspektive – als unbefriedigend, dass die „modelltechnische Rolle“ des Index k , „nebenbei“ auch eine Tour zu repräsentieren, die von einem Transportmittel durchgeführt wird (sofern es das Depot verlässt), aus dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung nicht unmittelbar ersichtlich ist. Vielmehr muss ein „sachkundiger“ Anwender des Standardmodells die o.a. Transportmittel-Touren-Prämisse kennen, um zu wissen, dass der Index k unter den o.a. Einschränkungen auf *implizite* Weise auch Touren repräsentiert. Aufgrund des weiteren „modellästhetischen“ Postulats, dass *wesentliche* Sachverhalte in einem Modell *explizit* verankert sein sollten, erweist sich das Standardmodell wiederum als unzulänglich. Es kann schon als Zumutung an potenzielle betriebliche Anwender des Standardmodells empfunden werden, sich mit solchen Modellprämissen auskennen zu müssen, um die implizite „Zusatzbedeutung“ eines Index zu verstehen.

Viertens führt die Vermengung von Transportmitteln und Touren im Index k auch zu einer *Modifizierungsfeindlichkeit* des Standardmodells. Diese Modifizierungsfeindlichkeit wird relevant, wenn entweder ein Transportmittel im Planungszeitraum mehrere Touren durchzuführen vermag (und dadurch die Transportmittel-Touren-Prämisse verletzt wird) oder wenn zur Durchführung einer Tour mehrere Transportmittel eingesetzt werden können. In beiden vorgenannten Fällen müsste die implizite Zuordnung von höchstens einer Tour zu jedem Transportmittel aufgegeben und ein Modell für die Tourenplanung mit entsprechendem Aufwand umstrukturiert werden. Solche Schwierigkeiten späterer Strukturmodifizierungen lassen sich vermeiden, wenn von vornherein eine Modellstruktur entworfen wird, in der *separate* formalsprachliche *Konstrukte* für Transportmittel einerseits und für Touren andererseits verwendet werden. Dies wird auf jeden Fall dann erreicht, wenn *Touren* in einem neuartigen Modell von vornherein durch ein *eigenständiges* Konstrukt – wie z.B. durch einen separaten Tourvektor – *explizit* repräsentiert werden.²⁾

Schließlich – und fünftens – ist es aufgrund der fehlenden expliziten Modellierung von Touren streng genommen nicht möglich, die *absolute* Position innerhalb einer Tour anzugeben, an der ein Knoten des Verkehrsnetzes angefahren wird. Zwar ist es möglich, aus den Werten aller Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ für eine Modelllösung abzuleiten, in welcher Reihenfolge die tourzugehörigen Knoten angefahren werden. Aber durch diese Reihenfolge sind nur die *relativen* Tourpositionen der betroffenen Standorte festgelegt. Aufgrund des zyklischen Charakters kann eine Tour im Prinzip in jedem beliebigen der tourzugehörigen Knoten beginnen und auch enden. Aus dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung alleine ist es nicht ersichtlich, in welchem Knoten eine Tour

-
- 1) Ein Index k repräsentiert genau dann *keine* Tour, wenn für alle Entscheidungsvariablen $x_{i,j,k}$ mit dem Index k $x_{i,j,k} = 0$ gilt. In diesem Fall fährt das Transportmittel k keinen Knoten des Verkehrsnetzes an, sondern verbleibt im Depot des Knotens $n = 1$.
 - 2) Dieses Desiderat wird durch das später vorgestellte Nonstandardmodell für die Tourenplanung der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS miteinander kooperieren, eingelöst; vgl. Kapitel 7.3.1.

beginnt (und endet). Folglich sind auch die absoluten Tourpositionen der angefahrenen Knoten unbekannt. Erst durch die zusätzliche, im Standardmodell aber nirgendwo explizit verankerte Prämisse, dass alle Touren im Depot-Knoten mit $n = 1$ sowohl beginnen als auch enden (Depotprämisse), lassen sich die absoluten Tourpositionen der angefahrenen Knoten ableiten. Dies erweist sich insbesondere dann als problematisch, wenn diese Zusatzprämisse nicht „sauber“ dokumentiert wurde. Dann kann es in der betrieblichen Praxis dazu kommen, dass Anwender des Standardmodells bei ihrer Tourenplanung das Depot ihres Unternehmens in einem anderen als dem einen ausgezeichneten Knoten $n = 1$ lokalisieren.

Der Aufwand für die Ableitung absoluter Tourpositionen und die Fehleranfälligkeit der Depotprämisse lassen sich vermeiden, wenn Touren in einem Modell für Tourenplanungsprobleme durch ein „hinreichend“ ausdruckskräftiges Konstrukt repräsentiert werden. Dazu ist es erforderlich, auf Touren nicht nur durch „irgendein“ explizites formalsprachliches Konstrukt – wie z.B. einen separaten Tourindex – hinzuweisen, sondern für die Repräsentation von Touren ein Konstrukt vorzusehen, das es gestattet, unmittelbar die absoluten Positionen anzugeben, die von angefahrenen Knoten eines Verkehrsnetzes innerhalb einer Tour eingenommen werden. Als „natürlicher“ Kandidat für ein solches Konstrukt bietet sich das P-Tupel $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ an, das bereits im Kapitel 6.2.2.1 für die analytische Darstellung von Modelllösungen für Tourenplanungsprobleme vorgestellt wurde. Dieser P-stellige Zeilenvektor – oder kurz: Tourvektor – lässt unmittelbar und explizit erkennen, an welchen absoluten Positionen $p = 1, \dots, P$ einer Tour T_k die Knoten eines Verkehrsnetzes angefahren werden.¹⁾

Aus den vorgenannten Gründen stellt es ein zentrales Desiderat für eine „natürliche“ und „saubere“ Modellierung von Tourenplanungsproblemen dar, Touren mittels eines eigenständigen Konstrukts explizit zu repräsentieren, das ausdruckskräftig genug ist, die absoluten Positionen von Knoten eines Verkehrsnetzes innerhalb einer Tour explizit anzuzeigen. Dieses Desiderat lässt sich dadurch erfüllen, dass das zuvor angesprochene P-Tupel $T_k = (kn_{k,1}, \dots, kn_{k,p}, \dots, kn_{k,P})$ in einem neu zu entwickelnden Modell für Tourenplanungsprobleme zur expliziten Tourrepräsentation verwendet wird.

b) Defekt der Subzyklenfreiheit:

Dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung liegt die Prämisse der Subzyklenfreiheit zugrunde. Sie spielt für das Standardmodell eine zentrale Rolle. Es wurde bereits an früherer Stelle erläutert, dass das Standardmodell ohne die Erfüllung dieser Prämisse in wesentlichen Aspekten nicht aufrechterhalten werden könnte. Dies betrifft vor allem die Prämisse obligatorischer Gütertransporte, die sich im Falle der Zulässigkeit von Subzyklen nicht mehr erfüllen ließe. Würde die Prämisse obligatorischer Gütertransporte nicht mehr zutreffen, würden essenzielle Modellbestandteile wie die Formeln (18), (19), (21) und (22) des Standardmodells obsolet.²⁾ Auch in anderen Modellen für Tourenplanungsprobleme, die in der einschlägigen Fachliteratur als „etabliert“ gelten, wird die Prämisse der Subzyklenfreiheit oftmals vorausgesetzt. Sie scheint daher eine „Selbstverständlichkeit“ darzustellen.

1) Um die oben kritisierte Vermengung von Transportmitteln und Touren im selben Index k zu verhindern sind die P-Tupel für die Repräsentation von Touren später zu „reindizieren“, d.h. mit einem anderen, tourspezifischen Index zu versehen. Dies geschah bereits im Kapitel 6.2.1.1 mittels des tourspezifischen Index „q“ für Touren T_q .

2) Vgl. Kapitel 6.2.1.2.3.

Bei einem unvoreingenommenen¹⁾ Blick auf „das“ Realproblem der Tourenplanung zeigt sich jedoch, dass die Prämisse der Subzyklenfreiheit keineswegs selbstverständlich ist, sondern ganz im Gegenteil eher befremdlich wirkt. Zur Erläuterung wird auf ein einfaches Beispiel verwiesen, das in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt wird. Es betrifft ein Verkehrsunternehmen, das nur über ein Transportmittel verfügt ($k = K = 1$), und ein Verkehrsnetz mit nur 4 Knoten $n = 1, \dots, 4$. Das Depot für das Transportmittel des Verkehrsunternehmens befindet sich – wie im Standardmodell – im Knoten $n = 1$. Es liegen zwei Transportaufträge für das Verkehrsunternehmen vor. Sie erstrecken sich darauf, einerseits die Gütermenge m_2 vom Knoten 2 zum Knoten 4 und andererseits die Gütermenge m_3 vom Knoten 3 zum Knoten 2 zu transportieren. Die Kapazität C_1 des Transportmittels reicht aus, um die beiden Gütermengen m_2 und m_3 simultan zu transportieren. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich als eine zulässige – und in diesem Fall auch optimale – Tour des Verkehrsunternehmens, die 4 Knoten des Verkehrsnetzes in der Reihenfolge anzufahren, die in der Abbildung 19 wiedergegeben ist. Sie entspricht dem Tourvektor $T = (1, 2, 3, 4, 2, 1)$.

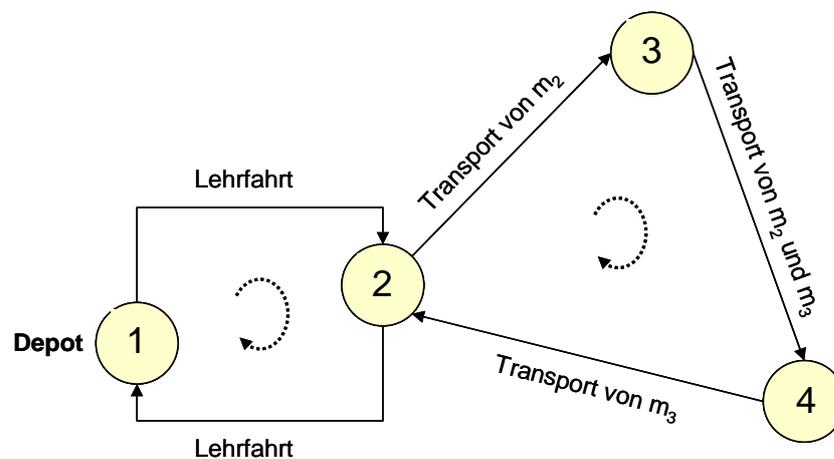


Abbildung 19: Tourenplanung mit Subzyklen

Sowohl aus der Abbildung 19 als auch aus dem Tourvektor $T = (1, 2, 3, 4, 2, 1)$ ist ersichtlich, dass zur Erfüllung der beiden Transportnachfragen mit den Gütermengen m_2 und m_3 ein Subzyklus erforderlich ist: $SZ = (2, 3, 4, 2)$. Er lässt sich in diesem Beispiel nicht vermeiden. Das Transportmittel des Verkehrsunternehmens startet zunächst von seinem Depot im Knoten 1 und fährt als nächstes den Knoten 2 an, um dort mit der Gütermenge m_2 für den ersten Transportauftrag beladen zu werden. Anschließend fährt es zu den Knoten 3 und 4, um dort die Gütermenge m_3 des zweiten Transportauftrags zu beladen bzw. die Gütermenge m_2 des ersten Transportauftrags zu entladen. Danach fährt das Transportmittel den Knoten 2 *wiederholt* an, um dort die Gütermenge m_3 des zweiten Transportauftrags zu entladen. Dadurch ist der vorgenannte Subzyklus entstanden. Schließlich kehrt das Transportmittel zu seinem Depot im Knoten 1 zurück.

Aufgrund der Rückkehr des Transportmittels zum Depot erweckt die Abbildung 19 den Eindruck, als ob ein zweiter Subzyklus $SZ = (1, 2, 1)$ entstanden wäre. Dieser Eindruck täuscht jedoch; es handelt sich um einen Scheinsubzyklus. Denn der Tourvektor $T = (1, 2, 3, 4, 2, 1)$ lässt erkennen, dass die Tour T keine zyklische Subtour umfasst, die im Knoten 1 startet, über den Knoten 2 verläuft und

1) Vgl. dazu die Ausführungen in der Fußnote 1 auf S. 121.

danach unmittelbar zum Knoten 1 zurückkehrt. Der Scheinsubzyklus $SZ' = (1,2,1)$ wird in der Abbildung 19 lediglich dadurch hervorgerufen, dass die Tour T mit dem Tourvektor $T = (1,2,3,4,2,1)$ zwei Toursegmente $(1,2)$ und $(2,1)$ umfasst, die hinsichtlich des Knotens 2 übereinstimmen und daher in der Abbildung 19 den Anschein eines Subzyklus erwecken, jedoch im Tourvektor $T = (1,2,3,4,2,1)$ nicht miteinander zusammenhängen und daher auch keinen echten Subzyklus bilden.

Nur am Rande sei vermerkt, dass dieses simple Beispiel verdeutlicht, wie wichtig es ist, für eine realitätsadäquate Modellierung von Tourenplanungsproblemen ein formalsprachliches Konstrukt einzuführen, mit dessen Hilfe sich Touren – einschließlich der absoluten Positionen der jeweils angefahrenen Knoten – explizit repräsentieren lassen; vgl. dazu die Erläuterungen im Abschnitt a). Denn nur der Tourvektor $T = (1,2,3,4,2,1)$, der ein solches formalsprachliches Konstrukt darstellt, gestattet es, im o.a. Beispiel zwischen dem echten Subzyklus $SZ = (2,3,4,2)$ und dem Scheinsubzyklus $SZ' = (1,2,1)$ zu unterscheiden. Die grafische Darstellungsvariante der Abbildung 19 lässt dagegen diesen wichtigen Unterschied nicht unmittelbar erkennen.¹⁾

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung ist grundsätzlich nicht in der Lage, ein Realproblem der Art, wie im Beispiel der Abbildung 19 veranschaulicht wurde, korrekt zu repräsentieren. Dies liegt an zwei miteinander verwobenen²⁾ Gründen. Erstens verbietet die Prämisse der Subzyklenfreiheit grundsätzlich, das Standardmodell auf ein solches Realproblem anzuwenden. Dadurch wird die Anwendungsbreite des Standardmodells – im Hinblick auf die große Vielfalt denk möglicher Realprobleme – empfindlich eingeschränkt. Zweitens wird die Prämisse obligatorischer Gütertransporte verletzt. Dies trifft noch nicht auf den Knoten 1 für das Depot des Transportmittels zu; denn für diesen Knoten beträgt im betrachteten Beispiel die zu transportierende Gütermenge $m_1 = 0$. Aber der Knoten 2 erweist sich als problematisch. Zwar wird das Transportmittel bei seiner ersten Anfahrt des Knotens 2 mit der Gütermenge m_2 des ersten Transportauftrags beladen. Dies stimmt noch mit der Prämisse obligatorischer Gütertransporte überein. Jedoch fährt das Transportmittel gemäß dem Tourvektor $T = (1,2,3,4,2,1)$ diesen Knoten 2 ein zweites Mal an – allerdings nur, um die Gütermenge m_3 des zweiten Transportauftrags dort zu entladen. Es wäre widersinnig, das Transportmittel bei seiner Rückkehr zum Knoten 2 mit der Gütermenge m_2 des ersten Transportauftrags, die dem Knoten 2 „zugeordnet“ ist, ein zweites Mal zu beladen.³⁾ Im Standardmodell der

1) Diesem Transparenzmangel unterliegt übrigens auch das „analytisch“ formulierte Standardmodell. Die Modelllösung, die mittels der Abbildung 19 grafisch wiedergegeben wird, entspricht einer Tour T_q mit dem Tourvektor $T_q = (1,2,3,4,2,1)$. Diese Tour besitzt die tourspezifische Knotenmenge $KN_q = \{1,2,3,4\}$. Des Weiteren umfasst die Modelllösung u.a. die Entscheidungsvariablen $x_{1,2,1} = 1$ und $x_{2,1,1} = 1$ (es gilt $k = K = 1$, weil nur ein Transportmittel betrachtet wird). Für die echte Teilmenge S der tourspezifischen Knotenmenge KN_q mit $S = \{1,2\}$ und infolgedessen auch $\#(S) \geq 2$ gilt:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{i,j,q} = x_{1,2,1} + x_{2,1,1} = 1 + 1 = 2 = \#(\{1,2\}) = \#(S) \not\leq \#(S) - 1$$

Folglich müsste gemäß Formel (10) für das Standardmodell gelten, dass die Teilmenge S der tourspezifischen Knotenmenge KN_q mit $S = \{1,2\}$ einen Subzyklus bildet. Dies trifft zwar nicht zu, wie hier im Abschnitt b) aufgezeigt wurde, lässt sich aber anhand der analytischen Formulierung des Standardmodells nicht unmittelbar erkennen.

2) Die Interdependenz der nachfolgend angeführten Gründe resultiert daraus, dass die Prämisse der Subzyklenfreiheit und die Prämisse obligatorischer Gütertransporte im Standardmodell miteinander zusammenhängen. Dies wurde bereits an früherer Stelle erläutert; vgl. Kapitel 6.2.1.2.3.

3) Ebenso verfehlt wäre es, alternativ anzunehmen, dass die Gütermenge m_2 des ersten Transportauftrags am Knoten 2 entladen wird. Denn der erste Transportauftrag lautet, diese Gütermenge vom Knoten 2 zum Knoten 4 zu transportieren, aber nicht am Knoten 2 zu entladen.

konventionellen Tourenplanung ist es aber aufgrund der Prämisse obligatorischer Gütertransporte nicht möglich auszudrücken, dass derselbe Knoten – wie hier der Knoten 2 – von einem Transportmittel wiederholt angefahren wird und dabei das eine Mal mit einer Gütermenge beladen wird, die diesem Knoten als Transportnachfrage zugeordnet ist, und ein anderes Mal mit jener Gütermenge nicht beladen wird.

Anhand des simplen Beispiels der Abbildung 19 ist es offensichtlich, dass das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung nicht in der Lage ist, vergleichsweise einfache, aber dennoch realistisch anmutende Realprobleme der Tourenplanung zu modellieren. Dieser *Modellierungsdefekt* wird durch die Prämisse der Subzyklenfreiheit verursacht, die mit der Prämisse obligatorischer Gütertransporte eng verwoben ist. Daher stellt die Prämisse der Subzyklenfreiheit keineswegs eine „nebensächliche“, rein „modelltechnische“ Eigenschaft des Standardmodells dar. Vielmehr handelt es sich um ein *modelltechnisches Artefakt*, das einerseits tief in der Struktur des Standardmodells verankert ist, aber andererseits eine realitätsadäquate Modellierung in zahlreichen und praktisch relevanten Fällen verhindert.¹⁾

Um die Anwendungsbreite von Modellen für Tourenplanungsprobleme zu erweitern, bedarf es also einer Revision der Modellstruktur des Standardmodells, die es gestattet, auch Touren mit Subzyklen zu repräsentieren (Aufhebung der Prämisse der Subzyklenfreiheit). Mit der Zulässigkeit von Subzyklen geht einher, dass es in einer überarbeiteten Modellstruktur möglich sein muss anzugeben, ob ein Transportmittel, das einen Knoten anfährt, bei dieser Anfahrt entweder mit einer Gütermenge beladen wird, für die in dem betroffenen Knoten eine Transportnachfrage besteht, oder ob bei dieser Anfahrt auf eine Beladung mit der Gütermenge verzichtet wird (Aufhebung der Prämisse obligatorischer Gütertransporte). Es sollte also möglich sein, in einem Modell für Tourenplanungsprobleme zwischen wiederholten Anfahrten desselben Knotens im Hinblick auf Beladungsaktivitäten zu unterscheiden. Gleiches trifft auch auf komplementäre Entladungsaktivitäten zu.

Die Unterscheidung zwischen wiederholten Anfahrten desselben Knotens muss keineswegs auf die zuvor thematisierte *dichotome* Unterscheidung beschränkt werden, ob bei der wiederholten Anfahrt ein Transportmittel *entweder* mit einer Gütermenge beladen wird, für die in dem betroffenen Knoten eine Transportnachfrage besteht, *oder* ob bei dieser Anfahrt auf eine Beladung mit der Gütermenge verzichtet wird.²⁾ Stattdessen lässt sich ebenso vorstellen, diese dichotome durch eine *kontinuierliche* Unterscheidung zu ersetzen: Im letztgenannten Fall wäre bei der wiederholten Anfahrt desselben Knotens für jede Anfahrt festzulegen, mit welchem *Anteil* an der Gütermenge, für die in dem betroffenen Knoten eine Transportnachfrage besteht, das Transportmittel beladen werden soll. Dieser Anteil kann zwischen den Extremwerten „1“ für die vollständige Beladung mit der Gütermenge und „0“ für den Verzicht auf Beladung mit der Gütermenge frei variiert werden. Dadurch wird ein weiterer Freiheitsgrad in die Tourenplanung eingeführt, der zur Disposition des Entscheidungsträgers steht. Zur Berücksichtigung dieses Freiheitsgrads wäre eine zweite Art von Entscheidungsvariablen einzuführen, die im Gegensatz zu den ganzzahligen, sogar binären Entscheidungsvariablen (und modellendogenen Variablen) des Standardmodells der konventionellen Tourenpla-

1) Daher lässt sich die Prämisse der Subzyklenfreiheit als eine Manifestation der „PROKRUSTES-Bett-Modellierung“ auffassen, die schon kurz zuvor im Abschnitt a) erwähnt wurde.

2) Auf komplementäre Entladungsaktivitäten wird hier der Einfachheit halber nicht explizit eingegangen. Sie sind aber implizit ebenso betroffen.

nung beliebige reellzahlige¹⁾ Werte im Intervall $[0;1]$ anzunehmen vermag. Auf diese Weise würde die Modellstruktur nicht nur um eine Entscheidungsvariable sui generis erweitert. Vielmehr würde aus dem Standardmodell, das ein rein ganzzahliges (binäres) Entscheidungs- oder Optimierungsmodell²⁾ darstellt, ein gemischt-ganzzahliges Modell.

c) Defekt atomarer Transportmittel:

Nicht nur das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, sondern alle „üblichen“ Tourenplanungsmodelle des Operations Research beruhen auf der Unterstellung, dass die Transportmittel jeweils ein „atomares“ mobiles Objekt darstellen (*Prämisse atomarer Transportmittel*). Dies erscheint zwar für den „Handelsreisenden“ von Travelling-Salesman-Problemen unmittelbar plausibel.

Aber für Vehicle-Routing-Probleme braucht dies keineswegs der Fall sein. Bereits für Lastkraftwagen (Lkw) als Transportmittel könnte unterschieden werden, ob es sich um „Solo-Lkw“ oder um Lkw mit Anhängern handelt. Diese Unterscheidung ist für Modelle zur Planung von Lkw-Routen jedoch kaum bekannt.³⁾

Noch gravierender wirkt sich die Prämisse atomarer Transportmittel im Hinblick auf Vehicle-Routing-Probleme für Eisenbahnverkehrsunternehmen aus. Denn ein Güterzug besteht aus einer Lokomotive mit einer hochgradig variablen Anzahl von angekoppelten Güterwagen. Der Freiheitsgrad, sowohl unterschiedlich viele als auch verschiedenartige Güterwagen zu einem Güterzug zusammenzustellen, sollte in realitätsadäquaten Modellen für den Gütertransport durch Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht ignoriert werden, findet aber nur in wenigen Ausnahmen Berücksichtigung.⁴⁾

-
- 1) Für Tourenplanungsprobleme aus der betrieblichen Praxis reichen rationalzahlige Werte im Intervall $[0;1]$ vollkommen aus. Die Menge der rationalen Zahlen wird jedoch in OR-Modellen im Allgemeinen nicht als Definitionsbereich für Entscheidungsvariablen oder modellendogene Variablen berücksichtigt. Stattdessen wird in der Regel unmittelbar auf die Menge der reellen Zahlen übergegangen, wenn keine Ganzzahligkeitsbedingung erfüllt werden muss. Dieser Konvention wird hier im Interesse der Anschlussfähigkeit an etablierte OR-Modelle gefolgt, indem von vornherein reellzahlige Werte aus dem Intervall $[0;1]$ zugelassen werden.
 - 2) Jedes Optimierungsmodell stellt ein Entscheidungsmodell dar, weil über die optimalen Werte für die Entscheidungsvariablen entschieden werden muss. Die Umkehrung trifft im Allgemeinen jedoch nicht zu. Denn ein Entscheidungsmodell braucht keineswegs ein Optimierungsmodell darzustellen. Beispielsweise kann in einem Entscheidungsmodell ein Satisfizierungsziel verfolgt werden, sodass es ausreicht, für die Entscheidungsvariablen lediglich zufriedenstellende Werte aufzufinden. Im hier vorgelegten Projektbericht kann jedoch auf die Unterscheidung zwischen Entscheidungs- und Optimierungsmodellen verzichtet werden, weil stets von Extremierungszielen – wie etwa der Minimierung von Leerfahrten oder Leertonnenkilometern – ausgegangen wird. Daher werden hier Entscheidungs- und Optimierungsmodelle als Synonyme behandelt.
 - 3) Da ein Lastkraftwagen selten mit mehr als einem Anhänger verkehrt (von Ausnahmen wie z.B. „Road Trucks“ im australischen Outback abgesehen, die wie ein Güterzug aus einer Zugmaschine und oftmals mehreren angekoppelten Anhängern zusammengestellt werden), reicht es in Modellen für Vehicle-Routing-Probleme des Straßengüterverkehrs im Allgemeinen aus, die Option von Lkw-Anhängern durch entsprechend vergrößerte Ladungskapazitäten der Lastkraftwagen auf indirekte Weise zu erfassen. Bei dieser Modellierungsweise werden Lastkraftwagen weiterhin als atomare Transportmittel behandelt. Lediglich die Ausprägungen des Objektattributs „Ladungskapazität“ werden variiert.
 - 4) Als Beispiele für Modellierungen im Bereich des Schienengüterverkehrs siehe HOLMBERG/JOBORN/LUNDGREN (1998), KROON/HUISMAN/MARÓTI (2007), KUO/NICHOLLS (2007). In den vorgenannten Quellen werden jedoch weder Einzelwagenverkehre noch Leerfahrten und Leertonnenkilometer berücksichtigt, die für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS eine große Rolle spielen.

Besondere Relevanz erlangt die Zusammenstellung eines Güterzugs aus mehreren und unter Umständen auch verschiedenartigen Güterwagen bei den sogenannten *Einzelwagenverkehren*. Einzelwagenverkehre sind dadurch gekennzeichnet, dass nicht von vornherein ein sogenannter Ganzzug für einen – in der Regel homogenen – Transportauftrag eines einzelnen Großkunden gebildet wird. Vielmehr wird von einer größeren Anzahl von einzelnen Güterwagen („Einzelwagen“) ausgegangen. Diese Güterwagen müssen an verschiedenen, aber zumeist regional benachbarten Knoten eines Verkehrsnetzes mit den relativ kleinen und oftmals heterogenen Gütermengen aus den Transportnachfragen einer Vielzahl von Kleinkunden beladen und zumeist an abermals verschiedenen Knoten des Verkehrsnetzes entladen werden. Da es unwirtschaftlich wäre, jeden dieser Güterwagen mit einer eigenen Lokomotive verkehren zu lassen, besteht ein Optimierungsproblem sui generis von Eisenbahnverkehrsunternehmen darin, entweder aus einer größeren Anzahl von Einzelwagen komplette Ganzzüge zusammenzustellen oder aber einige wenige Einzelwagen in bereits bestehende Ganzzüge aufzunehmen.

Das Optimierungsproblem für Einzelwagenverkehre weist eine hohe Komplexität auf. Sie resultiert nicht nur daraus, dass jeweils eine Lokomotive als Traktionseinheit mit einer variablen Anzahl von Güterwagen zu einem Güterzug als einem komplex aufgebauten, keineswegs mehr atomaren Transportmittel zusammengesetzt („komponiert“) werden muss. Vielmehr gilt es hierbei auch eine Vielzahl von Restriktionen zu beachten, die aus Tourenplanungsproblemen für „Handelsreisende“ und Lastkraftwagen vollkommen unbekannt sind. Zu diesen Restriktionen zählen beispielsweise die maximal zulässige Güterzuglänge, die zurzeit experimentell auf 1.000 m erhöht wird, die zulässigen Gesamtgewichte der einzelnen eingesetzten Güterwagen sowie die maximale Traktionskraft der jeweils eingesetzten Lokomotiven.

Das Verbundprojekt MAEKAS ist dadurch gekennzeichnet, dass die kooperierenden vier Eisenbahnverkehrsunternehmen besondere Wettbewerbsvorteile im Markt für schienengebundene Gütertransporte durch eine „intelligente“ Bündelung von Einzelwagenverkehren erwarten. Daher spielt das zuvor skizzierte Optimierungsproblem für Einzelwagenverkehre im Verbundprojekt MAEKAS eine herausragende Rolle. Folglich stellt es ein Desiderat hoher Priorität dar, den Defekt atomarer Transportmittel im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung dadurch zu heilen, dass die Transportmittel als komplex aufgebaute Objekte modelliert werden, die einerseits aus einer Lokomotive und andererseits aus einer variablen Anzahl von – unter Umständen sogar verschiedenartigen – Güterwagen zusammengesetzt sind.

d) Defekt mangelnder Ressourcenheterogenität:

Sowohl die Lokomotiven eines Eisenbahnverkehrsunternehmens als auch seine Güterwagen können verschiedenartig sein. Die Verschiedenartigkeit von Güterwagen wurde bereits im Kapitel 4.2 angesprochen. Auch im voranstehenden Abschnitt c) spielte sie im Zusammenhang von Einzelwagenverkehren eine Rolle, besaß dort aber nur periphere Bedeutung, weil der Defekt atomarer Transportmittel nicht maßgeblich von der Verschiedenartigkeit der Transportmittelbestandteile abhängt. Die Verschiedenartigkeit von Lokomotiven oder von Güterwagen kann für eine Modellierung von Tourenplanungsproblemen jedoch eine eigenständige Bedeutung erlangen, wenn es artspezifische Restriktionen zu beachten gilt.

Die Verschiedenartigkeit von *Lokomotiven* spielt vor allem dann eine bedeutsame Rolle, wenn nicht alle Strecken eines Verkehrsnetzes elektrifiziert sind. Dann können zwar für die elektrifizierten Strecken sowohl Elektro- als auch Diesel-Lokomotiven¹⁾ eingesetzt werden, aber für die nicht elektrifizierten Strecken kommen nur Güterzüge in Betracht, die von Diesel-Lokomotiven gezogen werden. Daher besteht eine wesentliche Realitätsannäherung von Modellen für Tourenplanungsprobleme von Eisenbahnverkehrsunternehmen darin, einerseits den „Elektrifizierungsstatus“ der Strecken eines Verkehrsnetzes explizit zu erfassen sowie andererseits explizit zwischen Elektro- und Diesel-Lokomotiven in den Fuhrparks der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu unterscheiden.

Auch für *Güterwagen* können artspezifische Restriktionen eine Rolle spielen. Dies trifft beispielsweise auf Strecken eines Verkehrsnetzes zu, die für Gefahrguttransporte gesperrt sind. Dann können Güterzüge, die Spezialgüterwagen für Gefahrguttransporte umfassen, diese Strecken nicht befahren. Ebenso kann es „Kombinationsverbote“ im Einzelwagenverkehr geben, die es nicht gestatten, Spezialgüterwagen für Gefahrguttransporte mit „normalen“ Güterwagen zu einem Ganzzug zusammenzustellen. Solche Verbote können dazu dienen, Gefährdungen durch Gefahrgüter auszuschließen, die andernfalls auf die Güter, die in den „normalen“ Güterwagen transportiert werden, ausstrahlen könnten. Folglich sollte ein realitätsadäquates Modell auch die Möglichkeit umfassen, zwischen Güterwagenarten, wie etwa für den Transport von „normalen“ Gütern versus von Gefahrgütern, explizit zu unterscheiden.

e) Zielinhaltsdefekt:

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung geht – wie auch die meisten anderen Tourenplanungsmodelle – von dem Formalziel aus, die „Weglänge“ aller Touren zu minimieren, die im hier präsentierten Standardmodell als Tourenlängensumme TLS konkretisiert wurde. Diese Minimierung von Weglängen in der Dimension „km“ besitzt für Tourenplanungsmodelle paradigmatischen Charakter. Für das Realproblem, schienengebundene Gütertransporte innerhalb einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu koordinieren, steht im hier vorgelegten Projektbericht hingegen ein anderes Ziel im Vordergrund: Es gilt, die Leerfahrten der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen so weit wie möglich zu reduzieren. Operationalisieren lässt sich dieses Ziel durch das Formalziel, die anfallenden Leertonnenkilometer zu minimieren. Dieses Formalziel weicht nicht nur inhaltlich, sondern auch hinsichtlich seiner Dimension „to·km“ vom sonst üblichen Formalziel der Minimierung von Weglängen deutlich ab.

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung bietet keinen Ansatzpunkt, um die gefahrenen Leertonnenkilometer zu erfassen. Weder wird die Kapazitätsauslastung von Güterwagen berücksichtigt, die unvollständig beladen verkehren, noch werden Fahrten von leeren Güterwagen oder sogar reine Lokzug-Fahrten modelliert. Daher erweist sich das Standardmodell als grundsätzlich ungeeignet, um Tourenplanungsprobleme zu modellieren, in denen vorrangig das Ziel der Vermeidung von Leerfahrten interessiert. Da dieses Ziel im Verbundprojekt MAEKAS eine heraus-

1) In diesem Projektbericht werden ausschließlich Elektro- und Diesel-Lokomotiven als relevante Lokomotivtypen betrachtet, weil die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS über keine anderen Lokomotivtypen verfügen. Darüber hinaus könnten aber noch weitere, in der betrieblichen Praxis von Eisenbahnverkehrsunternehmen jedoch kaum relevante Lokomotivtypen einbezogen werden. Dazu gehören vor allem – technisch veraltete – Dampflokomotiven. Weitere, „exotische“ Varianten, wie etwa Lokomotiven mit Flüssiggas- oder Brennstoffzellenantrieb, mögen zukunftsweisend anmuten, spielen aber derzeit noch keine Rolle.

ragende Bedeutung besitzt, besteht ein weiteres Desiderat darin, ein Modell für die Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu entwickeln, das primär darauf zugeschnitten ist, Leerfahrten berücksichtigen und hinsichtlich der gemessenen Leertonnenkilometer minimieren zu können. Darüber hinaus sollte es möglich sein, in Modellvarianten die unterschiedlichen Arten von Leerfahrten unterscheiden zu können, die im Kapitel 2.1 als Leerfahrten im engsten, im engeren, im weiteren sowie im weitesten Sinne vorgestellt wurden.

In der einschlägigen Fachliteratur – vor allem auf dem Gebiet des Operations Research – existieren einige wenige Modellierungen von Tourenplanungsproblemen für Eisenbahnverkehrsunternehmen, die sich mit dem Realproblem der Vermeidung von Leerfahrten zumindest ansatzweise befassen. Dazu gehören vor allem die Beiträge von FALKENSAMMER, von BORNDÖRFER sowie von PANKRATZ.¹⁾ Jedoch ist den Verfassern noch kein Modell bekannt, das die Vermeidung von Leerfahrten im speziellen Kontext der „intelligenten“ Bündelung von Einzelwagenverkehren mehrerer miteinander kooperierender EVU behandelt.

Schließlich sollte ein neu zu entwickelndes Modell von vornherein so flexibel ausgelegt sein, dass es in der Lage ist, auch andere Formalziele neben der „paradigmatischen“ Minimierung von Weglängen und der Minimierung von Leerfahrten bzw. Leertonnenkilometern zu berücksichtigen. Dazu gehören beispielsweise technische Formalziele, die sich auf die Auslastungen der Kapazitäten von Lokomotiven (Traktionskapazitäten) und Güterzügen (Ladungskapazitäten) beziehen, sowie ökonomische Formalziele, die vor allem die Erlöse, die Kosten oder die Deckungsbeiträge in den Vordergrund rücken, die mit dem Betrieb der Güterzüge verursacht werden.

f) Ein-Depot-Defekt:

Im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung wird davon ausgegangen, dass alle Touren im selben Depot beginnen und dort auch wieder enden. Diese Ein-Depot-Prämisse mag noch für einzelne Eisenbahnverkehrsunternehmen überwiegend zutreffen – auch wenn sich nicht ausschließen lässt, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen in Ausnahmefällen über mehrere Depots für seine Lokomotiven und Güterwagen verfügt.²⁾ Aber für *mehrere* Eisenbahnverkehrsunternehmen muss als Regelfall davon ausgegangen werden, dass sie ihr Equipment nicht in einem gemeinsam betriebenen Depot vorhalten, sondern jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen (mindestens) ein eigenes Depot besitzt. Da im Verbundprojekt MAEKAS die *Kooperation* zwischen mehreren Eisenbahn-

1) Vgl. FALKENSAMMER (2006), BORNDÖRFER (2005), PANKRATZ (2005). Siehe als Grundlagenüberblick auch CANNEN/PIZZOLATO (1994) sowie GIAGLIS/MINIS/TATARAKIS et al. (2004).

2) Beispielsweise kann zugunsten von mehreren Depots für dasselbe Eisenbahnverkehrsunternehmen angeführt werden, dass sich ein regional tätiges Eisenbahnverkehrsunternehmen durch zunehmende Wettbewerbsintensität veranlasst sieht, Kunden nicht nur in seiner engeren und „angestammten“ Nachbarschaft zu bedienen (Stammkundschaft), sondern die Kundenakquisition auch über das bisher gepflegte Einzugsgebiet hinaus auszuweiten. Wenn neue Kunden akquiriert werden, die Transportnachfragen weit außerhalb des bisher üblichen Einzugsgebiets eines Eisenbahnverkehrsunternehmens artikulieren, so kann es für das Eisenbahnverkehrsunternehmen wirtschaftlich vorteilhaft sein, ein neues Depot für Lokomotiven oder Güterwagen in der Nähe dieser Kunden einzurichten, um lange Leerfahrten zu diesen Kunden hin oder auf der Rückfahrt von diesen Kunden zu vermeiden. Allerdings kann für das betrachtete regional tätige Eisenbahnverkehrsunternehmen eine alternative Option darin bestehen, mit einem anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen zu kooperieren, in dessen „angestammtem“ Einzugsgebiet die neu akquirierten Kunden des erstgenannten Eisenbahnverkehrsunternehmens angesiedelt sind. Auf diese Kooperationsalternative wird unmittelbar nachfolgend eingegangen. Auch sie führt dazu, dass bei einer Modellierung von Tourenplanungsproblemen multiple Depots zu berücksichtigen sind.

verkehrsunternehmen untersucht und gestaltet wird, muss von diesem Regelfall *multipler Depots* bei der Modellierung ihrer Tourenplanung von vornherein ausgegangen werden. Dies widerspricht der Ein-Depot-Prämisse des Standardmodells. Auch aus diesem Grund erweist sich das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung für das Verbundprojekt MAEKAS als prinzipiell ungeeignet.

Zwar existieren in der einschlägigen Fachliteratur mehrere Ansätze, um das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung auf mehrere Depots zu erweitern. Sie werden in der Regel als Modelle für Mehrdepot-Tourenplanungsprobleme oder auch Multi-Depot-Vehicle-Routing-Probleme (MDVRP) thematisiert.¹⁾ Aber auch diese Modellierungsansätze bleiben unzureichend, weil sie das Standardmodell nur im Hinblick auf den Aspekt multipler Depots erweitern, jedoch die übrigen Unzulänglichkeiten, die in diesem Kapitel angesprochen werden, nicht überwinden.

g) Ein-Touren-Defekt:

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung unterstellt aufgrund seiner Transportmittel-Touren-Prämisse, dass von einem Transportmittel im Planungszeitraum höchstens eine Tour T durchgeführt werden kann. Dies muss jedoch keineswegs der Fall sein. Vielmehr lässt sich ebenso vorstellen, dass ein Transportmittel eine Tour durchführt, danach ins Depot zurückkehrt und noch im selben Planungszeitraum (mindestens) eine weitere vollständige Tour durchführt.

Entsprechende Modelle für Tourenplanungsprobleme besitzen in der einschlägigen Fachliteratur Seltenheitswert. Dies könnte dadurch plausibel gemacht werden, dass die Wahrscheinlichkeit der Möglichkeit von mehreren Touren desselben Transportmittels im selben Planungszeitraum dadurch „beliebig“ gesenkt werden kann, dass die Dauer des Planungszeitraums entsprechend verkürzt wird. Dieses Plausibilitätsargument wirkt jedoch nicht überzeugend. Denn mit der Verkürzung der Dauer des Planungszeitraums werden auch die Länge und die Dauer derjenigen Touren verkürzt, die im Planungszeitraum mithilfe von nur einem Transportmittel durchgeführt werden können. Dies kann zu einer „Inflationierung“ zahlreicher nur kurzer Touren führen, die in ihrer Gesamtheit wirtschaftlich nachteilhaft sind gegenüber wenigen, aber längeren Touren in einem Planungszeitraum mit größerer Ausdehnung.

Überzeugender erscheint den Verfassern ein anderes Argument: In der betrieblichen Praxis wird oftmals „revolvierend“ geplant. Dies bedeutet, dass eine Tourenplanung zwar für einen bestimmten Planungszeitraum aufgestellt wird. Aber es wird berücksichtigt, dass sich realiter oftmals unvorhergesehene Störungen ereignen, die dazu führen können, dass ein Tourenplan undurchführbar wird oder zumindest nur noch unter erheblichen Effizienzverlusten – wie z.B. Zusatzkosten – realisiert werden kann. Ein rationales Störungsmanagement kann daher so ausgelegt sein, dass entweder in festen Zeitintervallen oder aber von gravierenden Störfällen „getriggert“ eine Revision der ursprünglichen Tourenplanung erfolgt, die Situationsveränderungen gegenüber dem Zeitpunkt berücksichtigt, in dem der letzte Tourenplan aufgestellt wurde. Bei einer derart „revolvierenden“ Tourenplanung spielt es nur noch eine untergeordnete Rolle, wie groß der Planungszeitraum „an sich“ bemessen ist. Vielmehr wird nun wichtig, in welchen Zeitintervallen oder ab welcher Störfallgröße eine Revision der ursprünglichen Tourenplanung angestoßen wird. Wenn die Tourenplanung in ein

1) Vgl. ENGELER (2002), S. 19.

solches Szenario „revolvierender“ Planung eingebettet wird, lässt es sich durchaus vertreten, innerhalb des Planungszeitraums davon auszugehen, dass ein Transportmittel höchstens eine Tour durchführt. Denn in diesem Szenario besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Planrevision den Einsatz des jeweils betrachteten Transportmittels für eine weitere Tour ermöglicht – noch lange bevor das Ende des ursprünglichen Planungszeitraums erreicht worden ist. Vor diesem Hintergrund erscheint die Erweiterung des Standardmodells um die Möglichkeit, dass ein Transportmittel im Planungszeitraum mehrere Touren durchführen kann, als zwar nicht überflüssig, aber weit weniger wichtig als die vorgenannten Aspekte.

h) Be- und Entladungsdefekt:

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung leidet unter einer eigentümlichen Intransparenz im Hinblick auf die Gütermengen m_i , bezüglich derer Transportnachfragen in den Knoten i des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes artikuliert werden. Im Standardmodell erfolgt keine explizite Festlegung darauf, ob ein Transportmittel *entweder* in einem Knoten i mit der Gütermenge m_i *beladen* wird – *oder* ob im Knoten i die Gütermenge m_i aus dem Transportmittel *entladen* wird. Aufgrund dieses Festlegungsmangels lässt sich das Standardmodell auf zwei unterschiedliche Weisen interpretieren:

- Entweder werden die Transportmittel zu Beginn ihrer Tour im Depot-Knoten mit den zu transportierenden Gütermengen m_i beladen, transportieren diese Gütermengen zu den Zielknoten i und werden dort von den Gütermengen m_i entladen. Dies entspricht einer „*Versorgungstour*“, auf der die Knoten i mit Gütermengen m_i aus dem Depot des Verkehrsunternehmens versorgt werden.
- Oder die Transportmittel verlassen den Depot-Knoten zunächst unbeladen und werden erst in den Knoten i mit den zu transportierenden Gütermengen m_i beladen, die danach zum Depot des Verkehrsunternehmens transportiert und dort entladen werden. Dies entspricht einer „*Entsorgungstour*“, auf der die Knoten i von den Gütermengen m_i , die zum Depot des Verkehrsunternehmens transportiert werden, entsorgt werden.

Es ist bemerkenswert, dass das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung die beiden vorgenannten Interpretationen zulässt. Dies kann einerseits als eine besondere Modellflexibilität ausgelegt werden, weil es möglich ist, höchst unterschiedliche Realprobleme mittels des gleichen Modells zu repräsentieren. Andererseits wird das „modellästhetische“ Postulat verletzt, dass für wesentlich erachtete Aspekte eines Realproblems – wie hier die Unterscheidung zwischen Ver- und Entsorgungstouren – in der Modellierung des Realproblems explizit berücksichtigt werden sollten. Da das Standardmodell diese Explizierung des Tourtyps im Hinblick auf Ver- versus Entsorgungstouren nicht gestattet, leidet es unter einem weiteren Explizierungsdefekt.¹⁾

Aber selbst dann, wenn das Standardmodell im Hinblick auf Ver- versus Entsorgungstouren eindeutig interpretiert wäre, reichte es nicht aus, um Be- und Entladungsaktivitäten in den Knoten eines Verkehrsnetzes realitätsadäquat zu erfassen. Zumindest für Eisenbahnverkehrsunternehmen, die Einzelwagenverkehre durchführen, ist es typisch, dass ein Güterzug seine Fracht nicht an *einem* Knoten des Verkehrsnetzes belädt (der Depot-Knoten im Fall der o.a. Versorgungstouren) oder an

1) Vgl. zum Aspekt von Explizierungsdefekten vor allem die Ausführungen im Abschnitt a).

einem Knoten des Verkehrsnetzes entlädt (der Depot-Knoten im Fall der o.a. Entsorgungstouren). Vielmehr erfordert es eine realitätsadäquate Modellierung, dass ein Güterzug, der entweder aus Güterwagen des Einzelwagenverkehrs zusammengestellt wurde oder aber zumindest um einzelne Güterwagen des Einzelwagenverkehrs erweitert wurde, Gütermengen an unterschiedlichen Knoten des Verkehrsnetzes be- oder entladen kann.¹⁾ Diese Option besteht im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung grundsätzlich nicht. Sie wird erst in komplexeren Modellen eröffnet, die dem Typ der Pickup-and-Delivery-Vehicle-Routing-Probleme (PDVRP) zugeordnet werden. Solche Tourenplanungsmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass hinsichtlich jeder Transportnachfrage zwischen dem Knoten für die Abholung der zu transportierenden Gütermenge („pickup point“) und dem Knoten für die Auslieferung der zu transportierenden Gütermenge („delivery point“) unterschieden wird. Dabei entspricht der Knoten für die Güterabholung demjenigen Knoten, in dem ein Transportmittel mit der zu transportierenden Gütermenge zu beladen ist, und der Knoten für die Güterablieferung entspricht demjenigen Knoten, in dem ein Transportmittel von der transportierten Gütermenge entladen werden muss.

Wegen der großen Bedeutung, die Einzelwagenverkehre und deren „intelligente“ Bündelung für die Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS besitzen, erweist es sich als sehr wichtig, das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung so zu erweitern, dass Pickup-and-Delivery-Vehicle-Routing-Probleme modelliert werden können.

i) Zeitdefekt:

Im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung werden nur Zuordnungen (von Transportmitteln zu Strecken des Verkehrsnetzes und somit mittelbar auch zu Touren sowie von Gütermengen zu Transportmitteln bzw. Touren) sowie Reihenfolgen (von angefahrenen Knoten innerhalb einer Tour) geplant. Zeitaspekte finden hierbei keine Berücksichtigung. Dies stellt einen erheblichen Defekt dar. Denn in der betrieblichen Praxis müssen in der Regel sogenannte „Zeitfenster“ berücksichtigt werden. Solche „Zeitfenster“ werden vor allem durch die zeitlich beschränkte Verfügbarkeit von Lokomotiven und Güterwagen sowie durch frühest mögliche und spätest zulässige Termine für das Be- oder Entladen von Gütern konstituiert.

Eine realitätsadäquate Modellierung von Tourenplanungsproblemen erfordert daher auch die Möglichkeit, in der Dimension „Zeit“ zu planen und entsprechende zeitliche Restriktionen für die Verfügbarkeit von Ressourcen bzw. für die Termine von Be- oder Entladungsaktivitäten zu berücksichtigen. Mit dieser zeitbezogenen Modellierung von Tourenplanungsproblemen befasst sich vor allem eine Forschungsrichtung, die unter der Bezeichnung Vehicle-Routing-Problem-with-Time-Windows (VRPTW) bekannt geworden ist.²⁾ Sie befasst sich mit Tourenplanungsmodellen, die wegen ihrer „dynamischen“ Komponente die Komplexität des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung – trotz seiner keineswegs trivialen Modellstruktur – bei Weitem übertreffen. Daher stellt die Einbeziehung von Zeitaspekten in die Modellierung von Tourenplanungsproblemen eine große Herausforderung dar. Sie wird im hier vorgelegten Projektbericht noch nicht berücksichtigt.

1) Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt b), vor allem im Zusammenhang mit dem Beispiel, das der Abbildung 19 zugrunde liegt.

2) Vgl. ENGELER (2002), S. 23.

j) Kundendefekt:

Das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung ist gegenüber den *einzelnen* Kunden eines Verkehrsunternehmens „blind“, weil in einem Knoten i des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes die Gütermenge m_i nur als *Aggregat* der Transportnachfragen *aller Kunden* berücksichtigt wird. Diese aggregierte Gütermenge gibt aber keinen Aufschluss darüber, welche Teilmengen für welche einzelnen Kunden transportiert werden sollen. Ohne dieses spezielle kundenbezogene Wissen lassen sich mindestens zwei Aspekte nicht modellieren, die für reale Tourenplanungsprobleme eine bedeutsame Rolle spielen können.

Erstens wäre es vorteilhaft, Teilmengen derselben Gütermenge m_i in einem Tourenplanungsmodell unterschiedlich behandeln zu können, wenn ihre Transporte von Kunden nachgefragt werden, die für ein Verkehrsunternehmen eine unterschiedliche wirtschaftliche Bedeutung besitzen. Beispielsweise könnte daran gedacht werden, die Transportnachfragen von besonders wichtigen Kunden (Schlüsselkunden oder „key accounts“) vorrangig zu bedienen. Dies kann insbesondere in Verbindung mit Abschnitt i) Bedeutung erlangen, weil es sich im Rahmen einer zeitbezogenen Modellierung von Tourenplanungsproblemen anbietet, bei Engpässen hinsichtlich der verfügbaren Transportkapazität zunächst die Transportnachfragen der Schlüsselkunden zu erfüllen und die übrigen Kunden warten zu lassen, bis auch für sie Transportkapazität frei wird.

Zweitens erscheint es bei Pickup-and-Delivery-Vehicle-Routing-Problemen (vgl. Abschnitt h) realitätsfern anzunehmen, dass unterschiedliche Kunden, die im selben Knoten i des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes Transportnachfragen für die Be- oder die Entladung eines Transportmittels artikulieren, jeweils denselben Knoten für die korrespondierende Güterent- bzw. -beladung wünschen. Daher erfordert die realitätsadäquate Modellierung von Pickup-and-Delivery-Vehicle-Routing-Problemen, die Gütermenge m_i , nach deren Transport in einem Knoten i nachgefragt wird, in kundenspezifischer Weise in Teilmengen aufspalten zu können, die in jeweils anderen Knoten des Verkehrsnetzes zu ent- bzw. beladen sind.

k) Lagerhaltungsdefekt:

Im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung wird nicht berücksichtigt, dass ein Verkehrsunternehmen unter Umständen nicht nur beauftragt wird, Gütermengen von einem Knoten i zu einem Knoten j zu transportieren, sondern ebenso den Auftrag erhält, eine Gütermenge für eine begrenzte Zeitdauer zu lagern. Dies kann die Einrichtung und Aufrechterhaltung von Lagern an zumindest einigen Knoten des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes erfordern. Diese Lager-Knoten müssen nicht mit dem oder den Depot-Knoten eines Eisenbahnverkehrsunternehmens übereinstimmen. Wenn eine solche Übereinstimmung nicht gefordert ist, muss das betroffene Verkehrsunternehmen nicht nur ein Tourenplanungsproblem, sondern auch ein damit verwobenes Standortplanungsproblem (für die Lagerstandorte) lösen. In der einschlägigen Fachliteratur existieren einige wenige Ansätze, solche Inventory-Routing-Probleme zu modellieren.¹⁾

Bislang ist kein Modell für Tourenplanungsprobleme bekannt, das in der Lage wäre, alle vorgenannten Unzulänglichkeiten des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung zu beseitigen.

1) Vgl. CAMPBELL/CLARKE/KLEYWEGT et al. (1998), S. 96 ff.; CAMPBELL/SAVELSBERGH (2004), S. 488 ff.; SONG/SAVELSBERGH (2007), S. 44 ff.

Daher besteht ein großer Bedarf für entsprechend weiterentwickelte Modelle. Insbesondere wurde in der einschlägigen Fachliteratur bislang dem Aspekt wenig Aufmerksamkeit gewidmet, dass mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen miteinander kooperieren, um ihre Einzelwagenverkehre „intelligent“ zu bündeln, d.h. so miteinander zu kombinieren, dass sich Ganzzüge zusammenstellen oder ergänzen lassen, die wirtschaftlich vorteilhaft betrieben werden können.

Um die zuvor erläuterten Unzulänglichkeiten des Standardmodells der konventionellen Tourenplanung zu überwinden, ist eine neuartige Modellierung erforderlich, die auf das Realproblem zugeschnitten ist, schienengebundene Gütertransporte innerhalb einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu koordinieren und hierbei vor allem Leerfahrten zu vermeiden. Diese neuartige Modellierung wird die Komplexität von konventionellen Modellen des Operations Research für die Tourenplanung – auch im Rahmen des Schienengüterverkehrs – deutlich übersteigen. Dies sollte anhand der voranstehenden Erläuterungen sichtbar geworden sein.

Allerdings sind die Verfasser nicht so naiv anzunehmen, dass es ihnen in einem „ersten großen Wurf“ gelingen könnte, die zuvor erläuterten Unzulänglichkeiten des Standardmodells auf einmal zu überwinden. Stattdessen wird mit dem hier vorgelegten Projektbericht ein bescheideneres Ziel verfolgt. Zwar soll ein neuartiges Modell für die Tourenplanung von Eisenbahnverkehrsunternehmen entwickelt werden, die zwecks Vermeidung von Leerfahrten miteinander kooperieren. Aber von diesem Modell wird nicht erwartet, alle o.a. Unzulänglichkeiten zu vermeiden. Stattdessen soll es „nur“ einige besonders wichtig erscheinende Unzulänglichkeiten überwinden. Insbesondere soll seine *Modellstruktur so flexibel* ausgelegt sein, dass sie Ansatzpunkte erkennen lässt, bei späteren Gelegenheiten die bislang noch nicht berücksichtigten Unzulänglichkeiten des Standardmodells ebenso zu beseitigen.

7 Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern

7.1 Grundlagen

Im Folgenden wird ein *neuartiger Ansatz* für die *Modellierung* des Realproblems vorgestellt, die Touren von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS in der Art eines virtuellen Unternehmens miteinander kooperieren, so miteinander zu koordinieren („intelligent“ zu bündeln), dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen. Dieser „innovative“ Modellierungsansatz ist auf die Besonderheiten des realen Leerfahrtenvermeidungsproblems für Eisenbahnverkehrsunternehmen speziell zugeschnitten.

Zwar baut der Modellierungsansatz grundsätzlich auf dem *Standardmodell* der konventionellen Tourenplanung auf, das im Kapitel 6.2.1.2.2 vor allem im Hinblick auf Vehicle-Routing-Probleme vorgestellt wurde. Jedoch wird die *Modellstruktur* wegen der zahlreichen Unzulänglichkeiten dieses Standardmodells (vgl. Kapitel 6.2.1.2.3) so *verändert*, dass keine „zwanghafte“ Anpassung an „den“ Standard erfolgt und somit eine hochproblematische „PROKRUSTES-Bett-Modellierung“ unterbleibt. Stattdessen erfolgen Strukturveränderungen des Standardmodells derart, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen der Modellstruktur einerseits und der konzeptualisierten Struktur des zugrunde liegenden Realproblems andererseits erzielt wird. Diese Strukturveränderungen manifestieren sich besonders deutlich darin, dass im hier verfolgten Modellierungsansatz die *Touren* eines Eisenbahnverkehrsunternehmens im Fokus der Modellierung stehen. Sie stellen ein zentrales Konstrukt der Modellierung dar, auf das sich die Entscheidungsvariablen sowie die meisten modellendogenen Variablen unmittelbar beziehen. Auf diese Weise wird es möglich, das Realproblem der Vermeidung von Leerfahrten – auch Leerfahrten sind eine spezielle Ausprägung von Touren – auf „natürlich“ anmutende, möglichst realitätsadäquate Weise zu modellieren. Die weiteren Kritikpunkte, die im Kapitel 6.2.3 hinsichtlich des Standardmodells erörtert wurden, fließen ebenso in den hier vorgestellten Modellierungsansatz ein.¹⁾

Als erstes „Produkt“ des neuartigen Modellierungsansatzes wird hier ein *Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern* präsentiert. Es knüpft unmittelbar an die Erläuterungen des Kapitels 2.2 an. In diesem Kapitel wurde das allgemeine Ziel, die Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen so weit wie möglich zu vermeiden, mithilfe des speziellen Ziels operationalisiert, diejenigen Leertonnenkilometer zu reduzieren, die auf den Touren der jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmen anfallen.

1) Der Modellierungsansatz ist von vornherein so flexibel ausgelegt, dass er sich grundsätzlich dafür eignen sollte, alle Kritikpunkte hinsichtlich des Standardmodells konstruktiv auszugreifen, also in konkrete Strukturkomponenten eines entsprechend modifizierten Tourenplanungsmodells umzusetzen. Für den hier vorgelegten Projektbericht standen aber weder die personellen noch die zeitlichen Ressourcen zur Verfügung, die erforderlich wären, um ein Tourenplanungsmodell zu konstruieren, das bereits alle Kritikpunkte berücksichtigt. Vielmehr handelt es sich um einen *ersten Entwurf* für ein Tourenplanungsmodell mit einer realitätsadäquaten Modellstruktur, der in der Folgezeit durch entsprechende Varianten des hier präsentierten Tourenplanungsmodells weiterzuentwickeln ist. Um diesen Weiterentwicklungsbedarf nicht etwa zu verbergen, sondern in einer transparenten Weise zu dokumentieren, die zu konstruktiver Kritik am hier präsentierten Tourenplanungsmodell bewusst einlädt, werden im abschließenden Kapitel 7.4 mehrere Desiderata für die Weiterentwicklung des Tourenplanungsmodells angeführt.

Das Tourenplanungsmodell erstreckt sich von vornherein auf *mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen*, um so flexibel ausgelegt zu sein, dass sich auch die Kooperationseffekte erfassen lassen, die im Kapitel 5 hinsichtlich der *Kooperation* von Eisenbahnverkehrsunternehmen in einem virtuellen Unternehmen erörtert wurden. Dies trifft zumindest auf die dort vorgestellten *quantitativen* Kooperationseffekte zu.¹⁾ Als pars pro toto werden in dem Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern, das in diesem Projektbericht vorgestellt wird, diejenigen Leerfahrten- und Leertonnenkilometereffekte adressiert, die im Kapitel 5.2.1.1 erörtert wurden.

Allerdings ist zu beachten, dass sich in dem Tourenplanungsmodell die *Reduzierung* von Leertonnenkilometern, die mit der Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen im Verbundprojekt MAEKAS angestrebt wird, *nicht unmittelbar* nachweisen lässt. Denn das Tourenplanungsmodell ist als ein *Optimierungsmodell* ausgelegt, das es „nur“ gestattet, für *eine* gegebene *Planungssituation* (mindestens) einen *optimalen Tourenplan* zu ermitteln. Dieser Tourenplan erreicht für die gegebene Planungssituation ein *Minimum* der insgesamt anfallenden Leertonnenkilometer. Dies lässt es aber noch nicht zu, eine kooperationsbedingte Reduzierung von Leertonnenkilometern nachzuweisen. Denn ein Reduzierungsziel gehört zur Klasse der Meliorisierungsziele, die sich von den Optimierungszielen, die Optimierungsmodellen zugrunde liegen, grundsätzlich unterscheiden: Um die Erreichung eines Reduzierungsziels nachzuweisen (oder zu widerlegen), müssen *zwei* alternative *Situationen*²⁾ miteinander verglichen werden: eine Situation, die vor der Durchführung von „zielführenden“ Aktivitäten vorlag, und eine weitere Situation, die durch die Aktivitätendurchführung herbeigeführt worden ist. Auf die hier interessierende, kooperationsbedingte Reduzierung von Leertonnenkilometern übertragen bedeutet dies, dass folgender *Situationsvergleich* erforderlich ist:

- Für eine *Ausgangssituation*³⁾ ohne Kooperation der jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmen sind die Leertonnenkilometer zu erfassen, die auf den Touren für die Erfüllung der Transportnachfragen tatsächlich entstehen (Ist-Leertonnenkilometer).

1) In einem formalsprachlichen Modell, das sich im Rahmen der *konventionellen* Modellierungsweisen des Operations Research bewegt, lassen sich nur *quantitative* Aspekte eines Realproblems repräsentieren. Dies trifft auch auf das hier präsentierte Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern zu. Daher entziehen sich die *qualitativen* Kooperationseffekte, die im Kapitel 5.2.2 skizziert wurden, zunächst einer Erfassung durch den hier vorgestellten Modellierungsansatz. Allerdings existierenden im Bereich der *Erforschung Künstlicher Intelligenz* wegweisende Ansätze, mithilfe von „an sich“ vertrauten Ausdrucksmitteln der Mathematik und Logik (in der Regel Prädikatenlogik erster Ordnung) auch qualitative Problemaspekte modellieren zu können. Dazu zählt vor allem die Forschungsrichtung des sogenannten „*Qualitative Reasoning*“ (QR). Eine prägnante und tiefeschürfende Einführung in diese Forschungsrichtung bietet aus dezidiert betriebswirtschaftlicher Perspektive die jüngst erschienene Dissertation von HÜGENS; vgl. HÜGENS (2008), insbesondere S.131 ff. Daher wäre zu erwägen, die Modellkonstruktionen, die von HÜGENS einschließlich einer umfassenden Implementierung mit spezieller QR-Software erarbeitet wurden, auf die qualitativen Kooperationseffekte zu übertragen, die im Kapitel 5.2.2 für Kooperationen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen skizziert wurden.

2) Es wird hier bewusst nicht – wie zuvor – von einer Planungssituation, sondern von Situationen gesprochen, weil bei Analysen zur Erreichung von Meliorisierungszielen neben einer Planungs- auch eine Ausgangssituation betrachtet wird, die in der Regel keine Planungssituation darstellt. Darauf wird in Kürze näher eingegangen.

3) Bei der Ausgangssituation kann es sich sowohl um eine reale Situation (Istsituation) als auch um eine fiktive Situation (Planungssituation) handeln. Im Regelfall wird ein Situationsvergleich zur Analyse der Erreichung eines Meliorisierungsziels auf eine Istsituation als Ausgangssituation bezogen. Davon wird auch hier ausgegangen, sodass in Bezug auf die Ausgangssituation von „Ist-Leertonnenkilometern“ gesprochen wird. Allerdings lässt es sich ebenso vorstellen, eine fiktive oder „kontrafaktische“ Planungssituation vor der Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen mit einer Planungssituation zu vergleichen, in der die betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmen miteinander kooperieren.

- Für eine *Planungssituation*, die sich von der Ausgangssituation nur dadurch unterscheidet („*ceteris paribus*“)¹⁾, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen – z.B. in einem virtuellen Unternehmen – miteinander kooperieren, wird mithilfe des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells ermittelt, welche minimalen Leertonnenkilometer für einen *optimalen Tourenplan* in Bezug auf diese spezifische Planungssituation anfallen (Soll-Leertonnenkilometer).

Erst durch den Vergleich zwischen den Ist- und den Soll-Leertonnenkilometern, die für die Ausgangs- bzw. die Planungssituation ermittelt worden sind, lässt sich feststellen, ob die intendierte Reduzierung von Leertonnenkilometern durch die Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen in dem Ausmaß, wie die Kooperationsmöglichkeiten im Tourenplanungsmodell erfasst wurden, erreicht werden kann. Folglich ist das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell *allein* nicht dazu in der Lage, den Nachweis der Reduzierung von Leertonnenkilometern zu leisten. Aber es stellt als Optimierungsmodell für die o.a. Planungssituation eine *zentrale Komponente* desjenigen *Situationsvergleichs* dar, mit dessen Hilfe es möglich ist, die angestrebte Reduzierung von Leertonnenkilometern nachzuweisen – oder auch zu widerlegen. Insofern dient das Tourenplanungsmodell *mittelbar* dazu bei nachzuweisen (oder zu widerlegen), dass sich durch die Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen die Leertonnenkilometer reduzieren lassen. Nur in diesem mittelbaren Sinne wird hier davon gesprochen, dass es sich um ein Tourenplanungsmodell „zur Reduzierung von Leertonnenkilometern“ handelt.

Aufgrund der voranstehenden Erläuterungen kann von dem Tourenplanungsmodell, das hier im Kapitel 7 ausführlicher vorgestellt wird, noch *nicht* erwartet werden, die Reduzierung von Leertonnenkilometern im Rahmen einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen aufzuzeigen. Vielmehr bedarf es weitergehender, umfangreicher Erhebungen über die Ausgangssituation der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die am Verbundprojekt MAEKAS teilnehmen, um die Leertonnenkilometer zu ermitteln, die in dieser Ausgangssituation bereits anfallen. Die bislang vorliegenden Angaben über die Leertonnenkilometer der Praxispartner des Verbundprojekts, die im Kapitel 3 vorgestellt wurden, reichen für diesen Zweck an Detailliertheit bei Weitem noch nicht aus. Daher kann

1) Aus wissenschaftstheoretischer Perspektive erweist sich die *Ceteris-paribus-Prämisse* – ungeachtet ihrer großen Beliebtheit vor allem in ökonomischen Argumentationszusammenhängen – als höchst problematisch. Denn sie lässt unspezifiziert, was – abgesehen von der neu hinzukommenden Kooperation zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen – „alles“ unverändert bleiben soll. Die Verfasser sind sich dieser Spezifikationsproblematik durchaus bewusst, ohne sie an dieser Stelle zufriedenstellend lösen zu können. Dafür wäre eine Art „Meta-Tourenplanungsmodell“ erforderlich, in dem die Ausgangssituation ohne Kooperation und die Planungssituation mit Kooperation zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen gemeinsam modelliert werden. Erst in einem solchen „Meta-Tourenplanungsmodell“ ließe sich präzise spezifizieren, dass „alles“ unverändert bleiben soll, was nicht unmittelbar die Kooperation der Eisenbahnverkehrsunternehmen betrifft. Ein solches „Meta-Tourenplanungsmodell“ geht aber weit über den Erkenntnishorizont des hier vorgelegten Projektberichts hinaus. Aber es lässt sich zumindest exemplarisch veranschaulichen, was mit der o.a. Ceteris-paribus-Prämisse gemeint ist. Sie drückt z.B. aus, dass unabhängig davon, ob die Eisenbahnverkehrsunternehmen miteinander kooperieren (Planungssituation) oder nicht (Istsituation), die Transportnachfragen ihrer Kunden und die Transportkapazitäten ihres Equipments unverändert bleiben. Dies muss jedoch keineswegs so sein – und wegen dieser Unsicherheit, was tatsächlich unverändert bleibt, erweist sich die Ceteris-paribus-Prämisse als so problematisch. Beispielsweise lässt sich vorstellen, dass es den Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgrund ihrer Kooperation gelingt, die Attraktivität ihres Leistungsangebots so sehr zu steigern, dass sie Transportnachfragen von anderen Verkehrsträgern abziehen und dadurch die für sie wirksame Transportnachfrage *kooperationsinduziert* erhöhen. Eine methodisch „sauber“ formulierte Ceteris-paribus-Prämisse müsste u.a. zu solchen denkmöglichen Effekten Stellung beziehen, ob sie entweder zugelassen oder aber ausgeschlossen werden. Dafür reicht es nicht aus, lediglich „global“ zu formulieren, dass „alles“ bis auf den betrachteten Übergang von einer Situation ohne Kooperation zu einer Situation mit Kooperation unverändert bleibe.

das hier präsentierte Tourenplanungsmodell nur einen *ersten Schritt* auf dem Weg darstellen, die Möglichkeit der Reduzierung von Leertonnenkilometern in einer Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen durch den oben erläuterten *Situationsvergleich* methodisch stringent nachzuweisen.

Um das Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich zu beschreiben, wird schrittweise vorgegangen: Es wird aus einzelnen Komponenten aufgebaut, um die Struktur des Modells – seine „Komposition“ aus charakteristischen Modellkomponenten – möglichst übersichtlich entfalten zu können. Diesem Zweck dient zunächst das anschließende Kapitel 7.2. Später wird im Kapitel 7.3 das Gesamtmodell vorgestellt werden.

In den beiden Kapiteln 7.2 und 7.3 werden zwei unterschiedliche Darstellungsformen des Tourenplanungsmodells zur Reduzierung von Leertonnenkilometern nebeneinander verwendet.

Zum einen handelt es sich um die *mathematische Modellformulierung*. Sie erfolgt in der Art, die aus Modellierungen des Operations Research und der betriebswirtschaftlichen Entscheidungstheorie wohlvertraut ist. Die mathematische Modellformulierung manifestiert sich als ein System aus gewöhnlichen mathematischen Formeln, zu deren Formulierung in seltenen Fällen auch explizite Anleihen an den Ausdrucksmitteln der formalen Logik – hier: der Prädikatenlogik erster Ordnung¹⁾ – erfolgen.

Zum anderen wird eine *computergestützte Modellformulierung* verwendet. Zwar kann die computergestützte Implementierung eines Modells in einem Projektbericht als „Textdokument“ nicht unmittelbar dargestellt werden, weil sie aus der Modellimplementierung mit der Hilfe von mathematischer Modellierungssoftware auf einem Computer besteht. Aber der Text, der im Rahmen einer solchen Modellierungssoftware zur Spezifizierung eines Modells im sogenannten Modelleditor als kommentierter Programmcode erstellt wird, kann in einem Projektbericht wiedergegeben werden. Gleiches gilt für den Text, der von der Modellierungssoftware zur Beschreibung einer Modelllösung als Lösungsreport generiert wird. Der Einfachheit halber werden im Folgenden beide Textarten, die bei der Benutzung einer mathematischen Modellierungssoftware „produziert“ werden, als computergestützte Modellformulierung bezeichnet. Um Bestandteile der computergestützten Modellformulierung von den Formeln der mathematischen Modellformulierung klar unterscheiden zu können, wird eine besondere Darstellungskonvention eingeführt: Formeln der mathematischen Modellformulierung werden wie „normaler“ Text mittels des Standard-Schrifttyps „Times New Roman“ in 12-Punkt-Größe dargestellt. Bestandteile der computergestützten Modellformulierung werden davon durch den serifenlosen Schrifttyp „Arial“ in 10-Punkt-Größe abgehoben.

Als mathematische Modellierungssoftware wird das Programm LINGO in der aktuellen Version 11.0 eingesetzt.²⁾ Im Folgenden wird ein Modell, das mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO erstellt und eventuell auch gelöst wurde, der Kürze halber als ein LINGO-Modell bezeichnet.

1) Dies betrifft insbesondere die Verwendung von All- oder Existenzquantoren („ \forall “ bzw. „ \exists “), daneben aber auch von logischen Konnektoren, wie z.B. für Subjugate („ \rightarrow “) und Bijugate („ \leftrightarrow “). Vgl. dazu beispielsweise die Formel 14, die schon an früherer Stelle zur Formulierung der Prämisse der Subzyklenfreiheit verwendet wurde.

2) Vgl. SCHRAGE (2003) zu einem Überblick über die mathematische Modellierungssoftware LINGO mit einer großen Vielfalt von Anwendungsbeispielen aus den Bereichen Operations Research und Betriebswirtschaftslehre.

Für die Auswahl der Software LINGO sprechen mehrere Argumente.¹⁾ Es handelt sich um eine international weit verbreitete Modellierungssoftware, sodass die Vielzahl der Installationen – sowohl bei Hochschulen als auch bei Unternehmen – auf eine ausgereifte und verlässliche Software schließen lässt. LINGO besitzt sowohl eine benutzerfreundliche Editor-Komponente für die Erstellung und Modifizierung von Modellen als auch eine Solver-Komponente, die mit sehr leistungsfähigen Standard-Algorithmen des Operations Research für eine große Palette unterschiedlicher Modellklassen ausgestattet ist. Insbesondere überzeugt LINGO dadurch, dass es eine Art der Modellformulierung gestattet, die sich sehr eng an die Notationsweise der mathematischen Modellformulierung anlehnt, wie sie vor allem aus Modellierungen des Operations Research vertraut ist.²⁾ Daher bereitet die Anwendung von LINGO zur computergestützten Implementierung von Modellen – im Vergleich zu anderer mathematischer Modellierungssoftware, wie z.B. CPLEX und MAPLE, – einen relativ geringen „kognitiven Rüstaufwand“ für Benutzer („User“), die aus den Bereichen Operations Research und Betriebswirtschaftslehre stammen.³⁾ Schließlich erweist es sich vor allem im Hochschulbereich als attraktiv, dass LINGO auch auf modernen Personalcomputern eingesetzt und zu „moderaten“ Lizenzgebühren erworben werden kann.

Es wird bewusst darauf verzichtet, dass die mathematische und die computergestützte Modellformulierung für das Tourenplanungsmodell zur Reduzierung von Leertonnenkilometern inhaltlich exakt übereinstimmen. Dies gilt selbst dann, wenn von ihren unterschiedlichen Darstellungsformen und „implementierungstechnischen Details“ abgesehen wird. Die inhaltlichen Unterschiede zwischen der mathematischen und der computergestützten Modellformulierung beruhen darauf, dass mit den beiden Formulierungsweisen im hier vorgelegten Projektbericht unterschiedliche Modellierungszwecke verfolgt werden.

-
- 1) Allerdings soll nicht verschwiegen werden, dass bei der praktischen Anwendung von LINGO im Rahmen des Verbundprojekts MAEKAS auch einige Softwareprobleme zu Tage getreten sind. Sie betreffen einerseits die nicht immer leicht verständliche Funktionsweise der zwar sehr leistungsfähigen, aber auch komplexen Set-Konstrukte (vgl. die nachstehende Fußnote). Die Verständnisprobleme werden dadurch verschärft, dass die präzise Funktionsweise dieser Set-Konstrukte weder in der Online-Hilfe zur Software noch in dem Handbuch zur Software von LINUS SCHRAGE vollständig dokumentiert ist. Daher werden Anwender von LINGO bei anspruchsvolleren Modellierungsaufgaben zuweilen dazu genötigt, mit dieser Modellierungssoftware zu „experimentieren“, um mittels eines „trial and error“-Prozesses herauszufinden, wie die Set-Konstrukte tatsächlich funktionieren. Andererseits mussten bei der Anwendung der zunächst verwendeten „Industrial Version“ erhebliche Effektivitätsprobleme (Nichtauffinden optimaler Lösungen) und Effizienzprobleme (stark anwachsende Rechenzeiten trotz geringer Modellgröße bei „vertrackten“ Modellen) beobachtet werden. Sie scheinen auf einer besonders schwierigen, nicht-konvexen Struktur des hier entwickelten Tourenplanungsmodells zur Reduzierung von Leertonnenkilometern zu beruhen. Die vorgenannten Softwareprobleme trugen im Wesentlichen dazu bei, dass erhebliche Verzögerungen bei der Durchführung des Verbundprojekts MAEKAS im Hinblick auf das Arbeitspaket „Produktoptimierung“ eingetreten sind.
 - 2) Dies trifft zumindest auf die „Basiskonstrukte“ von LINGO zu. Dagegen bereitet die Verwendung der sogenannten Set-Konstrukte, die vor allem zur Implementierung prädikatenlogischer Quantoren dienen, bereits erheblichen Einarbeitungsaufwand. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sollten diese Set-Konstrukte wesentlich benutzerfreundlicher gestaltet sein. Insbesondere wäre eine Notationsweise wünschenswert, die sich enger an die prädikatenlogische Notation von Formeln mit All- oder Existenzquantoren anlehnt.
 - 3) Vgl. aber auch die Vorbehalte gegenüber den Set-Konstrukten in der voranstehenden Fußnote.

Die *mathematische Modellformulierung* wird möglichst *allgemeingültig* gehalten, um ein „generisches“ Tourenplanungsmodell¹⁾ zu erhalten. Das Tourenplanungsmodell soll sich auf eine möglichst große Vielfalt von Ausprägungen des Realproblems²⁾ anwenden lassen, Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu vermeiden und hierdurch – als Operationalisierung des Vermeidungsziels – die anfallenden Leertonnenkilometer zu reduzieren. Ausdruck dieses Strebens nach einer möglichst allgemeingültigen Modellformulierung sind vor allem zwei Aspekte.

Erstens werden *variable Indexmengen* verwendet, deren Umfang nicht durch die Vorgabe eines „größten Elements“ fixiert ist, sondern je nach Bedarf an die Eigenarten der jeweils zu modellierenden Realproblemausprägung (Problemstellung) angepasst werden kann.³⁾ Dies betrifft beispielsweise die Anzahlen von Eisenbahnverkehrsunternehmen und von Haltepunkten in einem Verkehrsnetz, die nicht fest vorgegeben werden, sondern je nach Problemstellung unterschiedlich groß gewählt werden können.

Zweitens wird mit einer Vielzahl von *Modellparametern* gearbeitet, die des Öfteren auch als „symbolische Konstanten“ bezeichnet werden. Solche Modellparameter besitzen aus „modelltechnischer“ Perspektive einen ambivalenten Charakter. Einerseits stellen sie keine Variablen dar, die mit beliebigen Werten aus ihren Definitionsbereichen „belegt“ werden können, um zulässige oder sogar optimale Lösungen für ein Modell zu ermitteln. Andererseits handelt es sich auch nicht um „norma-

-
- 1) Streng genommen handelt sich beim Tourenplanungsmodell, das hier präsentiert wird, nicht um ein Modell, sondern um eine *Klasse gleichartiger Modelle* oder – als Synonyme – um eine *Modellklasse*, ein *Modell-Schema* oder einen *Modelltyp*. Diese Modellklasse kann eine sehr große Anzahl von Modellen, bei einem reellzahligen Definitionsbereich für zumindest einen der Modellparameter sogar potenziell unendlich viele Modelle als Elemente umfassen. Die Modelle, die zu dieser Modellklasse gehören, werden auch als Instanzierungen der Modellklasse oder kurz als „Instanzen“ bezeichnet. Die semantisch präzise Unterscheidung zwischen einer *Modellklasse* auf der *Typenebene* einerseits und ihren zugehörigen *Modellen* auf der *Instanzenebene* andererseits wird im Folgenden aber nicht aufrechterhalten, weil sie die Erörterungen des Tourenplanungsmodells – oder präzise formuliert: der Tourenplanungsmodellklasse – sprachlich erheblich verkomplizieren würde. Daher wird in der Regel nur von einem „Modell“ gesprochen, solange es im aktuellen Argumentationskontext unerheblich oder unmittelbar offensichtlich erscheint, ob bzw. dass damit entweder eine Modellklasse oder aber ein Element aus einer Modellklasse gemeint ist.
 - 2) Analog zur Differenzierung zwischen einer Modellklasse und einem Element aus einer Modellklasse, die in der voranstehenden Fußnote erfolgte, müsste streng genommen auch zwischen „dem“ *Realproblem* auf der *Typebene* (als einer Problemklasse) und seinen vielfältigen *Ausprägungen* auf der *Instanzenebene* (als Elementen der Problemklasse) unterschieden werden. Abermals wird zwecks sprachlicher Vereinfachung auf diese semantisch präzise Unterscheidung verzichtet und stattdessen nur von einem „Problem“ gesprochen, solange es im aktuellen Argumentationskontext unerheblich oder unmittelbar offensichtlich erscheint, ob bzw. dass damit entweder eine Problemklasse oder aber ein Element aus einer Problemklasse gemeint ist.
 - 3) Das „größte Element“ einer variablen Indexmenge lässt sich als eine besondere Form der Modellparameter auffassen, die unmittelbar nachfolgend erläutert werden. Dennoch werden *variable Indexmengen* und *Modellparameter* hier als zwei unterschiedliche Sachverhalte behandelt, weil aus den Perspektiven von Modellkonstruktoren und Modellanwendern die *Indizierungen* von Konstanten, Variablen oder Parametern eines Modells als etwas anderes empfunden werden als die indizierten Konstanten, Variablen oder *Parameter*. Aus diesem Blickwinkel kann auch von einem unterschiedlichen pragmatischen Status von variablen Indexmengen einerseits und Modellparametern andererseits gesprochen werden. Allerdings wird sich bei der späteren Überführung der mathematischen Modellformulierung in eine computergestützte Modellformulierung, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO erfolgt, zeigen, dass dieser unterschiedliche pragmatische Status zumindest auf der Ebene der Modellimplementierung aufgehoben wird. Denn sowohl *variable Indexmengen* als auch *Modellparameter* werden „syntaktisch“ gleichbehandelt, indem für sie in einer sogenannten „Data Section“ jeweils konkrete numerische Werte festzulegen sind, bevor für ein LINGO-Modell zulässige oder sogar optimale Modelllösungen ermittelt werden können.

le“, in der Regel numerisch fixierte Konstanten, die für ein Modell „unveränderlich“ festliegen. Vielmehr kann aus einem Modell eine Vielzahl von strukturgleichen Modellvarianten erzeugt werden, indem lediglich unterschiedliche numerische Werte aus den Definitionsbereichen für die Parameter des Modells eingesetzt werden.¹⁾ Insofern ähneln Modellparameter Variablen, stellen aber nicht Variablen innerhalb eines gewöhnlichen Modells dar, sondern variieren lediglich beim Übergang zwischen Modellvarianten, die eine gemeinsame Modellstruktur aufweisen. Daher erweisen sich Modellparameter als eine Art „Zwitter“, der Aspekte von Konstanten und Variablen in sich vereint. Sie stellen ein sehr leistungsfähiges Instrument dar, um sich bei der Formulierung eines möglichst allgemeingültigen Modells nicht auf unwesentliche Details eines Einzelfalls festlegen zu müssen. Stattdessen reicht es aus, einen Modellparameter als eine Art „Platzhalter“ für solche Details vorzusehen und erst dann durch einen konkreten – in der Regel numerischen – Wert aus seinem Definitionsbereich zu ersetzen, wenn das betroffene Modell auf eine konkrete Ausprägung des jeweils zugrunde liegenden Realproblems angewendet werden soll. Bei dem hier interessierenden Realproblem, die Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen möglichst weitgehend zu vermeiden, stellen z.B. die Traktionskräfte der verfügbaren Lokomotiven und die Ladungskapazitäten der eingesetzten Güterwagen typische Modellparameter dar.

