

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Christoph Kühn

Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen



Scientific
Publishing

Christoph Kühn

**Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen
in Nahverkehrssystemen**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 66**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen

von
Christoph Kühn

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2017
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0740-6

DOI 10.5445/KSP/1000077162

Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Wi.-Ing. Christoph Kühn
aus Offenburg

Tag der mündlichen Prüfung:

23. Juni 2017

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Vorwort des Herausgebers

Schienegebundene Nahverkehrssysteme transportieren täglich viele Millionen Menschen. Sie prägen die Stadtbilder auf der ganzen Erde und gewährleisten die Mobilität der Menschen in den großen Ballungszentren. Für eine nachhaltige und wirtschaftliche Mobilität ist das Energiemanagement ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Hier gibt es noch großen Forschungsbedarf, da kaum Daten vorliegen, wie energieeffizient diese komplexen Systeme sind. Bremsen die Fahrzeuge, wandeln sie kinetische Energie in elektrische Energie um. Im Idealfall kann diese Energie über das Fahrleitungsnetz an andere Fahrzeuge verteilt werden, allerdings nur, wenn der Bedarf zur gleichen Zeit und in örtlicher Nähe besteht. Andernfalls verpufft sie nutzlos als Wärme in den Bremswiderständen. Das ist nicht akzeptabel in einer Zeit, in der wir alle gehalten sind, sparsam mit Energie umzugehen. Als Abhilfe sind hier Energiespeicher ein viel diskutiertes Thema. Jedoch gibt es keine verlässlichen Aussagen darüber, welchen Nutzen sie haben, wie groß sie dimensioniert sein müssen oder wie viele von ihnen im Netz benötigt werden. Hinzu kommt, dass sich die innerstädtischen Verkehrssysteme erheblich voneinander unterscheiden, so dass pauschal keine Aussagen getroffen werden können. Zudem stehen bislang nahezu keine Informationen zur Verfügung, welchen Einfluss die einzelnen Systemkomponenten auf die Gesamtenergieeffizienz haben.

In dieser Arbeit wird ein Analysewerkzeug entwickelt, das die Komplexität beliebiger Nahverkehrssysteme gesamtheitlich abbilden und die relevanten energetischen Größen untersuchen kann. Dazu werden die Fahrspiele der einzelnen Fahrzeuge simuliert und die Energieflüsse im elektrischen Netz berechnet. Hiermit wird aufgezeigt, welches Potenzial besteht, die Energiebilanz im städtischen Bahnverkehr zu optimieren.

Karlsruhe, im September 2017

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld, dem Inhaber des Lehrstuhls für Bahnsystemtechnik, für das entgegengebrachte Vertrauen, seine Unterstützung sowie für die Übernahme des Hauptreferats. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die freundliche Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Golder bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Kollegen des Instituts sei für die angenehme Arbeitsatmosphäre und Zusammenarbeit gedankt. Hervorheben möchte ich dabei Marco Eller, Stefan Hartmann und Philip Otto, die mir wertvolle Hinweise zu dieser Arbeit gegeben haben. Steffen Kölling danke ich für die Erwähnung meines Namens in der Danksagung seiner Dissertation und Ivana Kramer für die vielfältige Hilfe.

Zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf unterschiedliche Weise über die ganzen Jahre unterstützt haben, meinen Dank aussprechen.

Karlsruhe, im Juni 2017

Christoph Kühn

Kurzfassung

Straßen-, Stadt-, U- und S-Bahnen sind schienengebundene und gleichstromgespeiste Nahverkehrssysteme, die in den wachsenden Metropolregionen einen wichtigen Grundpfeiler der modernen Verkehrsinfrastruktur darstellen. Die Energieeffizienz solcher Systeme rückt aus ökologischen und ökonomischen Gründen weiter in den Fokus. Eine wichtige Fragestellung ist daher die quantitative Untersuchung des Systemenergieverbrauchs. Dazu müssen alle relevanten infrastruktur-, fahrzeug- und betriebsbezogenen Systemzusammenhänge berücksichtigt werden. Hierfür wird ein Simulationsprogramm in der Programmiersprache C# entwickelt. Die Eingabe erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, mit der beliebige Nahverkehrssysteme definiert werden können. Das Strecken- und Leitungsnetz sowie die Fahr- und Umlaufpläne lassen sich individuell anpassen. Der Simulationsablauf erfolgt im Zeitschrittverfahren in Form einer gekoppelten Fahrspiel- und Energieflussberechnung, deren Ausgabewerte in einer Datenbank abgespeichert werden. Am Beispiel des Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetzes werden 16 Simulationsszenarien analysiert, in denen jeweils unterschiedliche Maßnahmen zur Optimierung der Energiebilanz durchgeführt werden. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Szenarien werden gegenübergestellt und detailliert ausgewertet.

