



Daniel Pöhle

Strategische Planung und Optimierung der Kapazität in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanung

disserta
Verlag

Pöhle, Daniel: Strategische Planung und Optimierung der Kapazität in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanung. Hamburg, disserta Verlag, 2016

Buch-ISBN: 978-3-95935-322-9

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95935-323-6

Druck/Herstellung: disserta Verlag, Hamburg, 2016

Covergestaltung: © Annelie Lamers

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Genehmigte Dissertation der TU Dresden mit dem Titel
„Strategische Planung und Optimierung der Kapazität in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanung“
Gutachter Prof. Dr. rer. nat. habil. K. Nachtigall und Prof. Dr.-Ing. J. Pacht
Tag der Verteidigung 07.04.2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© disserta Verlag, Imprint der Diplomica Verlag GmbH
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg
<http://www.disserta-verlag.de>, Hamburg 2016
Printed in Germany

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der strategischen Kapazitätsplanung in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanplanung. Da in den aktuellen Verkehrsprognosen für Deutschland ein Wachstum im Schienenverkehr gegenüber der heutigen Verkehrsleistung vorausgesagt wird, jedoch demgegenüber eine Knappheit der finanziellen Mittel für den Neu- und Ausbau sowie den Erhalt der Schieneninfrastruktur steht, ist es wichtig die „richtigen“ Maßnahmen zur Engpassauflösung zu bestimmen und umzusetzen. Durch die lange Zeitdauer von Planung bis zur Realisierung von Infrastrukturmaßnahmen ist es weiterhin notwendig, bereits sehr frühzeitig die zukünftig erforderlichen Maßnahmen zu identifizieren, damit sie noch rechtzeitig umgesetzt werden können. Mit Hilfe der fahrplanbasierten Infrastrukturentwicklung wird ein zukünftiger Zielfahrplan im Vorlauf von etwa 20 Jahren entwickelt und daraus die erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen abgeleitet. Die Entwicklung des Langfristfahrplans hat dabei den Vorteil gegenüber einer rein verkehrsstrombasierten Dimensionierung der Infrastruktur, dass verlässlichere Aussagen zu zukünftigen Beförderungszeiten, der Realisierbarkeit von Fahrplankonzepten und der Betriebsqualität gemacht werden können. Daher wird auch explizit der Schienengüterverkehr mit in der strategischen Fahrplanung berücksichtigt und mit Hilfe von standardisierten Systemtrassen auf definierten Relationen (Zuglaufabschnitte) geplant.

Zur Unterstützung der strategischen Fahrplanung wurde an der TU Dresden ein Software-Prototyp „TAKT“ entwickelt, der automatisiert Fahrpläne für den Personen- und Güterverkehr ermittelt und optimiert. Aufbauend auf den Entwicklungen wird in dieser Arbeit die Erschließung und Nutzbarmachung von automatisierter Taktfahrplanung und mathematischen Optimierungsverfahren für die praktischen Fragestellungen aus der strategischen Fahrplanung und dem Kapazitätsmanagement thematisiert. Es wird aufgezeigt, welche Anwendungsfelder der automatisierte Fahrplanung in der Praxis bestehen und welcher Nutzen damit zu erzielen ist. Dabei liegt der Fokus auf der automatisierten Planung und Optimierung des Güterverkehrs, der mit standardisierten Systemtrassen auf Zuglaufabschnitten geplant wird. Die Zuglaufabschnitte verlaufen auf gemeinsamen Teillaufwegen im Schienennetz und überlagern sich. Dadurch konkurrieren die Trassen der verschiedenen Relationen um die gleiche Kapazität der Strecken und es muss ein ausgewogenes und auf die Verkehrsprognose passendes Mischungsverhältnis der Systemtrassen aller Zuglaufabschnitte gefunden werden. Die

heutigen Regeln und Heuristiken der manuellen Fahrplankonstruktion und auch die mathematischen Optimierungsverfahren zur Fahrplankonstruktion können bisher das Planungsproblem nicht direkt adressieren. Für die Fahrplankonstruktion werden in der Arbeit drei Fragestellungen beantwortet, die es bei der „klassischen“ Fahrplanbearbeitung ohne Trennung von Trasse und Zug nicht gegeben hat:

- Wie muss bei sich überlagernden Zuglaufabschnitten der Fahrplan konstruiert werden, damit die Kapazität möglichst gut ausgenutzt wird?
- Wie kann die Anforderung an Trassen auf allen Zuglaufabschnitten möglichst gleichmäßig erfüllt werden?
- Wie lassen sich aus der Konstruktion die maßgebenden Abschnitte der Infrastruktur erkennen, durch die die Kapazität für den Güterverkehr begrenzt wird

Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche Verfahren zur Planung von Systemtrassen auf sich überlagernden Zuglaufabschnitten entwickelt und an einem Praxisbeispiel erprobt. Weiterhin werden die Ergebnisse der Strategien aus eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Sicht analysiert und miteinander verglichen. Die Strategie „Belegung und Flexibilität“ übertrifft die Ergebnisse aller anderen Ansätze und ermöglicht sowohl eine sehr hohe Gesamtanzahl an Trassen als auch eine homogene Verteilung auf die Zuglaufabschnitte. Es hat sich gezeigt, dass mit einem kombinierten Verfahren von Fahrplankonstruktion und der Belegung von Systemtrassen die vorhandene Kapazität sehr effektiv ausgenutzt werden kann. Die gute Kapazitätsausnutzung sind mit dem Informationsaustausch zwischen Konstruktion und Belegung und der vollen Ausnutzung der vorhandenen Flexibilität der Trassen begründet. Um einen wesentlichen Nachteil dieser Strategie - hoher manueller Aufwand Phase bei der Synchronisation der Trassen - zu eliminieren, wird Modell entwickelt, dass die Arbeitsschritte weitestgehend automatisiert.

Eine wichtige Stärke der Strategie „Belegung und Flexibilität“ für die fahrplanbasierte Infrastrukturentwicklung ist die Möglichkeit, die maßgebenden kapazitätsbegrenzenden Abschnitte zu erkennen und die Ursache von Trassenablehnungen direkt ableiten zu können. Dadurch ergeben sich unmittelbar diejenigen Bereiche in der Infrastruktur, für die Maßnahmen ergriffen werden müssen, damit die prognostizierte Verkehrsmenge tatsächlich abgewickelt werden kann. Weiterhin wird im Rahmen der Arbeit eine obere Schranke für die Konstruktionskapazität im Schienennetz hergeleitet. Unter Verwendung eines Netzwerkflussproblems (multi commodity flow problem) kann die maximale Anzahl an Trassen bestimmt werden, die im Netz aufgrund der Kapazitätsbeschränkung der einzelnen Teilabschnitte fahrbar ist.

In der strategischen Fahrplanung lassen sich leistungsfähige Optimierungsverfahren für die Teilprobleme Konstruktion und Belegung in für die Praxis relevanten Teilnetzgrößen anwenden und nutzen. Gegenüber der manuellen Trassenplanung wird einerseits Bearbeitungszeit eingespart, andererseits kann die verfügbare Kapazität durch die Optimierung besser ausgenutzt werden. Eine höhere Anzahl Systemtrassen bietet der Trassenbelegung einen größeren Spielraum für die Optimierung. Dies hat einerseits attraktivere Trassen für die Eisenbahnverkehrsunternehmen im Güterverkehr zur Folge, andererseits wirken sich vorhandene Engpässe im Netz weniger stark aus. Die verbesserten Fahrplanungsmethoden können damit die Wettbewerbsfähigkeit des Systems Eisenbahn steigern, um mehr Güterverkehr auf den umweltfreundlichen Schienenverkehr zu verlagern.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	13
Symbolverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	16
Fachbegriffsverzeichnis	18
1 Einleitung	21
2 Kapazität des Schienennetzes und Industrialisierung des Fahrplans	25
2.1 Grundlagen Kapazität im Bahnsystem	25
2.2 Stand der Forschung bei Methoden zur Kapazitätsbestimmung	29
2.3 Zusammenhang von Strecken-, Knoten- und Netzkapazität	35
2.4 Industrialisierung des Fahrplans	36
2.5 Neue Kapazitätsmaße durch Industrialisierung des Fahrplans	40
3 Fahrplanbasierte Infrastrukturentwicklung	43
3.1 Klassische Dimensionierung der Infrastruktur	43
3.2 Prozess fahrplanbasierte Infrastrukturentwicklung	45
3.3 Automatisierung von Planungsschritten	49
4 Verfahren zur automatisierten Fahrplanung	54
4.1 Überblick Verfahren zur automatisierten Fahrplanung . . .	54
4.2 Theoretische Grundlagen: Periodic Event Scheduling Problem	59
4.3 Das Programmsystem TAKT	65
4.3.1 Überblick über Programmmodule	65
4.3.2 Automatisierte Taktfahrplanung Personenverkehr .	66
4.3.3 Automatisierte Taktfahrplanung Güterverkehr . . .	68
4.3.4 Automatisierte Planung für ungetaktete Fahrlagen .	71
4.4 Optimierte Belegung von Güterverkehrsstrassen	73

