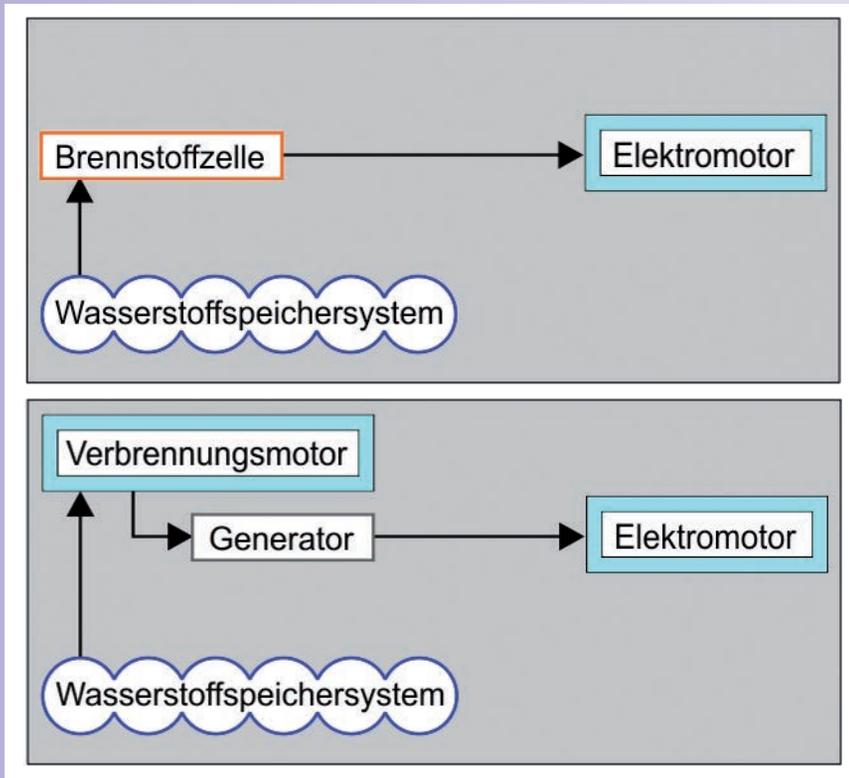


SENAN M. MAHMOD MOUSTAFA ALKHALIL



**Entwicklung von Betriebskonzepten
für Nahverkehrsfahrzeuge
mit alternativen Antrieben**

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.de> abrufbar.

Impressum:

Wissenschaftliche Arbeit Nr. 72 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Moustafa Alkhalil, Senan M. Mahmod, „Entwicklung von Betriebskonzepten für Nahverkehrsfahrzeuge mit alternativen Antrieben“, Dissertation 24.08.2011

ISBN 978-3-7771-0442-3

Copyright® 2012 bei DVV Media Group GmbH | Eurailpress, Nordkanalstr. 36, D-20097 Hamburg, Telefon +49 (0) 40 237 14 - 03, Telefax +49 (0) 40 237 14 - 236, E-Mail: eurailpress@dvvmedia.com

Alle Rechte der Verbreitung und Wiedergabe vorbehalten, Übersetzungen in eine andere Sprache, Nachdruck und Vervielfältigung – in jeglicher Form und Technik, auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlags gestattet.

Eine Publikation der DVV Media Group



**Eurail
press**

WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN
des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Nr. 72

Entwicklung von Betriebskonzepten für Nahverkehrsfahrzeuge mit alternativen Antrieben

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation
von

M.Sc. Senan M. Mahmod Moustafa Alkhalil
geboren am 06. Mai 1981 in Bagdad

Hannover 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Betriebskonzepte für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben	3
2.1 Herstellung von Wasserstoff.....	3
2.2 Mögliche Wasserstoffspeicherung an Bord	6
2.3 Alternative Antriebe mit Wasserstoff	10
2.4 Einsatz von Wasserstoff im Eisenbahnsystem.....	28
2.5 Zwischenfazit für die betrieblichen Fragestellungen	33
3 Der Eisenbahnnahverkehr	36
3.1 Einsatzphilosophie des Eisenbahnnahverkehrs.....	38
3.1.1 Einsatzphilosophie-A (Industrieländer).....	40
3.1.1.1 Das Betriebsprogramm.....	41
3.1.1.2 Das Netz	42
3.1.1.3 Die Linien.....	43
3.1.1.4 Die Fahrzeuge	46
3.1.2 Einsatzphilosophie-B (Entwicklungsländer).....	47
3.1.2.1 Das Betriebsprogramm.....	48
3.1.2.2 Das Netz	49
3.1.2.3 Die Linie	50
3.1.2.4 Die Fahrzeuge	51
3.2 Die Haltestellen des Regionalverkehrs.....	52
4 Modellierung	60
4.1 Ziel	61
4.2 Methode.....	62
4.2.1 Eingesetzte Programme	64
4.2.1.1 RailSys [®] -Programm.....	64
4.2.1.2 Dynamis [®] -Programm	65