Die *computergestützte Modellformulierung* zielt im Gegensatz zur mathematischen Modellformulierung nicht auf Allgemeingültigkeit ab. Vielmehr soll es die computergestützte Implementierung des Tourenplanungsmodells gestatten, *Lösungen* für das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell zu *ermitteln*. Mithilfe solcher Modelllösungen soll analysiert werden, ob – und im positiven Fall: in welchem Ausmaß – das Tourenplanungsmodell geeignet ist, zur Bewältigung des Realproblems beizutragen, Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu vermeiden und dadurch Leertonenkilometer zu reduzieren.

Modelllösungen lassen sich mit der hier eingesetzten mathematischen Modellierungssoftware nur dann ermitteln, wenn ein konkretes, auf einen Einzelfall bezogenes Tourenplanungsmodell²⁾ be-

-
- 1) Bei dem „Modell“ handelt es sich streng genommen um eine Modellklasse. Die Vielzahl von strukturgleichen „Modellvarianten“, die aus diesem „Modell“ durch Einsetzen unterschiedlicher numerischer Werte aus den Definitionsbereichen für die Modellparameter erzeugt werden können, stellen Elemente aus der Modellklasse dar. Die Verwendung von Modellparametern dient also zur Spezifizierung einer Modellklasse. Mithilfe der Modellparameter wird zugleich den Übergang von der Typ- auf die Instanzenebene operationalisiert, indem für jede Instanziierung der Modellklasse für jeden Modellparameter ein konkreter, in der Regel numerischer Wert aus seinem Definitionsbereich auszuwählen ist. Die Elemente der Modellklasse, die auf diese Weise instanziiert oder generiert werden, besitzen alle dieselbe Modellstruktur, weil sie sich nur im Hinblick auf die konkreten Parameterwerte unterscheiden. Auf diese Weise lässt sich eine Vielzahl numerisch unterschiedlicher Varianten desselben „Modells“, d.h. von Elementen einer Modellklasse, erzeugen. Daher erfreut sich das Instrument der „parametrischen“ oder „parametrisierten“ Modellformulierung (oder präzise: der Spezifizierung einer Modellklasse) bei der praktischen Konstruktion von Modellen in den Bereichen Operations Research und Betriebswirtschaftslehre einer großen Beliebtheit.
 - 2) Bei jedem konkreten, auf einen Einzelfall bezogenen Tourenplanungsmodell handelt es sich streng genommen um ein Element aus der Klasse aller Modelle, die durch das oben erwähnte generische Tourenplanungsmodell spezifiziert wird. Die *computergestützte* Modellformulierung betrifft daher stets die *Instanzenebene*, die durch Formulierungen wie „konkretes Modell“ und „Einzelfall“ adressiert wird. Dagegen bezieht sich die *mathematische* Modellformulierung auf die *Typeebene*, auf der es um eine Klasse gleichartiger Modelle geht. Wenn vom „generischen Tourenplanungsmodell“ die Rede ist, wird also streng genommen kein einzelnes Modell angesprochen, sondern die Klasse aller Modelle, welche die Struktur des Modell-Schemas für das generische Tourenplanungsmodell aufweisen.

trachtet wird.¹⁾ Daher muss sich die computergestützte Modellformulierung stets auf eine konkrete Ausprägung des Realproblems beziehen. Dies ist nur dann der Fall, wenn das Tourenplanungsmodell weder variable Indexmengen noch Modellparameter umfasst.

Dennoch besteht ein großes Interesse daran, auch eine computergestützte Modellformulierung, die „eigentlich“ nur auf eine konkrete Ausprägung des Realproblems bezogen ist, von vornherein so flexibel auszulegen, dass sie sich sehr leicht an andere Realproblemausprägungen („Einzelfälle“) anpassen lässt, ohne die Modellstruktur verändern zu müssen.²⁾ Als probates Instrument zur Realisierung dieser Modellflexibilität dient eine Zweiteilung der Struktur der computergestützten Modellformulierung in einen Modellkern und eine Modellperipherie. Diese Zweiteilung der Modellstruktur führt dazu, dass Modellparameter – metaphorisch gesprochen „durch die Hintertür“ – doch wieder in die Modellformulierung eingehen.

-
- 1) Die Einschränkung auf ein konkretes Tourenplanungsmodell („Einzelfall“) betrifft nicht nur die hier eingesetzte mathematische Modellierungssoftware LINGO, sondern jede mathematische Modellierungssoftware, die in den Bereichen Operations Research und Betriebswirtschaftslehre „üblich“ ist. Diese Einschränkung würde nur dann nicht gelten, wenn eine Software mit der Fähigkeit zur „symbolischen“ oder „analytischen“ Optimierung benutzt würde. Sie wäre in der Lage, auch für Optimierungsmodelle mit symbolischen Konstanten (Modellparametern) auf „analytische“ Weise optimale Modelllösungen zu ermitteln, die jeweils von den numerisch nicht spezifizierten Modellparametern abhängen. Software mit dieser Fähigkeit stellen z.B. die Programme MACSYMA, MAPLE, MATHEMATICA und MATLAB dar. Sie erweisen sich zwar aus mathematischer Perspektive als hochleistungsfähig, lassen sich aber nicht nutzen, um Modelle wie das hier betrachtete Tourenplanungsmodell zu lösen. Dies beruht vor allem darauf, dass die „symbolische“ oder „analytische“ Ermittlung optimaler Modelllösungen praktisch immer auf Anwendungen der Differenzialrechnung (oder im Extremfall der Integralrechnung) beruht. Nahezu alle Kalküle der Differenzialrechnung setzen aber mindestens zweimal stetig differenzierbare Funktionen voraus, so dass für die Entscheidungsvariablen nur reellzahlige (oder zumindest rationalzahlige) Definitionsbereiche in Betracht kommen. Diese Anwendungsvoraussetzung wird aber vom hier betrachteten Tourenplanungsmodell und verwandten Modellen, wie z.B. auch dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, verletzt, weil die Entscheidungsvariablen zum Typ der „ganzzahligen“ Binärvariablen gehören. Für solche ganzzahligen Modelle ist den Verfassern keine Software bekannt, die zu einer „symbolischen“ oder „analytischen“ Ermittlung optimaler Modelllösungen fähig wäre.
 - 2) Es stellt ein nicht-triviales Problem dar zu definieren, was unter der *Struktur* eines Modells zu verstehen ist. Letztlich handelt es sich bei jedem Versuch, den Terminus technicus „Modellstruktur“ zu definieren, um eine willkürliche definitonische Setzung, die jedoch „zweckmäßig“ getroffen werden sollte. Dies gilt zumindest insofern, als kein essentialistisches oder begriffsrealistisches, sondern – wie auch von den Verfassern dieses Projektberichts – ein nominalistisches Begriffsverständnis zugrunde gelegt wird. Die „Zweckmäßigkeit“ der Begriffsdefinition wird hier in Bezug auf den Zweck der Modellanpassung ausgelegt, die in Kürze zu einer Unterscheidung zwischen einem Modellkern und einer Modellperipherie führen wird. Aus dieser speziellen, „zweckgeleiteten“ Perspektive wird die Struktur eines Modells wie folgt indirekt (da nur auf Veränderungen der Modellstruktur bezogen) definiert: Die *Struktur* eines Modells bleibt so lange *unverändert* („invariant“), wie das betroffene Modell entweder überhaupt nicht verändert wird oder aber nur mindestens einer der konkreten Werte, die den *Modellparametern* zugeordnet sind, verändert wird. Die rein „parametrische“ Variation eines Modells ändert also per definitionem dessen Modellstruktur nicht. Dagegen wird von einer *Veränderung der Modellstruktur* gesprochen, sobald eine Veränderung von mindestens einem Modellbestandteil erfolgt, die sich nicht als die Variation des Werts von mindestens einem Modellparameter darstellen lässt. Dies kann beispielsweise die Veränderung der mathematischen Gestalt einer Funktion betreffen, das Hinzufügen einer neuartigen Restriktion in das Modell oder das Entfernen einer früher verwendeten Restriktion aus dem Modell sowie die Veränderung des Definitionsbereichs für eine Entscheidungsvariable oder eine modellendogene Variable. In allen – wie den zuvor exemplarisch angeführten – Fällen, in denen nicht nur der Wert von mindestens einem Modellparameter variiert wird, liegt per conventionem eine veränderte Modellstruktur vor.

Der *Modellkern* stellt diejenige Komponente einer computergestützten Modellformulierung dar, die bei der Modellanpassung an unterschiedliche Realproblemausprägungen so weit wie möglich unverändert bleiben soll.¹⁾ Dies wird dadurch erreicht, dass im Modellkern umfangreicher Gebrauch von Modellparametern gemacht wird, deren konkrete Werte im Modellkern nicht festgelegt werden. Daher bleibt der Modellkern so lange „unversehrt“, wie sich die Tourenplanung an unterschiedliche Realproblemausprägungen lediglich dadurch anpassen lässt, dass die Modellparameter des Modellkerns mit verschiedenen, für die jeweils betrachtete Realproblemausprägung spezifischen Werten „belegt“ werden.

Die *Modellperipherie* umfasst alle übrigen Komponenten einer computergestützten Modellformulierung, die nicht den Modellkern darstellen. Dazu gehört bei der mathematischen Modellierungssoftware LINGO vor allem eine sogenannte „Data Section“. Sie dient ausschließlich dem Zweck, für alle Modellparameter (symbolische Konstanten), die im Modellkern verwendet werden, jeweils einen konkreten, und zwar numerischen Wert festzulegen. Dadurch werden Modellparameter aus der computergestützten Modellformulierung „im Prinzip“ eliminiert, weil die mathematische Modellierungssoftware jeden Modellparameter aus dem Modellkern zunächst durch seinen konkreten numerischen Wert aus der „Data Section“ ersetzt, bevor computergestützt versucht wird, eine Modelllösung für eine modellierte Ausprägung des Realproblems zu ermitteln. Auf diese Weise bleibt einerseits der Ausschluss von Modellparametern aus der computergestützten Modellformulierung weiterhin wirksam, sofern als Modellformulierung die Gesamtheit aus Modellkern und Modellperipherie betrachtet wird. Andererseits können Modellanpassungen an unterschiedliche konkrete Ausprägungen des Realproblems in einem weiten Bereich von Realproblemausprägungen²⁾ darauf beschränkt werden, in der Modellperipherie, und zwar präzise in der „Data Section“, die Festlegungen konkreter numerischer Werte für die Modellparameter aus dem Modellkern zu variieren. Dadurch wird eine sehr flexible computergestützte Modellformulierung erreicht, die sowohl die Einzelfall-Fokussierung des Modells auf eine konkrete Ausprägung des Realproblems als auch die leichte Anpassbarkeit des Modells an eine möglichst große Spannbreite unterschiedlicher Realproblemausprägungen gestattet.

Um den voranstehenden Anforderungen an eine computergestützte Modellformulierung gerecht zu werden, muss der Modellierung ein „Einzelfall“, d.h. eine konkrete Ausprägung des Realproblems, zugrunde gelegt werden. Hierfür dient das *praktische Optimierungsbeispiel* der Neusser Eisenbahn, das im Kapitel 5.3.2 ausführlicher vorgestellt wurde. Es ist einerseits so klein, dass das hierauf bezogene Tourenplanungsmodell kompakt und übersichtlich bleibt. Andererseits erweist sich dieses

-
- 1) Die mathematische Modellierungssoftware bietet ein transparentes Ausdrucksmittel, um diesen Modellkern zu spezifizieren und von der Modellperipherie klar abzugrenzen. Es handelt sich um das softwaretechnische Konstrukt „SUBMODEL ... ENDSUBMODEL“. Dieses Konstrukt wird in der computergestützten Formulierung des Tourenplanungsmodells, die später präsentiert wird (vgl. Kapitel 7.3.2), verwendet und dort – in Übereinstimmung mit den hier vorgetragenen Erläuterungen – als „SUBMODEL Modellkern ... ENDSUBMODEL“ bezeichnet.
 - 2) Es wäre unrealistisch zu erwarten, dass sich alle konkreten Ausprägungen des zugrunde liegenden Realproblems lediglich dadurch erfassen lassen, dass die konkreten Werte für Modellparameter in problemausprägungsspezifischer Weise variiert werden. Vielmehr können Ausprägungen des zugrunde liegenden Realproblems auch dazu führen, dass – über Variationen der Werte von Modellparametern hinaus – auch andere Modellbestandteile verändert werden müssen, wie z.B. die mathematische Gestalt einer Funktion, das Hinzufügen einer neuartigen Restriktion oder das Entfernen einer früher verwendeten Restriktion sowie die Veränderung des Definitionsbereichs für eine Entscheidungsvariable oder eine modellendogene Variable.

Optimierungsbeispiel bereits als so komplex, dass sich in ihm die meisten der hier interessierenden, in den Kapiteln 6.1 und 6.2.1 beschriebenen Aspekte des Realproblems für Eisenbahnverkehrsunternehmen wiederfinden.¹⁾

Abschließend werden der Vollständigkeit halber²⁾ einige wenige Voraussetzungen aufgelistet, die es für die mathematische und die computergestützte Formulierung des Tourenplanungsmodells zu beachten gilt. Es handelt sich um Voraussetzungen „technischen“ Charakters (modellierungstechnische Voraussetzungen), die nicht in der „Natur“ des zugrunde liegenden Realproblems begründet sind, sondern lediglich den praktischen Umgang mit den beiden Modellformulierungen betreffen. Zum einen handelt es sich um Voraussetzungen, die letztlich willkürlich sind und daher auch durch andere Voraussetzungen ersetzt werden könnten (kontingente Voraussetzungen). Dies betrifft z.B. Konventionen für die Notation von formalsprachlichen Konstrukten. Zum anderen ergeben sich die Voraussetzungen aus Einschränkungen, denen die hier eingesetzte mathematische Modellierungssoftware LINGO unterliegt (softwarespezifische Voraussetzungen). Dazu gehört vor allem die Unzulässigkeit einiger formalsprachlicher Konstrukte, die sich von der Modellierungssoftware nicht verarbeiten lassen.

Die modellierungstechnischen Voraussetzungen umfassen im Einzelnen die nachfolgend angeführten Aspekte:

1. In einer computergestützten Modellformulierung dürfen als *Indizes* von Konstanten, Variablen und Parametern nur Konstrukte verwendet werden, deren zulässige Werte im Tourenplanungsmodell von vornherein („a priori“) explizit bekannt sind und nicht erst aus einer Modelllösung „a posteriori“ hervorgehen. Beispielsweise muss für eine Entscheidungsvariable x_n mit dem Index „n“, für die „ $n = 1, \dots, N$ “ gelten soll, der größtmögliche Indexwert „N“ von vornherein bekannt und konstant sein. Falls für den größtmöglichen Indexwert „N“ im Interesse einer flexiblen Modellformulierung eine Variable verwendet wird, muss ihr konstanter Wert in der „Data Section“ zu Beginn der Modellformulierung festgelegt, also modellexogen („von außen“) vorgegeben werden. Diese Voraussetzung a priori und explizit bekannter, zulässiger Indexwerte entspricht dem o.a. Ausschluss variabler Indexmengen aus der computergestützten Modellformulierung.

1) Das praktische Optimierungsbeispiel ist trotz seiner Übersichtlichkeit sogar schon so komplex, dass einige Aspekte mit dem hier vorgestellten Tourenplanungsmodell nicht berücksichtigt werden können. Es handelt sich zumindest um die beiden Optionen, einen Güterzug im Haltepunkt Neuss seine Tour mit zwei Lokomotiven beginnen zu lassen sowie eine der beiden Lokomotiven im Haltepunkt Oberhausen zu „parken“, um auf künftige Nachfragesteigerungen möglichst flexibel reagieren zu können. Daher sollte das praktische Optimierungsbeispiel nicht unterschätzt werden.

2) Streng genommen werden hier nicht alle, sondern nur diejenigen modellierungstechnischen Voraussetzungen angeführt, die den Verfassern als „besonders wichtig“ erscheinen, weil sie bei der Modellierung des Realproblems mehrfach zu berücksichtigen sind. Dagegen werden modellierungstechnische Voraussetzungen, die nur von punktueller Bedeutung sind, an den jeweils betroffenen Stellen der Modellierung erwähnt.

2. Die *Formeln* einer computergestützten Modellformulierung dürfen nur Operatoren sowie Gleichungen, Ungleichungen und ähnliche Relationen umfassen, die in der eingesetzten mathematischen Modellierungssoftware tatsächlich implementiert sind.¹⁾ Dies bedeutet für die hier verwendete mathematische Modellierungssoftware LINGO, dass *logische Operatoren* wie Negate (\neg), Adjugate (\vee), Disjugate (\forall), Subjugate (\rightarrow) und Bijugate (\leftrightarrow) in der computergestützten Modellformulierung nicht auftauchen dürfen. Lediglich Konjugate (\wedge) sind insofern zulässig, als alle Formeln bei der Verwendung von mathematischer Modellierungssoftware implizit als konjunktiv verknüpft vorausgesetzt werden.
3. Einzelne Sachverhalte, die in der Konzeptualisierung des Realproblems als *atomare*, also nicht weiter aus anderen Objekten zusammengesetzte *Objekte* („Individuen“, „Entitäten“) erscheinen, werden sowohl in der mathematischen als auch in der computergestützten Modellformulierung mit *Großbuchstaben* notiert. Dies betrifft z.B. die Haltepunkte „HP“ eines Verkehrsnetzes und die Eisenbahnverkehrsunternehmen „EVU“, die miteinander kooperieren. Dagegen werden Attribute (Eigenschaften) von Objekten sowie Relationen (Beziehungen) zwischen Objekten jeweils mit Kleinbuchstaben notiert. Gleiches gilt für die Entscheidungsvariablen und die modellendogenen Variablen des Tourenplanungsmodells, weil sie keine „Individuen“, sondern Relationen (insbesondere Zuordnungsbeziehungen) zwischen Objekten dieses Modells herstellen.
4. Für die *symbolische Bezeichnung* von Konstanten, Variablen, Parametern, Funktionen und Relationen werden möglichst „selbsterklärende“ Notationen verwendet, die zwar etwas umfangreicher ausfallen als in sonst üblichen Modellen des Operations Research, dafür aber eine hohe mnemotechnische Qualität besitzen.²⁾ Dies hat den Vorteil, dass sich ein formalsprachlich verfasstes Tourenplanungsmodell – dies gilt sowohl für die mathematische als auch für die computergestützte Modellformulierung – anhand der Bezeichnungen seiner o.a. Bestandteile nahezu „von selbst“ lesen und verstehen lässt. In dieser Hinsicht erfolgt eine bewusste Abgrenzung von zahlreichen anderen Modellen des Operations Research, die zwar „Professionalität“ für sich in

1) Beispielsweise sind in der mathematischen Modellierungssoftware LINGO Operatoren zur Ermittlung minimaler und maximaler Elemente aus einer (ungeordneten) Menge, in der kein Element mehrfach auftreten darf, oder aus einer (geordneten) Liste, die dasselbe Element mehrfach enthalten darf, implementiert. Daher dürfen in einer computergestützten Modellformulierung Operatoren zur Ermittlung minimaler und maximaler Elemente verwendet werden.

2) Allerdings muss eingeräumt werden, dass eine konsequente Umsetzung des Anspruchs, „selbsterklärende“ Bezeichnungen für die Konstanten, Variablen, Parameter, Funktionen und Relationen eines formalsprachlichen Modells zu verwenden, oftmals zu derart langen und umständlich anmutenden Bezeichnungen führt, dass eine „aufgeblähte“ und umständlich anmutende Modellformulierung resultiert. Insbesondere werden die Bezeichnungen für Modellbestandteile des Öfteren so lang, dass es schwer fällt, einzelne Modellkomponenten, wie etwa eine Restriktion oder eine Zielfunktion, in einer kompakten Weise auszudrücken, die übersichtlich bleibt und möglichst auf eine Zeile oder nur wenige Zeilen in der Spezifizierung des betroffenen Modells beschränkt bleibt. Wegen dieses „trade offs“ zwischen einerseits dem Bemühen, „selbsterklärende“ Bezeichnungen zu verwenden, und andererseits dem Wunsch, kompakte und übersichtlich wirkende Modelle zu formulieren, wird bei der Formulierung des Tourenplanungsmodells versucht, einen „akzeptablen“ Kompromiss zwischen den beiden vorgenannten Desideraten herbeizuführen. Es wird hier nicht näher erörtert, was unter einem solchen „akzeptablen“ Kompromiss konkret zu verstehen ist und auf welcher Skala sich der Akzeptabilitätsbegriff operationalisieren lässt. Stattdessen wird an ein „intuitives Vorverständnis“ der Leser appelliert, die selbst einzuschätzen vermögen, wie sich ein solcher „akzeptabler“ Kompromiss beurteilen lässt.

Anspruch nehmen, aber mit derart „kryptischen“¹⁾ und kurzen Bezeichnungen für Modellbestandteile arbeiten, dass sich die Modelle ohne vielfache Konsultationen einer „Legende“ für die Erläuterung der intendierten Bedeutungen der symbolischen Bezeichnungen nicht „verstehen“ lassen.

1) Eine „Unsitte“ bei der formalsprachlichen Formulierung von Modellen des Operations Research besteht z.B. darin, Modellbestandteile mit nur jeweils einem Buchstaben zu bezeichnen und dabei – wenn der Buchstabenvorrat des landessprachlichen Alphabets zur Neige geht oder wenn besonderer wissenschaftlicher „Anspruch“ suggeriert werden soll – in umfangreicher Weise auf weniger aussagekräftige Buchstaben insbesondere des griechischen Alphabets zurückzugreifen.

7.2 Komponenten des Tourenplanungsmodells

7.2.1 Verkehrsnetz

Die wesentlichen graphentheoretischen Grundlagen, die zur Modellierung eines Verkehrsnetzes in der Gestalt eines gerichteten Graphen¹⁾ erforderlich sind, wurden bereits im Kapitel 6.2.1.1 erläutert. Daher kann auf die dort eingeführten Konstrukte, Notationsweisen und Definitionen zurückgegriffen werden. Sie werden im Folgenden nur dann wiederholt, wenn es zur leichteren Verständlichkeit der Ausführungen angezeigt erscheint. Es erfolgen auch einige Abweichungen von den früher eingeführten Notationsweisen und Definitionen, um das hier entwickelte Tourenplanungsmodell noch stärker auf das zugrunde liegende Realproblem zuzuschneiden²⁾, Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen zu vermeiden, und um die Lesbarkeit der mathematischen und der computer-gestützten Modellformulierung zu verbessern³⁾.

Das *Verkehrsnetz* des Tourenplanungsmodells ist ein gerichteter Graph $VN = (KN, KA)$ mit der Knotenmenge KN und der Kantenmenge KA .

Jeder *Knoten* HP_n aus der Knotenmenge KN ist ein *Haltepunkt* für Güterbahnen mit $n = 1, \dots, N$ sowie mit $N \in \mathbb{N}_+$ und $N \geq 2$ für die Anzahl N aller Haltepunkte im Verkehrsnetz VN . Ein solcher Haltepunkt HP_n kann einerseits einen Güterbahnhof darstellen, der sich von einem Eisenbahnverkehrsunternehmen in mehreren Funktionen nutzen lässt: als Heimatbahnhof (Depot) zur Stationierung seiner Lokomotiven und Güterwagen, solange sie sich nicht in produktivem Einsatz befinden, als Durchfahrbahnhof, den Güterzüge des Eisenbahnverkehrsunternehmens auf ihren Touren lediglich passieren, als Umschlagsbahnhof, auf dem Güterzüge des Eisenbahnverkehrsunternehmens auf ihren Touren mit Gütern beladen oder von Gütern entladen werden, sowie als Rangierbahnhof, auf dem Güterzüge zusammengestellt, hinsichtlich ihrer Zusammensetzung aus Güterwagen verändert oder wieder aufgelöst werden. Andererseits kann ein Haltepunkt HP_n auch einen Gleisanschluss

-
- 1) Der Einfachheit halber wird im Folgenden zwischen dem modellierten Verkehrsnetz aus dem zugrunde liegenden Realproblem und dem gerichteten Graphen, der dieses Verkehrsnetz modelliert, nicht mehr unterschieden. Daher kann auch der gerichtete Graph selbst als Verkehrsnetz angesprochen werden. Von dieser vereinfachenden Rede-weise kann so lange Gebrauch gemacht werden, wie aus dem aktuellen Argumentationskontext ersichtlich ist, ob jeweils entweder eine Konstituente des Realproblems (das „eigentliche“ Verkehrsnetz) oder aber ein Bestandteil des Modells (der gerichtete Graph, der das Verkehrsnetz repräsentiert) gemeint ist. Unter derselben Voraussetzung wird die Konvention, Bezeichnungen für Konstituenten des Realproblems auf entsprechende Bestandteile des Tourenplanungsmodells zu übertragen und dann nicht mehr ausdrücklich zwischen modelliertem Realproblem und Modell zu differenzieren, auch auf andere Realproblemkonstituenten bzw. Modellbestandteile angewendet. Dieser Differenzierungsverzicht vereinfacht nicht nur die natürlichsprachliche Erläuterung des Tourenplanungsmodells. Darüber hinaus hat er auch den großen Vorteil, mithilfe einer natürlichsprachlichen Bezeichnung für einen formal-sprachlichen Modellbestandteil direkt jenen Sachverhalt ausdrücken zu können, der im modellierten Realproblem dem jeweils bezeichneten Modellbestandteil zugrunde liegt.
 - 2) Beispielsweise wird die Kantenmenge des gerichteten Graphen neu definiert, weil die Prämisse der vollständigen Verknüpftheit im Hinblick auf reale Verkehrsnetze aufgegeben wird. Darauf wird noch näher eingegangen.
 - 3) Beispielsweise werden die Knoten des gerichteten Graphen nicht mehr wie früher – und wie auch für Tourenplanungsmodelle im Operations Research oftmals üblich – mit „nackten“ Zahlen „n“ bezeichnet, sondern mit aussagekräftigeren Symbolen HP_n , die jeweils „selbsterklärend“ auf einen Haltepunkt im zugrunde liegenden Verkehrsnetz verweisen. Analog dazu werden die Kanten des gerichteten Graphen nicht mehr wie früher als „abstrakte“ 2-Tupel (i, j) mit wiederum „nackten“ Zahlen „i“ und „j“ als Komponenten dargestellt. Stattdessen werden diese Kanten mit aussagekräftigeren Symbolen $s_{i,j}$ bezeichnet, die sich in abermals „selbsterklärender“ Weise auf jeweils eine (Gleis-) Strecke im zugrunde liegenden Verkehrsnetz beziehen.

darstellen, der von aktuellen oder potenziellen Kunden eines Eisenbahnverkehrsunternehmens für das Be- oder Entladen von Gütern genutzt wird (aktiver Gleisanschluss) oder zumindest nach einer entsprechenden Reaktivierung genutzt werden könnte (passiver Gleisanschluss). Darüber hinaus lassen sich noch weitere reale „Lokalitäten“ vorstellen, die in einem realen Verkehrsnetz die Rolle eines Haltepunkts spielen. Dazu gehören vor allem sogenannte „Hubs“ oder „Rail-Ports“, die vor allem zum Güterumschlag zwischen Güterzügen und den Transportmitteln anderer Verkehrsträger – insbesondere Lastkraftwagen – dienen. Man mag darüber streiten, ob es sich bei „Hubs“ oder „Rail-Ports“ lediglich um eine Sonderform konventioneller Güterbahnhöfe handelt. Diese Frage kann hier jedoch unbeantwortet bleiben, weil letztlich die „begriffliche Systematik“ der unterschiedlichen Ausprägungen von Haltepunkten nicht näher interessiert. Wesentlich für das Tourenplanungsmodell ist lediglich, dass das Konstrukt „Haltepunkt HP_n im Verkehrsnetz“ offen gehalten wird für beliebige Komponenten eines Verkehrsnetzes, die sich von einem Eisenbahnverkehrsunternehmen als Standorte für sein Equipment und als Ab-, Durch- oder Anfahrtorte seiner Güterzüge nutzen lassen.

Jede *Kante* (HP_i, HP_j) aus der Kantenmenge KA ist eine *Gleisstrecke*¹⁾ des Verkehrsnetzes, auf der ein Güterzug von einem Haltepunkt HP_i mit $i \in \{1, \dots, N\}$ *direkt* zu einem *anderen* Haltepunkt HP_j mit $j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\}$ ²⁾ verkehren kann. Dies bedeutet einerseits, dass die Kantenmenge KA *kein* Paar (HP_i, HP_j) enthält, falls in der Realität *keine* Gleisstrecke direkt vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j führt. Da dieser Fall in realen Verkehrsnetzen des Öfteren eintritt, sogar den Normalfall darstellt, darf an der *Prämisse* der *vollständigen Verknüpftheit* für den gerichteten Graphen eines Verkehrsnetzes, die früher im Rahmen der graphentheoretischen Grundlagen aufgestellt wurde und in Tourenplanungsmodellen des Operations Research weit verbreitet ist, im Interesse einer möglichst realitätsadäquaten Modellierung nicht mehr festgehalten werden.³⁾ Andererseits bleibt die *Prämisse* der *1-Zyklen-Freiheit* für den gerichteten Graphen eines Verkehrsnetzes unverändert gül-

-
- 1) In synonymer Weise kann auch von einer „Eisenbahntrasse“ oder einem „Schienenweg“ gesprochen werden. Analog zur früheren Diktion im Kontext der graphentheoretischen Grundlagen wird als weiteres Synonym die Bezeichnung „Strecke“ verwendet, bei der jedoch der Realitätsbezug zum Verkehrsträger Schiene verblasst.
 - 2) Es werden hier bewusst die Notationen $i \in \{1, \dots, N\}$ und $j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\}$ anstelle der ebenso vorstellbaren Notationen $i = 1, \dots, N$ bzw. $j = 1, \dots, N$ mit $j \neq i$ verwendet. Denn die beiden letztgenannten Notationen suggerieren, dass die Indizes i bzw. *alle* zulässigen Werte von 1 bis N (mit Ausnahme der Kombination (i, j) mit $j = i$ wegen der vorausgesetzten 1-Zyklen-Freiheit) durchlaufen. Dies muss jedoch keineswegs der Fall sein. Stattdessen kann durchaus der Fall eintreten, dass ein – hier beliebig herausgegriffener – Haltepunkt HP_i mit $i \in \{1, \dots, N\}$ im zugrundeliegenden Verkehrsnetz mit einem anderen – hier ebenso beliebig herausgegriffenen – Haltepunkt HP_j mit $j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\}$ *nicht* durch eine Gleisstrecke verknüpft ist. Dann stellt das Paar (HP_i, HP_j) *keine* Kante des Verkehrsnetzes VN dar.
Entsprechend zu den voranstehenden Erläuterungen ist in der nachfolgenden Formel (31) die Mengenschreibweise „ $\{\dots\}$ “ in einer besonderen Weise zu interpretieren: Im Allgemeinen bezeichnet der Ausdruck $\{x_n \mid n = 1, \dots, N\}$ *die* Menge *aller* x_n mit den Indizes von 1 bis N . Dagegen bezeichnet im hier erläuterten Kontext der Formel (31) der Ausdruck $\{x_n \mid n \in \{1, \dots, N\}\}$ *eine* Menge *von* x_n mit Indizes aus der Indexmenge $\{1, \dots, N\}$.
 - 3) Analog zur Formel (3), in der wegen der dort vorausgesetzten vollständigen Verknüpftheit der Kantenmenge KA die Beziehung $KA = (KN \times KN \setminus id)$ galt, kann hier nach der Aufgabe der Prämisse vollständiger Verknüpftheit für die Kantenmenge KA in der nachstehenden Formel (31) nur noch die schwächere Beziehung $KA \subseteq (KN \times KN \setminus id)$ zutreffen. In der Regel wird sogar $KA \subset (KN \times KN \setminus id)$ gelten, weil zumeist mindestens ein Paar (HP_i, HP_j) aus der Bezugsmenge $KN \times KN \setminus id$ existiert, das *keine* Gleisstrecke im realen Verkehrsnetz darstellt und somit *nicht* zur Kantenmenge KA des Verkehrsnetzes VN gehört. Da jedoch als Grenzfall nicht ausgeschlossen werden kann, dass in einem realen Verkehrsnetz jeder Haltepunkt mit jedem anderen Haltepunkt direkt mittels einer Gleisstrecke verknüpft ist, wird $KA = (KN \times KN \setminus id)$ ebenso zugelassen. Da sowohl die Beziehung $KA \subset (KN \times KN \setminus id)$ als auch die Beziehung $KA = (KN \times KN \setminus id)$ zutreffen kann, gilt insgesamt die bereits oben erwähnte, schwächere Beziehung $KA \subseteq (KN \times KN \setminus id)$.

tig,¹⁾ weil es in der modellierten Realität keinen „Sinn“ machen würde, dass ein Güterzug auf einer seiner Touren von einem Haltepunkt HP_i abfährt und zum selben Haltepunkt HP_i unmittelbar zurückkehrt. Deshalb bleiben Paare (HP_i, HP_j) mit $j = i$ weiterhin aus der Kantenmenge KA ausgeschlossen.

Aufgrund der voranstehenden Vereinbarungen gilt das Verkehrsnetz VN des Tourenplanungsmodells, das einen gerichteten Graphen mit folgenden Eigenschaften darstellt:

$$VN = (KN, KA) \quad (29)$$

$$KN = \{HP_n \mid n = 1, \dots, N\} \text{ mit } N \subset \mathbb{N}_+ \text{ und } N \geq 2 \quad (30)$$

$$KA = \left\{ (HP_i, HP_j) \mid \exists i \in \{1, \dots, N\} \exists j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : HP_i \in KN \wedge HP_j \in KN \right\} \subseteq (KN \times KN \setminus id) \quad (31)$$

Für die Kanten (HP_i, HP_j) aus der Kantenmenge KA wird im Folgenden als nicht identische, aber äquivalente Notation $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ eingeführt.²⁾ Das Symbol $s_{i,j}$ bezeichnet auch weiterhin eine Gleisstrecke (oder kurz Strecke), die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt. Die kompaktere Notation $s_{i,j}$ erlaubt aber mitunter, insbesondere in der computergestützten Modellformulierung, eine einfachere Ausdrucksweise als die etwas umständlich wirkende Notation mithilfe der 2-Tupel (HP_i, HP_j) . Schließlich wird zur Vereinfachung von Formeln und ihren Erläuterungen im Folgenden als eine formalsprachlich „mutige“³⁾, aber hilfreiche Notationskonvention eingeführt: Die „abkürzenden“ Schreibweisen $s_{i,j} \in KA$ und $s_{i,j} \notin KA$ treffen für eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ genau dann zu, wenn $(HP_i, HP_j) \in KA$ bzw. $(HP_i, HP_j) \notin KA$ gelten.

Die Definition des Verkehrsnetzes $VN = (KN, KA)$ ist von vornherein so flexibel angelegt, dass zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j sowohl bidirektionale Verbindungen als auch unidirektionale Verbindungen möglich sind. Bei einer bidirektionalen Verbindung bestehen „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ mit $s_{i,j} \in KA$ bzw. $s_{j,i} \in KA$, auf denen Güterzüge – oder auch nur Lokomotiven bei Lokzug-Fahrten – zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j in beiden Richtungen verkehren können. Bei einer unidirektionalen Verbindung gibt es nur eine Gleisstrecke zwischen den beiden Haltepunkten HP_i und HP_j , die nur in einer Richtung benutzt werden kann, so dass entweder $s_{i,j} \in KA$ und $s_{j,i} \notin KA$ oder aber $s_{i,j} \notin KA$ und $s_{j,i} \in KA$ gilt. Schließlich gilt $s_{i,j} \notin KA$ und $s_{j,i} \notin KA$, falls zwei Haltepunkte HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes durch keine Gleisstrecke direkt miteinander verbunden sind.

-
- 1) In der Formel (31) wird die 1-Zyklen-Freiheit analog zur früher angeführten Formel (3) durch die Formelbestandteile „ $\{i\}$ “ und „ id “ ausgedrückt. Sie gewährleisten jeweils, dass Gleisstrecken $s_{i,i}$ mit $s_{i,i} = (HP_i, HP_i)$, die einen Haltepunkt HP_i mit sich selbst verbinden würden, von vornherein ausgeschlossen sind.
 - 2) Zu beachten ist, dass in der Formel (31) die klarstellende Teilformel $KA \subseteq (KN \times KN \setminus id)$ nicht hätte verwendet werden können, wenn die Kantenmenge KA von vornherein aus den Gleisstrecken $s_{i,j}$ konstruiert worden wäre. Denn dann hätte es zu Beginn der Formel (31) anstelle von $KA = \{(HP_i, HP_j) \mid \dots\}$ heißen müssen: $KA = \{s_{i,j} \mid \dots\}$. Die Gleisstrecken $s_{i,j}$ sind jedoch im Gegensatz zu den Haltepunkten HP_n keine Elemente der Knotenmenge KN , so dass bei einem Formelbeginn $KA = \{s_{i,j} \mid \dots\}$ die klarstellende Teilformel $KA \subseteq (KN \times KN \setminus id)$ nicht mehr korrekt definiert gewesen wäre.
 - 3) Vgl. dazu die voranstehende Fußnote, in der darauf hingewiesen wurde, dass die Gleisstrecken $s_{i,j}$ bei einer formalsprachlich strengen Betrachtungsweise keine Elemente der Kantenmenge KA sind.

Die „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ mit $s_{i,j} \in KA$ bzw. $s_{j,i} \in KA$, die für den Fall einer bidirektionalen Verbindung zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j angeführt wurden, bedürfen einer besonderen Erläuterung für die Verwendung der Anführungszeichen.

Einerseits kann es sich um *zwei physikalisch* unterschiedliche Schienenstränge handeln, die zwischen den beiden Haltepunkten HP_i und HP_j verlaufen. Im Normalfall darf jeder von diesen zwei Schienensträngen aufgrund *organisatorischer* („betriebstechnischer“) Vorgaben in nur *genau einer* Verkehrsrichtung benutzt werden: der Schienenstrang der Gleisstrecke $s_{i,j}$ nur vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j und der Schienenstrang der Gleisstrecke $s_{j,i}$ nur vom Haltepunkt HP_j direkt zum Haltepunkt HP_i . Lediglich in Ausnahmefällen, also etwa im Falle eines Zugunfalls oder einer Gleisbaustelle, kann ein Güterzug auf den jeweils anderen Schienenstrang wechseln und auf ihm – in physikalisch zulässiger Weise, aber unter Verletzung der organisatorischen Vorgaben – in Gegenrichtung verkehren.

Andererseits kommt aber auch in Betracht, dass den „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ mit $s_{i,j} \in KA$ bzw. $s_{j,i} \in KA$ nur *ein physikalischer* Schienenstrang zugrunde liegt, der jedoch aufgrund *organisatorischer* Vorgaben zwischen den zwei Haltepunkten HP_i und HP_j in *beiden* Verkehrsrichtungen benutzt werden darf. Der letztgenannte Fall liegt z.B. in der Regel für nur eingleisig ausgebaute (Neben-) Strecken vor.

Es würde großen formalsprachlichen Aufwand bereiten, für das Verkehrsnetz VN des Tourenplanungsmodells zwischen den beiden vorgenannten Fällen der Existenz von entweder zwei physikalisch unterschiedlichen Schienensträngen oder aber von nur einem physikalischen Schienenstrang explizit zu unterscheiden. Daher werden diese beiden Fälle unter dieselbe Formulierung, dass „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ mit $s_{i,j} \in KA$ bzw. $s_{j,i} \in KA$ im Verkehrsnetz VN existieren, implizit subsumiert.

Diese Gleichbehandlung der beiden physikalisch unterschiedlichen Fälle hat einen weiteren Vorteil. Auch dann, wenn zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j nur ein physikalischer Schienenstrang existiert, der in beiden Verkehrsrichtungen benutzt werden darf, empfiehlt es sich, im Tourenplanungsmodell dennoch zwischen den „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ mit $s_{i,j} \in KA$ bzw. $s_{j,i} \in KA$ zu unterscheiden, von denen jede für genau eine Verkehrsrichtung definiert ist: die Gleisstrecke $s_{i,j}$ nur für Güterzüge, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j verkehren, und die Gleisstrecke $s_{j,i}$ nur für Güterzüge, die vom Haltepunkt HP_j direkt zum Haltepunkt HP_i verkehren. Auf diese Weise wird es möglich, *demselben* physikalischen Schienenstrang zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j *unterschiedliche* Ausprägungen desselben Attributs zuzuordnen, und zwar je nachdem, welche der beiden physikalisch möglichen *Verkehrsrichtungen* betroffen ist. Im Falle einer solchen *Verkehrs- oder Transportasymmetrie* weisen die „zwei“ Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$, von denen jede für genau eine Verkehrsrichtung zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j definiert ist, unterschiedliche Ausprägungen des jeweils betrachteten Attributs auf. Dadurch lassen sich asymmetrisch oder „anisotrop“ wirkende Einflussgrößen für bidirektionale Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j berücksichtigen.

Beispielsweise kann auf das Phänomen der Transportasymmetrie zurückgegriffen werden, um Gleisstrecken im Verkehrsnetz zu modellieren, auf denen signifikante *Höhenunterschiede* zwischen den jeweils zwei direkt miteinander verbundenen Haltepunkten HP_i und HP_j überwunden werden müssen. Solche Höhenunterschiede, die sich durch ein Attribut für die durchschnittliche Streckensteigung operationalisieren lassen, sind richtungsabhängig und somit asymmetrisch oder „anisotrop“. Daher besitzt das Attribut „ss“ für die durchschnittliche Streckensteigung unterschiedliche

Ausprägungen $ss_{i,j}$ und $ss_{j,i}$ mit $ss_{i,j} \neq ss_{j,i}$ je nachdem, ob derselbe physikalische Schienenstrang entweder in der Richtung vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j (entsprechend der Gleisstrecke $s_{i,j}$) oder aber in der Gegenrichtung vom Haltepunkt HP_j direkt zum Haltepunkt HP_i (entsprechend der Gleisstrecke $s_{j,i}$) durchfahren wird. So kann die Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j eine durchschnittliche Streckensteigung $ss_{i,j}$ von +5 % aufweisen, während die Gleisstrecke $s_{j,i}$ in der Gegenrichtung vom Haltepunkt HP_j zum Haltepunkt HP_i ein durchschnittliches Streckengefälle $ss_{j,i}$ von -5 % besitzt.

Die Ausprägungen weiterer Streckenattribute können ebenso dem Phänomen der Transportasymmetrie unterliegen, d.h., in Abhängigkeit davon variieren, in welcher Richtung derselbe physikalische Schienenstrang von einem Güterzug durchfahren wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn diese Attributausprägungen ihrerseits in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Steigung einer Gleisstrecke variieren. Dies trifft beispielsweise auf die durchschnittliche Geschwindigkeit zu, mit der ein Güterzug eine Gleisstrecke befahren kann. Sie fällt tendenziell umso geringer aus, je größer die Steigung der befahrenen Gleisstrecke ist. In ähnlicher, aber entgegengesetzter Weise verhalten sich die Ausprägungen der Streckenattribute „durchschnittliche Transportdauer“, „durchschnittlicher Energieverzehr“ und „durchschnittliche Treibhausgasemissionen“ für einen Güterzug, der eine Gleisstrecke befährt. Seine durchschnittliche Transportdauer, sein durchschnittlicher Energieverzehr und seine durchschnittlichen Treibhausgasemissionen nehmen tendenziell umso größere Werte („Ausprägungen“) an, je größer die Steigung der befahrenen Gleisstrecke ist.

Jede der drei vorgenannten Einflussgrößen kann ihrerseits bewirken, dass die Transportkosten, die für die Fahrt eines Güterzugs entlang einer Gleisstrecke verursacht oder verrechnet werden, umso höher ausfallen, je größer die Steigung der befahrenen Gleisstrecke ist: Ansteigende durchschnittliche Transportdauern erhöhen die verrechneten zeitabhängigen Abschreibungen für das eingesetzte Equipment (Lokomotiven und Güterwagen) und die verrechneten kalkulatorischen Zinskosten für das Kapital, das durch die Anschaffungsauszahlungen für das Equipment gebunden wurde (sofern es nicht durch vorangehend durchgeführte Transportaufträge mit Einzahlungsüberschüssen schon wieder freigesetzt wurde). Ein zunehmender durchschnittlicher Energieverzehr verursacht unmittelbar einen Anstieg der Transportkosten in der Gestalt höherer Energie- oder Antriebskosten. Schließlich erhöhen anwachsende durchschnittliche Treibhausgasemissionen ebenso die Transportkosten, falls ein Eisenbahnverkehrsunternehmen für die von ihm verursachten Emissionen von Treibhausgasen kostenwirksam belastet wird. Dies kann z.B. durch die Verpflichtung des Eisenbahnverkehrsunternehmens geschehen, für die von ihm verursachten Emissionen von Treibhausgasen eine entsprechende Menge an „Verschmutzungszertifikaten“ käuflich zu erwerben, die dem Eisenbahnverkehrsunternehmen also nicht im Rahmen eines Nationalen Allokationsplans als „Anfangsausstattung“ unentgeltlich zur Verfügung gestellt wurden. Dieser Erwerbszwang für „Verschmutzungszertifikate“ spielt zwar für Elektro-Lokomotiven in der Regel keine Rolle. Denn sie werden mit elektrischem Fahrstrom angetrieben, für dessen Erzeugung die Betreiber von Elektrizitätskraftwerken bereits entsprechende „Verschmutzungszertifikate“ erwerben mussten (sofern sie die Zertifikate nicht unentgeltlich zugeteilt erhielten). Aber für Diesel-Lokomotiven kann der Erwerbszwang für „Verschmutzungszertifikate“ – zumindest zukünftig bei entsprechenden regulatorischen Vorgaben seitens der staatlichen Klimapolitik – auch für Eisenbahnverkehrsunternehmen eine direkte Kostenbelastung darstellen.

Die durchschnittliche Steigung einer Gleisstrecke ist aber nicht der einzige Grund, der zum Phänomen der Transportasymmetrie führen kann, bei dem die Ausprägungen eines Streckenattributs in Abhängigkeit davon variieren, in welcher Richtung derselbe physikalische Schienenstrang von

einem Güterzug durchfahren wird. Beispielsweise lässt sich bei der Existenz von zwei physikalisch unterschiedlichen Schiensträngen vorstellen, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit $sg_{i,j}$, mit der eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ befahren werden kann, gegenüber der durchschnittlichen Geschwindigkeit $sg_{j,i}$ für die Gegenrichtung der Gleisstrecke $s_{j,i}$ um 10 % geringer ausfällt, weil die Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j durch eine Gleisbaustelle beeinträchtigt wird, die sich nur auf Güterverkehre vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j auswirkt, weil sie nur einen der beiden Schienstränge in Mitleidenschaft zieht.

Aus den vorgenannten Gründen empfiehlt es sich, mithilfe der asymmetrisch oder „anisotrop“ definierten Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ grundsätzlich immer zwischen den beiden Verkehrsrichtungen zu unterscheiden, die zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes möglich sind. Dies gilt unabhängig davon, ob die beiden Haltepunkte entweder durch zwei unterschiedliche physikalische Schienenstränge oder aber durch nur einen physikalischen Schienenstrang direkt miteinander verbunden sind.

Für die grafische Visualisierung eines Verkehrsnetzes wird vereinbart, dass zwei Haltepunkte HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes genau dann durch eine gerichtete Kante mit Pfeilspitzen in beiden Verkehrsrichtungen („Doppelpfeil“: \leftrightarrow) miteinander verbunden sind, wenn eine direkte bidirektionale Verbindung zwischen den beiden Haltepunkten durch die Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$ besteht. Zwei Haltepunkte HP_i und HP_j sind dagegen genau dann durch eine gerichtete Kante mit einer Pfeilspitze in nur einer Verkehrsrichtung („Einfachpfeil“: \rightarrow) miteinander verbunden, wenn eine direkte unidirektionale Verbindung von nur einem der beiden Haltepunkte zum jeweils anderen Haltepunkt entweder durch die Gleisstrecke $s_{i,j}$ oder aber durch die Gleisstrecke $s_{j,i}$ besteht. Schließlich bleiben zwei Haltepunkte HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes in dessen grafischer Visualisierung genau dann unverbunden, wenn weder eine direkte bi- noch eine direkte unidirektionale Verbindung zwischen den beiden Haltepunkten durch Gleisstrecken $s_{i,j}$ oder $s_{j,i}$ existiert.

Jeder Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} \in KA$, die vom Haltepunkt HP_i mit $HP_i \in KN$ direkt zum Haltepunkt HP_j mit $HP_j \in KN$ führt, können mehrere Attribute (*Streckenattribute*) zugeordnet werden. Jedes dieser Streckenattribute drückt eine Eigenschaft der Gleisstrecke $s_{i,j}$ aus, die für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der Planung der Touren seiner Güterzüge als relevant erachtet wird. Als solche Streckenattribute kommen insbesondere in Betracht:¹⁾

1. die *Länge* $sl_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ (*Streckenlänge*), gemessen in [km], die auch als *Distanz* zwischen den zwei Haltepunkten HP_i und HP_j bezeichnet wird, die durch die Gleisstrecke $s_{i,j}$ direkt miteinander verbunden sind;
2. die *Steigung* $ss_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ (*Streckensteigung*), gemessen in [%];
3. die *Durchschnittsgeschwindigkeit* $sdg_{i,j}$, mit der eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ befahren werden kann (*Streckendurchschnittsgeschwindigkeit*), gemessen in [km/h];
4. der *Elektrifizierungsstatus* $se_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ (*Streckenelektrifizierung*), gemessen als Binärparameter mit den Ausprägungen $se_{i,j} = 1$ und $se_{i,j} = 0$ für die beiden berücksichtigten Fälle, dass die Gleisstrecke $s_{i,j}$ vollständig elektrifiziert ist bzw. nicht vollständig elektrifiziert ist;

1) Weitere Streckenattribute können in späteren Modellerweiterungen zwecks Realitätsannäherung für jede Gleisstrecke $s_{i,j}$ ergänzt werden. Die Modellstruktur wird hierdurch nicht wesentlich verändert.

5. die *Gefahrguttauglichkeit* $sgt_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ (*Streckengefahrguttauglichkeit*), gemessen als Binärparameter mit den Ausprägungen $sgt_{i,j} = 1$ und $sgt_{i,j} = 0$ für die beiden berücksichtigten Fälle, dass die Gleisstrecke $s_{i,j}$ für Transporte von Gefahrgütern geeignet ist bzw. nicht geeignet ist.

Die vorgenannten Streckenattribute werden im Folgenden in dem Ausmaß näher erläutert, wie es für das hier entwickelte Tourenplanungsmodell erforderlich erscheint. Nur auf das Attribut der Streckensteigung wird nicht mehr eingegangen, weil es bereits kurz zuvor thematisiert wurde und im ersten Entwurf des Tourenplanungsmodells, der im hier vorgelegten Projektbericht präsentiert wird, noch keine Berücksichtigung findet.

Zur Verdeutlichung der Streckenattribute und des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes VN dient zunächst ein *fiktives Demonstrationsbeispiel*.¹⁾ Es umfasst ein Verkehrsnetz VN mit insgesamt 10 Haltepunkten HP_n ($n = 1, \dots, N$ und $N = 10$). Für seine Knotenmenge gilt also $KN = \{HP_n \mid n = 1, \dots, 10\}$.

Zur übersichtlichen Spezifizierung der Kantenmenge KA kann auf eine quadratische *Verknüpfungsmatrix* VM der Dimension $N = 10$ zurückgegriffen werden. Sie zeigt durch jeden ihrer *Verknüpfungskoeffizienten* $v_{i,j}$ an, ob im Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt ($v_{i,j} = 1$) oder nicht ($v_{i,j} = 0$). Die nachfolgende Abbildung 20 gibt die Verknüpfungsmatrix VM für das hier betrachtete Demonstrationsbeispiel wieder.

		Haltepunkt HP_j									
		HP ₁	HP ₂	HP ₃	HP ₄	HP ₅	HP ₆	HP ₇	HP ₈	HP ₉	HP ₁₀
Haltepunkt HP_i	HP ₁	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	HP ₂	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	HP ₃	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	HP ₄	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	HP ₅	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
	HP ₆	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
	HP ₇	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
	HP ₈	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
	HP ₉	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
	HP ₁₀	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0

Abbildung 20: exemplarische Verknüpfungsmatrix VM

1) Es wird an dieser Stelle bewusst noch nicht auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn eingegangen, das im Kapitel 7.1 angekündigt wurde. Dieses praktische Optimierungsbeispiel wird der computergestützten Modellformulierung vorbehalten, die später folgt. Das praktische Optimierungsbeispiel eignet sich hier weniger zur Verdeutlichung der mathematischen Modellformulierung des Tourenplanungsmodells, weil einige Ausdrucksmöglichkeiten des „generischen“ Tourenplanungsmodells durch die speziellen Gegebenheiten des praktischen Optimierungsbeispiels nicht ausgeschöpft werden und daher hier nicht verdeutlicht werden könnten, wenn sofort auf das praktische Optimierungsbeispiel Bezug genommen würde. Zu diesen nicht ausgeschöpften Ausdrucksmöglichkeiten des „generischen“ Tourenplanungsmodells gehört z.B. der Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecken.

Die Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ mit $v_{i,j} = 1$ werden in der Verknüpfungsmatrix jeweils fett hervorgehoben, damit sich die Verknüpfung der Haltepunkte im Verkehrsnetz VN aus der Verknüpfungsmatrix VM unmittelbar „ablesen“ lässt.¹⁾

Anhand der Verknüpfungsmatrix VM aus Abbildung 20 lässt sich die Kantenmenge KA des Verkehrsnetzes VN auch unmittelbar in der mengentheoretischen Notationsweise darstellen, die oben in der Formel (31) eingeführt wurde:

$$KA = \left\{ \begin{array}{l} (HP_1, HP_2), (HP_1, HP_4), (HP_2, HP_1), (HP_2, HP_3), (HP_2, HP_7), \\ (HP_3, HP_2), (HP_3, HP_4), (HP_3, HP_5), (HP_4, HP_1), (HP_4, HP_3), \\ (HP_4, HP_5), (HP_4, HP_6), (HP_5, HP_3), (HP_5, HP_4), (HP_5, HP_6), \\ (HP_5, HP_7), (HP_6, HP_4), (HP_6, HP_5), (HP_6, HP_8), (HP_6, HP_{10}), \\ (HP_7, HP_2), (HP_7, HP_5), (HP_7, HP_8), (HP_7, HP_9), (HP_8, HP_6), \\ (HP_8, HP_7), (HP_8, HP_9), (HP_8, HP_{10}), (HP_9, HP_7), (HP_9, HP_8), \\ (HP_9, HP_{10}), (HP_{10}, HP_6), (HP_{10}, HP_8), (HP_{10}, HP_9) \end{array} \right\} \subset (KN \times KN \setminus id) \quad (32)$$

Da jeder Verknüpfungskoeffizient $v_{i,j}$ aus der Verknüpfungsmatrix VM genau dann den Wert $v_{i,j} = 1$ ($v_{i,j} = 0$) annimmt, wenn die Kantenmenge KA eine (keine) Kante (HP_i, HP_j) enthält, gilt:

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: v_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (33)$$

Aufgrund der fetten Hervorhebung der Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ mit $v_{i,j} = 1$ wird in Abbildung 20 unmittelbar ersichtlich, dass es sich bei der Verknüpfungsmatrix VM des Demonstrationsbeispiels um eine (zur Hauptdiagonale) *symmetrische* Matrix handelt. Dies bedeutet, dass es im Demonstrationsbeispiel zu jeder Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, auch eine entgegengesetzt gerichtete Gleisstrecke $s_{j,i}$ gibt, die vom Haltepunkt HP_j direkt zum Haltepunkt HP_i führt. Es gilt also: Wenn zwischen zwei Haltepunkten HP_i und HP_j im Verkehrsnetz eine direkte Verbindung besteht, dann handelt es sich stets um eine *bidirektionale* Verbindung mit zwei Gleisstrecken $s_{i,j}$ und $s_{j,i}$, auf denen Güterzüge in jeweils entgegengesetzter Richtung verkehren können. Dies stellt den *Normalfall* für Verkehrsnetze dar, die von Eisenbahnverkehrsunternehmen genutzt werden.

Die Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ mit $v_{i,j} = 0$ in der Hauptdiagonale der Abbildung 20 zeigen an, dass die Prämisse der 1-Zyklen-Freiheit vom Verkehrsnetz VN erfüllt wird. Anhand der Vielzahl von Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ mit $v_{i,j} = 0$, die sich in Matrixfeldern außerhalb der Hauptdiagonalen befinden, wird unmittelbar deutlich, dass die Prämisse vollständiger Verknüpftheit massiv verletzt wird. Dies ist aber unbeachtlich, weil sich diese Prämisse, wie schon früher erläutert, für die Modellierung realer Tourenplanungsprobleme ohnehin als nicht realitätsadäquat erweist.

1) Diese Darstellungskonvention erstreckt sich auch auf die nachfolgenden Matrizen, die zur Beschreibung des Verkehrsnetzes VN dienen. Auch dort dient die fette Hervorhebung von Matrixkoeffizienten, denen jeweils eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ zugrunde liegt, die von einem Haltepunkt HP_i direkt zu einem anderen Haltepunkt HP_j führt, zur leichteren Erkennbarkeit der Sachverhalte, die in der Matrix jeweils dargestellt sind.

Analog zur Verknüpfungsmatrix VM lässt sich eine *Distanzmatrix* DM definieren. Jeder ihrer *Distanzkoeffizienten* $d_{i,j}$ ist wie folgt definiert: Wenn im Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, dann ist der Distanzkoeffizient $d_{i,j}$ mit der Länge $sl_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ identisch. Hierfür gilt stets $sl_{i,j} > 0$, weil eine Gleisstrecke $s_{i,j}$, die von einem Haltepunkt HP_i direkt zu einem *anderen* Haltepunkt HP_j führt, niemals die Länge Null besitzen kann (und „natürlich“ auch niemals negativ sein kann). Andernfalls, wenn im Verkehrsnetz VN keine Gleisstrecke vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, beträgt der Distanzkoeffizient $d_{i,j}$ Null. Folglich muss gelten:

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: d_{i,j} = \begin{cases} sl_{i,j} & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0 & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (34)$$

Die nachfolgende Abbildung 21 stellt die Distanzmatrix DM für das hier betrachtete Demonstrationsbeispiel mit willkürlich angenommenen, jeweils in Kilometern gemessenen Streckenlängen $sl_{i,j}$ dar. Es handelt sich abermals um eine symmetrische Matrix, weil von dem Normalfall ausgegangen wird, dass sich die Längen $sl_{i,j}$ und $sl_{j,i}$ zweier Gleisstrecken $s_{i,j}$ bzw. $s_{j,i}$, die zwei Haltepunkte HP_i und HP_j in bidirektionaler Weise direkt miteinander verbinden, nicht voneinander unterscheiden.

von \ nach		Haltepunkt HP_j									
		HP_1	HP_2	HP_3	HP_4	HP_5	HP_6	HP_7	HP_8	HP_9	HP_{10}
Haltepunkt HP_i	HP_1	0	20	0	10	0	0	0	0	0	0
	HP_2	20	0	9	0	0	0	18	0	0	0
	HP_3	0	9	0	7	10	0	0	0	0	0
	HP_4	10	0	7	0	9	14	0	0	0	0
	HP_5	0	0	10	9	0	6	8	0	0	0
	HP_6	0	0	0	14	6	0	0	6	0	14
	HP_7	0	18	0	0	8	0	0	12	15	0
	HP_8	0	0	0	0	0	6	12	0	5	12
	HP_9	0	0	0	0	0	0	15	5	0	23
	HP_{10}	0	0	0	0	0	14	0	12	23	0

Abbildung 21: exemplarische Distanzmatrix DM

Zwischen der Verknüpfungsmatrix- und der Distanzmatrix besteht ein asymmetrisches Verhältnis: Einerseits kann aus der Kenntnis der Werte für die Verknüpfungsmatrix nicht auf die Werte für die Distanzmatrix geschlossen werden. Denn aus dem Wissen, dass zwei Haltepunkte HP_i und HP_j in einem Verkehrsnetz durch eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ direkt miteinander verknüpft sind ($v_{i,j} = 1$), folgt nur, dass diese Gleisstrecke $s_{i,j}$ eine positive Streckenlänge $sl_{i,j}$ aufweisen muss ($sl_{i,j} > 0$). Aber der Wert der Streckenlänge $sl_{i,j}$ bleibt unbekannt, solange er nicht zusätzlich angegeben wird. Andererseits kann aus der Kenntnis der Werte der Distanzkoeffizienten $d_{i,j}$ aus der Distanzmatrix unmittelbar auf die Werte der Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ aus der Verknüpfungsmatrix geschlossen werden. Denn aus dem Wissen, dass zwei Haltepunkte HP_i und HP_j in einem Verkehrsnetz durch eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ (nicht) direkt miteinander verknüpft sind und deshalb ($d_{i,j} = 0$) $d_{i,j} > 0$ gilt, ergibt sich unmittelbar, dass die Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ (nicht) zur Kantenmenge KA des Ver-

kehrnetzes gehört und somit auch ($v_{i,j} = 0$) $v_{i,j} = 1$ gelten muss. Folglich gilt zwischen den Koeffizienten von Verknüpfungs- und der Distanzmatrix ein einfacher Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad & v_{i,j} = 1 \leftrightarrow d_{i,j} > 0 \quad ; \text{ für } (HP_i, HP_j) \in KA \\ & \wedge \quad v_{i,j} = 0 \leftrightarrow d_{i,j} = 0 \quad ; \text{ für } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{aligned} \quad (35)$$

Dieses Zusammenhangswissen lässt sich für die praktische Anwendung des Tourenplanungsmodells nutzen, um den Aufwand für die Spezifizierung von Eingabeinformationen (Modellinput) „intelligent“ zu reduzieren. Es ist nicht erforderlich, sowohl für die Verknüpfungs- als auch für die Distanzmatrix alle Koeffizientenwerte einzugeben. Stattdessen reicht es aus, nur die Werte der Distanzkoeffizienten $d_{i,j}$ aus der Distanzmatrix numerisch festzulegen. Daraus ergeben sich dann unmittelbar die Werte der Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ aus der Distanzmatrix, indem die Bijugate ($,\leftrightarrow$) aus der o.a. Formel (35) als „von rechts nach links“ gerichtete Subjugate ($,\leftarrow$) ausgewertet werden.

Die *Durchschnittsgeschwindigkeitsmatrix* DGM ist analog zur Distanzmatrix DM aufgebaut. Jeder ihrer *Durchschnittsgeschwindigkeitskoeffizienten* $sdg_{i,j}$ ist wie folgt definiert: Wenn im Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, dann gibt der positive Koeffizient $sg_{i,j}$ an, mit welcher durchschnittlichen Geschwindigkeit [km/h] die Gleisstrecke $s_{i,j}$ von einem Güterzug befahren werden kann (*Streckendurchschnittsgeschwindigkeit*). Andernfalls, wenn im Verkehrsnetz VN keine Gleisstrecke vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, beträgt der Durchschnittsgeschwindigkeitskoeffizient $sdg_{i,j}$ Null. Folglich muss gelten:

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad sdg_{i,j} \begin{cases} > 0; & \text{ falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ = 0; & \text{ falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (36)$$

Die durchschnittliche Geschwindigkeit $sdg_{i,j}$, mit der eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ von einem Güterzug befahren werden kann, gestattet es, eine Vielfalt von *gleisstreckenspezifischen* Einflussgrößen zu berücksichtigen, die sich auf die Geschwindigkeit von schienengebundenen Gütertransporten auszuwirken vermögen. Dazu gehört vor allem die topografische Charakteristik der jeweils betroffenen Gleisstrecke, wie z.B. ihre durchschnittliche Steigung und die Existenz von engen, zu Langsamfahrten zwingenden Kurvenradien. Aber auch der Instandhaltungszustand einer Gleisstrecke kann die durchschnittliche Geschwindigkeit $sdg_{i,j}$ ihrer Befahrbarkeit beeinflussen. Dies betrifft z.B. Langsamfahrabschnitte aufgrund von Schäden im Gleisbett oder an Eisenbahnbrücken sowie aufgrund von Gleisbaustellen. Dagegen wird von *güterzugspezifischen* Einflussgrößen auf die tatsächliche Geschwindigkeit eines Güterzugs bewusst abgesehen, weil es sich beim Parameter $sdg_{i,j}$ um eine Durchschnittsgröße handelt, die über eine große Vielfalt von denkmöglichen oder empirisch beobachteten Güterzügen „gemittelt“ wurde. Zu solchen unberücksichtigten Einflussgrößen gehören z.B. das Gesamtgewicht eines Güterzugs, das von seiner Lokomotive gezogen werden muss, und die bauartbedingte Geschwindigkeit, mit der die eingesetzte Lokomotive „auf Dauer“ verkehren kann, ohne einem übermäßigen Verschleiß zu unterliegen.

Bei der Streckendurchschnittsgeschwindigkeit $sdg_{i,j}$ handelt es sich um eine Größe von zentraler Bedeutung für sogenannte *dynamische* Tourenplanungsaufgaben. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass Touren nicht nur unter Berücksichtigung der zu transportierenden Gütermengen und der verfügbaren Transportmittelkapazitäten geplant werden (rein mengenmäßige Tourenplanung), sondern

auch *zeitliche* Aspekte Berücksichtigung finden. Dies können z.B. sogenannte „Zeitfenster“ sein, innerhalb derer Gütermengen in einem Haltepunkt des Verkehrsnetzes be- oder entladen werden müssen, um die Transportnachfrage eines Kunden *termingerecht* erfüllen zu können. Solche Tourenplanungsaufgaben spielen in der betrieblichen Praxis eine sehr wichtige Rolle. Sie werden auch in der einschlägigen Fachliteratur gewürdigt, vor allem aus der Perspektive des sogenannten „Vehicle Routing Problem with Time Windows“ (VRPTW). Allerdings fallen Tourenplanungsmodelle für dieses Tourenplanungsproblem noch weitaus komplexer aus als das *statische* Tourenplanungsmodell, das im vorgelegten Projektbericht für eine rein mengenmäßige Tourenplanung vorgestellt wird. Daher wird zwar im Folgenden auf die Durchschnittsgeschwindigkeitsmatrix DGM und die zugehörigen Streckendurchschnittsgeschwindigkeiten $sd_{i,j}$ nicht weiter eingegangen, aber sie bilden einen „Vormerkposten“ für spätere Weiterentwicklungen.

Die *Elektrifizierungsmatrix* EM gibt mithilfe ihrer *Elektrifizierungskoeffizienten* $se_{i,j}$ den Elektrifizierungsstatus (*Streckenelektrifizierung*) für jede Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ aus dem Verkehrsnetz VN an, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt. Die beiden Ausprägungen $se_{i,j} = 1$ und $se_{i,j} = 0$ des Binärparameters $se_{i,j}$ zeigen an, dass die Gleisstrecke $s_{i,j}$ vollständig elektrifiziert ist bzw. nicht vollständig elektrifiziert ist. Der letztgenannte Fall mit $se_{i,j} = 0$ gilt der Vollständigkeit halber ebenso dann, wenn im Verkehrsnetz VN keine Gleisstrecke vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt.¹⁾ Folglich muss gelten:

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: se_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und vollständig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und nicht vollständig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (37)$$

Darüber hinaus ließe sich vorstellen, dass der Elektrifizierungsstatus „nicht vollständig elektrifiziert“ in die beiden Stati „unvollständig elektrifiziert“ und „nicht elektrifiziert“ ausdifferenziert wird. Dies würde die Formulierung des Tourenplanungsmodells jedoch erheblich verkomplizieren, weil nicht mehr mit einem übersichtlichen Binärparameter für den Elektrifizierungsstatus $se_{i,j}$ der Gleisstrecke $s_{i,j}$ gearbeitet werden könnte. Stattdessen müsste für den Elektrifizierungsstatus $se_{i,j}$ entweder ein Parameter mit drei zulässigen Werten („Trinärparameter“) für die drei denkmöglichen Fälle „vollständig elektrifiziert“, „unvollständig elektrifiziert“ sowie „nicht elektrifiziert“ eingeführt werden, der sich jedoch in formalsprachlichen Modellen nur schwer handhaben lässt. Oder es müsste zu einem reellzahligen Parameter aus dem Intervall $[0;1]$ für den Elektrifizierungsstatus $se_{i,j}$ übergegangen werden, der den Elektrifizierungsanteil einer Gleisstrecke $s_{i,j}$ misst. Er würde zwar in formalsprachlichen Modellen keine Handhabungsprobleme aufweisen, aber seine „Semantik“ wäre nicht mehr kongruent mit dem zugrunde liegenden Realproblem. Denn für den Einsatz einer Elek-

1) Zwar werden durch den Elektrifizierungsstatus $se_{i,j} = 0$ zwei Sachverhalte ausgedrückt: einerseits die Existenz einer Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt und nicht vollständig elektrifiziert ist ($v_{i,j} = 1$ und $se_{i,j} = 0$), sowie andererseits das Fehlen einer Gleisstrecke, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt ($v_{i,j} = 0$ und $se_{i,j} = 0$). Dennoch brauchen hierfür nicht zwei unterschiedliche Parameterausprägungen vorgesehen werden, weil der Elektrifizierungsstatus $se_{i,j}$ im Tourenplanungsmodell erst dann Berücksichtigung findet, wenn bereits feststeht, dass eine Gleisstrecke existiert, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j ($v_{i,j} = 1$) führt. Der andere Fall – das Fehlen einer Gleisstrecke, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt ($v_{i,j} = 0$) – wird hier lediglich „der Vollständigkeit halber“ eingeführt, damit alle Felder der Elektrifizierungsmatrix einen wohldefinierten Wert aufweisen.

tro-Lokomotive auf einer Gleisstrecke $s_{i,j}$ ist *nicht* der Anteil der Streckenelektrifizierung entscheidend, sondern lediglich der Sachverhalt, *ob* eine Gleisstrecke *vollständig* elektrifiziert ist oder nicht. Daher entspricht der o.a. Binärparameter für den Elektrifizierungsstatus $se_{i,j}$ genau der „Semantik“ des Realproblems.

Die nachfolgende Abbildung 22 stellt die Elektrifizierungsmatrix EM für das hier betrachtete Demonstrationsbeispiel mit willkürlich angenommenen Elektrifizierungsstati $se_{i,j}$ dar.¹⁾

von \ nach		Haltepunkt HP _j									
		HP ₁	HP ₂	HP ₃	HP ₄	HP ₅	HP ₆	HP ₇	HP ₈	HP ₉	HP ₁₀
Haltepunkt HP _i	HP ₁	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	HP ₂	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	HP ₃	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	HP ₄	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	HP ₅	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	HP ₆	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
	HP ₇	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
	HP ₈	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
	HP ₉	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
	HP ₁₀	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0

Abbildung 22: exemplarische Elektrifizierungsmatrix EM

Bei der Elektrifizierungsmatrix EM der Abbildung 22 handelt es sich abermals um eine symmetrische Matrix, weil von dem Normalfall ausgegangen wird, dass sich die Elektrifizierungsstati $se_{i,j}$ und $se_{j,i}$ zweier Gleisstrecken $s_{i,j}$ bzw. $s_{j,i}$, die zwei Haltepunkte HP_i und HP_j in bidirektionaler Weise direkt miteinander verbinden, nicht voneinander unterscheiden. Dies bedeutet, dass direkte bidirektionale Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten des Verkehrsnetzes stets entweder in beiden Richtungen vollständig elektrifiziert sind oder in keiner Richtung.

Die Berücksichtigung des Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecken eines Verkehrsnetzes stellt eine wesentliche Realitätsannäherung von Modellen für Tourenplanungsprobleme von Eisenbahnverkehrsunternehmen dar, die in anderen Tourenplanungsmodellen als dem hier vorgestellten im Allgemeinen „ausgeblendet“ wird. Nur mithilfe dieses Elektrifizierungsstatus ist es möglich, bei der

1) In der Elektrifizierungsmatrix lassen sich die beiden Sachverhalte, die in der voranstehenden Fußnote angesprochen wurden, bereits auf den ersten Blick unterscheiden: Wenn eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ existiert, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, aber nicht vollständig elektrifiziert ist ($v_{i,j} = 1$ und $se_{i,j} = 0$), dann wird der Elektrifizierungskoeffizient $se_{i,j} = 0$ in der Matrix EM fett hervorgehoben. Dies entspricht der oben „weitblickend“ eingeführten Konvention, in den Matrizen zur Repräsentation von Wissen über das Verkehrsnetz VN jeweils alle Koeffizienten fett hervorzuheben, die für eine solche Gleisstrecke $s_{i,j}$ stehen. Andernfalls, wenn keine Gleisstrecke existiert, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt ($v_{i,j} = 0$ und $se_{i,j} = 0$), dann wird der Elektrifizierungskoeffizient $se_{i,j} = 0$ in der Matrix EM nicht fett hervorgehoben.

Tourenplanung zwei¹⁾ verschiedenartige Fälle klar voneinander zu trennen: Einerseits können für Touren, die nur aus vollständig elektrifizierten Gleisstrecken bestehen, sowohl Elektro- als auch Diesel-Lokomotiven eingesetzt werden. Andererseits kommen für eine Tour, die mindestens eine nicht vollständig elektrifizierte Gleisstrecke umfasst, nur Güterzüge in Betracht, die von Diesel-Lokomotiven gezogen werden.

Für die grafische Visualisierung eines Verkehrsnetzes wird vereinbart,²⁾ dass zwei Haltepunkte HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes durch eine „durchgezogene“ gerichtete Kante miteinander verbunden werden, wenn die Gleisstrecke zwischen den beiden Haltepunkten HP_i und HP_j vollständig elektrifiziert ist. Andernfalls, wenn die Gleisstrecke zwischen den beiden Haltepunkten HP_i und HP_j nicht vollständig elektrifiziert ist, wird für die Verbindung der zwei Haltepunkte HP_i und HP_j des Verkehrsnetzes eine „gestrichelte“ gerichtete Kante verwendet.

Schließlich kann als letztes der hier vorgestellten Streckenattribute die *Gefahrguttauglichkeit* einer Gleisstrecke (*Streckengefahrguttauglichkeit*) erfasst werden. Die *Gefahrguttauglichkeitsmatrix* GTM gibt mithilfe ihrer *Gefahrguttauglichkeitskoeffizienten* $sgt_{i,j}$ für jede Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt, Auskunft darüber, ob die Gleisstrecke $s_{i,j}$ für Transporte von Gefahrgütern geeignet ist ($sgt_{i,j} = 1$) oder nicht geeignet ist ($sgt_{i,j} = 0$). Der letztgenannte Fall mit $sgt_{i,j} = 0$ gilt – analog zur Elektrifizierungsmatrix EM – der

1) Eine Beschränkung auf die zwei hier angesprochenen Fälle ist nur unter der *Prämisse* der *Unzulässigkeit von tourbegleitenden Lokomotivwechseln* zulässig. Dieser Prämisse zufolge wird eine Tour entweder durch genau eine Lokomotive realisiert (Normalfall) oder durch ein Ensemble von Lokomotiven, das dem Güterzug einer Tour fest zugeordnet bleibt (Sonderfall im praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn; vgl. Kapitel 5.3.2). Allerdings wird im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell davon ausgegangen, dass ein *Ensemble* aus mehreren Lokomotiven *nur* Lokomotiven *unterschiedlichen* Typs umfassen kann. Denn die lokomotivenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{die.a.e.q}$ und $y_{ele.b.e.q}$ stellen jeweils Binärvariablen dar, sodass einer Tour $T_{e,q}$ nur genau eine ($y_{die.a.e.q} = 1$ bzw. $y_{ele.b.e.q} = 1$) oder aber keine Lokomotive ($y_{die.a.e.q} = 0$ bzw. $y_{ele.b.e.q} = 0$) eines bestimmten Typs $LT_{die.a}$ bzw. $LT_{ele.b}$ zugeordnet werden kann.

Andernfalls, wenn keine feste Zuordnung von Lokomotiven zu Güterzügen vorausgesetzt wird, ließe sich auch vorstellen, dass ein Güterzug während einer Tour durch *wechselnde Lokomotiven* gezogen werden kann je nachdem, ob nicht vollständig elektrifizierte Gleisstrecken (nur Einsatz einer Diesel-Lokomotive) oder vollständig elektrifizierte Gleisstrecken (Einsatz einer Diesel- oder einer Elektro-Lokomotive) befahren werden. Ein solcher Lokomotivwechsel für dieselbe Tour wird nach Wissen der Verfasser in der betrieblichen Praxis aber kaum realisiert, auf jeden Fall nicht bei den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS. Daher wird darauf verzichtet, solche Lokomotivwechsel in das hier entwickelte Tourenplanungsmodell als zusätzlichen Freiheitsgrad der Entscheidungssträger aufzunehmen.

2) Der Einfachheit halber beziehen sich die beiden nachstehenden Vereinbarungen *expressis verbis* jeweils auf eine unidirektionale Verbindung, bei der nur *eine* Gleisstrecke von einem der beiden Haltepunkte direkt zum jeweils anderen Haltepunkt führt, die Umkehrung aber nicht zutrifft. Diese Darstellungskonvention lässt sich jedoch auf bidirektionale Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten mit *zwei* entgegengesetzt gerichteten Gleisstrecken analog übertragen, ohne dass – mit Ausnahme einer komplizierteren Formulierung der Darstellungskonvention – irgendwelche Besonderheiten zu berücksichtigen wären. Dafür sorgt der oben angeführte Normalfall, der im Kontext der Abbildung 22 angeführt wurde, dass sich die Elektrifizierungsstati $se_{i,j}$ und $se_{j,i}$ zweier Gleisstrecken $s_{i,j}$ bzw. $s_{j,i}$, die zwei Haltepunkte HP_i und HP_j in bidirektionaler Weise direkt miteinander verbinden, nicht voneinander unterscheiden. Andernfalls, wenn sich bei einer bidirektionalen Verbindungen zwischen zwei Haltepunkten die Elektrifizierungsstati $se_{i,j}$ und $se_{j,i}$ der beiden Gleisstrecken $s_{i,j}$ bzw. $s_{j,i}$, welche die zwei Haltepunkte HP_i und HP_j direkt miteinander verbinden, voneinander unterscheiden, muss wie folgt vorgegangen werden: Der übliche „Doppelpfeil“, der in der grafischen Visualisierung eines Verkehrsnetzes für die beiden Gleisstrecken $s_{i,j}$ bzw. $s_{j,i}$ sonst verwendet würde, ist in zwei „Einfachpfeile“ aufzulösen. Alsdann ist derjenige „Einfachpfeil“ mit einer „durchgezogenen“ („gestrichelten“) Linie darzustellen, der die (nicht) vollständig elektrifizierte Gleisstrecke darstellt.

Vollständigkeit halber ebenso dann, wenn im Verkehrsnetz VN keine Gleisstrecke vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt. Folglich muss gelten:

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \text{sgt}_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern geeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern ungeeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (38)$$

Auf Gleisstrecken $s_{i,j}$, die für Transporte von Gefahrgütern geeignet sind ($\text{sgt}_{i,j} = 1$), können Gütertransporte beliebiger Art durchgeführt werden. Diese Gleisstrecken sind also für die Transporte sowohl von Standardgütern¹⁾ als auch von Gefahrgütern geeignet. Dagegen kommen Gleisstrecken $s_{i,j}$, die für Transporte von Gefahrgütern ungeeignet sind ($\text{sgt}_{i,j} = 0$), für Gefahrgut-Transporte grundsätzlich nicht in Betracht.

Da die Gefahrguttauglichkeitsmatrix GTM und die Elektrifizierungsmatrix EM sowie die zugehörigen Gefahrguttauglichkeits- bzw. Elektrifizierungskoeffizienten strukturell gleichartig sind, wird darauf verzichtet, für das Demonstrationsbeispiel auch noch eine Gefahrguttauglichkeitsmatrix GTM anzuführen. Sie würde sich von der Darstellung der Elektrifizierungsmatrix EM in der o.a. Abbildung 22 strukturell nicht unterscheiden.

Stattdessen wird in der nachfolgenden Abbildung 23 abschließend das Verkehrsnetz VN des Demonstrationsbeispiels mit Hilfe einer Grafik visualisiert. Diese Grafik gibt die Informationen, die für das Demonstrationsbeispiel in den voranstehenden Erläuterungen zusammengetragen wurden, auf anschauliche Weise wieder. Insbesondere werden in ihr die Verknüpfungsmatrix VM, die zugehörigen Gleisstrecken $s_{i,j}$, die jeweils von einem Haltepunkt HP_i direkt zu einem anderen Haltepunkt HP_j führen, sowie die Elektrifizierungsstati dieser Gleisstrecken gemäß der Elektrifizierungsmatrix EM visualisiert. Auf eine Visualisierung der Streckenlängen $sl_{i,j}$, die in der Distanzmatrix DM festgehalten wurden, wurde dagegen in der Abbildung 23 der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Die Grafik könnte aber bei Bedarf durch eine zusätzliche Beschriftung der gerichteten Kanten („Pfeile“) mit den Kilometerangaben aus der Distanzmatrix DM entsprechend erweitert werden. Ebenso wenig wird in der Abbildung 23 auf Streckendurchschnittsgeschwindigkeiten $sdg_{i,j}$ aus einer Durchschnittsgeschwindigkeitsmatrix DGM eingegangen, weil bereits an früherer Stelle erläutert wurde, dass derart „dynamische“ Aspekte in dem hier vorgestellten, statischen Tourenplanungsmodell zunächst noch keine Rolle spielen, sondern einer späteren Weiterentwicklung des Modellierungsansatzes vorbehalten bleiben.

1) Als Standardgüter gelten hier alle Güter, die nicht als Gefahrgüter klassifiziert sind.