Abstract

Trams, urban, underground, and suburban trains are rail-bound, local, direct current-based transport systems that constitute an important pillar of modern transport infrastructure in growing metropolitan areas. For ecological and economic reasons, special attention is paid to the energy balance of these systems. In particular, the systems' energy consumption has to be investigated quantitatively. For this purpose, all relevant infrastructural, vehicle-related, and operating contexts have to be considered. To this end, a simulation software is developed in the C# programming language. Data input takes place via a graphical user interface, thus defining arbitrary local transport systems. The railway and supply network as well as the schedule and working timetables can be adapted individually. The simulation is implemented in a time-stepping process in the form of a coupled computation of driving cycles and energy flows, whose output values are stored in a database. With the tram and urban railway network of Karlsruhe being used as an example, 16 simulation scenarios with different measures for energy optimization are analysed. The simulation results of the scenarios are compared and evaluated in detail.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	i
Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract.....	vii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Elektrifizierte Schienennetze	2
1.1.2 Öffentlicher Personennahverkehr	3
1.2 Hintergrund	8
1.2.1 Gleichstromnahverkehrsnetze	8
1.2.2 Energiespeicher	12
1.3 Aufgabenstellung	19
1.3.1 Problemstellung und Zielsetzung	19
1.3.2 Aufbau und Inhalt der Arbeit	25
2 Netzmodellierung.....	27
2.1 Verkehrsnetz.....	27
2.1.1 Verkehrsknoten	29
2.1.2 Verkehrskanten	34
2.2 Versorgungsnetz.....	40
2.2.1 Versorgungsknoten	41
2.2.2 Versorgungsleitungen	43
2.3 Fahrpläne	50
2.3.1 Fahrplantabelle.....	51
2.3.2 Fahrwegbestimmung	54

2.3.3	Fahrgastaufkommen.....	57
2.4	Umlaufpläne.....	60
2.4.1	Umlaufplantabelle	60
2.4.2	Umlaufplanaufträge.....	64
2.5	Lichtsignale.....	67
2.5.1	Signalanmeldung.....	67
2.5.2	Signalsteuerung	72
3	Fahrspielberechnung	79
3.1	Netzsimulation	79
3.1.1	Programmparameter	80
3.1.2	Programmablauf	83
3.2	Fahrzustände	86
3.2.1	Inaktiver Fahrzustand	87
3.2.2	Aktiver Fahrzustand	90
3.3	Fahrermodell.....	95
3.3.1	Hinderniserkennung	95
3.3.2	Folgeabstand und Relativgeschwindigkeit	99
3.3.3	Wunschbeschleunigung	109
3.3.4	Fahrverhalten.....	118
3.4	Fahrzeugmodell	123
3.4.1	Fahrwiderstände.....	123
3.4.2	Traktionssystem	128
3.4.3	Leistungsverteilung.....	139
4	Energieflussberechnung.....	151
4.1	Netzberechnung	151
4.1.1	Netzgleichungen	151
4.1.2	Newton-Raphson-Verfahren	156
4.1.3	Energieflüsse.....	163
4.2	Netzwerkkomponenten	168
4.2.1	DC-Netz	168
4.2.2	Unterwerke	171
4.2.3	Speicher.....	178

4.2.4	Anlagen	183
4.2.5	Fahrzeuge	186
4.3	Berechnungsablauf	191
4.3.1	Knotenleitwertmatrix	192
4.3.2	Knotenmodifikationsverfahren	196
4.4	Energiebilanz	201
4.4.1	Systembilanz	202
4.4.2	Fahrzeugbilanz	205
5	Simulationsergebnisse	211
5.1	Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetz	211
5.1.1	Netzbeschreibung	211
5.1.2	Simulationsszenarien	220
5.2	Analyse	224
5.2.1	Systemuntersuchung	224
5.2.2	Fahrzeuguntersuchung	235
5.2.3	Netzuntersuchung	242
5.2.4	Speicheruntersuchung	253
6	Zusammenfassung und Ausblick	263
A	Anhang	269
A.1	Programmierung	269
A.1.1	.NET-Framework (C# und WPF)	269
A.1.2	Grafische Netzgestaltung	271
A.1.3	Stochastische Einflüsse	281
A.2	Mechanische Grundlagen	283
A.2.1	Fahrkinematik	283
A.2.2	Fahrdynamik	288
A.3	Elektrotechnische Grundlagen	291
A.3.1	Gleichstrom	291
A.3.2	Leitungsmodell	296
A.3.3	Netzwerkanalyse	299

Abbildungsverzeichnis 303
Tabellenverzeichnis 309
Literaturverzeichnis 311

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
A	Alpha-Knoten
a	Anno (Jahr)
abs	Absolutwert
AC	Wechselstrom
AKKU	Akkumulator
AL	Anschlussliste (Dijkstra-Algorithmus)
AI	Anlage
anf	Anfang, Start
AT	Alpha-Knotentor
AVG	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft
B6	Sechspulsschaltung
B12	Zwölfpulsschaltung
BA	Bremsabstand
BOStrab	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung
BST	Bahnsystemtechnik
const	konstant
CPU	Central Processing Unit
DB	Deutsche Bahn
DC	Gleichstrom
DL	Distanzliste (Dijkstra-Algorithmus)
DSK	Doppelschichtkondensator
DV	Direktverbindung
E	Endstationsknoten
Eb	Elektrisches Bremsen
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

EFP	Energieflussproblem
end	Ende, Ziel
Es	Netzspeicher (stationärer Energiespeicher)
ET	Eingangstor einer signalgesteuerten Kreuzung
EUR	Euro (Währung)
F	Fahrleitungsknoten
FIFO	First In First Out
FL	Fahrleitung
Fz	Fahrzeug
FzAl	Fahrzeuanlage (Fahrzeughilfsbetriebe)
FzEs	Fahrzeugspeicher (mobiler Energiespeicher)
GB	Gigabyte
GLS	Gleichungssystem
GPU	Graphics Processing Unit
GT6-70D/N	Niederflurgelenktriebwagen mit sechs Achsen
GT8-80D/M	Mittelflurgelenktriebwagen mit acht Achsen
GUI	Graphical User Interface
H	Haltestelle
IEE	Institution of Electrical Engineers
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IET	Institution of Engineering and Technology
K	Kreuzungsknoten
Kfz	Kraftfahrzeug
KM	Knotenmodifikation
KS	Knotensteuerung (Signal)
KVV	Karlsruher Verkehrsverbund
LE	Leiterelement
LG	Leitergruppe
Li-Ion	Lithium-Ionen
lim	Grenzwert
LT	Linkes Ausgangstor einer signalgesteuerten Kreuzung
max	Maximum