4.2.2	Segmentierung eines Netzes	65
4.2.3	Auswahl eines Antriebssystems und eines Betriebsprogramms	66
4.2.4	Auswahl von Fahrgeschwindigkeit, Fahrweise und Energieverbrauch	73
4.3	Einsatzmöglichkeit des Verfahrens	91
4.4	Ausblick und weitere erforderliche Untersuchungen	92
5	Das Modellnetz.....	94
5.1	Beschreibung und Segmentierung des Modellnetzes	95
5.2	Darstellung des Modellnetzes und des Fahrplans im RailSys®-Programm	96
5.2.1	Betriebsvarianten und Betriebssimulation	97
5.2.2	Ergebnisse bei Anwendung der RailSys®- und Dynamis®-Programme	98
5.3	Ermittlung einer minimalen Fahrzeuganzahl	101
5.3.1	Auswahl eines Antriebssystems und eines Betriebsprogramms.....	103
5.4	Auswahl von Fahrgeschwindigkeit, Fahrweise und Energieverbrauch	110
5.4.1	Ergebnisse aus dem Verfahren	110
5.4.2	Diskussion der Ergebnisse	111
5.5	Bewertung der Ergebnisse	114
6	Zusammenfassung	116
7	Literaturverzeichnis.....	120
	Anhangsverzeichnis.....	127
Anhang 1:	Erforderliche SOLL-Fahrzeuganzahl und IST-Fahrzeuganzahl bezüglich der verschiedenen Betriebsprogramme und Zugreichweiten	128
Anhang 2:	Ermittlung der Haltefunktion von RE-Zuggattungen während einer Fahrt.....	139
Anhang 3:	Ergebnisse aus dem RailSys®- und Dynamis®-Programm für die untersuchten Zuggattungen im Netz	144
Anhang 4:	Verlauf der Fahrzeuge innerhalb eines Einsatztages beim Einsatz von 16 oder 12 Fahrzeugen.....	152
Anhang 5:	Verlauf der Fahrzeuge innerhalb eines Einsatztages beim Einsatz von 12 Fahrzeugen.....	153
Anhang 6:	Position und Umlauf der Fahrzeuge innerhalb von 6 Einsatztagen	155
Anhang 7:	Ermittlung der Werte beim Einsatz von 16 Fahrzeugen	156
Anhang 8:	Ermittlung der Werte beim Einsatz von 12 Fahrzeugen	158
Anhang 9:	Darstellung der Fahrzeuge im Verfahren	160

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Herstellungskosten von Wasserstoff aus regenerativen Energieträgern [20].....	4
Abb. 2: Herstellungsmöglichkeit von Wasserstoff und Wirkungsgrad des jeweiligen Herstellungsvorgangs [22][40][8]	5
Abb. 3: Erforderliches Gewicht und Ausmaß eines Speichersystems in Abhängigkeit zur gewünschten Reichweite [39]	9
Abb. 4: Mögliche Antriebssysteme für den Einsatz von Wasserstoff in einem Eisenbahnfahrzeug	11
Abb. 5: Komponenten eines Triebwagens mit alternativem (Brennstoffzellen) Antrieb (Antriebssystem BzB) [44][48]	12
Abb. 6: Verlauf der Züge bei erforderlicher Anzahl von 6 Fahrzeugen	16
Abb. 7: Verlauf der gefahrenen Züge mit maximal zwei Fahrten und einer zusätzlichen Fahrzeuganzahl	19
Abb. 8: Erforderliche SOLL-Fahrzeuganzahl nach der Betrachtung des Betriebsprogramms	20
Abb. 9: Erforderliche IST-Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit des Anteils des elektrifizierten Streckenabschnitts, der gesamten Streckenlänge, der Reichweite, des Energieverbrauchs, des Antriebssystems und des Betriebsprogramms	21
Abb. 10: Auswahl eines Antriebssystems	23
Abb. 11: Reduzierung der erforderlichen Fahrzeuganzahl durch den Einsatz der Züge einer Linie auf einer anderen	27
Abb. 12: Anzahl der Personenkraftwagen nach ihren Kraftstoffarten in Deutschland [49]	28
Abb. 13: Streckenlänge des Eisenbahnnetzes der europäischen Länder und Anteil ihrer elektrifizierten Strecken [45][51].....	30
Abb. 14: Kostenstrukturen im SPNV [4]	37
Abb. 15: Werte der PKW-Dichte und PKW-km in den verschiedenen Ländern.....	39
Abb. 16: Beispiel der Verstärkung der RE-Zuggattung in der NW-Region	44
Abb. 17: Der Regionalverkehr in der MS-Region	45
Abb. 18: Beispiel der Funktion von Neben-Linien in der NW-Region	45
Abb. 19: Abbildung einer Strecke und der verschiedenen Elemente für die Ermittlung der Haltefunktion eines Zuges.....	55
Abb. 20: Segmentierung des S-Bahnnetzes D-Stadt.....	66
Abb. 21: Positionen der Fahrzeuge im Verlauf mehrerer Einsatztage	68
Abb. 22: Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit in einer Normalverteilung [32]	69
Abb. 23: Die erforderliche Wartung von Fahrzeugen nach Betrachtung des Betriebsprogramms	71
Abb. 24: Darstellung des Verfahrens und seiner weiteren Anwendungen.....	74
Abb. 25: Fahrtafel des V-Weg-Diagramms eines Zuges	75