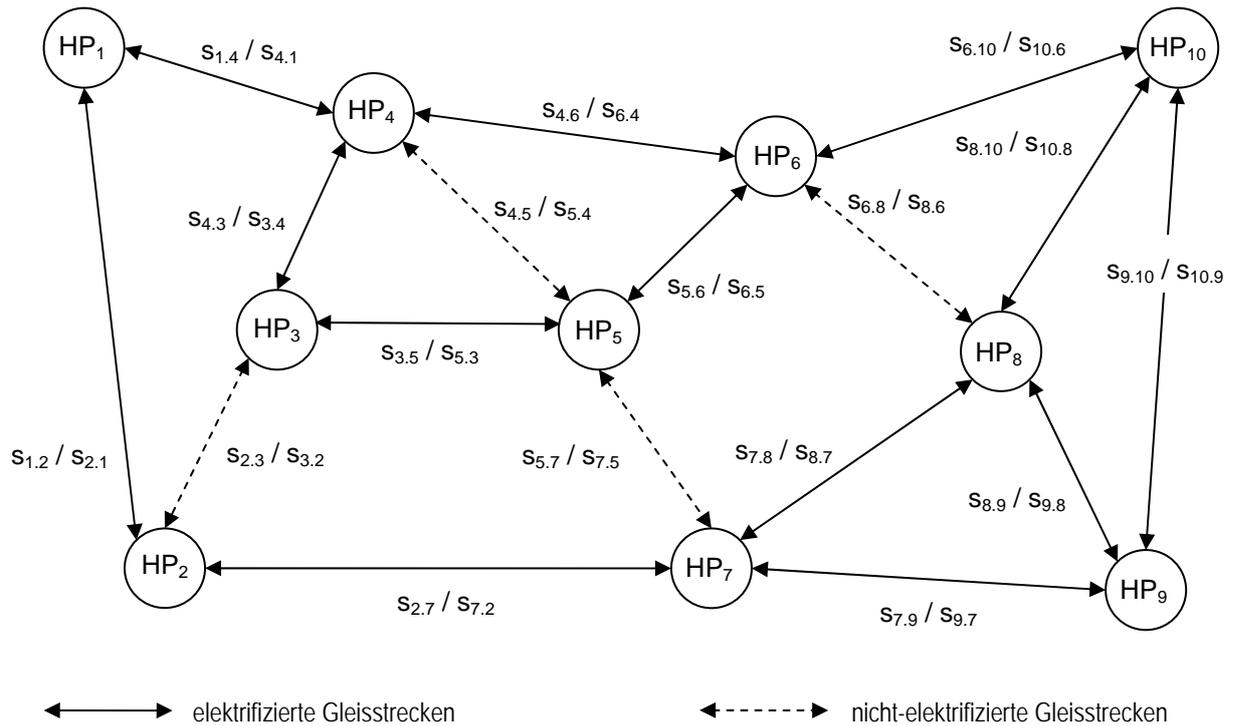


Abbildung 23: grafische Visualisierung eines exemplarischen Verkehrsnetzes

Zuvor wurden die formalsprachlichen Komponenten zusammengestellt und erläutert, die für die mathematische Formulierung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells bereitgestellt werden, um das Verkehrsnetz VN eines zugrunde liegenden Tourenplanungsproblems zu repräsentieren. Darüber hinaus wurden die Spezifizierung dieser Komponenten und ihr Zusammenspiel anhand eines fiktiven Demonstrationsbeispiels verdeutlicht.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich diese mathematische Modellformulierung – weiterhin eingeschränkt auf die Repräsentation eines Verkehrsnetzes – in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird.¹⁾ Zu diesem Zweck wird, wie im Kapitel 7.1 angekündigt, auf das *praktische Optimierungsbeispiel* der Neusser Eisenbahn zurückgegriffen, das im Kapitel 5.3.2 ausführlicher vorgestellt wurde. Der Wechsel vom bislang verwendeten fiktiven Demonstrationsbeispiel zum praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn lässt sich zweifach motivieren.²⁾ Erstens fällt das praktische Optimierungsbeispiel hinsichtlich einiger Aspekte – vor allem im Hinblick auf das zugrunde liegende Verkehrsnetz – wesentlich einfacher aus als das bislang betrachtete fiktive Demonstrati-

- 1) Im hier vorgelegten Projektbericht wird vorausgesetzt, dass Leser über Basiskenntnisse der mathematischen Modellierungssoftware LINGO verfügen. Daher wird nur auf einige besonders wichtig erscheinende Aspekte der computergestützten Modellformulierung eingegangen. Über die Abgrenzung, was unter „Basiskenntnissen“ und „besonders wichtig“ zu verstehen ist, lässt sich natürlich trefflich streiten. Es wird darauf verzichtet, diese „offene Flanke“ zu schließen.
- 2) Die nachfolgend angeführten Argumente gelten auch für die weiteren Kapitel zum Tourenplanungsmodell, das in diesem Projektbericht präsentiert werden. Sie werden im Folgenden aber nicht mehr explizit wiederholt, sondern gelten jeweils als implizit vorausgesetzt.

onsbeispiel. So sind für das praktische Optimierungsbeispiel nur noch vier anstelle von zehn Haltepunkten zu berücksichtigen, und der Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecken spielt auch keine Rolle. Aufgrund dieser Vereinfachungen ist die computergestützte Modellformulierung für das praktische Optimierungsbeispiel deutlich kompakter und somit auch übersichtlicher, als es für das zuvor benutzte fiktive Demonstrationsbeispiel der Fall war. Zweitens erscheint es für die Erläuterung der computergestützten Modellformulierung als vorteilhaft, sich von vornherein auf den „Einzelfall“ eines praktischen Optimierungsbeispiels – wie den der Neusser Eisenbahn – zu beziehen, um die Praxisrelevanz der computergestützten Modellformulierung zu verdeutlichen.

Das Verkehrsnetz VN für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn umfasst nur die vier Haltepunkte Neuss (HP₁), Oberhausen (HP₂), Beddingen (HP₃) und Deuna (HP₄).¹⁾ Diese vier Haltepunkte sind nicht alle durch Gleisstrecken direkt miteinander verknüpft. Im Neusser Haltepunkt HP₁ befindet sich das Depot der Neusser Eisenbahn für ihre Lokomotiven und Güterwagen. Die nachfolgende Abbildung 24 visualisiert, welche Gleisstrecken im Verkehrsnetz VN von Güterzügen der Neusser Eisenbahn tatsächlich befahren werden können.²⁾ Es handelt sich jeweils um bidirektionale Verbindungen zwischen den Haltepunkten. In der grafischen Visualisierung des Verkehrsnetzes sind die Streckenlängen für die Gleisstrecken, die zwei Haltepunkte direkt miteinander verbinden, bereits als zusätzliche Kantenanschriften eingetragen. Die Streckenelektrifizierung spielt hier keine Rolle, weil in der computergestützten Modellformulierung die Unterscheidung zwischen Elektro- und Diesel-Lokomotiven noch nicht implementiert ist.³⁾

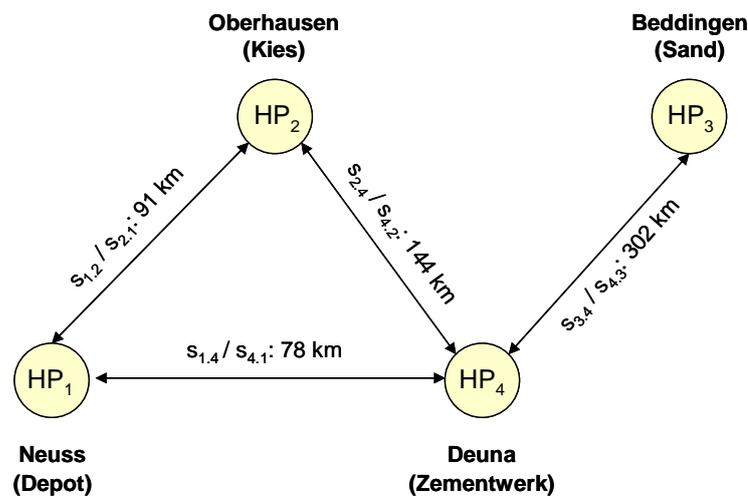


Abbildung 24: grafische Visualisierung des Verkehrsnetzes für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn

- 1) Für die Knotenmenge KN des Verkehrsnetzes VN gilt beim praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn also: $KN = \{HP_1, HP_2, HP_3, HP_4\}$.
- 2) Für die Kantenmenge KA des Verkehrsnetzes VN gilt gemäß Abbildung 24: $KA = \{(HP_1, HP_2), (HP_1, HP_4), (HP_2, HP_1), (HP_2, HP_4), (HP_3, HP_4), (HP_4, HP_1), (HP_4, HP_2), (HP_4, HP_3)\} \subset (KN \times KN \setminus id)$.
- 3) Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass es sich jeweils um vollständig elektrifizierte Gleisstrecken handelt, die keine Einschränkungen hinsichtlich des einsetzbaren Lokomotiv-Typs (Elektro- versus Diesel-Lokomotiven) bedeuten.

Die zugehörigen Verknüpfungs- und Distanzmatrizen werden in den nachfolgenden Abbildungen 25 bzw. 26 wiedergegeben.

		nach	Haltepunkt HP _j			
			HP ₁	HP ₂	HP ₃	HP ₄
Haltepunkt HP _i	HP ₁	0	1	0	1	
	HP ₂	1	0	0	1	
	HP ₃	0	0	0	1	
	HP ₄	1	1	1	0	

Abbildung 25: Verknüpfungsmatrix VM
für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn

		nach	Haltepunkt HP _j			
			HP ₁	HP ₂	HP ₃	HP ₄
Haltepunkt HP _i	HP ₁	0	91	0	78	
	HP ₂	91	0	0	144	
	HP ₃	0	0	0	302	
	HP ₄	78	144	302	0	

Abbildung 26: Distanzmatrix DM
für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn

Da die Streckenelektrifizierung bei der computergestützten Modellformulierung keine Rolle spielt, kann auf die Elektrifizierungsmatrix EM verzichtet werden.

Bei der Implementierung des praktischen Optimierungsbeispiels der Neusser Eisenbahn mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO kommt es im Wesentlichen¹⁾ nur auf die Spezifizierung der Distanzmatrix DM an. Denn aufgrund des Zusammenhangswissens, das in der o.a. Formel (35) ausgedrückt wurde, können die Werte der Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ aus der Verknüpfungsmatrix VM unmittelbar erschlossen werden, wenn die Werte der Distanzkoeffizienten $d_{i,j}$ aus der Distanzmatrix DM bekannt sind. Dazu reicht es aus, die Bijugate aus der Formel (35) als „von rechts nach links“ gerichtete Subjugate auszuwerten. Daher gilt als Implikation der Formel (35):

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: (d_{i,j} > 0 \rightarrow v_{i,j} = 1) \wedge (d_{i,j} = 0 \rightarrow v_{i,j} = 0) \quad (39)$$

1) Daneben ist auch die Menge der Haltepunkte explizit anzugeben.

Die Subjugate der Formel (39) lassen sich in LINGO mithilfe der @IF-Funktion problemlos¹⁾ implementieren. Diese Sonderfunktion ist wie folgt definiert: @IF(logische_Bedingung, Resultat_wenn_Bedingung_erfüllt, Resultat_wenn_Bedingung_verletzt). Mit $d_{i,j} > 0$ als logischer Bedingung sind gemäß Formel (39) $v_{i,j} = 1$ für die Erfüllung dieser Bedingung und $v_{i,j} = 0$ für die Verletzung dieser Bedingung zu wählen:²⁾

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad v_{i,j} = @IF \left(\underbrace{d_{i,j} \#GT\# 0}_{\text{logische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (40)$$

Durch die Verwendung der @IF-Funktion lässt sich ein LINGO-Modell relativ einfach verstehen, weil sich diese Sonderfunktion gut dazu eignet, logische Subjugate und informationstechnische IF-THEN-ELSE-Prozeduren unmittelbar zu implementieren. Dies spricht für die kognitive Adäquanz der mathematischen Modellierungssoftware LINGO.

Wenn Vorbehalte gegenüber der @IF-Funktion bestehen,³⁾ lassen sich die Subjugate der Formel (39) auch mithilfe einer „sehr großen“ Konstante K wie folgt implementieren:⁴⁾

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K \quad \wedge \quad v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j} \quad (41)$$

Einerseits erzwingt die Bedingung $v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K$, dass $v_{i,j} = 0$ für $d_{i,j} = 0$ gilt. Allerdings wird für $d_{i,j} > 0$ der Spielraum $v_{i,j} \in \{0,1\}$ gelassen. Andererseits erzwingt die Bedingung $v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j}$, dass $v_{i,j} = 1$ für $d_{i,j} > 0$ gilt. Allerdings wird für $d_{i,j} = 0$ der Spielraum $v_{i,j} \in \{0,1\}$ gelassen. Beide Bedingungen zusammen beseitigen die vorgenannten Spielräume, die für jeweils eine „isolierte“ Bedingung noch offen geblieben sind. Dies bedeutet, dass das Konjugat $v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K \quad \wedge \quad v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j}$ sowohl $v_{i,j} = 0$ für $d_{i,j} = 0$ als auch $v_{i,j} = 1$ für $d_{i,j} > 0$ sicherstellt. Dadurch wird nicht nur die Formel (39), sondern auch die Formel (35) erfüllt. Als Nachteil der Formel (41) erweist sich jedoch ihre

- 1) Die Problemlosigkeit der @IF-Funktion gilt allerdings nur in Bezug auf die computergestützte *Modellformulierung*. Denn bei der *Modellauswertung* mit der Solver-Komponente von LINGO werden alle Konstrukte, die mindestens eine @IF-Funktion enthalten, zunächst in relativ komplexe Ersatzkonstrukte transformiert, welche die Auswertungsgeschwindigkeit eines LINGO-Modells erheblich beeinträchtigen können. Daher kann die Verwendung der @IF-Funktion in LINGO-Modellen zu Performanzproblemen führen.
- 2) In der LINGO-Syntax dürfen innerhalb einer Funktionsspezifikation mathematische Relationszeichen, wie z.B. „>“, nicht verwendet werden. Stattdessen muss hier der logische Operator #GT# („greater than“) benutzt werden, um die Relation „ist größer als“ innerhalb der Spezifikation der @IF-Funktion auszudrücken.
- 3) Die Vorbehalte können aus mangelnder Vertrautheit mit logischen und informationstechnischen Ausdrucksmitteln wie den oben angeführten IF()- und #GT#-Konstrukten resultieren. Die Vorbehalte können aber auch auf den Performanzproblemen beruhen, die in der vorletzten Fußnote angesprochen wurden.
- 4) Die „sehr große“ Konstante K muss mindestens so groß gewählt werden, dass für jede beliebige positive Distanz $d_{i,j}$ gilt: $d_{i,j} \cdot K \geq 1$ und $K \geq d_{i,j}$. Beide Anforderungen werden erfüllt, wenn die Konstante K so groß gewählt wird, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ \frac{1}{d_{i,j}}, d_{i,j} \mid i, j \in \{1, \dots, N\} \wedge d_{i,j} > 0 \right\}$$

Falls die Distanzen ganzzahlig gemessen werden (z.B. nur in „ganzen“ Kilometern), ist die Bedingung $d_{i,j} \cdot K \geq 1$ für jede Konstante K mit $K \geq 1$ auf triviale Weise erfüllt. In diesem Fall reicht es aus, die Konstante K so groß zu wählen, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ d_{i,j} \mid i, j \in \{1, \dots, N\} \wedge d_{i,j} > 0 \right\}$$

mangelhafte kognitive Adäquanz. Denn ihre „Bedeutung“, d.h. die Erfüllung der beiden Formeln (35) und (39), lässt sich – im Gegensatz zu der o.a. @IF-Funktion¹⁾ – nicht unmittelbar aus der Formel (41) „ablesen“. Sie erschließt sich nur Experten, die mit den „Kunstgriffen“ der Konstruktion eines OR-Modells vertraut sind.²⁾ Da die Verfasser der unmittelbaren „Lesbarkeit“ einer computergestützten Modellformulierung hohen Rang einräumen, bevorzugen sie die Verwendung der leichter verständlichen @IF-Funktion.

Aufgrund der voranstehenden Erläuterungen reicht es zur computergestützten Formulierung des Tourenplanungsmodells als LINGO-Modell³⁾ aus, das Verkehrsnetz VN für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn dadurch zu spezifizieren, dass zunächst nur Informationen über die Menge der Haltepunkte des Verkehrsnetzes sowie über die Koeffizientenwerte der Distanzmatrix eingegeben werden. Dieser Informationseingabe dient die DATA-Sektion. Die Koeffizientenwerte der Verknüpfungsmatrix, die für die spätere Formulierung einer wichtigen Restriktion des Tourenplanungsmodells benötigt werden, lassen sich in einer anschließenden CALC-Sektion aus den bereits bekannten Werten Koeffizienten der Distanzmatrix berechnen.

-
- 1) Allerdings gilt es zu beachten, dass die @IF-Funktion nicht die Erfüllung der beiden Formeln (35) und (39) sicherstellt, sondern nur die Erfüllung der Formel (39). Dies reicht aber für den hier verfolgten Zweck vollkommen aus, die Werte der Verknüpfungskoeffizienten v_{ij} und somit die Verknüpfungsmatrix VM berechnen zu können, sobald die Werte der Distanzkoeffizienten d_{ij} aus der Distanzmatrix DM als Modellinput eingegeben worden sind.
 - 2) Außerdem ist noch Expertenwissen erforderlich, um die „sehr große“ Konstante K hinreichend groß zu wählen. Siehe dazu die Erläuterungen in der vorletzten Fußnote.
 - 3) Wie bereits an früherer Stelle angemerkt, wird hier eine grundsätzliche Vertrautheit mit der Modellierungssprache der mathematischen Modellierungssoftware LINGO vorausgesetzt. Außerdem erfüllt diese Software in bemerkenswerter Weise die Anforderung einer „natürlichen“, „kognitiv adäquaten“ Notation, sodass sich LINGO-Modelle – zumindest im Vergleich zu anderer mathematischer Modellierungssoftware – nahezu „unmittelbar“ lesen und verstehen lassen. Daher sollte es ausreichen, hier (und im Folgenden) nur auf einige wenige Merkmale der Syntax der Modellierungssprache von LINGO hinzuweisen:
 - a) Jedes in sich abgeschlossene Modellierungs-Statement wird durch ein Semikolon (;) abgeschlossen. Ein solches Modellierungs-Statement kann z.B. eine Deklaration von Konstanten, Parametern und Variablen, eine Restriktion oder ein Prozeduraufruf, insbesondere eine Optimierungsanweisung, sein.
 - b) Kommentare, die zur Erläuterung einzelner Komponenten eines LINGO-Modells dienen und keinen Einfluss auf die Modellauswertung haben, werden durch ein Ausrufezeichen (!) eingeleitet und ebenso durch ein Semikolon (;) abgeschlossen. Zur Modellauswertung dienen z.B. ein Parser für den Syntax-Check sowie – insbesondere – eine Solver-Komponente für die Ermittlung einer optimalen Modelllösung.
 - c) Die Sektion „SETS ... ENDSETS“ (kurz: SET-Sektion) dient in einem LINGO-Modell dazu, die „mengenartigen“ Konstrukte zu definieren, aus denen das Modell aufgebaut ist.
 - d) Die Sektion „DATA ... ENDDATA“ (kurz: DATA-Sektion) wird in einem LINGO-Modell dazu verwendet, für Parameter des Modells konkrete symbolische oder numerische Werte als Eingabeinformationen oder „Daten“ zu spezifizieren, die bei der Modellauswertung für jeden Modellparameter substituiert werden.
 - e) Die Sektion „CALC ... END CALC“ (kurz: CALC-Sektion) dient in einem LINGO-Modell dazu, „vorbereitende“ Auswertungen der Eingabedaten durchzuführen, bevor mit der „eigentlichen“ Modellauswertung, d.h. der Ermittlung einer optimalen Modelllösung, begonnen wird. Solche „vorbereitende“ Auswertungen können insbesondere dazu verwendet werden, um für eine nachfolgende variable Indexmenge ihr „größtes Element“ aus denjenigen Daten zu ermitteln, die in einer vorangehenden DATA-Sektion bereits eingegeben wurden. Dadurch wird die variable Indexmenge in eine konstante Indexmenge mit einer fest vorgegebenen Anzahl an Indexelementen transformiert.
 - e) Da im Modell-Editor von LINGO keine Hoch- oder Tiefstellungen möglich sind, werden Indizes mithilfe eines „unhübschen“ Unterstrichs angehängt. Ein Haltepunkt HP_n wird also im LINGO-Modell als „HP_n“ notiert.
 - f) Bezeichnungen von Modellelementen dürfen in LINGO keine Umlaute („ä“, „ö“, „ü“) und keine Sonderzeichen (woie z.B. „ß“) enthalten, die durch jeweils entsprechende Zeichenkombinationen („ae“, „oe“, „ue“ bzw. „ss“) zu ersetzen sind.

Die Abbildung 27 auf dieser und der nächsten Seite zeigt einen ersten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung des Verkehrsnetzes für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn.

SETS:

Haltepunkt;

! ist die Menge der Haltepunkte HP_n im OR-Modell;

1)

Gleisstrecken(Haltepunkt, Haltepunkt): Streckenlaenge;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Streckenlaenge(i,j) für die Koeffizienten der Distanzmatrix im OR-Modell;

2)

Direktverknuepfungen(Haltepunkt, Haltepunkt): Direktverknuepfung;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Direktverknuepfung(i,j) für die Koeffizienten der Verknüpfungsmatrix im OR-Modell;

ENDSETS

DATA:

Haltepunkt = HP1 HP2 HP3 HP4;

! gibt die Haltepunkte HP_n des Verkehrsnetzes als symbolische Konstanten HP1, HP2, HP3 und HP4 ein;

!		j=1	j=2	j=3	j=4	;
Streckenlaenge =		0	91	0	78	! i=1;
		91	0	0	144	! i=2;
		0	0	0	302	! i=3;
		78	144	302	0;	! i=4;

! Eingabe der Werte für jedes Element Streckenlaenge(i,j) zur Spezifizierung der Distanzmatrix;

3)

ENDDATA

-
- 1) Die mathematische Modellformulierung wird im LINGO-Modell der Kürze halber als „OR-Modell“ angesprochen.
 - 2) An dieser Stelle ist zu beachten, dass im LINGO-Modell eine Vereinfachung eingeführt wird: Streng genommen wird hier die Distanzmatrix mit den Distanzkoeffizienten d_{ij} definiert. Dennoch wird von „Gleisstrecken“ und „Streckenlaenge“ gesprochen, damit sich spätere Formeln im LINGO-Modell leichter verstehen lassen.
 - 3) Bei der Informationseingabe in Matrixform sind einige Besonderheiten der mathematischen Modellierungssoftware LINGO zu beachten: a) Nur am Ende der Gesamtmatrix darf genau ein abschließendes Semikolon vorkommen, also nicht an jedem Zeilenende. b) Die Werte der Matrixkoeffizienten müssen immer so eingegeben werden, dass die Elemente zur ersten / zweiten ... Trägermenge (in der Klammer der Spezifikation einer abgeleiteten Menge) in der ersten / zweiten ... Zeile der Matrix für die Informationseingabe stehen müssen. Hier stehen also für die o.a. abgeleitete Menge „Gleisstrecken(Haltepunkt [HP_i], Haltepunkt [HP_j]): Streckenlaenge“ beispielsweise die Streckenlängen vom Haltepunkt HP_i mit $i=1$ zu Haltepunkten HP_j mit beliebigen $j = 1, \dots, 4$ jeweils in der *ersten* Zeile.

Darüber hinaus ist die Vereinfachung zu berücksichtigen, die bereits in der voranstehenden Fußnote hinsichtlich der Definition der Distanzmatrix angesprochen wurde: Streng genommen werden an dieser Stelle die Werte für die Distanzkoeffizienten d_{ij} der Distanzmatrix eingegeben. Denn die Koeffizientenwerte „0“ in der o.a. Matrix stellen keine Streckenlängen s_{ij} von Gleisstrecken s_{ij} dar, sondern zeigen an, dass die beiden jeweils betroffenen Haltepunkte im Verkehrsnetz durch keine Gleisstrecke direkt miteinander verknüpft werden. Dennoch werden hier im LINGO-Modell die Distanzkoeffizienten d_{ij} der Einfachheit halber als „Streckenlaenge(i,j)“ angesprochen. Dies beeinflusst nicht die Menge optimaler Modelllösungen, gestattet es aber, das LINGO-Modell etwas kompakter und leichter lesbar zu formulieren.

CALC:

@FOR(Haltepunkt(i):

@FOR(Haltepunkt(j): Direktverknuepfung(i,j) = @IF(Streckenlaenge(i,j) #GT# 0, 1, 0));

ENDCALC

Abbildung 27: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell zur Spezifizierung des Verkehrsnetzes

7.2.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment

Im Tourenplanungsmodell wird eine beliebig große Anzahl E von *Eisenbahnverkehrsunternehmen* EVU_e mit $e = 1, \dots, E$ und $E \in \mathbb{N}_+$ betrachtet. Für das Verbundprojekt MAEKAS mit vier kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen gilt z.B. $E = 4$.

Jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen lässt sich durch eine Vielzahl von *Eigenschaften* charakterisieren. Im Tourenplanungsmodell werden für jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen drei simple und zwei komplexe Eigenschaften berücksichtigt. Die Gesamtheit der Ausprägungen dieser Eigenschaften charakterisiert das Potenzial für *Transportangebote*, das von den Eisenbahnverkehrsunternehmen im Planungszeitraum zur Erfüllung von Transportnachfragen bereitgestellt wird.

Die *simplen* Eigenschaften eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e sind zunächst die Anzahl $anz_{lok,e}$ der Lokomotiven, über die das Eisenbahnverkehrsunternehmen verfügt, sowie die Anzahl Q_e der Touren, die das Eisenbahnverkehrsunternehmen im Planungszeitraum höchstens durchzuführen vermag. Im Prinzip sind diese beiden Anzahlen voneinander unabhängig. Aber es wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass sich keine Lokomotive im Planungszeitraum für mehrere Touren einsetzen lässt. Daraus folgt unmittelbar, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen im Planungszeitraum mit jeder seiner Lokomotiven höchstens eine Tour durchführen kann.¹⁾ Unter dieser speziellen Voraussetzung gilt:

$$\forall e = 1, \dots, E: Q_e = anz_{lok,e} \quad (42)$$

Hinzu kommt als dritte simple Eigenschaft, dass jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e über genau ein *Depot* DEP_e verfügt (*Ein-Depot-Prämisse*)²⁾, dessen Standort sich in einem Haltepunkt HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes befindet. Das Depot DEP_e dient dazu, das Equipment des Eisenbahnverkehrsunternehmens bereitzuhalten, solange es nicht für die Durchführung von Touren produktiv eingesetzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass jede reale³⁾ Tour des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens beginnt und in

-
- 1) Diese vereinfachende Annahme entspricht der Transportmittel-Touren-Prämisse, die an früherer Stelle angeführt wurde.
 - 2) Stattdessen lässt es sich ebenso vorstellen, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen sein Equipment über mehrere Depots verteilt bereithält. Davon wird aber im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell abgesehen. Diese Option lässt sich vielleicht in späteren Modellerweiterungen berücksichtigen.
 - 3) Auf die Unterscheidung zwischen realen und artifiziellen Touren wird später im Kapitel 7.2.4 näher eingegangen, in dem die Modellierung von Touren ausführlicher thematisiert wird.

diesem Depot auch wieder endet (*Depot-Touren-Prämisse*).¹⁾ Die Binärvariable²⁾ $dhp_{e,n}$ für den *Depot-Haltepunkt* nimmt genau dann den Wert $dhp_{e,n} = 1$ an, wenn das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e sein Depot im Haltepunkt HP_n eingerichtet hat ($DEP_e = HP_n$). Andernfalls weist sie den Wert $dhp_{e,n} = 0$ auf. Es muss also gelten:

$$\forall e = 1, \dots, E: dhp_{e,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } DEP_e = HP_n \\ 0, & \text{wenn } DEP_e \neq HP_n \end{cases} \quad (43)$$

Des Weiteren gilt aufgrund der Ein-Depot-Prämisse, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen über genau ein Depot für sein Equipment verfügt:

$$\forall e = 1, \dots, E: \sum_{n=1}^N dhp_{e,n} = 1 \quad (44)$$

Die Verwendung der Binärvariable $dhp_{e,n}$ für den Depot-Haltepunkt hat den Vorzug, dass sie die Flexibilität bietet, bei späteren Modellerweiterungen pro Eisenbahnverkehrsunternehmen auch mehrere Depots in unterschiedlichen Haltepunkten vorzusehen.³⁾ Dies kann z.B. genutzt werden, um unterschiedliche Touren desselben Eisenbahnverkehrsunternehmens in verschiedenen Depots beginnen und enden zu lassen.

Als *Equipment* eines Eisenbahnverkehrsunternehmens werden im Tourenplanungsmodell nur dessen Lokomotiven und Güterwagen berücksichtigt. Dieser *Fuhrpark* kann komplex zusammengesetzt sein, d.h., es lassen sich im Allgemeinen sowohl für Lokomotiven als auch für Güterwagen unterschiedliche Typen erfassen. Daraus resultieren als *komplexe* Eigenschaften eines Eisenbahnverkehrsunternehmens seine Ausstattung mit Lokomotiven unterschiedlichen Typs und seine Ausstattung mit Güterwagen unterschiedlichen Typs.

Lokomotiven stellen die Traktionseinheiten dar, die Güterzüge „ziehen“⁴⁾. In diesem Projektbericht werden als *Lokomotivarten* ausschließlich *Diesel-* und *Elektro-Lokomotiven* betrachtet, weil die kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen des Verbundprojekts MAEKAS über keine anderen Lokomotivarten verfügen. Darüber hinaus könnten noch weitere, in der betrieblichen Praxis von

- 1) Eine reale Tour ist also nur dann zulässig, wenn sie im Verkehrsnetz VN einen zusammenhängenden, gerichteten und zyklischen Weg bildet, der im Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens beginnt und endet. Dadurch entsteht für jede *einzelne* reale Tour ein Tourenplanungsproblem in der speziellen Gestalt eines Rundreiseproblems vom Travelling-Salesman-Typ.
- 2) Die Binärvariable $dhp_{e,n}$ stellt weder eine Entscheidungsvariable noch eine modellendogene Variable dar. Vielmehr handelt es sich um eine modellexogene Variable, deren konkreter Wert durch eine Informationseingabe des Modellbenutzers spezifiziert werden muss.
- 3) Bei einer solchen Modellerweiterung kann ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e über mehrere Depots $DEP_{e,f}$ mit $f = 1, \dots, F$ und $F \in \mathbb{N}_+$ verfügen. Die Restriktion aus Formel (43) muss dann entsprechend modifiziert werden zu:

$$\forall e = 1, \dots, E: \sum_{n=1}^N dhp_{e,n} = F$$
- 4) Grundsätzlich ist es auch möglich, dass eine Lokomotive einen Güterzug „schiebt“ oder sogar „innerhalb“ eines Güterzugs für die erforderliche Antriebskraft („Traktionskraft“) sorgt. Von solchen Sonderfällen wird hier jedoch abgesehen und deshalb nur vom „Ziehen“ eines Güterzugs gesprochen. Außerdem führt es im Tourenplanungsmodell zu keinem Unterschied, an welcher Stelle eines Güterzugs die „ziehende“, „schiebende“ oder „ziehend-schiebende“ Lokomotive positioniert ist.

Eisenbahnverkehrsunternehmen jedoch kaum relevante Lokomotivarten einbezogen werden. Dazu gehören vor allem – technisch veraltete – Dampflokomotiven. Weitere, „exotische“ Varianten, wie etwa Lokomotiven mit Flüssiggas- oder Brennstoffzellenantrieb, mögen zukunftsweisend anmuten, spielen aber derzeit noch keine Rolle.

Sowohl für Diesel- als auch für Elektro-Lokomotiven werden beliebig viele unterschiedliche *Lokomotiv-Typen* zugelassen.¹⁾ Sie werden als dieselgetriebene Lokomotiv-Typen $LT_{die,a}$ mit $a = 1, \dots, A$ und $A \in \mathbb{N}_+$ bzw. als elektrogetriebene Lokomotiv-Typen $LT_{ele,b}$ mit $b = 1, \dots, B$ und $B \in \mathbb{N}_+$ bezeichnet. Die Anzahl der Lokomotiven eines bestimmten Typs, über die ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e verfügt, wird mit $anz_{lok,die,a,e}$ für Diesel- und mit $anz_{lok,ele,b,e}$ für Elektro-Lokomotiven angegeben.

Für die Anzahl $anz_{lok,e}$ der Lokomotiven beliebigen Typs, über die ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e insgesamt verfügt, gilt der einfache Zusammenhang:

$$\forall e = 1, \dots, E: \quad anz_{lok,e} = \sum_{a=1}^A anz_{lok,die,a,e} + \sum_{b=1}^B anz_{lok,ele,b,e} \quad (45)$$

Jede Lokomotive desselben Lokomotiv-Typs verfügt über dieselbe maximale Zugkraft in [to], die für die Lokomotiv-Typen durch die Parameter $zk_{die,a}$ und $zk_{ele,b}$ angegeben wird. Diese maximale Zugkraft stellt die Traktionskapazität dar, die von den Lokomotiven eines Typs für das Ziehen eines Güterzugs jeweils zur Verfügung gestellt werden kann. Darüber hinaus wird jede Lokomotive desselben Lokomotiv-Typs durch ihr Gesamtgewicht in [to] charakterisiert, das für die Lokomotiv-Typen durch die Parameter $gg_{die,a}$ und $gg_{ele,b}$ angegeben wird. Schließlich bezeichnen die Parameter $dce_{die,a}$ und $dce_{ele,b}$ die durchschnittlichen CO_2 -Emissionen in [kg CO_2 / to·km], die von einer Diesel-Lokomotive vom Typ $LT_{die,a}$ bzw. von einer Elektro-Lokomotive vom Typ $LT_{ele,b}$ verursacht werden.

1) Die Lokomotiv-Typen werden nicht individuell für jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e spezifiziert. Daher entfällt ein unternehmensspezifischer Index „e“ bei den Anzahlen verschiedenartiger Lokomotiv-Typen und ihren charakteristischen Eigenschaften, wie z.B. der maximalen Zugkraft und den durchschnittlichen CO_2 -Emissionen.

Die folgende Tabelle 7 zeigt ein Beispiel für den Lokomotiv-Fuhrpark eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e .

Lokomotiv-Typ	maximale Zugkraft des Lokomotiv-Typs	Gesamtgewicht des Lokomotiv-Typs	durchschnittliche CO ₂ -Emissionen ¹⁾ des Lokomotiv-Typs	Anzahl von Lokomotiven des Typs
LT _{die.1}	zk _{die.1} = 1.440 to	72/80 to	0,027 kg/to·km (+10 %)	anz _{lok.die.1.e} = 1
LT _{die.2} ²⁾	zk _{die.2} = 1.500 to	72/80 to	0,027 kg/to·km (+ 10 %)	anz _{lok.die.2.e} = 1
LT _{ele.1}	zk _{ele.1} = 2.000 to	85 to	0,027 kg/to·km (-10 %)	anz _{lok.ele.1.e} = 0
LT _{ele.2} ³⁾	zk _{ele.2} = 2.200 to	85 to	0,027 kg/to·km (-10 %)	anz _{lok.ele.2.e} = 2

Tabelle 7: Beispiel eines Lokomotiv-Fuhrparks für das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e

Hinsichtlich der *Güterwagen* eines Eisenbahnverkehrsunternehmens werden zwei *Güterwagenarten* unterschieden. Es handelt sich um Güterwagen, die sich entweder für Transporte von *Standardgütern* oder aber für Transporte von *Gefahrgütern* eignen. Sowohl für Standard- als auch für Gefahrgut-Güterwagen werden beliebig viele unterschiedliche *Güterwagen-Typen* zugelassen. Sie werden als Güterwagen-Typen $GT_{sta.c}$ mit $c = 1, \dots, C$ und $C \in \mathbb{N}_+$ für Standardgüter bzw. als Güterwagen-Typen $GT_{gef.d}$ mit $d = 1, \dots, D$ und $D \in \mathbb{N}_+$ für Gefahrgüter bezeichnet. Die Anzahlen der Güterwagen eines bestimmten Typs, über die ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e verfügt, werden mit $anz_{wag.sta.c.e}$ für Standard-Güterwagen und $anz_{wag.gef.d.e}$ für Gefahrgut-Güterwagen angegeben.

Alle Güterwagen desselben Güterwagen-Typs haben ein *Eigengewicht* in [to], das durch die Parameter $eg_{sta.c}$ für Standard-Güterwagen und $eg_{gef.d}$ für Gefahrgut-Güterwagen dargestellt wird, sowie ein *höchstzulässiges Gesamtgewicht* in [to], das durch die Parameter $hgg_{sta.c}$ bzw. $hgg_{gef.d}$ angegeben wird. Die *Ladungskapazität* in [to], die durch die Parameter $lk_{sta.c}$ für Standard-Güterwagen und $lk_{gef.d}$ für Gefahrgut-Güterwagen erfasst wird, ist für jeden Güterwagen-Typ als Differenz zwischen seinem höchstzulässigen Gesamt- und seinem Eigengewicht definiert. Daher muss für alle Güterwagen-Typen per definitionem gelten:

$$\forall c = 1, \dots, C: lk_{sta.c} = hgg_{sta.c} - eg_{sta.c} \quad (46)$$

$$\forall d = 1, \dots, D: lk_{gef.d} = hgg_{gef.d} - eg_{gef.d} \quad (47)$$

1) Vgl. IFEU/GREENDELTA TC (2007), S. 17. Bei den 0,027 kg/to·km für die durchschnittliche CO₂-Emission des Lokomotiv-Typs findet in der vorgenannten Quelle keine Unterscheidung zwischen Diesel- und Elektro-Lokomotiven statt. Daher werden im Folgenden aus Plausibilitätsgründen für Diesel-Lokomotiven noch 10 % zum durchschnittlichen Wert von 0,027 kg/to·km hinzugerechnet und für Elektro-Lokomotiven 10 % vom durchschnittlichen Wert von 0,027 kg/to·km abgezogen.

2) Die genaue Bezeichnung der Diesel-Lokomotive lautet „Vossloh G 1000 BB“. Dieser Lokomotiv-Typ wird von der Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH eingesetzt.

3) Die genaue Bezeichnung der Elektro-Lokomotive lautet „SBB RE 484“. Dieser Lokomotiv-Typ wird von der SBB Cargo GmbH für internationale Güterverkehre genutzt.

Die folgende Tabelle 8 zeigt ein Beispiel für den Güterwagen-Fuhrpark eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e .

Güterwagen-Typ	Eigengewicht des Güterwagen-Typs	höchstzulässiges Gesamtgewicht des Güterwagen-Typs	Ladungskapazität des Güterwagen-Typs	Anzahl von Güterwagen des Typs
$GT_{sta.1}$	$eg_{sta.1} = 22$ to	$hgg_{sta.1} = 66$ to	$lk_{sta.1} = 44$ to	$anz_{wag.sta.1.e} = 12$
$GT_{sta.2}$	$eg_{sta.2} = 20$ to	$hgg_{sta.2} = 50$ to	$lk_{sta.2} = 30$ to	$anz_{wag.sta.2.e} = 10$
$GT_{gef.1}$	$eg_{gef.1} = 30$ to	$hgg_{gef.1} = 80$ to	$lk_{gef.1} = 50$ to	$anz_{wag.gef.1.e} = 3$
$GT_{gef.2}$	$eg_{gef.2} = 25$ to	$hgg_{gef.2} = 65$ to	$lk_{gef.2} = 40$ to	$anz_{wag.gef.2.e} = 0$

Tabelle 8: Beispiel eines Güterwagen-Fuhrparks für das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e

Für die Anzahl $anz_{wag.e}$ der Güterwagen beliebigen Typs, über die ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e insgesamt verfügt, gilt der einfache Zusammenhang:

$$\forall e = 1, \dots, E: \text{anz}_{wag.e} = \sum_{c=1}^C \text{anz}_{wag.sta.c.e} + \sum_{d=1}^D \text{anz}_{wag.gef.d.e} \quad (48)$$

Die Festlegungen für die zu berücksichtigenden Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment fallen bei der mathematischen Modellformulierung kaum ins Auge. Sie dienen in erster Linie „nur“ der Bestimmung von Indexmengen für die Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie für die Lokomotiv- und Güterwagen-Typen. Den Formeln (42) bis (48) kommt daher in der mathematischen Modellformulierung nur eine untergeordnete Rolle zu.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die voranstehende mathematische Modellformulierung für die Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen. Da in diesem Optimierungsbeispiel nur ein Eisenbahnverkehrsunternehmen, die Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG – Neusser Eisenbahn, mit nur einer Lokomotive betrachtet wird, liegt ein sehr einfacher Modellierungsfall mit $e = E = 1$ und $anz_{lok.1} = 1$ vor.

Zwischen Diesel- und Elektro-Lokomotiven braucht nicht unterschieden zu werden, weil der Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecken im praktischen Optimierungsbeispiel unberücksichtigt bleibt. Auch der Lokomotiv-Typ spielt keine Rolle, weil ohnehin nur mit einer Lokomotive geplant werden kann. Außerdem wird davon ausgegangen, dass nur Güterwagen desselben Güterwagen-Typs eingesetzt werden, wie z.B. Standard-Güterwagen des Typs $c = C = 1$. Aufgrund dieser Vereinfachungen lässt sich auf alle Indizes für die Unterscheidung zwischen Lokomotivarten (Diesel- versus Elektro-Lokomotiven) und mehreren Lokomotiv-Typen je Lokomotivart sowie zwischen Güterwagenarten (Standard- versus Gefahrgut-Güterwagen) und Güterwagen-Typen je Güterwagenart verzichten.

Die Abbildung 28 auf der nächsten Seite zeigt einen zweiten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung des Eisenbahnverkehrsunternehmens und seines Equipments für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn.

SETS:

Eisenbahnverkehrsunternehmen: Anzahl_Lokomotiven, Anzahl_max_Touren;

! ist die Menge der Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e im OR-Modell mit ihren Eigenschaften Anzahl_Lokomotiven und Anzahl_max_Touren;

Depots(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Haltepunkt): Depot_Haltepunkt;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Depot_Haltepunkt(e,n) für das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n im OR-Modell;

ENDSETS

DATA:

Eisenbahnverkehrsunternehmen = EVU1 ;! EVU2 ;

Anzahl_Lokomotiven = 1 ;! 0 ;

! gibt das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mit e=1 als symbolische Konstante EVU1 ein
Das zweite Eisenbahnverkehrsunternehmen mit der symbolischen Konstanten EVU2 wird lediglich als „Dummy“ in einem Kommentar-Zusatz eingefügt, um zu verdeutlichen, wie die Informationseingabe erweitert werden müsste, wenn mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen zugelassen sind. Die Lokomotivenanzahl 0 für das EVU2 zeigt an, dass das EVU2 für das hier betrachtete Optimierungsbeispiel keine Bedeutung besitzt.;

! HP_1 HP_2 HP_3 HP_4 ;

Depot_Haltepunkt = 1 0 0 0 ; ! EVU_1: hier hat das EVU1 sein Depot im HP1;

! 0 0 0 1 ; ! EVU_2: hier hat das EVU2 sein Depot im HP4;

! Eingabe der Matrix der Depot_Haltepunkte DEP_e der Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e;

ENDDATA

CALC:

@FOR(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Anzahl_max_Touren(e) = Anzahl_Lokomotiven(e));

Groesste_Anzahl_max_Touren = @MAX(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Anzahl_max_Touren(e)); ¹⁾

ENDCALC

Abbildung 28: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell zur Spezifizierung eines Eisenbahnverkehrsunternehmens und seines Equipments

7.2.3 Transportnachfrage

Die Transportnachfrage wird für jeden Haltepunkt des Verkehrsnetzes aggregiert betrachtet (*Aggregations-Prämisse*). Es wird also nicht unterschieden, welche Teile der Transportnachfrage in einem Haltepunkt HP_n zu welchen einzelnen Kunden gehören. Die bevorzugte Behandlung der Transportnachfragen von Kunden, die für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen besondere Bedeutung besitzen („key accounts“), kann im hier vorgelegten Tourenplanungsmodell also noch nicht berücksichtigt werden.

1) Bei der Variable „Groesste_Anzahl_max_Touren“ handelt es sich lediglich um eine „technische“ Hilfsgröße mit $Q_{\max} = \max\{Q_e | e=1, \dots, E\}$, die an einer späteren Stelle des LINGO-Modells benötigt wird. Da im hier betrachteten praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn nur ein Eisenbahnverkehrsunternehmen betrachtet wird ($E = 1$), gilt unmittelbar $Q_{\max} = Q_1$. Dennoch wird im LINGO-Modell die Hilfsgröße mit Q_{\max} von vornherein spezifiziert, damit sie bei späteren Modellerweiterungen auf mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen mit $E \geq 2$ nicht neu eingeführt werden muss. Diese „Spezifizierung auf Vorrat“ erhöht die Erweiterungsflexibilität des hier vorgestellten LINGO-Modells.

Für jeden Haltepunkt HP_i des Verkehrsnetzes VN ist eine Transportnachfrage bekannt. Diese Transportnachfrage spezifiziert:

- die *Beladungsmenge* $gmb_{sta.c.i}$ in [to] für Standard-Güterwagen des Typs $GT_{sta.c}$ am Haltepunkt HP_i (es gilt $gmb_{sta.c.i} = 0$, falls keine solche Gütermenge zur Beladung am Haltepunkt HP_i vorliegt),
- die *Beladungsmenge* $gmb_{gef.d.i}$ in [to] für Gefahrgut-Güterwagen des Typs $GT_{gef.d}$ am Haltepunkt HP_i (es gilt $gmb_{gef.d.i} = 0$, falls keine solche Gütermenge zur Beladung am Haltepunkt HP_i vorliegt),
- die *Entladungsmenge* $gme_{sta.c.i,j}$ in [to] für Standard-Güterwagen des Typs $GT_{sta.c}$, die vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j zu transportieren und im Haltepunkt HP_j zu entladen ist (es gilt $gme_{sta.c.i,j} = 0$, falls keine solche Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_i stammt, zur Entladung am Haltepunkt HP_j bestimmt ist),
- die *Entladungsmenge* $gme_{gef.d.i,j}$ in [to] für Gefahrgut-Güterwagen des Typs $GT_{gef.d}$, die vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j zu transportieren und im Haltepunkt HP_j zu entladen ist (es gilt $gme_{gef.d.i,j} = 0$, falls keine solche Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_i stammt, zur Entladung am Haltepunkt HP_j bestimmt ist).

Der Haltepunkt HP_i , in dem ein Güterwagen¹⁾ mit der Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ einer Transportnachfrage beladen wird, heißt auch *Start-Haltepunkt* oder *Lieferstart* der Transportnachfrage im Haltepunkt HP_i . Der Haltepunkt HP_j , in dem aus einem Güterwagen die vom Haltepunkt HP_i transportierte Gütermenge $gme_{sta.c.i,j}$ oder $gme_{gef.d.i,j}$ einer Transportnachfrage entladen wird, heißt auch *Ziel-Haltepunkt* oder *Lieferziel* der Transportnachfrage im Haltepunkt HP_j .

Für jeden Güterwagen-Typ $GT_{sta.c}$ mit $c = 1, \dots, C$ und $GT_{gef.d}$ mit $d = 1, \dots, D$ kann eine andere, jeweils güterwagentypspezifische Be- und Entladungsmenge spezifiziert werden. Auch können die Ziel-Haltepunkte HP_j für Transportnachfragen, die im Haltepunkt HP_i artikuliert werden, je nach Güterwagen-Typ variieren. Allerdings ist es *nicht* möglich, für *eine* güterwagentypspezifische Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$, mit der ein Güterzug am Start-Haltepunkt HP_i beladen wird, *mehrere* Ziel-Haltepunkte HP_j zu spezifizieren, an denen jeweils *Anteile* der ursprünglich aufgeladenen Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ als Teilladungen entladen werden. Es muss also zu jeder Beladungsmenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ für einen Start-Haltepunkt HP_i genau einen Ziel-Haltepunkt HP_j mit $gme_{sta.c.i,j}$ bzw. $gme_{gef.d.i,j}$ und $gme_{sta.c.i,j} = gmb_{sta.c.i}$ bzw. $gme_{gef.d.i,j} = gmb_{gef.d.i}$ geben. Diese Anforderung wird auch als *Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entladungsmengen* bezeichnet.²⁾

1) Je nach Größe der Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ kann auch die Beladung von *mehreren* Güterwagen erforderlich werden. Dies wird jedoch hier und im Folgenden nicht explizit erwähnt, um die Diktion möglichst einfach zu halten. Die Option mehrerer Güterwagen gilt jedoch stets als implizit mitgedacht.

2) Die Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entladungsmengen ist allerdings gehaltreicher, als „nur“ zu verbieten, dass eine Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$, mit der ein Güterzug an einem Haltepunkt HP_i beladen wurde, in mehrere Teilladungen aufgespalten wird, die an unterschiedlichen Ziel-Haltepunkten HP_j entladen werden. Vielmehr weist sie aufgrund der beiden Anforderungen $gme_{sta.c.i,j} = gmb_{sta.c.i}$ und $gme_{gef.d.i,j} = gmb_{gef.d.i}$ auch den – durchaus willkommenen – „Überschussgehalt“ aus, dass unterwegs weder Gütermengen verloren gehen (Verbot von $gme_{sta.c.i,j} < gmb_{sta.c.i}$ und $gme_{gef.d.i,j} < gmb_{gef.d.i}$) noch „aus dem Nichts“ erschaffen werden (Verbot von $gme_{sta.c.i,j} > gmb_{sta.c.i}$ und $gme_{gef.d.i,j} > gmb_{gef.d.i}$) können.

Zum besseren Verständnis wird in der folgenden Tabelle ein Beispiel für eine Transportnachfrage angeführt, die im Haltepunkt HP_i mit $i = 3$ im Hinblick auf verschiedene Güterwagen-Typen und mit unterschiedlichen Lieferzielen artikuliert wird.¹⁾

Güterwagen-Typ	Beladungsmenge im Haltepunkt HP_3 als Lieferstart	Haltepunkt HP_j für das Lieferziel	Entladungsmenge im Haltepunkt HP_j als Lieferziel
$GT_{sta.1}$	$gmb_{sta.1.3} = 12$ to	HP_7	$gme_{sta.1.3.7} = 12$ to
$GT_{sta.2}$	$gmb_{sta.2.3} = 75$ to	HP_1	$gme_{sta.2.3.1} = 75$ to
$GT_{gef.1}$	$gmb_{gef.1.3} = 50$ to	HP_4	$gme_{gef.1.3.4} = 50$ to
$GT_{gef.2}$	$gmb_{gef.2.3} = 12$ to	HP_5	$gme_{gef.2.3.5} = 12$ to

Tabelle 9: Beispiel für eine Transportnachfrage im Haltepunkt HP_3

Aufgrund der Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entladungsmengen müssen bei der Spezifizierung der Transportnachfragen in allen Haltepunkten des Verkehrsnetzes zwei *Integritätsbedingungen*²⁾ beachtet werden:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad (49)$$

$$(gmb_{sta.c.i} > 0 \wedge gme_{sta.c.i.j} > 0) \rightarrow gmb_{sta.c.i} = gme_{sta.c.i.j}$$

$$\forall d \in \{1, \dots, D\} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad (50)$$

$$(gmb_{gef.d.i} > 0 \wedge gme_{gef.d.i.j} > 0) \rightarrow gmb_{gef.d.i} = gme_{gef.d.i.j}$$

Allerdings handelt es sich nur um *schwache* Integritätsbedingungen. Sie sorgen nur dafür, dass die Anforderung $gme_{sta.c.i.j} = gmb_{sta.c.i}$ und $gme_{gef.d.i.j} = gmb_{gef.d.i}$ aus der Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entladungsmengen erfüllt wird, *falls* zu jedem Start-Haltepunkt HP_i mit der Beladungsmenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ genau ein Ziel-Haltepunkt HP_j mit der korrespondierenden Entladungsmenge $gme_{sta.c.i.j}$ bzw. $gme_{gef.d.i.j}$ existiert. *Dass* ein solcher Ziel-Haltepunkt HP_j für jeden Einzelfall existiert, das vermögen die beiden o.a. Integritätsbedingungen aus den Formeln (49)

-
- 1) Eine solche tabellarische Darstellung könnte den Eindruck erwecken, dass für eine Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$, mit der ein Güterzug im Haltepunkt HP_i zu beladen ist, nur der Ziel-Haltepunkt HP_j und die dort zu entladenden Gütermengen $gme_{sta.c.i.j}$ bzw. $gme_{gef.d.i.j}$ zu spezifizieren sind. Dieser Eindruck würde jedoch in die Irre leiten. Denn die Parameter $gme_{sta.c.i.j}$ und $gme_{gef.d.i.j}$ müssen für alle Güterwagen-Typen und für alle Paare aus Haltepunkten HP_i und HP_j konkrete Werte aufweisen. Andernfalls ließe sich z.B. nicht überprüfen, ob die Integritätsbedingungen aus den beiden Formeln (48) und (49) erfüllt sind. Denn zu ihrer Überprüfung ist es u.a. erforderlich festzustellen, ob die Teilbedingungen $gme_{sta.c.i.j} > 0$ bzw. $gme_{gef.d.i.j} > 0$ erfüllt sind oder nicht. Damit dieser Fall un spezifizierter Parameterwerte nicht eintreten kann, wurde schon oben festgelegt, dass für alle Güterwagen-Typen und für alle Paare aus Haltepunkten HP_i und HP_j als Default-Werte $gme_{sta.c.i.j} = 0$ und $gme_{gef.d.i.j} = 0$ gelten, sofern keine Gütermenge existiert, mit der ein Güterzug im Haltepunkt HP_i beladen werden soll und die am Haltepunkt HP_j zu entladen ist.
 - 2) Integritätsbedingungen stellen in der hier eingeführten Terminologie *Integritätsrestriktionen* dar. Im Interesse der Anschlussfähigkeit an die etablierte Fachliteratur wird aber weiterhin von Integritätsbedingungen gesprochen, weil sich diese Bezeichnung allgemein durchgesetzt hat.

und (50) jedoch nicht sicherzustellen. Dies leisten erst die beiden nachfolgend angeführten *strikten* Integritätsbedingungen:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N :$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0 \rightarrow \left(\exists j \in \{1, \dots, N\} : \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \right) \right) \wedge \dots \quad (51)$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0 \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N : \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = 0 \right) \right)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N :$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0 \rightarrow \left(\exists j \in \{1, \dots, N\} : \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} = \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \right) \right) \wedge \dots \quad (52)$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} = 0 \rightarrow \left(\forall j \in \{1, \dots, N\} : \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} = 0 \right) \right)$$

Da sich solche Subjugat-Formeln, wie schon mehrfach erwähnt wurde, nur schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementieren lassen, werden sie mittels eines „Kunstgriffs“ in eine äquivalente, aber „subjugatfreie“ Darstellungsweise transformiert:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} - \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}) = 0 \quad (53)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} - \text{gmb}_{\text{gef.d.i}}) = 0 \quad (54)$$

Die Funktionsweise dieser „subjugatfreien“ Darstellungsweise wird anhand von Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ und $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ für Transporte von Standardgütern in exemplarischer Weise kurz erläutert. Falls $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ gilt, wird die Restriktion $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} - \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}) = 0$ nur dadurch erfüllt, dass $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ gilt. Wegen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ und $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ werden die beiden anderen Restriktionen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \geq 0$ und $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ notwendig erfüllt. Andernfalls, wenn also $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ die gilt, sorgen für beiden Restriktionen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \geq 0$ und $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ dafür, dass $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = 0$ gelten muss. Die Restriktion $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} - \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}) = 0$ wird für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ notwendig erfüllt. Folglich stellen die beiden Formeln (53) und (54) sicher, dass die Werte für die Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ und $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ nur genau so gewählt werden können, dass die Integritätsbedingung der Formel (51) erfüllt ist.

Die *Unterscheidung* zwischen den zu *beladenen* Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ und den zu *entladenen* Gütermengen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ für Transporte von Standardgütern sowie in analoger Weise zwischen den zu *beladenen* Gütermengen $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}}$ und den zu *entladenen* Gütermengen $\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}}$ für Transporte von Gefahrgütern mag auf den ersten Blick „unnötig kompliziert“ wirken. Sie ist auch in konventionellen Tourenplanungsmodellen, wie z.B. dem oben vorgestellten Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, unbekannt. Dennoch ist sie im Hinblick auf das hier zugrunde liegende Realproblem aus zwei Gründen erforderlich.

Erstens kann der Fall eintreten, dass am *selben* Ziel-Haltepunkt HP_j Gütermengen entladen werden sollen, die an zwei *unterschiedlichen* Start-Haltepunkten HP_{i_1} und HP_{i_2} beladen wurden. Würde man am Ziel-Haltepunkt HP_j nur mit der negativen Beladungsmenge $-\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ für einen exemplarisch betrachteten Transport von Standardgütern arbeiten, müsste *derselbe* Parameter $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ *zwei* unterschiedliche Werte aufweisen: einen ersten für die zu entladende Gütermenge, die vom Halte-

punkt HP_{i_1} herantransportiert wurde, sowie einen zweiten für die zu entladende Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_{i_2} herantransportiert wurde.¹⁾ Um diese Komplikation zu vermeiden, müssen die zu entladenden Gütermengen in jedem Ziel-Haltepunkt HP_j nach den Start-Haltepunkten unterschieden werden, in denen die Beladung der Güterwagen mit denjenigen Gütermengen erfolgte, die für denselben Ziel-Haltepunkt HP_j bestimmt sind. Deshalb wird in den Parametern $gme_{sta.c.i,j}$ und $gme_{gef.d.i,j}$ für zu entladende Gütermengen von vornherein mit der Doppel-Indexkomponente „i,j“ gearbeitet. Sie gestatten es, am selben Ziel-Haltepunkt HP_j Gütermengen zu entladen, die an unterschiedlichen Start-Haltepunkten beladen wurden.

Beispielsweise seien die zwei Start-Haltepunkte HP_1 und HP_3 betrachtet. Dort wird ein Güterzug mit den Gütermengen $gmb_{sta.c.1}$ bzw. $gmb_{sta.c.3}$ beladen, die wegen $gme_{sta.c.1.7} = gmb_{sta.c.1}$ bzw. $gme_{sta.c.3.7} = gmb_{sta.c.3}$ für denselben Ziel-Haltepunkt HP_7 bestimmt sind. Dann ist im Ziel-Haltepunkt HP_7 (mindestens) die Gütermenge $gme_{sta.c.1.7} + gme_{sta.c.3.7}$ zu entladen, die aus den beiden verschiedenen Start-Haltepunkten HP_1 und HP_3 angeliefert wurde.

Zweitens wird das Tourenplanungsmodell von vornherein so *flexibel* ausgelegt, dass es spätere Modellerweiterungen gestattet, in denen eine Gütermenge, mit der ein Güterzug an einem Haltepunkt HP_i beladen wird, an *mehreren* Lieferziel-Haltepunkten $HP_{j(h)}$ mit $h = 1, \dots, H_i$, $H_i \in \mathbb{N}_+$ und $H_i \geq 2$ entladen werden kann. In diesem Erweiterungsfall ist lediglich dafür zu sorgen, dass die Summe der Entladungsmengen an den mehreren Ziel-Haltepunkten gleich der Beladungsmenge am betrachteten Haltepunkt HP_i ist.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die voranstehende mathematische Modellformulierung für die Transportnachfrage in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen.

Zurzeit werden in der computergestützten Modellformulierung die o.a. Integritätsbedingungen weder in der schwachen noch in der strikten Variante berücksichtigt. Stattdessen wird der Einfachheit halber vorausgesetzt, dass die strikten Integritätsbedingungen durch die Informationseingabe für die Werte der Parameter $gmb_{sta.c.i}$, $gmb_{gef.d.i}$, $gme_{sta.c.i,j}$ und $gme_{gef.d.i,j}$ von vornherein eingehalten werden. Darüber hinaus wird nicht zwischen verschiedenen Güterwagenarten (Standard- versus Gefahrgut-Güterwagen) und zwischen Güterwagen unterschiedlichen Typs differenziert. Daher fallen die Parameter $gmb_{sta.c.i}$ und $gmb_{gef.d.i}$ für Beladungsmengen in nur noch einem Parameter gmb_i sowie die Parameter $gme_{sta.c.i,j}$ und $gme_{gef.d.i,j}$ für Entladungsmengen in nur noch einem Parameter $gme_{i,j}$ zusammen.

1) Das hier angesprochene Problem würde nur dann entfallen, wenn die beiden zu entladenden Gütermengen zufällig gleich groß wären.

Stattdessen könnte auch erwogen werden, durch komplizierte Zusatzkonstruktionen dafür Sorge zu tragen, dass am Ziel-Haltepunkt HP_j nur mit *einer* negativen Beladungsmenge $-gmb_{sta.c.j}$ gearbeitet wird, in der alle dort von anderen Haltepunkten ankommenden Transportmengen aggregiert werden. Solche komplizierten Zusatzkonstruktionen werden jedoch durch die hier eingeführte, explizite Unterscheidung zwischen Gütermengen, die an einem Haltepunkt entweder zu be- oder aber zu entladen sind, von vornherein vermieden.

Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt einen dritten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung der Transportnachfrage für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn.

SETS:

Beladungsmengen(Haltepunkt): gmb;

! spezifiziert die Beladungsmengen gmb_i, mit denen ein Güterzug im Haltepunkt HP_i zu beladen ist;

Entladungsmengen(Haltepunkt, Haltepunkt): gme;

! spezifiziert die Entladungsmengen gme_i_j, von denen ein Güterzug, der im Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge gmb_i beladen wurde, im Haltepunkt HP_j zu entladen ist;

ENDSETS

DATA:

```
!      i=1    i=2    i=3    i=4    ;
gmb = 0      200   400   300   ;
! Eingabe der Matrix der Zuladungsmengen;
!      j=1    j=2    j=3    j=4    ;
gme = 0      0      0      0      ! i=1;
      0      0      0      200   ! i=2;
      0      0      0      400   ! i=3;
      300    0      0      0      ; ! i=4;
```

! Eingabe der Matrix der Entladungsmengen;

1)

ENDDATA

Abbildung 29: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell zur Spezifizierung der Transportnachfrage

- 1) Bei dieser Matrix-Darstellungsweise ist zu beachten, dass die Integritätsbedingungen gemäß den Formeln (49) und (50) oder (51) und (52) durch die Eingabe korrekter („integrer“) Werte in die Matrix der Entladungsmengen $gme_{i,j}$ eingehalten werden. Dies ist im Hinblick auf die *strikten Integritätsbedingungen* gemäß den Formeln (51) und (52) genau dann der Fall, wenn gilt: a) Zu jeder Beladungsmenge gmb_i mit $gmb_i > 0$ existiert in der Matrix für die Entladungsmengen $gme_{i,j}$ eine i -te Zeile, in der alle – bis auf eine – Spalten die Entladungsmengen $gme_{i,j} = 0$ aufweisen und genau eine Spalte die Entladungsmenge $gme_{i,j} > 0$ mit $gme_{i,j} = gmb_i$ aufweist. Dies ist im hier betrachteten Optimierungsbeispiel für die Haltepunkte HP_i mit $i = 2, 3, 4$ erfüllt. b) Zu jeder Beladungsmenge gmb_i mit $gmb_i = 0$ existiert in der Matrix für die Entladungsmengen $gme_{i,j}$ eine i -te Zeile, in der alle Spalten die Entladungsmenge $gme_{i,j} = 0$ aufweisen. Dies ist im hier betrachteten Optimierungsbeispiel für den Haltepunkt HP_i mit $i = 1$ der Fall. Folglich werden durch die Eingabeinformationen des Optimierungsbeispiels die Integritätsbedingungen für die Transportnachfrage nicht nur in der schwachen, sondern sogar in der strikten Variante erfüllt.

Des Weiteren besitzt diese Matrix-Darstellungsweise für die Entladungsmengen den Vorteil großer *Flexibilität* im Hinblick auf spätere Modellerweiterungen. Wenn die Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entladungsmengen aufgegeben („relaxiert“) wird, braucht beispielsweise die Gütermenge $gmb_3 = 400$, mit der ein Güterzug im Haltepunkt HP_3 beladen wird, nicht mehr vollständig im Haltepunkt HP_4 entladen zu werden ($gme_{3,4} = 400$). Stattdessen wird es dann möglich, die Beladungsmenge $gmb_3 = 400$ aus dem Haltepunkt HP_3 so in Teilladungen aufzuspalten, dass die Gütermengen $gme_{3,1} = 100$, $gme_{3,2} = 250$ und $gme_{3,4} = 50$ in den mehreren Ziel-Haltepunkten HP_1 , HP_2 bzw. HP_4 zu entladen sind. Dies könnte in der o.a. Matrix-Darstellungsweise ohne Strukturveränderung ebenso erfasst werden:

```
!      j=1    j=2    j=3    j=4    ;
gme = 0      0      0      0      ! i=1;
      0      0      0      200   ! i=2;
      100    250    0      50    ! i=3;
      300    0      0      0      ; ! i=4;
```

7.2.4 Touren

Im Kapitel 6.2.1.1 zu den graphentheoretischen Grundlagen wurde bereits ausführlich auf Touren als zentrales Konstrukt von Tourenplanungsproblemen eingegangen. Daher können sich die nachfolgenden Ausführungen für die mathematische Modellformulierung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells im Wesentlichen darauf beschränken, die Notationen in Erinnerung zu rufen, die für eine „natürlich“ anmutende, realitätsadäquate Darstellung von Touren in einem formalsprachlichen Modell erforderlich sind. Darüber hinaus werden die Notationen an das zugrunde liegende Realproblem der Tourenplanung angepasst, damit – wie schon früher erläutert wurde – die „Semantik“ des Tourenplanungsmodells leichter zu verstehen ist.¹⁾ Schließlich wird besonders darauf eingegangen, wenn von den Erläuterungen, die in den graphentheoretischen Grundlagen zu Touren erfolgten, bewusst abgewichen wird.²⁾

Die q -te *Tour* $T_{e,q}$ eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e wird durch ein P -Tupel – d.h. einen P -stelligen Zeilenvektor oder kurz *Tourvektor* $TV_{e,q}$ – charakterisiert, für den mit $e = 1, \dots, E$ und $q = 1, \dots, Q_e$ gilt: $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ mit $hpi_{e,q,p}$ als Haltepunkt-Index sowie mit „ p “ als Index für die Position innerhalb der Tour $T_{e,q}$ (Positionsindex) mit $p = 1, \dots, P$ und $P \in \mathbb{N}_+$. Der Haltepunkt-Index ist entweder der Index „ n “ desjenigen Haltepunkts HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN , der sich an der p -ten Position der Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ befindet, oder aber der artifizielle Wert „ 0 “, der keinem Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN entspricht.

Beispielsweise charakterisiert der Tourvektor $TV_{e,q} = (3, 7, 5, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ eine Tour $T_{e,q}$, die wegen des Haltepunkt-Indexes $hpi_{e,q,1} = 3$ an der ersten Tourposition mit $p = 1$ im Haltepunkt HP_3 (als Standort für das Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e) beginnt, wegen der Haltepunkt-Indexes $hpi_{e,q,2} = 7$ und $hpi_{e,q,3} = 5$ über die Haltepunkte HP_7 bzw. HP_5 führt und schließlich wegen des Haltepunkt-Indexes $hpi_{e,q,4} = 3$ zum Haltepunkt HP_3 als Ausgangspunkt der Tour $T_{e,q}$ (und als Standort für das Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e) zurückkehrt. Die Haltepunkt-Indexes $hpi_{e,q,p} = 0$ für die Tourpositionen p mit $p = 5, \dots, 11$ ($P = 11$) zeigen an, dass die Tour an der Position $p = 4$ nach der Rückkehr in das Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens beendet ist und deshalb danach keine Haltepunkte des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes VN mehr angefahren werden.

Anhand der zuvor exemplarisch angeführten Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (3, 7, 5, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ werden mehrere charakteristische Eigenschaften jedes Tourvektors offensichtlich, der in der hier vorgestellten Weise konstruiert wird.

Erstens beginnt jede Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt für das Depot des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e . Wenn sich das Depot DEP_e im Haltepunkt HP_n befindet ($DEP_e = HP_n$),

-
- 1) Dies betrifft z.B. die Notation von Touren in Bezug auf die Haltepunkte HP_n eines Verkehrsnetzes anstelle der früher verwendeten Knoten kn eines gerichteten Graphen.
 - 2) Das gilt vor allem in Bezug auf die Bedingung der Subzyklenfreiheit. Sie spielte in den graphentheoretischen Grundlagen eine große Rolle, weil ihre Erfüllung im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung als Prämisse vorausgesetzt wird und dort eine ausschlaggebende Bedeutung besitzt. Allerdings wurde im Kapitel 6.2.3 ausführlicher erläutert, dass diese Prämisse im Hinblick auf das hier interessierende Realproblem zu einem gravierenden Defekt, dem Defekt der Subzyklenfreiheit, führt. Daher wird in dem Tourenplanungsmodell, das in diesem Projektbericht vorgestellt wird, von vornherein auf die Prämisse der Subzyklenfreiheit verzichtet.

dann muss für den Haltepunkt-Indexes $hpi_{e,q,1}$ mit dem Positionsindex $p = 1$ für den *Tourbeginn* gelten: $hpi_{e,q,1} = n$.

Zweitens endet auch jede Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt für das Depot des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e . Wenn p^* der Positionsindex für das *Tourende* ist, dann muss für den Haltepunkt-Index hpi_{e,q,p^*} gelten: $hpi_{e,q,p^*} = n$.

Drittens liegt der Positionsindex p^* für das Tourende nicht fest, sondern kann von Tour zu Tour variieren. Diese *Variabilität* des *Positionsindex* p^* für das *Tourende* verursacht erhebliche Probleme bei der Konstruktion des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells. Darauf wird noch mehrfach zurückgekommen. Aber das Tourende und sein Positionsindex p^* lassen sich anhand des Tourvektors – wie im o.a. Beispiel mit dem Tourvektor $(3,7,5,3,0,0,0,0,0,0,0)$ – immerhin eindeutig charakterisieren:

- Entweder bezeichnet der Positionsindex p^* für das Tourende diejenige Position *innerhalb* des Tourvektors (Normalfall), an dem der Haltepunkt-Index hpi_{e,q,p^*} zum letzten Mal der Index „n“ eines Haltepunkts HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz ist ($hpi_{e,q,p^*} = n$), sodass $n \in \{1, \dots, N\}$ und somit $n \geq 1$ gilt. An der nächsten Position p^*+1 nimmt der Haltepunkt-Index hpi_{e,q,p^*+1} erstmals den artifiziellen Wert „0“ an; es gilt also $hpi_{e,q,p^*+1} = 0$.
- Oder der Positionsindex p^* für das Tourende fällt mit der *letzten Stelle* des Tourvektors mit dem größten Positionsindex P zusammen (Sonderfall), sodass $p^* = P$ zutrifft.

Im o.a. Beispiel mit dem Tourvektor $(3,7,5,3,0,0,0,0,0,0,0)$ liegt der erstgenannte Normalfall vor, weil der Positionsindex p^* für das Tourende mit $p^* = 4$ eine Position innerhalb des Tourvektors mit insgesamt $P = 11$ Positionen bezeichnet.

Viertens müssen alle Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$, die im Tourvektor zwischen den Positionen für den Tourbeginn ($p = 1$) und für das Tourende ($p = p^*$) liegen oder mit einer der beiden vorgenannten Grenzpositionen zusammenfallen, positive Werte für jeweils einen Index „n“ der Haltepunkte HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz annehmen ($hpi_{e,q,p} \geq 1$), dürfen also niemals „0“ beitragen.

Fünftens müssen alle Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$, die im Tourvektor auf die Position für das Tourende folgen ($p > p^*$), jeweils den artifiziellen Wert „0“ annehmen ($hpi_{e,q,p} = 0$), sofern es solche folgenden Tourpositionen gibt, d.h. $p^* < P$ gilt.¹⁾

Darüber hinaus sind einige weitere Festlegungen erforderlich, die sich anhand der oben exemplarisch angeführten Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (3,7,5,3,0,0,0,0,0,0,0)$ nicht unmittelbar erkennen lassen.

1) Für den oben erwähnten Sonderfall, in dem der Positionsindex p^* für das Tourende wegen $p^* = P$ mit dem Ende des Tourvektors zusammenfällt, kann es solche „folgende“ Tourpositionen nicht geben.

Jede Tour $T_{e,q}$ mit $e = 1, \dots, E$ und $q = 1, \dots, Q_e$ stellt zunächst eine *potenzielle* Tour dar.¹⁾ Eine potenzielle Tour $T_{e,q}$ ist genau dann eine *reale* oder *geplante*²⁾ Tour, wenn mindestens die drei ersten Positionen „p“ der Tour $T_{e,q}$ mit $p = 1, \dots, 3$ positive Haltepunkte-Indizes $hpi_{e,q,p}$ mit $hpi_{e,q,p} \geq 1$ aufweisen und dabei sowohl am Tourbeginn ($p = 1$) als auch am Tourende ($p = p^*$) mit $hpi_{e,q,1} = n$ bzw. $hpi_{e,q,p^*} = n$ der Index „n“ des Haltepunkts HP_n für das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e erscheint.

Andernfalls handelt es sich bei der Tour $T_{e,q}$ um ein formales Artefakt, also um eine *artifizielle*, *virtuelle* oder *nicht-geplante*³⁾ Tour, der keine reale Tour des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e entspricht. Als artifizielle Touren kommen sowohl Null-Touren als auch Schein-Touren in Betracht.

Eine *Null-Tour* ist eine Tour $T_{e,q}$, deren Haltepunkt-Indizes ausschließlich den artifiziellen Wert „0“ annehmen, der keinem Haltepunkt HP_n im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN entspricht. Sie wird durch den Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0, \dots, 0)$ charakterisiert.

Schein-Touren können sowohl ein- als auch zweistellige Schein-Touren darstellen. Eine *einstellige* Schein-Tour umfasst nur das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n ($DEP_e = HP_n$) an der ersten Tourposition ($hpi_{e,q,1} = n$), enthält danach aber keinen Haltepunkt aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN: $TV_{e,q} = (n, 0, \dots, 0)$.⁴⁾ Eine *zweistellige* Schein-Tour kann nur dann vorliegen, wenn von der Prämisse der 1-Zyklen-Freiheit für das zugrunde liegende Verkehrsnetz VN abgesehen wird.⁵⁾ Eine solche zweistellige Schein-Tour würde nur das De-

-
- 1) Wenn nur von einer Tour $T_{e,q}$ ohne qualifizierendes Attribut gesprochen wird, ist jeweils eine potenzielle Tour gemeint, die entweder eine reale oder eine artifizielle Tour darstellen kann.
 - 2) Eine *reale* Tour wird im Tourenplanungsmodell für die spätere Ausführung *geplant*. Daher werden die Attribute „real“ und „geplant“ für solche Touren in diesem Projektbericht synonym verwendet.
 - 3) Eine *artifizielle* oder *virtuelle* Tour kann zwar in dem Tourenplan enthalten sein, der durch die Lösung des Tourenplanungsmodells ermittelt wird. Aber eine solche Tour wird *nicht* für die spätere Ausführung *geplant*, sondern stellt lediglich ein modellierungstechnisches Artefakt dar. Daher werden die Attribute „artifiziell“, „virtuell“ und „nicht-geplant“ für solche Touren in diesem Projektbericht synonym verwendet.
 - 4) In diesem Fall mit $TV_{e,q} = (n, 0, \dots, 0)$ liegt eine Schein-Tour vor, weil auf der Tour $T_{e,q}$ das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e mit $DEP_e = HP_n$ nicht verlassen wird.
 - 5) Wenn die Prämisse der 1-Zyklen-Freiheit für das zugrunde liegende Verkehrsnetz berücksichtigt wird, kann es keine zweistellige Schein-Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (n, n, 0, \dots, 0)$ geben. Denn die Eigenschaft der Zusammenhängigkeit und gleichsinnigen Gerichtetheit würde für die Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (n, n, 0, \dots, 0)$ erfordern, dass für die beiden Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,1}$ und $hpi_{e,q,2}$ mit $hpi_{e,q,1} = hpi_{e,q,2} = n$ im zugrunde liegenden Verkehrsnetz eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ und $i = j = n$ existiert. Eine solche Gleisstrecke $s_{n,n}$ mit $s_{n,n} = (HP_n, HP_n)$ wäre jedoch ein 1-Zyklus, der wegen der vorgenannten Prämisse im zugrunde liegenden Verkehrsnetz nicht existieren kann; q.e.d. Allerdings wäre eine zweistellige Schein-Tour trotz der Prämisse der 1-Zyklen-Freiheit möglich, wenn die Ein-Depot-Prämisse aufgegeben würde. Dann ist es möglich, dass ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e über zwei Depots $DEP_{e,1}$ und $DEP_{e,2}$ verfügt, die sich an zwei verschiedenen Haltepunkten HP_m bzw. HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes befinden. In diesem Fall würde z.B. die Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (m, n, 0, \dots, 0)$ vom Haltepunkt HP_m des ersten Depots $DEP_{e,1}$ zum Haltepunkt HP_n des zweiten Depots $DEP_{e,2}$ führen und dabei keinen unzulässigen 1-Zyklus bilden. Darüber hinaus wäre die Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (m, n, 0, \dots, 0)$ jetzt noch nicht einmal eine „sinnlose“ Schein-Tour, sondern eine „normale“, allerdings nicht mehr zyklische Tour. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist es keineswegs notwendig, die zyklische Geschlossenheit von Touren zu fordern, sobald ein Eisenbahnverkehrsunternehmen mehrere Depots besitzen kann. Dann stellen nicht-zyklische Touren zwischen unterschiedlichen Depots desselben Eisenbahnverkehrsunternehmens eine „normale“ Option der Tourenplanung dar. In diesem Fall lässt sich das Vehicle-Routing-Problem nicht mehr auf den „vorherrschenden“ Rundreisety – wie etwa beim Travelling-Salesman-Problem – beschränken. Von solchen Erweiterungen wird im hier vorgelegten Projektbericht abgesehen, weil grundsätzlich von der Ein-Depot-Prämisse ausgegangen wird.

pot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n ($DEP_e = HP_n$) an der ersten und an der zweiten Tourposition als Tourbeginn bzw. Tourende umfassen ($hpi_{e,q,1} = hpi_{e,q,2} = n$), danach aber keinen Haltepunkt aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN mehr enthalten: $TV_{e,q} = (n, n, 0, \dots, 0)$.¹⁾

P gibt als größtmöglicher Wert des Positionsindex p die *Stellenanzahl* eines Tourvektors $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$ an. Diese Stellenanzahl P sollte bei der Formulierung des Tourenplanungsmodells exogen vorgegeben werden.²⁾ Sie muss mindestens so groß sein, dass jede „vernünftig“ erscheinende Tour $T_{e,q}$ für ein beliebiges Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mithilfe eines solchen Tourvektors $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$ dargestellt werden kann. Insbesondere darf nicht der Fall eintreten, dass „an sich“ optimale Touren in einer optimalen Lösung des Tourenplanungsmodells nicht erkannt werden, weil sie mehr Haltepunkte umfasst hätten, als durch die Stellenanzahl P des Tourvektors vorgesehen ist. Daher ist diese Stellenanzahl P einerseits möglichst groß zu wählen. Allerdings steigen die Anzahlen der Entscheidungsvariablen und der Restriktionen des Tourenplanungsmodells umso mehr an, je größer die Stellenanzahl P des Tourvektors gewählt wird. Deshalb ist diese Stellenanzahl P andererseits möglichst gering zu wählen. Es stellt ein Optimierungsproblem sui generis auf einer „Meta-Ebene“ dar, wie angesichts der zuvor skizzierten, gegenläufigen Argumente zugunsten einer möglichst großen und zugunsten einer möglichst geringen Stellenanzahl P des Tourvektors diese Stellenanzahl konkret festgelegt werden soll. Dieses Optimierungsproblem sui generis wird im hier vorgelegten Projektbericht nicht gelöst. Stattdessen wird die Stellenanzahl P des Tourvektors auf heuristische Weise durch die nachfolgenden Abschätzungen festgelegt.

Im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell werden nur Touren betrachtet, die im Haltepunkt für das Depot eines Eisenbahnverkehrsunternehmens beginnen, zu mindestens einem anderen Haltepunkt HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes führen, und am Ende der Tour zum Haltepunkt

1) Auch in diesem Fall mit $TV_{e,q} = (n, n, 0, \dots, 0)$ liegt eine Schein-Tour vor, weil auf der Tour $T_{e,q}$ das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e mit $DEP_e = HP_n$ zwar „verlassen“ wird, aber unmittelbar zu diesem Depot DEP_e mit $DEP_e = HP_n$ „zurückgekehrt“ wird, *ohne* irgendeinen *anderen* Haltepunkt HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes VN angefahren zu haben.

2) In der mathematischen Modellformulierung führt die Stellenanzahl P des Tourvektors $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$ ein unauffälliges Dasein als ein größter Wert für den Positionsindex p mit $p = 1, \dots, P$. Prima facie besteht daher kein „dringender“ Anlass, sich über die Größe dieser Stellenanzahl P des Tourvektors Gedanken zu machen. Vielmehr verhalten sich alle Formeln der mathematischen Modellformulierung (bis auf eine mögliche Formel zur Festlegung dieser Stellenanzahl P) invariant gegenüber der Frage, wie groß die Stellenanzahl P des Tourvektors konkret gewählt wird. Daher lässt sich das Tourenplanungsmodell in seiner mathematischen Formulierungsvariante aufstellen, ohne die Stellenanzahl P des Tourvektors konkret festzulegen. Dann handelt es sich jedoch bei der Menge $\{p \mid p = 1, \dots, P\}$ aller Positionsindizes „ p “ um eine *variable* Indexmenge, da der größte Indexwert P nicht vorgegeben ist, sondern frei variieren kann. Spätestens bei der computergestützten Modellformulierung zeigt sich, dass solche variablen Indexmengen mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware nicht implementiert werden können. Daher wird hier von vornherein darauf geachtet, bereits in der mathematischen Modellformulierung variable Indexmengen zu vermeiden. Aus diesem Grund wird hier großer Wert darauf gelegt, die Stellenanzahl P des Tourvektors von Anfang an konkret festzulegen.

Am Rande sei vermerkt, dass dieses Beispiel verdeutlicht, wie „verführerisch“ die „Eleganz“ einer mathematischen Modellformulierung sein kann. Aus den Formeln einer mathematischen Modellformulierung lässt sich die Implementierungsproblematik variabler Indexmengen kaum erkennen – allenfalls einige wenige Modellierungsexperten besitzen hierfür einen „sensiblen Blick“. Daher schätzen die Verfasser computergestützte Modellformulierungen sehr, weil erst die harten Syntaxanforderungen von mathematischer Modellierungssoftware einen „heilsamen Druck“ ausüben, sich mit Schwierigkeiten wie dem hier angesprochenen Problem variabler Indexmengen bewusst auseinanderzusetzen.

für das Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens zurückführen. Daher umfasst jede Tour, sofern sie überhaupt geplant wird,¹⁾ mindestens drei Positionen. Also muss auf jeden Fall als untere Schranke für die Stellenanzahl P eines Tourvektors gelten: $P \geq 3$.

Wenn für Touren Subzyklen grundsätzlich ausgeschlossen würden, wie es früher für das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung der Fall war, dann könnte eine zyklische, aber subzyklenfreie Tour, die im Haltepunkt des Depots eines Eisenbahnverkehrsunternehmens beginnt und dort auch wieder endet, in einem Verkehrsnetz VN mit insgesamt N Haltepunkten HP_n ($n = 1, \dots, N$) höchstens $N+1$ Positionen umfassen: $P \leq N+1$. Denn jeder Haltepunkt HP_n des Verkehrsnetzes VN wird nur höchstens einmal angefahren – mit Ausnahme des Haltepunkts für das Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens, der genau zweimal angefahren wird.