Mb	Mechanisches Bremsen
min	Minimum
MT	Mittleres Ausgangstor einer signalgesteuerten Kreuzung
MVVM	Model-View-ViewModel
n. def.	nicht definiert
neg	negativ
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NK	Nullknoten
NR	Newton-Raphson
NWS	Negative Wahrnehmungsschwelle
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pb	Blei
pos	positiv
PWS	Positive Wahrnehmungsschwelle
RA	Risikoabstand
RT	Rechtes Ausgangstor einer signalgesteuerten Kreuzung
SA	Sicherheitsabstand
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SFB	Signalfreigabebedingung
Sg	Signal
SI	Internationales Einheitensystem
sim	Simulation
SK	Speisekabel
SMS	Schwungmassenspeicher
SQL	Structured Query Language
Sys	System
Uw	Unterwerk
XAML	Extensible Application Markup Language
XML	Extensible Markup Language
VBK	Verkehrsbetriebe Karlsruhe
VL	Vorgängerliste (Dijkstra-Algorithmus)

WA	Wunschabstand
WPF	Windows Presentation Foundation
Z	Omega-Knoten
ZT	Omega-Knotentor

Formelzeichen

<i>A</i>	Flächeninhalt	[m ²]
<i>a</i>	Beschleunigung	[m/s ²]
<i>b</i>	Breite	[m]
<i>C</i>	Kapazität	[F]
<i>d</i>	Abstand	[m]
<i>E</i>	Energie	[W·s]
<i>e</i>	Eulersche Zahl	[-]
<i>F</i>	Kraft	[N]
<i>f</i>	Frequenz	[Hz]
<i>G</i>	Leitwert	[S]
<i>g</i>	Gravitationsbeschleunigung	[m/s ²]
<i>h</i>	Höhe	[m]
<i>I</i>	Stromstärke	[A]
<i>L</i>	Induktivität	[H]
<i>l</i>	Länge	[m]
<i>M</i>	Drehmoment	[N·m]
<i>m</i>	Masse	[kg]
<i>P</i>	Leistung	[W]
<i>Q</i>	Elektrische Ladung	[C]
<i>R</i>	Widerstand	[Ω]
<i>s</i>	Weg	[m]
<i>T</i>	Temperatur	[K]
<i>t</i>	Zeit	[s]
<i>U</i>	Spannung	[V]
<i>v</i>	Geschwindigkeit	[m/s]

W	Arbeit	[J]
x	x-Koordinate	[m]
y	y-Koordinate	[m]
α	Winkelbeschleunigung	[rad/s ²]
Θ	Massenträgheitsmoment	[kg·m ²]
μ	Erwartungswert der Normalverteilung	[-]
π	Kreiszahl	[-]
ρ	Luftdichte	[kg/m ³]
σ	Standardabweichung der Normalverteilung	[-]
φ	Winkel	[rad]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
\wedge	Logische Konjunktion (Und)	[-]
\vee	Logische Disjunktion (Oder)	[-]
\neg	Logische Negation (Nicht)	[-]

Programmparameter

$a_{abs,min}^*$	Gefahrenverzögerung	[m/s ²]
A_{Fz}	Fahrzeugstirnfläche	[m ²]
a_{Fz}	Fahrzeugbeschleunigung	[m/s ²]
a_{Fz}^*	Fahrzeugwunschbeschleunigung	[m/s ²]
a_i^*	Fahrerwunschbeschleunigung	[m/s ²]
A_L	Leitungsquerschnittsfläche	[m ²]
A_{LE}	Leiterelementquerschnitt	[mm ²]
$a_{neg,anf}^*$	Wunschanfangsverzögerung	[m/s ²]
$a_{neg,max}$	Oberer Schwellenwert für $a_i^* < 0$	[m/s ²]
$a_{neg,min}^*$	Wunschendverzögerung	[m/s ²]
a_{neg,v_i}^*	v_i -abh. Wunschverzögerung	[m/s ²]
$a_{neg,\alpha}^*$	Wunschverzögerung für $v > v_i^*$	[m/s ²]
$a_{neg,\Delta s}^*$	Δs -abh. Wunschbeschleunigung in Zone 3	[m/s ²]
$a_{pos,end}^*$	Wunschendbeschleunigung bei $v_{Fz,max}$	[m/s ²]
$a_{pos,max}^*$	Wunschendbeschleunigung	[m/s ²]