Abb. 26: Gebildete Widerstände während einer Fahrt und deren Einflussfaktoren [35].....	77
Abb. 27: Notwendiger Energieaufwand bei der Beschleunigung zur Erzielung der gewünschten Geschwindigkeit	78
Abb. 28: Erforderlicher Energieverbrauch der Beharrungsphase bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten	78
Abb. 29: Zuglauf auf einer bestimmten Streckenlänge mit unterschiedlichen maximalen Geschwindigkeiten [18].....	79
Abb. 30: Reisegeschwindigkeiten eines Zuges bei unterschiedlichen Streckenlängen und Geschwindigkeiten	80
Abb. 31: Darstellung der möglichen Fahrweisen nach Betrachtung der Zugeigenschaften, der Streckenlänge sowie der Beharrungs- und der Auslaufphasen einer Fahrt	82
Abb. 32: Darstellung der möglichen Fahrten und deren Fahrweisen für eine bestimmte Reisezeit und Streckenlänge	83
Abb. 33: Beispiel für die mögliche Erhöhung der Betriebsqualität	84
Abb. 34: Auswahl von Fahrgeschwindigkeit, Fahrweise und Energieverbrauch	86
Abb. 35: Darstellung der möglichen Fahrten und deren Fahrweisen	87
Abb. 36: Optimierung der Leistungsfähigkeit und des Energieverbrauchs bei einer Fahrt zwischen zwei Haltestellen	90
Abb. 37: Segmentierung des Modellnetzes.....	95
Abb. 38: Verteilung der Fahrzeuge im Modellnetz innerhalb eines Einsatztages nach Betrachtung der Zeitspanne, der Zuggattungen und der Haltestellenanzahl der jeweiligen Zuggattung ...	96
Abb. 39: Beschreibung der möglichen Einflüsse von Geschwindigkeitsänderungen auf die Betriebsqualität eines gestörten Fahrplans.....	99
Abb. 40: Verspätungsabbau bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten zwischen den Haltestellen einer Fahrt von As-Stadt nach Ma-Stadt.....	100
Abb. 41: Position der Fahrzeuge innerhalb des gesamten Umlaufs beim Einsatz von 12 Fahrzeugen	105
Abb. 42: Ergebnisse des Verspätungsabbaus der Fahrten (Standard-Fahrt und Fahrten nach dem Verfahren) im Modellnetz	111
Abb. 43: Ergebnisse des Energieverbrauchs der verschiedenen Fahrten im Modellnetz	112
Abb. 44: Verfahrensablauf für die Ermittlung der Haltefunktion von Zügen einer Standard-Linie	143

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kenngrößen der verschiedenen Speichersysteme	6
Tab. 2: Das erforderliche Gewicht und Ausmaß der verschiedenen Speichersysteme in Bezug auf die Reichweite	8
Tab. 3: Takt der gefahrenen Züge in Abhängigkeit von der Gleisanzahl der Strecke und dem Verkehrsaufkommen	13
Tab. 4: Die erforderliche Fahrtenanzahl innerhalb eines Tages	13
Tab. 5: Erforderliche Umlaufzeit eines Zuges unter Berücksichtigung der Streckenlänge, Reisegeschwindigkeit und Wendezeit von 10 min	14
Tab. 6: Mögliche Fahrtenanzahl eines Zuges in Abhängigkeit von dem Antriebssystem, dem Anteil des elektrifizierten Streckenabschnitts, der Streckenlänge und der Reichweite	17
Tab. 7: Erforderliche Fahrzeuganzahl zweier Linien eines Netzes	26
Tab. 8: Grenzwerte der Faktoren für die Ermittlung der Haltefunktion von Zügen des Regionalverkehrs	57
Tab. 9: Betriebs- und Instandhaltungskosten nach Betrachtung des Betriebsprogramms und Art der Instandhaltung	72
Tab. 10: Mögliches Fahrverhältnis eines Zuges zwischen zwei Haltestellen	87
Tab. 11: Abweichung im Fahrplan der untersuchten Züge in den verschiedenen Betriebsvarianten verglichen mit dem originalen Fahrplan	97
Tab. 12: Parameter der Einbruchsverspätung der DB-Richtlinien 405.0102 [27]	98
Tab. 13: Erforderliche Fahrzeuganzahl und ihre Fahrten innerhalb eines Einsatztages	102
Tab. 14: Erforderliche Werte der verschiedenen Fahrten	104
Tab. 15: Mittelwert und Standardabweichung der verschiedenen Kenngrößen im gesamten Netz ..	107
Tab. 16: Mittelwert und Standardabweichung der verschiedenen Kenngrößen auf den nicht elektrifizierten Streckenabschnitten des Netzes	108
Tab. 17: Bewertung des Einsatzes von Antriebssystemen nach Betrachtung des eingesetzten Betriebsprogramms	109
Tab. 18: Energieverbrauch und Verspätungsabbau einer Standard-Fahrt und bei Fahrten nach dem Verfahren	111
Tab. 19: Verlauf der Züge innerhalb eines Einsatztages beim Einsatz von 16 Fahrzeugen	152
Tab. 20: Verlauf der Züge innerhalb eines Einsatztages beim Einsatz von 12 Fahrzeugen	152
Tab. 21: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Einsatztages	156
Tab. 22: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Umlaufs (6 Einsatztage)	156
Tab. 23: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Einsatztages	157
Tab. 24: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Umlaufs (6 Einsatztage)	157
Tab. 25: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Einsatztages	158