5	Fahrplankonstruktionsstrategien auf überlagerten Zuglaufabschnitten	77
5.1	Charakteristik der Zuglaufabschnitte	77
5.2	Greedy-Strategien für die Konstruktion	81
5.2.1	Strategie „Auflösung der Überlagerungen“	82
5.2.2	Strategie „Seriell“	83
5.2.3	Strategie „Parallel“	84
5.2.4	Strategie „Nachfrage“	84
5.2.5	Zusammenfassung der Greedy-Strategien	86
5.3	Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	87
5.4	Strategie „Engpassorientierung“	90
5.5	Strategie „Belegung und Flexibilität“	94
6	Bewertung und Vergleich der Strategien	104
6.1	Realer Testfall mit überlagerten Zuglaufabschnitten	104
6.2	Ergebnisse der manuellen Konstruktion	107
6.3	Ergebnisse Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	108
6.4	Ergebnisse Strategie „Engpassorientierung“	114
6.5	Ergebnisse Strategie „Belegung und Flexibilität“	119
6.6	Vergleich der Strategien	128
6.6.1	Bewertung Ergebnisse	128
6.6.2	Ermittlung des maßgebenden Abschnitts	133
6.6.3	Schranken für die Kapazitätsgrenze	135
6.6.4	Aufwand und Verständlichkeit für den Bearbeiter	138
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	141
7	Erweiterung des PESP-Modells für überlagerte Zuglaufabschnitte	143
7.1	Modell für die Synchronisation an den Teilungspunkten	144
7.2	Herleitung der notwendigen Restriktionen	148
7.3	Anwendung im Testfall	159
8	Zusammenfassung und Ausblick	165
	Literaturverzeichnis	172
A	Anhang	179
A.1	Weitere Ergebnisse des Testfalls	179
A.1.1	Zusammenfassung Konstruktionsergebnis	179
A.1.2	Strategie „Seriell“	180
A.1.3	Strategie „Parallel“	180
A.2	Lösungskandidaten aus der Strategie „Belegung und Flexibilität“	181
A.3	Zwischenergebnisse der automatischen Verknüpfung	186

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kapazitätsbegriffe im Eisenbahnsystem	26
2.2	Zusammensetzung der Sperrzeit	28
2.3	Mindestzugfolgezeit zweier Züge	29
2.4	Netzelemente der Eisenbahninfrastruktur	30
2.5	Heutiger und industrialisierter Fahrplanprozess	38
3.1	Vergleich Planungsmethodik Infrastrukturentwicklung . . .	44
3.2	Fahrplanbasierte Infrastrukturentwicklung	45
3.3	Zuglaufabschnitte im Langfristfahrplan	47
3.4	Automatisierte Optimierung des Fahrplans	50
3.5	Planungsschritte der fahrplanbasierten Infrastrukturentwicklung	51
4.1	Planungsschritte Produktionsplanung Eisenbahnverkehr . .	55
4.2	Abbildung der Zugfahrt in einem Graph	56
4.3	Periodisches Ereignisnetzwerk für drei Linien im Personenverkehr	60
4.4	Zusammenhang Flexibilität der Ereignisse mit der Fahrzeit	62
4.5	Komponenten des Programmsystems TAKT	65
4.6	Unterteilung des Güterverkehrs in Schnipsel	69
4.7	Graph zur Konstruktion von Güterverkehrstrassen	70
5.1	Europäische TEN-Korridore	78
5.2	Konfliktpotential bei überlagerten Zuglaufabschnitten . . .	80
5.3	Teilnetz mit überlagerten Zuglaufabschnitten	81
5.4	Zuglaufabschnitte mit aufgelöster Überlagerung	82
5.5	Phasen der Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	87
5.6	Abnehmender Grenznutzen der Nachfrageerfüllung	89
5.7	Phasen der Strategie „Engpassorientierung“	90
5.8	Teilungspunkte in Phase 1	91
5.9	Kapazitätsbeschränkung im Netzwerkflussproblem	92
5.10	Phasen der Strategie „Belegung und Flexibilität“	95
5.11	Bewertung der Synchronisationszeit	97
5.12	Teilschritte in Phase 3 der Strategie „Belegung und Flexibilität“	98
5.13	Verknüpfungsdiagramm	99
5.14	Flexibilität der Güterverkehrstrassen	100
5.15	Konflikte bei der netzweiten Verknüpfung	101