$a_{pos,min}$	Unterer Schwellenwert für $a_i^* > 0$	[m/s ²]
a_{pos,v_i}^*	v_i -abh. Wunschbeschleunigung in Zone 6b/7b	[m/s ²]
$a_{pos,Z6}^*$	v_i -, Δs -abh. Wunschbeschleunigung in Zone 6a	[m/s ²]
$a_{pos,Z7}^*$	v_i -, Δv -abh. Wunschbeschleunigung in Zone 7a	[m/s ²]
$a_{pos,\alpha}^*$	Wunschbeschleunigung für $v < v_i^*$	[m/s ²]
A_T	Tunnelquerschnittsfläche	[m ²]
b_j	Hindernisbreite	[m]
C'_0	Leitungskapazitätsbelag	[F/m]
c_{AZ}	y-Achsenabschnitt der Geraden AZ	[m]
$c_{Fz,L}$	Fahrzeugluftwiderstandsbeiwert	[-]
$c_{Fz,R}$	Fahrzeugrollwiderstandsbeiwert	[%o]
$c_{Fz,T}$	Fahrzeugtunnelwiderstandsbeiwert	[-]
c_{NWS}	Scheitelparameter der NWS	[m/s]
c_{PWS}	Scheitelparameter der PWS	[m/s]
d_0	Stillstandsabstand	[m]
$d_{0,Fz}$	Stillstandsabstand zum mobilen Hindernis	[m]
$d_{1D,min}$	1D-Knotenmindestabstand	[m]
$d_{2D,min}$	2D-Knotenmindestabstand	[m]
d_{AZ}	Euklidischer Abstand der Geradenpunkte A, Z	[m]
$d_{F,g}$	Fahrbahngleisabstand	[m]
$d'_{F,g}$	Verlängerter Fahrbahngleisabstand	[m]
$d_{Fz,b}$	Fahrzeugschienenspurweite	[m]
$d_{Fz,c}$	Fahrzeugdrehgestellachsabstand	[m]
D_K	2D-Knotendurchmesser	[m]
D_L	Leitungsdurchmesser	[m]
$d_{Sg,\Delta s}$	Signalmeldepunktentfernung	[m]
\vec{e}_{AZ}	Einheitsvektor der Geraden AZ	[m]
\vec{e}_{AZ}^\perp	Einheitsnormale der Geraden AZ	[m]
E_{Es}	Stationäre Speicherenergie (Netzspeicher)	[W·s]
$E_{Es,lim}$	Netzspeicherkapazität	[W·s]
E_{FzEs}	Mobile Speicherenergie (Fahrzeugspeicher)	[W·s]
$E_{FzEs,lim}$	Fahrzeugspeicherkapazität	[W·s]

E_{FzTr}	Kinetische und potenzielle Fahrzeugenergie	[W·s]
$E_{FzTr,kin}$	Fahrzeugbewegungsenergie	[W·s]
$E_{FzTr,pot}$	Fahrzeuglageenergie	[W·s]
E_{Sys}	Systemenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Al,V}$	Anlagenverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Al,X}$	Anlagenerzeugerenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Al,Y}$	Anlagenverbraucherenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,dc,V}$	Netzverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Es,ab}$	Netzspeicherentladeenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Es,V}$	Netzspeicherverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Es,zu}$	Netzspeicherladeenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Fz,eig}$	Fahrzeugeigenbedarfsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Fz,intern}$	Fahrzeuginterne Energie	[W·s]
$E_{\Sigma,Fz,neg}$	Fahrzeugangebotsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Fz,pos}$	Fahrzeugnachfrageenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzAl,V}$	Fahrzeughilfsbetriebeverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzAl,Y}$	Fahrzeughilfsbetriebeverbraucherenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzDc,aus}$	Fahrzeugnetzausgangsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzDc,ein}$	Fahrzeugnetzeingangsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzEb,V}$	Fahrzeugwiderstandsbremsverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzEs,ab}$	Fahrzeugspeicherentladeenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzEs,V}$	Fahrzeugspeicherverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzEs,zu}$	Fahrzeugspeicherladeenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzFw,V}$	Fahrzeugfahrwiderstandsverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzMb,V}$	Fahrzeugreibungsbremsverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzTr,ab}$	Fahrzeugrekuperationsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzTr,zu}$	Fahrzeugakkumulationsenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,FzTrS,V}$	Fahrzeugtraktionssystemverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Uw,V}$	Unterwerksverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Uw,X}$	Unterwerkseinspeiseenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Uw,Y}$	Unterwerksrückspeiseenergie	[W·s]
$E_{\Sigma,Sys,ab}$	Systemabnahmeenergie	[W·s]

$E_{\Sigma, Sys, V}$	Systemverlustenergie	[W·s]
$E_{\Sigma, Sys, X}$	Systemeinfuhrenergie	[W·s]
$E_{\Sigma, Sys, Y}$	Systemausfuhrenergie	[W·s]
$E_{\Sigma, Sys, zu}$	Systemzunahmeenergie	[W·s]
f_F	Fahrbahnlängenkompensationsfaktor	[-]
F_{FzFW}	Fahrzeuffahrwiderstandskraft	[N]
F_{FzFW}^*	Fahrzeuffahrwunschfahrwiderstandskraft	[N]
$F_{FzFW, a}$	Fahrzeuffahrbeschleunigungswiderstand	[N]
$F_{FzFW, a}^*$	Fahrzeuffahrbeschleunigungswunschwiderstand	[N]
F_{FzFW, a_r}	Fahrzeuffahrgrotationswiderstand	[N]
F_{FzFW, a_t}	Fahrzeuffahrgtranslationswiderstand	[N]
$F_{FzFW, K}$	Fahrzeuffahrgkurvenwiderstand	[N]
$F_{FzFW, L}$	Fahrzeuffahrgluftwiderstand	[N]
$F_{FzFW, R}$	Fahrzeuffahrgrollwiderstand	[N]
$F_{FzFW, S}$	Fahrzeuffahrgsteigungswiderstand	[N]
$F_{FzFW, T}$	Fahrzeuffahrgtunnelwiderstand	[N]
$F_{FzFW, V}$	Fahrzeuffahrgverlustfahrwiderstände	[N]
$F_{FzMb, min}$	Minimale mechanische Fahrzeuffahrgbremskraft	[N]
$F_{FzMb, V}$	Mechanische Fahrzeuffahrgbremskraft	[N]
F_{FzTr}	Fahrzeuffahrgtraktionskraft	[N]
$F_{FzTr, gen}$	Elektrische Fahrzeuffahrgbremskraft	[N]
$F_{FzTr, max}$	Maximale elektrische Fahrzeuffahrgantriebskraft	[N]
$F_{FzTr, min}$	Minimale elektrische Fahrzeuffahrgbremskraft	[N]
$F_{FzTr, mot}$	Elektrische Fahrzeuffahrgantriebskraft	[N]
$F_{FzTr, neg}$	Untere elektrische Fahrzeuffahrgbremskraftgrenze	[N]
$F_{FzTr, pos}$	Obere elektrische Fahrzeuffahrgantriebskraftgrenze	[N]
F_G	Gewichtskraft	[N]
F_N	Normalkraft	[N]
$f_{n, Fg}$	Horizontaler Fahrgastwechselzeitreferenzpunkt	[-]
f_P	Knotenleistungsfaktor	[-]
$f_{P, min}$	Untere Knotenleistungsfaktorgrenze	[-]
F_R	Reibungskraft	[N]