Allerdings wird auf diese obere Schranke für die Stellenanzahl P eines Tourvektors hier nicht zurückgegriffen, weil im Kapitel 6.2.3 als Defekt der Subzyklenfreiheit ausführlicher erläutert wurde, dass die Prämisse der Subzyklenfreiheit aus dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung im Hinblick auf das hier interessierende Realproblem zu gravierenden Schwierigkeiten führen kann. Daher wird in dem Tourenplanungsmodell, das in diesem Projektbericht vorgestellt wird, von vornherein auf die Prämisse der Subzyklenfreiheit verzichtet. Folglich kann derselbe Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN mehrfach angefahren werden, auch wenn es sich nicht um den Haltepunkt für das Depot eines Eisenbahnverkehrsunternehmens handelt. Dadurch werden im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN Touren zulässig, die im Prinzip beliebig viele Positionen umfassen können. Der Verzicht auf die Prämisse der Subzyklenfreiheit führt also zu dem nicht-intendierten Nebeneffekt, dass für die Stellenanzahl P eines Tourvektors keine „harte“ obere Schranke angegeben werden kann.

Dennoch bedarf es der Festlegung eines konkreten Wertes für die Stellenanzahl P eines Tourvektors, um das Problem variabler Indextmengen zu vermeiden. Hierfür kommen nur heuristische Schätzwerte in Betracht. Eine erste Möglichkeit besteht darin, die obere Schranke $P \leq N+1$ aus dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung zu übernehmen und darauf zu hoffen, dass „an sich“ optimale Touren niemals mehr Positionen umfassen, als durch diese Beschränkung der Stellenanzahl P eines Tourvektors maximal zugelassen werden. Als zweite Möglichkeit lässt sich eine obere Schranke, wie z.B. $P \leq 2 \cdot N$, wählen, die erheblich größer als $P \leq N+1$ ausfällt, sobald die Anzahl N der Haltepunkte im Verkehrsnetz VN wesentlich über $N = 2$ hinausgeht. Im hier vorgelegten Projektbericht wird mit $P = N+3$ als Stellenanzahl P eines Tourvektors ein „mittlerer“ Wert zwischen den beiden vorgenannten oberen Schranken gewählt. Hierfür spricht, dass sich in mehreren computergestützten Experimenten mit dem Tourenplanungsmodell zeigte, dass hierdurch keine optimalen Touren ausgeschlossen wurden, obwohl darunter auch Touren mit Subzyklen waren. Es bleibt aber eine heuristische, im Prinzip fehleranfällige Festlegung. Denn es ist immer möglich, dass bei anderen Tourenplanungsproblemen, die hier nicht experimentell untersucht wurden, optimale Touren existieren, die mehr Positionen umfassen würden, als von der Stellenanzahl P eines Tourvektors mit $P = N+3$ zugelassen werden.

1) Es kann durchaus der Fall eintreten, dass einzelne der insgesamt Q_e Touren, die von einem Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e im Planungszeitraum durchgeführt werden können, nicht geplant werden. Solche *nicht-geplanten Touren* $T_{e,q}$ werden als Tourvektoren $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p}) = (0, \dots, 0, \dots, 0)$ dargestellt und deshalb auch als *Null-Touren* bezeichnet.

Aufgrund der voranstehenden Erläuterungen sowie der Festlegungen, die im Kapitel 6.2.1.1 zu graphentheoretischen Grundlagen erfolgten, ist jede *zulässige* Tour $T_{e,q}$ ein P-Tupel oder ein P-stelliger Zeilenvektor $TV_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$, das bzw. der die nachfolgend angeführten Eigenschaften erfüllt.

- a) Trägermenge: Eine Tour $T_{e,q}$ besteht aus Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$ mit $p = 1, \dots, P$. Jeder Haltepunkt-Index $hpi_{e,q,p}$ zeigt entweder den Index „n“ eines Haltepunkts HP_n mit $n \in \{1, \dots, N\}$ an, der seinerseits einen Knoten aus der Knotenmenge KN des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes $VN = (KN, KA)$ darstellt, oder weist den artifiziellen Wert „0“ auf, der wegen $0 \notin \{1, \dots, N\}$ keinem Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN entspricht.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P :$$

$$\left(\dot{\exists} n \in \{1, \dots, N\} : hpi_{e,q,p} = n \wedge HP_n \in KN \right) \vee hpi_{e,q,p} = 0 \quad (55)$$

- b) Zusammenhängigkeit und gleichsinnige Gerichtetheit: Für jedes Paar aus zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$ und $hpi_{e,q,p+1}$ mit $hpi_{e,q,p} = i$ und $hpi_{e,q,p+1} = j$, die jeweils einen Haltepunkt HP_i bzw. HP_j aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz $VN = (KN, KA)$ anzeigen, existiert im Verkehrsnetz VN genau eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$, die vom Haltepunkt HP_i mit dem kleineren Positionsindex p direkt zum Haltepunkt HP_j mit dem größeren Positionsindex $p+1$ führt.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1 :$$

$$\left(hpi_{e,q,p} = i \wedge HP_i \in KN \wedge hpi_{e,q,p+1} = j \wedge HP_j \in KN \right) \quad (56)$$

$$\rightarrow \left(\dot{\exists} i \in \{1, \dots, N\} \quad \dot{\exists} j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : s_{i,j} = (HP_i, HP_j) \wedge (HP_i, HP_j) \in KA \right)$$

- c) Zyklizität: Der Haltepunkt-Index $hpi_{e,q,1}$ mit dem Positionsindex $p = 1$ für den Tourbeginn und der Haltepunkt-Index hpi_{e,q,p^*} mit dem Positionsindex $p = p^*$ für das Tourende sind identisch.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$\left(\begin{array}{l} \dot{\exists} i \in \{1, \dots, N\} : hpi_{e,q,1} = i \wedge \dots \\ \dot{\exists} j \in \{1, \dots, N\} : \left(\left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P - 1\} : hpi_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge hpi_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \\ \wedge hpi_{e,q,p^*} = j \end{array} \right) \quad (57)$$

$$\rightarrow i = j$$

- d) Depot: Wenn sich das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n befindet ($DEP_e = HP_n$), dann müssen im Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ die Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,1}$ mit dem Positionsindex $p = 1$ für den Tourbeginn und hpi_{e,q,p^*} mit dem Positionsindex $p = p^*$ für das Tourende mit dem Index „n“ für den Standort des Depots übereinstimmen, sofern es sich nicht um eine artifizielle Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ handelt.

$$\begin{aligned} & \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \exists n = 1, \dots, N : \\ & \text{DEP}_e = \text{HP}_n \wedge \text{TV}_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots \\ & \left(\left(\left(\exists p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \right) \\ & \left(\wedge \text{hpi}_{e,q,1} = n \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*} = n \right) \end{aligned} \quad (58)$$

e) Kontinuität bis zum Tourende: Alle Haltepunkt-Indizes $\text{hpi}_{e,q,p}$, die im Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ zwischen den Positionen für den Tourbeginn ($p = 1$) und für das Tourende ($p = p^*$) liegen oder mit einer der beiden vorgenannten Grenzpositionen zusammenfallen, müssen positive Werte für jeweils genau einen Index „n“ der Haltepunkte HP_n mit $n \in \{1, \dots, N\}$ aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN annehmen, sofern es sich nicht um eine artifizielle Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $\text{TV}_{e,q} = (0, \dots, 0)$ handelt.

$$\begin{aligned} & \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \\ & \text{TV}_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots \\ & \left(\left(\left(\exists p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \right) \\ & \left(\wedge \forall p = 1, \dots, p^* : \text{hpi}_{e,q,p} \geq 1 \right) \end{aligned} \quad (59)$$

f) Kontinuität nach dem Tourende: Falls ein Tourvektor nach der Position p^* für das Tourende noch weitere Positionen umfasst ($P > p^*$), dann müssen alle Haltepunkt-Indizes $\text{hpi}_{e,q,p}$, die im Tourvektor hinter der Position für das Tourende liegen ($p > p^*$), jeweils den artifiziellen Wert „0“ annehmen, dem kein Haltepunkt HP_n im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN entspricht.

$$\begin{aligned} & \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \\ & \left(\exists p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \rightarrow \forall p = p^*+1, \dots, P : \text{hpi}_{e,q,p} = 0 \end{aligned} \quad (60)$$

g) Ausschluss von Schein-Touren: Mit den voranstehend angeführten Eigenschaften einer Tour $T_{e,q}$ könnte eine einstellige Schein-Tour vereinbart werden, die nur das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n ($\text{DEP}_e = \text{HP}_n$) an der ersten Tourposition umfasst ($\text{hpi}_{e,q,1} = n$), danach aber keinen Haltepunkt aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN mehr enthält: $\text{TV}_{e,q} = (n, 0, \dots, 0)$. Darüber hinaus könnte mit den voranstehend angeführten Eigenschaften einer Tour $T_{e,q}$ auch noch eine zweistellige Schein-Tour vereinbart werden, wenn von der Prämisse der 1-Zyklen-Freiheit für das zugrunde liegende Verkehrsnetz VN abgesehen wird. Eine solche zweistellige Schein-Tour würde nur das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n ($\text{DEP}_e = \text{HP}_n$) an der ersten und der zweiten Tourposition als Tourbeginn bzw. Tourende umfassen ($\text{hpi}_{e,q,1} = \text{hpi}_{e,q,2} = n$), danach aber keinen Haltepunkt aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN enthalten: $\text{TV}_{e,q} = (n, n, 0, \dots, 0)$. Beide Fälle von sowohl ein- als auch zweistelligen Schein-Touren werden explizit ausgeschlossen, wenn die nachfolgende Eigenschaft erfüllt wird.

$$\begin{aligned} & \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \\ & \text{TV}_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots \\ & \left(\left(\left(\exists p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \wedge p^* \geq 3 \right) \end{aligned} \quad (61)$$

Weitere allgemeingültige, d.h. auf *jede* Tour $T_{e,q}$ zutreffende Eigenschaften brauchen die Touren *nicht* zu erfüllen, die hier als Lösungen für das Tourenplanungsmodell zugelassen werden (zulässige Touren).

Das betrifft vor allem die Bedingung der *Subzyklenfreiheit*, die in den graphentheoretischen Grundlagen des Kapitels 6.2.1.1 ausführlich erläutert und im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung als Prämisse vorausgesetzt wurde. Im Kapitel 6.2.3 wurden jedoch „gute“ Gründe dafür angeführt, dass es ratsam ist, auf die Prämisse der Subzyklenfreiheit zu verzichten, weil sie im Hinblick auf das hier interessierende Realproblem der Tourenplanung zu einem gravierenden Defekt führt. Daher wird im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell *nicht* gefordert, dass zulässige Touren die Prämisse der Subzyklenfreiheit erfüllen müssen. Dies stellt einerseits eine begrüßenswerte Realitätsannäherung gegenüber dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung dar, weil bei realen Tourenplanungsproblemen durchaus „sinnvolle“ oder sogar optimale Touren mit Subzyklen existieren können.¹⁾ Andererseits wird das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell dadurch erheblich vereinfacht, dass auf die komplexen Konstruktionen, die im Kapitel 6.2.1.1 für das Verbot von Touren mit Subzyklen vorgestellt wurden, vollständig verzichtet werden kann.

Schließlich wird noch das Konstrukt der *Tourenfamilie*²⁾ eingeführt. Die Tourenfamilie TF_e eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e mit $e = 1, \dots, E$ und $E \in \mathbb{N}_+$ umfasst die Tourvektoren $TV_{e,q}$ aller Touren $T_{e,q}$ mit $q = 1, \dots, Q_e$ und $Q_e \in \mathbb{N}_+$, die das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mithilfe seines Equipments im Planungszeitraum durchzuführen vermag. Die Tourenfamilie TF eines Tourenplans als (Gesamt-) Lösung für ein Tourenplanungsmodell ergibt sich als Familie aller dieser unternehmensspezifischen Tourenfamilien TF_e mit $e = 1, \dots, E$. Folglich gilt für die beiden vorgenannten Varianten von Tourenfamilien:

$$\forall e = 1, \dots, E: TF_e = \left(TV_{e,q} = \left(hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p} \right) \mid q = 1, \dots, Q_e \right) \quad (62)$$

$$TF = \left(TF_e \mid e = 1, \dots, E \right) \quad (63)$$

-
- 1) Vgl. dazu das Beispiel einer „sinnvollen“ Tour in der Abbildung 19 im Kapitel 6.2.3, Abschnitt b).
 - 2) Es wird hier bewusst von einer Tourenfamilie anstatt einer Tourenmenge gesprochen. Denn eine Tourenmenge darf als *Menge* nur jeweils paarweise *wohlunterschiedene* Touren umfassen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Tourvektoren zweier unterschiedlicher Touren T_{e_1,q_1} und T_{e_2,q_2} mit $(e_1, q_1) \neq (e_2, q_2)$ zufällig hinsichtlich der Werte aller ihrer Haltepunkt-Indizes übereinstimmen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf alle artifizialen Touren, die per definitionem denselben P-stelligen Tourvektor $(0, \dots, 0, \dots, 0)$ besitzen. Dagegen gestattet der Familienbegriff, der in syntaktischer Hinsicht einem Tupel oder Zeilenvektor entspricht, dass in einer Tourenfamilie auch mehrere identische Tourvektoren enthalten sein dürfen.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die voranstehende mathematische Modellformulierung für die Spezifizierung von Touren in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen.

Die Formeln (55) bis (61) aus der Charakterisierung zulässiger Touren werden in der computergestützten Modellformulierung noch nicht implementiert. Sie werden an späterer Stelle berücksichtigt, wenn es gilt, die Werte für Entscheidungsvariablen und modellendogene Variablen mithilfe zusätzlicher Restriktionen so einzuschränken, dass sich nur zulässige Touren ergeben können. Darauf wird im Kapitel 7.2.6 zurückgekommen.

Die Abbildung 30 auf dieser und den nächsten Seiten zeigt einen vierten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung von Touren für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn.

CALC:

Anzahl_Haltepunkte = @SIZE(Haltepunkt);

1)

Anzahl_max_Tourpositionen = Anzahl_Haltepunkte + 3;

Anzahl_max_Tourpositionen_minEin = Anzahl_max_Tourpositionen - 1;

ENDCALC

SETS:

2)

Haltepunktzaehler / 1..Anzahl_Haltepunkte /: Haltepunktindex;

! ist die Menge der Indizes n für die Haltepunkte HP_n im OR-Modell;

Tourzaehler / 1..Groesste_Anzahl_max_Touren /: Tourindex;

! ist die Menge der Indizes q für die Touren T_{e_q} im OR-Modell;

Positionszaehler / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /: Positionsindex;

! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_{e_q} im OR-Modell;

ENDSETS

-
- 1) Die @SIZE-Funktion erlaubt es, die Anzahl aller Elemente einer Menge zu ermitteln. Sie entspricht in mathematischer Hinsicht der sogenannten Kardinalitätsfunktion $\#(M)$, die eine Menge M auf die Anzahl $\#(M)$ ihrer Elemente abbildet.
 - 2) Die nachfolgenden drei Indexmengen „Haltepunktzaehler“, „Tourzaehler“ und „Positionszaehler“ stellen eine Eigenart von LINGO-Modellen dar. Die Syntax der mathematischen Modellierungssoftware LINGO gestattet es nicht, die Indizes von Konstanten, Parametern oder Variablen in einer Formel direkt als mathematisch verarbeitbare Größen zu adressieren. Stattdessen muss jeder Index in eine neue, anders benannte, aber betragsgleiche Konstante transformiert werden, bevor diese Konstante in einer Formel konkret verarbeitet werden kann. Beispielsweise wird der Index „n“ für einen Haltepunkt HP_n im zugrundeliegenden Verkehrsnetz zunächst in die betragsgleiche Konstante „Haltepunktindex(n)“ mit Haltepunktindex(n) = n transformiert. Die Indexmenge „Haltepunktzaehler“ ist dann die Menge $\{1, \dots, N\}$, die alle Indizes „n“ der Haltepunkte HP_n umfasst, jedoch nicht mehr als Indizes, sondern als Konstanten 1, ..., N, die Elemente der Menge „Haltepunktzaehler“ sind und jeweils als „Haltepunktindex(n)“ bezeichnet werden. Dabei stellt „n“ einen neuen, von LINGO intern verwalteten Index dar, der alle Konstanten aus der Menge „Haltepunktzaehler“ enumeriert und „zufällig“ mit dem ursprünglichen Index „n“ übereinstimmt (aber in den Formeln eines LINGO-Modells wieder nicht direkt verarbeitet werden kann).

CALC:

@FOR(Haltpunktzaehler(n): Haltpunktindex(n)=n);

@FOR(Tourzaehler(q): Tourindex(q)=q);

@FOR(Positionszaehler(p): Positionsindex(p)=p);

ENDCALC

SETS:

Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Tourlaenge, Position_Tourende;

1)

! ist eine abgeleitete Menge, die für jede Tour $T_{e,q}$ konkrete Werte für die beiden Toureigenschaften Tourlänge $TL_{e,q}$ und Position_Tourende e_q ausweisen kann;

! die Toureigenschaft Position_Tourende e_q wird hier nur als "Merkposten" angeführt, weil sie für das aktuelle OR-Modell nicht erforderlich ist, aber für zukünftige Modellvarianten von Interesse sein könnte;

- 1) Die abgeleitete Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) stellt im LINGO-Modell ein *zentrales Konstrukt* dar. Sie entspricht der Tourenfamilie TF aus der mathematischen Modellformulierung; vgl. die o.a. Formeln (62) und (63). Jedes ihrer Elemente ist eine Tour „Tour(e,q)“ mit $e = 1, \dots, E$ und $q = 1, \dots, Q_e$, die in der mathematischen Modellformulierung als Tour $T_{e,q}$ notiert wird. Eine Tour wird in der computergestützten Modellformulierung aber (noch) nicht als ein P-stelliger Zeilenvektor $TV_{e,q}$ dargestellt, sondern – neben ihren eindeutig identifizierenden Indizes „e“ und „q“ – zunächst nur durch zwei charakteristische Toureigenschaften beschrieben: die Eigenschaft „Tourlaenge(e,q)“ und die Eigenschaft „Position_Tourende(e,q)“. Die Werte (Ausprägungen) der Eigenschaft „Position_Tourende(e,q)“ entsprechen jeweils dem Positionsindex p^* für das Tourende in einem P-stelligen Tourvektor, der oben schon ausführlicher erörtert wurde. Auf die Eigenschaft „Tourlaenge(e,q)“, die in der mathematischen Modellformulierung als Tourlänge $TL_{e,q}$ notiert wird, wird erst später näher eingegangen. Sie wird hier in der computergestützten Modellformulierung aber bereits „auf Vorrat“ spezifiziert, um später problemlos darauf zurückgreifen zu können.

Der LINGO-spezifische Ausdruck „|Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1)“ stellt sicher, dass für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e in der Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) nur so viele Touren $T_{e,q}$ mit $q = 1, \dots, Q_e$ enumeriert werden, wie durch den Parameter „Anzahl_max_Touren(e)“ mit dem Wert $Anzahl_max_Touren(e) = Q_e$ festgelegt ist. Hierbei ist die Syntax der mathematischen Modellierungssoftware LINGO wie folgt zu interpretieren: Der Parameter „Anzahl_max_Touren(e)“ bezieht sich wegen des Anzeigers „&1“ auf die *erste* Trägermenge, die in der Notation der abgeleiteten Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) im Klammerausdruck (...) angeführt wird, also auf die Trägermenge „Eisenbahnverkehrsunternehmen“. Für jedes Element Eisenbahnverkehrsunternehmen(e) aus dieser Trägermenge – entsprechend dem Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e in der mathematischen Modellformulierung – wurde bereits an früherer Stelle der Wert für die Eigenschaft „Anzahl_max_Touren(e)“ konkret ermittelt; vgl. die Sektion „CALC ... ENDCALC“ in der Abbildung 28. Der Parameter „Tourindex(q)“ bezieht sich wegen des Anzeigers „&2“ auf die *zweite* Trägermenge, die in der Notation der abgeleiteten Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) im Klammerausdruck (...) angeführt wird, also auf die Trägermenge „Tourzaehler“. Dieser Tourzähler weist für das jeweils betrachtete Element Tour(e,q) aus der Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) unmittelbar den Indexwert aus; es gilt also: $Tourindex(q) = q$. Vgl. dazu die Ausführungen in der voranstehenden Fußnote zur Transformation der Elemente aus Indexmengen in Größen, die in Formeln eines LINGO-Modells unmittelbar verarbeitet werden können. Schließlich sorgt der einschränkende Ausdruck „|Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1)“ dafür, dass jedes Element Tour(e,q) aus der Menge Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) die folgende Anforderung erfüllt: $Tourindex(q) \leq Anzahl_max_Touren(e) = Q_e$. Nimmt man des Weiteren die Beziehungen $Tourindex(q) = q$ sowie $Anzahl_max_Touren(e) = Q_e$ hinzu, die aufgrund der voranstehenden Ausführungen ebenso zutreffen, muss also aufgrund des einschränkenden Ausdrucks „|Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1)“ ebenso gelten: $q \leq Q_e$. Dies entspricht genau der mathematischen Modellformulierung.

Auf diese LINGO-spezifische Ausdrucksmöglichkeit für die Einschränkung der Elementanzahlen für abgeleitete Mengen wird im Folgenden noch mehrfach zurückgegriffen, ohne die analogen Konstruktionen jeweils im Einzelnen zu erläutern. Sie erlaubt u.a. eine „unverzerrte“ Implementierung der höchstzulässigen Tourenanzahl Q_e für jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mithilfe des Parameters $Anzahl_max_Touren(e)$. Allerdings ist dabei zu beachten, dass aus der Verwendung solcher Einschränkungen der Elementanzahlen für abgeleitete Mengen einige recht komplexe, etwas intransparent anmutende Formeln resultieren können, welche die unmittelbare „Lesbarkeit“ oder Verständlichkeit eines LINGO-Modells zu beeinträchtigen drohen.

```

Tourpositionen_bis_P / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /; 1)
! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_e_q im OR-Modell
  mit p = 1,...,P, also mit der letzten Tourposition P;

Tourpositionen_bis_Pminus1 / 1..Anzahl_max_Tourpositionen_minEin /; 2)
! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_e_q im OR-Modell
  mit p=1,...,P-1, also ohne die letzte Tourposition P;

Tourendevektorkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |
  Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
  Tourendevektorkomponente;

Haltepunktindexvektorkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |
  Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
  Haltepunktindexvektorkomponente;
! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen hpi_e_q_p als Haltepunkt-Indizes n für diejenigen
  Haltepunkte HP_n, die im Tourvektor TV_e_q einer Tour T_e_q an den Positionen p = 1,...,P stehen;
ENDSETS

```

Abbildung 30: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell zur Spezifizierung von Touren

7.2.5 Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers

Die Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers werden in jedem betriebswirtschaftlichen Entscheidungsmodell durch die sogenannten *Entscheidungsvariablen* erfasst. Gleiches gilt für die Vielfalt von Modellen, die im Rahmen des Operations Research erforscht werden, wie z.B. die hier betrachteten Optimierungsmodelle.

Ein Entscheidungsträger kann über die Werte (Ausprägungen) der Entscheidungsvariablen so weit frei disponieren, wie es ihm durch die Restriktionen eines Entscheidungs- oder Optimierungsmodells gestattet wird. Daher stellen die Restriktionen das „natürliche“ Komplement zu den Entscheidungsvariablen dar.

Zunächst werden im Folgenden diejenigen Sachverhalte betrachtet, die grundsätzlich zur Disposition eines Entscheidungsträgers stehen und in der Gestalt von Entscheidungsvariablen modelliert werden. Sie *eröffnen* die *Entscheidungsspielräume* eines Entscheidungsträgers.

Als erste Einschränkungen dieser Entscheidungsspielräume werden auch die *Definitionsbereiche* der Entscheidungsvariablen spezifiziert. Sie sind die Mengen der Werte, die für die Entscheidungsvariablen grundsätzlich *zulässig* sind. Die Definitionsbereiche können daher bereits als eine spezielle Form von Restriktionen aufgefasst werden (Restriktionen im weitesten Sinne). Allerdings beziehen sich diese Restriktionen nur „isoliert“ auf jeweils eine Entscheidungsvariable. Daher werden die Definitionsbereiche der Entscheidungsvariablen unmittelbar im Kontext der zugrunde liegenden Entscheidungsvariablen und somit als Determinanten der Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers behandelt. Als *Restriktionen im engeren Sinne* werden dagegen im nächsten Kapitel

-
- 1) Diese Menge lässt sich durch die bereits oben eingeführte Menge „Positionszaehler / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /: Positionsindex“ ersetzen. Sie wird hier nur der Deutlichkeit halber verwendet.
 - 2) Als Syntax-Restriktion der mathematischen Modellierungssoftware LINGO ist zu beachten, dass die Bezeichner von Konstrukten keine Bindestriche oder Minuszeichen „-“ enthalten dürfen, sodass die Konstruktbezeichnung „Tourpositionen_bis_P-1“ zu einer Fehlermeldung führen würde. Daher wird hier die leicht modifizierte, aber inhaltlich das Gleiche meinende Konstruktbezeichnung „Tourpositionen_bis_Pminus1“ verwendet.

nur noch solche Restriktionen behandelt, die *unterschiedliche* Konstruktarten eines Entscheidungsmodells miteinander verknüpfen, um solche Werte für die Entscheidungsvariablen – und ergänzende modellendogene Variablen – auszuschließen, die trotz Beachtung der Definitionsbereiche für die Entscheidungsvariablen jeweils zu einer unzulässigen Modelllösung führen würden.

Das Tourenplanungsmodell umfasst mehrere unterschiedliche *Typen* von Entscheidungsvariablen, die sich jeweils auf verschiedenartige disponierbare Sachverhalte erstrecken. Alle Entscheidungsvariablentypen gehören zur Klasse der sogenannten *Zuordnungsvariablen*. Sie stellen überwiegend *Binärvariablen* dar, die nur die Werte „1“ oder „0“ annehmen können, um anzuzeigen, dass eine Zuordnung entweder erfolgt („1“) oder aber unterbleibt („0“). In einem Fall handelt es sich aber auch um „ganzahlige“ („integers“) *Zählvariablen*, die nur beliebige ganzahlige, aber nicht-negative Werte annehmen können, um anzuzeigen, wie viele Objekte einem anderen Objekt zugeordnet werden.

Der erste Typ der *haltepunktbezogenen* Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ zeigt an, ob sich im P-stelligen Zeilenvektor einer Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ an der Position p der Index n eines Haltepunkts HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN befindet oder nicht. Die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ leisten daher eine Zuordnung von Haltepunkten zu Tourpositionen. Für diese Entscheidungsvariablen gilt:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N :$$

$$x_{e,q,p,n} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$x_{e,q,p,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ befindet} \\ 0, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ nicht befindet} \end{cases} \quad (64)$$

Mit $\underline{x}_{e,q}$ wird im Folgenden das $P \times N$ -Tupel aller Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ bezeichnet, die zur selben Tour $T_{e,q}$ gehören: $\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,1,1}, \dots, x_{e,q,P,N})$. Auf analoge Weise ist \underline{x} als das $E \times Q_e \times P \times N$ -Tupel aller Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ definiert, die im Planungszeitraum für beliebige Touren $T_{e,q}$ festgelegt werden: $\underline{x} = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{E,Q_e,P,N})$.

Der zweite Typ der *lokomotivenbezogenen* Entscheidungsvariablen $y_{die,a,e,q}$ und $y_{ele,b,e,q}$ zeigt an, ob eine Lokomotive des Typs $LT_{die,a}$ bzw. $LT_{ele,b}$ einer Tour $T_{e,q}$ zugeordnet worden ist, um diese Tour entweder als reine Lokzug-Fahrt zu bestreiten oder aber um auf dieser Tour angekoppelte Güterwagen zu ziehen.¹⁾ Für diese Entscheidungsvariablen $y_{die,a,e,q}$ und $y_{ele,b,e,q}$ gilt:

1) Es wird davon ausgegangen, dass jeder Tour in Bezug auf jeden Lokomotivtyp höchstens eine Lokomotive zugeordnet wird (*Güterzug-Lokomotiven-Prämisse*). Dies schließt jedoch nicht aus, dass derselbe Güterzug durch ein „Ensemble“ aus mehreren Lokomotiven gezogen wird, die jeweils zu verschiedenen Lokomotivtypen gehören.

$$\forall a = 1, \dots, A \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$y_{\text{die.a.e.q}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$y_{\text{die.a.e.q}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{\text{die.a}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{\text{die.a}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

(65)

$$\forall b = 1, \dots, B \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$y_{\text{ele.b.e.q}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$y_{\text{ele.b.e.q}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{\text{ele.b}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{\text{ele.b}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

(66)

Mit $\underline{y}_{\text{lok.e.q}}$ wird im Folgenden das $A+B$ -Tupel aller lokomotivenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ bezeichnet, die zur selben Tour $T_{e,q}$ gehören: $\underline{y}_{\text{lok.e.q}} = (y_{\text{die.1.e.q}}, \dots, y_{\text{die.A.e.q}}, y_{\text{ele.1.e.q}}, \dots, y_{\text{ele.B.e.q}})$. Auf analoge Weise ist $\underline{y}_{\text{lok}}$ als das $(A+B) \times E \times Q_e$ -Tupel aller Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ definiert, die im Planungszeitraum für beliebige Touren $T_{e,q}$ festgelegt werden: $\underline{y}_{\text{lok}} = (y_{\text{die.1.1.1}}, \dots, y_{\text{die.A.E.Q}_e}, y_{\text{ele.1.1.1}}, \dots, y_{\text{ele.B.E.Q}_e})$.

Der dritte Typ der *güterwagenbezogenen* Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ zeigt an, wie viele Güterwagen des Typs $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ einer Tour $T_{e,q}$ zugeordnet worden sind, um einen Güterzug zu bilden. Für diese Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ gilt:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$y_{\text{sta.c.e.q}} \in \mathbb{N}_0$$

mit :

$$y_{\text{sta.c.e.q}} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{\text{sta.c}} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{\text{sta.c}} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

(67)

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$y_{\text{gef.d.e.q}} \in \mathbb{N}_0$$

mit :

$$y_{\text{gef.d.e.q}} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

(68)

Mit $\underline{y}_{\text{wag.e.q}}$ wird im Folgenden das $C+D$ -Tupel aller güterwagenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ bezeichnet, die zur selben Tour $T_{e,q}$ gehören: $\underline{y}_{\text{wag.e.q}} = (y_{\text{sta.1.e.q}}, \dots, y_{\text{sta.C.e.q}}, y_{\text{gef.1.e.q}}, \dots, y_{\text{gef.D.e.q}})$. Auf analoge Weise ist $\underline{y}_{\text{wag}}$ als das $(C+D) \times E \times Q_e$ -Tupel aller Entscheidungs-

variablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ definiert, die im Planungszeitraum für beliebige Touren $T_{e,q}$ festgelegt werden: $\underline{y}_{\text{wag}} = (y_{\text{sta.1.1.1}}, \dots, y_{\text{sta.C.E.Q}_e}, y_{\text{gef.1.1.1}_e}, \dots, y_{\text{gef.D.E.Q}_e})$.

Der vierte Typ der *beladungsbezogenen* Entscheidungsvariablen $z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}}$ und $z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}}$ zeigt an, ob ein Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, an der Tourposition p mit dem Index i für den Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge $g_{\text{mb,sta.c.i}}$ für Transporte von Standardgütern bzw. mit der Gütermenge $g_{\text{mb,gef.d.i}}$ für Transporte von Gefahrgütern beladen wird, ob ihm also die vorgenannten Beladungsmengen an der Tourposition p zugeordnet werden oder nicht.¹⁾ Für diese Entscheidungsvariablen $z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}}$ und $z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}}$ gilt:

$$\begin{aligned} & \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \\ & z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}} \in \{0, 1\} \\ & \text{mit :} \\ & z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb,sta.c.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb,sta.c.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases} \quad (69) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \\ & z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}} \in \{0, 1\} \\ & \text{mit :} \\ & z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb,gef.d.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb,gef.d.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases} \quad (70) \end{aligned}$$

Die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}}$ und $z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}}$ eröffnen dem Entscheidungsträger im hier präsentierten Tourenplanungsmodell erstmals den Spielraum, einen Haltepunkt HP_i anzufahren, ohne in diesem Haltepunkt diejenigen Gütermengen aufladen zu müssen, die dort als Transportnachfrage artikuliert werden. Dieser Freiheitsgrad ermöglicht es, dass mehrere Güterzüge auf ihren Touren denselben Haltepunkt HP_i anfahren, aber nur einer von ihnen dort mit der Gütermenge $g_{\text{mb,sta.c.i}}$ bzw. $g_{\text{mb,gef.d.i}}$ beladen wird, während die anderen Güterzüge den Haltepunkt

1) Da einem Güterzug, der eine Tour $T_{e,q}$ durchführt, die zu beladende und alsdann zu transportierende Gütermenge $g_{\text{mb,sta.c.i}}$ oder $g_{\text{mb,gef.d.i}}$ an einer Tourposition p entweder als *Ganzes* zugeordnet wird oder aber überhaupt nicht, wird bei der Beladung mit einer zu transportierenden Gütermenge eine Art „take it or leave it“ praktiziert. Dadurch wird von vornherein ausgeschlossen, dass derselbe Güterzug an *mehreren* verschiedenen Positionen seiner Tour oder dass *mehrere* Güterzüge auf ihren unterschiedlichen Touren jeweils mit *Teilen* der zu transportierenden Gütermenge $g_{\text{mb,sta.c.i}}$ oder $g_{\text{mb,gef.d.i}}$ beladen wird bzw. werden. Dieser Sachverhalt wird hier als *beladungsbezogene Unteilbarkeitsprämisse* bezeichnet. Sie manifestiert sich im formalsprachlichen Tourenplanungsmodell durch die Ganzzahligkeit – genauer gesagt: durch den binären Definitionsbereich $\{0, 1\}$ – der Entscheidungsvariablen $z_{\text{b,sta.c.i.e.q,p}}$ und $z_{\text{b,gef.d.i.e.q,p}}$.

HP_i durchfahren, ohne dort mit der Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ bzw. $gmb_{gef.d.i}$ beladen zu werden. Darüber hinaus eröffnen sie auch den Freiheitsgrad, dass derselbe Güterzug während seiner Tour denselben Haltepunkt HP_i aufgrund von Subzyklen mehrfach anfahren kann, dabei aber nur einmal mit der Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ bzw. $gmb_{gef.d.i}$ beladen wird und die übrigen Male den Haltepunkt HP_i ohne Beladung mit dieser Gütermenge passiert.

Der fünfte Typ der *entladungsbezogenen* Entscheidungsvariablen $ze_{sta.c.i.j.e.q.r}$ und $ze_{gef.d.i.j.e.q.r}$ zeigt an, ob ein Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt und am Haltepunkt HP_i mit Standardgütern bzw. mit Gefahrgütern beladen wurde, an der Tourposition r mit dem Index j für den Haltepunkt HP_j die entsprechende Gütermenge $gme_{sta.c.i.j}$ bzw. $gme_{gef.d.i.j}$ entlädt oder nicht, ob ihm also die vorgenannten Entladungsmengen an der Tourposition r zugeordnet werden oder nicht.¹⁾ Für diese Entscheidungsvariablen $ze_{sta.c.i.j.e.q.r}$ und $ze_{gef.d.i.j.e.q.r}$ gilt:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P :$$

$$ze_{sta.c.i.j.e.q.r} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt HP}_i \text{ mit der Gütermenge } gmb_{sta.c.i} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } gme_{sta.c.i.j} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt HP}_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt HP}_j \\ & \text{keine Gütermenge } gme_{sta.c.i.j} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt HP}_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } gmb_{sta.c.i} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (71)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P :$$

$$ze_{gef.d.i.j.e.q.r} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$ze_{gef.d.i.j.e.q.r} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt HP}_i \text{ mit der Gütermenge } gmb_{gef.d.i} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } gme_{gef.d.i.j} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt HP}_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt HP}_j \\ & \text{keine Gütermenge } gme_{gef.d.i.j} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt HP}_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } gmb_{gef.d.i} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (72)$$

1) Da einem Güterzug, der eine Tour $T_{e,q}$ durchführt, die transportierte und zu entladende Gütermenge $gme_{sta.c.i.j}$ oder $gme_{gef.d.i.j}$ an einer Tourposition r entweder als *Ganzes* zugeordnet wird oder aber überhaupt nicht, wird bei der Entladung einer transportierten Gütermenge eine Art „take it or leave it“ praktiziert. Dadurch wird von vornherein ausgeschlossen, dass derselbe Güterzug an *mehreren* verschiedenen Positionen seiner Tour oder dass *mehrere* Güterzüge auf ihren unterschiedlichen Touren jeweils von *Teilen* der transportierten Gütermengen $gme_{sta.c.i.j}$ oder $gme_{gef.d.i.j}$ entladen wird bzw. werden. Dieser Sachverhalt wird hier als *entladungsbezogene Unteilbarkeitsprämisse* bezeichnet. Sie manifestiert sich im formalsprachlichen Tourenplanungsmodell durch die Ganzzahligkeit – genauer gesagt: durch den binären Definitionsbereich $\{0, 1\}$ – der Entscheidungsvariablen $ze_{sta.c.i.j.e.q.r}$ und $ze_{gef.d.i.j.e.q.r}$.

Die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ eröffnen dem Entscheidungsträger im hier präsentierten Tourenplanungsmodell abermals einen neuartigen Spielraum. Es handelt sich um den Entscheidungsspielraum, einen Haltepunkt HP_j anzufahren, ohne in diesem Haltepunkt Gütermengen entladen zu müssen, die laut Transportnachfrage von einem anderen Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j transportiert und dort entladen werden sollten. Dieser Freiheitsgrad ermöglicht es, dass mehrere Güterzüge auf ihren Touren denselben Haltepunkt HP_j anfahren, aber nur einer von ihnen dort von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i.j}}$ entladen wird, während die anderen Güterzüge den Haltepunkt HP_j durchfahren, ohne dort von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i.j}}$ entladen zu werden. Darüber hinaus eröffnen sie auch den Freiheitsgrad, dass derselbe Güterzug während seiner Tour denselben Haltepunkt HP_j aufgrund von Subzyklen mehrfach anfahren kann, dabei aber nur einmal von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i.j}}$ entladen wird und die übrigen Male den Haltepunkt HP_j ohne Entladung von dieser Gütermenge passiert.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die voranstehende mathematische Modellformulierung für die Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen.

Die lokomotivenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ werden in die computergestützte Modellformulierung nicht einbezogen, weil nur eine Lokomotive berücksichtigt wird, die auf jeden Fall für die Tourdurchführung eingesetzt werden muss. Die güterwagenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ bleiben unberücksichtigt, weil Güterwagen im praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn überhaupt nicht explizit erfasst werden. Die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ sowie die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ werden nur in einer vereinfachten Form verwendet, die von der Differenzierung zwischen unterschiedlichen Güterwagen-Typen $GT_{\text{sta.c}}$ und $GT_{\text{gef.d}}$ abstrahiert. Diese Vereinfachung ergibt sich unmittelbar daraus, dass Güterwagen im praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn nicht explizit erfasst werden.

Die Abbildung 31 auf dieser und der nächsten Seite zeigt einen fünften Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung der Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn.

SETS:

Zuordnungsentscheidung(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,

Tourpositionen_bis_P, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):

Entscheidungsvariable_x;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$;

Tourbeladungsmenge(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler):

Entscheidungsvariable_zb;

! ist die Entscheidungsvariable $zb_{i,e,q,p}$ zur Beladung eines Güterwagens auf einer Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_i ;

Tourentladungsmenge(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler):

Entscheidungsvariable_ze;

! ist die Entscheidungsvariable $ze_{i,j,e,q,r}$ zur Entladung eines Güterwagens auf einer Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_j ;

ENDSETS

SUBMODEL Modellkern:

! Die nachfolgenden @FOR-Funktionen implementieren als „Schleifen“ in kompakter Form die Binär-Restriktionen, dass für jede Entscheidungsvariable nur der Wert 0 oder 1 zulässig ist;

@FOR(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): @BIN(Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n));

@FOR(Tourbeladungsmenge(n,e,q,p): @BIN(Entscheidungsvariable_zb(n,e,q,p));

@FOR(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): @BIN(Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r));

ENDSUBMODEL

Abbildung 31: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell
zur Spezifizierung der Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers

7.2.6 Spielraumeinschränkungen durch Restriktionen aus dem Entscheidungsumfeld

Die Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers, die durch seine Entscheidungsvariablen eröffnet werden, gilt es so weit *einzuschränken*, dass eine Zuweisung von jeweils einem konkreten Wert zu jeder Entscheidungsvariable eine *zulässige* Modelllösung ergibt.¹⁾ Die Anforderungen, die jede zulässige Modelllösung im Hinblick auf das zugrunde liegende Realproblem erfüllen muss, werden im Kontext von Modellen des Operations Research im Allgemeinen als *Restriktionen* formuliert.²⁾ Da diese Restriktionen einem Entscheidungsträger durch sein Umfeld „vorgegeben“ sind, also durch sein dispositives Verhalten nicht beeinflusst werden können, werden sie oftmals als „ob-

-
- 1) Eine *Modelllösung* ist die Zuweisung von jeweils einem konkreten Wert zu jeder Variablen des zugrunde liegenden Modells. In diesem Zusammenhang wird häufig auch von einer Variablenbelegung mit zulässigen Werten aus ihren Definitionsbereichen gesprochen. Die Variablenbelegung muss bei einer Modelllösung im weiteren Sinne sowohl für jede Entscheidungsvariable als auch für jede modellendogene Variable erfolgen. Für alle modellexogenen Variablen (Parameter) wird hingegen vorausgesetzt, dass ihnen bereits vor dem Versuch, Modelllösungen zu ermitteln, jeweils ein konkreter Wert „außerhalb“ des Modells, z.B. durch einen Modellbenutzer, zugewiesen wurde. Die Wertzuweisungen zu den modellendogenen Variablen sind „innerhalb“ eines Modells eindeutig determiniert, sobald jeder Entscheidungsvariable ein konkreter Wert zugewiesen worden ist. Daher reicht es für eine Modelllösung im engeren Sinne aus, eine Variablenbelegung nur für alle Entscheidungsvariablen durchzuführen. Von diesem eng gefassten Verständnis einer Modelllösung wird hier ausgegangen.
 - 2) Es wird hier unterschieden zwischen Anforderungen einerseits und Restriktionen andererseits. *Anforderungen* sind auf der Ebene des Realproblems angesiedelt. Sie gehen aus der Wahrnehmung des Realproblems durch „relevante“ Personen hervor, die Einfluss auf Entscheidungsträger und Modellkonstrukteure ausüben vermögen, und werden hier als „gegeben“ vorausgesetzt. Komplikationen, die aus der unterschiedlichen Realproblemwahrnehmung durch verschiedene Personen resultieren können, werden im hier vorgelegten Projektbericht also nicht thematisiert. Von einer *Restriktion* wird erst dann gesprochen, wenn ein Modellkonstrukteur eine Anforderung oder mehrere Anforderungen aus der Ebene des Realproblems mittels einer formalsprachlichen Konzeptualisierung „herausgehoben“ („rekonstruiert“) hat und auf der Ebene des Formalproblems – also des von ihm konstruierten Modells – als ein Modellkonstrukt darstellt. Eine Restriktion repräsentiert daher stets eine nicht-leere Menge von Anforderungen, die im jeweils zugrunde liegenden Realproblem zwischen zulässigen (anforderungserfüllenden) und unzulässigen (anforderungsverletzenden) Problemlösungen diskriminieren. Die Gesamtheit aller Anforderungen, die ein Entscheidungsträger für das jeweils zugrunde liegende Realproblem als relevant erachtet, werden als das *Entscheidungsumfeld* – oder kurz: Umfeld – des Entscheidungsträgers bezeichnet.

jektive“ Determinanten eines Entscheidungsmodells¹⁾ bezeichnet. Tatsächlich handelt es sich aber nur um „quasi-objektive“ Determinanten, da die Formulierung der Restriktionen den subjektiven Konzeptualisierungsentscheidungen („Designentscheidungen“) derjenigen Personen unterliegt, die als „Modellbauer“ oder „Modelldesigner“ ein Entscheidungsmodell konstruieren. Die Gesamtheit aller Restriktionen eines Entscheidungsmodells repräsentiert das Entscheidungsumfeld eines Entscheidungsträgers. Jede Modelllösung, die diese Restriktionengesamtheit erfüllt (verletzt), stellt eine (un)zulässige Modelllösung dar.

Restriktionen wurden in den voranstehenden Kapiteln schon mehrfach aufgestellt. Sie betrafen dort jedoch nur diejenige Konstruktart, die in einem Kapitel behandelt wurde. Zu solchen konstruktart-spezifischen Restriktionen gehören z.B. die Definitionsbereiche der Entscheidungsvariablen sowie die Formeln, die zur (vorläufigen) Spezifizierung zulässiger Touren verwendet wurden. Im aktuellen Kapitel werden dagegen nur noch die „restlichen“ Restriktionen behandelt, die unterschiedliche Konstruktarten des Tourenplanungsmodells miteinander verknüpfen. Sie werden auch als *Restriktionen im engeren Sinne* bezeichnet, weil sie für Entscheidungs- und Optimierungsmodelle zumeist eine zentrale Rolle spielen. Sie bereiten einerseits bei der Modellkonstruktion oftmals den größten Aufwand, weil es meistens diesen Restriktionen überlassen bleibt, besonders „knifflige“ Aspekte des jeweils zugrunde liegenden Realproblems in einem Modell mit formalsprachlichen Konstrukten „einzufangen“. Andererseits hängt oftmals auch der Aufwand, der als Rechenzeit oder Arbeitsspeicher in die Ermittlung von Modelllösungen investiert werden muss, maßgeblich vom komplexen Zusammenspiel dieser Restriktionen eines Modells ab.

Zunächst wird auf die umfangreiche Gruppe der *Tourestriktionen* eingegangen. Sie dienen dazu, die Zulässigkeit von Touren zu definieren.²⁾ Dabei werden die P-Tupel oder P-stelligen Zeilenvektoren – oder kurz: Tourvektoren – $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$, die für die Spezifizierung einer Tour $T_{e,q}$ eingeführt wurden, mit den Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ kombiniert, die den Positionen p einer Tour $T_{e,q}$ jeweils einen Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN zuordnen (oder nicht). Eine Kombination aus dem Tourvektor $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ für die Tour $T_{e,q}$ mit insgesamt $P \times N$ Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für die Positionen $p = 1, \dots, P$ des Tourvektors und für Haltepunkte die HP_n mit $n = 1, \dots, N$ des zugrunde liegenden Ver-

-
- 1) Im aktuellen Argumentationskontext wird von einem *Entscheidungsmodell* gesprochen, weil ein Entscheidungsträger mit seinem Entscheidungsverhalten (dispositives Verhalten) und den Einschränkungen (Restriktionen), denen er bei seinem Entscheidungsverhalten unterworfen ist, im Vordergrund des Interesses steht. Eine besondere Variante solcher Entscheidungsmodelle stellen die Optimierungsmodelle dar, die in diesem Projektbericht in der Gestalt eines Tourenplanungsmodells konstruiert und analysiert werden. Von einem *Optimierungsmodell* wird immer dann gesprochen, wenn es in einem Entscheidungsmodell darum geht, seine Entscheidungsvariablen so mit konkreten Werten zu belegen, dass die Zielfunktion(en) des Entscheidungsmodells bestmöglich („optimal“) erfüllt wird (werden). Auch bei dem hier vorgestellten Tourenplanungsmodell handelt es sich um ein Optimierungsmodell, weil seine Zielfunktion der Leertonnenkilometer durch die Ermittlung (mindestens) eines minimalen Zielfunktionswerts bestmöglich erfüllt werden soll.
 - 2) Hier werden die meisten derjenigen Eigenschaften aufgegriffen, die im Kapitel 7.2.4 angeführt wurden, um die Zulässigkeit einer Tour zu definieren. Dabei wurde zwar aus graphentheoretischer Perspektive argumentiert, jedoch die Notation bereits auf die „Semantik“ des zugrunde liegenden Realproblems einer Tourenplanung für Eisenbahnverkehrsunternehmen ausgerichtet. Bereits im Kapitel 7.2.4 schon darauf hingewiesen, dass die dort angeführten Formeln für die Zulässigkeit einer Tour nicht unmittelbar in die mathematische Modellformulierung eingehen, sondern erst im Zusammenhang mit den Entscheidungsvariablen zu explizit formulierten Restriktionen für das Tourenplanungsmodell führen.

kehrnetzes VN stellt genau dann eine *zulässige Tour* $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ dar, wenn alle nachfolgend angeführten Tourrestriktionen a) bis h) erfüllt werden.¹⁾

a) Die elementare Kopplung zwischen den beiden Konstrukten Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ einerseits und Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ andererseits erfolgt durch die nachstehende Definitionsgleichung, die jeden Haltepunkt-Index $hpi_{e,q,p}$ aus dem Tourvektor mit dem Wert genau einer positionsgleichen, d.h. im Positionsindex „p“ übereinstimmenden Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ verknüpft (*Kopplungsrestriktion für Haltepunkt-Indizes und Entscheidungsvariablen*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} \quad (73)$$

Daher lässt sich jede Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,P})$ äquivalent darstellen, indem nur noch auf die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ und die Indizes „n“ von jeweils referenzierten Haltepunkten HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN zurückgegriffen wird (*Tourdarstellungsrestriktion*):²⁾

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad TV_{e,q} = \left(\sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,P,n} \right) \quad (74)$$

Z.B. kommt das P-Tupel $TV_{e,q} = (3, 7, 5, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ mit $P = 11$ als Tourvektor $TV_{e,q}$ der Tour $T_{e,q}$ dadurch zustande, dass aus einem Verkehrsnetz VN mit der Knotenmenge $KN = \{HP_n | n = 1, \dots, 10\}$ mithilfe konkreter Werte für die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ an allen Positionen des Tourvektors die nachfolgend erläuterten Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$ festgelegt wurden.

-
- 1) Die nachfolgend angeführten Tourrestriktionen definieren die Zulässigkeit einer Tour $T_{e,q}$ lediglich aus graphentheoretischer und somit *topologischer* Perspektive. Dies rein *qualitative* Betrachtungsweise bedeutet, dass quantitative Aspekte eines Tourenplanungsproblems hier noch nicht in die Definition der Tourzulässigkeit eingehen. Diese *quantitativen* Aspekte werden erst später aus einer speziellen *metrischen* Perspektive aufgegriffen, um z.B. die Erfüllung aller Transportnachfragen sicherzustellen sowie spezielle Anforderungen an die Verhältnisse zwischen Be- und Entladungsmengen zu erfüllen. Auch im Hinblick auf diese quantitativen Aspekte könnte von zulässigen Touren gesprochen werden. Um die hier verwendete Begrifflichkeit möglichst diskriminierungsstark auszulegen, wird jedoch davon abgesehen. Daher werden die Begriffe der Zulässigkeit einer Tour und der Tourrestriktionen nur auf die oben erwähnte graphentheoretische oder topologische Perspektive bezogen. Die anderen, quantitativen Aspekte werden dagegen später unter andere Zulässigkeitsbegriffe und somit auch andere Restriktionsklassen subsumiert. Dazu gehören z.B. die später angeführten Markträumungs- und Ladungsrestriktionen. Modelllösungen, die alle Restriktionen erfüllen, werden jeweils als ein *zulässiger Tourenplan* bezeichnet. Ein solcher zulässiger Tourenplan besteht daher nicht nur aus zulässigen Touren, welche die Tourrestriktionen erfüllen. Vielmehr erfüllen seine zulässigen Touren darüber hinaus auch eine große Vielfalt weiterer Restriktionen, zu denen u.a. die vorgenannten Markträumungs- und Ladungsrestriktionen zählen.
 - 2) Dies ist der „tiefere“ Grund dafür, dass die Zulässigkeit von Touren im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell nicht unmittelbar mithilfe derjenigen Formeln spezifiziert wird, die im Kapitel 7.2.4 mit Bezug auf die Haltepunkt-Indizes $hpi_{e,q,p}$ aufgestellt wurden, weil dort das Konstrukt der Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ noch nicht eingeführt war. Jetzt, nachdem diese Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ zur Verfügung stehen, werden mit ihrer Hilfe diejenigen Restriktionen aufgestellt, die von jeder zulässigen Tour erfüllt werden müssen.

- Für die Tourposition $p = 1$ gilt mit $x_{e,q,1,3} = 1$ und $x_{e,q,1,n} = 0$ für alle $n \in \{1, \dots, 10\} \setminus \{3\}$:

$$hpi_{e,q,1} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n} = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + \underline{3 \cdot 1} + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 3$$

Also befindet sich an der ersten Position der Tour $T_{e,q}$ der Haltepunkt HP_3 mit dem Index 3. Er stellt den Start-Haltepunkt (den Tourbeginn) der Tour $T_{e,q}$ dar.

- Für die Tourposition $p = 2$ gilt mit $x_{e,q,2,7} = 1$ und $x_{e,q,2,n} = 0$ für alle $n \in \{1, \dots, 10\} \setminus \{7\}$:

$$hpi_{e,q,2} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,2,n} = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + \underline{7 \cdot 1} + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 7$$

Also wird an der zweiten Position der Tour $T_{e,q}$ der Haltepunkt HP_7 mit dem Index 7 angefahren.

- Für die Tourposition $p = 3$ gilt mit $x_{e,q,3,5} = 1$ und $x_{e,q,3,n} = 0$ für alle $n \in \{1, \dots, 10\} \setminus \{5\}$:

$$hpi_{e,q,3} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,3,n} = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + \underline{5 \cdot 1} + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 5$$

Also wird an der dritten Position der Tour $T_{e,q}$ der Haltepunkt HP_5 mit dem Index 5 angefahren.

- Für die Tourposition $p = 4$ gilt mit $x_{e,q,4,3} = 1$ und $x_{e,q,4,n} = 0$ für alle $n \in \{1, \dots, 10\} \setminus \{3\}$:

$$hpi_{e,q,4} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,4,n} = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + \underline{3 \cdot 1} + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 3$$

Also wird an der vierten Position der Tour $T_{e,q}$ der Haltepunkt HP_3 mit dem Index 3 angefahren. Er stellt den Ziel-Haltepunkt (das Tourende) der Tour $T_{e,q}$ mit dem Positionsindex $p^* = 4$ für das Tourende dar. Bei Erreichen des Tourendes wird an den Start-Haltepunkt HP_3 der Tour $T_{e,q}$ zurückgekehrt.

- Für die Tourpositionen $p = 5, \dots, 11$ gilt mit $x_{e,q,p,n} = 0$ für alle $n \in \{1, \dots, 10\}$:

$$hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 0$$

Also wird ab der fünften Position der Tour $T_{e,q}$ kein Haltepunkt HP_n mehr angefahren. Dies wird durch den artifiziellen Index 0 angezeigt, dem kein Haltepunkt HP_n im zugrundeliegenden Verkehrsnetz entspricht.

b) An der p -ten Position im Tourvektor $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ mit $p = 1, \dots, P$ darf die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ für höchstens einen Haltepunkt HP_n den Wert 1 annehmen.¹⁾ Für alle anderen Haltepunkte HP_m mit $m \neq n$ müssen die zugehörigen Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,m}$ jeweils den Wert 0

1) Wenn die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ für keinen Haltepunkt HP_n den Wert 1 annimmt, also für alle Haltepunkte HP_n jeweils den Wert 0 annimmt, wird an der p -ten Position der Tour $T_{e,q}$ überhaupt kein Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN angefahren. Dies ist z.B. für die o.a. Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (3, 7, 5, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ für die Tourpositionen $p = 5, \dots, 11$ der Fall.

annehmen. Andernfalls könnten sich mehrere verschiedene Haltepunkte an derselben Position p der Tour $T_{e,q}$ befinden, was unzulässig wäre. Daher muss als *Restriktion zum Ausschluss multipler Haltepunkte* gelten:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1 \quad (75)$$

c) Jede reale Tour $T_{e,q}$ beginnt im Haltepunkt für das Depot des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e . Wenn sich das Depot DEP_e im Haltepunkt HP_n befindet ($DEP_e = HP_n$), dann muss für den Tourbeginn mit der Position $p = 1$ gelten: $x_{e,q,1,n} = 1$. Um diesen Entscheidungsvariablenwert zu erzwingen, bedarf es einer „trickreich“ konstruierten Restriktion. Sie greift auf die bereits eingeführte Binärvariable $dhp_{e,n}$ zurück, die genau dann den Wert $dhp_{e,n} = 1$ annimmt, wenn das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e sein Depot im Haltepunkt HP_n eingerichtet hat. Andernfalls weist sie den Wert $dhp_{e,n} = 0$ auf. Dann lässt sich die Anforderung, dass jede reale Tour $T_{e,q}$ im Depot DEP_e des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e beginnen muss, durch folgende Restriktion ausdrücken (*Depotrestriktion für den Tourbeginn*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \quad (76)$$

Diese Restriktion trifft jedoch nur auf *reale* Touren $T_{e,q}$ zu, die im Depot eines Eisenbahnverkehrsunternehmens beginnen, mindestens einen anderen Haltepunkt HP_n des Verkehrsnetzes VN anfahren und am Tourende zum Depot zurückkehren, also mindestens drei Haltepunkte im Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ umfassen ($p^* \geq 3$). Es wurde jedoch schon früher erläutert, dass sich auch artifizielle, virtuelle oder nicht-geplante Touren vorstellen lassen. Dazu gehört vor allem die Null-Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$.¹⁾ Sie kann aus „formalen“ Gründen entstehen, wenn die höchstzulässige Tourenanzahl Q_e für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e größer ist als die Anzahl der realen Touren, die das Eisenbahnverkehrsunternehmen benötigt, um die Transportnachfragen aller seiner Kunden vollständig zu erfüllen. In diesem Fall muss es möglich sein, die realiter nicht benötigten Touren $T_{e,q}$ im Tourenplanungsmodell dennoch formal darzustellen, und zwar als artifizielle Null-Tour $T_{e,q}$ mit $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$. Die Null-Tour stellt ein typisches *Artefakt* dar, das aus einem modellierungstechnischen Grund²⁾ bei der Spezifizierung des Tourenplanungsmodells als *Formalproblem* erforderlich ist, aber *nichts* mit dem zugrunde liegenden *Realproblem* gemein hat.

-
- 1) Daneben lassen sich auch Schein-Touren konstruieren, die nur einen Haltepunkt ($p^* = 1$) oder nur zwei Haltepunkte ($p^* = 2$) umfassen und daher nicht geplant werden, wenn jede Tour vom Depot aus starten und dorthin auch zurückkehren muss. Solche Schein-Touren werden durch eine später eingeführte Restriktion ebenso wie die Null-Tour ausgeschlossen.
 - 2) Der Grund, der die Einführung des Artefakts „Null-Tour“ erzwingt, ist die Vorgabe einer höchstzulässigen Tourenanzahl Q_e . Sie wird im Tourenplanungsmodell benötigt, um das modellierungstechnische Problem variabler Indextmengen zu vermeiden. Seitens des modellierten Realproblems ist aber keine reale Entität ersichtlich, die mit der höchstzulässigen Tourenanzahl Q_e auf irgendeine „sinnvolle“ Weise korrespondieren würde.

Um diesen „artifiziellen“ Effekt zu berücksichtigen, wird die modellendogene Binärvariable $real_{e,q}$ eingeführt.¹⁾ Sie zeigt als *Realisierungsvariable* an, ob eine Tour $T_{e,q}$ für die spätere Realisierung geplant wird oder nicht:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad real_{e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn die Tour } T_{e,q} \text{ realisiert wird} \\ 0, & \text{wenn die Tour } T_{e,q} \text{ nicht realisiert wird} \end{cases} \quad (77)$$

Der Wert der Realisierungsvariable $real_{e,q}$ ist für jede Tour $T_{e,q}$ modellendogen bestimmt: Sie nimmt genau dann den Wert $real_{e,q} = 1$ an, wenn die Tour an einem Haltepunkt HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes begonnen wird, wenn also für die erste Position $p = 1$ des Tourvektors der Tour $T_{e,q}$ gilt: $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 1$. Dann sorgen die übrigen Restriktionen des Tourenplanungsmodells dafür, dass es sich um eine zulässige und somit realisierbare Tour handelt. Andernfalls, wenn $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 0$ für die erste Position $p = 1$ des Tourvektors der Tour $T_{e,q}$ gilt, führt die später vorgestellte Kontinuitätsrestriktion dazu, dass es sich bei dieser Tour $T_{e,q}$ um die Null-Tour mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ handeln muss. Diese artifizielle Tour steht im Tourenplanungsmodell für alle zwar zulässigen, aber nicht für die spätere Realisierung geplanten Touren. Folglich gilt für die modellendogene Realisierungsvariable $real_{e,q}$:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad real_{e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 1 \\ 0, & \text{wenn } \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 0 \end{cases} \quad (78)$$

Diese Definition der Realisierungsvariable $real_{e,q}$ lässt sich äquivalent auf folgende Weise darstellen, die zwar intuitiv weniger übersichtlich wirkt, aber die schwer zu handhabende Fallunterscheidung aus der Formel (78) vermeidet (*Restriktion für die Realisierungsvariable*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad real_{e,q} = \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \quad (79)$$

Damit die o.a. Depotrestriktion für den Tourbeginn von artifiziellen Touren $T_{e,q}$ nicht wirksam werden kann, muss sie wie folgt erweitert werden (*erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad real_{e,q} = 1 \rightarrow \left(\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \right) \quad (80)$$

Allerdings lassen sich solche Subjugat-Formeln, die in einer mathematischen Modellformulierung keine Probleme bereiten, nur sehr schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementieren. Daher wird ein „Kunstgriff“ angewendet, der die Menge zulässiger Modelllösungen nicht verändert,²⁾ aber dennoch gestattet, die Depotrestriktion für den Tourbeginn unter Berück-

1) Die Wertzuweisungen zu den Realisierungsvariablen $real_{e,q}$ erfolgen *modellendogen*. Dies bedeutet, dass von einem Algorithmus zur Ermittlung (mindestens) einer optimalen Modelllösung nicht nur die Werte aller Entscheidungsvariablen, sondern „nebenbei“ auch die Werte der Realisierungsvariablen $real_{e,q}$ so ermittelt werden, dass die Zielfunktion bestmöglich erfüllt und keine Restriktionen verletzt wird.

2) Der Übergang von der implementierungsfernen zur implementierungsnahen Formulierung der Depotrestriktion für den Tourbeginn stellt daher eine Äquivalenztransformation dar.

sichtigung der Zulässigkeit von artifiziellen Touren „subjugatfrei“ zu formulieren. Daraus resultiert als *modifizierte erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn*:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \cdot \text{real}_{e,q} \quad (81)$$

Die Formel (81) kann unmittelbar vereinfacht werden zu:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = \text{real}_{e,q} \quad (82)$$

In dieser Formulierung hat die Formel (82) – im Gegensatz zur Formel (81) – an Transparenz hinsichtlich ihres Zustandekommens aus der zugrunde liegenden Formel (76) eingebüßt.

Schließlich kann die Formel (79) verwendet werden, um die Realisierungsvariable $\text{real}_{e,q}$ vollständig zu eliminieren. Dann ergeben sich für die *modifizierte erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn* aus den Formen (81) und (82) als weitere äquivalente Formulierungen:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \quad (83)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 0 \quad (84)$$

Es bleibt letztlich eine „modellästhetische“ Frage, welche der äquivalenten Formeln (81) bis (84) in der mathematischen Modellformulierung bevorzugt wird, um die erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn in einer „subjugatfreien“ Form darzustellen.

Die Depotrestriktion für den Tourbeginn spielt in ihrer Wechselwirkung mit den Realisierungsvariablen $\text{real}_{e,q}$ eine wichtige Rolle für die Definition zulässiger Touren:

- Entweder wird die Tour $T_{e,q}$ *geplant* (reale Tour). In diesem Fall gilt wegen $\text{real}_{e,q} = 1$ die modifizierte erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn in der Gestalt von Formel (82) in der „normalen“ Variante $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1$. Durch $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1$ wird erzwungen, dass die Tour $T_{e,q}$ an der ersten Position ($p = 1$) ihres Tourvektors mit dem Index „n“ desjenigen Haltepunkts HP_n beginnt, in dem sich das Depot DEP_e des betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befindet.
- Oder die Tour $T_{e,q}$ wird *nicht geplant* (artifizielle Tour). In diesem Fall gilt wegen $\text{real}_{e,q} = 0$ die modifizierte erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn in der Gestalt von Formel (82) in der „anormalen“ Variante $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 0$. Durch $\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 0$ wird erzwungen, dass die Tour $T_{e,q}$ an der ersten Position ($p = 1$) ihres Tourvektors mit dem artifiziellen Index „0“ beginnt, dem kein Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN entspricht. Im Zusammenspiel mit der Kontinuitätsrestriktion, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellt wird, bewirkt die modifizierte erweiterte Depotrestriktion für den Tourbeginn gemeinsam mit der Realisierungsvariablen $\text{real}_{e,q} = 0$, dass für nicht-geplante, artifizielle Touren im Tourenplanungsmodell *nur* die *Null-Tour* mit $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ in Betracht kommt. Andere denkmögliche Formen von nicht geplanten Touren, die an früherer Stelle als Schein-Touren angesprochen wurden, sind daher im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell von vornherein unzulässig.

d) Jede reale Tour $T_{e,q}$ startet nicht nur im Depot des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e , sondern endet auch dort.¹⁾ Wenn sich das Depot DEP_e im Haltepunkt HP_n befindet ($DEP_e = HP_n$), muss für das Tourende mit der Position p^* im Tourvektor gelten: $x_{e,q,p^*,n} = 1$. Um diesen Entscheidungsvariablenwert zu erzwingen, kann – analog zur Depotrestriktion für den Tourbeginn – wiederum auf die Binärvariable $dhp_{e,n}$ zurückgegriffen werden. Sie nimmt genau dann den Wert $dhp_{e,n} = 1$ an, wenn das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e sein Depot im Haltepunkt HP_n eingerichtet hat. Daher lässt sich die Anforderung, dass jede reale Tour $T_{e,q}$ im Depot DEP_e des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e enden muss, durch folgende Restriktion ausdrücken (*vorläufige Depotrestriktion für das Tourende*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \quad (85)$$

Allerdings kann diese Formel mittels einer mathematischen Modellierungssoftware nicht unmittelbar implementiert werden. Der Grund hierfür ist der unscheinbar anmutende Index „ p^* “ für die Position des Tourendes im Tourvektor $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$. Dieser Positionsindex p^* ist „ex ante“, d.h. vor der Ermittlung einer optimalen Modelllösung, unbekannt und stellt daher eine modellendogene Variable dar. Einen derart variablen Index, der durch keinen Quantor gebunden ist, kann eine mathematische Modellierungssoftware im Allgemeinen nicht verarbeiten. Dies unterstreicht nochmals die Schwierigkeiten, die aus der *Variabilität* des *Positionsindex* p^* für das *Tourende* resultieren und bereits an früherer Stelle angesprochen wurden. Allerdings lassen sich diese Schwierigkeiten durch einen weiteren modellierungstechnischen „Kunstgriff“ beseitigen. Dies betrifft zumindest die mathematische Modellformulierung – auf besondere Probleme der computergestützten Modellformulierung wird später eingegangen.

An jeder Position p , die im Tourvektor zwischen der ersten Position für den Tourbeginn ($p = 1$) und der Position für das Tourende ($p = p^*$) liegt, nimmt genau eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ den Wert $x_{e,q,p,n} = 1$ an, während alle anderen Entscheidungsvariablen an dieser Position p den Wert $x_{e,q,p,n} = 0$ besitzen.²⁾ Nach der Position p^* des Tourendes müssen alle Entscheidungsvariablen an den Positionen p mit $p = p^*+1, \dots, P$ jeweils den Wert $x_{e,q,p,n} = 0$ annehmen, sofern nicht $p^* = P$ gilt. Folglich ergibt sich der Index p^* für die Position des Tourendes im Tourvektor $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ schlicht als die Summe der Werte aller Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$, die zu der Tour $T_{e,q}$ für alle

1) Dadurch wird gewährleistet, dass jede Tour $T_{e,q}$ im zugrunde liegenden Verkehrsnetz einen zyklischen Weg darstellt. Deshalb entspricht das Tourenplanungsmodell in dieser Hinsicht für jede *einzelne* Tour $T_{e,q}$ weiterhin einem konventionellen Rundreiseproblem vom Travelling-Salesman-Typ.

2) Aufgrund der bereits erläuterten Restriktion zum Ausschluss multipler Haltepunkte gilt für jede Position p im Tourvektor: $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1$. Solange eine Tour noch nicht beendet ist ($1 \leq p \leq p^*$), kann $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 0$ nicht eintreten, weil dann einer Tourposition kein Haltepunkt HP_n zugeordnet wäre, was für zulässige Touren grundsätzlich ausgeschlossen ist. Vgl. dazu auch die Kontinuitätsrestriktion, die in Kürze vorgestellt wird. Da für jede Tourposition p mit $1 \leq p \leq p^*$ sowohl $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1$ als auch $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \neq 0$ gilt, muss wegen $x_{e,q,p,n} \in \{0,1\}$ für alle Tourpositionen p mit $p = 1, \dots, p^*$, also solange eine Tour noch nicht beendet ist, gelten: $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$. Wegen $x_{e,q,p,n} \in \{0,1\}$ kann $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ für jede Tourposition p nur durch genau eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ mit $x_{e,q,p,n} = 1$ erfüllt werden; q.e.d.

Tourpositionen p mit $p = 1, \dots, P$ und zu allen Haltepunkten HP_n mit $n = 1, \dots, N$ des jeweils zugrundeliegenden Verkehrsnetzes VN gehören:¹⁾

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad p^* = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \quad (86)$$

Beispielsweise gilt für die oben vorgestellte Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (3, 7, 5, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$: Der Index p^* für die Position des Tourendes beträgt hier $p^* = 4$. Er lässt sich als Summe aus den vier Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für die ersten vier Tourpositionen $p = 1, \dots, 4$ mit den Werten $x_{e,q,p,n} = 1$ ermitteln ($x_{e,q,1,3} = 1$, $x_{e,q,2,7} = 1$, $x_{e,q,3,5} = 1$ und $x_{e,q,4,3} = 1$), weil alle anderen Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für den gesamten Tourvektor per constructionem den Wert $x_{e,q,p,n} = 0$ aufweisen.

Folglich stellt der variable Index p^* für die Position des Tourendes einer Tour $T_{e,q}$ in der mathematischen Modellformulierung eine wohldefinierte *modellendogene Variable* dar, deren Wert sich simultan ergibt, wenn die Werte der Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ ermittelt werden. Daher lässt sich die *Depotrestriktion für das Tourende* wie folgt ausdrücken:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad p^* = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \quad \wedge \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \quad (87)$$

Wenn die Option zugelassen werden soll, dass auch nicht-geplante, artifizielle Touren $T_{e,q}$ möglich sind, ist die o.a. Depotrestriktion für das Tourende analog zur Depotrestriktion für den Tourbeginn auf reale Touren einzuschränken, die für die spätere Realisierung geplant werden. Dies sind genau diejenigen Touren, für welche die Realisierungsvariable $real_{e,q}$ den Wert $real_{e,q} = 1$ annimmt. Folglich gilt – zumindest vorläufig – bei Berücksichtigung der Zulässigkeit von artifiziellen Touren als entsprechend *erweiterte*, aber noch *implementierungsferne Depotrestriktion für das Tourende*:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad real_{e,q} = 1 \rightarrow \left(p^* = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \quad \wedge \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \right) \quad (88)$$

Analog zu der Vorgehensweise, die oben hinsichtlich der Depotrestriktion für den Tourbeginn erläutert wurde, lässt sich diese Subjugat-Formel u.a. in die nachfolgend angeführten, äquivalenten, aber „subjugatfreien“ Formeln als *implementierungsnaherweiterte Depotrestriktion für das Tourende* transformieren:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad p^* = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \quad \wedge \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n} = real_{e,q} \quad (89)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad p^* = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \quad \wedge \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} = 0 \quad (90)$$

1) Streng genommen muss der Index für die Position des Tourendes einer Tour $T_{e,q}$ stets in Bezug auf die jeweils betroffene Tour indiziert, also als „ $p^*_{e,q}$ “ notiert werden. Von dieser präzisen, aber schwerfälligen Notation wird hier der Übersichtlichkeit halber abgesehen.

An dieser Stelle tritt jedoch eine weitere *Komplikation* zu Tage, die vom variablen Positionsindex p^* für das Tourende selbst dann noch verursacht wird, wenn er mithilfe der Formel (86) oder (88) als eine modellendogene Variable des Tourenplanungsmodells spezifiziert worden ist. Denn für den Fall einer artifiziellen Tour $T_{e,q}$, die als Null-Tour den Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ besitzt, muss der Positionsindex p^* in den beiden o.a. Formeln (89) und (90) jeweils den Wert $p^* = 0$ annehmen, weil bei einer solchen artifiziellen Null-Tour jede Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ den Wert $x_{e,q,p,n} = 0$ annimmt. Dies stimmt auch weiterhin mit der „Endogenisierung“ des Positionsindex p^* für das Tourende gemäß Formel (86) überein.

Allerdings bedeutet der Wert $p^* = 0$ für die Position des Tourendes in einer artifiziellen Null-Tour mit dem Tourvektor $(0, \dots, 0)$, dass in der jeweils zweiten Komponente der Konjugate in den beiden o.a. Formeln (89) und (90) der Summen-Term $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} \cdot dhp_{e,n}$ über einer „nullten“ Indexposition für $p^* = 0$ zu bilden ist. Eine solche „nullte“ Indexposition ist aber nicht wohldefiniert. Diese Komplikation lässt sich nur vermeiden, indem die Anwendung des Summen-Terms auf reale Touren beschränkt wird. Dies ist zwar leicht möglich, führt aber zurück zu einer Subjugat-Formel wie der, die oben als Formel (88) angeführt wurde. Zumindest haben die Verfasser keinen Ansatz gefunden, um die Formel (88) in eine „subjugatfreie“, äquivalente Darstellung zu überführen, welche die Komplikation einer „nullten“ Indexposition für artifizielle Touren vermeidet.

Daher scheint kein anderer Ausweg zu bestehen, als zumindest für den Fall der Zulässigkeit von nicht-geplanten, artifiziellen Touren die entsprechend erweiterte Depotrestriktion für das Tourende auf andere Weise zu formulieren, als bislang diskutiert wurde. Zu diesem Zweck wird auf eine etwas kompliziertere, weniger „natürlich“ anmutende *Ersatzkonstruktion* zurückgegriffen, die sich jedoch später bei der computergestützten Modellformulierung als vorteilhaft erweisen wird.

Ausgangspunkt der Ersatzkonstruktion ist die Idee, den „eigentlich“ gemeinten, *skalaren* Index p^* für die Position des Tourendes im Tourvektor $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ durch ein P -Tupel oder einen P -stelligen *Zeilenvektor* zu substituieren, der genau so viele Komponenten („Stellen“) wie der Tourvektor $TV_{e,q}$ der jeweils zugrunde liegenden Tour $T_{e,q}$ besitzt. Dieser Zeilenvektor wird aufgrund seiner Funktion, den Positionsindex p^* für das Ende einer Tour $T_{e,q}$ in komplikationsfreier, auch computergestützt implementierbarer Form zu erfassen, als *Tourendevektor* $TE_{e,q}$ bezeichnet. Zur Konstruktion des Tourendevektors werden folgende Toureigenschaften, die für das hier präsentierte Tourenplanungsmodell immer erfüllt sind, ausgenutzt:

- Falls die Position p^* des Tourendes *innerhalb* des Tourvektors $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ liegt, wenn also $p^* < P$ mit P als dem größten Positionsindex für die letzte Stelle des Tourvektors gilt, dann nimmt an jeder Position p des Tourvektors bis zum Erreichen der Position p^* des Tourendes genau eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ den Wert $x_{e,q,p,n} = 1$ an, sodass $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ für $p = 1, \dots, p^*$ gilt, während an jeder Position p des Tourvektors nach dem Erreichen der Position p^* des Tourendes alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ den Wert $x_{e,q,p,n} = 0$ annehmen, so dass $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 0$ für $p = p^*+1, \dots, P$ gilt. Daraus folgt für die Differenz der voranstehend angeführten Entscheidungsvariablen-Summen – also für $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}$ – an jeweils zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Positionen des Tourvektors einer Tour $T_{e,q}$: Bis zum Erreichen der Position p^* des Tourendes gilt für jeden Positionsindex p mit $p = 1, \dots, p^*-1$, dass die Differenzen aus den beiden unmittelbar aufeinanderfolgenden Werten $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ und $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} = 1$ jeweils „0“ betragen. An der Position p^* des Tourendes nimmt diese Differenz wegen $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*,n} = 1$ und $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p^*+1,n} = 0$ erstmals und einmalig den Wert „1“ an. Danach – also für $p = p^*+1, \dots, P$ – betragen die Differenzen aus den beiden unmittelbar aufein-

anderfolgenden Werten $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 0$ und $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} = 0$ wiederum jeweils „0“. Daher nimmt *nur* an der Position p^* des Tourendes die Differenz $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}$ den *charakteristischen* Wert „1“ an.

- Falls die Position p^* des Tourendes *am Ende* des Tourvektors einer Tour $T_{e,q}$ liegt, wenn also $p^* = P$ mit P als dem größten Positionsindex für die letzte Stelle des Tourvektors $TV_{e,q}$ gilt, dann nimmt an jeder Position p des Tourvektors bis zum Erreichen der Position p^* des Tourendes genau eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ den Wert $x_{e,q,p,n} = 1$ an, sodass $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ an jeder Position p des Tourvektors mit $p = 1, \dots, p^* = P$ gilt. Daraus folgt für die Differenz der Entscheidungsvariablen-Summen – also für $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}$ – an jeweils zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Positionen des Tourvektors einer Tour $T_{e,q}$: Bis zum Erreichen der Position p^* des Tourendes mit $p^* = P$ gilt für jeden Positionsindex p mit $p = 1, \dots, P-1$, dass die Differenzen aus den beiden unmittelbar aufeinanderfolgenden Werten $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ und $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} = 1$ jeweils „0“ betragen. Für die Position p^* des Tourendes mit $p^* = P$ ist der Differenzterm $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}$ nicht mehr definiert, weil im Tourvektor nach der letzten Stelle P , die wegen $p^* = P$ mit der Position des Tourendes zusammenfällt, keine weitere Position mehr folgt. Betrachtet man ausschließlich für diese letzte Stelle P des Tourvektors nicht mehr den vorgenannten Differenzterm $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}$, sondern den positionsspezifischen Term $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}$, so muss für diesen laut Voraussetzung $\sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} = 1$ gelten. Folglich gilt auch in diesem Fall mit $p^* = P$, dass *nur* an der Position p^* des Tourendes der *charakteristische* Wert „1“ angenommen wird.

Daher weist der Tourendevektor $TE_{e,q}$ für die beiden vorgenannten Fälle die wesentliche Eigenschaft auf, dass alle seine Komponenten „0“ betragen – bis auf die eine Ausnahme, dass an derjenigen Position p^* , an der sich im zugrunde liegenden Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ der Index für den Haltepunkt HP_n des Tourendes befindet, im Tourendevektor $TE_{e,q}$ eine „1“ befindet.

Formalsprachlich lassen sich die voranstehenden Überlegungen in die folgende *Definitionsrestriktion für den Tourendevektor* umsetzen:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad TE_{e,q} = (te_{e,q,p} \mid p = 1, \dots, P) \wedge \dots$$

$$\forall p = 1, \dots, P : \quad te_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} , & \text{für } p = 1, \dots, P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} , & \text{für } p = P \end{cases} \quad (91)$$

Beispielsweise gilt für die oben vorgestellte Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (3,7,5,3,0,0,0,0,0,0,0)$: Der Index p^* für die Position des Tourendes beträgt hier, wie schon zuvor erläutert wurde, $p^* = 4$. Die Komponenten $te_{e,q,p}$ des P -stelligen Tourendevektors $TE_{e,q}$ mit $P = 11$ lassen sich nach Maßgabe von Formel (91) wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
TE_{e,q} = & \left(\underbrace{1-1}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,2,n}}, \underbrace{1-1}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,2,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,3,n}}, \underbrace{1-1}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,3,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,4,n}}, \underbrace{1-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,4,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,5,n}}, \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,5,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,6,n}}, \right. \\
& \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,6,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,7,n}}, \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,7,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,8,n}}, \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,8,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,9,n}}, \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,9,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,10,n}}, \underbrace{0-0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,10,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,11,n}}, \\
& \left. \underbrace{0}_{\sum_{n=1}^N x_{e,q,11,n}} \right) \\
= & (0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
\end{aligned} \tag{92}$$

Mithilfe des Tourendevktors $TE_{e,q}$ und seinen Komponenten $te_{e,q,p}$ mit $p = 1, \dots, P$ ist es nun möglich, sowohl die „normale“ als auch die erweiterte Depotrestriktion für das Tourende so zu formulieren, dass auf den variablen, aber modellendogen bestimmten Index p^* für die Position des Tourendes im Tourvektor einer Tour $T_{e,q}$ nicht mehr zurückgegriffen werden muss. Stattdessen lässt sich die *modifizierte Depotrestriktion für das Tourende* ohne expliziten Bezug auf den Positionsindex p^* für das Tourende wie folgt formulieren:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N: \quad x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n} \tag{93}$$

Diese „trickreiche“ Restriktionskonstruktion wirkt auf folgende Weise:

- Wenn in einer *geplanten* und somit realen Tour $T_{e,q}$ im Tourvektor $TV_{e,q}$ die Position p^* des Tourendes *noch nicht erreicht* ist ($1 \leq p < p^*$) oder *bereits überschritten* wurde ($p^* < p \leq P$), dann gilt für alle Komponenten $te_{e,q,p}$ des Tourendevktors $TE_{e,q}$ mit $p = 1, \dots, p^*-1, p^*+1, \dots, P$: $te_{e,q,p} = 0$. In diesem Fall wird die Ungleichung $x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n}$ aus der o.a. Formel (93) der modifizierten Depotrestriktion für das Tourende wegen $x_{e,q,p,n} \geq 0 \cdot dhp_{e,n}$, also wegen $x_{e,q,p,n} \geq 0$, durch jeden zulässigen Wert der Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ mit $x_{e,q,p,n} \in \{0, 1\}$ erfüllt. Folglich wirkt sich die modifizierte Depotrestriktion für das Tourende auf alle Positionsindizes einer geplanten Tour, die mit dem Positionsindex p^* für das Tourende *nicht* zusammenfallen, in keiner Weise aus.
- Wenn in einer *geplanten* und somit realen Tour $T_{e,q}$ im Tourvektor $TV_{e,q}$ die Position p^* des Tourendes *exakt erreicht* ist ($p = p^*$), dann gilt per constructionem für die Komponente $te_{e,q,p}$ des Tourendevktors $TE_{e,q}$ mit $p = p^*$: $te_{e,q,p^*} = 1$. In diesem Fall wird die Ungleichung $x_{e,q,p^*,n} \geq te_{e,q,p^*} \cdot dhp_{e,n}$ aus der o.a. Formel (90) wegen $x_{e,q,p^*,n} \geq 1 \cdot dhp_{e,n}$ für denjenigen Haltepunkt HP_n , in dem sich das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befindet ($dhp_{e,n} = 1$), aufgrund der Beziehung $x_{e,q,p^*,n} \geq 1 \cdot 1$, also wegen $x_{e,q,p^*,n} \geq 1$, und aufgrund von $x_{e,q,p^*,n} \in \{0, 1\}$ lediglich durch den Wert $x_{e,q,p^*,n} = 1$ für die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p^*,n}$ erfüllt. Folglich bewirkt die modifizierte Depotrestriktion für das Tourende, dass im Tourvektor einer geplanten Tour $T_{e,q}$ an der Position p^* des *Tourendes* stets der Index „n“ desjenigen Haltepunkts HP_n stehen *muss*, in dem sich das *Depot* DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befindet.
- Wenn eine Tour $T_{e,q}$ *nicht geplant* ist und als artifizielle Null-Tour mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ dargestellt wird, dann gilt für *alle* Komponenten $te_{e,q,p}$ des Tourendevktors $TE_{e,q}$ mit $p = 1, \dots, P$: $te_{e,q,p} = 0$. In diesem Fall wird die Ungleichung $x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n}$ aus der o.a. Formel (93) wegen $x_{e,q,p,n} \geq 0 \cdot dhp_{e,n}$, also wegen $x_{e,q,p,n} \geq 0$, durch jeden zulässigen Wert

der Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ mit $x_{e,q,p,n} \in \{0,1\}$ und somit auch durch die Werte $x_{e,q,p,n} = 0$ erfüllt, die bei einer Null-Tour mit dem Tourvektor $(0, \dots, 0)$ vorliegen müssen. Folglich wirkt sich die modifizierte Depotrestriktion für das Tourende auf alle Positionsindizes einer nicht geplanten Tour nicht aus.