Tab. 26: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Umlaufs (6 Einsatztage).....	158
Tab. 27: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Einsatztages.....	159
Tab. 28: Ermittlung der erforderlichen Werte innerhalb eines Umlaufs (6 Einsatztage).....	159

Abkürzungsverzeichnis

Symbole

§	Paragraph
‰	Promille
%	Prozent

A

Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
Abzw.	Abzweigstelle
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
a _{Zug}	erforderliche Fahrzeuganzahl
a _{Zug-Netz}	erforderliche Fahrzeuganzahl in dem gesamten Netz
a _{ZUGzusä.}	zusätzliche Fahrzeuganzahl

B

BAG SPNV	Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr
bvar	Betriebsvariante
Bz	Wasserstoff-Brennstoffzelle Antriebssystem direkt am elektrischen Motor
BzB	Wasserstoff-Brennstoffzelle Antriebssystem mit Batterien (Stromversorgung aus Brennstoffzellen)
bzw.	Beziehungsweise

C

ca.	circa
CH350	Compressed Hydrogen with 350bar
CH700	Compressed Hydrogen with 700bar
CNG	Compressed Natural Gas

D

d. h.	das heißt
DB-AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

E

EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ehem.	ehemalige
etc.	et cetera
EV	Energieverbrauch

F

Fgi	Anzahl der Bahnhofnutzer
FuE	Forschung und Entwicklung

H

H	Wasserstoff-Brennstoffzelle Hybridantriebssystem mit Batterien (Stromversorgung aus Brennstoffzellen und Bahnstrom)
H/V-Signal	Haupt-/Vorsignal-System
Hbf	Hauptbahnhof
HEX	Harz Elbe-Express, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
HS	Haltestelle
HVZ	Hauptverkehrszeit

I

IC	InterCity, Zuggattung des Schienenpersonenfernverkehrs
inkl.	inklusive
IRE	Interregio-Express, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
ITF	Integraler Taktfahrplan

K

kg	Kilogramm
km/h	Kilometer pro Stunde
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde

L

LH	Liquid Hydrogen
LPG	Low Pressure Gas

M

m	Meter
max.	maximal
MH	Metallhydrid
min	Minute
min.	minimal
Mio.	Millionen
MIV	motorisierte Individualverkehr
Mo-Fr	Montag bis Freitag

N

n.a.g.	nicht anderweitig genannt
Nr.	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
NVZ	Neben- bzw. Normalverkehrszeit

O

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
------	---------------------------------

P

PKW	Personenkraftwagen
PVA	Photovoltaikanlage

R

RB	Regionalbahn, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
RE	Regional- Express, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
RTRI	Japan Railway Technical Research Institute

S

s	Abstand [m oder km]
s.	siehe
S-Bahn	Stadtschnellbahn, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
SE	Stadt-Express, Zuggattung des Schienenpersonennahverkehrs
sec.	Sekunde
SPD	Sozialdemokratische Partei
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
Std.	Stunde
SVZ	Schwachverkehrszeit

T

t	Zeit [sec., min oder Std.]
t_{ab}	Abfahrtszeit
Tab.	Tabelle
t_{an}	Ankunftszeit
t_{Eab}	Abfahrtszeit der Züge ab Endstation
Tfzf	Triebfahrzeugfahrt
th. SA	thermische Solaranlage
t_{Hin}	erforderliche Zeit einer Hinfahrt
$t_{Rück}$	erforderliche Zeit einer Rückfahrt
t_{Sab}	Abfahrtszeit der Züge ab Startstation
t_{San}	Ankunftszeit der Züge in der Startstation
t_{Still}	Stilllager eines Zuges
t_{Takt}	Takt der Züge
t_{Tank}	erforderliche Zeit eines Betankungsprozesses
t_{TnVo}	erforderliche Zeit beim Tankvorgang
t_{Umlauf}	Umlaufzeit eines Zuges
t_{Wende}	Wendezeit eines Zuges für neue Fahrt

V

v	Geschwindigkeit [m/sec. oder km/h]
VLTJ	Vemb-Lemvig-Thyborøn Jernbane A/S bekannt als „Lemvigbanen“
Vmax	maximal zulässige Geschwindigkeit
Vsp.	Verspätung