f_S	Panelskalierungsfaktor	[-]
$f_{t,FG}$	Vertikaler Fahrgastwechselzeitreferenzpunkt	[-]
f_{v^*}	Richtgeschwindigkeitseinhaltungsfaktor	[-]
$f_{\alpha,max}$	Oberer Ausrollfaktor für v_i^*	[-]
$f_{\alpha,min}$	Unterer Ausrollfaktor für v_i^*	[-]
$F_{\mu_H,neg}$	Untere Kraftschlussgrenze	[N]
$F_{\mu_H,pos}$	Obere Kraftschlussgrenze	[N]
f_τ	Verspätungsfaktor	[-]
$f_{\tau,max(1)}$	Maximaler Referenzfaktor für a_i^* bei $\tau_{pos(1)}$	[-]
$f_{\tau,min(2)}$	Minimaler Referenzfaktor für a_i^* bei $\tau_{neg(2)}$	[-]
G'_0	Leitungsableitungsbelag	[S/m]
G_{kk}	Umlaufleitwert für Knoten k	[S]
G_{km}	Leitungsleitwert zwischen Knoten k und m	[S]
G_L	Leitungsleitwert	[S]
G'_L	Leitungsleitwertbelag	[S·m]
$G'_{L,1}$	Leitwertbelag für den Hinleiter	[S·m]
$G'_{L,2}$	Leitwertbelag für den Rückleiter	[S·m]
$G_{L,max}$	Maximaler Leitungsleitwert	[S]
$G_{L,min}$	Minimaler Leitungsleitwert	[S]
g_S	Steigungsgrad	[%]
h_j	Hindernishöhe	[m]
$[I]$	Knotenstromvektor	[A]
I_{dc}	Knotenstrom	[A]
I_k	Knotenstrom für Knoten k	[A]
I_{kk}	Belastungsknotenstrom für Knoten k	[A]
I_{km}	Zweigstrom zwischen Knoten k und m	[A]
$I_{UW,N}$	Unterwerksnenngleichstrom	[A]
$[J]$	Jacobi-Matrix	[A]
k_{FG}	Wachstumskonstante der Fahrgastwechselzeit	[-]
k_{NWS}	Krümmungsparameter der NWS	[1/(m·s)]
k_{PWS}	Krümmungsparameter der PWS	[1/(m·s)]
k_T	Tunnelversperrungskoeffizient	[-]

$[L]$	Links-untere Dreiecksmatrix	[-]
l_F	Fahrbahnlänge	[m]
l_{Fz}	Fahrzeuglänge	[m]
L_h	Hauptinduktivität (Transformator)	[H]
l_j	Hindernislänge	[m]
l_K	Kantenlänge	[m]
l_L	Leitungslänge	[m]
L'_L	Leitungsinduktivitätsbelag	[H/m]
l_{SK}	Speisekabellänge	[m]
L_σ	Streuinduktivität (Transformator)	[H]
m_{AZ}	Steigung der Geraden <i>AZ</i>	[-]
m_{Fg}	Fahrgastgewicht	[kg]
m_{Fz}	Fahrzeugleergewicht	[kg]
$m_{Fz,ges}$	Fahrzeuggesamtmasse	[kg]
$m_{Fz,rot}$	Beschleunigte Fahrzeugdrehmasse	[kg]
m_{FzEs}	Fahrzeugspeichergewicht	[kg]
n_{Al}	Anlagenanzahl	[-]
n_E	Endstationsknotenanzahl	[-]
n_{EK}	Elektrische Knotenanzahl	[-]
n_{Es}	Netzspeicheranzahl	[-]
n_F	Fahrleitungsknotenanzahl	[-]
n_{F1}	Einspeisepunkteanzahl	[-]
n_{F2}	Streckentrenneranzahl	[-]
n_{Fg}	Fahrgastanzahl	[-]
$n_{Fg,max}$	Maximale Fahrgastanzahl	[-]
$n_{FL,Fz}$	Fahrzeuganzahl einer Fahrleitung	[-]
$n_{FL,G}$	Teilstückanzahl einer Fahrleitung	[-]
n_{Fz}	Fahrzeuganzahl	[-]
$n_{FzFg,max}$	Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs	[-]
n_{IK}	Innere Kantenanzahl einer Kreuzung	[-]
n_K	Kreuzungsknotenanzahl	[-]
n_{LE}	Leiterelementanzahl	[-]