5.16	Bilanzdiagramm Gleisbelegung	102
5.17	Ablaufdiagramm Strategie „Belegung und Flexibilität“ . .	103
6.1	Übersichtskarte Testfall	105
6.2	Bildfahrplan Strecke Hamburg - Berlin	105
6.3	Konstruktionsergebnis der manuellen Konstruktion	108
6.4	Anzahl unabhängig voneinander konstruierbarer Systemtras- sen	109
6.5	Systemtrassen auf der Relation Hamburg - Berlin	109
6.6	Systemtrassen auf der Relation Hamburg - Magdeburg . .	110
6.7	Ausschlussmatrix für die konfliktfreie Auswahl	111
6.8	Konstruktionsergebnis der Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	112
6.9	Bildfahrplan Endergebnis Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	113
6.10	Verteilung des BFQ bei der Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	113
6.11	Kapazität der Teilabschnitte	114
6.12	Trassen auf dem Teilabschnitt Ludwigslust - Wittenberge .	115
6.13	Konstruktionsergebnis der Strategie „Engpassorientierung“	117
6.14	Bildfahrplan Endergebnis Strategie „Engpassorientierung“	117
6.15	Verteilung des BFQ bei der Strategie „Engpassorientierung“	118
6.16	Gabeltrassen für mehr Flexibilität bei der Belegung	118
6.17	Zeitlicher Versatz der Trassen auf den Teilabschnitten . . .	119
6.18	Übersicht der Trassen auf den Teilabschnitten	121
6.19	Auslastungsgrad der Teilabschnitte nach der Belegung . . .	122
6.20	Anpassungsbedarf Verknüpfung Knoten Wittenberge . . .	124
6.21	Wartegleisbedarf in Hagenow Land	125
6.22	Bildfahrplan Endergebnis Strategie „Belegung und Flexibi- lität“	126
6.23	Bildfahrplan mit Zusatztrasse von Hamburg nach Berlin .	127
6.24	Verteilung des BFQ der Strategie „Flexibilität und Bele- gung“ inklusive Zusatztrasse	127
6.25	Gesamtanzahl Trassen je Strategie im Testfall	129
6.26	Verteilung der Trassen zur Nachfrageerfüllung	130
6.27	Relative Abweichung von der bestmöglichen Verteilung . .	131
6.28	Verteilung der Beförderungszeitquotienten je Strategie . . .	132
7.1	Periodisches Ereignisnetzwerk für die Synchronisation . . .	144
7.2	Konfliktauflösung zur Synchronisation der Trassen	146
7.3	Flexibilität der Trassen an den Teilungspunkten	151
7.4	Transformation der Zugfolgerestriktionen	153
7.5	Allgemeine Mindestzugfolgerestriktion Güterverkehr - Per- sonenverkehr	154
7.6	Einfluss Güterverkehr auf Flexibilität	155
7.7	Potentiell in Konflikt stehende Trassen	157
7.8	PESP zur Synchronisation in Iteration 1	161

7.9	Ergebnis der ersten Iteration zur automatisierten Synchronisation	161
7.10	Ergebnis der automatischen lokalen Verknüpfung in Wittenberge	162
A.1	Bildfahrplan Hamburg - Berlin Strategie „Seriell“	180
A.2	Bildfahrplan Hamburg - Berlin Strategie „Parallel“	180
A.3	Ausschlussmatrix der Lösungskandidaten	183
A.4	Verknüpfungsdiagramm Wittenberge	184
A.5	Verknüpfungsdiagramm Ludwigslust	185
A.6	Ausgangssituation vor der Synchronisation	186
A.7	Verknüpfung nach Iteration 1	187
A.8	Verknüpfung nach Iteration 2	188
A.9	Verknüpfung nach Iteration 3	189
A.10	Verknüpfung nach Iteration 4	190
A.11	Verknüpfung nach Iteration 5	191
A.12	Verknüpfung nach Iteration 6	192
A.13	Endergebnis der Synchronisation	193

Tabellenverzeichnis

5.1	Beispiel für Konstruktionsreihenfolge bei der Strategie „Seriell“	83
5.2	Beispiel für Konstruktionsreihenfolge bei Strategie „Parallel“	84
5.3	Gleichmäßige Erfüllung der Nachfrage auf den Zuglaufabschnitten	85
5.4	Konstruktionsreihenfolge bei der Strategie „Nachfrage“ . .	85
6.1	Geforderte Trassenanzahl je Zuglaufabschnitt im Testfalls .	106
6.2	Konfliktfrei ausgewählte Trassenanzahl je Zuglaufabschnitt	112
6.3	Aufteilung des Maximalflusses auf die Zuglaufabschnitte .	116
6.4	Belegte Lösungskandidaten der Strategie „Konfliktfreie Auswahl“	122
6.5	Varianten Netzwerkfluss bei Mindesterfüllung der Nachfrage	137
6.6	Verständlichkeit und Aufwand der entwickelten Strategien	138
7.1	Berücksichtigung der Verknüpfungsrestriktionen	149
7.2	Berücksichtigung der Fahrzeitrestriktionen	150
7.3	Berücksichtigung der Flexibilitätsrestriktionen	152
7.4	Berücksichtigung der Reihenfolge- und Mindestzugfolgere- striktionen	157
7.5	Berücksichtigung der Ausschlussrestriktionen	158
7.6	Berücksichtigung der Gleisbelegungsrestriktionen	159
7.7	Güterverkehrstrassen in Wittenberge vor der Synchronisation	160
7.8	Vergleich automatische und manuelle Lösung lokale Ver- knüpfung Wittenberge	163
A.1	Zusammenstellung Verteilung der konstruierten Trassen im Testfall	179
A.2	Zuglaufabschnitte	181
A.3	Liste der Lösungskandidaten	181