W

WEA	Windenergieanlage
WKW	Wasserkraftwerk

Z

z. B.	zum Beispiel
-------	--------------

Somit ergibt sich:

$$a_{1/2_1} = \frac{t_{\text{Umlauf_1}}}{t_{\text{Takt_2}}}$$

Wobei:

$a_{1/2_1}$ = Anzahl des Fahrzeuge durch den Einsatz der Züge der Linie Nr. 1 auf Linie Nr. 2 in der Startstation

$t_{\text{Umlauf_1}}$ = erforderliche Umlaufzeit des Zuges auf der Strecke der Linie Nr. 1

$t_{\text{Takt_2}}$ = Taktfahrplan der Züge auf der Strecke der Linie Nr. 2

Hierzu wird die Fahrzeuganzahl ($a_{1/2_1}$) in Bezug auf die Züge ermittelt, die auf der Linie Nr. 1 aus der Endstation in Richtung der Startstation eingesetzt werden und weiterhin eine Fahrt auf der Linie Nr. 2 aus der Startstation in Richtung der Endstation leisten müssen. Die Fahrzeuganzahl bei einer Fahrt der Linie Nr. 2 ist von der Umlaufzeit (Streckeneigenschaft, Wendezeit, Reisegeschwindigkeit und Betriebsprogramm) bei einer Zugfahrt auf der Strecke der Linie Nr.1 und dem dargestellten Taktfahrplan der Linie Nr. 2 abhängig. Des Weiteren wird die Einsatzmöglichkeit eines Zuges innerhalb einer Fahrt hinsichtlich der geplanten Abfahrtszeit der Züge ab der Endstation (Linie Nr. 1) und Abfahrtszeit der Züge ab der Startstation (Linie Nr. 2) ($a_{2/2_1}$) geprüft. Die Darstellung eines Zuges der Linie Nr. 1 in der entsprechenden Fahrt auf Linie Nr. 2 ist möglich wenn:

$$t_{\text{Sab_2}} \geq 0,5 * t_{\text{Umlauf_1}} + t_{\text{Eab_1}} - (0,5 * t_{\text{Takt_2}} * a_{1/2_1}), \text{ dann } a_{2/2_1} = 0,$$

Andernfalls wird der Zug in der nächsten Fahrt eingesetzt, da

$$t_{\text{Sab_2}} < 0,5 * t_{\text{Umlauf_1}} + t_{\text{Eab_1}} - (0,5 * t_{\text{Takt_2}} * a_{1/2_1}), \text{ dann } a_{2/2_1} = 1.$$

Wobei:

$t_{\text{Sab_2}}$ = Abfahrtszeit der Züge ab der Startstation der Linie Nr. 2

$t_{\text{Eab_1}}$ = Abfahrtszeit der Züge ab der Endstation der Linie Nr. 1

$t_{\text{Umlauf_1}}$ = erforderliche Umlaufzeit des Zuges auf der ersten Strecke (Linie Nr. 1)

$t_{\text{Takt_2}}$ = Taktfahrplan der Züge auf der zweiten Strecke (Linie Nr. 2)

$a_{1/2_1}$ = Fahrzeuganzahl auf Linie Nr. 2 in Bezug auf die erforderliche Umlaufzeit der Linie Nr. 1

$a_{2/2_1}$ = Fahrzeuganzahl auf Linie Nr. 2 in Bezug auf die Abfahrtszeiten der Züge ab der Endstation der Linie Nr. 1 und der Startstation der Linie Nr. 2

Somit wird die gesamte Fahrzeuganzahl für eine Fahrt auf der Strecke der Linie Nr. 2 wie folgt ermittelt:

$$a_{\text{Zug_2_1}} = a_{1/2_1} + a_{2/2_1}$$

Durch diese Berechnung wird auch die erforderliche Fahrzeuganzahl der Linie Nr. 1 abhängig von dem Betriebsprogramm und dem Einsatz der Fahrzeuge auf die Linie Nr. 2 ermittelt. Somit erhält man vier Werte der Fahrzeuganzahl bei einer Fahrkombination zweier Linien. Zwei davon entsprechen der Fahrzeuganzahl, wenn die Fahrzeuge innerhalb ihrer eigenen Linie fahren. Die übrigen Werte entsprechen der Fahrzeuganzahl, sofern die Fahrzeuge einer Linie auf eine andere Linie ab der Startstation eingesetzt werden. Die gesamte Fahrzeuganzahl beider Linien wird nach der Entscheidung ermittelt, ob die Fahrzeuge auf einer bestimmten Linie fahren müssen oder die Fahrzeuge auf mehreren Linien fahren können. Mit dem ersten Zustand wird die gesamte Fahrzeuganzahl wie folgt ermittelt:

$$a_{\text{Zug-Netz}} = \sum a_{\text{Zug}/1} + a_{\text{Zug}/2}$$

Mit der Möglichkeit, dass die Fahrzeuge von einer Linie auf eine andere eingesetzt werden können, wird die erforderliche Fahrzeuganzahl wie folgt ermittelt:

$$a_{\text{Zug-Netz}} = \sum a_{\text{Zug}_{1_2}} + a_{\text{Zug}_{2_1}}$$

Wobei:

$a_{\text{Zug}_{1_2}}$ = Fahrzeuganzahl, die aus der zweiten Strecke in der ersten Strecke (Züge von Linie Nr. 2 auf Linie Nr. 1) eingesetzt werden

$a_{\text{Zug}_{2_1}}$ = Fahrzeuganzahl, die aus der ersten Strecke in die zweite Strecke (Züge von Linie Nr. 1 auf Linie Nr. 2) eingesetzt werden

Die Auswahl eines geeigneten Zuglaufwegs (auf einer oder zwei Strecken) erfolgt nach der Betrachtung des minimalen Werts (der erforderlichen Fahrzeuganzahl) beider Einsatzmöglichkeiten. Die Anforderungen der möglichen IST-Fahrzeuganzahl hinsichtlich des Betankungsprozesses, der Reichweite, des Energieverbrauchs und der Zugeigenschaften werden nach der Betrachtung der ersten Berechnungen, die die Zugfahrt auf einer Linie betreffen, ermittelt. Das ist erforderlich, da der Einsatz der Züge einer Linie auf anderen Linien in der Startstation, z. B. zentraler Bahnhof, stattgefunden hat und die Reichweite der Züge als reine Reichweite ab der Startstation betrachtet wird. Als Beispiel wird die erforderliche Fahrzeuganzahl zweier Linien mit folgenden Werten dargestellt (Tab. 7). In diesem Beispiel wird die erforderliche Fahrzeuganzahl zwischen Linie Nr. 1 und Linie Nr. 2 auf 1 herabgesetzt, um einen weiteren Einsatz der Züge auf beiden Linien mit kurzer Wendezeit zu ermitteln und damit die Züge aufgrund des Verhältnisses zwischen den Abfahrtszeiten in beiden Linien kein weiteres Fahrzeug ($a_{\text{Zug}_{2_1}}$ und $a_{\text{Zug}_{1_2}}$) erfordern.

Fahrzeuganzahl	Methode Nr. 1	Methode Nr. 2
$a_{\text{Zug}/1}$	6	6
$a_{\text{Zug}/2}$	6	6
$a_{\text{Zug}_{2_1}}$	5	5
$a_{\text{Zug}_{1_2}}$	5	5
Erforderliche Fahrzeuganzahl	6+6=12	5+5=10

Tab. 7: Erforderliche Fahrzeuganzahl zweier Linien eines Netzes

Durch die Untersuchung der beiden Einsatzphilosophien wird Folgendes festgestellt:

- Unter bestimmten Bedingungen ist der Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in beiden Einsatzphilosophien wirtschaftlich und betrieblich durchführbar.
- Alternative Antriebe sowie die erforderlichen zugehörigen Einzelheiten (wie Herstellung, Erzeugung und Speicherung) benötigen Entwicklungen. Mit Hilfe dieser Entwicklungen werden der Einsatz, der Betrieb und die Instandhaltung dieser Antriebe vereinfacht und wirtschaftlich.
- Zukünftig werden die Einsatzmöglichkeiten für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben in Einsatzphilosophie-B steigen, da die erforderliche Technik, die Herstellung und der Markt dieser Antriebe sowie ihrer zugehörigen Komponenten erweitert werden und damit ihre Kosten sinken werden.
- In den Entwicklungsländern stellt das Thema Umwelt bisher aufgrund der sozialen und wirtschaftlichen Notwendigkeiten (z. B. Wohnung, Trinkwasser, Ernährung sowie Transport und Elektrizität) keine Priorität dar. Durch den wirtschaftlichen Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben können lokale und globale Ziele des Umweltschutzes erreicht werden.

3.2 Die Haltestellen des Regionalverkehrs

Der Regionalverkehr sorgt für eine schnelle Regionalverbindung mit möglichst einer Anschlussverbindung zum Fernverkehr und/oder zum S-Bahnnetz. Die Untersuchung der Haltestellen erfolgt nach Betrachtung der Zuggattungen im Regionalverkehr und der Bedeutung der Haltestellen. Die Haltestellenbedeutung ist abhängig von der Fahrgastanzahl, der möglichen Anschlussverbindungen und den weiteren vorhandenen Verkehrsleistungen, die auf denselben Strecken verkehren. Unter Berücksichtigung dieser Parameter werden im Folgenden die Haltefunktionen des Regionalverkehrs ermittelt.

Die Entscheidung, ob ein Zug in bestimmten Haltestellen halten soll, wird nach Prüfung mehrerer Faktoren, die sich auch gegenseitig beeinflussen, getroffen. Was die Haltefunktion betrifft, so werden die Haltestellen einer Linie zunächst in zwei Gruppen geteilt. Die erste Gruppe entspricht einer festen Haltefunktion der Linie. Darunter fallen Stationen mit einer Anschlussverbindung zum Fernverkehr, zu einer Neben-Linie, zum zentralen S-Bahnhof oder Haltestellen bzw. Stationen, die zwei sich kreuzende Regionalverkehrslinien verbinden. Unter sich kreuzenden Regionallinien wird auch die Anschlussverbindung zwischen Zügen verstanden. Mit diesen Verbindungsmöglichkeiten werden die weiteren Faktoren, die die Haltemöglichkeit in einer Haltestelle beeinflussen, nicht weiter betrachtet. In der Regel gehören die Start- und Zielhaltestellen einer Linie ebenfalls dieser Gruppe an.