n_{LG}	Leitergruppenanzahl	[-]
$n_{SK,max}$	Maximale Speisekabelanzahl je U_w , E_s , Al	[-]
n_T	Knotentoranzahl eines 2D-Knotens	[-]
$n_{T,max}$	Maximale Knotentoranzahl pro 2D-Knoten	[-]
n_{Uw}	Unterwerksanzahl	[-]
$n_{\Delta t}$	Simulationszeitschrittzahl	[-]
p	Verkehrsdichte	[Fz/m]
$[P]$	Knotenleistungsvektor	[W]
$P_{Al,V}$	Anlagenverlustleistung	[W]
$P_{Al,X}$	Anlagenerzeugerleistung	[W]
$P_{Al,Y}$	Anlagenverbraucherleistung	[W]
P_{AlDc}	Anlagennetzleistung	[W]
$P_{AlDc,aus}$	Anlagennetzaugangsleistung	[W]
$P_{AlDc,ein}$	Anlagennetzeingangsleistung	[W]
P_{dc}	Knotennetzleistung	[W]
$P_{dc,aus}$	Netzausgangsleistung	[W]
$P_{dc,ein}$	Netzeingangsleistung	[W]
$P_{dc,V}$	Netzverlustleistung	[W]
$P_{Es,ab}$	Speicherabnahmeleistung (Entladen)	[W]
$P_{Es,V}$	Speicherverlustleistung	[W]
$P_{Es,zu}$	Speicherzunahmeleistung (Laden)	[W]
P_{EsDc}	Speichernetzleistung	[W]
$P_{EsDc,aus}$	Speichernetzaugangsleistung	[W]
$P_{EsDc,ein}$	Speichernetzeingangsleistung	[W]
$P_{EsDc,inf}$	Untere Speicherknotenleistungsgrenze	[W]
$P_{EsDc,max}$	Maximale Speichernetzaugangsleistung	[W]
$P_{EsDc,min}$	Minimale Speichernetzeingangsleistung	[W]
$P_{EsDc,sup}$	Obere Speicherknotenleistungsgrenze	[W]
P_{FzAl}	Fahrzeughilfsbetriebeleistung	[W]
$P_{FzAl,ein}$	Fahrzeughilfsbetriebeeingangsleistung	[W]
$P_{FzAl,max}$	Fahrzeughilfsbetriebeleistung (100 %)	[W]
$P_{FzAl,V}$	Fahrzeughilfsbetriebeverlustleistung	[W]

$P_{FzAl,Y}$	Fahrzeughilfsbetriebeverbraucherleistung	[W]
P_{FzDc}	Fahrzeugnetzleistung	[W]
$P_{FzDc,aus}$	Fahrzeugnetzausgangsleistung	[W]
$P_{FzDc,ein}$	Fahrzeugnetzeingangsleistung	[W]
$P_{FzDc,max}$	Positive Fahrzeugnetzausgangsleistungsgrenze	[W]
$P_{FzDc,min}$	Negative Fahrzeugnetzeingangsleistungsgrenze	[W]
$P_{FzEb,min}$	Minimale Fahrzeugwiderstandsbremsleistung	[W]
$P_{FzEb,V}$	Fahrzeugwiderstandsbremsverlustleistung	[W]
P_{FzEs}	Fahrzeugspeicherleistung	[W]
$P_{FzEs,ab}$	Fahrzeugspeicherabnahmeleistung (Entladen)	[W]
$P_{FzEs,aus}$	Fahrzeugspeicherausgangsleistung	[W]
$P_{FzEs,ein}$	Fahrzeugspeichereingangsleistung	[W]
$P_{FzEs,max}$	Maximale Fahrzeugspeichereingangsleistung	[W]
$P_{FzEs,min}$	Minimale Fahrzeugspeicherausgangsleistung	[W]
$P_{FzEs,neg}$	Negative Fahrzeugspeicherkapazitätsgrenze	[W]
$P_{FzEs,pos}$	Positive Fahrzeugspeicherkapazitätsgrenze	[W]
$P_{FzEs,V}$	Fahrzeugspeicherverlustleistung	[W]
$P_{FzEs,zu}$	Fahrzeugspeicherzunahmeleistung (Laden)	[W]
$P_{FzFw,V}$	Fahrzeugfahrwiderstandsverlustleistung	[W]
$P_{FzMb,V}$	Fahrzeugreibungsbremsverlustleistung	[W]
P_{FzTr}	Fahrzeugtraktionsleistung	[W]
$P_{FzTr,ab}$	Fahrzeugabnahmeleistung ($v \downarrow$ bzw. $h \downarrow$)	[W]
$P_{FzTr,gen}$	Fahrzeugbremsleistung	[W]
$P_{FzTr,mot}$	Fahrzeugantriebsleistung	[W]
$P_{FzTr,zu}$	Fahrzeugzunahmeleistung ($v \uparrow$ bzw. $h \uparrow$)	[W]
$P_{FzTr,max}$	Maximale Fahrzeugantriebsleistung	[W]
$P_{FzTr,min}$	Minimale Fahrzeugbremsleistung	[W]
$P_{FzTrM,gen}$	Fahrzeuggeneratorleistung	[W]
$P_{FzTrM,mot}$	Fahrzeugmotorleistung	[W]
P_{FzTrS}	Fahrzeugtraktionssystemleistung	[W]
$P_{FzTrS,aus}$	Fahrzeugtraktionssystemausgangsleistung	[W]
$P_{FzTrS,ein}$	Fahrzeugtraktionssystemeingangsleistung	[W]