Symbolverzeichnis

$\mathcal{C}$	Menge der Zuglaufabschnitte
C_s	Menge der Trassen, die einen Konflikt mit der Systemtrasse s haben
d_c	Trassennachfrage auf dem Zuglaufabschnitt c
d_{jk}	Zeitliche Differenz zwischen spätester Abfahrtszeit der Trasse k und frühester Abfahrtszeit der Trasse j
$\mathcal{H}$	Menge der Zeitintervalle in den Knoten
h_l	Untere Grenze der Mindestzugfolgezeitrestriktion
h_u	Obere Grenze der Mindestzugfolgezeitrestriktion
$\mathcal{K}$	Menge der Konflikte
l_a	Untere Grenze des Zeitintervalls der Restriktion a
l_c	Mindestbefriedigung Nachfrage auf Zuglaufabschnitt c
P_H	Menge der Wege, die in einem Knoten im Zeitintervall H verknüpft werden
P_r	Menge der möglichen Wege für eine Trassenanfrage r
$\mathcal{R}$	Menge der Trassenanfragen
$\mathcal{S}$	Menge der Systemtrassen
T_0	Ereigniszeitpunkt zur Minute 0
$T_{an,j,A}$	Ankunftszeitpunkt der Trasse j im Verknüpfungsknoten A
$T_{ab,k,B}$	Abfahrtszeitpunkt der Trasse k im Verknüpfungsknoten B
T_i	Abfahrtszeitpunkt im Ereignisknoten i
t_F	Fahrzeit
t_T	Taktzeit
u_a	Obere Grenze des Zeitintervalls der Restriktion a
u_r	Umsatz der Trassenanfrage r
u_V	Obere Grenze des Zeitintervalls für die Verknüpfung
x_i	Entscheidungsvariable, ob für Trasse i ausgewählt wird
$x_{p,c}$	Entscheidungsvariable, ob für Zuglaufabschnitt c die Trasse mit dem Weg p ausgewählt wird
$x_{p,r}$	Entscheidungsvariable, ob für Trassenanfrage r der Weg p ausgewählt wird
z_a	Taktmultiplikator der Restriktion a
Z_c	Menge der Trassen des Zuglaufabschnitts c

Fortsetzung auf nächster Seite

α_i	Gewichtungsparameter für die Synchronisationszeit am Teilungspunkt i
χ_c	Gesamtfluss auf dem Zuglaufabschnitt c
δ_i	Flexibilität am Ereignisknoten i
κ_{jk}	Maximale Flussmenge auf der Kante von j nach k
λ_{jk}	Minimale Flussmenge auf der Kante von j nach k
ϕ_{cjk}	Flussmenge des Zuglaufabschnitts c auf der Kante von j nach k
ϱ	Umwegfaktor
$\tau(p_r^*)$	Fahrzeit von Quelle nach Ziel für Trassenanfrage r auf dem Weg p^* mit minimaler Fahrzeit
$\tau(p)$	Fahrzeit auf dem Weg p von Quelle nach Ziel
$\xi(p)^2$	Bewertung der Synchronisationszeit für den Weg p
Ω	Konstante mit großem Wert („big M“), z.B. $\Omega = 5000$
ω_i	Synchronisationszeit am Teilungspunkt i
$\omega_{p,r}$	Nutzenwert, falls der Weg p für die Trassenanfrage r ausgewählt wird

Abkürzungsverzeichnis

ACP - Arc Configuration Problem

ANKE - Programmsystem „Analytische Kapazitätsermittlung“

APP - Arc Packing Problem

Bf - Bahnhof

BFQ - Beförderungszeitquotient

EBW - Eisenbahnbetriebswissenschaft

EBWU - Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung

EIU - Eisenbahninfrastrukturunternehmen

EVU - Eisenbahnverkehrsunternehmen

Lfpl - Langfristfahrplan

LUKS - Programmsystem „Leistungsuntersuchung für Knoten und Strecken“

MUS - Minimal Unfeasible Subset (kleinste unlösbare Teilmenge)