Die zweite Gruppe setzt sich aus den Haltestellen zusammen, die die Anforderungen der ersten Gruppe nicht erfüllen. Ein Halt ist hierbei zeitlich und räumlich beeinflusst und wird von den benachbarten Haltestellen derselben Linie bewirkt. Als zeitlicher Faktor wird die Anzahl der Bahnstufennutzer (Fahrgastnachfrage) definiert. In dieser Arbeit werden mit der Fahrgastanzahl einer Haltestelle die sie nutzenden Personen pro Tag bezeichnet.

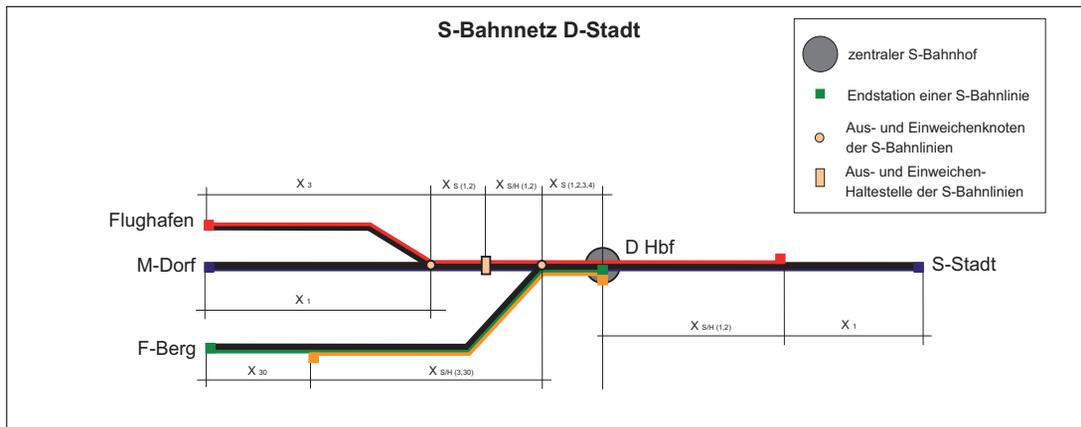


Abb. 20: Segmentierung des S-Bahnnetzes D-Stadt

Ein Streckensegment wird durch die Verbindung der Kennzeichen definiert. Als Beispiel für die Segmentierung wird das S-Bahnnetz D-Stadt verwendet (Abb. 20). In diesem Netz fahren die Züge der S-Bahnlinien auf einzelnen und gemeinsamen Streckenabschnitten. Während der Segmentierung werden nur neun Streckenabschnitte betrachtet, wovon vier der jeweiligen Streckenabschnitte von Zügen einer S-Bahnlinie benutzt werden. Ziel der Segmentierung ist es, die verschiedenen Streckenabschnitte und ihre zugehörigen Elemente innerhalb eines Netzes als einen Abschnitt zu analysieren, da die Fahrplankonstruktion und die Dichte der Züge innerhalb des jeweiligen Segments konstant sind und die Änderungen des Fahrplans damit nur in dem nächsten Segment des Netzes entstehen werden. Somit werden die vorgeschlagene Änderung der Fahrweise und der Fahrgeschwindigkeit innerhalb des gesamten Segments durchgeführt. Dies ermöglicht eine bessere Darstellung des Netzes. Weiterhin werden die Verbindungen für die Ermittlung des möglichen Einsatzes von Zügen innerhalb des Netzes verwendet. Hier werden die Anzahl der Fahrten pro Tag, die Anzahl der Halbfahrten (von der Endstation bis zum zentralen Bahnhof) pro Tag, die gesamten Leistungen und Eigenschaften der fahrenden Züge sowie die Abfahrtszeiten der ersten Züge des nächsten Einsatztages betrachtet (s. Kapitel 2.3). Auf diese Weise wird die erforderliche Mindestfahrzeuganzahl eines Netzes für das gesamte Betriebsprogramm eines Tages ermittelt.

4.2.3 Auswahl eines Antriebssystems und eines Betriebsprogramms

Die Modellierung erfolgt für die Auswahl eines Antriebssystems und die Auswahl eines Betriebsprogramms mit bestimmter Fahrzeuganzahl. In der Modellierung werden die Streckenlänge, die Reisezeit und der Energieverbrauch der Fahrten (Linie) als erforderliche Werte genannt und untersucht. Die Auswahl eines Antriebssystems ist von dem Anteil der elektrifizierten Streckenabschnitte im Verhältnis zu der gesamten untersuchten Strecke abhängig.