$P_{FzTrS,max}$	Max. Fahrzeugtraktionssystemeingangsleistung	[W]
$P_{FzTrS,min}$	Min. Fahrzeugtraktionssystemausgangsleistung	[W]
$P_{FzTrS,V}$	Fahrzeugtraktionssystemverlustleistung	[W]
P_k	Wirkleistung für Knoten k	[W]
P_k^*	Vorgegebene Wirkleistung für Knoten k	[W]
$P_{k,max}$	Obere Knotenleistungsgrenze	[W]
$P_{k,min}$	Untere Knotenleistungsgrenze	[W]
P_{km}	Zweigleistung zwischen Knoten k und m	[W]
$P_{Uw,V}$	Unterwerksverlustleistung	[W]
$P_{Uw,X}$	Unterwerkseinspeiseleistung	[W]
$P_{Uw,Y}$	Unterwerksrückspeiseleistung	[W]
P_{UwDc}	Unterwerksnetzleistung	[W]
$P_{UwDc,aus}$	Unterwerksnetzausgangsleistung	[W]
$P_{UwDc,ein}$	Unterwerksnetzeingangsleistung	[W]
$P_{UwDc,max}$	Maximale Unterwerksnetzausgangsleistung	[W]
$P_{UwDc,min}$	Minimale Unterwerksnetzeingangsleistung	[W]
$P_{Sys,ab}$	Systemabnahmeleistung	[W]
$P_{Sys,V}$	Systemverlustleistung	[W]
$P_{Sys,X}$	Systemeinfuhrleistung	[W]
$P_{Sys,Y}$	Systemausfuhrleistung	[W]
$P_{Sys,zu}$	Systemzunahmeleistung	[W]
q	Verkehrsstärke	[Fz/s]
$[R]$	Rechts-obere Dreiecksmatrix	[-]
R_{Cu}	Wicklungsverluste (Transformator)	[Ω]
R_D	Diodenverluste (Gleichrichter)	[Ω]
R_{DV}	Direktverbindungswiderstand	[Ω]
R_{Fe}	Eisenverluste (Transformator)	[Ω]
R'_{FL}	Fahrleitungs-widerstandsbelag	[Ω/km]
R_i	Innenwiderstand	[Ω]
r_K	Kurvenradius	[m]
R_{km}	Leitungswiderstand zwischen Knoten k und m	[Ω]
R_L	Leitungswiderstand	[Ω]

R'_L	Leitungswiderstandsbelag	[Ω/m]
r_{NK}	Zulässiger Anteil an Nullknoten	[-]
R'_{SK}	Speisekabelwiderstandsbelag	[Ω/km]
R^*_{Uw}	Unterwerksinnenwiderstand	[Ω]
S_F	Fahrstreckenposition	[m]
S_{F1}	Start-Fahrstreckenposition	[m]
S_{F2}	Ziel-Fahrstreckenposition	[m]
S_i	Fahrerposition	[m]
S_{ist}	Aktuelle Fahrstreckenposition	[m]
S_j	Hindernisposition	[m]
S_K	Kantenposition	[m]
t_{anf}	Simulationsanfangszeit	[s]
$t_{E,aus}$	Endstationsausfahrzeit	[s]
$t_{E,ein}$	Endstationseinfahrzeit	[s]
t_{end}	Simulationsendzeit	[s]
t_{ist}	Aktuelle Simulationszeit	[s]
t_{max}	Maximale Simulationszeit	[s]
t_{min}	Minimale Simulationszeit	[s]
t_{soll}	Abfahrtsplanzeit	[s]
$t_{\Delta s,RA}$	Risikoabstandszeitlücke	[s]
$t_{\Delta s,WA}$	Wunschabstandszeitlücke	[s]
[U]	Knotenspannungsvektor	[V]
U_{AlDc}	Anlagennetzspannung	[V]
U_{dc}	Knotennetzspannung	[V]
$U_{dc,max}$	Obere Netzspannungsgrenze	[V]
$U_{dc,min}$	Untere Netzspannungsgrenze	[V]
$U_{dc,N}$	Netzennspannung	[V]
U_{EsDc}	Speichernetzspannung	[V]
$U^*_{EsDc,inf}$	Speichernetzentladespannung	[V]
$U^*_{EsDc,sup}$	Speichernetzladspannung	[V]
U_{FzDc}	Fahrzeugnetzspannung	[V]
U_k	Spannungsbetrag für Knoten k	[V]

U_k^*	Vorgegebener Spannungsbetrag für Knoten k	[V]
$U_{k,max}$	Obere Knotenspannungsgrenze	[V]
$U_{k,min}$	Untere Knotenspannungsgrenze	[V]
U_{km}	Zweigspannung zwischen Knoten k und m	[V]
$U_{NR,max}$	Obere Knotenspannungsabbruchgrenze	[V]
$U_{NR,min}$	Untere Knotenspannungsabbruchgrenze	[V]
U_q	Quellenspannung	[V]
U_{Uw}^*	Unterwerksleerlaufspannung	[V]
$u_{Uw,K}$	Relative Unterwerkskurzschlussspannung	[%]
$U_{Uw,N}$	Unterwerkstransformatorenennspannung	[V]
U_{UwDc}	Unterwerksnetzspannung	[V]
$U_{UwDc,inf}^*$	Obere Unterwerksknoten Spannungsgrenze	[V]
$U_{UwDc,sup}^*$	Untere Unterwerksknoten Spannungsgrenze	[V]
\bar{v}	Verkehrsgeschwindigkeit (arithm. Mittel)	[m/s]
v^*	Richtgeschwindigkeit	[m/s]
\vec{v}_{AZ}	Richtungsvektor der Geraden AZ	[m]
\vec{v}_{AZ}^\perp	Normalenvektor der Geraden AZ	[m]
$v_{E,aus}$	Endstationsausfahrgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{E,ein}$	Endstationseinfahrgeschwindigkeit	[m/s]
v_{Fz}	Fahrzeuggeschwindigkeit	[m/s]
$v_{Fz,max}$	Fahrzeughöchstgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{Fz,ümot}$	Fahrzeugmotorübergangsgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{Fz,ügen}$	Fahrzeuggeneratorübergangsgeschwindigkeit	[m/s]
v_i	Fahrergeschwindigkeit	[m/s]
v_i^*	Fahrerwunschgeschwindigkeit	[m/s]
v_j	Hindernisgeschwindigkeit	[m/s]
v_{lim}	Geschwindigkeitslimit	[m/s]
$v_{\alpha,max}$	Obere Ausrollgeschwindigkeitsgrenze	[m/s]
$v_{\alpha,min}$	Untere Ausrollgeschwindigkeitsgrenze	[m/s]
\underline{Y}	Admittanz	[S]
\underline{Z}	Impedanz	[Ω]
z	Normalverteilte Zufallsvariable	[-]