Es lässt sich festhalten, dass die modifizierte Depotrestriktion für das Tourende gemäß Formel (93) in Verbindung mit Formel (91) genau das leistet, was erforderlich ist: Im Fall einer geplanten, realen Tour $T_{e,q}$ wird sichergestellt, dass der jeweils betroffene Güterzug seine Tour nicht nur am Haltepunkt HP_n des Depots des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e beginnt, sondern dorthin auch am Tourende zurückkehrt. Im Fall einer nicht geplanten, artifiziellen Tour $T_{e,q}$ mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ führt die modifizierte Depotrestriktion für das Tourende – im Gegensatz zu der zunächst gewählten Konstruktion – zu keinen Komplikationen.

Aus den vorgenannten Gründen wird die Depotrestriktion für das Tourende im Folgenden so dargestellt und später auch so implementiert, wie es zuletzt anhand der modifizierten Depotrestriktion für das Tourende erläutert wurde.

e) Jede „sinnvolle“ reale Tour $T_{e,q}$ umfasst, wie schon früher erläutert wurde, mindestens drei Haltepunkte HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN. Daher wird für das Tourenplanungsmodell vorausgesetzt, dass eine Tour $T_{e,q}$ nur dann für die spätere Realisierung geplant wird, wenn ihr Tourvektor an mindestens drei Positionen ($p^* \geq 3$) Haltepunkte HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN enthält. Es muss sich dabei nicht um verschiedene Haltepunkte handeln. Beispielsweise fallen die Haltepunkte am Beginn ($p = 1$) und am Ende ($p = p^*$) des Tourvektors $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ immer mit dem einen Haltepunkt HP_n zusammen, in dem sich das Depot des jeweils betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befindet. Darüber hinaus können Subzyklen dazu führen, dass ein Haltepunkt HP_n während derselben Tour $T_{e,q}$ mehrfach angefahren wird.

Die Voraussetzung, dass eine Tour $T_{e,q}$ nur dann für die spätere Realisierung geplant wird, wenn ihr Tourvektor an mindestens drei Positionen Haltepunkte HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN enthält, lässt sich mithilfe der bereits eingeführten Realisierungsvariablen $real_{e,q}$ wie folgt ausdrücken (*implementierungsferne Realisierungsrestriktion*):¹⁾

- 1) Durch diese Restriktion allein werden alle Schein-Touren, die an nur höchstens zwei Positionen ihres Tourvektors Haltepunkte aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz ausweisen, keineswegs unzulässig. Stattdessen erzwingt diese Restriktion nur, dass solche Schein-Touren nicht für die spätere Realisierung geplant werden ($real_{e,q} = 0$). Denn aus der Kontraposition des Subjugs für die o.a. Restriktion folgt:

$$\begin{aligned} & \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : real_{e,q} = 1 \rightarrow \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \right) \\ \Leftrightarrow & \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \neg \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \right) \rightarrow \neg (real_{e,q} = 1) \quad // \quad real_{e,q} \in \{0,1\} \\ \Leftrightarrow & \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 2 \right) \rightarrow real_{e,q} = 0 \end{aligned}$$

Es reicht hier aus sicherzustellen, dass Schein-Touren, die an nur höchstens zwei Positionen ihres Tourvektors Haltepunkte aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz aufweisen, in einer Modelllösung niemals für die spätere Realisierung geplant werden. Die Gründe, welche die Realisierung solcher Schein-Touren als „sinnlos“ erscheinen lassen, wurden schon an früherer Stelle erläutert. Vgl. Kapitel 7.2.4.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \text{real}_{e,q} = 1 \rightarrow \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \right) \quad (94)$$

Allerdings können sich solche Subjugat-Formeln, wie bereits erwähnt, nur sehr schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementiert werden. Daher wird abermals ein „Kunstgriff“ angewendet, der die Menge zulässiger Modelllösungen nicht verändert, aber dennoch gestattet, die Realisierungsrestriktion „subjugatfrei“ zu formulieren (*implementierungsnaher Realisierungsrestriktion*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \cdot \text{real}_{e,q} \quad (95)$$

f) Jede reale Tour $T_{e,q}$ stellt im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN einen zusammenhängenden Weg dar (Zusammenhängigkeitsbedingung oder – synonym – Kontinuitätsbedingung). Dies bedeutet einerseits, dass die Haltepunkte HP_n zwischen dem Tourbeginn und dem Tourende eine lückenlose Folge bilden müssen, sodass die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für die Positionen p zwischen dem Tourbeginn ($p = 1$) und dem Tourende ($p = p^*$) jeweils den Wert 1 annehmen müssen, also niemals den Wert 0 annehmen dürfen. Andererseits müssen alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für die Positionen p nach dem Tourende ($p > p^*$) mit $p = p^*, \dots, P$ für den Fall, dass die betrachtete Tour $T_{e,q}$ nicht die maximale Anzahl P an Haltepunkten HP_n umfasst ($p^* < P$), jeweils den Wert 0 annehmen. Diese zweifache Anforderung wird durch die folgende *Kontinuitätsrestriktion* formal-sprachlich dargestellt:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1 : \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} \geq 0 \quad (96)$$

Die Kontinuitätsrestriktion stellt ein sehr leistungsfähiges Konstrukt dar, um Touren $T_{e,q}$ derart zu erzwingen, dass sie sich auf intuitive Weise als zulässig erweisen: *Einerseits* muss *zwischen* den Positionen für den Tourbeginn ($p = 1$) und für das Tourende ($p = p^*$) ein zusammenhängender Weg aus Haltepunkten im zugrunde liegenden Verkehrsnetz bestehen, der durch eine „lückenlose“ Kette von Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ mit den Werten $x_{e,q,p,n} = 1$ für $p = 1, \dots, p^*$ erzwungen wird.¹⁾ *Andererseits* wird *nach* dem Tourende ($p > p^*$) für den Fall $p^* < P$ durch eine „lückenlose“ Kette von Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ mit den Werten $x_{e,q,p,n} = 0$ für $p = p^*, \dots, P$ erzwungen, dass eine einmal beendete Tour – wenn also eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ erstmals den Wert 0 angenommen hat – niemals nach einer „Pause“ wiederaufgenommen werden kann (andernfalls wäre die Tour nicht zusammenhängend).²⁾

Die Erfüllung dieser zwei Anforderungen der Kontinuitätsrestriktion an zulässige Touren gemäß Formel (96) lässt sich durch folgende Fallunterscheidung verdeutlichen, bei der jeweils ein Toursegment betrachtet wird, das aus zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tourpositionen „ p “ und „ $p+1$ “ besteht:

-
- 1) Dies schließt als Sonderfall auch eine Tour $T_{e,q}$ ein, die erst an der letzten Tourposition P endet ($p^* = P$).
 - 2) Dies schließt als Sonderfall auch die Null-Tour mit $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ ein, die bereits „von Anfang an beendet“ ist, sodass die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ für die Null-Tour an allen ihren Positionen nur den Wert 0 aufweisen können.

- eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n} = 1$ und eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p+1,n} = 1$ für ein *zulässiges* Segment aus der Tour $T_{e,q}$ zwischen dem Tourbeginn und dem Tourende, d.h. mit $1 \leq p < p^*$: $\sum x_{e,q,p,n} - \sum x_{e,q,p+1,n} = 1-1 = 0 \geq 0$ (✓);
- eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n} = 1$ und alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p+1,n} = 0$ für ein *zulässiges* Segment aus der Tour $T_{e,q}$ am Tourende, d.h. mit $p = p^*$ und $p+1 > p^*$: $\sum x_{e,q,p,n} - \sum x_{e,q,p+1,n} = 1-0 = 1 \geq 0$ (✓);
- alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n} = 0$ und alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p+1,n} = 0$ für ein *zulässiges* Segment aus der Tour $T_{e,q}$ nach dem Tourende, d.h. mit $p^* < p < P$: $\sum x_{e,q,p,n} - \sum x_{e,q,p+1,n} = 0-0 = 0 \geq 0$ (✓);
- alle Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n} = 0$ und eine Entscheidungsvariable $x_{e,q,p+1,n} = 1$ für ein *unzulässiges* Segment aus der Tour $T_{e,q}$ mit $1 \leq p < P$: $\sum x_{e,q,p,n} - \sum x_{e,q,p+1,n} = 0-1 = -1 \not\geq 0$ (✓).

g) Die Indizes „i“ und „j“ von zwei Haltepunkten HP_i bzw. HP_j dürfen in zwei Positionen p und $p+1$ einer Tour $T_{e,q}$ nur dann unmittelbar aufeinanderfolgen ($x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 1$), wenn im Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ als Kante (HP_i, HP_j) mit $(HP_i, HP_j) \in KA$ und $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$ existiert, die den Haltepunkt HP_i mit dem Haltepunkt HP_j *direkt* verbindet und dabei vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j *gerichtet* ist. Diese (Verbindungs- und) Richtungsrestriktion lässt sich zunächst wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned} \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \\ (x_{e,q,p,i} = 1 \wedge x_{e,q,p+1,j} = 1) \rightarrow \dots \\ \left(\exists i \in \{1, \dots, N\} \quad \exists j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : s_{i,j} = (HP_i, HP_j) \wedge (HP_i, HP_j) \in KA \right) \end{aligned} \quad (97)$$

Diese vorläufige Richtungsrestriktion lässt sich mithilfe des Verknüpfungskoeffizienten $v_{i,j}$ aus der Verknüpfungsmatrix VM vereinfachen, für den $v_{i,j} = 1$ genau dann gilt, wenn $(HP_i, HP_j) \in KA$ zutrifft. Folglich kann die Formel (97) wesentlich kompakter, aber äquivalent formuliert werden:

$$\begin{aligned} \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \\ (x_{e,q,p,i} = 1 \wedge x_{e,q,p+1,j} = 1) \rightarrow v_{i,j} = 1 \end{aligned} \quad (98)$$

Ein solches Subjugat lässt sich, wie schon mehrfach erwähnt wurde, mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware nicht unmittelbar implementieren. Aber es kann wegen $v_{i,j} \in \{0,1\}$ durch die

nachfolgend angeführte, „subjugatfreie“ Konstruktion äquivalent ersetzt werden. Sie stellt die endgültige Formulierung der *Richtungsrestriktion* für das Tourenplanungsmodell dar:¹⁾

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \leq v_{i,j} \quad (99)$$

Die Wirkungsweise der voranstehenden Richtungsrestriktion lässt sich durch folgende Fallunterscheidung verdeutlichen:

- Wenn die Indizes „i“ und „j“ von zwei Haltepunkten HP_i bzw. HP_j in zwei Positionen p und $p+1$ des Tourvektors $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ unmittelbar aufeinanderfolgen ($x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 1$), dann nimmt der Produktterm $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}$ den Wert 1 an. In diesem Fall ist die o.a. Restriktion mit $1 \leq 1$ nur dann erfüllt, wenn im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt und deswegen $v_{i,j} = 1$ gilt.
- Wenn die Indizes „i“ und „j“ von zwei Haltepunkten HP_i bzw. HP_j nicht in zwei Positionen p und $p+1$ des Tourvektors $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ unmittelbar aufeinanderfolgen ($x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 0$, $x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 0$ oder $x_{e,q,p,i} = 0$ und $x_{e,q,p+1,j} = 0$), dann nimmt der Produktterm $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}$ den Wert 0 an. In diesem Fall ist die o.a. Restriktion mit $0 \leq 1$ oder $0 \leq 0$ immer erfüllt, und zwar unabhängig davon, ob im Verkehrsnetz VN eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j führt ($v_{i,j} = 1$) oder nicht ($v_{i,j} = 0$).

h) Würde dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung gefolgt, so müsste sichergestellt werden, dass in keiner zulässigen Tour *Subzyklen* enthalten sind. Die Prämisse der Subzyklenfreiheit wäre für das hier neuartig eingeführte Konstrukt der Touren erfüllt, wenn gilt: Zu jeder Tour $T_{e,q}$ gehört jeder Haltepunkt HP_n aus dem zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN – mit Ausnahme desjenigen Haltepunkts HP_m , in dem sich das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befindet ($DEP_e = HP_m$), – höchstens einmal:

1) Wenn man „spitzfindig“ sein möchte, lässt sich einwenden, dass die Richtungsrestriktion nur Folgendes sicherstellt: Im zugrunde liegenden Verkehrsnetz *existiert* eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit $s_{i,j} = (HP_i, HP_j)$, die von demjenigen Haltepunkt HP_i , der sich – vermittelt über seinen Index „i“ – an der Position p einer Tour $T_{e,q}$ befindet ($x_{e,q,p,i} = 1$), direkt zu demjenigen Haltepunkt HP_j führt, der sich – vermittelt über seinen Index „j“ – an der Position $p+1$ der Tour $T_{e,q}$ befindet ($x_{e,q,p+1,j} = 1$). Allerdings reicht diese *Existenz* einer Verbindungsstrecke $s_{i,j}$, die direkt vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j gerichtet ist, noch nicht dafür aus, dass die Tour $T_{e,q}$ einen gerichteten Weg im Verkehrsnetz VN darstellt. Denn zwischen zwei Haltepunkt HP_i und HP_j könnte ebenso eine entgegengesetzt gerichtete Gleisstrecke $s_{j,i}$ existieren. Die o.a. Restriktion allein würde nicht verhindern, dass zur *Konstruktion* einer Tour $T_{e,q}$ zur Fahrt vom Haltepunkt HP_i an der Position p zum Haltepunkt HP_j an der unmittelbar nachfolgenden Position $p+1$ die entgegengesetzt gerichtete Gleisstrecke $s_{j,i}$ verwendet wird. Daher muss die Verwendung der entgegengesetzt gerichteten Gleisstrecke $s_{j,i}$ durch die nachfolgende *Konstruktionsregel* für die Synthese einer Tour $T_{e,q}$ aus Haltepunkten und Gleisstrecken ausgeschlossen werden: Wenn zwei Haltepunkte HP_i und HP_j – vermittelt über ihre Indizes „i“ bzw. „j“ – in zwei Positionen p und $p+1$ einer Tour $T_{e,q}$ unmittelbar aufeinanderfolgen ($x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 1$), dann werden diese beiden Haltepunkte HP_i und HP_j aufgrund der gesicherten Existenz der Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j gerichtet ist, in der Tour $T_{e,q}$ stets durch diese Gleisstrecke $s_{i,j}$ miteinander verknüpft. Aus dem unmittelbaren „Aufeinanderfolgen“ der beiden Haltepunkte HP_i und HP_j gemäß der Anordnung ihrer Indizes „i“ bzw. „j“ im Tourvektor einer Tour $T_{e,q}$ wird also mittels der o.a. Konstruktionsregel für Touren darauf geschlossen, dass bei der Planung und bei der Durchführung der Tour $T_{e,q}$ ein Güterzug auf der „richtig gerichteten“ Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i direkt zum Haltepunkt HP_j fährt. Diese Konstruktionsregel wird für das gesamte hier präsentierte Tourenplanungsmodell vorausgesetzt und nur hier in exemplarischer Weise erläutert.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall n \in \{1, \dots, N\} \setminus \{m\}: \sum_{p=1}^P x_{e,q,p,n} \leq 1 \quad (100)$$

Im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell lässt sich daher die Prämisse der Subzyklenfreiheit wesentlich kompakter und auch einfacher darstellen, als es früher im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung möglich war.¹⁾ Dies spricht nochmals für die „Natürlichkeit“ der Modellierung von Tourenplanungsproblemen, die in diesem Tourenplanungsmodell mithilfe des zentralen Konstrukts der Touren $T_{e,q}$ mit Tourvektoren $TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}, \dots, hpi_{e,q,p})$ erzielt wird.

Allerdings wurde schon früher darauf hingewiesen, dass aus der Perspektive des hier betrachteten Realproblems, die Touren von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS in der Art eines virtuellen Unternehmens miteinander kooperieren, so miteinander zu koordinieren („intelligent“ zu bündeln), dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen, die Prämisse der Subzyklenfreiheit vermieden werden sollte. Stattdessen können zulässige, unter Umständen sogar optimale Lösungen für dieses Realproblem dazu führen, dass ein Haltepunkt HP_n des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes auch dann von einem Eisenbahnverkehrsunternehmen mehrfach angefahren wird, wenn es sich nicht um den Haltepunkt seines Depots handelt. Dieser Sachverhalt wurde früher als Defekt der Subzyklenfreiheit ausführlicher erläutert.²⁾

Aus den vorgenannten Gründen wird die o.a. Formel (100) für die Vermeidung von Subzyklen in Touren ausdrücklich *nicht* als *Restriktion* in das Tourenplanungsmodell aufgenommen. Sie wurde hier nur angeführt, um zu verdeutlichen, wie sich die Bedingung der Subzyklenfreiheit in das Tourenplanungsmodell aufnehmen ließe, wenn dies im Interesse der Anschlussfähigkeit an das Standardmodell der konventionellen Tourenplanung gefordert würde. Eine solche Forderung wäre jedoch nach Einschätzung der Verfasser im Hinblick auf das hier interessierende Realproblem nicht realitätsadäquat.

i) Im Tourenplanungsmodell werden zwei *Lokomotivarten* berücksichtigt: einerseits Diesel- und andererseits Elektro-Lokomotiven. Für den „artgerechten“ Einsatz von Diesel- und Elektro-Lokomotiven ist der *Elektrifizierungsstatus* der Gleisstrecken entscheidend, die während einer Tour $T_{e,q}$ befahren werden:

- Für eine Tour $T_{e,q}$ wird eine Lokomotive mit Dieselantrieb genau dann benötigt, wenn nicht alle Gleisstrecken $s_{i,j}$, die Haltepunkte HP_i und HP_j aus der Tour $T_{e,q}$ direkt miteinander verbinden, vollständig elektrifiziert sind.
- Falls alle Gleisstrecken $s_{i,j}$, die Haltepunkte HP_i und HP_j aus einer Tour $T_{e,q}$ direkt miteinander verbinden, vollständig elektrifiziert sind, kommen für diese Tour $T_{e,q}$ sowohl Lokomotiven mit Diesel- als auch Lokomotiven mit Elektro-Antrieb in Betracht.

Daher besteht eine wesentliche Realitätsannäherung von Modellen für Tourenplanungsprobleme von Eisenbahnverkehrsunternehmen darin, die Elektrifizierungsstatus der Gleisstrecken eines Verkehrsnetzes explizit zu erfassen. Dies ist mit dem hier präsentierten Tourenplanungsmodell geschehen. Allerdings stellt es keineswegs eine triviale Aufgabe dar, die oben natürlichsprachlich beschriebenen Anforderungen an einen realistischen Einsatz der beiden Lokomotivarten in realitäts-

1) Vgl. die Formel (14) im Kapitel 6.2.1.1 und die Formel (23) im Kapitel 6.2.1.2.2.

2) Vgl. Kapitel 6.2.3, Abschnitt b).

adäquate formalsprachliche Konstrukte umzusetzen. Zur Aufgabenerfüllung bedarf es einiger Hilfskonstrukte und entsprechender Erläuterungen.

Um den Elektrifizierungsstatus einer Tour $T_{e,q}$ zu erfassen, wird zunächst als Hilfskonstrukt die Anzahl $\text{anz}_{\text{nel.e.q}}$ der Gleisstrecken $s_{i,j}$ eingeführt, die zu einer Tour $T_{e,q}$ gehören und nicht vollständig elektrifiziert sind. Diese Gleisstreckenanzahl lässt sich als eine modellendogene „Schlupfvariable“ ermitteln. Dabei wird das Wissen genutzt, dass eine Tour $T_{e,q}$, zu der insgesamt p^* Positionen mit Haltepunkten HP_n gehören, p^*-1 Gleisstrecken zwischen diesen Haltepunkten aufweisen muss. Für die Anzahl dieser p^*-1 Gleisstrecken gilt mithilfe der o.a. Formel (86) für die Position p^* des Tourrendes einer Tour $T_{e,q}$ im zugehörigen Tourvektor $TV_{e,q}$:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad p^* - 1 = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - 1 \quad (101)$$

Eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j , die sich in einer Tour $T_{e,q}$ an den Positionen p bzw. $p+1$ befinden, existiert genau dann, wenn die Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,i}$ bzw. $x_{e,q,p+1,j}$ jeweils den Wert 1 annehmen, sodass auch ihr Produkt $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}$ den Wert 1 aufweist. Falls diese Gleisstrecke $s_{i,j}$ vollständig elektrifiziert ist, also für ihren Elektrifizierungsstatus $se_{i,j} = 1$ gilt, muss auch das erweiterte Produkt $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j}$ den Wert 1 annehmen. Andernfalls, wenn die Gleisstrecke $s_{i,j}$ nicht vollständig elektrifiziert ist ($se_{i,j} = 0$), nimmt das erweiterte Produkt $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j}$ den Wert 0 an. Folglich gilt für die Anzahl $\text{anz}_{\text{nel.e.q}}$ der Gleisstrecken $s_{i,j}$, die zu einer Tour $T_{e,q}$ gehören und nicht vollständig elektrifiziert sind (*Restriktion für die Anzahl nicht vollständig elektrifizierter Gleisstrecken*):

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad \text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \right) - 1 - \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j} \right) \quad (102)$$

mit:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad \text{anz}_{\text{nel.e.q}} \in \mathbb{N}_0 \quad (103)$$

Aufgrund dieser Festlegungen nimmt die Anzahl $\text{anz}_{\text{nel.e.q}}$ der nicht vollständig elektrifizierten Gleisstrecken einer Tour $T_{e,q}$ den Wert $\text{anz}_{\text{nel.e.q}} = 0$ genau dann an, wenn die Tour $T_{e,q}$ vollständig elektrifiziert ist. Andernfalls, wenn eine Tour $T_{e,q}$ nicht vollständig elektrifiziert ist, nimmt diese Gleisstreckenanzahl einen Wert $\text{anz}_{\text{nel.e.q}}$ mit $1 \leq \text{anz}_{\text{nel.e.q}} \leq p^*-1$ an. Dies trifft streng genommen jedoch nur auf reale Touren zu. Im Fall einer artifiziellen Tour, also einer Null-Tour mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$, gilt hingegen wegen $x_{e,q,p,n} = 0$ für alle Entscheidungsvariablen:

$$\text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N 0 \right) - 1 - \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 0 \cdot 0 \cdot se_{i,j} \right) = -1 \quad (104)$$

Folglich gilt für die Anzahl $\text{anz}_{\text{nel.e.q}}$ der nicht vollständig elektrifizierten Gleisstrecken einer Tour $T_{e,q}$ allgemein:

$$\text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \begin{cases} k \text{ mit } k \in \mathbb{N}_+, & \text{wenn die reale Tour } T_{e,q} \text{ nicht vollständig elektrifiziert ist} \\ 0, & \text{wenn die reale Tour } T_{e,q} \text{ vollständig elektrifiziert ist} \\ -1, & \text{wenn es sich um eine artifizielle Tour } T_{e,q} \text{ handelt} \end{cases} \quad (105)$$

Für die Entscheidung, ob auf einer Tour $T_{e,q}$ wegen fehlender vollständiger Elektrifizierung Diesel-Lokomotiven eingesetzt werden müssen, interessiert aber *nicht* direkt die *Anzahl* $anz_{nel.e,q}$ der nicht vollständig elektrifizierten Gleisstrecken, die auf der Tour $T_{e,q}$ zu befahren sind. Vielmehr ist nur der *qualitative* Sachverhalt ausschlaggebend, *ob* die betrachtete Tour $T_{e,q}$ entweder vollständig elektrifiziert ist oder nicht. Zur Erfassung dieses Sachverhalts wird die Binärvariable $vel_{e,q}$ eingeführt. Es handelt sich um eine modellendogene Variable, die den Elektrifizierungsstatus einer realen Tour $T_{e,q}$ wie folgt anzeigt:

$$vel_{e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn die reale Tour } T_{e,q} \text{ vollständig elektrifiziert ist} \\ 0, & \text{wenn die reale Tour } T_{e,q} \text{ nicht vollständig elektrifiziert ist} \end{cases} \quad (106)$$

Mithilfe der bereits eingeführten Anzahl $anz_{nel.e,q}$ der nicht vollständig elektrifizierten Gleisstrecken einer Tour $T_{e,q}$ gilt für die Binärvariable $vel_{e,q}$ für den Elektrifizierungsstatus einer realen Tour $T_{e,q}$ (*Restriktion für den Elektrifizierungsstatus*):

$$\forall e=1,\dots,E \quad \forall q=1,\dots,Q_e : \left(anz_{nel.e,q} \geq 1 \rightarrow vel_{e,q} = 0 \right) \wedge \left(anz_{nel.e,q} = 0 \rightarrow vel_{e,q} = 1 \right) \quad (107)$$

Da sich eine solche Subjugat-Formel, wie schon mehrfach erwähnt wurde, nur sehr schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementieren lässt, wird sie mittels eines „Kunstgriffs“ in eine äquivalente, aber „subjugatfreie“ Darstellungsweise transformiert (*modifizierte Restriktion für den Elektrifizierungsstatus*):

$$\forall e=1,\dots,E \quad \forall q=1,\dots,Q_e : \quad vel_{e,q} \in \{0,1\} \quad \wedge \quad \dots \quad (108)$$

$$\underbrace{\left(1 - vel_{e,q} \leq anz_{nel.e,q} \right)}_{\text{erste Teilbedingung}} \quad \wedge \quad \underbrace{\left(1 - vel_{e,q} \geq \frac{anz_{nel.e,q}}{P} \right)}_{\text{zweite Teilbedingung}}$$

Einerseits stellt die erste Teilbedingung für den Fall $anz_{nel.e,q} = 0$ sicher, dass der Wert 0 für die Binärvariable $vel_{e,q}$ verboten ist ($1-0 \not\leq 0$), so dass in diesem Fall wegen $vel_{e,q} \in \{0,1\}$ gelten muss: $vel_{e,q} = 1$. Die zweite Teilbedingung gestattet dagegen für den Fall $anz_{nel.e,q} = 0$ wegen $P \geq 1$, dass die Binärvariable $vel_{e,q}$ jeden Wert aus ihrem Definitionsbereich $\{0,1\}$ annehmen kann. Andererseits verbietet die zweite Teilbedingung für den Fall $anz_{nel.e,q} \geq 1$ den Wert 1 für die Binärvariable $vel_{e,q}$ ($1-1 \not\geq 1/P$ für $P \geq 1$), sodass wegen $vel_{e,q} \in \{0,1\}$ gelten muss: $vel_{e,q} = 0$. Dagegen gestattet die erste Teilbedingung für den Fall $anz_{nel.e,q} \geq 1$, dass die Binärvariable $vel_{e,q}$ jeden Wert aus ihrem Definitionsbereich $\{0,1\}$ annehmen kann. Durch die konjunktive Verknüpfung der beiden Teilbedingungen wird erreicht, dass für $anz_{nel.e,q} = 0$ notwendig $vel_{e,q} = 1$ und für $anz_{nel.e,q} \geq 1$ notwendig $vel_{e,q} = 0$ gilt; q.e.d.

Zur Ermittlung der Werte für die Binärvariable $vel_{e,q}$, die den Elektrifizierungsstatus einer realen Tour $T_{e,q}$ anzeigt, kann später in der computergestützten Modellformulierung die „subjugatfreie“, aber etwas kompliziert anmutende Darstellungsweise der Formel (108) durch ein anderes Konstrukt ersetzt werden. Dafür bietet sich in der mathematischen Modellierungssoftware LINGO die @IF-Funktion an, die bereits mehrfach angesprochen wurde. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Binärvariable $vel_{e,q}$ für den Elektrifizierungsstatus einer realen Tour $T_{e,q}$ wie folgt spezifizieren:

$$\text{vel}_{e,q} = @\text{IF} \left(\underbrace{\text{anz}_{\text{nel.e.q}} \# \text{EQ} \# 0}_{\text{logische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (109)$$

Die Kompatibilität der Lokomotivart mit den Elektrifizierungsstadien der Gleisstrecken, die von einem Güterzug entlang seiner Tour $T_{e,q}$ befahren werden, lässt sich nun mithilfe der Konstruktionen, die zuvor erläutert wurden, formalsprachlich spezifizieren. Dabei wird auf die lokomotivenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ zurückgegriffen, die im Kapitel 7.2.5 eingeführt wurden, um anzuzeigen, ob eine Diesel-Lokomotive des Typs $LT_{\text{die.a}}$ einer Tour $T_{e,q}$ zugeordnet ist ($y_{\text{die.a.e.q}} = 1$) oder nicht ($y_{\text{die.a.e.q}} = 0$). Auf dieser Grundlage lässt sich die Restriktion, dass für eine reale Tour $T_{e,q}$ eine Diesel-Lokomotive eingesetzt werden muss, wenn nicht alle Gleisstrecken $s_{i,j}$, die Haltepunkte HP_i und HP_j aus der Tour $T_{e,q}$ miteinander verbinden, vollständig elektrifiziert sind, durch die nachfolgende *Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten* ausdrücken:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \geq 1 - \text{vel}_{e,q} \quad (110)$$

Wenn die Gleisstrecken einer realen Tour $T_{e,q}$ nicht vollständig elektrifiziert sind ($\text{vel}_{e,q} = 0$), nimmt die rechte Seite der Ungleichung aus Formel (110) den Wert 1 an, sodass auf der Tour $T_{e,q}$ eine Diesel-Lokomotive eingesetzt werden muss. Andernfalls, wenn die Gleisstrecken einer realen Tour $T_{e,q}$ vollständig elektrifiziert sind ($\text{vel}_{e,q} = 1$), nimmt die rechte Seite der Ungleichung aus Formel (110) den Wert 0 an. In diesem Fall verfügt das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e wegen der Formulierung der Formel (110) als schwache Ungleichung („ \geq “) über den Freiheitsgrad zu entscheiden, ob es lieber entweder eine Diesel- oder aber eine Elektro-Lokomotive einsetzen möchte (sofern es über Exemplare der beiden Lokomotivarten verfügt).

Wenn die Option zugelassen werden soll, dass auch artifizielle Touren $T_{e,q}$ (Null-Touren) möglich sind, ist die o.a. Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten auf reale Touren einzuschränken. Dies sind genau diejenigen Touren, für welche die Realisierungsvariable $\text{real}_{e,q}$ den Wert $\text{real}_{e,q} = 1$ annimmt. Folglich gilt bei Berücksichtigung der Zulässigkeit von artifiziellen Touren als entsprechend *erweiterte Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten*:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \geq (1 - \text{vel}_{e,q}) \cdot \text{real}_{e,q} \quad (111)$$

Nachdem zuvor die Tourrestriktionen vorgestellt wurden, die zur Definition der Zulässigkeit von Touren dienen, werden im Folgenden *weitere Restriktionen* eingeführt. Sie erstrecken sich auf andere Anforderungen, die ebenso aus dem zugrunde liegenden Realproblem der Tourenplanung resultieren. Im Gegensatz zu den qualitativen Aspekten, die aus einer topologischen Perspektive zu beachten waren, um zulässige Touren zu definieren, stehen jetzt *quantitative* Aspekte im Vordergrund. Sie eröffnen eine spezielle *metrische* Perspektive auf Anforderungen, die von einem zulässigen Tourenplan erfüllt werden müssen.

j) Die *Tourlänge* $TL_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ stellt eine typische quantitative Toureigenschaft dar.¹⁾ Sie wird insbesondere benötigt, um später für die Ermittlung optimaler Touren die Minimierung der Tourengesamtlänge als ein mögliches (Formal-) Ziel spezifizieren zu können. Die Tourlänge ist die Summe der Längen aller Gleisstrecken, die vom Güterzug eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e befahren werden müssen, um im zugrunde liegenden Verkehrsnetz vom Haltepunkt des Tourbeginns zum Haltepunkt des Tourendes zu gelangen. Eine Gleisstrecke $s_{i,j}$ mit der Streckenlänge $sl_{i,j}$ ($sl_{i,j} > 0$) geht in die Ermittlung der Weglänge $wl_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ unter Beachtung der o.a. Konstruktionsregel für die Synthese einer Tour $T_{e,q}$ genau dann ein, wenn in der Tour $T_{e,q}$ die Haltepunkte HP_i und HP_j an den zwei Positionen p und $p+1$ im Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ unmittelbar aufeinanderfolgen. In diesem Fall trifft für die Entscheidungsvariablen, die zu den beiden Tourpositionen gehören, $x_{e,q,p,i} = 1$ und $x_{e,q,p+1,j} = 1$ zu. Folglich gilt für das Produkt der beiden Entscheidungsvariablen: $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} = 1$. Daher nimmt das Produkt $(x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j}$ den Wert $1 \cdot sl_{i,j} = sl_{i,j}$ an. In allen anderen Fällen, in denen die Haltepunkte HP_i und HP_j an den zwei Positionen p und $p+1$ im Tourvektor der Tour $T_{e,q}$ nicht unmittelbar aufeinanderfolgen, gilt wegen $x_{e,q,p,i} = 0$ oder $x_{e,q,p+1,j} = 0$ stets $x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} = 0$. Daher nimmt in jenen Fällen das Produkt $(x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j}$ den Wert $0 \cdot sl_{i,j} = 0$ an. Aufgrund der voranstehenden Überlegungen gilt für die Länge $TL_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ folgende *Definitionsrestriktion für die Tourlänge*:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad TL_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \quad (112)$$

k) Im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen realen und artifiziellen Touren kann gefordert werden.²⁾ Eine reale Tour erstreckt sich entweder auf einen Güterzug, der von mindestens³⁾ einer Lokomotive gezogen wird und mindestens einen Güterwagen umfasst, oder es handelt sich um eine

-
- 1) Vordergründig handelt es sich bei der Tourlänge $TL_{e,q}$ um keine Restriktion, die den Spielraum eines Entscheidungsträgers einschränkt, sondern – wie oben expressis verbis festgestellt – um eine Eigenschaft von Touren. Trotzdem werden solche Toureigenschaften (und ähnliche Aspekte des Realproblems) hier mit guten Gründen unter die Kategorie der Restriktionen subsumiert. Hierfür spricht vor allem aus formalsprachlicher Sicht, dass Toureigenschaften über Definitionsgleichungen eingeführt werden und Gleichungen („=“) nichts anderes als die konjunktive Verknüpfung von zwei entgegengesetzt gerichteten Ungleichungen („≤“ und „≥“) darstellen. Bei Ungleichungen handelt es sich um *das* typische formalsprachliche Ausdrucksmittel zur Formulierung von Restriktionen, weil sie den Spielraum derjenigen Werte einschränken, die von den spielraumeröffnenden Entscheidungsvariablen angenommen werden können, ohne eine Restriktion zu verletzen. Hinzu kommt, dass Definitionen von Toureigenschaften auch aus inhaltlicher Perspektive einen restriktiven Charakter besitzen: Wenn ein Entscheidungsträger beispielsweise das Ziel verfolgt, die Tourengesamtlänge zu minimieren, so kann er sich den Maßstab zur Messung der Zielerreichung nicht mehr „nach eigenem Gutdünken zurechtbiegen“. Stattdessen wird er durch die Existenz einer Definitionsgleichung – und die implizite Handlungsnorm, solche Definitionsgleichungen bei der Messung der Zielerreichung auch anzuwenden, – auf eine bestimmte Art der Zielerreichungsmessung eingeschränkt.
 - 2) Die nachfolgend angeführten Restriktionen sind vermutlich redundant, d.h., sie würden aufgrund der Gesamtheit der übrigen Restriktionen des Tourenplanungsmodells auch dann erfüllt, wenn sie aus der Modellformulierung eliminiert würden. Diese Vermutung lässt sich jedoch erst dann überprüfen, wenn das Tourenplanungsmodell einmal mit den nachfolgend angeführten Restriktionen und ein zweites Mal ohne sie aufgestellt wird und alsdann die Mengen der zulässigen Modelllösungen für beide Modellvarianten miteinander verglichen werden. Darauf wird im hier vorgelegten Projektbericht verzichtet. Daher werden die nachfolgend angeführten Restriktionen für den – hier nicht analysierten – Fall „auf Verdacht“ spezifiziert, dass sie sich unter Umständen doch nicht als redundant erweisen.
 - 3) Das Tourenplanungsmodell ist so flexibel ausgelegt, dass es auch Güterzüge zu erfassen gestattet, die jeweils von mehreren Lokomotiven unterschiedlichen Typs („Lokomotiv-Ensembles“) gezogen werden, um die Traktionskapazität zu erhöhen.

Lokzug-Fahrt, bei der mindestens eine Lokomotive ohne Güterwagen verkehrt. Dagegen nehmen an einer artifiziiellen Tour weder Lokomotiven noch Güterwagen teil. Mithilfe der bereits eingeführten Realisierungsvariable $real_{e,q}$, die zwischen realen ($real_{e,q} = 1$) und artifiziiellen ($real_{e,q} = 0$) Touren $T_{e,q}$ zu unterscheiden gestattet, lassen sich die vorgenannten Anforderungen als folgende *tourbezogene Equipmentrestriktionen* ausdrücken:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad (113)$$

$$real_{e,q} = 1 \rightarrow \left(\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} + \sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \geq 1 \right) \wedge \left(\sum_{c=1}^C y_{sta.c.e,q} + \sum_{d=1}^D y_{gef.d.e,q} \geq 0 \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad (114)$$

$$real_{e,q} = 0 \rightarrow \left(\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} + \sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} = 0 \right) \wedge \left(\sum_{c=1}^C y_{sta.c.e,q} + \sum_{d=1}^D y_{gef.d.e,q} = 0 \right)$$

Da sich eine solche Subjunkt-Formel, wie schon mehrfach erwähnt wurde, nur sehr schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementieren lässt, wird sie mittels eines „Kunstgriffs“ in eine äquivalente, aber „subjunktfreie“ Darstellungsweise transformiert. Mithilfe einer „sehr großen“ Konstante K gilt für die *modifizierte tourbezogene Equipmentrestriktion*:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad (115)$$

$$\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} + \sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \leq K \cdot real_{e,q} \quad \wedge \quad \sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} + \sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \geq real_{e,q}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad \sum_{c=1}^C y_{sta.c.e,q} + \sum_{d=1}^D y_{gef.d.e,q} \leq K \cdot real_{e,q} \quad (116)$$

Eine Gruppe von *Ladungsrestriktionen* stellt einerseits sicher, dass die Güterwagen auf der Tour $T_{e,q}$ eines Güterzugs entsprechend den Transportnachfragen, die von Kunden in den Haltepunkten der Tour $T_{e,q}$ artikuliert werden, um entsprechende Gütermengen korrekt be- und entladen werden. Andererseits dienen die Ladungsrestriktionen auch dazu, für jeden Güterwagen dessen aktuelles Ladungsgewicht zu ermitteln¹⁾ und dafür zu sorgen, dass hiervon die Ladungskapazität des Güterwagens nicht überschritten wird.

1) Das *aktuelle Ladungsgewicht* eines Standard-Güterwagens vom Typ $GT_{sta.c}$ oder eines Gefahrgut-Güterwagens vom Typ $GT_{gef.d}$ wird an jeder Position p einer Tour $T_{e,q}$ durch die modellendogenen Variablen $lg_{sta.c.e,q,p}$ bzw. $lg_{gef.d.e,q,p}$ erfasst. Für den Tourbeginn ($p = 1$) wird davon ausgegangen, dass die Güterwagen unbeladen starten. Folglich müssen als *Ladungsgewichtsrestriktionen für den Tourbeginn* gelten:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c \in \{1, \dots, C\} : \quad lg_{sta.c.e,q,1} = 0 \quad (117)$$

1) Hinsichtlich dieser Ermittlungsfunktion stellen die Ladungsrestriktionen eine Variante der Definitionsrestriktionen dar, auf die später näher eingegangen wird.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d \in \{1, \dots, D\} : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.l}} = 0 \quad (118)$$

Wenn der Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, an der Tourposition p wegen $x_{e,q,p,j} = 1$ den Haltepunkt HP_j anfährt,¹⁾ kann das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e , das den Güterzug auf der Tour $T_{e,q}$ einsetzt, grundsätzlich *frei* darüber *entscheiden*, ob es die Transportnachfrage im Haltepunkt HP_j erfüllt – oder ob es den Haltepunkt HP_j ohne Erfüllung der Transportnachfrage passiert.²⁾ Für diesen *Freiheitsgrad*, der im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung nicht existiert, wurden im Kapitel 7.2.5 die neuartigen, beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z_{\text{sta.c.j.e.q.p}}$ und $z_{\text{gef.d.j.e.q.p}}$ eingeführt. Sie drücken die *Zuordnungsentscheidung* aus, einer Tour $T_{e,q}$ die Transportnachfrage, die in einem Haltepunkt HP_j an der Position p der Tour vorliegt, entweder zuzuordnen oder aber darauf zu verzichten.³⁾ Diese *beladungsbezogenen* Entscheidungsvariablen $z_{\text{sta.c.j.e.q.p}}$ und $z_{\text{gef.d.j.e.q.p}}$ zeigen an, *ob* der Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, im Haltepunkt HP_j an der Position p mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ für Transporte von Standardgütern bzw. mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$ für Transporte von Gefahrgütern *beladen* wird. Wenn die Zuordnungsentscheidung positiv ausfällt, also die Beladung des Güterzugs mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$ an der Position p der Tour $T_{e,q}$ erfolgt ($z_{\text{sta.c.j.e.q.p}} = 1$ bzw. $z_{\text{gef.d.j.e.q.p}} = 1$), muss das aktuelle Ladungsgewicht $\lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ bzw. $\lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ der betroffenen Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ um die jeweils aufgeladene Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}}$ erhöht werden. Andernfalls, wenn die Zuordnungsentscheidung negativ ausfällt, wenn also die Beladung des Güterzugs mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ oder $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$ an der Position p der Tour $T_{e,q}$ unterbleibt ($z_{\text{sta.c.j.e.q.p}} = 0$ bzw. $z_{\text{gef.d.j.e.q.p}} = 0$), bleibt das aktuelle Ladungsgewicht $\lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ bzw. $\lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ der betroffenen Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ unverändert. Dann erfolgt also im Haltepunkt HP_j an der Position p der Tour $T_{e,q}$ eine „Durchfahrt“ ohne Beladung der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$. Auf diese Weise wird es mithilfe der beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z_{\text{sta.c.j.e.q.p}}$ und $z_{\text{gef.d.j.e.q.p}}$ möglich zu erfassen, dass *derselbe* Güterzug auf *derselben* Tour $T_{e,q}$ aufgrund von Subzyklen einen Haltepunkt HP_j *mehrfach* anfährt und dabei nur genau einmal mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$ beladen wird, während er bei den übrigen Anfahrten des Haltepunkts HP_j mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.j}}$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.j}}$ nicht beladen wird.

-
- 1) Die Tourposition p für den Haltepunkt HP_j ist durch die Gleichung $j \cdot x_{e,q,p,j} = j$ festgelegt, weil die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,j}$ nur für eine Position p der Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_j den Wert $x_{e,q,p,j} = 1$ annimmt und dadurch die Gleichung $j \cdot 1 = j$ erfüllt.
 - 2) Für die Beladung eines Güterzugs wurde bislang ein Haltepunkt HP_i mit dem Index „i“ betrachtet, während die Gütermengen, mit denen der Güterzug dort beladen wurde, an einem korrespondierenden Haltepunkt HP_j mit dem Index „j“ entladen wurden. Von dieser Konvention für die Indizes „i“ und „j“ der Start- bzw. Ziel-Haltepunkte wird im Folgenden abgewichen, um die Notation der Formeln (119) und (120) vorzubereiten. Wie aus diesen beiden Formeln ersichtlich sein wird, ist es im aktuellen Argumentationskontext vorteilhaft, den Start-Haltepunkt, in dem ein Güterzug mit einer Gütermenge beladen wird, als Haltepunkt HP_j mit dem Index „j“ zu bezeichnen, während der Ziel-Haltepunkt, in dem eine Gütermenge entladen wird, als Haltepunkt HP_i mit dem Index „i“ bezeichnet wird.
 - 3) Der Verzichtsfall bedeutet nur, dass die Transportnachfrage, die im Haltepunkt HP_j vorliegt, von dem betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e an der Position p der Tour $T_{e,q}$ nicht erfüllt wird. Dies schließt aber nicht aus, dass das Eisenbahnverkehrsunternehmen mit seinem Güterzug auf *derselben* Tour $T_{e,q}$, jedoch an einer *anderen* Tourposition p' mit $p' \neq p$ *denselben* Haltepunkt HP_j *nochmals* anfährt und dabei die Transportnachfrage im Haltepunkt HP_j erfüllt. Dies wird allerdings erst dadurch möglich, dass – im Gegensatz zum Standardmodell der konventionellen Tourenplanung – *Subzyklen* zugelassen werden, sodass derselbe Haltepunkt HP_j auf einer Tour $T_{e,q}$ auch dann *mehrfach* angefahren werden kann, wenn es sich nicht um das Depot des jeweils betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens handelt.

Darüber hinaus *kann* das aktuelle Ladungsgewicht $lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ oder $lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ der Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ in demjenigen Haltepunkt HP_j , der sich an der Position p der Tour $T_{e,q}$ befindet, auch reduziert werden. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Güterzug im Haltepunkt HP_i an einer *früheren* Position m auf seiner Tour $T_{e,q}$ mit $m < p$ und $x_{e,q,m,i} = 1$ mit einer Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}}$ für Transporte von Standardgütern oder mit einer Gütermenge $gmb_{\text{gef.d.i}}$ für Transporte von Gefahrgütern beladen wurde, die jetzt nach dem Eintreffen im Haltepunkt HP_j zu *entladen* ist. Diese Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j zu transportieren und am Haltepunkt HP_j zu entladen ist, wird mit $gme_{\text{sta.c.i,j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i,j}}$ bezeichnet. Wiederum kann das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e , das den Güterzug auf der Tour $T_{e,q}$ einsetzt, grundsätzlich *frei* darüber *entscheiden*, ob es die Gütermengen $gme_{\text{sta.c.i,j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i,j}}$ an der Position p der Tour $T_{e,q}$ entlädt oder nicht.¹⁾ Für diesen *Freiheitsgrad*, der im Standardmodell der konventionellen Tourenplanung abermals nicht existiert, wurden im Kapitel 7.2.5 die ebenso neuartigen, dieses Mal jedoch entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i,j,e,q,p}}$ und $ze_{\text{gef.d.i,j,e,q,p}}$ eingeführt. Diese *entladungsbezogenen* Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i,j,e,q,p}}$ und $ze_{\text{gef.d.i,j,e,q,p}}$ zeigen an, ob der Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, im Haltepunkt HP_j an der Position p von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i,j}}$ für Transporte von Standardgütern bzw. $gme_{\text{gef.d.i,j}}$ für Transporte von Gefahrgütern *entladen* wird, mit der er in einem früher angefahrenen Haltepunkt HP_i beladen wurde. Wenn diese Zuordnungsentscheidung positiv ausfällt, also die Entladung des Güterzugs von der Gütermenge an der Position p der Tour $T_{e,q}$ erfolgt ($ze_{\text{sta.c.i,j,e,q,p}} = 1$ bzw. $ze_{\text{gef.d.i,j,e,q,p}} = 1$), muss das aktuelle Ladungsgewicht $lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ bzw. $lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ der betroffenen Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ um die jeweils abgeladene Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i,j}}$ bzw. $gme_{\text{gef.d.i,j}}$ verringert werden.

Das aktuelle Ladungsgewicht $lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ oder $lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ der Güterwagen des Typs $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ lässt sich aufgrund der voranstehenden Erläuterungen an jeder Position p der Tour $T_{e,q}$ mit $p = 2, \dots, P^2)$ unter Beachtung aller Entscheidungen hinsichtlich des Be- und Entladens desjenigen Güterzugs, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, durch folgende *Be- und Entladungsrestriktionen* erfassen:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c \in \{1, \dots, C\} :$$

$$\forall p = 2, \dots, P : \quad lg_{\text{sta.c.e.q.p}} = lg_{\text{sta.c.e.q.p-1}} + \dots \quad (119)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(zb_{\text{sta.c.j,e,q,p}} \cdot gmb_{\text{sta.c.j}} - \left(\sum_{i=1}^N ze_{\text{sta.c.i,j,e,q,p}} \cdot gme_{\text{sta.c.i,j}} \right) \right) \right)$$

-
- 1) Allerdings ist das Eisenbahnverkehrsunternehmen hinsichtlich dieser entladungsbezogenen Entscheidung nicht vollkommen frei, sondern muss auch Integritätsbedingungen berücksichtigen, auf die später eingegangen wird. Diese Integritätsbedingungen stellen sicher, dass eine Gütermenge, mit der ein Güterzug beladen wurde, „irgendwann“ bis zum Erreichen des Tourenendes auch wieder entladen wird. Dies muss nicht die hier betrachtete Tourposition p sein, sondern es kann sich auch um eine andere Tourposition p' mit $p \neq p'$ handeln. Daher lassen die Integritätsbedingungen dem Eisenbahnverkehrsunternehmen durchaus noch einen Entscheidungsspielraum offen.
 - 2) Für die Tourposition $p = 1$ spezifizieren bereits die o.a. Formeln (117) und (118) das aktuelle Ladungsgewicht eines Güterzugs.

$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d \in \{1, \dots, D\} :$

$$\forall p = 2, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} = \lg_{\text{gef.d.e.q.p-1}} + \dots \quad (120)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(z b_{\text{gef.d.j.e.q.p}} \cdot g m b_{\text{gef.c.j}} - \left(\sum_{i=1}^N z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.p}} \cdot g m e_{\text{gef.d.i.j}} \right) \right) \right)$$

m) Mithilfe von Kapazitätsrestriktionen ist für jede Tour $T_{e,q}$ sicherzustellen, dass die aktuellen Ladungsgewichte $\lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ oder $\lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ aller Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$, die zum Güterzug der Tour $T_{e,q}$ gehören, niemals die Ladungskapazität $lk_{\text{sta.c}}$ bzw. $lk_{\text{gef.d}}$ des jeweils betroffenen Güterwagen-Typs überschreiten. Dabei gilt es zu beachten, dass zu einem Güterzug *mehrere* Güterwagen desselben Typs gehören können, dass sich die aktuellen Ladungsgewichte $\lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ oder $\lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ auf die *Gesamtheit* aller Güterwagen desselben Typs beziehen und dass die Ladungskapazitäten $lk_{\text{sta.c}}$ und $lk_{\text{gef.d}}$ eines Güterwagen-Typs $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ jeweils auf *nur einen* Güterwagen dieses Typs bezogen sind. Daher muss mithilfe der *güterwagenbezogenen* Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ berücksichtigt werden, *wie viele* Güterwagen des Typs $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$ dem Güterzug einer Tour $T_{e,q}$ zugeordnet sind. Mithilfe dieser Entscheidungsvariablen lassen sich die *güterwagenbezogenen Kapazitätsrestriktionen* wie folgt ausdrücken:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \leq y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot lk_{\text{sta.c}} \quad (121)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \leq y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot lk_{\text{gef.d}} \quad (122)$$

n) Zusätzliche Kapazitätsrestriktionen sind für jede Tour $T_{e,q}$ erforderlich, um sicherzustellen, dass die maximale Zugkraft, d.h. die Traktionskapazität der jeweils eingesetzten Lokomotive ausreicht, um den Güterzug, der die Tour $T_{e,q}$ durchführt, zu ziehen. Um diese lokomotivenbezogenen Kapazitätsrestriktionen aufzustellen, wird auf die *lokomotivenbezogenen* Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ zurückgegriffen, die im Kapitel 7.2.5 eingeführt wurden. Diese Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ zeigen an, ob eine Lokomotive des Typs $LT_{\text{die.a}}$ bzw. $LT_{\text{ele.b}}$ einer Tour $T_{e,q}$ zugeordnet worden ist, um diese Tour durchzuführen.

Für jede Position p einer Tour $T_{e,q}$ ergibt sich die Beanspruchung der Traktionskapazität der jeweils eingesetzten Lokomotive(n) aus den Eigengewichten $eg_{\text{sta.c}}$ und $eg_{\text{gef.d}}$ der Güterwagen des Typs $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$, multipliziert mit den Anzahlen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ bzw. $y_{\text{gef.d.e.q}}$ der Güterwagen dieses Typs, die zum Güterzug der Tour $T_{e,q}$ gehören, sowie den aktuellen Ladungsgewichten $\lg_{\text{sta.c.e.q.p}}$ oder $\lg_{\text{gef.d.e.q.p}}$ aller Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ bzw. $GT_{\text{gef.d}}$, die zum Güterzug der Tour $T_{e,q}$ gehören. Diese Summen aus Eigen- und Ladungsgewichten aller Güterwagen desselben Güterzugs dürfen nicht größer sein als die maximale Zugkraft $zk_{\text{die.a}}$ der jeweils eingesetzten Diesel-Lokomotive(n) des Typs $LT_{\text{die.a}}$ oder als die maximale Zugkraft $zk_{\text{ele.b}}$ der jeweils eingesetzten Elektro-Lokomotive(n) des Typs $LT_{\text{ele.b}}$. Daraus ergeben sich als *lokomotivenbezogene Kapazitätsrestriktionen*:

$$\begin{aligned}
& \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \\
& \left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{sta.c}}) + \text{lg}_{\text{sta.c.e.q.p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{gef.d}}) + \text{lg}_{\text{gef.d.e.q.p}} \right) \\
& \leq \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{ele.b}} \right)
\end{aligned} \tag{123}$$

Diese lokomotivenbezogenen Kapazitätsrestriktionen lassen auch zu, dass *ein* Güterzug auf einer Tour $T_{e,q}$ von *mehreren* Lokomotiven gezogen wird. Für ein solches Lokomotiven-Ensemble muss $y_{\text{die.a.e.q}} + y_{\text{ele.b.e.q}} \geq 2$ gelten. Dadurch wird die maximale Zugkraft, d.h. die Traktionskapazität, des Lokomotiven-Ensembles entsprechend vervielfacht.

Die Werte der beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z_{\text{bsta.c.i.e.q.p}}$ und $z_{\text{bgef.d.i.e.q.p}}$ sowie der entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z_{\text{e sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $z_{\text{e gef.d.i.j.e.q.r}}$ können nicht vollkommen frei gewählt werden, sondern müssen eine größere Anzahl von *Integritätsbedingungen* erfüllen. Die Integritätsbedingungen sorgen dafür, dass nur „integre“, „sinnvolle“, von immanenten Widersprüchlichkeiten freie Modelllösungen zulässig sind.

o) Zunächst ist im Tourenplanungsmodell zu erfassen, ob ein Haltepunkt HP_i im Verkehrsnetz VN für das *Beladen* eines Güterzugs *relevant* ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn in diesem Haltepunkt HP_i mindestens eine „echte“, d.h. von Null verschiedene Transportnachfrage für die zu transportierende Gütermenge $g_{\text{mb sta.c.i}}$ im Hinblick auf Standard-Güterwagen vom Typ $GT_{\text{sta.c}}$ oder mindestens eine Transportnachfrage für die zu transportierende Gütermenge $g_{\text{mb gef.d.i}}$ im Hinblick auf Gefahrgut-Güterwagen vom Typ $GT_{\text{gef.d}}$ besteht. Diese Beladungsrelevanz des Haltepunkts HP_i wird durch *beladungsbezogene Relevanzvariablen* $\text{relb}_{\text{sta.c.i}}$ für Standard-Transporte bzw. $\text{relb}_{\text{gef.d.i}}$ für Gefahrgut-Transporte erfasst:

$$\forall c \in \{1, \dots, C\} \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } g_{\text{mb sta.c.i}} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } g_{\text{mb sta.c.i}} = 0 \text{ gilt} \end{cases} \tag{124}$$

$$\forall d \in \{1, \dots, D\} \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } g_{\text{mb gef.d.i}} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } g_{\text{mb gef.d.i}} = 0 \text{ gilt} \end{cases} \tag{125}$$

Bei den beladungsbezogenen Relevanzvariablen handelt es sich um modellendogene Variablen. Ihre Werte lassen sich in der mathematischen Modellformulierung wie folgt eindeutig bestimmen:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (g_{\text{mb sta.c.i}} > 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 1) \wedge (g_{\text{mb sta.c.i}} = 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 0) \tag{126}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (g_{\text{mb gef.d.i}} > 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = 1) \wedge (g_{\text{mb gef.d.i}} = 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = 0) \tag{127}$$

Dies lässt sich in der mathematischen Modellierungssoftware LINGO unmittelbar mithilfe der bereits eingeführten @IF-Funktion implementieren:¹⁾

1) Vgl. dazu die Erläuterungen zu den Formeln (40) und (41).

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = @\text{IF} \left(\underbrace{\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \# \text{GT} \# 0}_{\text{logische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (128)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = @\text{IF} \left(\underbrace{\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \# \text{GT} \# 0}_{\text{logische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (129)$$

Wenn Vorbehalte gegenüber der @IF-Funktion bestehen, lassen sich die Subjugate der Formeln (126) und (127) mithilfe einer „sehr großen“ Konstante K wie folgt implementieren:¹⁾

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \quad (130)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \quad (131)$$

Beispielsweise gilt im Hinblick auf Transporte von Standardgütern (für Transporte von Gefahrgütern treffen die nachfolgenden Argumente in analoger Weise zu): Einerseits erzwingt die Bedingung $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K$, dass $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ gilt. Allerdings wird für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ der Spielraum $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} \in \{0,1\}$ gelassen. Andererseits erzwingt die Bedingung $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$, dass $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 1$ für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ gilt. Für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ wird jedoch der Spielraum $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} \in \{0,1\}$ gelassen. Beide Bedingungen zusammen beseitigen die vorgenannten Spielräume, die für jeweils eine „isolierte“ Bedingung noch offenstanden. Daher stellt das Konjugat $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \wedge \dots \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ sicher, dass sowohl $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0$ als auch $\text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 1$ für $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ gilt. Dadurch werden die Formeln (126) bis (129) erfüllt.

p) Mithilfe der beladungsbezogenen Relevanzvariablen $\text{relb}_{\text{sta.c.i}}$ und $\text{relb}_{\text{gef.d.i}}$ ist es nun möglich auszudrücken, dass die Beladung eines Güterzugs, der an der Position p seiner Tour $T_{e,q}$ den Haltepunkt HP_i im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN anfährt, in diesem Haltepunkt HP_i nur dann „sinnvoll“ ist, wenn dort der Transport einer Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ nachgefragt wird, wenn der Haltepunkt HP_i also für das *Beladen* eines Güterzugs *relevant* ist. Dies gewährleisten die nachfolgenden *beladungsbezogenen Relevanzrestriktionen*:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \text{zb}_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (132)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \text{zb}_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (133)$$

1) Die „sehr große“ Konstante K muss mindestens so groß gewählt werden, dass z.B. im Hinblick auf Transporte von Standardgütern für jede beliebige Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ gilt: $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq 1$ und $K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$. Beide Anforderungen werden erfüllt, wenn die Konstante K so groß gewählt wird, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ \frac{1}{\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}}, \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \mid c \in \{1, \dots, C\} \wedge i \in \{1, \dots, N\} \wedge \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0 \right\}$$

Wenn die Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ ganzzahlig gemessen werden (z.B. nur in „ganzen“ Tonnen) oder wenn sichergestellt ist, dass keine „sehr kleinen“ Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}}$ mit $0 < \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} < 1$ vorkommen, dann ist die Bedingung $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq 1$ für jede Konstante K mit $K \geq 1$ auf triviale Weise erfüllt. In diesem Fall reicht es aus, die Konstante K so groß zu wählen, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \mid c \in \{1, \dots, C\} \wedge i \in \{1, \dots, N\} \wedge \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0 \right\}$$

Falls an einem Haltepunkt HP_i wegen $relb_{sta.c.i} = 0$ oder $relb_{gef.d.i} = 0$ keine Gütermengen für den Transport von Standard- bzw. Gefahrgütern nachgefragt werden, erzwingen die o.a. Relevanzrestriktionen, dass die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen nur die Werte $zb_{sta.c.i.e.q.p} = 0$ bzw. $zb_{gef.d.i.e.q.p} = 0$ annehmen können. Andernfalls, wenn im Haltepunkt HP_i wegen $relb_{sta.c.i} = 1$ oder $relb_{gef.d.i} = 1$ Gütermengen für den Transport von Standard- bzw. Gefahrgütern nachgefragt werden, lassen die o.a. Relevanzrestriktionen dem Entscheidungsträger den Freiheitsgrad, den Güterzug an der Position p seiner Tour $T_{e,q}$ entweder mit der zu transportierenden Gütermenge $gmb_{sta.c.i} > 0$ oder $gmb_{gef.d.i} > 0$ zu beladen ($zb_{sta.c.i.e.q.p} = 1$ bzw. $zb_{gef.d.i.e.q.p} = 1$) oder aber darauf zu verzichten ($zb_{sta.c.i.e.q.p} = 0$ bzw. $zb_{gef.d.i.e.q.p} = 0$).

q) Die voranstehenden beladungsbezogenen Relevanzrestriktionen können allerdings nicht verhindern, dass Lösungen des Tourenplanungsmodells zulässig sind, in denen dieselbe zu transportierende Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ ¹⁾ von einem Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an *mehreren* Positionen aufgeladen wird oder dieselbe zu transportierende Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ von *mehreren* Güterzügen auf unterschiedlichen Touren $T_{e,q}$ aufgeladen wird. Dies ist im Hinblick auf das zugrunde liegende Realproblem jedoch unzulässig, weil eine Transportnachfrage, die in einem Haltepunkt HP_i hinsichtlich einer zu transportierenden Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ besteht, nur entweder durch die *einmalige* Beladung eines Güterzugs im Start-Haltepunkt HP_i (und die entsprechende einmalige Entladung am Ziel-Haltepunkt HP_j) vollständig erfüllt werden kann oder gar nicht („take it or leave it“). Von dieser *Einmaligkeitsprämisse* hinsichtlich der zu transportierenden Gütermengen wird auch in diesem Projektbericht ausgegangen. Daher sind die o.a. Konstellationen, bei denen dieselbe zu transportierende Gütermenge mehrfach transportiert wird, auszuschließen. Dies leisten die nachfolgenden *beladungsbezogenen Einmaligkeitsrestriktionen*, indem sie verhindern, dass mehrere der beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen für unterschiedliche Touren $T_{e,q}$ oder für unterschiedliche Tourpositionen p innerhalb derselben Tour $T_{e,q}$ die Werte $zb_{sta.c.i.e.q.p} = 1$ oder $zb_{gef.d.i.e.q.p} = 1$ annehmen können:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P zb_{sta.c.i.e.q.p} \leq 1 \quad (134)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P zb_{gef.d.i.e.q.p} \leq 1 \quad (135)$$

Für das Entladen eines Güterzugs in einem Haltepunkt HP_j des Verkehrsnetzes VN gelten die Restriktionen, die zuvor in den Abschnitten o) bis q) im Hinblick auf das Beladen eines Güterzugs in einem Haltepunkt HP_i erläutert wurden, im Prinzip analog. Daher werden Restriktionen für das Entladen eines Güterzugs im Folgenden etwas „kompakter“ dargestellt.

r) Zunächst ist im Tourenplanungsmodell zu erfassen, ob ein Haltepunkt HP_j im Verkehrsnetz VN für das *Entladen* eines Güterzugs *relevant* ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn mindestens ein anderer (Start-) Haltepunkt HP_i im Verkehrsnetz VN existiert, in dem mindestens eine „echte“, d.h. von Null verschiedene Transportnachfrage für die zu transportierende Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ im Hinblick auf Güterwagen für Standard-Transporte vom Typ $GT_{sta.c}$ oder mindestens eine Transport-

1) Es wird hier für zu transportierende Gütermengen stets $gmb_{sta.c.i} > 0$ und $gmb_{gef.d.i} > 0$ vorausgesetzt.

nachfrage für die zu transportierende Gütermenge $gmb_{gef.d.i}$ im Hinblick auf Güterwagen für Gefahrgut-Transporte vom Typ $GT_{gef.d}$ besteht, und wenn diese zu transportierende Gütermenge als gleich große Gütermenge $gme_{sta.c.i,j}$ bzw. $gme_{gef.d.i,j}$ am Haltepunkt HP_j als Ziel-Haltepunkt entladen werden soll. Diese Entladungsrelevanz des Haltepunkts HP_j in Bezug auf einen anderen Haltepunkt HP_i wird durch die *entladungsbezogenen Relevanzvariablen* $rele_{sta.c.i,j}$ für Standard-Transporte und $rele_{gef.d.i,j}$ für Gefahrgut-Transporte erfasst:

$$\forall c \in \{1, \dots, C\} \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad rele_{sta.c.i,j} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } gme_{sta.c.i,j} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } gme_{sta.c.i,j} = 0 \text{ gilt} \end{cases} \quad (136)$$

$$\forall d \in \{1, \dots, D\} \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad rele_{gef.d.i,j} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } gme_{gef.d.i,j} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } gme_{gef.d.i,j} = 0 \text{ gilt} \end{cases} \quad (137)$$

Bei den entladungsbezogenen Relevanzvariablen handelt es sich um modellendogene Variablen. Ihre Werte lassen sich in der mathematischen Modellformulierung wie folgt eindeutig bestimmen:

$$\forall c = 1, \dots, C \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad (gme_{sta.c.i,j} > 0 \rightarrow rele_{sta.c.i,j} = 1) \wedge (gme_{sta.c.i,j} = 0 \rightarrow rele_{sta.c.i,j} = 0) \quad (138)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad (gme_{gef.d.i,j} > 0 \rightarrow rele_{gef.d.i,j} = 1) \wedge (gme_{gef.d.i,j} = 0 \rightarrow rele_{gef.d.i,j} = 0) \quad (139)$$

Dies lässt sich in der mathematischen Modellierungssoftware LINGO unmittelbar mithilfe der bereits eingeführten @IF-Funktion implementieren:

$$\forall c = 1, \dots, C \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad rele_{sta.c.i,j} = @IF \left(\underbrace{gme_{sta.c.i,j} \#GT\# 0}_{\text{log ische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (140)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \forall i = 1, \dots, N \forall j = 1, \dots, N: \quad rele_{gef.d.i,j} = @IF \left(\underbrace{gme_{gef.d.i,j} \#GT\# 0}_{\text{log ische Bedingung}}, \underbrace{1}_{\text{wenn Bedingung erfüllt}}, \underbrace{0}_{\text{wenn Bedingung verletzt}} \right) \quad (141)$$

Wenn Vorbehalte gegenüber der @IF-Funktion bestehen, lassen sich die Subjugate der Formeln (138) und (139) auch mithilfe einer „sehr großen“ Konstante K wie folgt implementieren:¹⁾

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad (142)$$

$$\text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad (143)$$

$$\text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}}$$

s) Mithilfe der entladungsbezogenen Relevanzvariablen $\text{rele}_{\text{sta.c.i.j}}$ und $\text{rele}_{\text{gef.d.i.j}}$ ist es nun möglich auszudrücken, dass die Entladung eines Güterzugs, der an der Position p seiner Tour $T_{e,q}$ den Haltepunkt HP_j im zugrunde liegenden Verkehrsnetz VN anfährt, in diesem Haltepunkt HP_j nur dann „sinnvoll“ ist, wenn er in einem anderen Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ beladen wurde, die zum Haltepunkt HP_j transportiert werden soll, wenn der Haltepunkt HP_j also für das *Entladen* eines Güterzugs *relevant* ist. Dies gewährleisten die nachfolgenden *entladungsbezogenen Relevanzrestriktionen*:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (144)$$

$$\text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (145)$$

$$\text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}}$$

Falls an einem Haltepunkt HP_j wegen $\text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} = 0$ oder $\text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} = 0$ keine Gütermengen für den Transport von Standard- bzw. Gefahrgütern von einem anderen Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j nachgefragt werden, erzwingen die o.a. Relevanzrestriktionen, dass die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen nur die Werte $\text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$ bzw. $\text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0$ annehmen können. Andernfalls, wenn wegen $\text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} = 1$ oder $\text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} = 1$ Gütermengen für den Transport von Standard- bzw. Gefahrgütern von einem anderen Haltepunkt HP_i zum Haltepunkt HP_j transportiert werden sollen, lassen die o.a. Relevanzrestriktionen dem Entscheidungsträger den Freiheitsgrad, den Güterzug an der Position r seiner Tour $T_{e,q}$ entweder im Haltepunkt HP_j von der transportierten Gütermenge $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ oder $\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} > 0$ zu entladen ($\text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$ bzw. $\text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 1$) oder aber darauf zu verzichten ($\text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$ bzw. $\text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0$).

- 1) Die „sehr große“ Konstante K muss mindestens so groß gewählt werden, dass z.B. im Hinblick auf Transporte von Standardgütern für jede beliebige Gütermenge $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ gilt: $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \geq 1$ und $K \geq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$. Beide Anforderungen werden erfüllt, wenn die Konstante K so groß gewählt wird, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ \frac{1}{\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}}, \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \mid c \in \{1, \dots, C\} \wedge i, j \in \{1, \dots, N\} \wedge \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} > 0 \right\}$$

Wenn die Gütermengen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ ganzzahlig gemessen werden (z.B. nur in „ganzen“ Tonnen) oder wenn sichergestellt ist, dass keine „sehr kleinen“ Gütermengen $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}}$ mit $0 < \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} < 1$ vorkommen, dann ist die Bedingung $\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \geq 1$ für jede Konstante K mit $K \geq 1$ auf triviale Weise erfüllt. In diesem Fall reicht es aus, die Konstante K so groß zu wählen, dass gilt:

$$K \geq \max \left\{ \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \mid c \in \{1, \dots, C\} \wedge i, j \in \{1, \dots, N\} \wedge \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} > 0 \right\}$$

t) Die voranstehenden entladungsbezogenen Relevanzrestriktionen können allerdings nicht verhindern, dass Lösungen des Tourenplanungsmodells zulässig sind, in denen dieselbe zu transportierende Gütermenge $gme_{sta.c.i.j}$ oder $gme_{gef.d.i.j}$ ¹⁾ von einem Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an *mehreren* Positionen abgeladen wird oder dieselbe zu transportierende Gütermenge $gme_{sta.c.i.j}$ oder $gme_{gef.d.i.j}$ von *mehreren* Güterzügen auf unterschiedlichen Touren $T_{e,q}$ abgeladen wird. Dies ist im Hinblick auf das zugrunde liegende Realproblem unzulässig, weil eine Transportnachfrage, eine Gütermenge von einem Haltepunkt HP_i zu einem Haltepunkt HP_j zu transportieren, nur entweder durch die *einmalige* Beladung eines Güterzugs im Start-Haltepunkt HP_i und die entsprechende *einmalige* Entladung am Ziel-Haltepunkt HP_j vollständig erfüllt werden kann oder gar nicht („take it or leave it“). Von dieser *Einmaligkeitsprämisse* hinsichtlich der zu transportierenden Gütermengen wird auch in diesem Projektbericht ausgegangen. Daher sind die o.a. Konstellationen, bei denen dieselbe zu transportierende Gütermenge mehrfach transportiert wird, auszuschließen. Dies leisten die nachfolgenden *entladungsbezogenen Einmaligkeitsrestriktionen*, indem sie verhindern, dass mehrere der entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen für unterschiedliche Touren $T_{e,q}$ oder für unterschiedliche Tourpositionen p innerhalb derselben Tour $T_{e,q}$ die Werte $ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 1$ oder $ze_{gef.d.i.j.e.q.r} = 1$ annehmen können:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{sta.c.i.j.e.q.r} \leq 1 \quad (146)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{gef.d.i.j.e.q.r} \leq 1 \quad (147)$$

u) Bislang wurden die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $zb_{sta.c.i.e.q.p}$ und $zb_{gef.d.i.e.q.p}$ auf der einen Seite sowie die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{sta.c.i.j.e.q.r}$ und $ze_{gef.d.i.j.e.q.r}$ auf der anderen Seite in integritätswahrenden Restriktionen jeweils *separat* behandelt. Dies reicht jedoch noch nicht aus. Es bedarf einer weiteren Restriktionsgruppe, um sicherzustellen, dass zu jeder Beladung eines Güterzugs mit der Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ in einem Start-Haltepunkt HP_i an einer Tourposition p genau eine *korrespondierende* Entladung um die gleich große Gütermenge $gme_{sta.c.i.j}$ bzw. $gme_{gef.d.i.j}$ in einem Ziel-Haltepunkt HP_j an einer Tourposition r existiert. Dies wird durch die nachfolgenden *Kopplungsrestriktionen für Be- und Entladungsmengen* erreicht:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \left(\exists p = 1, \dots, P : zb_{sta.c.i.e.q.p} = 1 \right) \rightarrow \left(\exists j = 1, \dots, N \quad \exists r = 1, \dots, P : ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 1 \right) \quad (148)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \left(\forall p = 1, \dots, P : zb_{sta.c.i.e.q.p} = 0 \right) \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 0 \right) \quad (149)$$

1) Es wird hier für zu transportierende Gütermengen stets $gmb_{sta.c.i} > 0$ und $gmb_{gef.d.i} > 0$ vorausgesetzt.

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (150)$$

$$\left(\dot{\exists} p = 1, \dots, P : z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} = 1 \right) \rightarrow \left(\dot{\exists} j = 1, \dots, N \quad \dot{\exists} r = 1, \dots, P : z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 1 \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (151)$$

$$\left(\forall p = 1, \dots, P : z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} = 0 \right) \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0 \right)$$

Die voranstehenden vier Kopplungsrestriktionen lassen sich äquivalent, aber erheblich einfacher darstellen als:¹⁾

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (152)$$

$$\sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (153)$$

$$\sum_{p=1}^P z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0$$

- 1) Dabei wird auf folgende Äquivalenztransformationen zurückgegriffen, die hier der Kürze halber nur für Transporte von Standardgütern exemplarisch vorgestellt werden:

$$\left(\dot{\exists} p = 1, \dots, P : z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1 \right) \rightarrow \left(\dot{\exists} j = 1, \dots, N \quad \dot{\exists} r = 1, \dots, P : z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1 \right) \wedge \dots$$

$$\left(\forall p = 1, \dots, P : z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0 \right) \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0 \right)$$

$$// \quad z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}, z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \in \{0, 1\}$$

$$\Leftrightarrow \left(\left(\sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1 \right) \rightarrow \left(\sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1 \right) \right) \wedge \left(\left(\sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0 \right) \rightarrow \left(\sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0 \right) \right)$$

$$// \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1, \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq 1$$

$$\Leftrightarrow \sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$$

Bei der computergestützten Modellformulierung können die Anzahlen der Entscheidungsvariablen und der Restriktionen dadurch erheblich reduziert werden, dass die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ nur für solche Haltepunkte HP_i eingeführt werden, in denen eine Transportnachfrage mit einer Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ vorliegt, und die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ nur für solche Haltepunkte HP_j eingeführt werden, die als Lieferziele für die vorgenannten Gütermengen $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ bzw. $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ am Haltepunkt HP_i definiert sind. Allerdings erfordert diese Option, dass für die Ermittlung der Entscheidungsvariablen $z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ sowie $z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ einschließlich der darauf zu beziehenden Restriktionen die Zuladungs- und die Entladungsmatrix bei der Modellkonstruktion „händisch“ ausgewertet werden müssen. Dies kann erheblichen Konstruktionsaufwand bereiten. Außerdem wird hierdurch die Anpassung des Tourenplanungsmodells an unterschiedliche Verteilungen der Transportnachfrage auf die Haltepunkte des Verkehrsnetzes erheblich erschwert. Daher wird von der vorgenannten Reduzierungsmöglichkeit kein Gebrauch gemacht.

v) Die beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ sowie die entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ beziehen sich zwar in ihren Indizes auf Positionen p bzw. r aus dem Tourvektor $TV_{e,q}$ eines Güterzugs, der eine Tour $T_{e,q}$ durchführt. Aber es ist noch nicht sichergestellt, dass der Güterzug an der p -ten Position den Haltepunkt HP_i ($x_{e,q,p,i} = 1$) und an der r -ten Position den Haltepunkt HP_j ($x_{e,q,r,j} = 1$) anfährt, wenn beispielsweise für das Be- und das Entladen von Standardgütern $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$ bzw. $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$ festgelegt wurde. Daher werden weitere Kopplungsrestriktionen benötigt, welche die Werte der haltepunktbezogenen Entscheidungsvariablen $x_{e,q,p,n}$ mit den Werten der beladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ sowie mit den Werten der entladungsbezogenen Entscheidungsvariablen $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ verknüpfen.

Zu diesem Zweck werden die nachfolgenden *Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Beladungsmengen* eingeführt:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i} \quad (154)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad zb_{\text{gef.d.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i} \quad (155)$$

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise dieser Kopplungsrestriktionen wird in exemplarischer Weise eine Nachfrage hinsichtlich des Transports eines Standardguts betrachtet, zu deren Erfüllung ein Güterzug im Haltepunkt HP_i des Verkehrsnetzes mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen werden muss ($relb_{\text{sta.c.i}} = 1$):

- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position p im Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen werden soll ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$), so ist dies nur dann möglich, wenn der Haltepunkt HP_i an der p -ten Position der Tour $T_{e,q}$ vom Güterzug angefahren wird ($x_{e,q,p,i} = 1$). Daher muss gelten: $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1 \rightarrow x_{e,q,p,i} = 1$. Dies entspricht der Kopplungsrestriktion $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i}$, weil für den Fall $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$ durch $1 \leq x_{e,q,p,i}$ und $x_{e,q,p,i} \in \{0,1\}$ der Wert $x_{e,q,p,i} = 1$ erzwungen wird.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position p im Haltepunkt HP_i nicht mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen werden soll ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$), so ist es unerheblich, ob der Haltepunkt HP_i an der p -ten Position der Tour $T_{e,q}$ vom Güterzug angefahren wird oder nicht ($x_{e,q,p,i} \in \{0,1\}$). Folglich gilt: $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0 \rightarrow x_{e,q,p,i} \in \{0,1\}$. Dies entspricht der Kopplungsrestriktion $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i}$, weil für den Fall $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$ wegen $0 \leq x_{e,q,p,i}$ und $x_{e,q,p,i} \in \{0,1\}$ sowohl $x_{e,q,p,i} = 0$ als auch $x_{e,q,p,i} = 1$ zulässig sind.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position p den Haltepunkt HP_i anfährt ($x_{e,q,p,i} = 1$), kann er dort mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen werden ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$), muss es aber nicht ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$). Folglich gilt: $x_{e,q,p,i} = 1 \rightarrow zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$. Dies entspricht der Kopplungsrestriktion $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i}$, weil für den Fall $x_{e,q,p,i} = 1$ wegen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1$ und $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$ sowohl $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$ als auch $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$ zulässig sind.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position p den Haltepunkt HP_i nicht anfährt ($x_{e,q,p,i} = 0$), kann er dort mit keiner Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}}$ beladen werden ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$). Daher muss gelten: $x_{e,q,p,i} = 0 \rightarrow zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$. Die Kopplungsrestriktion $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i}$ wird hierdurch erfüllt, weil für den Fall $x_{e,q,p,i} = 0$ durch $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 0$ und $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$ der Wert $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$ erzwungen wird.