Weiter beeinflussen die gesamten Fahrten der Fahrzeuge innerhalb eines Einsatztages und die gesamten Fahrten der Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls die Auswahl eines Antriebssystems. Zudem wird die Auswahl beeinflusst durch die Verteilung der gesamten Fahrten, die daraus resultierenden Belastungen (Betriebsstunden und Energieverbrauch) innerhalb eines Einsatztages und innerhalb eines gesamten Umlaufs sowie die Fahrzeuganzahl im Netz.

Für die Feststellung eines Zugverlaufs innerhalb eines Einsatztages spielt die Fahrzeuganzahl des Betriebsprogramms eine wichtige Rolle. Dabei wird untersucht, wie viele und welche Fahrten jedes Fahrzeug innerhalb eines Einsatztages durchführt und welchen Umlaufplan jedes Fahrzeug aufweist. Die Ermittlung dieser Werte erfolgt nach Betrachtung des Betriebsprogramms, der Abfahrts- und Ankunftszeit der Fahrzeuge, der erforderlichen Wendezeiten und des Systems der Fahrzeugantriebe im Netz (s. Kapitel 2.3).

Durch die Feststellung der erforderlichen Fahrten der Fahrzeuge werden die Streckenlänge, die Reisezeit und der Energieverbrauch jeder Zugfahrt innerhalb eines Einsatztages ermittelt. Dadurch kann bestimmt werden, ob die Züge während der Einsatzzeit tanken müssen, oder ob für alle Züge erst am Ende eines Einsatztages der Tankvorgang erforderlich wird.

Ist ein Tanken während des Tages erforderlich, so soll der erforderliche Tankvorgang bei der Einsatzplanung entsprechend berücksichtigt werden. Dadurch wird der Bedarf an zusätzlichen Fahrzeugen aufgrund des Tankvorgangs minimal gehalten (s. Kapitel 2.3 Abb. 7). Auch werden die Belastungen der Antriebskomponenten untersucht. Diese werden nach Betrachtung des Energieverbrauchs und der Betriebsstunden ermittelt. Dadurch können erforderliche Inspektionen, Instandhaltungen und Wartungen bestimmt werden und ihre Wirkungen auf die gesamten Betriebskosten werden abhängig von den Eigenschaften der Antriebe festgestellt.

Bei Betriebsschluss enden die Züge in unterschiedlichen Stationen (End- oder Startstation). Einige Züge enden dort, wo sie bei Beginn des Einsatztages waren und können somit jeden Tag denselben Verlauf wiederholen. Andere Züge weisen andere Endstationen auf. Daher werden diese Züge am nächsten Einsatztag mit einem oder mehreren Fahrzeugen in ihrem Verlauf ausgetauscht oder müssen zu ihrer Startstation zurückgefahren werden (Leerfahrt). Leerfahrten werden als mögliche Lösung gestattet, wenn dadurch wirtschaftliche sowie betriebliche Vorzüge erzielt werden können.

Daher werden die Fahrzeuge eines Netzes in verschiedene Umläufe eingeteilt. Diese Einteilung ist von der Anzahl der erforderlichen Einsatztage und von der Anzahl der Fahrzeuge der jeweiligen Gruppe, zwischen denen der Austausch von Fahrten durchgeführt werden kann, abhängig. Um einen Austausch zwischen verschiedenen Umläufen durchzuführen, müssen sich die Fahrzeuge in einer gemeinsamen Station befinden. In Abb. 21 werden die erforderlichen Einsatztage dargestellt, damit in einem Netz die Fahrzeuge verschiedener Gruppen einen gesamten Umlauf durchführen können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **Prof. Dr. Ackermann, Kurt; Glowienka, Andreas; Heinemann, Reinhard W. u. a.**
„City-Tunnel Leipzig. Chronik einer Eisenbahnverbindung vom 19. bis zum 21. Jahrhundert“
Strom & Strom, 2004, Leipzig, ISBN 3-9807618-4-3
- [2] **Bahls, Michael**
„Die Hannover-Altenbekener Eisenbahn“
2006, Kenning, Nordhorn, ISBN 3-927587-77-X
- [3] **Dr. Breimeier, Rudolf**
„Wirtschaftliche Aspekte des Eisenbahnschnellverkehrs“
Vorlesung im Kurs „Einsatzfelder des Schienenverkehrs“, Oktober 2005, Hannover
- [4] **Bundesarbeitsgemeinschaft Schienenpersonennahverkehr (BAGSPNV)**
„Die Finanzierung des SPNV sichernachhaltige Mobilität ermöglichen“
17. Juni 2010, Berlin
- [5] **Bundesministerium der Justiz**
Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)
www.bundesrecht.juris.de
- [6] **Chandler, Kevin; Eudy, Battelle Leslie**
„Fuel Cell Transit Buses: Preliminary Evaluation Results“
Technical Report, Februar 2007, NREL/TP-560-41041
- [7] **Deutsches Verkehrsforum**
„Elektromobilität“
Lenkungskreis, Straßenverkehr im deutschen Verkehrsforum
Technologien fördern – Chance nutzen – Nachhaltigkeit Sichern
Oktober 2009