OpSysTra - Programmsystem „Optimierte Belegung von Systemtrassen“

PESP - Periodic Event Scheduling Problem (periodische Ereignisplanung)

PPP - Path Packing Problem

Q - Quelle

RFC - Rail Freight Corridor

Ril - Richtlinie

RUT-K - Programmsystem „Rechnerunterstütztes Trassenmanagement - Konstruktion“

SAT - Satisfiability Problem (Problem der Aussagenlogik)

SGV - Schienengüterverkehr

SPV - Schienenpersonenverkehr

STRELE - Programmsystem „Streckenleistungsfähigkeit“

TAKT - Programmsystem zur automatisierten Fahrplanung im Personen und Güterverkehr

TP - Teilungspunkt

UIC - International Union of Railways

VDE - Verkehrsprojekt Deutsche Einheit

Z - Ziel

ZLA - Zuglaufabschnitt

Fachbegriffsverzeichnis

Eine sehr gute Zusammenstellung von grundlegenden Fachbegriffen zum Eisenbahnsystem findet sich im Glossar des Buches „Systemtechnik des Schienenverkehrs“ [65] und im Fachlexikon „Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb“ [66]. In der nachfolgenden Übersicht sind die für das Verständnis der Arbeit hilfreichen (zusätzlichen) Fachbegriffe kurz erläutert.

Abfahrtsereignis - Im periodischen Ereignisnetzwerk wird mit einem Abfahrtsereignis der mögliche Abfahrtszeitpunkt eines Zuges in einem Bahnhof oder Haltepunkt modelliert.

Belegung - Im industrialisierten Fahrplan erfolgt die Kapazitätszuweisung durch die Belegung vorkonstruierter Systemtrassen mit Trassenanfragen.

Belegungsgrad - Der Belegungsgrad einer Strecke entspricht im industrialisierten Fahrplan dem Verhältnis der Anzahl belegter zu maximal vermarktbaren Systemtrassen. Der Nenner dieses Verhältnisses entspricht also der Vermarktungskapazität der Strecke.

Belegungszeit - Die Belegungszeit wird auch als Sperrzeit bezeichnet. Sie umfasst die Zeitspanne, in der ein Fahrwegabschnitt (beispielsweise ein Block oder eine Fahrstraße) durch eine Zugfahrt betrieblich genutzt wird und er somit für die Nutzung durch andere Fahrten gesperrt ist.

Erfüllungsgrad - Der Erfüllungsgrad entspricht im Kontext der Systemtrassenkonstruktion dem Verhältnis der Anzahl tatsächlich konstruierbarer zur Anzahl prognostizierter oder angeforderter Systemtrassen.

Flexibilität - Die Flexibilität gibt den maximalen zeitlichen Spielraum bei der Abfahrt oder Ankunft einer Trasse in einer Betriebsstelle an, in der sie ohne weitere Anpassungen am Fahrplan konfliktfrei zwischen den sie umgebenden Trassen verschoben werden kann.

Gabeltrassen - Gabeltrassen sind Trassen, die sich von einem gemeinsam genutzten Teil des Laufwegs verzweigen. Die Fahrplanlage der Gabeltrassen ist so abgestimmt, dass die Trasse auf dem gemeinsam genutzten Laufweg mit den Gabeltrassen jeweils ohne Wartezeit verknüpft werden kann. Somit können sie bei der Belegung alternativ und flexibel genutzt werden.

Industrialisierung Fahrplan - Im industrialisierten Fahrplan sind Trasse und Zug voneinander getrennt und werden separat geplant. Zunächst werden standardisierte und homogenisierte Systemtrassen (vor)geplant, die

anschließend mit Zügen belegt und verknüpft werden. Die Planungsschritte im industrialisierten Fahrplan werden in Kapitel 2.4 ab Seite 36 erläutert.

Konflikt - Zwei Trassen stehen miteinander im Konflikt, wenn sich deren Sperrzeiten in mindestens einem Blockabschnitt oder einer Fahrstraße überschneiden.

Konstruktionskapazität - Die maximale Anzahl Trassen des Güterverkehrs, die unter Einhaltung aller Vorgaben aus der DB-Richtlinie 402 [15] zu einem vorgegebenen Betriebsprogramms des Personenverkehrs konstruiert werden können, wird als Konstruktionskapazität bezeichnet. Sie ist eine fahrplanbezogene Kennzahl der Leistungsfähigkeit der Infrastruktur.