In analoger Weise werden die nachfolgenden *Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Entladungsmengen* eingeführt:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (156)$$

$$ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (157)$$

$$ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$$

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise dieser Kopplungsrestriktionen wird in exemplarischer Weise eine Nachfrage hinsichtlich des Transports eines Standardguts betrachtet, zu deren Erfüllung ein Güterzug im Haltepunkt HP_i des Verkehrsnetzes mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen werden muss ($relb_{\text{sta.c.i}} = 1$), diese Gütermenge zum Haltepunkt HP_j transportieren muss und dort die gleich große Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ entladen muss ($rele_{\text{sta.c.i.j}} = 1$):

- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position r im Haltepunkt HP_j von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ entladen werden soll ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$), so ist dies nur dann möglich, wenn der Haltepunkt HP_j an der r -ten Position der Tour $T_{e,q}$ vom Güterzug angefahren wird ($x_{e.q.r.j} = 1$). Daher muss gelten: $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1 \rightarrow x_{e.q.r.j} = 1$. Dies entspricht der Kopplungsrestriktion $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$, weil für den Fall $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$ durch die Ungleichung $1 \leq x_{e.q.r.j}$ und $x_{e.q.r.j} \in \{0,1\}$ der Wert $x_{e.q.r.j} = 1$ erzwungen wird.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position r im Haltepunkt HP_j nicht von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ entladen werden soll ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$), so ist es unerheblich, ob der Haltepunkt HP_j an der r -ten Position der Tour $T_{e,q}$ vom Güterzug angefahren wird ($x_{e.q.r.j} = 1$) oder nicht ($x_{e.q.r.j} = 0$). Folglich gilt: $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0 \rightarrow x_{e.q.r.j} \in \{0,1\}$. Dies entspricht der Kopplungsrestriktion $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$, weil für den Fall $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$ wegen der Ungleichung $0 \leq x_{e.q.r.j}$ und $x_{e.q.r.j} \in \{0,1\}$ sowohl $x_{e.q.r.j} = 0$ als auch $x_{e.q.r.j} = 1$ zulässig sind.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position r den Haltepunkt HP_j anfährt ($x_{e.q.r.j} = 1$), kann er dort von der Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ entladen werden ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$), muss es aber nicht ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$). Folglich gilt: $x_{e.q.r.j} = 1 \rightarrow ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \in \{0,1\}$. Dies stimmt mit der Kopplungsrestriktion $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$ überein, weil für den Fall $x_{e.q.r.j} = 1$ wegen $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq 1$ und $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$ sowohl $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 0$ als auch $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$ zulässig sind.
- Wenn ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ an der Position p den Haltepunkt HP_i nicht anfährt ($x_{e.q.r.j} = 0$), kann er dort von keiner Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}}$ entladen werden ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$). Daher muss gelten: $x_{e.q.r.j} = 0 \rightarrow ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$. Die Kopplungsrestriktion $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e.q.r.j}$ wird hierdurch erfüllt, weil für den Fall $x_{e.q.r.j} = 0$ durch $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq 0$ und $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \in \{0,1\}$ der Wert $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$ erzwungen wird.

w) Mithilfe einer letzten Integritätsbedingung ist für die *richtige Reihenfolge* zu sorgen, in der zwei Haltepunkte HP_i und HP_j auf der Tour $T_{e,q}$ eines Güterzugs an den Positionen p bzw. r angefahren werden. Ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit wird der exemplarische Fall betrachtet, dass der Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ den Haltepunkt HP_i anfährt ($x_{e,q,p,i} = 1$) und dort mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ beladen wird ($zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = 1$) sowie den Haltepunkt HP_j anfährt ($x_{e,q,p,j} = 1$) und dort von der gleich großen Gütermenge $gme_{\text{sta.c.i.j}} > 0$ entladen wird ($ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 1$). In diesem Fall ist zwar mit $gmb_{\text{sta.c.i}} = gme_{\text{sta.c.i.j}}$ das korrekte Be- und Entladen des Güterzugs garantiert. Aber es ist noch nicht sichergestellt, dass sich die Position p für das *Beladen* des Güterzugs in seiner Tour

$T_{e,q}$ vor der Position r für das *Entladen* des Güterzugs befindet. Um dies sicherzustellen, sind die nachfolgenden *Reihenfolgerestriktionen* erforderlich:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (158)$$

$$\left(z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = 1 \wedge z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 1 \right) \rightarrow p < r$$

Da sich eine solche Subjunkt-Formel, wie schon mehrfach erwähnt wurde, nur sehr schwer mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementieren lässt, wird sie mittels eines „Kunstgriffs“ in eine äquivalente, aber „subjunktfreie“ Darstellungsweise transformiert:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (159)$$

$$z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} \cdot p \leq z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} \cdot r$$

Für den Fall $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = 1 \wedge z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 1$ gilt $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 1$, so dass sich die Ungleichung aus der Formel (159) vereinfacht zu: $p \leq r$. Da der Beladungs-Haltepunkt HP_i und der Entladungs-Haltepunkt HP_j unterschiedliche Haltepunkte im Verkehrsnetz darstellen müssen ($i \neq j$) und sich an keiner Position im Tourvektor einer Tour $T_{e,q}$ mehrere Haltepunkte befinden dürfen (Ausschluss multipler Haltepunkte), ist in diesem Fall $p = r$ ausgeschlossen. Folglich ist für den Fall $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = 1 \wedge z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 1$ die Reihenfolgebeziehung $p < r$ für die angefahrenen Positionen des Be- und des Entladens einer Gütermenge sichergestellt. Dadurch wird die o.a. Formel (158) erfüllt.

Für den Fall $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = 0 \vee z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 0$ ¹⁾ gilt $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = 0$, so dass sich die Ungleichung aus der Formel (159) vereinfacht zu: $0 \leq 0$. Diese Tautologie ist auf triviale Weise immer erfüllt, so dass auch für diesen Fall die o.a. Formel (158) erfüllt wird.

x) Mit den bisher vorgestellten Restriktionen wäre im Extremfall auch eine Lösung des Tourenplanungsmodells verträglich, bei der die Lokomotiven aller Eisenbahnverkehrsunternehmen in ihren Depots verbleiben, also überhaupt keine reale Tour durchgeführt wird. Dies liegt daran, dass bislang „nur“ sichergestellt wurde, mit den geplanten realen Touren die verfügbaren Anzahlen und Kapazitäten der Lokomotiven und Güterwagen nicht zu überschreiten und alle Integritätsbedingungen einzuhalten, die sich aus dem zugrunde liegenden Realproblem ergeben. Aber es wurde an keiner Stelle vorgeschrieben, dass reale Touren durchgeführt werden müssen, um die Transportnachfragen zu erfüllen, die von Kunden in den Haltepunkten des Verkehrsnetzes artikuliert werden. Im Tourenplanungsmodell wird davon ausgegangen, dass durch die Gesamtheit der Touren $T_{e,q}$ aller Eisen-

1) Dieser Fall trifft u.a. auch auf alle artifiziellen Touren zu. Daher brauchen artifizielle Touren hier durch keine Modifizierung der o.a. Restriktionen berücksichtigt zu werden, sondern werden durch die o.a. Restriktionen bereits abgedeckt.

bahnverkehrsunternehmen *alle Transportnachfragen erfüllt* werden (*Markträumungsprämisse*).¹⁾ Dies entspricht aus betriebswirtschaftlicher Perspektive einem kunden- oder serviceorientierten Dienstleistungsverständnis, demzufolge Kundennachfragen – im Rahmen der vorhandenen Kapazitäten – immer erfüllt werden, sofern es sich um Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen handelt.²⁾ Auch aus volkswirtschaftlicher, insbesondere mikroökonomischer Perspektive ist eine solche Prämisse vertraut. Sie wird in Marktgleichgewichtsmodellen in der Regel als *Markträumungsbedingung* vorausgesetzt.

Die Prämisse, dass alle Transportnachfragen erfüllt werden, lässt sich mithilfe der nachfolgenden *Markträumungsrestriktionen* als letzten Restriktionen aus der Gruppe der Ladungsrestriktionen ausdrücken.³⁾

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (160)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \sum_{p=1}^P z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} = \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (161)$$

-
- 1) Die Markträumungsprämisse stellt eine „mutige“ Prämisse dar. Sie bedeutet, dass dann, wenn die Eisenbahnverkehrsunternehmen mit ihren Lokomotiven und Güterwagen über zu geringe Transportkapazitäten verfügen, um alle Transportnachfragen erfüllen zu können, keine zulässige Lösung für das Tourenplanungsmodell existiert. In diesem Fall sind die Restriktionen – insbesondere einschließlich der Markträumungs- und der Kapazitätsrestriktionen – so „eng“ spezifiziert, dass es keine Modelllösung gibt, die alle Restriktionen zugleich erfüllt. Dies wird hier bewusst in Kauf genommen. Denn die Nichtexistenz zulässiger Modelllösungen kann von den betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen als ein „Warnsignal“ interpretiert werden, nach den Ursachen der Nichtexistenz zu forschen und hierbei unter Umständen zu erkennen, dass sie ihre Kapazitäten erweitern müssten, um alle Transportnachfragen erfüllen zu können. Dies ließe sich z.B. in einem umfassenderen Tourenplanungsmodell analysieren, das die Option von *Kapazitätserweiterungen* umfasst, dabei allerdings auch die Zusatzkosten oder Zusatzausgaben berücksichtigt, die durch solche Kapazitätserweiterungen verursacht werden. Stattdessen könnte auch an eine Erweiterung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells in der Art eines *Rationierungsmodells* gedacht werden. Im Rahmen eines solchen Modells werden nicht die Transportkapazitäten an die höhere Transportnachfrage angepasst, sondern die Transportkapazitäten der Eisenbahnverkehrsunternehmen konstant gehalten und „rationiert“, d.h. den Transportaufträgen nur selektiv zugeteilt. Dann müssten Entscheidungskriterien dafür eingeführt werden, welche Transportaufträge mit den knappen Transportkapazitäten bedient werden – und welche Transportaufträge abgewiesen werden. Beispielsweise lässt sich vorstellen, mit den vorhandenen und nicht erweiterten Transportkapazitäten diejenige Menge von Transportaufträgen zu bedienen, die den Deckungsbeitrag der Eisenbahnverkehrsunternehmen insgesamt maximiert.
 - 2) Im Tourenplanungsmodell wird vorausgesetzt, dass nur Transportaufträge mit positiven Deckungsbeiträgen berücksichtigt werden.
 - 3) Die Markträumungsrestriktionen werden hier nur auf die *Beladung* von Güterzügen in Haltepunkten HP_i bezogen, die relevant sind, weil in ihnen jeweils eine Nachfrage für mindestens eine zu transportierende Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ vorliegt ($\text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 1$ bzw. $\text{relb}_{\text{gef.d.i}} = 1$). In analoger Weise könnten zusätzliche Markträumungsrestriktionen auch auf die *Entladung* von Güterzügen in jeweils korrespondierenden Haltepunkten HP_j bezogen werden. Dies ist im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell jedoch überflüssig, weil durch die früher aufgestellten Restriktionen bereits sichergestellt ist, dass zu jeder Beladung eines Güterzugs in einem Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge $\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0$ eine korrespondierende Entladung desselben Güterzugs in einem anderen Haltepunkt HP_j hinsichtlich der gleich großen Gütermenge $\text{gme}_{\text{sta.c.i,j}} > 0$ bzw. $\text{gme}_{\text{gef.d,i,j}} > 0$ existiert.

Wegen $z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \in \{0,1\}$ und $z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} \in \{0,1\}$ bedeutet dies, dass im Falle einer Transportnachfrage im Haltepunkt HP_i hinsichtlich der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $gmb_{\text{gef.d.i}} > 0$ ($relb_{\text{sta.c.i}} = 1$ bzw. $relb_{\text{gef.d.i}} = 1$) *genau eine* Tour $T_{e,q}$ eines Güterzugs existieren muss, bei deren Durchführung der Haltepunkt HP_i mindestens einmal angefahren wird, und zwar *genau einmal* an einer Position p , um den Güterzug an dieser Tourposition im Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge $gmb_{\text{sta.c.i}} > 0$ oder $gmb_{\text{gef.d.i}} > 0$ zu beladen ($z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = 1$ bzw. $z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} = 1$).

y) Die Anzahlen von Lokomotiven und Güterwagen, die zur Durchführung der Touren $T_{e,q}$ eines Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e mithilfe der o.a. Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ für Lokomotiven bzw. $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ für Güterwagen eingeplant werden, dürfen die Anzahlen $anz_{\text{lok.die.a.e}}$ und $anz_{\text{lok.ele.b.e}}$ derjenigen Lokomotiven bzw. $anz_{\text{wag.sta.c.e}}$ und $anz_{\text{wag.gef.d.e}}$ derjenigen Güterwagen des jeweils entsprechenden Typs nicht übersteigen, die dem Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e im Planungszeitraum zur Verfügung stehen. Daher müssen als *bestandsbezogene Equipmentrestriktionen* erfüllt sein:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall a \in \{1, \dots, A\} : \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{die.a.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} \quad (162)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall b \in \{1, \dots, B\} : \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{ele.b.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (163)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall c \in \{1, \dots, C\} : \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{sta.c.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} \quad (164)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall d \in \{1, \dots, D\} : \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{gef.d.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (165)$$

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die mathematische Modellformulierung für die voranstehend angeführten, zusätzlichen Restriktionen in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen.

Eine wesentliche Vereinfachung der computergestützten Modellformulierung resultiert daraus, dass bei dem praktischen Optimierungsbeispiel die jeweils zu transportierenden Gütermengen nicht spezifiziert sind. Daher kann auf alle Restriktionen, insbesondere Kapazitätsrestriktionen und Integritätsbedingungen, die von diesen Gütermengen abhängen, in der computergestützten Modellformulierung verzichtet werden.

Die Abbildung 32 auf den nächsten Seiten zeigt einen sechsten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt bezieht sich auf die Spezifizierung der zusätzlichen Restriktionen für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn, die nicht schon in den übrigen Modellausschnitten erfasst wurden.

SETS:

Relevanzvariable_Beladen(Haltepunkt): Relevanzvariable_relb;

! ist eine abgeleitete Menge mit den beladungsbezogenen Relevanzvariablen der Haltepunkte:
ein Haltepunkt ist zum Beladen genau dann anzufahren, wenn die Relevanzvariable den Wert 1 annimmt;

Relevanzvariable_Entladen(Haltepunkt, Haltepunkt): Relevanzvariable_rele;

! ist eine abgeleitete Menge mit den entladungsbezogenen Relevanzvariablen der Haltepunkte:
ein Haltepunkt ist zum Entladen genau dann anzufahren, wenn die Relevanzvariable den Wert 1 annimmt;

ENDSETS

CALC:

$$\forall i=1,\dots,N: \text{relb}_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \text{gmb}_i > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } \text{gmb}_i = 0 \text{ gilt} \end{cases} \text{ und } \text{relb}_i \leq \text{gmb}_i \cdot K \wedge \text{relb}_i \cdot K \geq \text{gmb}_i$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

@FOR(Haltepunkt(i): Relevanzvariable_relb(i) = @IF(gmb #EQ# 0, 0, 1));

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{rele}_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \text{gme}_{i,j} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } \text{gme}_{i,j} = 0 \text{ gilt} \end{cases} \text{ und } \text{rele}_{i,j} \leq \text{gme}_{i,j} \cdot K \wedge \text{rele}_{i,j} \cdot K \geq \text{gme}_{i,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

@FOR(Haltepunkt(i):

 @FOR(Haltepunkt(j): Relevanzvariable_rele(i,j) = @IF(gme #EQ# 0, 0, 1));

ENDCALC

SETS:

Hilfsvariablen1(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,

 Tourpositionen_bis_Pminus1, Haltepunkt, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
 Hilfsvariable1_x;

Hilfsvariablen2(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,

 Haltepunkt, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
 Hilfsvariable2_x;

Hilfsvariablen3(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) |

 Tourindex(&3) #LE# Anzahl_max_Touren(&2):
 Hilfsvariable3_zb;

Hilfsvariablen4(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) |

 Tourindex(&3) #LE# Anzahl_max_Touren(&2):
 Hilfsvariable4_ze;

Hilfsvariablen5(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,

 Tourpositionen_bis_P, Tourpositionen_bis_P) | Tourindex(&4) #LE# Anzahl_max_Touren(&3):
 Hilfsvariable5;

Hilfsvariablen6(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,

 Tourpositionen_bis_P, Tourpositionen_bis_P) | Tourindex(&4) #LE# Anzahl_max_Touren(&3):
 Hilfsvariable6;

Tourendevektorenkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |

 Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
 Tourendevektorkomponente;

Haltepunktindexvektorkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |

 Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
 Haltepunktindexvektorkomponente;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen hpi_e_q_p als Haltepunkt-Indizes n für diejenigen

Haltepunkte HP_n, die im Tourvektor TV_e_q einer Tour T_e_q an den Positionen p = 1,...,P stehen;

ENDSETS

SUBMODEL Modellkern:

! Die nachfolgenden @FOR-Funktionen implementieren als „Schleifen“ in kompakter Form die Binär-Restriktionen, dass für jede Relevanz- oder Hilfsvariable und für jede Komponente des Tourendevektors nur der Wert 0 oder 1 zulässig ist;

```
@FOR(Relevanzvariable_Beladen(i):      @BIN(Relevanzvariable_relb(i)) );
@FOR(Relevanzvariable_Entladen(i,j):   @BIN(Relevanzvariable_rele(i,j)) );
@FOR(Hilfsvariablen1(e,q,p,i,j):      @BIN(Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j)) );
@FOR(Hilfsvariablen2(e,q,i,j):        @BIN(Hilfsvariable2_x(e,q,i,j)) );
@FOR(Hilfsvariablen3(i,e,q):          @BIN(Hilfsvariable3_zb(i,e,q)) );
@FOR(Hilfsvariablen4(i,e,q):          @BIN(Hilfsvariable4_ze(i,e,q)) );
@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p): @BIN(Tourendevektorkomponente(e,q,p)) );
```

$$! \quad hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunktindexvektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #LE# Anzahl_max_Tourpositionen:
    Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p) = @SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
        Haltepunktindex(n) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n) ));
```

$$! \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    @FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
        @SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)) <= 1 ));
```

$$! \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um, welche die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ für die erste Position $p=1$ des Tourvektors einer Tour $T_{e,q}$ genau dann gleich 1 (0) setzt, wenn der Haltepunkt HP_n (nicht) das Depot DEP_e des EVU e darstellt;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #EQ# 1:
        @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
            Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n) * Depot_Haltepunkt(e,n)) = 1 ));
```

$$! \quad te_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}, & \text{für } p = 1, \dots, P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}, & \text{für } p = P \end{cases} \quad \text{und} \quad x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

1) Der zuletzt angeführte SUM-Term ist ein nicht dokumentierter "Glücksfall" von LINGO, weil die Addition nicht etwa über alle Indizes e,q,p,n der Entscheidungsvariable x verläuft, sondern nur über den einen Index n für die Haltepunkte HP_n , der durch den voranstehenden FOR-Operator für die Indizes e,q und p noch nicht erfasst wird. Auf diese Weise wird der entsprechende Summenterm aus dem OR-Modell korrekt implementiert.

@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #LT# Anzahl_max_Tourpositionen:
 Tourendevektorkomponente(e,q,p) =
 @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n))
 - @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,n)));

@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #EQ# Anzahl_max_Tourpositionen:
 Tourendevektorkomponente(e,q,p) =
 @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)));

@FOR(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
 Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n) >= Tourendevektorkomponente(e,q,p)*Depot_Haltepunkt(e,n)).

! Der nachfolgende LINGO-Ausdruck zur Ermittlung der Toureigenschaft Position_Tourende_e_q ist für das aktuelle OR-Modell nicht erforderlich, könnte aber für zukünftige Modellvarianten von Interesse sein ;

@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
 Position_Tourende(e,q) =
 @SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)));

$$! \sum_{n=1}^N X_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N X_{e,q,p+1,n} \geq 0$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
 @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
 @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n))
 - @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,n)) >= 0));

$$! X_{e,q,p,i} \cdot X_{e,q,p+1,j} \leq V_{i,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
 @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
 @FOR(Gleisstrecken(i,j): Direktverknuepfung(i,j) >=
 Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,j)));

$$! zb_{i,e,q,p} \leq relb_i$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Haltepunkt(i):
 @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
 @FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
 Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) <= Relevanzvariable_relb(i)));

$$! \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \sum_{p=1}^P zb_{i,e,q,p} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Haltepunkt(i):
 @sum(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p): Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)) <= 1);

$$! ze_{i,j,e,q,r} \leq rele_{i,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Haltepunkt(i):
 @FOR(Haltepunkt(j):
 @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
 @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
 Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) <= Relevanzvariable_rele(i,j)));

$$! \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P z_{e,i,j,e,q,r} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @sum(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r)) <= 1 ));
```

$$! \sum_{p=1}^P z_{b_{i,e,q,p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z_{e_{i,j,e,q,r}} = 0$$

Die nachfolgenden LINGO-Ausdrücke setzen die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    Hilfsvariable3_zb(i,e,q) =
      (@sum(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p): Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p))) );
  @FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      Hilfsvariable4_ze(i,e,q) =
        (@sum(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r))) );
  @FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      (Hilfsvariable3_zb(i,e,q) - Hilfsvariable4_ze(i,e,q)) = 0 ));
```

$$! z_{b_{i,e,q,p}} \leq x_{e,q,p,i}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    @FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
      Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) <= Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i)));
```

$$! z_{e_{i,j,e,q,r}} \leq x_{e,q,r,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
        Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) <= Entscheidungsvariable_x(e,q,r,i) ));
```

$$! z_{b_{i,e,q,p}} \cdot z_{e_{i,j,e,q,r}} \cdot p \leq z_{b_{i,e,q,p}} \cdot z_{e_{i,j,e,q,r}} \cdot r$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
        Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) *
        Positionsindex(p)
        <= Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) *
        Positionsindex(r) ))));
```

! Die folgende Formel dient zur internen Prüfung der Einhaltung der o.a. Reihenfolgerestriktion und zur Ermittlung von Positionsabstaende_Be_Entladen;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
```

Hilfsvariable5 (i,j,e,q,p,r) = Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)
 * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) * Positionsindex(p)))));

! Die folgende Formel dient zur internen Prüfung der Einhaltung der o.a. Reihenfolgerestriktion und zur Ermittlung von Positionsabstaende_Be_Entladen;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
        Hilfsvariable6 (i,j,e,q,p,r) = Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)
        * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) * Positionsindex(r) ))));
```

$$! \text{ PAS} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot r - z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot p$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
Positionsabstaende_Be_Entladen =
  @SUM(Haltepunkt(i):
    @SUM(Haltepunkt(j):
      @SUM(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
        @SUM(Tourpositionen_bis_P(p): @SUM(Tourpositionen_bis_P(r):
          Hilfsvariable6 (i,j,e,q,p,r) - Hilfsvariable5 (i,j,e,q,p,r) ))));
```

$$! \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{i,e,q,p} = \text{relb}_i$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @SUM(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p):
    Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) ) = Relevanzvariable_relb(i) );
```

$$TL_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j}$$

! Die nachfolgenden Konstrukte dienen zur Implementierung der Formel für die Tourlaenge(e,q), entsprechend TL_e_q im OR-Modell.

Die o.a. kompakte Formel aus dem OR-Modell wird bewusst mit Hilfsvariablen in drei Teilformeln zerlegt, um den korrekten Formelaufbau über mehrere verschachtelte FOR-Operatoren schrittweise nachvollziehen zu können und auch in der Lage zu sein, die Formelkorrektheit anhand von Zwischenwerten zu testen. ;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
    @FOR(Haltepunkt(i):
      @FOR(Haltepunkt(j): Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j) =
        Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,j) ))));
```

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Haltepunkt(j): Hilfsvariable2_x(e,q,i,j) =
      @SUM(Tourpositionen_bis_Pminus1(p): Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j) ))));
```