Lösungskandidat - Ein potentieller Weg von Quelle nach Ziel bei Belegung einer Trassenanfrage, der sich aus einer oder mehreren Systemtrassen zusammensetzt, wird als Lösungskandidat bezeichnet. Für eine Trassenanfrage gibt es in der Regel mehrere Lösungskandidaten, aus denen genau einer ausgewählt werden muss.

Maßgebender Abschnitt - Bei der Bestimmung der Konstruktionskapazität entspricht der maßgebende Abschnitt dem Teilabschnitt einer Strecke, dessen begrenzte Kapazität die Konstruktion einer zusätzlichen Trasse verhindert.

Mindestzugfolgezeit - Die Mindestzugfolgezeit ist der geringste zulässige Zeitabstand zwischen dem Beginn der Sperrzeiten zweier Trassen der gleichen Richtung auf einem Überholungsabschnitt und hängt maßgeblich von den Belegungszeiten und der Länge des Überholungsabschnitts ab.

Mindestkreuzungszeit - Die Mindestkreuzungszeit ist der geringste zulässige Zeitabstand zwischen zwei Trassen in unterschiedlicher Richtung auf einer eingleisigen Strecke.

Restriktion - Eine Restriktion entspricht einer Nebenbedingung in einem linearen Optimierungsmodell. Eine sehr gute Einführung in das Thema lineare Optimierung geben Neumann und Morlock [59].

Schnipsel - Bei der automatisierten Konstruktion von Güterverkehrstrassen werden die Trassen aus so genannten Schnipseln zusammengesetzt. Das Konzept wird im Kapitel 4.3.3 ab Seite 68 erläutert.

Spurplan - Im Spurplan sind die Gleise und Infrastrukturelemente des Schienennetzes schematisch dargestellt.

Synchronisation - Bei der Synchronisation im Verfahren „Belegung und Flexibilität“ (siehe Kapitel 5.5 ab Seite 94) werden die Trassen an den Teilungspunkten zeitlich aufeinander abgestimmt. Gibt es beispielsweise kein Wartegleis im Teilungspunkt, dann müssen Ankunfts- und Abfahrtszeit der beiden Trassen am Teilungspunkt exakt übereinstimmen.

Systemtrasse - Im industrialisierten Fahrplan werden standardisierte und homogenisierte Systemtrassen vorgeplant, die anschließend mit Trassenanfragen belegt werden.

Takt - Der Takt ist die Zeitspanne, nach der sich ein Ereignis periodisch wiederholt. Ein Zug im 60-Minuten-Takt fährt beispielsweise in jeder Stunde zur gleichen Minute ab.

Teilungspunkt - Zur Auflösung der Überlagerungen werden die Zuglaufabschnitte an den Teilungspunkten in Teilabschnitte unterteilt.

Trasse - Eine Trasse ist die im Fahrplan vorgesehene (geplante) zeitliche und räumliche Nutzung der Infrastruktur durch einen Zug mit definierten Eigenschaften und wird durch die Belegungszeiten charakterisiert.

Verkehrstag - Der Verkehrstag einer Trassenanfrage definiert, an welchen Tagen der Woche der Zug verkehren soll (Beispiele: Montag bis Freitag oder Dienstag, Donnerstag und Samstag).

Vermarktungskapazität - Die Anzahl Trassen des Güterverkehrs, die zur Sicherstellung einer mindestens befriedigenden Betriebsqualität (laut DB-Richtlinie 405 [16] „wirtschaftlich-optimal“) maximal belegt werden dürfen, wird als Vermarktungskapazität bezeichnet. Sie ist eine fahrplanbezogene Kennzahl der Leistungsfähigkeit der Infrastruktur.

Zielfunktion - Die Zielfunktion eines Optimierungsproblems bewertet eine Lösung im zulässigen Lösungsraum. Als Ergebnis des Optimierungsproblems wird eine Lösung mit optimalem Zielfunktionswert (Minimum oder Maximum) gefunden.

Zuglaufabschnitt - Im industrialisierten Fahrplan werden Systemtrassen auf vordefinierten Strecken zwischen wichtigen Quellen und Senken des Güterverkehrs sowie Rangierbahnhöfen, den so genannten Zuglaufabschnitten, geplant. Details sind in Kapitel 5.1 ab Seite 77 zu finden.

1 Einleitung

In den aktuellen Verkehrsprognosen für Deutschland wird ein Wachstum im Schienenverkehr gegenüber der heutigen Verkehrsleistung vorausgesagt (vgl. Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [7]). Während das durchschnittliche Wachstum im Schienenpersonenverkehr (SPV) mit 0,8% pro Jahr von 2010 bis 2030 eher moderat ausfällt¹, sollen im Schienengüterverkehr (SGV) die Trassenkilometer von 107,6 Milliarden (Jahr 2010) auf 153,7 Milliarden im Jahr 2030 steigen (vgl. [7], S. 8). Mit knapp 43% Wachstum von 2010 bis 2030 liegt die Steigerung der Verkehrsleistung auf der Schiene klar über dem Durchschnitt von 38% Wachstum und sie entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Rate von ungefähr 2%.