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e): Tourlaenge(e,q) =
  @SUM(Gleisstrecken(i,j): Streckenlaenge(i,j) * Hilfsvariable2_x(e,q,i,j) ));
```

ENDSUBMODEL

Abbildung 32: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell zur Spezifizierung der zusätzlichen Restriktionen

7.2.7 Zielfunktionen

Mithilfe von Zielfunktionen werden die subjektiven *Zielvorstellungen* und *Präferenzen* eines Entscheidungsträgers operationalisiert.¹⁾ Grundsätzlich lassen sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht Höhen-, Arten-, Risiko-, Zeit-, Sozial- und Gruppenpräferenzen unterscheiden. Das Tourenplanungsmodell, das hier vorgestellt wird, erweist sich hinsichtlich seiner Zielfunktionen im Gegensatz zu den Restriktionen, die ein erhebliches Ausmaß an Komplexität erreichen, als relativ einfach strukturiert.

Es werden nur drei exemplarische Zielfunktionen betrachtet. Sie erstrecken sich in inhaltlicher Hinsicht auf die Tourengesamtlänge, die Tourengesamtleertonnenkilometer und die Tourengesamtemissionen als relevante *Zielvorstellungen*. Die berücksichtigten Zielvorstellungen können jedoch mit „hinreichender“ Phantasie nahezu beliebig vermehrt werden. Beispielsweise lässt sich vorstellen, zusätzliche Deckungsbeitrags- oder Renditeziele zu berücksichtigen.

Den Zielfunktionen des Tourenplanungsmodells liegen *Höhenpräferenzen* vom *Extremierungstyp* zugrunde, weil die jeweils betrachtete Zielgröße – d.h. die unabhängige Variable der Zielfunktion oder kurz: die Zielvariable²⁾ – zu *minimieren* ist. Da sich das Tourenplanungsmodell auf Extremierungsziele erstreckt, stellt es ein Entscheidungsmodell in der speziellen Variante eines *Optimierungsmodells* dar.

Die drei Zielfunktionen, die nachfolgend angeführt werden, gelten in alternativer Weise. Daher kann das Tourenplanungsmodell immer nur mit *einer* von den drei Zielfunktionen angewendet oder implementiert werden. Es liegt also ein simples, lediglich „mono-dimensionales“ Zielsystem vor.³⁾ Infolgedessen brauchen in einer zielbezogenen Variante des Tourenplanungsmodells keine verschiedenartigen Zielvorstellungen des Entscheidungsträgers berücksichtigt zu werden, sodass es

-
- 1) Die subjektiven Zielvorstellungen drücken *Zielinhalte* aus, während sich die Präferenzen *inhaltsindifferent* verhalten, also mit beliebigen Zielinhalten kombiniert werden können. Die Gesamtheit aus einer inhaltlich konkreten Zielvorstellung und eindeutigen Festlegungen aller Präferenzen stellt ein *Ziel* des Entscheidungsträgers dar. Das Entfallen oder Nichtwirksamwerden einer Präferenzart wird als „degenerierter“ Grenzfall der Präferenzfestlegung eingeschlossen. In der Regel handelt es sich bei dem Ziel des Entscheidungsträgers um ein *Formalziel*. Daher wird hier der Kürze halber nur von einem Ziel gesprochen. Jede *Zielfunktion* eines Entscheidungsmodells operationalisiert genau ein Ziel des Entscheidungsträgers, indem sie die zielspezifische Gesamtheit aus einer inhaltlich konkreten Zielvorstellung und eindeutigen Festlegungen aller Präferenzen in einer „operationalen“, formalsprachlich präzisierten Funktionsgestalt ausdrückt. Diese Zielfunktion gestattet es, die Erreichung eines Ziels quantitativ zu messen. Die *Zielerreichung* ist der Wert der unabhängigen Variable der Zielfunktion, die auch kurz als *Zielvariable* bezeichnet wird. Die Zielerreichung wird im Folgenden in synonyme Weise auch als Zielbeitrag bezeichnet.
 - 2) Bei dieser Zielvariable handelt es sich um eine besondere Variante der modellendogenen Variablen. Ihr minimaler (optimaler) Wert wird durch einen Algorithmus ermittelt, der auf das Tourenplanungsmodell angewendet wird und dabei aus der Menge aller zulässigen Modelllösungen mindestens eine optimale Modelllösung ermittelt (sofern das Tourenplanungsmodell mindestens eine zulässige Lösung besitzt, die Menge aller zulässigen Modelllösungen also nicht leer ist). Die Menge der optimalen Modelllösungen ist daher stets eine Teilmenge der Menge aller zulässigen Modelllösungen.
 - 3) Falls mehrere Zielfunktionen aus einem multi-dimensionalen Zielsystem zu einer „Super-Zielfunktion“ kombiniert werden sollen, ist auf Aggregationskonzepte wie den Analytic Hierarchy Process oder das Goal Programming zurückzugreifen. Diese komplexen Aggregationskonzepte für multiple Zielfunktionen bleiben aber späteren Erweiterungen des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells vorbehalten. Sie erfordern die Berücksichtigung von Artenpräferenzen, um die verschiedenartigen Zielvorstellungen des Entscheidungsträgers aggregieren („amalgamieren“) zu können.

auch nicht erforderlich ist, Zielbeiträge¹⁾ zur Erreichung verschiedenartiger Zielvorstellungen zu einer Gesamtzieelerreichung, wie z.B. einem „Gesamtnutzen“, zu aggregieren. Deshalb entfallen *Artenpräferenzen* für die Aggregation unterschiedlicher Zielarten.

Risiko-, Zeit-, Sozial- und Gruppenpräferenzen sind für das Tourenplanungsmodell ebenso wenig relevant. *Risikopräferenzen* entfallen, weil es sich um ein deterministisches Entscheidungsmodell handelt, in dem alle Entscheidungswirkungen und Umwelteinflüsse mit Sicherheit bekannt sind. *Zeitpräferenzen* spielen keine Rolle, da ein statisches Entscheidungsmodell vorliegt. Es wird nur ein zeitlich homogener Planungszeitraum betrachtet, der es nicht gestattet, zwischen Zeitpunkten oder Zeitintervallen für das Wirksamwerden von Zielbeiträgen zu unterscheiden. *Sozialpräferenzen* differenzieren das Nutzenempfinden eines Entscheidungsträgers je nachdem, für welche Personen einzelne Zielbeiträge wirksam werden. Auf diese Weise lassen sich z.B. Neid- und Altruismus-Effekte in das Nutzenkalkül eines Entscheidungsträgers einbeziehen. Sie werden hier aber nicht berücksichtigt. Schließlich entfallen auch *Gruppenpräferenzen*. Sie wären erforderlich, wenn die modellierten Entscheidungen von einer Gruppe von Entscheidungsträgern – z.B. einem Team oder einem Kollegium – gemeinsam getroffen werden und diese Entscheidungsträger unterschiedliche Zielvorstellungen oder Präferenzen verfolgen. Dann müssten die Zielbeiträge, die bei den einzelnen Entscheidungsträgern anfallen, noch zu einem Gruppenurteil über die Gesamtzieelerreichung aggregiert werden. Auch dies bleibt im Tourenplanungsmodell unbeachtlich, weil davon ausgegangen wird, dass entweder nur ein Entscheidungsträger die Tourenplanung durchführt oder zwar mehrere Entscheidungsträger daran beteiligt sind, die sich jedoch hinsichtlich ihrer Zielvorstellungen und Präferenzen nicht signifikant unterscheiden.

Im Folgenden werden die drei alternativen Zielfunktionen des Tourenplanungsmodells vorgestellt.²⁾ Da hierbei in größerem Ausmaß auf Konstrukte zurückgegriffen werden kann, die in den voranstehenden Kapiteln eingeführt wurden, lassen sich die Ausführungen zu den Zielfunktionen kompakt halten.

a) Minimierung der *TourenGesamtlänge* TGL:

$$\text{TGL}(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \quad (166)$$

Dabei bezeichnet $\text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q})$ die Länge einer Tour $T_{e,q}$, die als Tourlänge $\text{TL}_{e,q}$ schon an früherer Stelle – vgl. Formel (112) – definiert wurde:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \quad (167)$$

-
- 1) Ein Zielbeitrag ist ein konkreter Wert für die unabhängige Variable (Zielvariable) einer Zielfunktion. Mit dem Zielbeitrag wird also die Erreichung derjenigen Zielvorstellung eines Entscheidungsträgers gemessen, die mithilfe der jeweils betrachteten Zielfunktion in einem Entscheidungsmodell operationalisiert wurde.
 - 2) Dabei wird hinter der modellendogenen Variable, welche die unabhängige Variable einer Zielfunktion darstellt (Zielfunktionsvariable), der Übersichtlichkeit halber jeweils das Tupel (d.h. ein Zeilenvektor) derjenigen Entscheidungsvariablen angeführt, über die ein Entscheidungsträger disponieren kann, um die jeweils betrachtete Zielfunktion bestmöglich zu erfüllen.

oder äquivalent:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N sl_{i,j} \cdot \left(\sum_{p=1}^{P-1} x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \right) \quad (168)$$

Setzt man dies in die o.a. Zielfunktion gemäß Formel (164) ein, die Tourengesamtlänge TGL minimieren zu wollen, so folgt daraus:

$$TGL(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \rightarrow \min! \quad (169)$$

b) Minimierung der *Tourengesamtleertonnenkilometer* TGLTK:

$$TGLTK(\underline{x}, \underline{y}_{wag}, \underline{y}_{lok}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} LTK_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) \rightarrow \min! \quad (170)$$

Dabei bezeichnet $LTK_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})$ diejenigen Leertonnenkilometer, die auf einer Tour $T_{e,q}$ verursacht werden. Sie setzen sich aus den Leertonnen, die während eines p-ten Tourabschnitts zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tourpositionen p und p+1 anfallen, und der Länge dieses p-ten Tourabschnitts zusammen. Die Länge des p-ten Tourabschnitts ist gleich der Länge $sl_{i,j}$ derjenigen Gleisstrecke $s_{i,j}$, die vom Haltepunkt HP_i an der Tourposition p direkt zum Haltepunkt HP_j an der Tourposition p+1 führt. Es muss also gelten:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \quad LTK_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{Leertonnen auf dem p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ HP_i \text{ und } HP_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ HP_i \text{ und } HP_j \text{ [km]}}} \right) \quad (171)$$

Die Leertonnen $LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})$, die auf dem p-ten Tourabschnitt einer Tour $T_{e,q}$ zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tourpositionen p und p+1 anfallen, bestehen aus zwei Komponenten.

Die erste Leertonnenkomponente betrifft die nicht ausgeschöpften Anteile an den Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs. Sie wird daher als *güterwagenbezogene Leertonnenkomponente* bezeichnet. Sie erstreckt sich auf alle Güterwagen des Typs $GT_{sta,c}$ oder $GT_{gef,d}$, die in den Anzahlen $y_{sta,c,e,q}$ bzw. $y_{gef,d,e,q}$ an den Güterzug der Tour $T_{e,q}$ angekoppelt sind und die Ladungskapazitäten $lk_{sta,c}$ bzw. $lk_{gef,d}$ aufweisen. Derjenige Anteil an diesen Ladungskapazitäten, der nach Abzug der aktuellen Ladungsgewichte $lg_{sta,c,e,q,p}$ bzw. $lg_{gef,d,e,q,p}$ der Güterwagen im p-ten Tourabschnitt verbleibt, also nicht für den Transport von Gütern in Anspruch genommen wird, stellt die güterwagenbezogenen Leertonnen [to] dar, die im p-ten Tourabschnitt der Tour $T_{e,q}$ anfallen.

Die zweite Leertonnenkomponente betrifft die nicht ausgeschöpften Anteile an den Traktionskapazitäten der Lokomotiven¹⁾ eines Güterzugs. Sie wird daher als *lokomotivenbezogene Leertonnenkomponente* bezeichnet. Sie erstreckt sich auf alle Lokomotiven des Typs $LT_{die,a}$ oder $LT_{ele,b}$, die in den Anzahlen $y_{die,a,e,q}$ bzw. $y_{ele,b,e,q}$ den Güterzug der Tour $T_{e,q}$ ziehen und die maximalen Zugkräfte (Traktionskapazitäten) $zk_{die,a}$ bzw. $zk_{ele,b}$ aufweisen. Derjenige Anteil an diesen Traktionskapazitäten, der nach Abzug der Eigengewichte $eg_{sta,c}$ bzw. $eg_{gef,d}$ sowie der aktuellen Ladungsgewichte $lg_{sta,c,e,q,p}$ bzw. $lg_{gef,d,e,q,p}$ der Güterwagen im p-ten Tourabschnitt verbleibt, also nicht für den Transport von Gütern in Anspruch genommen wird, stellt die lokomotivenbezogenen Leertonnen [to] dar, die im p-ten Tourabschnitt der Tour $T_{e,q}$ anfallen.

Aufgrund der voranstehenden Erläuterungen ergeben sich die Leertonnen $LT_{e,q,p}(y_{wag,e,q}, y_{lok,e,q})$, die auf dem p-ten Tourabschnitt einer Tour $T_{e,q}$ zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tourpositionen p und p+1 anfallen, wie folgt:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1:$$

$$LT_{e,q,p}(y_{wag,e,q}, y_{lok,e,q}) = \dots$$

$$\left(\sum_{c=1}^C (y_{sta,c,e,q} \cdot lk_{sta,c}) - lg_{sta,c,e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef,d,e,q} \cdot lk_{gef,d}) - lg_{gef,d,e,q,p} \right) + \dots$$

nicht ausgeschöpfte Ladungskapazitäten der Güterwagen (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

(172)

$$\left(\left(\sum_{a=1}^A y_{die,a,e,q} \cdot zk_{die,a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele,b,e,q} \cdot zk_{ele,b} \right) - \dots \right) - \left(\left(\sum_{c=1}^C (y_{sta,c,e,q} \cdot eg_{sta,c}) + lg_{sta,c,e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef,d,e,q} \cdot eg_{gef,d}) + lg_{gef,d,e,q,p} \right) \right)$$

nicht ausgeschöpfte Traktionskapazitäten der Lokomotiven (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

Die Zielfunktion der Minimierung der Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK nimmt bereits „etwas komplexere“ Gestalt als die erstgenannte Zielfunktion an, lediglich die Tourengesamtlänge TGL zu minimieren. In konventionellen Tourenplanungsmodellen, wie z.B. dem früher vorgestellten Standardmodell der konventionellen Tourenplanung, beschränkt man sich jedoch in der Regel auf derart einfache Zielfunktionen wie die Minimierung der Tourengesamtlänge.

Allerdings kann die Komplexion der hier vorgestellten Zielfunktion, die Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK zu minimieren, noch weiter gesteigert werden. Insbesondere sind hier noch nicht diejenigen Leertonnenkilometer erfasst, die dadurch entstehen, dass ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ die höchstzulässige Zuglänge (Abmessungskapazität) nicht vollständig ausschöpft und daher –

1) In der Regel wird ein Güterzug von nur einer Lokomotive gezogen. Es wurde jedoch schon an früherer Stelle darauf hingewiesen, dass das Tourenplanungsmodell so flexibel ausgelegt ist, auch Güterzüge erfassen zu können, die jeweils von mehreren Lokomotiven unterschiedlichen Typs gezogen werden. Um solche Lokomotiv-Ensembles nicht auszuschließen, wird von vornherein von den Lokomotiven eines Güterzugs im Plural gesprochen – und zwar auch dann, wenn damit im Regelfall nur eine einzelne Lokomotive gemeint ist.

bei noch ausreichender Traktionskapazität seiner Lokomotive –um zusätzliche Güterwagen mit entsprechenden Ladungskapazitäten verlängert werden könnte.

c) Minimierung der *Tourengesamtmissionen* TGE:

$$\text{TGE}(\underline{x}, \underline{y}_{\text{wag}}, \underline{y}_{\text{lok}}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TE}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q}) \rightarrow \min! \quad (173)$$

Das Ziel, die Tourengesamtmissionen TGE zu minimieren, wird hier in exemplarischer Weise anhand von CO₂-Emissionen verdeutlicht¹⁾ und daher in der Einheit [kg CO₂] gemessen. Die Tourmissionen $\text{TE}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q})$, die durch eine Tour $T_{e,q}$ verursacht werden, sind die Summe aller CO₂-Emissionen, die jeweils auf dem p-ten Tourabschnitt einer Tour $T_{e,q}$ zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tourpositionen p und p+1 entstehen [kg CO₂] und über alle Tourabschnitte $p = 1, \dots, P-1$ der jeweils betroffenen Tour $T_{e,q}$ addiert werden.

Die CO₂-Emissionen eines p-ten Tourabschnitts setzen sich aus drei Komponenten zusammen. Sie bestehen erstens aus der *Länge* [km] dieses p-ten *Tourabschnitts*. Diese Länge wird durch die Länge $sl_{i,j}$ derjenigen Gleisstrecke $s_{i,j}$ gemessen, die vom Haltepunkt HP_i an der Tourposition p direkt zum Haltepunkt HP_j an der Tourposition p+1 führt. Zweitens ist das *effektive Zuggewicht* $\text{ZG}_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q})$ zu ermitteln [to], das der Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ im p-ten Tourabschnitt aufweist. Das effektive Zuggewicht besteht einerseits aus den Anzahlen $y_{\text{die},a,e,q}$ und $y_{\text{ele},b,e,q}$ der eingesetzten Diesel- bzw. Elektro-Lokomotiven und ihren Gesamtgewichten $gg_{\text{die},a}$ bzw. $gg_{\text{ele},b}$. Andererseits tragen zum effektiven Zuggewicht auch die Anzahlen $y_{\text{sta},c,e,q}$ und $y_{\text{gef},d,e,q}$ der angekoppelten Güterwagen und ihre aktuellen Gesamtgewichte im p-ten Tourabschnitt bei. Das aktuelle Gesamtgewicht aller Güterwagen vom Typ $\text{GT}_{\text{sta},c}$ oder $\text{GT}_{\text{gef},d}$ im p-ten Tourabschnitt ist die Summe aus ihren Eigengewichten $eg_{\text{sta},c}$ bzw. $eg_{\text{gef},d}$ und dem aktuellen Ladungsgewicht $lg_{\text{sta},c,e,q,p}$ bzw. $lg_{\text{gef},d,e,q,p}$ für diese Güterwagen. Drittens sind die *Durchschnittsemissionen* $\text{DE}_{e,q}(\underline{y}_{\text{lok},e,q})$ je Tonnenkilometer zu beachten [kg CO₂ / to·km], die von den Lokomotiven verursacht werden, die den Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ ziehen. Diese Durchschnittsemissionen hängen maßgeblich von den durchschnittlichen CO₂-Emissionen je Tonnenkilometer $dce_{\text{die},a}$ und $dce_{\text{ele},b}$ ab, die beim Einsatz einer Diesel-Lokomotive vom Typ $\text{LT}_{\text{die},a}$ bzw. von einer Elektro-Lokomotive vom Typ $\text{LT}_{\text{ele},b}$ entstehen.

1) Wenn mehrere Emissionsarten berücksichtigt werden sollen, wie z.B. neben den o.a. CO₂-Emissionen auch NO_x-Emissionen, dann müssen die Tourengesamtmissionen TGE und die zugrunde liegenden Größen jeweils mit entsprechenden Indizes hinsichtlich der betroffenen Emissionsarten unterschieden werden: also z.B. Tourengesamtmissionen TGE_{CO_2} versus Tourengesamtmissionen TGE_{NO_x} .

Aus den voranstehenden Erläuterungen ergibt sich für die Touremissionen $TE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})$, die auf einer Tour $T_{e,q}$ verursacht werden:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$LE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots \tag{174}$$

$$\sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \cdot \underbrace{ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{effektives Zuggewicht} \\ \text{im p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{durchschnittliche} \\ \text{CO}_2\text{-Emissionen} \\ \text{je Tonnenkilometer} \\ \text{[kg CO}_2 / \text{to} \cdot \text{km]}}} \right)$$

mit dem effektiven Zuggewicht $ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})$ im p-ten Tourabschnitt der Tour $T_{e,q}$:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1 :$$

$$\begin{aligned} ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = & \left(\sum_{a=1}^A y_{die,a,e,q} \cdot gg_{die,a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele,b,e,q} \cdot gg_{ele,b} \right) \\ & + \left(\sum_{c=1}^C (y_{sta,c,e,q} \cdot eg_{sta,c}) + lg_{sta,c,e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef,d,e,q} \cdot eg_{gef,d}) + lg_{gef,d,e,q,p} \right) \end{aligned} \tag{175}$$

und mit den Durchschnittsemissionen $DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q})$ je Tonnenkilometer für die Tour $T_{e,q}$:

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q}) = \left(\sum_{a=1}^A y_{die,a,e,q} \cdot dce_{die,a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele,b,e,q} \cdot dce_{ele,b} \right) \tag{176}$$

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die voranstehende mathematische Modellformulierung für die Zielfunktion in eine computergestützte Modellformulierung überführen lässt, die mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO realisiert wird. Dabei wird abermals auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn Bezug genommen.

Von den o.a. drei alternativen Zielfunktionen wurde bisher nur die zuerst angeführte Zielfunktion implementiert, die Tourengesamtlänge TGL zu minimieren. Sie ist aufgrund ihrer Einfachheit besonders gut geeignet, die wesentlichen Konstrukte zu verdeutlichen, die in der mathematischen Modellierungssoftware LINGO für die Implementierung von Zielfunktionen erforderlich sind. Die nachfolgende Abbildung 33 zeigt den vorläufig letzten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt dient einerseits dazu, um in der SUBMODEL-Sektion die Zielfunktion der Minimierung der Tourengesamtlänge zu spezifizieren. Andererseits umfasst er auch eine CALC-Sektion, in der mithilfe des @SOLVE-Kommandos die Solver-Komponente von LINGO aufgerufen wird. Diese Solver-Komponente stellt

Standard-Algorithmen des Operations Research zur Verfügung, um die – mindestens eine¹⁾ – gesuchte optimale Modelllösung aufzufinden, bei der die TourenGesamtlänge ein globales Minimum annimmt. Diese CALC-Sektion ist in Verbindung mit der SUBMODEL-Sektion so flexibel ausgelegt, dass später spezielle Modellauswertungen ergänzt werden können. Dazu gehört z.B. die Ausgabe der generierten Modelllösung in einem besonders benutzerfreundlichen Format mithilfe des @WRITE-Kommandos. Darüber hinaus ermöglicht es die @Status-Funktion, die Qualität der generierten Modelllösung zu analysieren. Beispielsweise gestattet sie auszugeben, ob es sich bei der Modelllösung um eine zulässige, eine lokal optimale oder eine global optimale Modelllösung handelt.

SUBMODEL Modellkern:

! das nachfolgende Konstrukt dient zur Implementierung der Formel

$$TGL(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \text{ für die TourenGesamtlänge TGL;}$$

Gesamtlaenge_aller_Touren = @SUM(Tour(e,q): Tourlaenge(e,q));

! es folgt die Zielfunktion des OR-Modells für die Minimierung der TourenGesamtlänge TGL;

MIN = Gesamtlaenge_aller_Touren;

ENDSUBMODEL

CALC:

@SOLVE(Modellkern);

ENDCALC

Abbildung 33: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell

zur vorläufigen Spezifizierung der Zielfunktion und zur Ermittlung einer optimalen Modelllösung

Allerdings zeigt sich *Überraschendes*²⁾, wenn die mathematische Modellierungssoftware LINGO auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn hinsichtlich der Zielfunktion, die TourenGesamtlänge TGL zu minimieren, angewendet wird. Zwar wird von der Solver-Komponente korrekt eine optimale Modelllösung mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (1,2,4,3,4,1,0)$ ermittelt. Sie ent-

-
- 1) Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive wäre es wünschenswert, *alle* optimalen Modelllösungen zu generieren (sofern das zugrunde liegende Modell konsistent spezifiziert ist, also mindestens eine optimale Modelllösung existiert). Dazu ist die mathematische Modellierungssoftware LINGO jedoch *nicht* in der Lage. Stattdessen generiert sie nur *genau eine* optimale Modelllösung, und zwar unabhängig davon, ob tatsächlich nur eine optimale Modelllösung existiert oder aber mehrere optimale Modelllösungen existieren.
 - 2) Die anschließenden Erläuterungen lassen in exemplarischer Weise erkennen, dass die *computergestützte* Implementierung einer mathematischen Modellformulierung einen kaum zu unterschätzenden *heuristischen* Wert besitzt. Oftmals werden erst durch das *Experimentieren* mit der computergestützten Modellformulierung überraschende Ergebnisse erzielt, die aufgrund der „bloßen“ Anschauung der mathematischen Modellformulierung nicht erwartet wurden. Daher vertreten die Verfasser dieses Projektberichts entschieden die Ansicht, dass jede mathematische Modellformulierung mithilfe einer mathematischen Modellierungssoftware implementiert werden sollte, um durch computergestützte, letztlich experimentelle Modellanalysen erkunden zu können, ob – im Hinblick auf das jeweils zugrunde liegende Realproblem – relevante Modellaspekte übersehen wurden.

spricht der Haltepunkt-Folge $(HP_1, HP_2, HP_4, HP_3, HP_4, HP_1, HP_0)^{1)}$ mit der minimalen Touren-
gesamtlänge $TGL^* = 917$ [km]. Jedoch erweist sich die optimale Modelllösung, die von der ma-
thematischen Modellierungssoftware LINGO generiert wird, bei näherer Betrachtung als *kontra-*
intuitiv. Dies wird im Folgenden kurz verdeutlicht.

Im praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn müssen Gütermengen vom Haltepunkt
 HP_2 zum Haltepunkt HP_4 , vom Haltepunkt HP_3 zum Haltepunkt HP_4 und vom Haltepunkt HP_4 zum
Haltepunkt HP_1 transportiert werden. Dabei wird präsupponiert, also nur implizit vorausgesetzt,
dass die Gütermengen jeweils über kürzestmögliche Distanzen transportiert werden. Dies bedeutet,
dass eine Gütermenge, mit der ein Güterzug im Haltepunkt HP_i (Beladungshaltepunkt) auf seiner
Tour $T_{e,q}$ an einer Position p beladen wird ($z_{b_{sta.c.i.e.q,p}} = 1$ oder $z_{b_{gef.d.i.e.q,p}} = 1$) und die im Halte-
punkt HP_j (Entladungshaltepunkt) an einer Position r mit $r > p$ zu entladen ist ($z_{e_{sta.c.i.j.e.q,r}} = 1$ oder
 $z_{e_{gef.d.i.j.e.q,r}} = 1$), an derjenigen Position r entladen wird, die auf der Tour $T_{e,q}$ den kürzestmöglichen
Positionsabstand $r-p$ von der Position p des Beladungshaltepunkts HP_i hat. Diese „selbstverständ-
lich“ anmutende Präsupposition braucht jedoch keineswegs erfüllt zu sein. Dies liegt daran, dass die
Prämisse der Subzyklenfreiheit aus dem Standardmodell der konventionellen Tourenplanung im
Hinblick auf das hier interessierende Realproblem aufgegeben wurde. Infolge der Zulässigkeit von
Subzyklen kann der Entladungshaltepunkt HP_j von einem Güterzug während seiner Tour $T_{e,q}$ nach
dem Beladungshaltepunkt HP_i *mehrfach* angefahren werden. Daher besteht der Freiheitsgrad, die
Gütermenge, mit welcher der Güterzug im Haltepunkt HP_i beladen wurde, entweder beim ersten Er-
reichen des Entladungshaltepunkts HP_j oder erst beim zweiten oder bei einem noch späterem Errei-
chen des Entladungshaltepunkts HP_j zu entladen.

Der o.a. Präsupposition, dass die Gütermengen jeweils über kürzestmögliche Distanzen transportiert
werden, entspricht die Entladung der transportierten Gütermenge beim *ersten* Erreichen des Entla-
dungshaltepunkts HP_j . Wenn diese Präsupposition verletzt wird, wird dieser Entladungshaltepunkt
 HP_j beim ersten Mal *durchfahren* und die transportierte Gütermenge wird dort erst beim *zweiten* –
oder einem noch späteren – Erreichen dieses Entladungshaltepunkts HP_j entladen. Ein solches
Durchfahren eines Entladungshaltepunkts HP_j kann bei speziellen Realproblemkonstellationen
durchaus wirtschaftlich vorteilhaft sein. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn die Be- oder Entladeakti-
vitäten, die in einem mehrfach angefahrenen Haltepunkt geplant sind, in zeit- und rüstkostenparen-
der Weise so zusammengefasst werden, dass sie bei genau einer Anfahrt dieses Haltepunkts durch-
geführt werden. Von solchen Sonderfällen wird hier jedoch zunächst abgesehen. Dies entspricht der
oben erläuterten – und bislang präsupponierten – Intuition, dass alle Gütermengen jeweils über kür-
zestmögliche Distanzen transportiert werden und somit nach dem Verlassen ihres Beladungshalte-
punkts HP_i beim ersten Erreichen ihres Entladungshaltepunkts HP_j tatsächlich entladen werden.

1) Der Haltepunkt HP_0 entspricht keinem realen Haltepunkt HP_n mit $n = 1, \dots, N$. Vielmehr handelt es sich um ein
modellierungstechnisches Artefakt, das allen Positionen des Tourvektors $TV_{e,q}$ entspricht, die auf das Tourende
mit dem Positionsindex p^* folgen (hier gilt $p^* = 6$). Dieses Artefakt HP_0 ist nur dann erforderlich, wenn die Halte-
punkt-Folge, die einem Tourvektor $TV_{e,q}$ entspricht, mit der gleichen Anzahl von P Komponenten wie der Tour-
vektor $TV_{e,q}$ dargestellt werden soll. Andernfalls, wenn diese Gleichstelligkeitsforderung nicht erhoben wird, kann
auf das Artefakt HP_0 verzichtet werden. In diesem Fall lässt sich die o.a. Haltepunkt-Folge „artefaktfrei“ darstellen
als: $(HP_1, HP_2, HP_4, HP_3, HP_4, HP_1)$.

Dieser Intuition widerspricht jedoch die optimale Modelllösung, die von der mathematischen Modellierungssoftware LINGO mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (1,2,4,3,4,1,0)$ und der entsprechenden Haltepunkt-Folge $(HP_1, HP_2, HP_4, HP_3, HP_4, HP_1, HP_0)$ generiert wird. Denn bei dieser Modelllösung wird sowohl beim Transport derjenigen Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_2 zum Haltepunkt HP_4 zu transportieren ist, als auch beim Transport derjenigen Gütermenge, die vom Haltepunkt HP_4 zum Haltepunkt HP_1 transportiert werden soll, der Haltepunkt HP_4 jeweils einmal durchfahren, ohne dort die betroffene Gütermenge zu entladen bzw. zu beladen. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung 34 verdeutlicht. Sie gibt die Haltepunkt-Folge $(HP_1, HP_2, HP_4, HP_3, HP_4, HP_1, HP_0)$ der optimalen Modelllösung mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (1,2,4,3,4,1,0)$ der Übersichtlichkeit halber „artefaktfrei“, also nur bis zum Ziel-Haltepunkt HP_1 der Tour $T_{e,q}$ mit dem Positionsindex $p^* = 6$ für das Tourende wieder. Dafür geben aber in der Abbildung 34 zusätzliche, jeweils mit unterbrochenen Linien dargestellte Pfeile an, in welchem Haltepunkt am Pfeilursprung eine Gütermenge beladen und in welchem Haltepunkt an der Pfeilspitze eine Gütermenge entladen wird. Auf diese Weise wird unmittelbar ersichtlich, dass der Haltepunkt HP_4 einmal ohne Entladung (der Haltepunkt HP_4 an der dritten Tourposition für den Transport einer Gütermenge vom Beladungshaltepunkt HP_2 zum Entladungshaltepunkt HP_4) und ein weiteres Mal ohne Beladung (der Haltepunkt HP_4 an der fünften Tourposition für den Transport einer Gütermenge vom Beladungshaltepunkt HP_4 zum Entladungshaltepunkt HP_1) durchfahren wird.

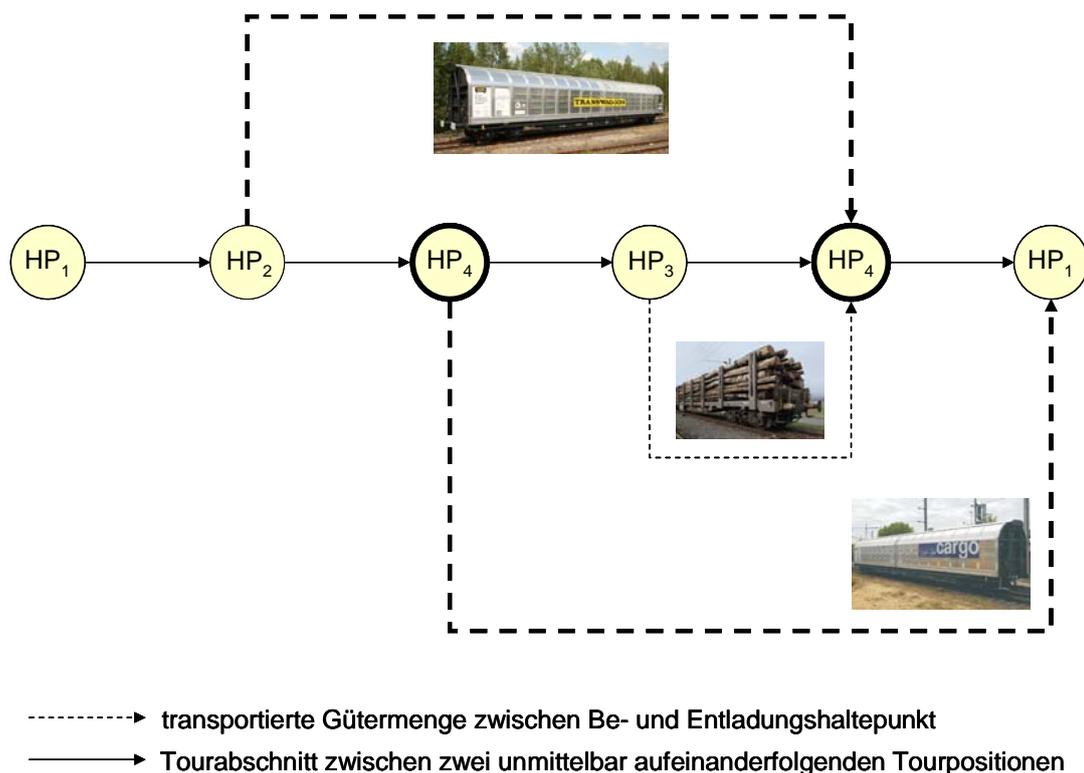


Abbildung 34: Tour $T_{e,q}$ mit minimaler Tourengesamtlänge TGL und mit Durchfahrten des Haltepunkts HP_4

Wenn eine zwar optimale, aber derart kontraintuitive Modelllösung verhindert werden soll, muss die Intuition, dass alle Gütermengen jeweils über kürzestmögliche Distanzen transportiert werden, zum Tourenplanungsmodell als eine explizite Prämisse hinzugefügt werden. Diese *Prämisse kürzestmöglicher Transportdistanzen* lässt sich durch zwei Erweiterungen des bislang vorgestellten Tourenplanungsmodells erfassen.

Erstens muss der *Positionsabstand* $r-p$ zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten einer Gütermenge, mit der ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ im Haltepunkt HP_i an einer Position p beladen wird und die im Haltepunkt HP_j an einer Position r mit $r > p$ zu entladen ist, explizit erfasst werden. Dies geschieht durch die beiden nachfolgenden Formeln für den Transport von entweder Standard- oder aber Gefahrgütern:

$$zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p \quad (177)$$

$$zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p \quad (178)$$

Die beiden o.a. Differenzterme sind so konstruiert, dass ihre Produkte $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ bzw. $zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ nur dann den Wert 1 annehmen, wenn ein Güterzug im Haltepunkt HP_i auf seiner Tour $T_{e,q}$ an einer Position p mit einer Gütermenge beladen wird, die im Haltepunkt HP_j an einer Position r mit $r > p$ zu entladen ist. Falls diese Produkte jeweils den Wert 1 annehmen, gilt für die beiden o.a. Differenzterme jeweils $r-p$, sodass die Differenzterme tatsächlich den Positionsabstand $r-p$ zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten der jeweils zu transportierenden Gütermenge darstellen.

Zweitens muss zur Erfüllung der Prämisse *kürzestmöglicher* Transportdistanzen sichergestellt werden, dass sich der Beladungshaltepunkt HP_i und der Entladungshaltepunkt HP_j für eine zu transportierende Gütermenge im Tourvektor $TV_{e,q}$ einer Tour $T_{e,q}$ so nahe wie möglich benachbart sind. Dies wird erreicht, wenn nicht nur die Tourengesamtlänge, sondern auch die *Summe* aller Positionsabstände $r-p$ zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten jeweils einer Gütermenge *minimiert* wird. Diese Positionsabstandesumme PAS zwischen den Be- und Entladungshaltepunkten von zu transportierenden Gütermengen lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned} \text{PAS}(\underline{z}) = & \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p \right) \\ & + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_c} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p \right) \end{aligned} \quad (179)$$

Die simultane Verfolgung zweier Minimierungsziele führt zu neuartigen Komplikationen, weil optimale Modelllösungen für ein Tourenplanungsmodell der hier vorgestellten Art nur für monodimensionale Zielsysteme mit nur einer Zielfunktion definiert sind. Der naheliegende Ansatz, die Summe aus Tourengesamtlänge TGL und Positionsabstandesumme PAS zu minimieren, kann zu Fehlern führen, weil diese Summe ein Minimum anzunehmen vermag, obwohl die Tourengesamtlänge TGL nicht optimal ist, also den o.a. minimalen Wert von $TGL^* = 917$ [km] überschreitet.

Solche Fehler lassen sich vermeiden, wenn sichergestellt ist, dass die Tourengesamtlänge TGL nur ganzzahlige Werte anzunehmen vermag¹⁾ und ein zu addierender Korrekturterm zur Berücksichtigung der Positionsabstandesumme PAS im reellzahligen Intervall $[0;1[$ liegt. Unter diesen Voraussetzungen kann der Korrekturterm zur Berücksichtigung der Positionsabstandesumme PAS das Auffinden der minimalen Tourengesamtlänge TGL^* nicht verhindern, aber zugleich dafür sorgen,

1) Es wird davon ausgegangen, dass diese Ganzzahligkeitsprämisse im Tourenplanungsmodell immer erfüllt ist. Dies wird dadurch erreicht, dass alle Längen von Gleisstrecken zwischen zwei Haltepunkten, die im zugrunde liegenden Verkehrsnetz unmittelbar benachbart sind, als *ganzzahlige* Vielfache einer Maßeinheit für die Gleisstreckenlänge – wie z.B. „Kilometer“ [km] – erfasst werden.

dass Gütermengen nach dem Verlassen ihres Beladungshaltepunkts HP_i beim ersten Erreichen ihres Entladungshaltepunkts HP_j tatsächlich entladen werden. Auf diese Weise wird verhindert, dass ein Be- oder Entladungshaltepunkt durchfahren wird, ohne die dort vorgesehenen Be- bzw. Entladungsaktivitäten durchzuführen. Dadurch resultiert also eine *minimale* und zugleich *durchfahrtsfreie* Tourengesamtlänge TGL_{dff} .

Die Anforderung, dass ein zu addierender Korrekturterm zur Berücksichtigung der Positionsabstandesumme PAS im reellzahligen Intervall $[0;1[$ liegt, lässt sich dadurch erfüllen, dass die tatsächliche Positionsabstandesumme PAS für alle zulässigen Touren $T_{e,q}$ durch einen Wert $PAS_{\text{grö}}$ dividiert wird, der mit Sicherheit größer ist als derjenige Wert, der durch die Positionsabstandesumme PAS für alle zulässigen Touren $T_{e,q}$ jemals angenommen werden kann. Dieser mit Sicherheit größere Wert $PAS_{\text{grö}}$ beträgt bei Touren $T_{e,q}$, die jeweils die Positionen $p = 1, \dots, P$ umfassen, und bei insgesamt E Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e , die jeweils maximal Q_e Touren durchführen können:¹⁾

$$PAS_{\text{grö}} = (P-1) \cdot (P-1) \cdot \sum_{e=1}^E Q_e \quad (180)$$

Angesichts der voranstehenden Erläuterungen lässt sich im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell die Tourengesamtlänge TGL minimieren und gleichzeitig gewährleisten, dass Gütermengen zwischen ihren Beladungshaltepunkten HP_i und ihren Entladungshaltepunkten HP_j über kürzestmögliche Distanzen transportiert werden, sodass überflüssige Durchfahrten durch Be- oder Entladungshaltepunkte vermieden werden, indem folgende Zielfunktion für die minimale und zugleich *durchfahrtsfreie Tourengesamtlänge* TGL_{dff} aufgestellt wird:

$$TGL_{\text{dff}}(\underline{x}, \underline{z}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) + \frac{PAS(\underline{z})}{PAS_{\text{grö}}} \rightarrow \min! \quad (181)$$

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt den endgültig letzten Ausschnitt aus dem LINGO-Modell, das später im Kapitel 7.3.2 vollständig wiedergegeben wird. Der Modellausschnitt dient dazu, um in der SUBMODEL-Sektion die Zielfunktion der Minimierung der durchfahrtsfreien Tourengesamtlänge zu spezifizieren.

SUBMODEL Modellkern:

! das nachfolgende Konstrukt dient zur Implementierung der Formel

$$TGL(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \text{ für die Tourengesamtlänge TGL;}$$

Gesamtlänge_aller_Touren = @SUM(Tour(e,q): Tourlaenge(e,q));

1) Eine einzelne Tour $T_{e,q}$ umfasst höchstens P Haltepunkte HP_n an den Tourpositionen $p = 1, \dots, P$. Zwischen diesen höchstens P Haltepunkten HP_n sind höchstens $P-1$ Positionsabstände definiert. Ein *einzelner* Positionsabstand zwischen zwei Haltepunkten derselben Tour $T_{e,q}$ beträgt bei insgesamt P Tourpositionen $p = 1, \dots, P$ maximal $P-1$, in zahlreichen (genau: $P-2$) Fällen sogar weniger als $P-1$. Daher ist die Positionsabstandesumme PAS für eine einzelne Tour $T_{e,q}$ auf jeden Fall *kleiner* als $(P-1) \cdot (P-1)$. Bei einer Anzahl von E Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mit $e = 1, \dots, E$, von denen jedes im Planungszeitraum maximal Q_e Touren durchzuführen vermag, kommen im Planungszeitraum insgesamt $\sum_{e=1}^E Q_e$ Touren in Betracht. Folglich ist das Produkt $(P-1) \cdot (P-1) \cdot \sum_{e=1}^E Q_e$ mit Sicherheit *größer* als die Positionsabstandesumme PAS für alle zulässigen Touren $T_{e,q}$, die im Planungszeitraum von allen Eisenbahnverkehrsunternehmen durchgeführt werden können.

! es folgt die Zielfunktion des OR-Modells für die Minimierung der Tourengesamtlänge TGL;

$$\text{MIN} = \text{Gesamtlaenge_aller_Touren} + (\text{Positionsabstaende_Be_Entladen} / (\text{Anzahl_max_Tourpositionen_minEin} * \text{Anzahl_max_Tourpositionen_minEin} * @\text{SUM}(\text{Eisenbahnverkehrsunternehmen}(e): \text{Anzahl_max_Touren}(e)));$$

ENDSUBMODEL

CALC:

@SOLVE(Modellkern);

ENDCALC

Abbildung 35: Ausschnitt aus dem LINGO-Modell

zur endgültigen Spezifizierung der Zielfunktion und zur Ermittlung einer optimalen Modelllösung

Mithilfe der Zielfunktion aus der voranstehenden Abbildung 35 wird der Intuition entsprochen, dass alle Gütermengen jeweils über kürzestmögliche Distanzen transportiert werden. Dadurch wird die Prämisse kürzestmöglicher Transportdistanzen erfüllt. Dies verdeutlicht die nachfolgende Abbildung 36. Sie zeigt, dass der Haltepunkt HP₄ – im Gegensatz zur o.a. optimalen Modelllösung gemäß Abbildung 34 – gemäß der „artefaktfreien“ Haltepunkt-Folge (HP₁, HP₂, HP₄, HP₃, HP₄, HP₁) einer optimalen Modelllösung mit dem Tourvektor TV_{e,q} = (1,2,4,3,4,1,0) *nicht* ohne Ent- oder Beladung *durchfahren* wird. Dennoch wird weiterhin die minimale Tourengesamtlänge von TGL* = 917 [km] realisiert.

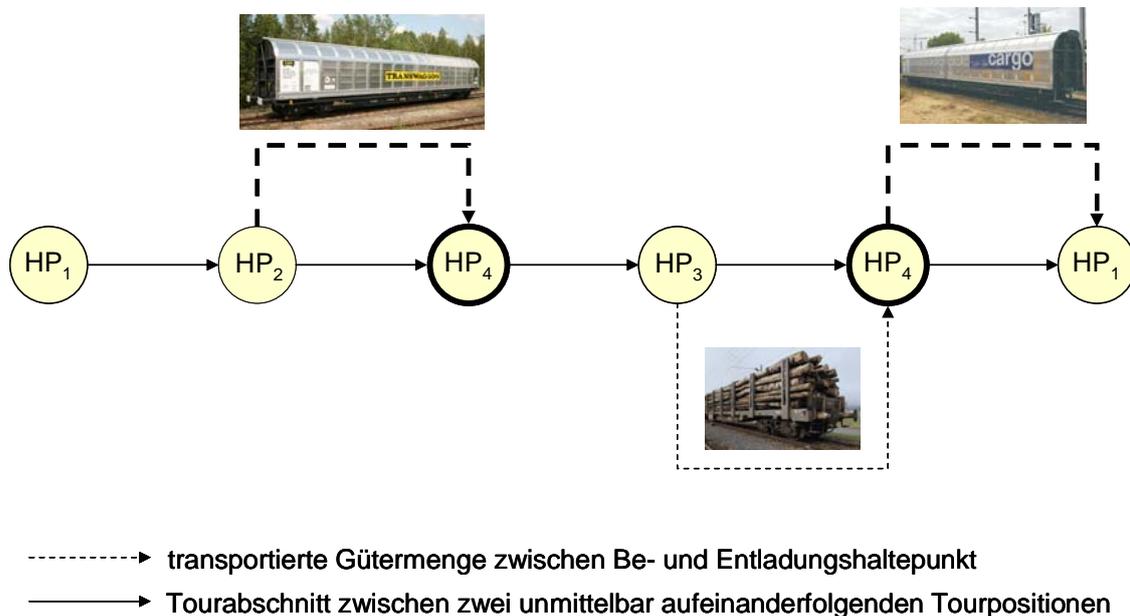


Abbildung 36: Tour T_{e,q} mit minimaler und durchfahrtenfreier Tourengesamtlänge TGL_{diff}

Bei anderen Zielfunktionen, wie z.B. der Minimierung der Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK und der Minimierung der Tourengesamtemissionen TGE, lässt sich nicht generell festlegen, ob Durchfahrten durch Be- oder Entladungshaltepunkte stets vermieden werden sollen. Wenn eine solche Durchfahrtenvermeidung sachlich geboten erscheint, können die anderen Zielfunktionen um den additiven Korrekturterm PAS(z) / PAS_{grö} so erweitert werden, wie es oben in Formel (181) verdeutlicht wurde. Stattdessen lässt sich aber auch vorstellen, dass überflüssige Durchfahrten durch die spezielle Formulierung einer Zielfunktion quasi „en passant“ vermieden werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn die Tourengesamtemissionen TGE minimiert werden sollen und

Durchfahrten dazu führen, dass aus den zu früh beladenen oder der zu spät entladenen Gütermengen überflüssige Ladungsgewichte resultieren, welche die transportbedingten Treibhausgasemissionen einer Tour unnötig erhöhen. In diesem Fall sorgt das Formalziel der Minimierung der Tourengesamtmissionen TGE dafür, dass überflüssige Durchfahrten „automatisch“ vermieden werden.

7.3 Gesamtdarstellung des Tourenplanungsmodells

7.3.1 Mathematische Modellformulierungen

Für das Tourenplanungsmodell, das im hier vorgelegten Projektbericht vorgestellt wird, existieren mehrere Varianten in Abhängigkeit davon, welche Formulierungsalternativen für einzelne Modellkonstrukte jeweils bevorzugt werden. Es besteht nicht die Absicht, die Vielfalt dieser Modellvarianten vollständig zu entfalten. Stattdessen werden in exemplarischer Weise nur drei Modellvarianten betrachtet, die sich relativ stark voneinander unterscheiden.

Einerseits handelt es sich um das *Tourenplanungsmodell* in seiner *einfacheren Form*, in der es nur reale Touren gibt. Die besonderen Komplikationen, die aus der Zulässigkeit von artifiziellen Touren mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ resultieren können, bleiben daher außer Acht. Hinsichtlich dieser einfacheren Form des Tourenplanungsmodells, in der es *nur reale Touren* gibt, werden zwei Modellvarianten unterschieden: Bei der ersten Modellvariante wird eine logisch ausgerichtete Formelnotation bevorzugt. Diese *formallogische Notationsweise* erweist sich nach Einschätzung der Verfasser als besonders transparent, weil die zugrunde liegenden sachlogischen Zusammenhänge aus dem zugrunde liegenden Realproblem mit entsprechenden formalsprachlichen Konstrukten, wie z.B. in der Gestalt von Subjugaten, ausgedrückt werden. Die zweite Modellvariante verwendet dagegen einige „trickreiche“ Ersatzkonstruktionen, mit denen formallogische Junktoren innerhalb der Formeln – bis auf den simplen Junktor „ \wedge “ für ein Konjugat¹⁾ – vollständig vermieden werden. Diese *mathematische Notationsweise* wird im Rahmen des Operations Research bevorzugt, um Modelle in einer mathematisch vertrauten und – im Gegensatz zur formallogischen Notationsweise – relativ leicht zu implementierenden Form darzustellen. Daher dient die zweite Variante des Tourenplanungsmodells vor allem dazu, es in einer Form aufzubereiten, welche die Anschlussfähigkeit zu Fachliteratur im Bereich des Operations Research herstellt.

Andererseits wird auch eine *komplexere Form* des *Tourenplanungsmodells* angeführt, in der *artifizielle Touren erlaubt* sind. Diese dritte Variante des Tourenplanungsmodells wird von vornherein mittels der mathematischen Notationsweise formuliert.

Im Folgenden werden die Formulierungen für die drei vorgenannten Varianten des Tourenplanungsmodells jeweils vollständig präsentiert.²⁾

-
- 1) Jede Konjugat-Formel lässt sich ohne Schwierigkeiten in zwei Teilformeln zerlegen, die nur noch entweder aus dem „linken“ oder aber dem „rechten“ Teil der früheren Konjugat-Formel bestehen und selbst „konjugat-frei“ sind. Diese Formelzerlegung bereitet keine Schwierigkeiten, weil in der mathematischen Notationsweise, in der Modelle des Operations Research im Allgemeinen formuliert werden, für alle Teilformeln implizit vorausgesetzt (präsupponiert) wird, dass sie auf konjunktive Weise – also in der logischen Form eines Konjugats – miteinander verknüpft sind.
 - 2) Innerhalb jeder Modellvariante wurde an einigen Stellen eine Auswahl aus mehreren, alternativ in Betracht kommenden Formulierungen für einzelne Modellkonstrukte getroffen. Darauf wird hier nicht mehr näher eingegangen, sondern auf die Erläuterungen dieser Formulierungsalternativen in den voranstehenden Kapiteln verwiesen.

Begonnen wird mit der Formulierung des Tourenplanungsmodells in der *ersten Variante*, die *keine* *artifizialen Touren* erlaubt und sich der *formallogischen Notationsweise* bedient. Diese Modellvariante wird in der Abbildung 37 dargestellt, die sich über die nächsten Seiten erstreckt.

a) Zielfunktion

a1) *entweder* Minimierung der Tourengesamtlänge TGL:

$$TGL(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \quad (182)$$

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

a2) *oder* Minimierung der durchfahrtenfreien Tourengesamtlänge TGL*:

$$TGL^*(\underline{x}, \underline{z}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) + \frac{PAS(\underline{z})}{PAS_{gr\ddot{o}}} \rightarrow \min! \quad (183)$$

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{z} = (\underline{z}b_{sta}, \underline{z}b_{gef}, \underline{z}e_{sta}, \underline{z}e_{gef})$$

$$\begin{aligned} \underline{z}b_{sta} &= (zb_{sta.c.i.e.q,p} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ &= (zb_{sta.1.1.1.1.1}, \dots, zb_{sta.C.N.E.Q_e.P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}b_{gef} &= (zb_{gef.d.i.e.q,p} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ &= (zb_{gef.1.1.1.1.1}, \dots, zb_{gef.D.N.E.Q_e.P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}e_{sta} &= (ze_{sta.c.i.j.e.q,r} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ &= (ze_{sta.1.1.1.1.1.1}, \dots, ze_{sta.C.N.N.E.Q_e.P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}e_{gef} &= (ze_{gef.d.i.j.e.q,r} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ &= (ze_{gef.1.1.1.1.1.1}, \dots, ze_{gef.D.N.N.E.Q_e.P}) \end{aligned}$$

a3) *oder* Minimierung der Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK:

$$TGLTK(\underline{x}, \underline{y}_{wag}, \underline{y}_{lok}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} LTK_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag.e,q}, \underline{y}_{lok.e,q}) \rightarrow \min! \quad (184)$$

$\forall e=1, \dots, E \quad \forall q=1, \dots, Q_e$:

$$LTK_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag.e,q}, \underline{y}_{lok.e,q}) = \sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag.e,q}, \underline{y}_{lok.e,q})}_{\text{Leertonnen auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [to]}} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts zwischen den Haltepunkten HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [km]}} \right) \quad (185)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1:$$

$$LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots$$

$$\left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot lk_{sta.c}) - lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot lk_{gef.d}) - lg_{gef.d.e,q,p} \right) + \dots$$

nicht ausgeschöpfte Ladungskapazitäten der Güterwagen (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

(186)

$$\left(\left(\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} \cdot zk_{die.a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \cdot zk_{ele.b} \right) - \dots \right. \\ \left. \left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot eg_{sta.c}) + lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot eg_{gef.d}) + lg_{gef.d.e,q,p} \right) \right)$$

nicht ausgeschöpfte Traktionskapazitäten der Lokomotiven (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{lok} = (y_{die.1.1.1}, \dots, y_{die.A.E.Q_e}, y_{ele.1.1.1}, \dots, y_{ele.B.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{lok,e,q} = (y_{die.1.e,q}, \dots, y_{die.A.e,q}, y_{ele.1.e,q}, \dots, y_{ele.B.e,q})$$

$$\underline{y}_{wag} = (y_{sta.1.1.1}, \dots, y_{sta.C.E.Q_e}, y_{gef.1.1.1}, \dots, y_{gef.D.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{wag,e,q} = (y_{sta.1.e,q}, \dots, y_{sta.C.e,q}, y_{gef.1.e,q}, \dots, y_{gef.D.e,q})$$

a4) oder Minimierung der Tourengesamemissionen TGE:

$$TGE(\underline{x}, \underline{y}_{wag}, \underline{y}_{lok}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) \rightarrow \min! \quad (187)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$LE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots \quad (188)$$

$$\sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \cdot \underbrace{ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{effektives Zuggewicht} \\ \text{im p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{durchschnittliche} \\ \text{CO}_2\text{-Emissionen} \\ \text{je Tonnenkilometer} \\ \text{[kg CO}_2 \text{ / to} \cdot \text{km]}}} \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1:$$

$$\begin{aligned} ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag.e.q}}, \underline{y}_{\text{lok.e.q}}) &= \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{ele.b}} \right) \\ &+ \left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{sta.c}}) + \mathbf{lg}_{\text{sta.c.e.q,p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{gef.d}}) + \mathbf{lg}_{\text{gef.d.e.q,p}} \right) \end{aligned} \quad (189)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e:$$

$$DE_{e,q}(\underline{y}_{\text{lok.e.q}}) = \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{ele.b}} \right) \quad (190)$$

mit:

$$\underline{x} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (\mathbf{x}_{1.1.1.1}, \dots, \mathbf{x}_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (\mathbf{x}_{e,q.1.1}, \dots, \mathbf{x}_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{\text{lok}} = (y_{\text{die.1.1.1}}, \dots, y_{\text{die.A.E.Q}_e}, y_{\text{ele.1.1.1}}, \dots, y_{\text{ele.B.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{lok.e.q}} = (y_{\text{die.1.e.q}}, \dots, y_{\text{die.A.e.q}}, y_{\text{ele.1.e.q}}, \dots, y_{\text{ele.B.e.q}})$$

$$\underline{y}_{\text{wag}} = (y_{\text{sta.1.1.1}}, \dots, y_{\text{sta.C.E.Q}_e}, y_{\text{gef.1.1.1}}, \dots, y_{\text{gef.D.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{wag.e.q}} = (y_{\text{sta.1.e.q}}, \dots, y_{\text{sta.C.e.q}}, y_{\text{gef.1.e.q}}, \dots, y_{\text{gef.D.e.q}})$$

b) Restriktionen

b1) Verkehrsnetz VN des Tourenplanungsmodells

$$VN = (KN, KA) \quad (191)$$

$$KN = \{HP_n \mid n = 1, \dots, N\} \text{ mit } N \subset \mathbb{N}_+ \text{ und } N \geq 2 \quad (192)$$

$$KA = \left\{ (HP_i, HP_j) \mid \exists i \in \{1, \dots, N\} \exists j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : HP_i \in KN \wedge HP_j \in KN \right\} \subseteq (KN \times KN \setminus \text{id}) \quad (193)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: v_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (194)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: d_{i,j} = \begin{cases} sl_{i,j}; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (195)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \text{sdg}_{i,j} = \begin{cases} > 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ = 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (196)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: se_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und nicht vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (197)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \text{sgt}_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern geeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern ungeeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (198)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: (d_{i,j} > 0 \rightarrow v_{i,j} = 1) \wedge (d_{i,j} = 0 \rightarrow v_{i,j} = 0) \quad (199)$$

b2) Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment

$$\forall e = 1, \dots, E: Q_e = \text{anz}_{\text{lok.e}} \quad (200)$$

$$\forall e = 1, \dots, E: \text{dhp}_{e,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } DEP_e = HP_n \\ 0, & \text{wenn } DEP_e \neq HP_n \end{cases} \quad (201)$$

$$\forall e = 1, \dots, E: \sum_{n=1}^N \text{dhp}_{e,n} = 1 \quad (202)$$

$$\forall e = 1, \dots, E: \text{anz}_{\text{lok.e}} = \sum_{a=1}^A \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} + \sum_{b=1}^B \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (203)$$

$$\forall c = 1, \dots, C: \text{lk}_{\text{sta.c}} = \text{hgg}_{\text{sta.c}} - \text{eg}_{\text{sta.c}} \quad (204)$$

$$\forall d = 1, \dots, D: \text{lk}_{\text{gef.d}} = \text{hgg}_{\text{gef.d}} - \text{eg}_{\text{gef.d}} \quad (205)$$

$$\forall e = 1, \dots, E: \text{anz}_{\text{wag.e}} = \sum_{c=1}^C \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} + \sum_{d=1}^D \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (206)$$

b3) Transportnachfrage

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \left(\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0 \rightarrow \left(\exists j \in \{1, \dots, N\}: \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \right) \right) \wedge \dots \quad (207)$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0 \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N: \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = 0 \right) \right)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \left(\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0 \rightarrow \left(\exists j \in \{1, \dots, N\}: \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} = \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \right) \right) \wedge \dots \quad (208)$$

$$\left(\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} = 0 \rightarrow \left(\forall j \in \{1, \dots, N\}: \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} = 0 \right) \right)$$

b4) Touren

Tourenfamilie

$$\forall e = 1, \dots, E: TF_e = (TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}) \mid q = 1, \dots, Q_e) \quad (209)$$

$$TF = (TF_e \mid e = 1, \dots, E) \quad (210)$$

Trägermenge

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad (211)$$

$$\left(\dot{\exists} n \in \{1, \dots, N\} : hpi_{e,q,p} = n \wedge HP_n \in KN \right) \vee hpi_{e,q,p} = 0$$

Zusammenhängigkeit und gleichsinnige Gerichtetheit

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1: \quad (212)$$

$$\left(hpi_{e,q,p} = i \wedge HP_i \in KN \wedge hpi_{e,q,p+1} = j \wedge HP_j \in KN \right)$$

$$\rightarrow \left(\dot{\exists} i \in \{1, \dots, N\} \quad \dot{\exists} j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : s_{i,j} = (HP_i, HP_j) \wedge (HP_i, HP_j) \in KA \right)$$

Zyklizität

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad (213)$$

$$\left(\begin{array}{l} \dot{\exists} i \in \{1, \dots, N\} : hpi_{e,q,1} = i \wedge \dots \\ \dot{\exists} j \in \{1, \dots, N\} : \left(\left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P-1\} : hpi_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge hpi_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \\ \wedge hpi_{e,q,p^*} = j \end{array} \right)$$

$$\rightarrow i = j$$

Depot

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \dot{\exists} n = 1, \dots, N: \quad (214)$$

$$DEP_e = HP_n \wedge TV_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots$$

$$\left(\left(\left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P-1\} : hpi_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge hpi_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \right)$$

$$\left(\wedge hpi_{e,q,1} = n \wedge hpi_{e,q,p^*} = n \right)$$

Kontinuität bis zum Tourende

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad (215)$$

$$TV_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots$$

$$\left(\left(\left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P-1\} : hpi_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge hpi_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \right)$$

$$\left(\wedge \forall p = 1, \dots, p^* : hpi_{e,q,p} \geq 1 \right)$$

Kontinuität nach dem Tourende

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \\ \left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \rightarrow \forall p = p^*+1, \dots, P : \text{hpi}_{e,q,p} = 0 \quad (216)$$

Ausschluss von Schein-Touren

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \\ \text{TV}_{e,q} \neq (0, \dots, 0) \rightarrow \dots \quad (217) \\ \left(\left(\dot{\exists} p^* \in \{1, \dots, P-1\} : \text{hpi}_{e,q,p^*} \geq 1 \wedge \text{hpi}_{e,q,p^*+1} = 0 \right) \vee p^* = P \right) \wedge p^* \geq 3$$

b5) Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N : x_{e,q,p,n} \in \{0, 1\} \\ \text{mit :} \quad (218)$$

$$x_{e,q,p,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn sich im Tourvektor } \text{TV}_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } \text{HP}_n \text{ befindet} \\ 0, & \text{wenn sich im Tourvektor } \text{TV}_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } \text{HP}_n \text{ nicht befindet} \end{cases}$$

$$\forall a = 1, \dots, A \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{\text{die.a.e.q}} \in \{0, 1\} \\ \text{mit :} \quad (219)$$

$$y_{\text{die.a.e.q}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } \text{LT}_{\text{die.a}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } \text{LT}_{\text{die.a}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall b = 1, \dots, B \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{\text{ele.b.e.q}} \in \{0, 1\} \\ \text{mit :} \quad (220)$$

$$y_{\text{ele.b.e.q}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } \text{LT}_{\text{ele.b}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } \text{LT}_{\text{ele.b}} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{\text{sta.c.e.q}} \in \mathbb{N}_0 \\ \text{mit :} \quad (221)$$

$$y_{\text{sta.c.e.q}} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } \text{GT}_{\text{sta.c}} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } \text{GT}_{\text{sta.c}} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{\text{gef.d.e.q}} \in \mathbb{N}_0$$

mit : (222)

$$y_{\text{gef.d.e.q}} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{\text{e,q}} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \\ & \text{der Tour } T_{\text{e,q}} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : z_{\text{b.sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$$

mit : (223)

$$z_{\text{b.sta.c.i.e.q.p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{m.b.sta.c.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{m.b.sta.c.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : z_{\text{b.gef.d.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$$

mit : (224)

$$z_{\text{b.gef.d.i.e.q.p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{m.b.gef.d.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{m.b.gef.d.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : z_{\text{e.sta.c.i.j.e.q.r}} \in \{0,1\}$$

mit :

$$z_{\text{e.sta.c.i.j.e.q.r}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } HP_i \text{ mit der Gütermenge } g_{\text{m.b.sta.c.i}} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } g_{\text{m.e.sta.c.i.j}} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \\ & \text{keine Gütermenge } g_{\text{m.e.sta.c.i.j}} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } HP_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } g_{\text{m.b.sta.c.i}} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (225)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P: z_{e, \text{gef.d.i.j.e.q,r}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$z_{e, \text{gef.d.i.j.e.q,r}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } HP_i \text{ mit der Gütermenge } gmb_{\text{gef.d.i}} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } gme_{\text{gef.d.i,j}} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \\ & \text{keine Gütermenge } gme_{\text{gef.d.i,j}} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } HP_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } gmb_{\text{gef.d.i}} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (226)$$

b6) Spielraumeinschränkungen durch Restriktionen aus dem Entscheidungsumfeld

b6.1) Tourrestriktionen

Kopplungsrestriktion für Haltepunkt-Indizes und Entscheidungsvariablen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} \quad (227)$$

Tourdarstellungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: TV_{e,q} = \left(\sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,P,n} \right) \quad (228)$$

Restriktion zum Ausschluss multipler Haltepunkte

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1 \quad (229)$$

Depotrestriktion für den Tourbeginn

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \quad (230)$$

Definitionsrestriktion für den Tourendevektor

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: TE_{e,q} = (te_{e,q,p} \mid p = 1, \dots, P) \wedge \dots$$

$$\forall p = 1, \dots, P: te_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}, & \text{für } p = 1, \dots, P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}, & \text{für } p = P \end{cases} \quad (231)$$

Depotrestriktion für das Tourende

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N: x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n} \quad (232)$$

Realisierungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \quad (233)$$

Kontinuitätsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1: \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} \geq 0 \quad (234)$$

Richtungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \\ (x_{e,q,p,i} = 1 \wedge x_{e,q,p+1,j} = 1) \rightarrow v_{i,j} = 1 \quad (235)$$

Restriktion für die Anzahl nicht vollständig elektrifizierter Gleisstrecken

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \right) - 1 - \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j} \right) \quad (236)$$

Restriktion für den Elektrifizierungsstatus

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: (\text{anz}_{\text{nel.e.q}} \geq 1 \rightarrow \text{vel}_{e,q} = 0) \wedge (\text{anz}_{\text{nel.e.q}} = 0 \rightarrow \text{vel}_{e,q} = 1) \quad (237)$$

Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \geq 1 - \text{vel}_{e,q} \quad (238)$$

Definitionsrestriktion für die Tourlänge

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \text{TL}_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \quad (239)$$

tourbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \\ \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} + \sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \geq 1 \right) \wedge \left(\sum_{c=1}^C y_{\text{sta.c.e.q}} + \sum_{d=1}^D y_{\text{gef.d.e.q}} \geq 0 \right) \quad (240)$$

b6.2) Ladungsrestriktionen

Ladungsgewichtsrestriktionen für den Tourbeginn

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C: \text{lg}_{\text{sta.c.e.q},1} = 0 \quad (241)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D: \text{lg}_{\text{gef.d.e.q},1} = 0 \quad (242)$$

Be- und Endladungsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C: \\ \forall p = 2, \dots, P: \text{lg}_{\text{sta.c.e.q,p}} = \text{lg}_{\text{sta.c.e.q,p-1}} + \dots \quad (243) \\ \left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(\text{zb}_{\text{sta.c.j.e.q,p}} \cdot \text{gmb}_{\text{sta.c,j}} - \left(\sum_{i=1}^N \text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q,p}} \cdot \text{gme}_{\text{sta.c,i,j}} \right) \right) \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D :$$

$$\forall p = 2, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} = \lg_{\text{gef.d.e.q.p-1}} + \dots \quad (244)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e.q.p.j} \cdot \left(z_{\text{gef.d.j.e.q.p}} \cdot \text{gmb}_{\text{gef.c.j}} - \left(\sum_{i=1}^N z_{\text{gef.d.i.j.e.q.p}} \cdot \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \right) \right) \right)$$

güterwagenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \leq y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \text{lk}_{\text{sta.c}} \quad (245)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \leq y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \text{lk}_{\text{gef.d}} \quad (246)$$

lokomotivenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P :$$

$$\left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{sta.c}}) + \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{gef.d}}) + \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \right) \quad (247)$$

$$\leq \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{ele.b}} \right)$$

beladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} > 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 1) \wedge (\text{gmb}_{\text{sta.c.i}} = 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{sta.c.i}} = 0) \quad (248)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} > 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = 1) \wedge (\text{gmb}_{\text{gef.d.i}} = 0 \rightarrow \text{relb}_{\text{gef.d.i}} = 0) \quad (249)$$

beladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad z_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (250)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad z_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (251)$$

beladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (252)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (253)$$

entladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$(\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} > 0 \rightarrow \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} = 1) \wedge (\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} = 0 \rightarrow \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} = 0) \quad (254)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$(\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} > 0 \rightarrow \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} = 1) \wedge (\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} = 0 \rightarrow \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} = 0) \quad (255)$$

entladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad z_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \quad (256)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (257)$$

$$ze_{gef.d.i.j.e.q.r} \leq rele_{gef.d.i.j}$$

entladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{sta.c.i.j.e.q.r} \leq 1 \quad (258)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{gef.d.i.j.e.q.r} \leq 1 \quad (259)$$

Kopplungsrestriktionen für Be- und Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (260)$$

$$\left(\dot{\exists} p = 1, \dots, P : zb_{sta.c.i.e.q.p} = 1 \right) \rightarrow \left(\dot{\exists} j = 1, \dots, N \quad \dot{\exists} r = 1, \dots, P : ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 1 \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (261)$$

$$\left(\forall p = 1, \dots, P : zb_{sta.c.i.e.q.p} = 0 \right) \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 0 \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (262)$$

$$\left(\dot{\exists} p = 1, \dots, P : zb_{gef.d.i.e.q.p} = 1 \right) \rightarrow \left(\dot{\exists} j = 1, \dots, N \quad \dot{\exists} r = 1, \dots, P : ze_{gef.d.i.j.e.q.r} = 1 \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (263)$$

$$\left(\forall p = 1, \dots, P : zb_{gef.d.i.e.q.p} = 0 \right) \rightarrow \left(\forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : ze_{gef.d.i.j.e.q.r} = 0 \right)$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Beladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad (264)$$

$$zb_{sta.c.i.e.q.p} \leq x_{e.q.p.i}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad (265)$$

$$zb_{gef.d.c.i.e.q.p} \leq x_{e.q.p.i}$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (266)$$

$$ze_{sta.c.i.j.e.q.r} \leq x_{e.q.r.j}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (267)$$

$$ze_{gef.d.i.j.e.q.r} \leq x_{e.q.r.j}$$

Reihenfolgerestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (268)$$

$$\left(zb_{sta.c.i.e.q.p} = 1 \wedge ze_{sta.c.i.j.e.q.r} = 1 \right) \rightarrow p < r$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (269)$$

$$\left(zb_{gef.d.i.e.q.p} = 1 \wedge ze_{gef.d.i.j.e.q.r} = 1 \right) \rightarrow p < r$$

Definitionsrestriktion für die Positionsabstandesumme zwischen Be- und Entladungshaltspunkten

$$\begin{aligned} \text{PAS}(\underline{z}) = & \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} \cdot r - z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} \cdot p \right) \\ & + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}} \cdot r - z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} \cdot z_{e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}} \cdot p \right) \end{aligned} \quad (270)$$

Definitionsrestriktion für einen mit Sicherheit größeren Wert als die Positionsabstandesumme

$$\text{PAS}_{\text{grö}} = (P-1) \cdot (P-1) \cdot \sum_{e=1}^E Q_e \quad (271)$$

Markträumungsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (272)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} = \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (273)$$

b6.3) bestandsbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall a \in \{1, \dots, A\}: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{die.a.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} \quad (274)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall b \in \{1, \dots, B\}: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{ele.b.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (275)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall c = 1, \dots, C: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{sta.c.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} \quad (276)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall d = 1, \dots, D: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{gef.d.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (277)$$

Abbildung 37: mathematische Formulierung des Tourenplanungsmodells –
erste Variante ohne Zulässigkeit von artifiziellen Touren
in einer „formallogischen“ Notationsweise

Es folgt die Formulierung des Tourenplanungsmodells in der zweiten Variante, die *keine artifiziel-
len Touren* erlaubt und sich der *mathematischen Notationsweise* bedient. Diese Modellvariante wird
in der Abbildung 38 dargestellt, die sich über diese Seite und die nächsten Seiten erstreckt.

a) Zielfunktion

a1) *entweder* Minimierung der Tourengesamtlänge TGL:

$$\text{TGL}(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \quad (278)$$

mit:

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q,1,1}, \dots, x_{e,q,P,N})$$

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{E,Q_e,P,N})$$

a2) *oder* Minimierung der durchfahrtenfreien Tourengesamtlänge TGL*:

$$\text{TGL}^*(\underline{x}, \underline{z}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) + \frac{\text{PAS}(\underline{z})}{\text{PAS}_{\text{grö}}} \rightarrow \min! \quad (279)$$

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{E,Q_e,P,N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q,1,1}, \dots, x_{e,q,P,N})$$

$$\underline{z} = (\underline{z}_{\text{sta}}, \underline{z}_{\text{gef}}, \underline{z}_{\text{sta}}, \underline{z}_{\text{gef}})$$

$$\underline{z}_{\text{sta}} = (z_{\text{sta},c,i,e,q,p} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ = (z_{\text{sta},1,1,1,1,1}, \dots, z_{\text{sta},C,N,E,Q_e,P})$$

$$\underline{z}_{\text{gef}} = (z_{\text{gef},d,i,e,q,p} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ = (z_{\text{gef},1,1,1,1,1}, \dots, z_{\text{gef},D,N,E,Q_e,P})$$

$$\underline{z}_{\text{sta}} = (z_{\text{sta},c,i,j,e,q,r} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ = (z_{\text{sta},1,1,1,1,1,1}, \dots, z_{\text{sta},C,N,N,E,Q_e,P})$$

$$\underline{z}_{\text{gef}} = (z_{\text{gef},d,i,j,e,q,r} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ = (z_{\text{gef},1,1,1,1,1,1}, \dots, z_{\text{gef},D,N,N,E,Q_e,P})$$

a3) *oder* Minimierung der Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK:

$$\text{TGLTK}(\underline{x}, \underline{y}_{\text{wag}}, \underline{y}_{\text{lok}}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{LTK}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q}) \rightarrow \min! \quad (280)$$

$$\forall e=1, \dots, E \quad \forall q=1, \dots, Q_e :$$

$$\text{LTK}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q}) = \sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\text{LT}_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q})}_{\substack{\text{Leertonnen auf dem p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \right) \quad (281)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1:$$

$$\begin{aligned}
 LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = & \dots \\
 & \underbrace{\left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot lk_{sta.c}) - lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot lk_{gef.d}) - lg_{gef.d.e,q,p} \right)}_{\substack{\text{nicht ausgeschöpfte Ladungskapazitäten der Güterwagen (Leertonnen)} \\ \text{auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP}_1 \text{ und HP}_j}} + \dots \\
 & \left(\underbrace{\left(\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} \cdot zk_{die.a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \cdot zk_{ele.b} \right) - \dots}_{\substack{\text{nicht ausgeschöpfte Traktionskapazitäten der Lokomotiven (Leertonnen)} \\ \text{auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP}_1 \text{ und HP}_j}} + \left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot eg_{sta.c}) + lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot eg_{gef.d}) + lg_{gef.d.e,q,p} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{282}$$

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{lok} = (y_{die.1.1.1}, \dots, y_{die.A.E.Q_e}, y_{ele.1.1.1}, \dots, y_{ele.B.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{lok,e,q} = (y_{die.1.e,q}, \dots, y_{die.A.e,q}, y_{ele.1.e,q}, \dots, y_{ele.B.e,q})$$

$$\underline{y}_{wag} = (y_{sta.1.1.1}, \dots, y_{sta.C.E.Q_e}, y_{gef.1.1.1}, \dots, y_{gef.D.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{wag,e,q} = (y_{sta.1.e,q}, \dots, y_{sta.C.e,q}, y_{gef.1.e,q}, \dots, y_{gef.D.e,q})$$

a4) oder Minimierung der Tourengesamemissionen TGE:

$$TGE(\underline{x}, \underline{y}_{wag}, \underline{y}_{lok}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) \rightarrow \min! \tag{283}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$LE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots \tag{284}$$

$$\sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \cdot \underbrace{ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{effektives Zuggewicht} \\ \text{im p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{durchschnittliche} \\ \text{CO}_2\text{-Emissionen} \\ \text{je Tonnenkilometer} \\ \text{[kg CO}_2 \text{ / to} \cdot \text{km]}}} \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1:$$

$$\begin{aligned} ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag.e.q}}, \underline{y}_{\text{lok.e.q}}) &= \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{ele.b}} \right) \\ &+ \left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{sta.c}}) + \mathbf{lg}_{\text{sta.c.e.q,p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{gef.d}}) + \mathbf{lg}_{\text{gef.d.e.q,p}} \right) \end{aligned} \quad (285)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e:$$

$$DE_{e,q}(\underline{y}_{\text{lok.e.q}}) = \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{ele.b}} \right) \quad (286)$$

mit:

$$\underline{x} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{\text{lok}} = (y_{\text{die.1.1.1}}, \dots, y_{\text{die.A.E.Q}_e}, y_{\text{ele.1.1.1}}, \dots, y_{\text{ele.B.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{lok.e.q}} = (y_{\text{die.1.e.q}}, \dots, y_{\text{die.A.e.q}}, y_{\text{ele.1.e.q}}, \dots, y_{\text{ele.B.e.q}})$$

$$\underline{y}_{\text{wag}} = (y_{\text{sta.1.1.1}}, \dots, y_{\text{sta.C.E.Q}_e}, y_{\text{gef.1.1.1}}, \dots, y_{\text{gef.D.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{wag.e.q}} = (y_{\text{sta.1.e.q}}, \dots, y_{\text{sta.C.e.q}}, y_{\text{gef.1.e.q}}, \dots, y_{\text{gef.D.e.q}})$$

b) Restriktionen

b1) Verkehrsnetz VN des Tourenplanungsmodells

$$VN = (KN, KA) \quad (287)$$

$$KN = \{HP_n \mid n = 1, \dots, N\} \text{ mit } N \subset \mathbb{N}_+ \text{ und } N \geq 2 \quad (288)$$

$$KA = \left\{ (HP_i, HP_j) \mid \exists i \in \{1, \dots, N\} \exists j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : HP_i \in KN \wedge HP_j \in KN \right\} \subseteq (KN \times KN \setminus \text{id}) \quad (289)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: v_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (290)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: d_{i,j} = \begin{cases} sl_{i,j}; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (291)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \text{sdg}_{i,j} = \begin{cases} > 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ = 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (292)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: se_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und nicht vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (293)$$

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{sgt}_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern geeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern ungeeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (294)$$

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K \wedge v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j} \quad (295)$$

b2) Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment

$$\forall e=1,\dots,E: Q_e = \text{anz}_{\text{lok.e}} \quad (296)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{dhp}_{e,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } DEP_e = HP_n \\ 0, & \text{wenn } DEP_e \neq HP_n \end{cases} \quad (297)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \sum_{n=1}^N \text{dhp}_{e,n} = 1 \quad (298)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{anz}_{\text{lok.e}} = \sum_{a=1}^A \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} + \sum_{b=1}^B \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (299)$$

$$\forall c=1,\dots,C: \text{lk}_{\text{sta.c}} = \text{hgg}_{\text{sta.c}} - \text{eg}_{\text{sta.c}} \quad (300)$$

$$\forall d=1,\dots,D: \text{lk}_{\text{gef.d}} = \text{hgg}_{\text{gef.d}} - \text{eg}_{\text{gef.d}} \quad (301)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{anz}_{\text{wag.e}} = \sum_{c=1}^C \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} + \sum_{d=1}^D \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (302)$$

b3) Transportnachfrage

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{gme}_{\text{sta.c.i,j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{sta.c.i,j}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{sta.c.i,j}} - \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}) = 0 \quad (303)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{gme}_{\text{gef.d.i,j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{gef.d.i,j}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{gef.d.i,j}} - \text{gmb}_{\text{gef.d.i}}) = 0 \quad (304)$$

b4) Touren¹⁾

$$\forall e = 1, \dots, E: TF_e = (TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}) \mid q = 1, \dots, Q_e) \quad (305)$$

$$TF = (TF_e \mid e = 1, \dots, E) \quad (306)$$

b5) Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N: x_{e,q,p,n} \in \{0, 1\}$$

mit : (307)

$$x_{e,q,p,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ befindet} \\ 0, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ nicht befindet} \end{cases}$$

$$\forall a = 1, \dots, A \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: y_{die.a.e,q} \in \{0, 1\}$$

mit : (308)

$$y_{die.a.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{die.a} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{die.a} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall b = 1, \dots, B \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: y_{ele.b.e,q} \in \{0, 1\}$$

mit : (309)

$$y_{ele.b.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{ele.b} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{ele.b} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: y_{sta.c.e,q} \in \mathbb{N}_0$$

mit : (310)

$$y_{sta.c.e,q} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{sta.c} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{sta.c} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

1) Die Restriktionen, die in der ersten Modellvariante mit der formallogischen Notationsweise angeführt wurden, werden hier in der Modellvariante mit der mathematischen Notationsweise – mit Ausnahme der Restriktionen für die Tourenfamilie – aus zwei Gründen nicht berücksichtigt. Einerseits lassen sich jene Restriktionen wegen ihren komplexen formallogischen Konstrukten, wie etwa Einsquantoren und Disjugaten, nur sehr schwer in äquivalente Ausdrucksformen einer rein mathematischen Notationsweise überführen. Andererseits sind sie für die Modellformulierung auch nicht notwendig, weil sie entweder keine denkmöglichen Modelllösungen als unzulässig ausschließen (wie die Restriktion der Trägermenge) oder weil sie sich als redundant erweisen, da ihre Erfüllung durch später angeführte Restriktionen garantiert wird (wie z.B. die Restriktion der Zyklizität, deren Erfüllung durch die später angeführte Depotrestriktion für das Tourende sichergestellt wird).

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{\text{gef.d.e.q}} \in \mathbb{N}_0$$

mit : (311)

$$y_{\text{gef.d.e.q}} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{\text{e,q}} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{\text{gef.d}} \\ & \text{der Tour } T_{\text{e,q}} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : z_{\text{b.sta.c.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$$

mit : (312)

$$z_{\text{b.sta.c.i.e.q.p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb.sta.c.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb.sta.c.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : z_{\text{b.gef.d.i.e.q.p}} \in \{0,1\}$$

mit : (313)

$$z_{\text{b.gef.d.i.e.q.p}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb.gef.d.i}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } HP_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{\text{mb.gef.d.i}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : z_{\text{e.sta.c.i.j.e.q.r}} \in \{0,1\}$$

mit :

$$z_{\text{e.sta.c.i.j.e.q.r}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } HP_i \text{ mit der Gütermenge } g_{\text{mb.sta.c.i}} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } g_{\text{me.sta.c.i.j}} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{\text{e,q}} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \\ & \text{keine Gütermenge } g_{\text{me.sta.c.i.j}} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } HP_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } g_{\text{mb.sta.c.i}} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (314)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall r=1,\dots,P: z_{e_{gef.d.i.j.e.q,r}} \in \{0,1\}$$

mit :

$$z_{e_{gef.d.i.j.e.q,r}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } HP_i \text{ mit der Gütermenge } gmb_{gef.d.i} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } gme_{gef.d.i,j} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } HP_j \\ & \text{keine Gütermenge } gme_{gef.d.i,j} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } HP_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } gmb_{gef.d.i} \text{ entspricht} \end{cases} \quad (315)$$

b6) Spielraumeinschränkungen durch Restriktionen aus dem Entscheidungsumfeld

b6.1) Tourrestriktionen

Kopplungsrestriktion für Haltepunkt-Indizes und Entscheidungsvariablen

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P: hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} \quad (316)$$

Tourdarstellungsrestriktion

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e: TV_{e,q} = \left(\sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,P,n} \right) \quad (317)$$

Restriktion zum Ausschluss multipler Haltepunkte

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P: \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1 \quad (318)$$

Depotrestriktion für den Tourbeginn

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e: \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot dhp_{e,n} = 1 \quad (319)$$

Definitionsrestriktion für den Tourendevektor

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e: TE_{e,q} = (te_{e,q,p} \mid p=1,\dots,P) \wedge \dots$$

$$\forall p=1,\dots,P: te_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}, & \text{für } p=1,\dots,P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}, & \text{für } p=P \end{cases} \quad (320)$$

Depotrestriktion für das Tourende

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P \forall n=1,\dots,N: x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n} \quad (321)$$

Realisierungsrestriktion

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e: \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \quad (322)$$

Kontinuitätsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1: \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} \geq 0 \quad (323)$$

Richtungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \leq v_{i,j} \quad (324)$$

Restriktion für die Anzahl nicht vollständig elektrifizierter Gleisstrecken

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \right) - 1 - \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j} \right) \quad (325)$$

Restriktion für den Elektrifizierungsstatus

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \text{vel}_{e,q} \in \{0,1\} \quad \wedge \quad \dots \quad (1 - \text{vel}_{e,q} \leq \text{anz}_{\text{nel.e.q}}) \quad \wedge \quad \left(1 - \text{vel}_{e,q} \geq \frac{\text{anz}_{\text{nel.e.q}}}{P} \right) \quad (326)$$

Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \geq 1 - \text{vel}_{e,q} \quad (327)$$

Definitionsrestriktion für die Tourlänge

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \text{TL}_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \quad (328)$$

tourbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} + \sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \geq 1 \right) \quad \wedge \quad \left(\sum_{c=1}^C y_{\text{sta.c.e.q}} + \sum_{d=1}^D y_{\text{gef.d.e.q}} \geq 0 \right) \quad (329)$$

b6.2) Ladungsrestriktionen

Ladungsgewichtsrestriktionen für den Tourbeginn

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C: \text{lg}_{\text{sta.c.e.q.1}} = 0 \quad (330)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D: \text{lg}_{\text{gef.d.e.q.1}} = 0 \quad (331)$$

Be- und Endladungsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C: \quad \forall p = 2, \dots, P: \text{lg}_{\text{sta.c.e.q.p}} = \text{lg}_{\text{sta.c.e.q.p-1}} + \dots \quad (332)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(\text{zb}_{\text{sta.c.j.e.q.p}} \cdot \text{gmb}_{\text{sta.c.j}} - \left(\sum_{i=1}^N \text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.p}} \cdot \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \right) \right) \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D :$$

$$\forall p = 2, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} = \lg_{\text{gef.d.e.q.p-1}} + \dots \quad (333)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e.q.p.j} \cdot \left(z_{\text{gef.d.j.e.q.p}} \cdot \text{gmb}_{\text{gef.c.j}} - \left(\sum_{i=1}^N z_{\text{gef.d.i.j.e.q.p}} \cdot \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \right) \right) \right)$$

güterwagenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \leq y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \text{lk}_{\text{sta.c}} \quad (334)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \leq y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \text{lk}_{\text{gef.d}} \quad (335)$$

lokomotivenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P :$$

$$\left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{sta.c}}) + \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \text{eg}_{\text{gef.d}}) + \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \right) \quad (336)$$

$$\leq \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \text{zk}_{\text{ele.b}} \right)$$

beladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \quad (337)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \quad (338)$$

beladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad z_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (339)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad z_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (340)$$

beladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (341)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (342)$$

entladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$\text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \quad (343)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N :$$

$$\text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \quad \wedge \quad \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \quad (344)$$

entladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P :$$

$$z_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \quad (345)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (346)$$

$$ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}}$$

entladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq 1 \quad (347)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq 1 \quad (348)$$

Kopplungsrestriktionen für Be- und Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (349)$$

$$\sum_{p=1}^P zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \quad (350)$$

$$\sum_{p=1}^P zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Beladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad (351)$$

$$zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{\text{e.q.p.i}}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : \quad (352)$$

$$zb_{\text{gef.d.c.i.e.q.p}} \leq x_{\text{e.q.p.i}}$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (353)$$

$$ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{\text{e.q.r.j}}$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (354)$$

$$ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq x_{\text{e.q.r.j}}$$

Reihenfolgerestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (355)$$

$$zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p \leq zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : \quad (356)$$

$$zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p \leq zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r$$

Definitionsrestriktion für die Positionsabstandesumme zwischen Be- und Entladungshaltspunkten

$$\text{PAS}(\underline{z}) = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p \right) \quad (357)$$

$$+ \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P \left(zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r - zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p \right)$$

Definitionsrestriktion für einen mit Sicherheit größeren Wert als die Positionsabstandesumme

$$PAS_{\text{grö}} = (P-1) \cdot (P-1) \cdot \sum_{e=1}^E Q_e \quad (358)$$

Markträumungsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{sta.c.i.e.q.p}} b_{\text{sta.c.i}} = \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (359)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{\text{gef.d.i.e.q.p}} b_{\text{gef.d.i}} = \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (360)$$

b6.3) bestandsbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall a = 1, \dots, A: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{die.a.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} \quad (361)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall b = 1, \dots, B: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{ele.b.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (362)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall c = 1, \dots, C: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{sta.c.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} \quad (363)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall d = 1, \dots, D: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{gef.d.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (364)$$

Abbildung 38: mathematische Formulierung des Tourenplanungsmodells – zweite Variante ohne Zulässigkeit von artifiziiellen Touren in einer „mathematischen“ Notationsweise

Schließlich wird die mathematische Formulierung des Tourenplanungsmodells in der *dritten Variante* präsentiert, die *artifizielle Touren* gestattet. Diese Modellvariante wird in der Abbildung 39 dargestellt, die sich über diese Seite und die nächsten Seiten erstreckt.

a) Zielfunktion

a1) *entweder* Minimierung der Tourengesamtlänge TGL:

$$\text{TGL}(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min! \quad (365)$$

mit:

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q,1,1}, \dots, x_{e,q,P,N})$$

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{E,Q_e,P,N})$$

a2) *oder* Minimierung der durchfahrtenfreien Tourengesamtlänge TGL*:

$$\text{TGL}^*(\underline{x}, \underline{z}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{TL}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) + \frac{\text{PAS}(\underline{z})}{\text{PAS}_{\text{grö}}} \rightarrow \min! \quad (366)$$

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{E,Q_e,P,N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p=1, \dots, P \wedge n=1, \dots, N) = (x_{e,q,1,1}, \dots, x_{e,q,P,N})$$

$$\underline{z} = (\underline{z}b_{\text{sta}}, \underline{z}b_{\text{gef}}, \underline{z}e_{\text{sta}}, \underline{z}e_{\text{gef}})$$

$$\begin{aligned} \underline{z}b_{\text{sta}} &= (zb_{\text{sta},c,i,e,q,p} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ &= (zb_{\text{sta},1,1,1,1,1}, \dots, zb_{\text{sta},C,N,E,Q_e,P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}b_{\text{gef}} &= (zb_{\text{gef},d,i,e,q,p} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge p=1, \dots, P) \\ &= (zb_{\text{gef},1,1,1,1,1}, \dots, zb_{\text{gef},D,N,E,Q_e,P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}e_{\text{sta}} &= (ze_{\text{sta},c,i,j,e,q,r} \mid c=1, \dots, C \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ &= (ze_{\text{sta},1,1,1,1,1,1}, \dots, ze_{\text{sta},C,N,N,E,Q_e,P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}e_{\text{gef}} &= (ze_{\text{gef},d,i,j,e,q,r} \mid d=1, \dots, D \wedge i=1, \dots, N \wedge j=1, \dots, N \wedge e=1, \dots, E \wedge q=1, \dots, Q_e \wedge r=1, \dots, P) \\ &= (ze_{\text{gef},1,1,1,1,1,1}, \dots, ze_{\text{gef},D,N,N,E,Q_e,P}) \end{aligned}$$

a3) *oder* Minimierung der Tourengesamtleertonnenkilometer TGLTK:

$$\text{TGLTK}(\underline{x}, \underline{y}_{\text{wag}}, \underline{y}_{\text{lok}}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \text{LTK}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q}) \rightarrow \min! \quad (367)$$

$\forall e=1, \dots, E \quad \forall q=1, \dots, Q_e$:

$$\text{LTK}_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q}) = \sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\text{LT}_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag},e,q}, \underline{y}_{\text{lok},e,q})}_{\substack{\text{Leertonnen auf dem p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_1 \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \right) \quad (368)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P - 1:$$

$$LT_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots$$

$$\left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot lk_{sta.c}) - lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot lk_{gef.d}) - lg_{gef.d.e,q,p} \right) + \dots$$

nicht ausgeschöpfte Ladungskapazitäten der Güterwagen (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

(369)

$$\left(\left(\sum_{a=1}^A y_{die.a.e,q} \cdot zk_{die.a} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{ele.b.e,q} \cdot zk_{ele.b} \right) - \dots \right. \\ \left. \left(\sum_{c=1}^C (y_{sta.c.e,q} \cdot eg_{sta.c}) + lg_{sta.c.e,q,p} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{gef.d.e,q} \cdot eg_{gef.d}) + lg_{gef.d.e,q,p} \right) \right)$$

nicht ausgeschöpfte Traktionskapazitäten der Lokomotiven (Leertonnen)
auf dem p-ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten HP_i und HP_j

mit:

$$\underline{x} = (x_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (x_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{lok} = (y_{die.1.1.1}, \dots, y_{die.A.E.Q_e}, y_{ele.1.1.1}, \dots, y_{ele.B.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{lok,e,q} = (y_{die.1.e,q}, \dots, y_{die.A.e,q}, y_{ele.1.e,q}, \dots, y_{ele.B.e,q})$$

$$\underline{y}_{wag} = (y_{sta.1.1.1}, \dots, y_{sta.C.E.Q_e}, y_{gef.1.1.1}, \dots, y_{gef.D.E.Q_e})$$

$$\underline{y}_{wag,e,q} = (y_{sta.1.e,q}, \dots, y_{sta.C.e,q}, y_{gef.1.e,q}, \dots, y_{gef.D.e,q})$$

a4) oder Minimierung der Tourengesamemissionen TGE:

$$TGE(\underline{x}, \underline{y}_{wag}, \underline{y}_{lok}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) \rightarrow \min! \quad (370)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$LE_{e,q}(\underline{x}_{e,q}, \underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q}) = \dots \quad (371)$$

$$\sum_{p=1}^{P-1} \left(\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j}}_{\substack{\text{Länge des p-ten Tourabschnitts} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [km]}}} \cdot \underbrace{ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{wag,e,q}, \underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{effektives Zuggewicht} \\ \text{im p-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ [to]}}} \cdot \underbrace{DE_{e,q}(\underline{y}_{lok,e,q})}_{\substack{\text{durchschnittliche} \\ \text{CO}_2\text{-Emissionen} \\ \text{je Tonnenkilometer} \\ \text{[kg CO}_2 \text{ / to} \cdot \text{km]}}} \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1:$$

$$\begin{aligned} ZG_{e,q,p}(\underline{y}_{\text{wag.e.q}}, \underline{y}_{\text{lok.e.q}}) &= \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{gg}_{\text{ele.b}} \right) \\ &+ \left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{sta.c}}) + \mathbf{lg}_{\text{sta.c.e.q,p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot \mathbf{eg}_{\text{gef.d}}) + \mathbf{lg}_{\text{gef.d.e.q,p}} \right) \end{aligned} \quad (372)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e:$$

$$DE_{e,q}(\underline{y}_{\text{lok.e.q}}) = \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot \mathbf{dce}_{\text{ele.b}} \right) \quad (373)$$

mit:

$$\underline{x} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid e = 1, \dots, E \wedge q = 1, \dots, Q_e \wedge p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{1.1.1.1}, \dots, x_{E.Q_e.P.N})$$

$$\underline{x}_{e,q} = (\mathbf{x}_{e,q,p,n} \mid p = 1, \dots, P \wedge n = 1, \dots, N) = (x_{e,q.1.1}, \dots, x_{e,q.P.N})$$

$$\underline{y}_{\text{lok}} = (y_{\text{die.1.1.1.1}}, \dots, y_{\text{die.A.E.Q}_e}, y_{\text{ele.1.1.1.1}}, \dots, y_{\text{ele.B.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{lok.e.q}} = (y_{\text{die.1.e.q}}, \dots, y_{\text{die.A.e.q}}, y_{\text{ele.1.e.q}}, \dots, y_{\text{ele.B.e.q}})$$

$$\underline{y}_{\text{wag}} = (y_{\text{sta.1.1.1.1}}, \dots, y_{\text{sta.C.E.Q}_e}, y_{\text{gef.1.1.1.1}}, \dots, y_{\text{gef.D.E.Q}_e})$$

$$\underline{y}_{\text{wag.e.q}} = (y_{\text{sta.1.e.q}}, \dots, y_{\text{sta.C.e.q}}, y_{\text{gef.1.e.q}}, \dots, y_{\text{gef.D.e.q}})$$

b) Restriktionen

b1) Verkehrsnetz VN des Tourenplanungsmodells

$$VN = (KN, KA) \quad (374)$$

$$KN = \{HP_n \mid n = 1, \dots, N\} \text{ mit } N \subset \mathbb{N}_+ \text{ und } N \geq 2 \quad (375)$$

$$KA = \{(HP_i, HP_j) \mid \exists i \in \{1, \dots, N\} \exists j \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} : HP_i \in KN \wedge HP_j \in KN\} \subseteq (KN \times KN \setminus \text{id}) \quad (376)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: v_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (377)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: d_{i,j} = \begin{cases} sl_{i,j}; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (378)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \text{sdg}_{i,j} = \begin{cases} > 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ = 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (379)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: se_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und nicht vollst\u00e4ndig elektrifiziert} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (380)$$

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{sgt}_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern geeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \text{ und für Transporte} \\ & \text{von Gefahrgütern ungeeignet} \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases} \quad (381)$$

$$\forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K \wedge v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j} \quad (382)$$

b2) Eisenbahnverkehrsunternehmen und ihr Equipment

$$\forall e=1,\dots,E: Q_e = \text{anz}_{\text{lok.e}} \quad (383)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{dhp}_{e,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } DEP_e = HP_n \\ 0, & \text{wenn } DEP_e \neq HP_n \end{cases} \quad (384)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \sum_{n=1}^N \text{dhp}_{e,n} = 1 \quad (385)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{anz}_{\text{lok.e}} = \sum_{a=1}^A \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} + \sum_{b=1}^B \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (386)$$

$$\forall c=1,\dots,C: \text{lk}_{\text{sta.c}} = \text{hgg}_{\text{sta.c}} - \text{eg}_{\text{sta.c}} \quad (387)$$

$$\forall d=1,\dots,D: \text{lk}_{\text{gef.d}} = \text{hgg}_{\text{gef.d}} - \text{eg}_{\text{gef.d}} \quad (388)$$

$$\forall e=1,\dots,E: \text{anz}_{\text{wag.e}} = \sum_{c=1}^C \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} + \sum_{d=1}^D \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (389)$$

b3) Transportnachfrage

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} - \text{gmb}_{\text{sta.c.i}}) = 0 \quad (390)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \geq 0 \wedge \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \wedge \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot (\text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} - \text{gmb}_{\text{gef.d.i}}) = 0 \quad (391)$$

b4) Touren

$$\forall e=1,\dots,E: TF_e = (TV_{e,q} = (hpi_{e,q,1}, \dots, hpi_{e,q,p}) \mid q=1, \dots, Q_e) \quad (392)$$

$$TF = (TF_e \mid e=1, \dots, E) \quad (393)$$

b5) Entscheidungsspielräume eines Entscheidungsträgers

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N: x_{e,q,p,n} \in \{0, 1\}$$

mit : (394)

$$x_{e,q,p,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ befindet} \\ 0, & \text{wenn sich im Tourvektor } TV_{e,q} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ an der Position } p \\ & \text{der Index } n \text{ des Haltepunkts } HP_n \text{ nicht befindet} \end{cases}$$

$$\forall a = 1, \dots, A \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{die.a.e,q} \in \{0, 1\}$$

mit : (395)

$$y_{die.a.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{die.a} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{die.a} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall b = 1, \dots, B \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{ele.b.e,q} \in \{0, 1\}$$

mit : (396)

$$y_{ele.b.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_{ele.b} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_{ele.b} \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{sta.c.e,q} \in \mathbb{N}_0$$

mit : (397)

$$y_{sta.c.e,q} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{sta.c} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{sta.c} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : y_{gef.d.e,q} \in \mathbb{N}_0$$

mit : (398)

$$y_{gef.d.e,q} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } GT_{gef.d} \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } GT_{gef.d} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ zugeordnet wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$z_{b_{\text{sta.c.i.e.q.p}}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i}}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i}}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$z_{b_{\text{gef.d.i.e.q.p}}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i}}} \text{ beladen wird} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt,} \\ & \text{an der Tourposition } p \text{ mit dem Index } i \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{mit der Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i}}} \text{ nicht beladen wird} \end{cases}$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P: z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$z_{e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } \text{HP}_i \text{ mit der Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i}}} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i.j}}} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_j \\ & \text{keine Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i.j}}} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } g_{m_{\text{sta.c.i}}} \text{ entspricht} \end{cases}$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall r = 1, \dots, P: z_{e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}} \in \{0, 1\}$$

mit :

$$z_{e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}} = \begin{cases} 1, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt und} \\ & \text{im Haltepunkt } \text{HP}_i \text{ mit der Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i}}} \text{ beladen wurde,} \\ & \text{die entsprechende Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i.j}}} \text{ an der Tourposition } r \\ & \text{mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_j \text{ entlädt} \\ 0, & \text{wenn der Güterzug, der die Tour } T_{e,q} \text{ durchführt, an der} \\ & \text{Tourposition } r \text{ mit dem Index } j \text{ für den Haltepunkt } \text{HP}_j \\ & \text{keine Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i.j}}} \text{ entlädt, die einer im Haltepunkt } \text{HP}_i \\ & \text{aufgenommenen Gütermenge } g_{m_{\text{gef.d.i}}} \text{ entspricht} \end{cases}$$

b6) Spielraumeinschränkungen durch Restriktionen aus dem Entscheidungsumfeld

b6.1) Tourrestriktionen

Kopplungsrestriktion für Haltepunkt-Indizes und Entscheidungsvariablen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad \text{hpi}_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} \quad (403)$$

Tourdarstellungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad \text{TV}_{e,q} = \left(\sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,P,n} \right) \quad (404)$$

Restriktion zum Ausschluss multipler Haltepunkte

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P: \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1 \quad (405)$$

Restriktion für die Realisierungsvariable

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad \text{real}_{e,q} = \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \quad (406)$$

Depotrestriktion für den Tourbeginn

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,1,n} \cdot \text{dhp}_{e,n} = \text{real}_{e,q} \quad (407)$$

Definitionsrestriktion für den Tourendevektor

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad \text{TE}_{e,q} = \left(\text{te}_{e,q,p} \mid p = 1, \dots, P \right) \wedge \dots$$

$$\forall p = 1, \dots, P: \quad \text{te}_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}, & \text{für } p = 1, \dots, P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}, & \text{für } p = P \end{cases} \quad (408)$$

Depotrestriktion für das Tourende

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall n = 1, \dots, N: \quad x_{e,q,p,n} \geq \text{te}_{e,q,p} \cdot \text{dhp}_{e,n} \quad (409)$$

Realisierungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e: \quad \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \geq 3 \cdot \text{real}_{e,q} \quad (410)$$

Kontinuitätsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P-1: \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} \geq 0 \quad (411)$$

Richtungsrestriktion

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \quad x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \leq v_{i,j} \quad (412)$$

Restriktion für die Anzahl nicht vollständig elektrifizierter Gleisstrecken

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \text{anz}_{\text{nel.e.q}} = \left(\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \right) - 1 - \left(\sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot se_{i,j} \right) \quad (413)$$

Restriktion für den Elektrifizierungsstatus

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \text{vel}_{e,q} \in \{0,1\} \quad \wedge \quad \dots$$

$$\left(1 - \text{vel}_{e,q} \leq \text{anz}_{\text{nel.e.q}} \right) \quad \wedge \quad \left(1 - \text{vel}_{e,q} \geq \frac{\text{anz}_{\text{nel.e.q}}}{P} \right) \quad (414)$$

Kompatibilitätsrestriktion für Lokomotivarten

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \geq (1 - \text{vel}_{e,q}) \cdot \text{real}_{e,q} \quad (415)$$

Definitionsrestriktion für die Tourlängen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \text{TL}_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j} \quad (416)$$

tourbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e :$$

$$\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} + \sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \leq K \cdot \text{real}_{e,q} \quad \wedge \quad \sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} + \sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \geq \text{real}_{e,q} \quad (417)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e : \sum_{c=1}^C y_{\text{sta.c.e.q}} + \sum_{d=1}^D y_{\text{gef.d.e.q}} \leq K \cdot \text{real}_{e,q} \quad (418)$$

b6.2) Ladungsrestriktionen

Ladungsgewichtsrestriktionen für den Tourbeginn

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C : \text{lg}_{\text{sta.c.e.q},1} = 0 \quad (419)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D : \text{lg}_{\text{gef.d.e.q},1} = 0 \quad (420)$$

Be- und Endladungsrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C :$$

$$\forall p = 2, \dots, P : \text{lg}_{\text{sta.c.e.q},p} = \text{lg}_{\text{sta.c.e.q},p-1} + \dots \quad (421)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(\text{zb}_{\text{sta.c.j.e.q},p} \cdot \text{gmb}_{\text{sta.c,j}} - \left(\sum_{i=1}^N \text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q},p} \cdot \text{gme}_{\text{sta.c,i,j}} \right) \right) \right)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D :$$

$$\forall p = 2, \dots, P : \text{lg}_{\text{gef.d.e.q},p} = \text{lg}_{\text{gef.d.e.q},p-1} + \dots \quad (422)$$

$$\left(\sum_{j=1}^N x_{e,q,p,j} \cdot \left(\text{zb}_{\text{gef.d.j.e.q},p} \cdot \text{gmb}_{\text{gef.d,j}} - \left(\sum_{i=1}^N \text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q},p} \cdot \text{gme}_{\text{gef.d,i,j}} \right) \right) \right)$$

güterwagenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall c=1,\dots,C \forall p=1,\dots,P: \lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \leq y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot lk_{\text{sta.c}} \quad (423)$$

$$\forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall d=1,\dots,D \forall p=1,\dots,P: \lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \leq y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot lk_{\text{gef.d}} \quad (424)$$

lokomotivenbezogene Kapazitätsrestriktionen

$$\begin{aligned} \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P: \\ \left(\sum_{c=1}^C (y_{\text{sta.c.e.q}} \cdot eg_{\text{sta.c}}) + lg_{\text{sta.c.e.q.p}} \right) + \left(\sum_{d=1}^D (y_{\text{gef.d.e.q}} \cdot eg_{\text{gef.d}}) + lg_{\text{gef.d.e.q.p}} \right) \\ \leq \left(\sum_{a=1}^A y_{\text{die.a.e.q}} \cdot zk_{\text{die.a}} \right) + \left(\sum_{b=1}^B y_{\text{ele.b.e.q}} \cdot zk_{\text{ele.b}} \right) \end{aligned} \quad (425)$$

beladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N: \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \leq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \wedge \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{sta.c.i}} \quad (426)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N: \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \leq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \wedge \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \cdot K \geq \text{gmb}_{\text{gef.d.i}} \quad (427)$$

beladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P: \text{zb}_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (428)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall p=1,\dots,P: \text{zb}_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (429)$$

beladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \text{zb}_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (430)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \text{zb}_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq 1 \quad (431)$$

entladungsbezogene Relevanzvariablen

$$\begin{aligned} \forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \\ \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \wedge \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{sta.c.i.j}} \end{aligned} \quad (432)$$

$$\begin{aligned} \forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \\ \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \leq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \wedge \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \cdot K \geq \text{gme}_{\text{gef.d.i.j}} \end{aligned} \quad (433)$$

entladungsbezogene Relevanzrestriktionen

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall r=1,\dots,P: \text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \quad (434)$$

$$\forall d=1,\dots,D \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N \forall e=1,\dots,E \forall q=1,\dots,Q_e \forall r=1,\dots,P: \text{ze}_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \quad (435)$$

entladungsbezogene Einmaligkeitsrestriktionen

$$\forall c=1,\dots,C \forall i=1,\dots,N \forall j=1,\dots,N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P \text{ze}_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq 1 \quad (436)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N : \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq 1 \quad (437)$$

Kopplungsrestriktionen für Be- und Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N : \sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} = 0 \quad (438)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N : \sum_{p=1}^P z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} = 0 \quad (439)$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Beladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i} \quad (440)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P : z b_{\text{gef.d.c.i.e.q.p}} \leq x_{e,q,p,i} \quad (441)$$

Kopplungsrestriktionen für Haltepunkte sowie Entladungsmengen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq x_{e,q,r,j} \quad (442)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall r = 1, \dots, P : z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \leq x_{e,q,r,j} \quad (443)$$

Reihenfolgerestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p \leq z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r \quad (444)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall q = 1, \dots, Q_e \quad \forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall r = 1, \dots, P : z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p \leq z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r \quad (445)$$

Definitionsrestriktion für die Positionsabstandesumme zwischen Be- und Entladungshaltspunkten

$$\begin{aligned} \text{PAS}(\underline{z}) = & \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P (z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot r - z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \cdot p) \\ & + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P (z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot r - z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \cdot z e_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}} \cdot p) \end{aligned} \quad (446)$$

Definitionsrestriktion für einen mit Sicherheit größeren Wert als die Positionsabstandesumme

$$\text{PAS}_{\text{grö}} = (P-1) \cdot (P-1) \cdot \sum_{e=1}^E Q_e \quad (447)$$

Markträumungsrestriktionen

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z b_{\text{sta.c.i.e.q.p}} = \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (448)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z b_{\text{gef.d.i.e.q.p}} = \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (449)$$

b6.3) bestandsbezogene Equipmentrestriktionen

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall a = 1, \dots, A: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{die.a.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.die.a.e}} \quad (450)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall b = 1, \dots, B: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{ele.b.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{lok.ele.b.e}} \quad (451)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall c = 1, \dots, C: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{sta.c.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.sta.c.e}} \quad (452)$$

$$\forall e = 1, \dots, E \quad \forall d = 1, \dots, D: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{\text{gef.d.e.q}} \leq \text{anz}_{\text{wag.gef.d.e}} \quad (453)$$

Abbildung 39: mathematische Formulierung des Tourenplanungsmodells – dritte Variante mit der Zulässigkeit von artifiziellen Touren

7.3.2 Computergestützte Modellimplementierung

Die computergestützte Modellformulierung des Tourenplanungsmodells beruht auf der mathematischen Modellierungssoftware LINGO. Sie wird daher auch kurz als LINGO-Modell bezeichnet. Da auf die Besonderheiten dieser Software bereits mehrfach im Kapitel 7.2 eingegangen wurde, um einzelne Konstruktionen des LINGO-Modells zu erläutern, sollte die nachfolgende computergestützte Modellformulierung unmittelbar verständlich sein. Außerdem enthält sie zahlreiche Kommentare (in der Notation „! ... ;“), die entweder auf die jeweils implementierten Konstrukte aus der mathematischen Modellformulierung verweisen oder aber einzelne softwarespezifische Aspekte hervorheben.

Der computergestützten Modellformulierung liegen die beiden ersten Varianten der mathematischen Modellformulierung zugrunde, in der *lediglich reale*, aber *keine artifiziellen Touren* erlaubt sind. Für die computergestützte Implementierung dieser beiden Varianten der mathematischen Modellformulierung wurde auf die erste Variante mit der formallogischen oder die zweite Variante mit der mathematischen Notationsweise zurückgegriffen je nachdem, welche dieser beiden Varianten sich mit den Ausdrucksmitteln der mathematischen Modellierungssoftware LINGO leichter umsetzen ließ.

Des Weiteren erfolgten gegenüber der mathematischen Modellformulierung (in der ersten Variante) noch einige weitere Vereinfachungen, die erforderlich waren, um die computergestützte Modellformulierung auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn zuzuschneiden. Diese Vereinfachungen betreffen insbesondere die Fokussierung auf nur ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_1 ($e = E = 1$) mit nur einer Tour $T_{e,q}$ ($q = Q_e = 1$) und nur einer Lokomotive. Von der Antriebsart der einen Lokomotive wird abgesehen, sodass auch alle Aspekte des Elektrifizierungsstatus von Gleisstrecken keine Rolle spielen. Ebenso finden die Durchschnittsgeschwindigkeit, mit der eine Gleisstrecke befahren werden kann, und ihre Tauglichkeit für Gefahrguttransporte keine Berücksichtigung. Des Weiteren wird von den Gewichten der zu transportierenden Gütermengen, den Ladungsgewichten der Güterwagen und allen davon abhängenden Modellaspekten abstrahiert. Außerdem wird von den drei Zielfunktionen aus der mathematischen Modellformulierung nur die einfachste Alternative, die Minimierung der Tourengesamtlänge, betrachtet. Allerdings wird hierbei sichergestellt, dass keine überflüssigen Durchfahrten durch Be- oder Entladungshaltepunkte erfolgen. Schließlich sind Integritätsbedingungen aus der mathematischen Modellformulierung noch nicht in die computergestützte Modellformulierung übernommen worden, um das LINGO-Modell in seiner ersten Variante möglichst kompakt und übersichtlich zu halten.

Die computergestützte Formulierung des Tourenplanungsmodells für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn wird in der Abbildung 40 dargestellt, die sich über diese Seite und die nächsten Seiten erstreckt.

! OR-Modell v5.2 für Lingo11, Stand 08.10.2009;

! INFO:

Vereinfachtes Model mit nur einer Lokomotive für nur ein EVU ($e=E=1$) und nur einer Tour ($q=Q_e=1$).
Streckenlängen und Transportdaten laut dem praktischen Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn;

! LINGO-Options (Ctrl-I): Im Nonlinear Solver muss die Option "Final Nonl Feasibility Tol" auf den neuen Wert "1e-032" eingestellt werden, andernfalls werden unter Umständen keine zulässigen Lösungen gefunden ;

MODEL:

SETS:

Haltepunkt;

! ist die Menge der Haltepunkte HP_n im OR-Modell;

Gleisstrecken(Haltepunkt, Haltepunkt): Streckenlaenge;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Streckenlaenge(i,j) für die Koeffizienten der Distanzmatrix im OR-Modell;

Direktverknuepfungen(Haltepunkt, Haltepunkt): Direktverknuepfung;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Direktverknuepfung(i,j) für die Koeffizienten der Verknüpfungsmatrix im OR-Modell;

Eisenbahnverkehrsunternehmen: Anzahl_Lokomotiven, Anzahl_max_Touren;

! ist die Menge der Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e im OR-Modell mit ihren Eigenschaften Anzahl_Lokomotiven und Anzahl_max_Touren;

Depots(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Haltepunkt): Depot_Haltepunkt;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Depot_Haltepunkt(e,n) für das Depot DEP_e des Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_e im Haltepunkt HP_n im OR-Modell;

ENDSETS

DATA:

Haltepunkt = HP1 HP2 HP3 HP4;

! gibt die Haltepunkte HP_n des Verkehrsnetzes als symbolische Konstanten HP1, HP2, HP3 und HP4 ein;

!		j=1	j=2	j=3	j=4	;
Streckenlaenge =	=	0	91	0	78	! i=1;
		91	0	0	144	! i=2;
		0	0	0	302	! i=3;
		78	144	302	0;	! i=4;

! Eingabe der Werte für jedes Element Streckenlaenge(i,j) zur Spezifizierung der Distanzmatrix;

Eisenbahnverkehrsunternehmen = EVU1 ;! EVU2 ;

Anzahl_Lokomotiven = 1 ;! 0 ;

! gibt das Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e mit e=1 als symbolische Konstante EVU1 ein
Das zweite Eisenbahnverkehrsunternehmen mit der symbolischen Konstanten EVU2 wird lediglich als „Dummy“ in einem Kommentar-Zusatz eingefügt, um zu verdeutlichen, wie die Informationseingabe erweitert werden müsste, wenn mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen zugelassen sind. Die Lokomotivenanzahl 0 für das EVU2 zeigt an, dass das EVU2 für das hier betrachtete Optimierungsbeispiel keine Bedeutung besitzt.;

!

		HP_1	HP_2	HP_3	HP_4	;
--	--	------	------	------	------	---

Depot_Haltepunkt = 1 0 0 0 ;! EVU_1: hier hat das EVU1 sein Depot im HP1;

!

		0	0	0	1	;
--	--	---	---	---	---	---

! EVU_2: hier hat das EVU2 sein Depot im HP4;

! Eingabe der Matrix der Depot_Haltepunkte DEP_e der Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e;

! zugleich werden hierdurch die Formeln
$$dhp_{e,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } DEP_e = HP_n \\ 0, & \text{wenn } DEP_e \neq HP_n \end{cases} \text{ und } \sum_{n=1}^N dhp_{e,n} = 1$$
 umgesetzt;

ENDDATA

CALC:

!

$v_{i,j} = \begin{cases} 1; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases}$	$d_{i,j} = \begin{cases} sl_{i,j}; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \in KA \\ 0; & \text{falls } (HP_i, HP_j) \notin KA \end{cases}$
---	--

$\forall i=1, \dots, N \forall j=1, \dots, N: v_{i,j} \leq d_{i,j} \cdot K \wedge v_{i,j} \cdot K \geq d_{i,j}$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

@FOR(Haltepunkt(i):

@FOR(Haltepunkt(j): Direktverknuepfung(i,j) = @IF(Streckenlaenge(i,j) #GT# 0, 1, 0));

Anzahl_Haltepunkte = @SIZE(Haltepunkt);

Anzahl_max_Tourpositionen = Anzahl_Haltepunkte + 3;

Anzahl_max_Tourpositionen_minEin = Anzahl_max_Tourpositionen - 1;

@FOR(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Index_EVU(e) = e);

! $Q_e = \text{anz}_{\text{lok},e}$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Anzahl_max_Touren(e) = Anzahl_Lokomotiven(e));

Groesste_Anzahl_max_Touren = @MAX(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Anzahl_max_Touren(e));

ENDCALC

SETS:

Beladungsmengen(Haltepunkt): gmb;

! spezifiziert die Beladungsmengen gmb_i, mit denen ein Güterzug im Haltepunkt HP_i zu beladen ist;

Entladungsmengen(Haltepunkt, Haltepunkt): gme;

! spezifiziert die Entladungsmengen gme_i_j, von denen ein Güterzug, der im Haltepunkt HP_i mit der Gütermenge gmb_i beladen wurde, im Haltepunkt HP_j zu entladen ist;

Relevanzvariable_Beladen(Haltepunkt): Relevanzvariable_relb;

! ist eine abgeleitete Menge mit den beladungsbezogenen Relevanzvariablen der Haltepunkte:

ein Haltpunkt ist zum Beladen genau dann anzufahren, wenn die Relevanzvariable den Wert 1 annimmt;

Relevanzvariable_Entladen(Haltepunkt, Haltepunkt): Relevanzvariable_rele;

! ist eine abgeleitete Menge mit den entladungsbezogenen Relevanzvariablen der Haltepunkte:

ein Haltpunkt ist zum Entladen genau dann anzufahren, wenn die Relevanzvariable den Wert 1 annimmt;

ENDSETS

DATA:

! i=1 i=2 i=3 i=4 ;

gmb = 0 200 400 300 ;

! Eingabe der Matrix der Zuladungsmengen;

! j=1 j=2 j=3 j=4 ;

gme = 0 0 0 0 ! i=1;

0 0 0 200 ! i=2;

0 0 0 400 ! i=3;

300 0 0 0 ; ! i=4;

! Eingabe der Matrix der Entladungsmengen;

ENDDATA

CALC:

! $\forall i=1, \dots, N: \text{relb}_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn } gmb_i > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } gmb_i = 0 \text{ gilt} \end{cases}$ und $\text{relb}_i \leq gmb_i \cdot K \wedge \text{relb}_i \cdot K \geq gmb_i$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

@FOR(Haltepunkt(i): Relevanzvariable_relb(i) = @IF(gmb #EQ# 0, 0, 1));

! $\forall i=1, \dots, N \forall j=1, \dots, N: \text{rele}_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } gme_{i,j} > 0 \text{ gilt} \\ 0, & \text{wenn } gme_{i,j} = 0 \text{ gilt} \end{cases}$ und $\text{rele}_{i,j} \leq gme_{i,j} \cdot K \wedge \text{rele}_{i,j} \cdot K \geq gme_{i,j}$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

@FOR(Haltepunkt(i):

@FOR(Haltepunkt(j): Relevanzvariable_rele(i,j) = @IF(gme #EQ# 0, 0, 1));

ENDCALC

SETS:

Haltepunktzaehler / 1..Anzahl_Haltepunkte /: Haltepunktindex;

! ist die Menge der Indizes n für die Haltepunkte HP_n im OR-Modell;

Tourzaehler / 1..Groesste_Anzahl_max_Touren /: Tourindex;

! ist die Menge der Indizes q für die Touren T_e_q im OR-Modell;

Positionszaehler / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /: Positionsindex;

! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_e_q im OR-Modell;

ENDSETS

CALC:

@FOR(Haltepunktzaehler(n): Haltepunktindex(n)=n);

@FOR(Tourzaehler(q): Tourindex(q)=q);

@FOR(Positionszaehler(p): Positionsindex(p)=p);

ENDCALC

SETS:

Tour(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Tourlaenge, Position_Tourende;

! ist eine abgeleitete Menge, die für jede Tour T_e_q konkrete Werte für die beiden
Toureigenschaften Tourlänge TL_e_q und Position_Tourende_e_q ausweisen kann;

! die Toureigenschaft Position_Tourende_e_q wird hier nur als "Merkposten" angeführt, weil sie für das
aktuelle OR-Modell nicht erforderlich ist, aber für zukünftige Modellvarianten von Interesse sein könnte;

Tourvektor / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /: Tourvektorkomponente;

! ist die Menge der Komponenten hpi_e_q_p des Tourvektors TV_e_q für eine beliebige Tour T_e_q
im OR-Modell mit p = 1,...,P;

Tourpositionen_bis_P / 1..Anzahl_max_Tourpositionen /;

! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_e_q im OR-Modell
mit p = 1,...,P, also mit der letzten Tourposition P;

Tourpositionen_bis_Pminus1 / 1..Anzahl_max_Tourpositionen_minEin /;

! ist die Menge der Indizes p für die Positionen in einer beliebigen Tour T_e_q im OR-Modell
mit p=1,...,P-1, also ohne die letzte Tourposition P;

Hilfsvariablen1(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Tourpositionen_bis_Pminus1, Haltepunkt, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Hilfsvariable1_x;

Hilfsvariablen2(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Haltepunkt, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Hilfsvariable2_x;

Hilfsvariablen3(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) |
Tourindex(&3) #LE# Anzahl_max_Touren(&2):
Hilfsvariable3_zb;

Hilfsvariablen4(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler) |
Tourindex(&3) #LE# Anzahl_max_Touren(&2):
Hilfsvariable4_ze;

Hilfsvariablen5(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Tourpositionen_bis_P, Tourpositionen_bis_P) | Tourindex(&4) #LE# Anzahl_max_Touren(&3):
Hilfsvariable5;

Hilfsvariablen6(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Tourpositionen_bis_P, Tourpositionen_bis_P) | Tourindex(&4) #LE# Anzahl_max_Touren(&3):
Hilfsvariable6;

Tourendevektorkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |
Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Tourendevektorkomponente;

Haltepunktindexvektorkomponenten(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P) |
Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Haltepunktindexvektorkomponente;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen hpi_e_q_p als Haltepunkt-Indizes n für diejenigen
Haltepunkte HP_n, die im Tourvektor TV_e_q einer Tour T_e_q an den Positionen p = 1,...,P stehen;

Zuordnungsentscheidung(Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Tourpositionen_bis_P, Haltepunkt) | Tourindex(&2) #LE# Anzahl_max_Touren(&1):
Entscheidungsvariable_x;

! ist eine abgeleitete Menge mit den Elementen Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$;

Tourbeladungsmenge(Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler, Tourpositionen_bis_P):
Entscheidungsvariable_zb;

! ist die Entscheidungsvariable $zb_{i,e,q,p}$ zur Beladung eines Güterwagens auf einer Tour $T_{e,q}$
im Haltepunkt HP_i an der Tourposition p ;

Tourentladungsmenge(Haltepunkt, Haltepunkt, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Tourzaehler,
Tourpositionen_bis_P): Entscheidungsvariable_ze;

! ist die Entscheidungsvariable $ze_{i,j,e,q,r}$ zur Entladung eines Güterwagens auf einer Tour $T_{e,q}$
im Haltepunkt HP_j an der Tourposition r ;

ENDSETS

SUBMODEL Modellkern:

! Die nachfolgenden @FOR-Funktionen implementieren als „Schleifen“ in kompakter Form
die Binär-Restriktionen, dass für jede Entscheidungs-, Relevanz- oder Hilfsvariable
und für jede Komponente des Tourendevektors nur der Wert 0 oder 1 zulässig ist;

@FOR(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): @BIN(Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)));
@FOR(Tourbeladungsmenge(n,e,q,p): @BIN(Entscheidungsvariable_zb(n,e,q,p)));
@FOR(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): @BIN(Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r)));
@FOR(Relevanzvariable_Beladen(i): @BIN(Relevanzvariable_relb(i)));
@FOR(Relevanzvariable_Entladen(i,j): @BIN(Relevanzvariable_rele(i,j)));
@FOR(Hilfsvariablen1(e,q,p,i,j): @BIN(Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j)));
@FOR(Hilfsvariablen2(e,q,i,j): @BIN(Hilfsvariable2_x(e,q,i,j)));
@FOR(Hilfsvariablen3(i,e,q): @BIN(Hilfsvariable3_zb(i,e,q)));
@FOR(Hilfsvariablen4(i,e,q): @BIN(Hilfsvariable4_ze(i,e,q)));
@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p): @BIN(Tourendevektorkomponente(e,q,p)));

$$! \quad hpi_{e,q,p} = \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Haltepunktindexvektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #LT# Anzahl_max_Tourpositionen:
Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p) = @SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
Haltepunktindex(n) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)));

1)

$$! \quad \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
@FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
@SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n)) <= 1));

1) Der zuletzt angeführte SUM-Term ist ein nicht dokumentierter "Glücksfall" von LINGO, weil die Addition nicht etwa über alle Indizes e,q,p,n der Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ verläuft, sondern nur über den einen Index n für die Haltepunkte HP_n , der durch den voranstehenden FOR-Operator für die Indizes e, q und p noch nicht erfasst wird. Auf diese Weise wird der entsprechende Summenterm aus dem OR-Modell korrekt implementiert.

$$! \sum_{n=1}^N x_{e,q,l,n} \cdot dhp_{e,n} = 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um, welche die Entscheidungsvariable $x_{e,q,p,n}$ für die erste Position $p=1$ des Tourvektors einer Tour $T_{e,q}$ genau dann gleich 1 (0) setzt, wenn der Haltepunkt HP_n (nicht) das Depot DEP_e des EVU_e darstellt;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #EQ# 1:
    @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
      Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n) * Depot_Haltepunkt(e,n) = 1 ));
```

$$! te_{e,q,p} = \begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n}, & \text{für } p = 1, \dots, P-1 \\ \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n}, & \text{für } p = P \end{cases} \quad \text{und } x_{e,q,p,n} \geq te_{e,q,p} \cdot dhp_{e,n}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formeln um;

```
@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #LT# Anzahl_max_Tourpositionen:
  Tourendevektorkomponente(e,q,p) =
    @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n))
  - @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,n));
@FOR(Tourendevektorkomponenten(e,q,p) | Positionsindex(p) #EQ# Anzahl_max_Tourpositionen:
  Tourendevektorkomponente(e,q,p) =
    @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n));
@FOR(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n):
  Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n) >= Tourendevektorkomponente(e,q,p) * Depot_Haltepunkt(e,n)).
```

! Der nachfolgende LINGO-Ausdruck zur Ermittlung der Toureigenschaft $Position_Tourende_e_q$ ist für das aktuelle OR-Modell nicht erforderlich, könnte aber für zukünftige Modellvarianten von Interesse sein ;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  Position_Tourende(e,q) =
    @SUM(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n));
```

$$! \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} - \sum_{n=1}^N x_{e,q,p+1,n} \geq 0$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
    @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p,n))
    - @sum(Zuordnungsentscheidung(e,q,p,n): Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,n)) >= 0 ));
```

$$! x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \leq v_{i,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
    @FOR(Gleisstrecken(i,j): Direktverknuepfung(i,j) >=
      Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,j) ));
```

$$! zb_{i,e,q,p} \leq relb_i$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    @FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
      Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) <= Relevanzvariable_relb(i) ));
```

$$! \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{b_{i,e,q,p}} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @sum(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p): Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)) <= 1 );
```

$$! z_{e_{i,j,e,q,r}} \leq \text{rele}_{i,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
        Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) <= Relevanzvariable_rele(i,j) ))));
```

$$! \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P z_{e_{i,j,e,q,r}} \leq 1$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @sum(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r)) <= 1 ));
```

$$! \sum_{p=1}^P z_{b_{i,e,q,p}} - \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^P z_{e_{i,j,e,q,r}} = 0$$

Die nachfolgenden LINGO-Ausdrücke setzen die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    Hilfsvariable3_zb(i,e,q) =
      (@sum(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p): Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)) ));
```

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    Hilfsvariable4_ze(i,e,q) =
      (@sum(Tourentladungsmenge(i,j,e,q,r): Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r)) ));
```

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    (Hilfsvariable3_zb(i,e,q) - Hilfsvariable4_ze(i,e,q)) = 0 ));
```

$$! z_{b_{i,e,q,p}} \leq x_{e,q,p,i}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
    @FOR(Tourpositionen_bis_P(p):
      Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) <= Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i))));
```

$$! z_{e_{i,j,e,q,r}} \leq x_{e,q,r,j}$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
  @FOR(Haltepunkt(j):
    @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
      @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
        Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) <= Entscheidungsvariable_x(e,q,r,j) ))));
```

$$! \quad z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot p \leq z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot r$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Haltepunkt(j):
        @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
            @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
                Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) *
                Positionsindex(p)
                <= Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) *
                Positionsindex(r) ))));
```

! Die folgende Formel dient zur internen Prüfung der Einhaltung der o.a. Reihenfolgerestriktion und zur Ermittlung von Positionsabstaende_Be_Entladen;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Haltepunkt(j):
        @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
            @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
                Hilfsvariable5 (i,j,e,q,p,r) = Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)
                * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) * Positionsindex(p) ))));
```

! Die folgende Formel dient zur internen Prüfung der Einhaltung der o.a. Reihenfolgerestriktion und zur Ermittlung von Positionsabstaende_Be_Entladen;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Haltepunkt(j):
        @FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
            @FOR(Tourpositionen_bis_P(p): @FOR(Tourpositionen_bis_P(r):
                Hilfsvariable6 (i,j,e,q,p,r) = Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p)
                * Entscheidungsvariable_ze(i,j,e,q,r) * Positionsindex(r) ))));
```

$$! \quad PAS = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^P z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot r - z_{i,e,q,p} \cdot z_{i,j,e,q,r} \cdot p$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
Positionsabstaende_Be_Entladen =
    @SUM(Haltepunkt(i):
        @SUM(Haltepunkt(j):
            @SUM(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
                @SUM(Tourpositionen_bis_P(p): @SUM(Tourpositionen_bis_P(r):
                    Hilfsvariable6 (i,j,e,q,p,r) - Hilfsvariable5 (i,j,e,q,p,r) ))));
```

$$! \quad \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P z_{i,e,q,p} = relb_i$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel um;

```
@FOR(Haltepunkt(i):
    @SUM(Tourbeladungsmenge(i,e,q,p):
        Entscheidungsvariable_zb(i,e,q,p) ) = Relevanzvariable_relb(i) );
```

! Die nachfolgenden Konstrukte dienen zur Implementierung der Formel $TL_{e,q} = \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j}) \cdot sl_{i,j}$

für die Tourlänge(e,q), entsprechend $TL_{e,q}$ im OR-Modell.

Die o.a. kompakte Formel aus dem OR-Modell wird bewusst mit Hilfsvariablen in drei Teilformeln zerlegt, um den korrekten Formelaufbau über mehrere verschachtelte FOR-Operatoren schrittweise nachvollziehen zu können und auch in der Lage zu sein, die Formelkorrektheit anhand von Zwischenwerten zu testen. ;

```

@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Tourpositionen_bis_Pminus1(p):
    @FOR(Haltepunkt(i):
      @FOR(Haltepunkt(j): Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j) =
        Entscheidungsvariable_x(e,q,p,i) * Entscheidungsvariable_x(e,q,p+1,j) ));
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @FOR(Haltepunkt(i):
    @FOR(Haltepunkt(j): Hilfsvariable2_x(e,q,i,j) =
      @SUM(Tourpositionen_bis_Pminus1(p): Hilfsvariable1_x(e,q,p,i,j) ));
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e): Tourlaenge(e,q) =
  @SUM(Gleisstrecken(i,j): Streckenlaenge(i,j) * Hilfsvariable2_x(e,q,i,j) ));

```

! Definition der Zielfunktion als Tourgesamtlänge TGL aller Eisenbahnverkehrsunternehmen e mit $e=1,\dots,E$ auf ihren jeweils zulässigen Touren $q=1,\dots,Q_e$;

! Das nachfolgende Konstrukt dient zur Implementierung der Formel $TGL(\underline{x}) = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} TL_{e,q}(\underline{x}_{e,q}) \rightarrow \min!$ für die Tourengesamtlänge TGL;

Gesamtlänge_aller_Touren = @SUM(Tour(e,q): Tourlaenge(e,q));

! es folgt die Zielfunktion für die Minimierung der durchfahrtenfreien Tourengesamtlänge TGL;

MIN = Gesamtlänge_aller_Touren + (Positionsabstände_Be_Entladen /
 (Anzahl_max_Tourpositionen_minEin * Anzahl_max_Tourpositionen_minEin *
 @SUM(Eisenbahnverkehrsunternehmen(e): Anzahl_max_Touren(e)));

ENDSUBMODEL

CALC:

@SOLVE(Modellkern);

$$! \quad TV_{e,q} = \left(\sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,1,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n}, \dots, \sum_{n=1}^N n \cdot x_{e,q,p,n} \right)$$

Der nachfolgende LINGO-Ausdruck setzt die o.a. Formel der Tourdarstellungsrestriktion um und ergänzt eine äquivalente, aber anschaulichere Darstellung des Tourvektors $TV_{e,q}$;

```

@WRITE(@NEWLINE(2), ' Modelllösung:', @NEWLINE(2) );
@FOR(Tour(e,q) | Tourindex(q) #LE# Anzahl_max_Touren(e):
  @WRITE(' Tourvektor TV(', Index_EVU(e), ',', Tourindex(q), ')=(');
  @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #LT# Anzahl_max_Tourpositionen:
    Tourvektorkomponente(p) = Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p);
    @WRITE(Tourvektorkomponente(p), ',') );
  @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #EQ# Anzahl_max_Tourpositionen:
    Tourvektorkomponente(p) = Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p);
    @WRITE(Tourvektorkomponente(p), ')') );
  @WRITE(' entsprechend der Haltepunkt-Folge: (');
  @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #LT# Anzahl_max_Tourpositionen:
    Tourvektorkomponente(p) = Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p);
    @WRITE('HP_', Tourvektorkomponente(p), ',') );
  @FOR(Tourpositionen_bis_P(p) | Positionsindex(p) #EQ# Anzahl_max_Tourpositionen:
    Tourvektorkomponente(p) = Haltepunktindexvektorkomponente(e,q,p);
    @WRITE('HP_', Tourvektorkomponente(p), ')', @NEWLINE(2) ));
);
@WRITE(' Tourengesamtlänge: TGL = ', Gesamtlänge_aller_Touren, ' km', @NEWLINE(2) );

```

```

@IFC( @STATUS() #EQ# 0: @WRITE(' Es wurde eine global optimale Modelllösung gefunden.',
@NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 1: @WRITE(' Es existiert keine zulässige Modelllösung.', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 2: @WRITE(' Es existiert eine unbeschränkte Modelllösung.', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 3: @WRITE(' Fehler: Die Lösungsprozedur wurde wegen eines unbekanntem
Fehlers erfolglos abgebrochen!', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 4: @WRITE(' Es wurde eine zulässige Modelllösung gefunden.',
@NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 5: @WRITE(' Entweder existiert eine unbeschränkte Modelllösung oder
es existiert keine zulässige Modelllösung.', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 6: @WRITE(' Es wurde eine lokal optimale Modelllösung gefunden.',
@NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 7: @WRITE(' Es wurde keine zulässige Modelllösung gefunden,
obwohl sie existieren könnte.', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 8: @WRITE(' Fehler: Die Lösungsprozedur wurde wegen Erreichens
des cutoff level der Zielfunktion erfolglos abgebrochen!', @NEWLINE(1) ));
@IFC( @STATUS() #EQ# 9: @WRITE(' Fehler: Die Lösungsprozedur wurde wegen eines undefinierten
arithmetischen Operation in einer der Restriktionen erfolglos abgebrochen!', @NEWLINE(1) ));
ENDCALC
END

```

Abbildung 40: computergestützte Formulierung des Tourenplanungsmodells –
für das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn

Die Abbildung 41 auf den nächsten Seiten zeigt einen Lösungsreport für die computergestützte Formulierung des Tourenplanungsmodells aus der Abbildung 40. In diesem Lösungsreport wurden nachträglich diejenigen Passagen in Fettdruck hervorgehoben, die sich für die generierte optimale Modelllösung aus betriebswirtschaftlicher Perspektive als besonders interessant erweisen. Dies ist einerseits die minimale Tourengesamtlänge, die als Wert der Zielvariable „GESAMTLAENGE_ALLER_TOUREN“ für die eine ausgewiesene optimale Modelllösung resultiert.¹⁾ Andererseits werden auch die Werte der Entscheidungsvariablen $x_{1.1.p.n}$ für die optimale Modelllösung hervorgehoben, mit deren Hilfe angezeigt wird, welche Haltepunkte des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes in welcher Reihenfolge auf der optimalen Tour $T_{1.1}$ des einen betrachteten Eisenbahnverkehrsunternehmens EVU_1 angefahren werden. Diese Reihenfolge der angefahrenen Haltepunkte wird am Ende des Lösungsreports nochmals als „Klartext“ für den Tourvektor und die entsprechende Haltepunkt-Folge angezeigt. Darüber hinaus wird auch der optimale Wert der zu minimierenden Tourengesamtlänge der Deutlichkeit halber als „Klartext“ ausgewiesen. Schließlich werden LINGO-interne Informationen über die Durchführung der Modelloptimierung genutzt, um am Ende anzuzeigen, dass es sich bei der ausgewiesenen optimalen Modelllösung um ein *lokales* Optimum handelt. Die mathematische Modellierungssoftware LINGO war aber nicht in der Lage nachzuweisen, dass dieses lokale Optimum des Tourenplanungsmodells zugleich das gesuchte *globale* Optimum darstellt.

1) Der „Objective value“ zu Beginn des Lösungsreports weicht mit dem Wert von 917,0833 geringfügig vom Wert 917,0000 für die Zielvariable „GESAMTLAENGE_ALLER_TOUREN“ ab. Dies liegt daran, dass das Tourenplanungsmodell mit der Zielfunktion „Minimierung der *durchfahrtenfreien* Tourengesamtlänge TGL*“ gemäß Rubrik a2) in z.B. Abbildung 37 aufgestellt wurde. Diese Zielfunktion umfasst den *Korrekturterm* $PAS(z)/PAS_{grö}$, der überflüssige Durchfahrten durch Be- oder Entladungshaltepunkte verhindert und in der hier generierten optimalen Modelllösung den Wert 0,0833 annimmt. Dagegen weist die Zielvariable „GESAMTLAENGE_ALLER_TOUREN“ den „eigentlich“ interessierenden Wert der Zielfunktion „Minimierung der Tourengesamtlänge TGL“ gemäß Rubrik a1) in z.B. Abbildung 37 aus, die den vorgenannten Korrekturterm nicht umfasst und daher „nur“ den *betriebswirtschaftlich relevanten* Wert 917,0000 für die Tourengesamtlänge aufweist.

Allerdings wurden aus dem Lösungsreport der mathematischen Modellierungssoftware LINGO die Darstellungen der Werte aller Hilfsvariablen sowie die Darstellungen des „Slack or Surplus“ für alle Restriktionen des Tourenplanungsmodells ausgeblendet, um den Lösungsreport nicht „ausufer“ zu lassen.¹⁾

Local optimal solution found.

Objective value: 917.0833
 Objective bound: 917.0833
 Infeasibilities: 0.4440892E-15
 Extended solver steps: 0
 Total solver iterations: 6

Variable	Value	Reduced Cost
ANZAHL_HALTEPUNKTE	4.000000	0.000000
ANZAHL_MAX_TOURPOSITIONEN	7.000000	0.000000
ANZAHL_MAX_TOURPOSITIONEN_MINEIN	6.000000	0.000000
GROSSTE_ANZAHL_MAX_TOUREN	1.000000	0.000000
POSITIONSABSTAENDE_BE_ENTLADEN	3.000000	0.000000
GESAMTLAENGE ALLER TOUREN	917.0000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP1, HP1)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP1, HP2)	91.00000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP1, HP3)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP1, HP4)	78.00000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP2, HP1)	91.00000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP2, HP2)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP2, HP3)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP2, HP4)	144.0000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP3, HP1)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP3, HP2)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP3, HP3)	0.000000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP3, HP4)	302.0000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP4, HP1)	78.00000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP4, HP2)	144.0000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP4, HP3)	302.0000	0.000000
STRECKENLAENGE(HP4, HP4)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP1, HP1)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP1, HP2)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP1, HP3)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP1, HP4)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP2, HP1)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP2, HP2)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP2, HP3)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP2, HP4)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP3, HP1)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP3, HP2)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP3, HP3)	0.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP3, HP4)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP4, HP1)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP4, HP2)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP4, HP3)	1.000000	0.000000
DIREKTVERKNUEPFUNG(HP4, HP4)	0.000000	0.000000
INDEX_EVU(EVU1)	1.000000	0.000000
ANZAHL_LOKOMOTIVEN(EVU1)	1.000000	0.000000
ANZAHL_MAX_TOUREN(EVU1)	1.000000	0.000000
DEPOT_HALTEPUNKT(EVU1, HP1)	1.000000	0.000000
DEPOT_HALTEPUNKT(EVU1, HP2)	0.000000	0.000000
DEPOT_HALTEPUNKT(EVU1, HP3)	0.000000	0.000000
DEPOT_HALTEPUNKT(EVU1, HP4)	0.000000	0.000000
GMB(HP1)	0.000000	0.000000
GMB(HP2)	200.0000	0.000000
GMB(HP3)	400.0000	0.000000
GMB(HP4)	300.0000	0.000000

1) Der gesamte, von der mathematischen Modellierungssoftware LINGO generierte Lösungsreport erstreckt sich in der nachfolgenden Formatierung über 28 Seiten. Die Auflistung des „Slack or Surplus“ erfolgt für insgesamt 2.938 Restriktionen des Tourenplanungsmodells.

GME(HP1, HP1)	0.000000	0.000000
GME(HP1, HP2)	0.000000	0.000000
GME(HP1, HP3)	0.000000	0.000000
GME(HP1, HP4)	0.000000	0.000000
GME(HP2, HP1)	0.000000	0.000000
GME(HP2, HP2)	0.000000	0.000000
GME(HP2, HP3)	0.000000	0.000000
GME(HP2, HP4)	200.0000	0.000000
GME(HP3, HP1)	0.000000	0.000000
GME(HP3, HP2)	0.000000	0.000000
GME(HP3, HP3)	0.000000	0.000000
GME(HP3, HP4)	400.0000	0.000000
GME(HP4, HP1)	300.0000	0.000000
GME(HP4, HP2)	0.000000	0.000000
GME(HP4, HP3)	0.000000	0.000000
GME(HP4, HP4)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELB(HP1)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELB(HP2)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELB(HP3)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELB(HP4)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP1, HP1)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP1, HP2)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP1, HP3)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP1, HP4)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP2, HP1)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP2, HP2)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP2, HP3)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP2, HP4)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP3, HP1)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP3, HP2)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP3, HP3)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP3, HP4)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP4, HP1)	1.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP4, HP2)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP4, HP3)	0.000000	0.000000
RELEVANZVARIABLE_RELE(HP4, HP4)	0.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEX(1)	1.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEX(2)	2.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEX(3)	3.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEX(4)	4.000000	0.000000
TOURINDEX(1)	1.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(1)	1.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(2)	2.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(3)	3.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(4)	4.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(5)	5.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(6)	6.000000	0.000000
POSITIONSINDEX(7)	7.000000	0.000000
TOURLAENGE(EVU1, 1)	917.0000	0.000000
POSITION_TOURENDE(EVU1, 1)	6.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(1)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(2)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(3)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(4)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(5)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(6)	0.000000	0.000000
TOURVEKTORKOMPONENTE(7)	0.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 1)	0.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 2)	0.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 3)	0.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 4)	0.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 5)	0.000000	0.2777778E-01
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 6)	1.000000	0.000000
TOURENDEVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 7)	0.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 1)	1.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 2)	2.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 3)	4.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 4)	3.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 5)	4.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 6)	1.000000	0.000000
HALTEPUNKTINDEXVEKTORKOMPONENTE(EVU1, 1, 7)	0.000000	0.000000
[...]		
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 1, HP1)	1.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 1, HP2)	0.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 1, HP3)	0.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 1, HP4)	0.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 2, HP1)	0.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 2, HP2)	1.000000	0.000000
ENTSCHEIDUNGSVARIABLE_X(EVU1, 1, 2, HP3)	0.000000	0.000000

[...]

Modelllösung:

Tourvektor TV_1_1 = (1,2,4,3,4,1,0)

entsprechend der Haltepunkt-Folge: (HP_1,HP_2,HP_4,HP_3,HP_4,HP_1,HP_0)

Tourenesamtlänge: TGL = 917 km

Es wurde eine **lokal optimale** Modelllösung gefunden.

Abbildung 41: Lösungsreport
für die computergestützte Formulierung des Tourenplanungsmodells

Die Lösung der computergestützten Formulierung des Tourenplanungsmodells wurde mithilfe der Solver-Komponente der mathematischen Modellierungssoftware LINGO ermittelt. Diese Solver-Komponente stellt eine reichhaltige Sammlung von leistungsfähigen Algorithmen dar, die sich für die Lösung umfangreicher und komplizierter Modelle des Operations Research schon vielfach bewährt haben. Trotz dieser Benutzung einer „an sich“ hochleistungsfähigen, sowohl in der betrieblichen Praxis als auch von universitären Forschungseinrichtungen häufig eingesetzten Solver-Komponente stellten sich bei Versuchen, das Tourenplanungsmodell mithilfe der mathematischen Modellierungssoftware LINGO zu lösen, einige gravierende Schwierigkeiten heraus. Sie werden hier nicht im Detail behandelt, sondern lediglich anhand von drei Aspekten exemplarisch erläutert.

Erstens erweist sich die mathematische Modellierungssoftware LINGO in manchen Situationen als extrem *sensibel* gegenüber der Festlegung von *Softwareparametern*, welche die Auswahl von Algorithmen zur Modelllösung und die Art der Ausführung der ausgewählten Algorithmen steuern. Diese Parameterfestlegung erfolgt in der Rubrik „LINGO Options“. Beispielsweise ist in der Parameter-Sektion des „Nonlinear Solver“ für den Parameter „Final Nonl(inear) Feasibility Tol(erance)“ der Default-Wert „1e-006“ voreingestellt. Mit dieser Voreinstellung scheitert die Solver-Komponente aber für einzelne Varianten des oben vorgestellten Tourenplanungsmodells,¹⁾ weil sie angeblich keine zulässige Lösung aufzufinden vermag, obwohl diese Modellvarianten nachweislich jeweils eine optimale – und somit auch zulässige – Modelllösung besitzen (!). Wird der Default-Wert durch den Wert „1e-032“ ersetzt, wie in der Abbildung 42 auf der nächsten Seite veranschaulicht ist, so wird von der Solver-Komponente die optimale Modelllösung ohne Schwierigkeiten und nach kurzer Rechenzeit, die auf einem handelsüblichen Personalcomputer im Subsekundenbereich liegt, aufgefunden. Auch die Veränderung der Suchstrategien („Strategies“), die sich in der Parameter-Sektion für den „Nonlinear Solver“ festlegen lassen, können erheblichen Einfluss auf das Auffinden sowohl zulässiger als auch optimaler Modelllösungen ausüben. Für das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell erwies sich nur die Suchstrategie „SLP Directions“ in den meisten Fällen als zielführend.

1) Die betrifft speziell die Modellvariante „Version 4.9a Depot in HP1“.

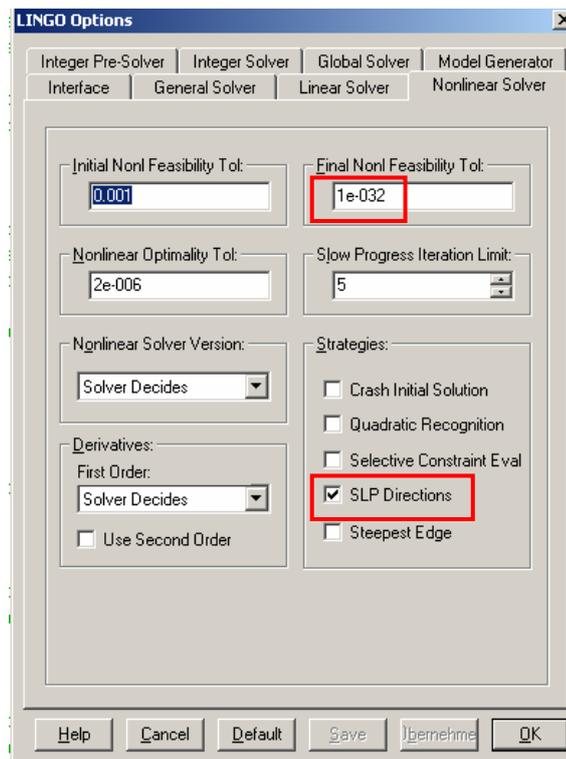


Abbildung 42: Softwareparameter für das LINGO-Modell –
Ausschnitt mit der Parameter-Sektion für den „Nonlinear Solver“

Die Parametrisierung der mathematischen Modellierungssoftware LINGO erweist sich einerseits als vorteilhaft, weil durch die Vielzahl von Softwareparametern eine große Flexibilität erreicht wird, um die Solver-Komponente an unterschiedlichste Strukturen der jeweils zu lösenden Modelle anzupassen. Andererseits leidet die Software LINGO unter der *Intransparenz* dieser Softwareparameter. Weder in der integrierten Online-Hilfe noch in der mitgelieferten Softwaredokumentation wird ausführlich darauf eingegangen, wie sich welche Parameterwerte darauf auswirken, *ob* tatsächlich existierende zulässige oder optimale Modelllösungen von der Solver-Komponente überhaupt *gefunden* werden. Ebenso wenig wird für den Fall, dass tatsächlich existierende zulässige oder optimale Modelllösungen von der Solver-Komponente gefunden werden, erläutert, wie sich welche Parameterwerte auf die Rechenzeit und den Speicherplatzbedarf auswirken, die benötigt werden, um die vorgenannten Modelllösungen aufzufinden. Angesichts dieser Intransparenz hinsichtlich der Wirkungsweisen unterschiedlicher Parameterwerte, die durch die Vielfalt unterschiedlicher Softwareparameter noch verstärkt wird, fühlt sich ein Benutzer der mathematischen Modellierungssoftware oftmals in einer Art „Blindflug“, wenn er mit unterschiedlichsten Kombinationen von Parameterwerten *experimentieren* muss, um herauszufinden, wie sich die gesuchten – und tatsächlich existierenden (!) – Modelllösungen mit möglichst geringem Einsatz von Rechenzeit und Speicherplatz generieren lassen. Ein solche „Blindflug“- und „Experimental“-Software sollte einem „normalen“ betriebswirtschaftlichen Anwender, der nicht über professionelle Softwarekenntnisse verfügt, eigentlich nicht zugemutet werden.

Zweitens scheint das Tourenplanungsmodell, das in diesem Projektbericht vorgestellt wurde, eine besonders „*vertrackte*“ *mathematische Struktur* aufzuweisen. Denn die Solver-Komponente der mathematischen Modellierungssoftware findet – unabhängig von der o.a. Problematik der Sensibilität gegenüber unterschiedlichen Werte für die vielfältigen Softwareparameter – des Öfteren optimale und sogar zulässige Modelllösungen nicht, obwohl sie tatsächlich existieren und sich z.B. „hän-

disch“ ermitteln lassen.¹⁾ Aus umfangreicheren Experimenten mit unterschiedlichen Einstellungen der Softwareparameter und einer Vielzahl von Fehlermeldungen der Solver-Komponente drängt sich der Verdacht auf, dass das Tourenplanungsmodell eine nicht-konvexe Modellstruktur aufweist und die nicht-linearen Subkomponenten der Solver-Komponente von LINGO nicht in der Lage sind, die tatsächlich existierenden (zulässigen oder optimalen) Lösungen für Modelle mit einer *nicht-konvexen Modellstruktur* vollständig zu ermitteln. Leider ist diese erhebliche Einschränkung der Leistungsfähigkeit der Solver-Komponente von LINGO nirgendwo „sauber“ dokumentiert. Es fehlt sogar an einer expliziten und exakten Spezifizierung dessen, was bei der Anwendung dieser Solver-Komponente unter einer „nicht-konvexen“ Modellstruktur präzise zu verstehen ist.

Drittens besteht zwar Hoffnung, die zuvor skizzierten Schwierigkeiten mit der nicht-konvexen Modellstruktur des Tourenplanungsmodells dadurch zu überwinden, dass die Entscheidungsvariablen im LINGO-Modell als sogenannte *globale Variablen* deklariert werden. Sie scheinen keiner Konvexitätsbeschränkung seitens der Solver-Komponente zu unterliegen. Allerdings verfügt die Variante der mathematischen Modellierungssoftware LINGO, die bei Mitgliedern des Verbundprojekts MAEKAS zurzeit implementiert ist, nur über das Potenzial, bis zu 20 globale Variablen pro Modell zu verarbeiten. Dies ist viel zu wenig für das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell. Es umfasst je nachdem, welche implementierte Modellvariante konkret bearbeitet wird, einige hundert globale Variablen. Diese Anzahl wird angezeigt, wenn in der Sektion „Global Solver“ von LINGO die Option „Use Global Solver“ aktiviert wird und die Solver-Komponente mit einer entsprechenden Fehlermeldung reagiert, weil sie zurzeit für nur höchstens 20 globale Variablen pro Modell ausgelegt ist.

Aufgrund der gravierenden Schwierigkeiten, die von der Solver-Komponente der mathematischen Modellierungssoftware LINGO bereitet wurden, steht im Rahmen des Verbundprojekts MAEKAS zurzeit eine wesentliche Richtungsentscheidung an:

- Entweder es wird an der Software LINGO festgehalten, weil sie in ihrer Editor-Komponente eine besonders benutzerfreundliche, in weiten Teilen kognitiv adäquate Modellierungssprache zum Konstruieren und Modifizieren von Modellen bietet. Außerdem sprechen „Lernkurvenvorteile“ für die weitere Verwendung dieser Software, weil schon relativ umfangreiche Erfahrungen mit ihrem praktischen Einsatz im Verbundprojekt MAEKAS vorliegen. In diesem Fall muss aber ein Upgrade der Software beschafft werden, das über eine wesentlich leistungsfähigere – im Zweifel auch fehlerfreie – Solver-Komponente verfügt. Insbesondere muss die Anzahl der globalen Variablen, die bislang auf 20 Exemplare beschränkt ist, drastisch erhöht werden. Erstrebenswert ist die Möglichkeit, mit Modellen arbeiten zu können, die einige wenige tausend, besser noch ca. zehntausend globale Variablen enthalten.
- Oder es erfolgt eine Reimplementierung der computergestützten Modellformulierung mithilfe einer anderen mathematischen Modellierungssoftware, wie z.B. CPLEX, MATHEMATICA oder MAPLE. In diesem Fall muss aber erheblicher Zusatzaufwand investiert werden, um mit

1) Die tatsächlich existierenden optimalen oder zulässigen Modelllösungen konnten nur dadurch aufgefunden werden, dass bei der Modellformulierung schon Teile der Modelllösungen vorgegeben wurden, und zwar in der Gestalt von Haltepunkten, die an einer bestimmten Position einer tatsächlich existierenden optimalen oder zulässigen Modelllösung anzufahren sind. Mit solchen „Tricks“ konnte die Solver-Komponente dazu gebracht werden, die gesuchten Modelllösungen auch aufzufinden. Aber solche „Tricks“ können einem „normalen“ betriebswirtschaftlichen Anwender einer mathematischen Modellierungssoftware abermals nicht zugenutzt werden.

den Besonderheiten dieser Softwarealternativen vertraut zu werden. Außerdem lässt sich nicht ausschließen, dass bei der Benutzung einer anderen mathematischen Modellierungssoftware ähnliche – oder auch ganz andere – Schwierigkeiten auftreten, wie sie im Umgang mit der Software LINGO offensichtlich geworden sind.

7.4 Desiderata für die Weiterentwicklung des Tourenplanungsmodells

In diesem Projektbericht wurde ein Tourenplanungsmodell vorgestellt, das auf die Besonderheiten des Realproblems Rücksicht nimmt, die Touren von Eisenbahnverkehrsunternehmen, die im Verbundprojekt MAEKAS in der Art eines virtuellen Unternehmens miteinander kooperieren, so miteinander zu koordinieren („intelligent“ zu bündeln), dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen. Dieses Tourenplanungsmodell wurde sowohl in einer mathematischen Modellformulierung (und dort sogar in zwei Modellvarianten) als auch in einer computergestützten Modellformulierung präsentiert. Während die mathematische Modellformulierung möglichst „generisch“ und flexibel im Hinblick auf denkmögliche Variationen des zugrunde liegenden Realproblems ausgelegt ist, wurde die computergestützte Modellformulierung speziell auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn zugeschnitten.

Für das Tourenplanungsmodell bietet sich eine Vielzahl von Weiterentwicklungsmöglichkeiten an. Sie können einerseits dazu dienen, in noch größerem Ausmaß spezielle Aspekte des zugrunde liegenden Realproblems repräsentieren und verarbeiten¹⁾ zu können. Andererseits können die Modellweiterentwicklungen auch darauf abzielen, das Tourenplanungsmodell auf andere Realprobleme anzuwenden, die sich vom hier betrachteten Realproblem in mancherlei Hinsicht nicht nur „parametrisch“, sondern „strukturell“ unterscheiden.

Im Folgenden werden einige Optionen für die Weiterentwicklung des Tourenplanungsmodells vorgestellt, die nach subjektiver Einschätzung der Verfasser als besonders wünschenswert erscheinen („Desiderata“). Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Kategorien von Modellweiterentwicklungen unterschieden. Einerseits handelt es sich um Weiterentwicklungen der computergestützten Modellformulierung, die darauf abzielen, die vielfachen Vereinfachungen der computergestützten Modellformulierung aufzuheben und dadurch die computergestützte Modellformulierung an die Ausdruckskraft – das Modellierungspotenzial – der mathematischen Modellformulierung heranzuführen. Darauf wird zunächst eingegangen. Andererseits werden Weiterentwicklungen der mathe-

1) Mit der Formulierung „repräsentieren und verarbeiten“ wird auf zwei grundlegende Aspekte der „Modell-Pragmatik“ angespielt. Es handelt sich einerseits um die *Repräsentation* eines Realproblems in der Gestalt eines Modells (oder synonym: Formalproblems). Dies betrifft das *Konstruieren* und erforderlichenfalls auch das *Modifizieren* von Modellen, das seitens einer mathematischen Modellierungssoftware durch eine *Editor*-Komponente unterstützt wird. Aus der Perspektive des Wissensmanagements ist davon vornehmlich *deklaratives* Wissen betroffen, das ausdrückt („deklariert“), *was* das jeweils zugrunde liegende Realproblem inhaltlich auszeichnet. Andererseits ist die *Verarbeitung* eines Modells erforderlich, um interessante Modelleigenschaften zu analysieren. Dazu gehört vor allem die Ermittlung von mindestens einer optimalen oder sogar von allen optimalen Modelllösungen. Dies leistet die *Solver*-Komponente einer mathematischen Modellierungssoftware durch die Anwendung von Algorithmen („Lösungsprozeduren“) auf das jeweils betrachtete Modell. Aus dem Blickwinkel des Wissensmanagements ist davon vornehmlich *prozedurales* Wissen betroffen, das vorschreibt, *wie* systematisch vorgegangen („prozediert“) werden soll, um intendierte (d.h. zulässige oder optimale) Lösungen für das jeweils untersuchte Modell (Formalproblem) und somit letztlich – unter dem Vorbehalt „verständiger“ Interpretationen – auch für das jeweils zugrunde liegende Realproblem zu ermitteln.

matischen Modellformulierung angedeutet. Sie erweitern die Ausdruckskraft der mathematischen Modellformulierung so weit, dass sich eine größere Vielfalt verwandter, aber strukturell unterschiedlicher Realprobleme aus dem Bereich der Tourenplanung mit dem entsprechend erweiterten Tourenplanungsmodell repräsentieren und verarbeiten lässt. Auf die letztgenannten Weiterentwicklungen der mathematischen Modellformulierung wird später zurückgekommen.

Damit die *computergestützte Modellformulierung* das Modellierungspotenzial ausschöpfen kann, das in der mathematischen Modellformulierung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells bereits angelegt ist, müsste das LINGO-Modell aus seiner Fokussierung auf das praktische Optimierungsbeispiel der Neusser Eisenbahn „befreit“ und entsprechend erweitert werden. Als solche Erweiterungen der computergestützten Modellformulierung sollten nach Einschätzung der Verfasser in Folgearbeiten insbesondere die nachfolgend angeführten Aspekte in Angriff genommen werden:¹⁾

1. Berücksichtigung der *Streckenelektrifizierung* mithilfe der Elektrifizierungsmatrix EM;
2. Berücksichtigung der *Streckengefahrguttauglichkeit* mithilfe der Gefahrguttauglichkeitsmatrix GTM;
3. Berücksichtigung von *mehreren Eisenbahnverkehrsunternehmen* EVU_e mit $e = 1, \dots, E$ und $E \geq 2$;
4. Berücksichtigung von *mehreren optionalen Touren* $T_{e,q}$ je Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e durch $q = 1, \dots, Q_e$ und $Q_e \geq 2$;
5. Zulässigkeit von *mehreren Lokomotiven* je Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e ;
6. Unterscheidung zwischen den beiden *Lokomotivarten* Diesel- versus Elektro-Lokomotiven;
7. Unterscheidung zwischen mehreren *Lokomotiv-Typen* je Lokomotivart;
8. Unterscheidung zwischen den beiden *Güterwagenarten* Standard- versus Gefahrgut-Güterwagen;
9. Unterscheidung zwischen mehreren *Güterwagen-Typen* je Güterwagenart (für Schüttgüter, Container etc.);
10. Zulässigkeit der *Null-Tour* mit dem Tourvektor $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ als Bestandteil eines optimalen Tourenplans;²⁾
11. Berücksichtigung der *Gewichte* der zu transportierenden Gütermengen, der *Ladungsgewichte* der Güterwagen und aller davon abhängenden Modellaspekte;

1) Die Reihenfolge der angeführten Aspekte lehnt sich an die Reihenfolge ihrer Diskussion in den voranstehenden Kapiteln an. Sie drückt keine Priorisierung hinsichtlich der erstrebenswerten Realisierungsreihenfolge der Weiterentwicklungen aus.

2) Die Null-Tour mit $TV_{e,q} = (0, \dots, 0)$ kann aus „modellierungstechnischen“ Gründen entstehen, wenn die höchstzulässige Tourenanzahl Q_e für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen EVU_e größer ist als die Anzahl der realen Touren, die das Eisenbahnverkehrsunternehmen benötigt, um die Transportnachfragen aller seiner Kunden vollständig zu erfüllen.

12. Einbeziehung von *Integritätsbedingungen* für die zu beladenden Gütermengen $gmb_{sta.c.i}$ und $gmb_{gef.d.i}$ sowie für die zu entladenden Gütermengen $gme_{sta.c.i,j}$ und $gme_{gef.d.i,j}$, damit nicht mehr „exogen“ gewährleistet werden muss, dass diese Gütermengen bei der Informationseingabe von vornherein korrekt spezifiziert sind;
13. Ausdehnung der berücksichtigten *Zielfunktionen* auf die Minimierung der *Tourengesamtleertonnenkilometer* und die Minimierung der *Tourengesamtmissionen*.

Das Modellierungspotenzial, das in der *mathematischen Modellformulierung* des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells angelegt ist, lässt sich in nahezu „beliebiger“ Weise erweitern. Im Folgenden werden nur einige Aspekte angeführt, die sich nach Ansicht der Verfasser als besonders attraktiv erweisen, um eine größere Vielfalt verwandter, aber strukturell unterschiedlicher Realprobleme aus dem Bereich der Tourenplanung mit dem entsprechend erweiterten Tourenplanungsmodell repräsentieren und verarbeiten zu können. Als solche Erweiterungen der mathematischen Modellformulierung bieten sich insbesondere an:¹⁾

1. Die Aggregations-Prämisse für die Transportnachfragen in jedem Haltepunkt HP_n des Verkehrsnetzes wird aufgegeben. Dadurch lässt sich *unterscheiden*, welche Teile der Transportnachfrage in einem Haltepunkt HP_n zu welchen *einzelnen Kunden* gehören. Auf diese Weise wird es möglich, die Transportnachfragen von Kunden, die für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen besondere Bedeutung besitzen („key accounts“), bevorzugt zu behandeln.
2. Für eine güterwagentypspezifische Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$, mit der ein Güterzug an einem Start-Haltepunkt HP_i beladen wird, können *unterschiedliche Ziel-Haltepunkte* HP_j spezifiziert werden, an denen jeweils *Anteile* der ursprünglich aufgeladenen Gütermenge $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ entladen werden. Dadurch wird die Prämisse der Übereinstimmung zwischen Be- und Entlademengen aufgehoben. Um eine Situationen abbilden zu können, in der Güter von einem Start-Haltepunkt HP_i in Teilladungen an *mehrere Ziel-Haltepunkte* $HP_{j(h)}$ mit $h = 1, \dots, H_i$, $H_i \in \mathbb{N}_+$ und $H_i \geq 2$ transportiert und dort jeweils entladen werden, ist lediglich dafür zu sorgen, dass die Summe der Entladungsmengen an den mehreren Ziel-Haltepunkten $HP_{j(h)}$ gleich der Beladungsmenge am betrachteten Haltepunkt HP_i ist. Dies lässt sich wie folgt berücksichtigen:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \quad gmb_{sta.c.i} > 0 \rightarrow \sum_{h=1}^{H_i} gme_{sta.c.i,j(h)} = gmb_{sta.c.i} \quad (454)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \quad gmb_{gef.d.i} > 0 \rightarrow \sum_{h=1}^{H_i} gme_{gef.d.i,j(h)} = gmb_{gef.d.i} \quad (455)$$

3. Wenn die be- und die entladungsbezogenen *Unteilbarkeitsprämissen aufgegeben* werden, ist es zulässig, einen Güterzug an *mehreren* Positionen seiner Tour oder *mehrere* Güterzüge auf ihren unterschiedlichen Touren jeweils mit *Anteilen* der zu transportierenden Gütermengen $gmb_{sta.c.i}$ oder $gmb_{gef.d.i}$ zu beladen bzw. von *Anteilen* der transportierten Gütermengen $gme_{sta.c.i,j}$ oder $gme_{gef.d.i,j}$ zu entladen. Diese beliebige Teilbarkeit der zu be- bzw. zu entladenden Gütermengen

1) Die Reihenfolge der angeführten Aspekte lehnt sich an die Reihenfolge ihrer Diskussion in den voranstehenden Kapiteln an. Sie drückt keine Priorisierung hinsichtlich der erstrebenswerten Realisierungsreihenfolge der Weiterentwicklungen aus.

lässt sich in das hier vorgestellte Tourenplanungsmodell ohne größere Veränderungen aufnehmen. Dazu reicht eine schlichte Modellmodifizierung aus. Es sind lediglich die binären Definitionsbereiche $\{0,1\}$ der Entscheidungsvariablen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ und $zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}}$ bzw. $ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}}$ und $ze_{\text{gef.d.i.j.e.q.r}}$ durch die reellzahligen Definitionsbereiche $[0,1]$ zu ersetzen. Dies lässt sich beispielsweise für die Entscheidungsvariablen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}}$ durch die Spezifikationen $zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \in \mathbb{R}$ und $0 \leq zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq 1$ erreichen. Darüber hinaus können der Deutlichkeit halber als zusätzliche Restriktionen aufgestellt werden:

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P zb_{\text{sta.c.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{sta.c.i}} \quad (456)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{p=1}^P zb_{\text{gef.d.i.e.q.p}} \leq \text{relb}_{\text{gef.d.i}} \quad (457)$$

$$\forall c = 1, \dots, C \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{\text{sta.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{sta.c.i.j}} \quad (458)$$

$$\forall d = 1, \dots, D \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, N: \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} \sum_{r=1}^P ze_{\text{gef.d.c.i.j.e.q.r}} \leq \text{rele}_{\text{gef.d.i.j}} \quad (459)$$

Diese Restriktionen sind jedoch nicht erforderlich. Denn die beiden ersten Restriktionen werden bereits von den Markträumungsrestriktionen impliziert. Die beiden letzten Restriktionen werden durch das Zusammenwirken der Kopplungsrestriktionen für Be- und Entladungsmengen mit den Markträumungsrestriktionen impliziert. Schließlich ist zu beachten, dass sich die be- und die entladungsbezogenen Einmaligkeitsrestriktionen als redundant erweisen, wenn die o.a. Restriktionen zum Tourenplanungsmodell hinzugefügt werden, und daher ersatzlos eliminiert werden können.

4. Wenn die Ein-Depot-Prämisse und die Depot-Touren-Prämisse aufgegeben werden, dann kann ein Eisenbahnverkehrsunternehmen sein *Equipment über mehrere Depots verteilt* bereithalten. Folglich braucht eine Tour nicht mehr im selben Haltepunkt HP_n des Verkehrsnetzes zu beginnen und zu enden, sondern kann von einem Depot zu einem anderen Depot desselben Eisenbahnverkehrsunternehmens führen. Die Touren müssen in diesem Fall *nicht mehr zyklisch* sein. Wenn diese Option realisiert wird, dann liegt für eine einzelne Tour *kein Rundreiseproblem* vom Travelling-Salesman-Typ mehr vor, sondern ein verallgemeinertes Multi-Depot-Tourenplanungsproblem.
5. Nach Verzicht auf die Güterzug-Lokomotiven-Prämisse braucht nicht mehr davon ausgegangen zu werden, dass jeder Tour von jedem Lokomotivtyp $LT_{\text{die.a}}$ und $LT_{\text{ele.b}}$ höchstens eine Lokomotive zugeordnet wird. Stattdessen wird zugelassen, dass derselbe Güterzug auch von *mehreren* Lokomotiven *desselben* Typs gezogen werden kann. Dann sind die Definitionsbereiche der lokomotivenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{die.a.e.q}}$ und $y_{\text{ele.b.e.q}}$ – analog zu den güterwagenbezogenen Entscheidungsvariablen $y_{\text{sta.c.e.q}}$ und $y_{\text{gef.d.e.q}}$ – von der Menge $\{0,1\}$ für Binärvariablen auf die Menge \mathbb{N}_0 der nicht-negativen Ganzzahlen zu erweitern.
6. Es sollten auch diejenigen Leertonnenkilometer erfasst werden können, die dadurch entstehen, dass ein Güterzug auf seiner Tour $T_{e,q}$ die *höchstzulässige Zuglänge* (Abmessungskapazität) nicht vollständig ausschöpft und daher – bei noch ausreichender Traktionskapazität seiner Lo-

- komotive(n) – um zusätzliche Güterwagen mit entsprechenden Ladungskapazitäten verlängert werden könnte.
7. Die *Zielfunktionen*, die im Tourenplanungsmodell jeweils separat berücksichtigt werden können, sollten um *typisch betriebswirtschaftliche* Zielfunktionen mit *monetär* gemessenen Zielgrößen erweitert werden. Dazu gehören beispielsweise Zielfunktionen für die Deckungsbeiträge oder die Renditen, die mit der Durchführung von Touren erwirtschaftet werden können. Dadurch lassen sich vor allem *Leistungsaspekte*, wie etwa die Betriebsleistung eines Eisenbahnverkehrsunternehmens mit entsprechenden Erlösen, in die Modellierung explizit einbeziehen. Darüber hinaus wäre auch die Berücksichtigung von *Qualitätsaspekten*, wie z.B. hinsichtlich der Transportflexibilität, aus betriebswirtschaftlicher Perspektive sehr willkommen. Der letztgenannte Aspekt wird jedoch mit erheblichen Operationalisierungsschwierigkeiten verknüpft sein.
 8. Falls mehrere Zielfunktionen im Rahmen eines *multi-dimensionalen Zielsystems* simultan Berücksichtigung finden sollen, müssen sie zu einer „Super-Zielfunktion“ kombiniert werden können. Dazu ist auf komplexe Aggregationskonzepte, wie z.B. den Analytic Hierarchy Process (AHP), das Operational Competitiveness Rating (OCRA) oder das Goal Programming (GP), zurückzugreifen.
 9. Für den Fall, dass die Transportkapazitäten von Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht ausreichen, um die aktuell artikulierten Transportnachfragen zu erfüllen, kann einerseits ein umfassenderes Tourenplanungsmodell entwickelt werden, das auch die *Option von Kapazitätserweiterungen* umfasst, um die Transportkapazitäten an die insgesamt höheren Transportnachfragen anzupassen. In einem derart erweiterten Tourenplanungsmodell mit variablen Transportkapazitäten sind allerdings auch die Zusatzkosten oder Zusatzausgaben zu berücksichtigen, die durch die Investitionen in solche Kapazitätserweiterungen verursacht werden.
 10. Für den Fall, dass die Transportkapazitäten von Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht ausreichen, um die aktuell artikulierten Transportnachfragen zu erfüllen, kommt andererseits auch eine Modifizierung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells in der Art eines *Rationierungsmodells* in Betracht. Im Rahmen eines solchen Modells werden die Transportkapazitäten der Eisenbahnverkehrsunternehmen konstant gehalten und „rationiert“, d.h. den Transportaufträgen aus der aktuell artikulierten Transportnachfrage nur selektiv zugeteilt. Im Rahmen eines solchen Rationierungsmodells müssen Entscheidungskriterien dafür eingeführt werden, welche Transportaufträge mit den knappen Transportkapazitäten „privilegiert“ bedient werden – und welche Transportaufträge abgewiesen werden. Beispielsweise lässt sich vorstellen, mit den vorhandenen und nicht erweiterten Transportkapazitäten diejenige Menge von Transportaufträgen zu bedienen, welche die Deckungsbeiträge der Eisenbahnverkehrsunternehmen insgesamt maximiert. Dies unterstreicht nochmals das bereits oben angeführte Desiderat, die Zielfunktionen des Tourenplanungsmodells um eine Deckungsbeitrags-Zielfunktion zu bereichern.
 11. Das Tourenplanungsmodell, das bislang nur als ein statisches Entscheidungsmodell ausgelegt ist, sollte *dynamisiert* werden. Dies erfordert eine explizite Modellierung von *Zeitpunkten* (z.B. für Zuordnungsentscheidungen), von *Zeitintervallen* (z.B. für die Belegung von Transportkapazitäten) oder von *Zeitdauern* (z.B. für die Durchführung einer Tour). Auf diese Weise ließen sich wichtige Einflussgrößen des zugrunde liegenden Realproblems der Tourenplanung für Eisenbahnverkehrsunternehmen berücksichtigen. Dazu gehören beispielsweise Be- und Entladezeitdauern an den Haltepunkten, Schichtzeiten des eigenen Personals und auf Eisenbahntrassen

eines Netzbetreibers zulässige Fahrzeiten als tourlimitierende Einflussgrößen sowie Be- und Entladezeitrestriktionen in der Form von „Ladezeitfenstern“ als Vorgaben für eine Tourenplanung. Zwar existieren einige Forschungsansätze für dynamische Tourenplanungsmodelle, wie z.B. Modellierungen, die unter der Bezeichnung „Vehicle Routing Problem with Time Windows“ (VRPTW) bekannt geworden sind. Aber sie reichen bei Weitem noch nicht aus, um die Komplexität des hier betrachteten Realproblems, die Touren von kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen so miteinander zu koordinieren, dass sich Leerfahrten so weit wie möglich vermeiden lassen, vollständig abzudecken. Daher stellt die Dynamisierung des hier vorgestellten Tourenplanungsmodells aus betriebswirtschaftlicher Perspektive eine der größten wissenschaftlichen Herausforderungen dar. Zu ihrer Bewältigung sollten auch Non-Standard-Ansätze, wie z.B. die Modellierung von komplexen Koordinierungsproblemen mit der Hilfe von *Multi-Agenten-Systemen* oder auf der Basis von *PETRI-Netzen*, in Betracht gezogen werden. Sie werden zwar von Anhängern des „etablierten“ Operations Research kaum gewürdigt, sollten jedoch nach Einschätzung der Verfasser nicht „ausgeblendet“ werden, weil sowohl Multi-Agenten-Systeme als auch PETRI-Netze eine erstaunlich hohe Ausdrucksmächtigkeit besitzen, um komplexe und vor allem auch dynamische Realprobleme möglichst realitätsadäquat zu modellieren.

12. Einen zentralen Ansatzpunkt für die Dynamisierung des Tourenplanungsmodells stellt die *Streckendurchschnittsgeschwindigkeit* dar. Sie ermöglicht es, dass Touren nicht nur unter Berücksichtigung der zu transportierenden Gütermengen und der verfügbaren Transportmittelkapazitäten geplant werden (rein mengenmäßige Tourenplanung), sondern auch *zeitliche* Aspekte Berücksichtigung finden. Dies können z.B. die bereits oben angesprochenen „Zeitfenster“¹⁾ sein, innerhalb derer Gütermengen in einem Haltepunkt des Verkehrsnetzes be- oder entladen werden müssen, um die Transportnachfrage eines Kunden *termingerecht* erfüllen zu können. Solche Tourenplanungsaufgaben mit vorgegebenen Abhol- bzw. Lieferterminen spielen in der betrieblichen Praxis eine herausragende Rolle. Allerdings fallen Tourenplanungsmodelle für dieses Tourenplanungsproblem noch weitaus komplexer aus als das statische Tourenplanungsmodell, das im hier vorgelegten Projektbericht für eine rein mengenmäßige Tourenplanung vorgestellt wurde.

1) Sie wurden bereits in der voranstehend angeführten Erweiterungsoption angesprochen, als Forschungsansätze für *dynamische* Tourenplanungsmodelle erwähnt wurden, zu denen vor allem Arbeiten im Zusammenhang mit dem sogenannten „Vehicle Routing Problem with *Time Windows*“ (VRPTW) gehören.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorstehenden Ausführungen können mit den folgenden Kernaussagen *zusammengefasst* werden:

- Im Bereich der schienengebundenen Gütertransporte stellt die Vermeidung von Leerfahrten ein signifikantes und komplexes betriebswirtschaftliches Problem dar.
- Dem Problem der Leerfahrtenvermeidung kommt über die Reduzierung von Treibhausgasemissionen auch eine große volkswirtschaftliche, insbesondere umweltpolitische Bedeutung zu.
- Trotz Definitions- und Ermittlungsschwierigkeiten ist dieses Problem einer betriebswirtschaftlichen Analyse und auch der Ermittlung relevanter Informationen in der betrieblichen Praxis zugänglich.
- Durch die Kooperation von Eisenbahnverkehrsunternehmen in einem virtuellen Unternehmen können vielfältige sowohl quantitative als auch qualitative Effekte bewirkt werden, die sich insbesondere auf das Ziel einer nachhaltigen Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und das Ziel der Reduzierung von Treibhausgasemissionen positiv auswirken.
- Ein Großteil der sowohl betriebs- als auch volkswirtschaftlich vorteilhaften Kooperationseffekte beruht auf der Vermeidung von Leerfahrten. Jedoch wäre es verfehlt, sich in jeder Entscheidungssituation ausschließlich vom Kriterium der Leerfahrtenvermeidung leiten zu lassen. In Einzelfällen kann dieses Kriterium zu betriebswirtschaftlich suboptimalen Entscheidungsempfehlungen verleiten.
- Für die Modellierung des betriebswirtschaftlichen Realproblems der Vermeidung von Leerfahrten bei Eisenbahnverkehrsunternehmen eignen sich etablierte Standardmodelle des Operations Research, die vor allem aus dem Bereich der Tourenplanungsprobleme – insbesondere Vehicle-Routing-Probleme – stammen, grundsätzlich nicht. Die Struktur dieser Standardmodelle reicht bei Weitem nicht aus, um der immanenten Komplexität des Leerfahrtenvermeidungsproblems für Eisenbahnverkehrsunternehmen gerecht zu werden.
- Es wurde ein erster Ansatz für die Modellierung des betriebswirtschaftlichen Realproblems der Vermeidung von Leerfahrten entwickelt, der auf die Besonderheiten des Leerfahrtenvermeidungsproblems für Eisenbahnverkehrsunternehmen zugeschnitten ist. Es handelt sich um einen ersten Entwurf einer realitätsadäquaten Modellstruktur, der in der Folgezeit weiterzuentwickeln ist. Der Weiterentwicklungsbedarf erstreckt sich insbesondere darauf, weitere Aspekte des zugrunde liegenden Realproblems in die Modellierung einzubeziehen und die Modellstruktur auf Realprobleme aus der betrieblichen Praxis anzuwenden. In der letztgenannten Hinsicht besteht vor allem die Erwartung, von den Praxispartnern des Verbundprojekts MAEKAS Anregungen zur Modellverfeinerung und einschlägige Realinformationen zu erhalten.

Darüber hinaus lässt sich im Sinne eines *Ausblicks* auf einige zukünftige Weiterentwicklungsoptionen für das Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungskonzept hinweisen, das in diesem Projektbericht für die Vermeidung von Leerfahrten bei Eisenbahnverkehrsunternehmen vorgestellt wurde.

Infolge der Einführung der Lkw-Maut konnte die Kapazitätsauslastung im Bereich von Gütertransporten mit Lastkraftwagen signifikant gesteigert werden; vgl. dazu die Abbildung 43 auf der nächsten Seite. Eine ähnliche Entwicklung sollte auch für Gütertransporte mit der Bahn angestrebt werden. Allerdings lassen die Betriebsdaten der Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS, die bei

der Erstellung dieses Projektberichts erhoben wurden, eher vermuten, dass der Schienengüterverkehr noch weit hinter der im Straßengüterverkehr bereits erreichten Kapazitätsauslastung von mehr als 80 % zurückliegt. Folglich besteht für Eisenbahnverkehrsunternehmen derzeit noch ein beträchtliches „Optimierungspotenzial“, die Kapazitäten ihrer Transportmittel (Lokomotiven und Güterwagen) in Zukunft höher auszulasten. Die Vermeidung von Leerfahrten und die Analyse des Vermeidungspotenzials anhand des Optimierungsmodells, das in diesem Projektbericht vorgestellt wurde, stellen für Eisenbahnverkehrsunternehmen wichtige Instrumente dar, mit deren Hilfe sich die Auslastung der Kapazitäten ihrer Transportmittel nachhaltig steigern lässt.

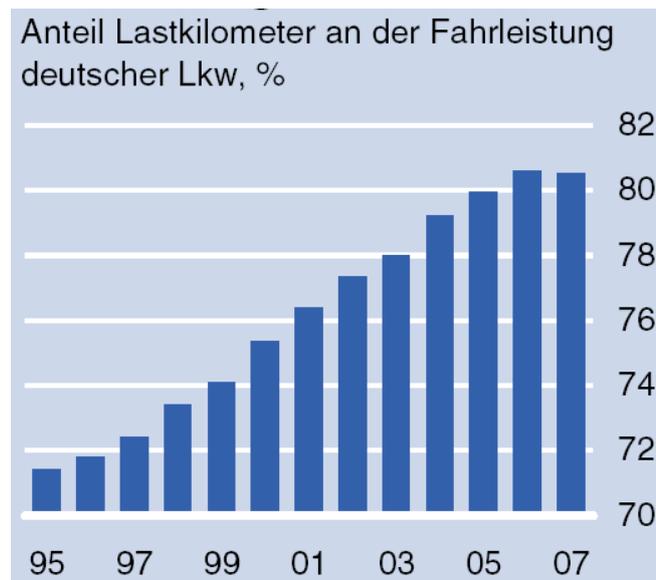


Abbildung 43: Zunahme der Kapazitätsauslastung bei Gütertransporten mit Lastkraftwagen¹⁾

Die Empfehlung, die Kapazitätsauslastung der eigenen Transportmittel signifikant zu erhöhen, wird durch die erwarteten Steigerungsraten des zukünftigen Verkehrsaufkommens für alle Verkehrsträger unterstrichen. Zur Verdeutlichung kann die offizielle Prognose der Europäischen Kommission herangezogen werden, die im Zeitraum zwischen 1990 und 2030 von einer Steigerung der Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern um 95,67 % ausgeht.²⁾

Ohne eine entsprechende Effizienz- und Effektivitätssteigerung, wie z.B. durch die Vermeidung von Leerfahrten sowie durch eine „intelligente“ Bündelung von Transportnachfragen, muss nicht nur aus betriebswirtschaftlicher Perspektive, sondern vor allem auch in volkswirtschaftlicher Hinsicht mit gravierenden Kapazitätsengpässen gerechnet werden. Diese Kapazitätsengpässe werden neben dem Logistiksektor insbesondere auch zahlreiche Industrie- und Handelsunternehmen innerhalb Deutschlands und in der Europäischen Union treffen.

Aus den vorgenannten Gründen ist die betriebswirtschaftliche Forschung in enger Abstimmung mit der Wirtschaftspraxis aufgerufen, Analysewerkzeuge, Optimierungsmodelle und zielführende Gestaltungsvorschläge zu entwickeln, um trag- und zukunftsfähige Lösungen für die zuvor skizzierten Probleme anzubieten.

1) Quelle: EHMER/HENG/HEYMANN (2008), S. 14.

2) Vgl. EUROPEAN COMMISSION (2005), S. 75.

Die Ausführungen des hier vorgelegten Projektberichts können nur kleine Bausteine für die Weiterentwicklung des betriebswirtschaftlichen Wissensbestandes zu der spezifischen Fragestellung beisteuern, wie und in welchem Umfang sich Leerfahrten von Eisenbahnverkehrsunternehmen vermeiden lassen.¹⁾ Daher bedarf es sowohl in der Wissenschaft als auch in der betrieblichen Praxis einer vertieften Auseinandersetzung mit dem Realproblem, Leerfahrten von Güterzügen – so weit wie möglich und so weit wie betriebswirtschaftlich vorteilhaft – zu vermeiden.

1) Das Potenzial für die Vermeidung von Leerfahrten, insbesondere für die Reduzierung von Leertonnenkilometern, kann im Hinblick auf die Praxispartner des Verbundprojekts MAEKAS zurzeit leider noch nicht seriös geschätzt werden. Dies liegt einerseits an einer Verzögerung im Projektverlauf, die u.a. aus gravierenden Anwendungsproblemen der eingesetzten mathematischen Modellierungssoftware LINGO resultierte, sowie andererseits an Schwierigkeiten, entsprechend aussagekräftige Realinformationen seitens der kooperierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen zu erhalten.

9 Literatur- und Interviewverzeichnis

Vorbemerkungen:

- Alle Quellen werden im Literaturverzeichnis wie folgt aufgeführt: In der ersten Zeile wird der *Referenztitel* der Quelle angegeben. Er entspricht der Form, die im Text Verwendung findet, wenn auf die Quellen hingewiesen wird.
- Bei der Vergabe der Referenztitel wird bei *einem* Autor dessen Nachname, gefolgt von dem Erscheinungsjahr der Quelle in Klammern, verwendet. Existieren *zwei* oder *drei* Autoren, werden diese getrennt von einem Schrägstrich („/“) aufgeführt. Bei mindestens vier Autoren werden nur die ersten drei Autoren mit dem Zusatz „et al.“ aufgeführt.
- Zu *Internetquellen* wird die dafür verantwortliche Instanz aufgeführt. Dies können sowohl natürliche als auch juristische Personen sein. Zu den Internetquellen werden die zum Zugriffsdatum gültige Internetadresse (URL) und das Zugriffsdatum angegeben.

ABERLE (1994)

Aberle, G.: Makrologistische Rahmenbedingungen für den Aufbau von Logistikketten. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Management der Logistikkette: Kostensenkung – Leistungssteigerung – Erfolgspotential. Erich Schmidt Verlag: Berlin 1994, S. 1-32.

AKCA (2008)

Akca, N.: Auktionen zur nationalen Reallokation von Treibhausgas-Emissionsrechten und Treibhausgas-Emissionsgutschriften auf Unternehmensebene – Ein spieltheoretischer nicht-kooperativer Modellierungs- und Lösungsansatz für das Reallokationsproblem. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, 2008. Gabler Verlag: Wiesbaden 2008.

APPLEGATE/BIXBY/CHAVÁTAL et al. (2006)

Applegate, D.L.; Bixby, R.E.; Chavátal, V.; Cook, W.J.: The Traveling Salesman Problem – A Computational Study. Princeton University Press: Princeton 2006.

BELL/CHEN (2006)

Bell, P.C.; Chen, J.: Cutting costs or enhancing revenues? An example of a multi-product firm with impatient customers illustrates an important choice facing operational researchers. In: Journal of the Operational Research Society, Vol. 57 (2006), No. 4, S. 443-450.

BERNDT (2001)

Berndt, T.: Eisenbahngüterverkehr. B.G. Teubner Verlag GmbH: Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2001.

BODIN/GOLDEN (1981)

Bodin, L.; Golden, B.: Classification in Vehicle Routing and Scheduling. In: Networks, Vol. 11 (1981), S. 97-108.

BORNDÖRFER/GRÖTSCHEL/LUKAC/MITUSCH/SCHLECHTE/SCHULTZ/TANNER (2005)

Borndörfer, R.; Grötschel, M.; Lukac, S.; Mitusch, K.; Schlechte, T.; Schultz, S.; Tanner, A.: An Auctioning Approach to Railway Slot Allocation. In: ZIB-Report 05-45. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin: Berlin 2005.

BÜHLER/JOCHEM (2008)

Bühler, G.; Jochem, P.: CO₂ Emission Reduction in Freight Transports – How to Stimulate Environmental Friendly Behavior? Discussion Paper No. 08-066, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH. Eigenverlag: Mannheim 2008.

BULLNHEIMER/HARTL/STRAUSS (1997)

Bullnheimer, B.; Hartl, R.F.; Strauss, C.: Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem. In: o.V.: 2nd International Conference on Metaheuristics – MIC97, 21.-24.07.1997 in Sophia-Antipolis. Department of Management Science, University of Vienna. Wien 1997, o.S.

BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR (2009)

Bundesamt für Güterverkehr: Marktbeobachtung Güterverkehr – Jahresbericht 2008. Eigenverlag: Köln 2009.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2008)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Masterplan Güterverkehr und Logistik. Eigenverlag: Berlin 2008.

CAMPBELL/CLARKE/KLEYWEGT et al. (1998)

Campbell, A.M.; Clarke, L.; Kleywegt, A.; Savelsbergh, M.: The Inventory Routing Problem. In: Crainic, T.G.; Laporte, G. (Hrsg.): Fleet Management and Logistics. Springer Verlag: Boston 1998, S. 95-113.

CAMPBELL/SAVELSBERGH (2004)

Campbell, A.M.; Savelsbergh, M.: A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem. In: Transportation Science, Vol. 38 (2004), No. 4, S. 488-502.

CANEN/PIZZOLATO (1994)

Canen, A.G.; Pizzolato, N.D.: The Vehicle Routing Problem. In: Logistics Information Management, Vol. 7 (1994), No. 1, S. 11-13.

CORSTEN HA./CORSTEN HI./SARTOR (2005)

Corsten Ha.; Corsten, Hi.; Sartor, C.: Operations Research – Eine problemorientierte Einführung. Verlag Franz Vahlen: München 2005.

DEMPE/SCHREIER (2006)

Dempe S.; Schreier, H.: Operations Research – Deterministische Modelle und Methoden: Teubner Verlag: Berlin, Wiesbaden 2006.

DOMSCHKE/DREXL (2005)

Domschke W.; Drexel, A.: Einführung in Operations Research. 6. Auflage, Springer Verlag: Berlin, Heidelberg 2005.

EHMER/HENG/HEYMANN (2008)

Ehmer, P.; Heng, S.; Heymann, E.: Logistik in Deutschland. Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen Nr. 432. Eigenverlag: Frankfurt am Main 2008.

ENGELER (2002)

Engeler, K.: Mehrdepot-Tourenplanung mit Zeitfenstern. Josef Eul Verlag GmbH: Lohmar 2002.

EUROPEAN COMMISSION (2005)

European Commission: European Energy and Transport – Trends to 2030 – Update 2005. Eigenverlag: Luxemburg 2005.

EWERS/ILGMANN (2001)

Ewers, H.-J.; Ilgmann, G.: Zukunft des Schienenverkehrs. Gutachten im Auftrag der FDP-Bundestagsfraktion. Eigenverlag: Berlin und Hamburg 2001.

FALKENSAMMER (2006)

Falkensammer, C.: Entwicklung einer Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der mittelfristigen Leistungstiefenplanung von Systemverkehrsanbietern. Dissertation, Johannes Kepler Universität Linz. Eigenverlag: Linz 2006.

FAWCETT/ ELLRAM/OGDEN (2007)

Fawcett, S.E.; Ellram, L.M.; Ogden, J.A.: Supply Chain Management – From Vision to Implementation. Prentice Hall: Upper Saddle River - New York 2007.

FLADNITZER (2006)

Fladnitzer, M.: Vertrauen als Erfolgsfaktor virtueller Unternehmen: Grundlagen, Rahmenbedingungen, und Maßnahmen zur Vertrauensbildung. Gabler Verlag: Wiesbaden 2006.

GENDREAU/LAPORTE/POTVIN (2002)

Gendreau, M.; Laporte, G.; Potvin, J.-Y.: Metaheuristics for the Capacitated VRP. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The Vehicle Routing Problem. Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia 2002, S. 129-154.

GHIANI/IMPROTA (2000)

Ghiani, G.; Improta, G.: An efficient transformation of the generalized vehicle routing problem. In: European Journal of Operational Research, Vol. 122 (2000), No. 1, S. 11-17.

GIAGLIS/MINIS/TATARAKIS et al. (2004)

Giaglis, G.M.; Minis, A.; Tatarakis, A.; Zeimpekis, V.: Minimizing logistics risks through realtime vehicle routing and mobile technologies – Research to date and future trends. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 34 (2004), No. 9, S. 749-764.

GIETZ (1994)

Gietz, M.: Computergestützte Tourenplanung mit zeitkritischen Restriktionen. Physica-Verlag: Heidelberg 1994.

GLEYZAL (1955)

Gleyzal, A.: An Algorithm for Solving the Transportation Problem. In: Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 54 (1955), Research Paper 2583, No. 4, S. 213-216.

HILLIER/LIEBERMAN (2002)

Hillier, F.S.; Lieberman, G.J.: Operations Research – Eine Einführung. 5. Aufl., Oldenbourg Verlag: München, Wien 2002.

HOLMBERG/JOBORN/LUNDGREN (1998)

Holmberg, K.; Joborn, M.; Lundgren, J.T.: Improved Empty Freight Car Distribution. In: Transportation Science, Vol. 32 (1998), No. 2, S. 163-173.

HÜGENS (2008)

Hügens, T.: Balanced Scorecard und Ursache-Wirkungsbeziehungen – Kausale Modellierung und Simulation mithilfe von Methoden des Qualitative Reasoning. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, 2008. Gabler Verlag: Wiesbaden 2008.

IRELAND/CASE/FALLIS et al. (2004)

Ireland, P.; Case, R.; Fallis, J.; van Dyke, C.; Kuehn, J.; Meketon, M.: The Canadian Pacific Railway Transforms Operations by Using Models to Develop Its Operating Plans. In: *Interfaces*, Vol. 34 (2004), No. 1, S. 5-14.

IFEU/GREENDELTA TC (2007)

Ifeu/GreenDelta TC: Datenprojekt Transport. Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Eigenverlag: Berlin, Heidelberg, Karlsruhe 2007.

JAILLET/WAGNER (2008)

Jaillet, P.; Wagner, M.R.: Online Vehicle Routing Problems: A Survey. In: Golden, B.; Raghavan, S.; Wasil E. (Hrsg.): *The Vehicle Routing Problem – Latest Advances and New Challenges*. Springer Verlag: New York 2008, S. 221-237.

JENTJENS (2008)

Jentjens, S.: Ermittlung ineffektiver Leertonnenkilometer bei regionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen. Seminararbeit am Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen. Essen 2008.

JOBORN/CRAINIC/GENDREAU et al. (2004)

Joborn, M.; Crainic, T.G.; Gendreau, M.; Holmberg, K.; Lundgren, J.T.: Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways. In: *Transportation Science*, Vol. 38 (2004), No. 2, S. 121-134.

KELLER (2004)

Keller, S.: Reduzierung des Bullwhip-Effektes – Eine quantitative Analyse aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. Dissertation, Universität Essen 2004. Gabler - Deutscher Universitäts-Verlag: Wiesbaden 2004.

KLUMPP/KOPPERS (2008)

Klumpp, M.; Koppers, L.: Kooperation zwischen Unternehmen als Voraussetzung für erfolgreiches Supply Chain Management (SCM). In: Clases, C.; Schulze, H. (Hrsg.): *Kooperation konkret*. Papst Science Publishers: Lengerich 2008, S. 169-182.

KRANKE (2008)

Kranke, A.: Grüne Supply Chains. In: *Logistik inside*, o.Jg. (2008), Nr. 6, S. 12-18.

KROON/HUISMAN/MARÓTI (2007)

Kroon, L.; Huisman, D.; Maróti, G.: Railway Timetabling from an Operations Research Perspective. *Econometric Institute Report EI*, No. 22. Eigenverlag: Rotterdam 2007.

KUO/NICHOLLS (2007)

Kuo, C.; Nicholls, G.M.: A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad. In: *Omega – The International Journal of Management Science*, Vol. 35 (2007), No. 5, S. 472-485.

LAPORTE (1992)

Laporte, G.: The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 59 (1992), No. 3, S. 345-358.

LAPORTE/SEMET (2002)

Laporte, G.; Semet, F.: Classical heuristics for the Capacitated VRP. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The Vehicle Routing Problem. Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia 2002, S. 109-128.

LAWLER/LENSTRA/RINNOOY (1985)

Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G.; Shmoys, D.B.: The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization. John Wiley & Sons: Hoboken 1985.

MARTIN (2006)

Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 6. Aufl., Verlag Vieweg & Sohn: Wiesbaden 2006.

MCCULLEN/TOWILL (2002)

McCullen, P.; Towill, D.: Diagnostics and Reduction of Bullwhip in Supply Chains. In: Supply Chain Management, Vol. 7 (2002), No. 3, S. 164-179.

MOLINA-AZORÍN/CLAVER-CORTÉS/LÓPEZ-GAMERO et al. (2009)

Molina-Azorín, J.F.; Claver-Cortés, E.; López-Gamero, M.D.; Tarí, J.J.: Green management and financial performance: a literature review. In: Management Decision, Vol. 47 (2009), No. 7, S. 1080-1100.

MÜHLHANS(1997)

Mühlhans, E.: Ansätze zur Kostensenkung im Eisenbahngüterverkehr. In: Internationales Verkehrswesen, 49. Jg. (1997), Nr. 6, S. 300-306.

o.V. (2009)

o.V.: Procter & Gamble verstärkt „Grüne Logistik“. In: Logistik inside (Online-Publikation), Meldung vom 30.03.2009 (o.S.). Im Internet unter der URL: <http://www.logistik-inside.de/procter-gamble-verstaerkt-gruene-logistik-827984.html>, letzter Zugriff am 07.09.2009.

NOBERT/PICARD (1996)

Nobert, Y.; Picard, J.-C.: An Optimal Algorithm for the Mixed Chinese Postman Problem. In: Networks, Vol. 27 (1996), S. 95-108.

PANKRATZ (2005)

Pankratz, G.: Dynamic vehicle routing by means of genetic algorithm. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 35 (2005), No. 5, S. 362-383.

PEARN/LIU (1995)

Pearn, W.L.; Liu, C.M.: Algorithms for the Chinese Postman Problem on Mixed Networks. In: Computers Operations Research, Vol. 22 (1995), No. 5, S. 479-489.

PERONA/CIGOLINI/ADANI et al. (2001)

Perona, M.; Cigolini, R.; Adani, M.; Biondi, R.; Guzzetti, S.; Jenna, R.; Chessa, M.; Agellara, S.: The integrated management of logistic chains in the white goods industry. A field research in Italy. In: International Journal of Production Economics, Vol. 69 (2001), No. 2, S. 227-238.

PFOHL (2004)

Pfohl, H.-C.: Netzkompetenz in Supply Chains – Grundlagen und Umsetzung. Gabler Verlag: Wiesbaden 2004.

PROKSCHI (2008)

Prokschi, E.: Internationale Warenströme effizient planen und umsetzen. In: Klumpp, M. (Hrsg.): Logistikanforderungen globaler Wertschöpfungsketten. KCL Paper No. 3, Fachhochschule für Oekonomie und Management (FOM) Essen. Eigenverlag: Essen 2008, S. 9-15.

RIECK (2008)

Rieck, J.: Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen – Modelle und Methoden. Gabler Verlag: Wiesbaden 2008.

RODRIGUE/SLACK/COMTOIS (2001)

Rodrigue, J.-P.; Slack, B.; Comtois, C.: Green Logistics (The Paradoxon of). In: Brewer, A.M.; Button, K.J.; Hensher, D.A. (Hrsg.): The Handbook of Logistics and Supply-Chain Management. Elsevier Ltd.: London 2001, S. 339-350.

SCHMIED/ZIMMER (2007)

Schmied, M.; Zimmer, W.: Nachhaltige Mobilität durch Innovationen im Güterverkehr – Güterverkehrsmarkt und Umwelt. Öko-Institut e.V.; Universität Dortmund, Lehrstuhl Verkehrssysteme und Logistik; Fraunhofer Institut. Eigenverlag: Berlin 2007.

SCHRAGE (2003)

Schrage, L.: Optimization Modeling with LINGO. 5. Aufl., 2. Druck, Lingo Systems Inc.: Chicago 2003.

SIEGMANN/HEIDMEIER (2006)

Siegmann, J.; Heidmeier, S.: Verbesserte Marktchancen für den Schienengüterverkehr. In: Logistik Management, 8. Jg. (2006), Nr. 3, S. 7-18.

SLAGER/KAPTEIJNS (2004)

Slager, B.; Kapteijns, L.: Implementation of cargo revenue management at KLM. In: Journal of Revenue and Pricing Management, Vol. 3 (2004), No. 1, S. 80-90.

SONG/SAVELSBERGH (2007)

Song, J.-H.; Savelsbergh, M.: Performance Measurement for Inventory Routing. In: Transportation Science, Vol. 41 (2007), No. 1, S. 44-54.

SPEH (2008)

Speh, T.W.: Assessing the State of Supply Chain Management. In: Baumgarten, H. (Hrsg.): Das Beste der Logistik – Innovationen – Strategien – Umsetzungen. Springer Verlag: Berlin 2008, S. 243-253.

THALER (2003)

Thaler, J.: Virtuelle Unternehmen – Rechtliche Analyse einer mittelständischen Kooperationsform. Dissertation, Universität Hamburg 2003. Eigenverlag: Hamburg 2003.

TRANSPORTBERATER (2009)

Transportberater.portal-c.info: Glossar 2009. Im Internet unter der URL: <http://www.transportberater.portal-c.info/glossar.html>, letzter Zugriff am 08.07.2009.

VAHRENKAMP (2003)

Vahrenkamp, R.: Quantitative Logistik für das Supply Chain Management. Oldenbourg Verlag: München, Wien 2003.

VAHRENKAMP (2005)

Vahrenkamp, R.: Logistik – Management und Strategien. 5. Aufl., Oldenbourg Verlag: München, Wien 2005.

VAHRENKAMP/MATTFELD (2007)

Vahrenkamp, R.; Mattfeld, D.C.: Logistiknetzwerke – Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. Gabler Verlag: Wiesbaden 2007.

WENDT (1995)

Wendt, O.: Tourenplanung durch Einsatz naturanaloger Verfahren – Integration von Genetischen Algorithmen und Simulated Annealing. Dissertation, Universität Frankfurt am Main 1994. Gabler Verlag - Deutscher Universitäts-Verlag: Wiesbaden 1995.

WITTENBRINK (2008)

Wittenbrink, P.: CO₂ und Modal Split. Studie, herausgegeben vom Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME). Eigenverlag: Frankfurt, Lörrach 2008.

YU/TING/WU (2009)

Yu, V.; Ting, H.; Wu, Y.-C.J.: Assessing the greenness effort for European firms. In: Management Decision, Vol. 47 (2009), No. 7, S. 1065-1079.

ZÄPFEL/WASNER (1999)

Zäpfel, G.; Wasner, M.: Der Peitschenschlageffekt in der Logistikkette und Möglichkeiten zur Überwindung chaotischen Verhaltens. In: Logistik Management, 1. Jg. (1999), Nr. 4, S. 297-309.

ZELEWSKI (2007)

Zelewski, S.: Faire Verteilung von Effizienzgewinnen in Supply Webs – ein spieltheoretischer Ansatz auf der Basis des τ -Werts. In: Corsten, H.; Missbauer, H. (Hrsg.): Produktions- und Logistikmanagement. Franz Vahlen Verlag: München 2007, S. 551-572.

ZELEWSKI (2009)

Zelewski, S.: Faire Verteilung von Effizienzgewinnen in Supply Webs – ein spieltheoretischer Ansatz auf Basis des τ -Werts. Logos Verlag: Berlin 2009.

ZELEWSKI/KOPPERS/KLUMPP (2009)

Zelewski, S.; Koppers, L.; Klumpp, M.: Supply Chain Cooperation. Projektberichte des Verbundprojekts MAEKAS Nr. 3. Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen. Eigenverlag: Essen 2009.

Interviews

Kirschner, Michael: ehemals Key Account Manager bei der SBB Cargo GmbH, Interview durchgeführt am 31.07.2008.

Paul, Ute: Absatz und Vertrieb bei der Neusser Eisenbahn der Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG, Interview durchgeführt am 03.09.2008.

Paulsen, Hans-Hermann: ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, davor: Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Interview durchgeführt am 08.08.2008.

Schulten, Dieter: Eisenbahnbetriebsleiter bei der Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH, Interview durchgeführt am 18.08.2008.

Strauss, Mirko: Prokurist Vertrieb bei der Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH, am 26.08.2008.

10 Anhang

(A) Ergebnisse des 1. Arbeitstreffens des Verbundprojekts MAEKAS am 24. Juni 2008

	Universität Duisburg-Essen, Campus Essen Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Initiative zur nachhaltigen Schienenlogistik Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und überregionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien	Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski
Internet: http://www.maekas.wiwi.uni-due.de/ • Universität Duisburg-Essen · FB 5: Institut PIM · 45141 Essen •	Dipl.-Kff. Alexandra Saur Universitätsstraße 9, 45141 Essen Telefon: ++49 (0)201/183-4322 (direkt) ++49 (0)201/183-4007 (Sekretariat) Telefax: ++49 (0)201/183-4017 E-Mail: alexandra.saur@pim.uni-due.de Internet: http://www.pim.wiwi.uni-due.de Raum: R09 / R01 / H33
Universität Duisburg-Essen, Campus Essen Fachbereich Wirtschaftswissenschaften Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement	

Ergebnisse der Gruppenarbeiten

Aufgabe 1: Beschreiben und diskutieren Sie bitte in der Gruppe operative Problembereiche aus zwei der vier Kategorien

- Qualität
- Preis
- Flexibilität
- Service

Erarbeitete Probleme aus dem Bereich „Qualität“:

- fehlende Transportsicherheit; Risikomanagement
- Schadwaggon wird zugestellt und nicht wieder abgeholt
- Zuverlässigkeit bei der Anlieferung oft nicht gegeben (z.B. Pünktlichkeit) (3x)
- Einhaltung vorgegebener Anzahl der Waggons
- Informationsketten fehlen/ proaktives Handeln wird gefordert
- Waggons werden oftmals defekt zugestellt (umgekehrte Beweislast) (2x)
- Informationsqualität muss gesteigert werden

Erarbeitete Probleme aus dem Bereich „Preis“:

- schlechtes Preis-/Leistungsverhältnis
- Verteuerung Nahverkehr
- Nebengebühren/Standgelder
- Gutschriftverfahren nicht möglich
- fehlende Preistransparenz (keine vergleichbaren Preise z.B. LKW)
- Abrechnung der Frachten zu kompliziert und häufig fehlerhaft (2x)

In Kooperation mit:

				
---	---	---	---	--

gefördert durch das:

	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
---	--

- 2 -

Erarbeitete Probleme aus dem Bereich „Flexibilität“:

- zu lange Vorlaufzeit, z.B. eine Woche
- fehlende Kapazität/ Einlegen von Ganzzügen
- keine Vorabinformationen über Destination
- Wagenpark/Mengenschwankung
- schlechte Reaktion auf Engpässe, z.B. innerhalb von 12 Stunden
- Transportänderungen sehr schwer zu realisieren
- Einzelwagengruppenfeststellung
- Mindestmengenabnahme (oftmals Mindestmenge von 300 t)

Erarbeitete Probleme aus dem Bereich „Service“:

- wenig Nebenleistungen
- die bestellte Wagenanzahl wird selten gestellt
- schlechte Kommunikationswege (Lieferant – DB (o.ä.) – Kunde) (3x)
- Kundenbetreuung wird vermisst/ feste Ansprechpartner fehlen (3x)
- keine Zugverfolgung
- oftmals veraltete Informationen über den Transportverlauf – Geisterzüge
- Bürokratie bei der Bahn ist wesentlich größer als beim LKW (zu viel Formalitäten)
- die Betrachtung ganzheitlicher Prozessketten erfolgt im Regelfall nicht
- Frachtzahlung entscheidet über A, B, C Kunde

Aufgabe 2: Erarbeiten Sie bitte als Gruppe konkrete Maßnahmen für Eisenbahnverkehrsunternehmen in Bezug auf die verschiedenen Probleme

Maßnahmen für den Bereich „Preis“:

- Verbesserung der Preistransparenz

Maßnahmen für den Bereich „Flexibilität“:

- höhere Zuverlässigkeit

Maßnahmen für den Bereich „Service“:

- Informationen über Abweichungen sollten schnellst möglich weitergegeben werden
- aktive Informationspolitik einführen
- zeitnahe Informationen in der gesamten Transportkette sollten gegeben sein

In Kooperation mit:



gefördert durch das:



(B) Berechnungen der Leertonnenkilometer aller Praxispartner

Berechnungen für die Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH

Tag	Eingang (E), Ausgang (A)	Zugnummer	beladene Güterwagen	leere Güterwagen	gefahrte km	Gewicht beladen in to	Lasttonnen- kilometer	Leertonnen- kilometer
Fr, 1.8.	E	89772	3	-	31,79	173,00	16497,45	
		54206/8	7	17	23,05	312,65	50435,13	122485,33
	A	54207/9	8	10	23,05	368,37	87912,69	84890,87
Mo, 4.8.	E	89772	4	-	31,79	226,10	28748,18	
		54206/8	30	30	23,05	1127,21	779297,32	779297,32
	A	89771	-	1	8,64	54,05		467,15
		89529	1	-	10,96	25,45	278,80	
		54207/9	9	14	23,05	405,10	84019,77	130697,41
Die, 5.8.	E	89772	5	-	31,79	300,90	47823,54	
		89530	-	2	10,96	54,05		1184,24
	A	54206/8	3	1	23,05	130,70	9035,94	
		89771	-	1	8,64	54,05		467,15
		89529	1	-	10,96	50,85	554,87	
		54207/9	30	21	23,05	1405,43	971644,03	680150,82
Mi, 6.8.	E	89772	3	-	31,79	175,25	18712,02	
		54206/8	39	-	23,05	2063,35	1854444,33	
	A	89529	1	-	10,96	21,15	231,70	
		89771	-	5	8,64	54,05		2335,77
		62398	21	-	13,27	1183,68	329905,82	
		54207/9	7	17	23,05	335,12		131288,29
Do, 7.8.	E	89772	2	-	31,79	112,35	7142,54	
		54206/8	30	20	23,05	1423,60	984205,86	656137,24
	A	89771	-	7	8,64	54,05		3270,08
		54207/9	2	33	23,05	98,80	4553,69	75135,92
Fr, 8.8.	E	89772	2	-	31,79	113,35	7206,11	
		54206/8	10	-	23,05	360,53	83082,99	
	A	82399	16	-	13,27	710,95	150971,85	
		89529	1	-	10,96	55,40	606,91	
		89771	-	2	8,64	54,05		934,31
		54207/9	24	4	23,05	1143,09	832219,11	105369,85
Sa, 9.8.	A	62405	20	-	13,27	1084,50	287669,68	
Mo, 11.8.	E	89772	4	-	31,79	229,10	29129,61	
		54206/8	22	26	23,05	1013,88	513913,96	0,00
	A	89771	-	3	8,64	54,05		1401,46
		89529	1	-	10,96	50,55	553,78	
		54207/9	14	12	23,05	814,56	262802,46	225259,25
Die, 12.8.	E	89772	6	-	31,79	349,00	66561,98	
		54206/8	1	30	23,05	47,89	1103,51	33105,29
	A	89771	-	6	8,64	54,05		2802,92
		89529	2	-	10,96	106,20	2326,84	
		54207/9	7	14	23,05	360,09	58087,92	118175,84
Mi, 13.8.	E	54206/8	16	25	23,05	880,05	324492,04	507018,81
	A	89529	1	-	10,96	50,15	549,39	
		54207/9	7	3	23,05	298,97	48228,35	20669,29
Do, 14.8.	E	89772	8	-	31,79	450,65	114598,49	
		54206/8	2	34	23,05	90,14	4154,64	70628,96
	A	89771	-	10	8,64	54,05		4871,54
		62401	16	-	13,27	714,25	151672,42	
		89529	2	-	10,96	65,90	1443,87	
		54207/9	23	10	23,05	118,16	59976,76	26077,72
Fr, 15.8.	E	89772	8	-	31,79	443,85	112869,28	
		54206/8	11	26	23,05	515,90	130779,08	309114,20
	A	89771	-	8	8,64	54,05		3737,23
		54207/9	5	11	23,05	239,72	27621,74	80767,82
Sa, 16.8.	A	62	20	-	13,27	1007,55	267444,07	
Mo, 18.8.	E	89772	3	-	31,79	163,35	15577,22	
		54206/8	20	-	23,05	958,40	441724,72	
	A	89771	-	8	8,64	54,05		3737,23
		89529	1	-	10,96	50,80	554,32	
		54207/9	7	-	23,05	386,06	62277,27	
Die, 19.8.	E	89772	7	-	31,79	401,15	89259,49	
		54206/8	11	3	23,05	601,99	152601,96	41618,72
	A	62401	22	-	13,27	1116,05	325868,74	
		54207/9	23	1	23,05	894,62	474179,91	20616,52
Mi, 20.8.	E	89772	3	-	31,79	127,40	12148,99	
		54206/8	5	19	23,05	108,55	12507,67	47529,16
	A	89771	-	10	8,64	54,05		4871,54
		89529	1	-	10,96	21,50	235,53	
		54207/9	5	31	23,05	249,35	28731,35	178134,39
Do, 21.8.	E	89772	4	-	31,79	189,40	23954,68	
		54206/8	8	7	23,05	398,71	71662,21	62704,43
	A	62401	20	-	13,27	868,55	230547,91	
		89771	-	3	8,64	54,05		1401,46
		89529	1	-	10,96	55,30	605,81	
		54207/9	15	29	23,05	577,83	199741,39	386166,68
Fr, 22.8.	E	89772	2	-	31,79	114,90	7304,85	
		54206/8	4	34	23,05	186,70	17210,01	146285,05
	A	62422	18	-	13,27	836,25	199776,78	
		89771	-	2	8,64	54,05		934,31
		54207/9	18	-	23,05	1057,65	438723,80	
Sa, 23.8.	A	62388	23	-	13,27	122,70	37454,91	
Mo, 25.8.	E	89772	3	-	31,79	188,75	18082,17	
		54206/8	37	28	23,05	155,78	1328267,04	1005175,06
	A	89771	-	3	8,64	54,05		1401,46
		54207/9	16	12	23,05	790,82	291591,15	218893,36
Die, 26.8.	E	89530	-	1	10,96	54,05		592,12
		89772	9	-	31,79	514,95	147318,44	
		54206/8	10	32	23,05	540,81	124629,68	398814,93
	A	89771	-	2	8,64	54,05		934,31
		89529	2	-	10,96	105,75	2316,98	
		54207/9	4	15	23,05	242,78	22377,62	83916,06
Mi, 27.8.	E	89772	1	-	31,79	55,90	1776,89	
		54206/8	16	32	23,05	540,26	199204,30	398408,60
	A	89771	-	4	8,64	54,05		1868,62
		89529	2	-	10,96	100,90	2210,72	
		54207/9	12	34	23,05	684,68	189334,77	536448,52
Do, 28.8.	E	89772	2	-	31,79	108,25	6881,89	
		62425	-	25	13,27	-	-	-
		54206/8	18	46	23,05	753,62	312610,77	798894,19
	A	89529	2	-	10,96	106,25	2327,94	
		62424	24	-	13,27	1035,25	329756,11	

Leertonnen Ölwggons
4168,85

Leertonnen andere Güterwagen
422852,82

Leertonnen Gesamt
427021,87

Lasttonnen Ölwggons
25744,4

Lasttonnen andere Güterwagen
890165,48

Lasttonnen gesamt
715909,86

Leertonnenkilometer Ölwggons
39148,89

Leertonnenkilometer andere Güterwagen
9137290,46

Lasttonnenkilometer Ölwggons
790198,4188

Lasttonnenkilometer andere Waggons
14171742,36

		89771	-	3	8,64	54,05		1401,46
		54207/9	17	19	23,05	940,15	368317,86	411649,38
Fr. 29.8.	E	89772	2	-	31,79	122,65	7797,35	
		54206/8	7	10	23,05	306,02	49366,10	70523,00
	A	89771	-	2	8,64	54,05		934,31
		54207/9	10	16	23,05	535,48	123401,37	197442,19
Summen			870	833	2080,48	41016,03	14961940,78	9176439,15

Summe Ölwaggons beladen	100		789,11	5405
Summe Ölwaggons leer		83	177,484	

Summe andere Waggons beladen	770		1100,61	34530,034
Summe andere Waggons leer		750	842,892	

Durchschnitt pro leeren Ölwagon in to, da keine Angaben zu einzelnen Wagen verfügbar: 54,05

Erläuterungen	
Ölwaggons	89771 / 89772
	89529 / 89530

		anteilig
Leertonnen-		
kilometer	39.148,69	
Ölwaggons		
Leertonnen-		
kilometer andere	9.137.290,46	
Summe	9.176.439,15	38,02%
Lasttonnen-		
kilometer	790.198,42	
Ölwaggons		
Lasttonnen-		
kilometer andere	14.171.742,36	
Summe	14.961.940,78	61,98%
Summe Leer		
und Lasttonnen-	24.138.379,93	
kilometer		

Berechnungen für die Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG

von	nach	km pro einfache Fahrt	Anzahl Fahrten pro Monat	Produkt	to/Zug
Flandersbach oder Dornap-Hahnenfurth	verschiedene	150	35	Kalk	1.000
Frimmersdorf	Hafen Neuss/Düsseldorf	50	16	Gips	1.000
Frechen	Trompet	120	16	Kohlenstaub	800
Deuna	Neuss	480	12	Zement	1.000
Oberhausen	Deuna	421	6	Sand	1.000
Beddingen	Deuna	191	3	Sand	1.000

ohne Leerfahrten (Last/Last)					
Hannover	Beimerstetten	638	4	Salz/Schlacke	700
Summe		2.050			6.500

von	nach	Lasttonnen pro Monat	Lasttonnen*km pro Monat	Leertonnen pro Monat	Leertonnen*km pro Monat
Flandersbach oder Dornap-Hahnenfurth	Verschiedene	35.000	5.250.000	35.000	5.250.000
Frimmersdorf	Hafen Neuss/Düsseldorf	16.000	800.000	16.000	800.000
Frechen	Trompet	12.800	1.536.000	12.800	1.536.000
Deuna	Neuss	12.000	5.760.000	12.000	5.760.000
Oberhausen	Deuna	6.000	2.526.000	6.000	2.526.000
Beddingen	Deuna	3.000	573.000	3.000	5.730.00
Hannover	Beimerstetten	5.600	3.572.800	0	0
Summe		90.400	20.017.800	84.800	16.445.000

		Anteil in %
Lasttonnen	90.400	51,60
Leertonnen	84.800	48,40
Tonnen insgesamt	175.200	
Lasttonnen-Kilometer	20.017.800	54,90
Leertonnen-Kilometer	16.445.000	45,10
Tonnenkilometer insgesamt	36.462.800	
Anzahl Fahrten leer	88	47,83
Anzahl Fahrten voll	96	52,17
Anzahl Fahrten insgesamt	184	

Berechnungen für die Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH

	Anzahl				
Lokzug-Fahrten	33				
Lokomotive mit leeren Güterwagen	20	leere Güterwagen	95	mögliches Gewicht pro Güterwagen	52 to
		monatlich	10,56		
Lastfahrten	31	beladene Güterwagen	86	Gesamtgewicht	4563 to
		monatlich	9,56	pro Güterwagen	53,06 to
		Summe	181		
		monatlich	20,11	Streckenlänge (ca.)	20 km

Anteil leere Güterwagen	52,49%
Anteil beladene Güterwagen	47,51%

	neun Monate	Durchschnitt pro Monat	anteilig am Gesamtaufkommen
Leerfahrten	53	5,89	63,10 %
Lastfahrten	31	3,44	36,90 %
gesamte Fahrten	84	9,33	

Berechnungen für die SBB Cargo GmbH

Eingang	1.138	Güterwagen
Ausgang	1.121	Güterwagen
insgesamt	2.259	Güterwagen
Anteil leerer Güterwagen ca. 3 %	68	leere Güterwagen
durchschnittliches Gewicht pro Güterwagen	56	Tonnen
Leertonnen insgesamt	3.808	Tonnen
leere Güterwagen im eigenen Zugriff	15	leere Güterwagen
leere Güterwagen außerhalb des eigenen Zugriffs	53	leere Güterwagen

Autoren:

Dipl.-Kff. Alexandra Saur

alexandra.saur@pim.uni-due.de

Univ.-Prof. Dr. Stephan Zelewski

stephan.zelewski@pim.uni-due.de

Impressum:

Institut für Produktion und
Industrielles Informationsmanagement

Universität Duisburg-Essen, Campus Essen

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

Universitätsstraße 9, 45141 Essen

Website (Institut PIM): www.pim.wiwi.uni-due.de

Website (MAEKAS): www.maekas.wiwi.uni-due.de

ISSN: 1866-9255



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie



TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

Das Drittmittelprojekt MAEKAS ("Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und über-regionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien") wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) innerhalb des Rahmenkonzepts "Intelligente Logistik im Güter- und Wirtschaftsverkehr" gefördert und vom Projektträger Mobilität und Verkehr, Bauen und Wohnen (PTMVBW), der TÜV Rheinland Consulting GmbH, betreut. Die Projektpartner danken für die großzügige Unterstützung ihrer Forschungs- und Transferarbeiten.

Partner aus der Praxis:

SBB Cargo GmbH



Mülheimer VerkehrsGesellschaft mbH



Neuss-Düsseldorfer Häfen GmbH & Co. KG



Wanne-Herner Eisenbahn und Hafen GmbH



Universität Duisburg-Essen – Campus Essen
Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement

Projektberichte des Verbundprojekts MAEKAS

ISSN 1866-9255

- Nr. 1 Zelewski, S.: Überblick über das Verbundprojekt MAEKAS – Management von projektbezogenen Allianzen zwischen lokalen und überregionalen Eisenbahnverkehrsunternehmen für kundenspezifische Akquisitionsstrategien. Essen 2008.
- Nr. 2 Zelewski, S.; Saur, A.; Klumpp, M.: Co-operative Rail Cargo Transport Effects. Essen 2008.
- Nr. 3 Zelewski, S.; Koppers, L.; Klumpp, M.: Supply Chain Cooperation. Essen 2009.
- Nr. 4 Günes, N.: Analyse der Ausgangssituation bei den Praxispartnern: Leistungsangebot – Kompetenzen – Geschäftsprozesse. Essen 2009.
- Nr. 5 Hertrampf, S.: Kernkompetenzen aus der Perspektive des Resource-based View – mit Fokus auf Kernkompetenzen von Eisenbahnverkehrsunternehmen. Essen 2009.
- Nr. 6 Hertrampf, S.: Das Konzept virtueller Unternehmen – konkretisiert für projektbezogene strategische Allianzen zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen. Essen 2009.
- Nr. 7 Hertrampf, S.: Motivationskonzepte für Wissensteilung und gemeinsame Wissensanwendung in virtuellen Unternehmen der zweiten Generation – unter besonderer Berücksichtigung des Wissensmanagements von Eisenbahnverkehrsunternehmen. Essen 2009.
- Nr. 8 Zelewski, S.; Saur, A.: Vermeidung von Leerfahrten für Eisenbahnverkehrsunternehmen durch „intelligente“ Nachfragebündelung – eine Beurteilung der ökonomischen und ökologischen Effizienz. Essen 2009.
- Nr. 9 Hertrampf, S.: Etablierung einer Kooperationsstruktur für ein virtuelles Unternehmen der zweiten Generation – ein Ansatz auf der Basis von Rollenmodellierung und Konfliktmanagement. Essen 2009.
- Nr. 10 Hertrampf, S.: Wissensmanagement in strategischen Allianzen lokaler und überregionaler Eisenbahnverkehrsunternehmen – Wissensbarrieren und Managementinstrumente zu ihrer Überwindung. Essen 2009.
- Nr. 11 Hertrampf, S.: Offenlegung, Verbreitung und Anwendung kooperationsrelevanten Wissens in Unternehmensnetzwerken – Entwicklung und Erprobung eines Unterstützungskonzepts für die betriebliche Praxis. Essen 2009.
- Nr. 12 Günes, N.: Schienengüterverkehrsmarkt 2009 im Ruhrgebiet: Marktanalyse – Logistikpotenzial – Branchenanalyse – Kunden. Essen 2009.
- Nr. 13 Günes, N.: Das 4-Phasenmodell der Gleisanschlussreaktivierung. Essen 2009.
- Nr. 14 Günes, N.: Güterverkehrsleistungen im Verbundprojekt MAEKAS: Basisleistungen – Zusatzleistungen – Gewerbeflächenvermittlung. Essen 2009.