Dem Wachstum steht eine Knappheit der finanziellen Mittel für den Neu- und Ausbau sowie den Erhalt der Schieneninfrastruktur gegenüber. Die so genannte Daehre-Kommission (Kommission „Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ [34]) hat im Jahr 2012 ermittelt, dass der Nachholbedarf der Schiene bei in der Vergangenheit unterlassenen Investitionen in den Ersatz von beispielsweise Brücken oder Stellwerken eine Größenordnung von ungefähr drei Milliarden Euro umfasst (vgl. [34], S. 24). Auch für die Neu- und Ausbauprojekte wird ein Finanzierungsbedarf ermittelt, der die zur Verfügung stehenden Mittel übersteigt. Dem Bedarf von 1,8 bis 2,0 Milliarden Euro pro Jahr steht lediglich ein Volumen von ungefähr

¹Dieses Wachstum ist jedoch mit einem umfangreichen unterstellten Ausbau der Infrastruktur und einer starken Ausweitung des Angebots insbesondere im Fernverkehr begründet. Aus dem Bundesverkehrswegeplan 2003 wurde die „Realisierung aller im 'Vordringlichen Bedarf' festgelegten Maßnahmen unterstellt“ ([7], S. 3). Aus heutiger Sicht ist es jedoch fragwürdig, ob alle unterstellten Maßnahmen auch tatsächlich bis zum Jahr 2030 realisiert worden sind (vgl. ebenda). Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich, dass das durchschnittliche Wachstum im Schienenpersonenverkehr geringer als 0,8% pro Jahr ausfällt.

1,2 Milliarden Euro gegenüber (vgl. [34], S. 25). Aus diesem Grund besteht die dringende Notwendigkeit, die „richtigen“ Infrastrukturmaßnahmen mit dem größten Nutzen zu identifizieren und auch zu realisieren. Die DB Netz AG, das größte Eisenbahninfrastrukturunternehmen in Europa, hat das Ziel die zur Verfügung stehenden Mittel vorrangig zur Auflösung der vorhandenen und zukünftigen Engpässe einzusetzen (vgl. Sandvoß [80]), damit das prognostizierte Verkehrswachstum ermöglicht werden kann und nicht auf andere Verkehrsträger verlagert werden muss.

Die Zeitdauer vom Beginn der Planungen bis zur Inbetriebnahme von Infrastrukturmaßnahmen erstreckt sich auf mehrere Jahre, manchmal sogar Jahrzehnte. Die Neubaustrecke Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE) Nr. 8, die von Nürnberg über Erfurt, Halle / Leipzig nach Berlin verlaufen soll, wird beispielsweise voraussichtlich im Dezember 2017 vollständig in Betrieb genommen sein. Der Beschluss der Bundesregierung, die insgesamt neun VDE-Maßnahmen zu realisieren, wurde dagegen bereits im Jahr 1991 gefasst. Es ist daher notwendig mit langem zeitlichen Vorlauf die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen zu identifizieren, damit sie noch rechtzeitig umgesetzt werden können. Die fahrplanbasierte Infrastrukturentwicklung mit einem Langfristfahrplan nach dem Vorbild der Schweiz hat sich auch für das deutsche Netz als geeignet erwiesen und wird bei der DB Netz AG seit einigen Jahren von einer eigenen Organisationseinheit bearbeitet (vgl. Weigand [99] und Feil [20]). Darüber hinaus wurde im Innovationsprojekt „neXt - Industrialisierung Fahrplan“ eine neuartige Methodik zur Planung des Schienengüterverkehrs entwickelt. Dabei ist ein wesentlicher Planungsschritt die Konstruktion standardisierter Güterverkehrstrassen auf Teilabschnitten des Netzes, so genannten Zuglaufabschnitten (ZLA). Für den Langfristfahrplan und die Konstruktion von Trassen im industrialisierten Fahrplan gibt es noch keine in der Praxis etablierten Optimierungsverfahren, sondern die Planung erfolgt noch weitestgehend manuell durch Fahrplanexperten. Mit dem Programmsystem TAKT (vgl. Opitz [64]), das auf periodischer Ereignisplanung (vgl. Nachtigall [54]) basiert, existiert ein Prototyp für automatisierte Fahrplanung, der den Weg von mathemati-