z_{α}	Ausrollzustand	[–]
β_{FzEs}	Boolesche Variable für Fahrzeugspeicher	[–]
β_{τ}	Boolesche Variable für Verspätungsverhalten	[–]
Δd	Fahrwegdistanz	[m]
$\Delta d'$	Horizontale Distanz	[m]
Δh	Vertikale Distanz	[m]
ΔE_{Es}	Stationäre Speicherenergieabweichung	[W·s]
ΔE_{FzEs}	Mobile Speicherenergieabweichung	[W·s]
ΔE_{FzTr}	Fahrzeugenergieabweichung	[W·s]
ΔE_{Sys}	Systemenergieabweichung	[W·s]
Δf_P	Knotenleistungsfaktorreduzierungsschrittweite	[–]
$[\Delta P]$	Knotenleistungsabweichungsvektor	[W]
ΔP_k	Knotenleistungsabweichung bei Knoten k	[W]
Δs	Folgeabstand	[m]
Δs_{BA}	Bremsabstand	[m]
Δs_j	Hinderniserfassungsabstand	[m]
$\Delta s_{NWS(2)}$	Vertikaler NWS-Referenzpunkt	[m]
$\Delta s_{PWS(2)}$	Vertikaler PWS-Referenzpunkt	[m]
Δs_{RA}	Risikoabstand	[m]
Δs_{SA}	Sicherheitsabstand	[m]
Δs_{Sg}	Signalanhalteabstand	[m]
Δs_{WA}	Wunschabstand	[m]
$\Delta s_{WA,Fz}$	Wunschmindestabstand zum mobilen Hindernis	[m]
$\Delta s_{WA,min}$	Wunschmindestabstand	[m]
$\Delta s_{Z6,lim_a}$	Beschleunigungsbegrenzungsbereich in Zone 6	[m]
Δt	Simulationszeitschrittweite	[s]
Δt_E	Verbleibende Endstationsabstellzeit	[s]
$\Delta t_{E,FzAl}$	Endstationshilfsbetriebebereitschaftszeit	[s]
$\Delta t_{E,min}$	Endstationsausfahrmindestzeitspanne	[s]
Δt_{Fg}	Fahrgastwechselzeit	[s]
$\Delta t_{Fg,max}$	Wachstumsschranke für Fahrgastwechselzeit	[s]
Δt_H	Verbleibende Haltestellenhaltezeit	[s]

$\Delta t_{H,min}$	Mindesthaltezeit	[s]
Δt_{max}	Größte Simulationszeitschrittweite	[s]
Δt_{min}	Kleinste Simulationszeitschrittweite	[s]
Δt_{sg}	Signalsperrzeit	[s]
$[\Delta U]$	Knotenspannungsabweichungsvektor	[V]
ΔU_k	Knotenspannungsabweichung bei Knoten k	[V]
$[\Delta V]$	Hilfsvektor für Gauß-Verfahren	[-]
Δv	Relativgeschwindigkeit	[m/s]
Δv_{NWS}	Negative Wahrnehmungsschwelle	[m/s]
$\Delta v_{NWS(1)}$	Horizontaler NWS-Referenzpunkt	[m/s]
Δv_{PWS}	Positive Wahrnehmungsschwelle	[m/s]
$\Delta v_{PWS(1)}$	Horizontaler PWS-Referenzpunkt	[m/s]
$\Delta v_{Z7,lim_a}$	Beschleunigungsbegrenzungsbereich in Zone 7	[m/s]
ε_{NR}	Konvergenzkriteriumsabbruchswert	[V]
ζ_{Fg}	Fahrgastindex	[%]
$\zeta_{Fg,s}$	Örtlicher Fahrgastindex	[%]
$\zeta_{Fg,t}$	Zeitlicher Fahrgastindex	[%]
η_{Al}	Anlagenwirkungsgrad	[-]
η_{Es}	Speicherwirkungsgrad	[-]
η_{FzAl}	Fahrzeughilfsbetriebewirkungsgrad	[-]
η_{FzEs}	Fahrzeugspeicherwirkungsgrad	[-]
$\eta_{FzTrS,e}$	Elektr. Fahrzeugtraktionssystemwirkungsgrad	[-]
$\eta_{FzTrS,m}$	Mech. Fahrzeugtraktionssystemwirkungsgrad	[-]
η_{Uw}	Unterwerkswirkungsgrad	[-]
ϑ	Iterationszahl für das NR-Verfahren	[-]
ϑ_{max}	Maximale Iterationen beim NR-Verfahren	[-]
κ_L	Elektrische Leitfähigkeit	[S/m]
κ_{LE}	Elektrische Leitfähigkeit eines Leiterelements	[S·m/mm ²]
$\lambda_{FzDc,ein/aus}$	Fahrzeugnetzrückspeisegrad	[-]
$\lambda_{Fz,neg/pos}$	Fahrzeugrekuperationsgrad	[-]
$\mu_{E,\tau}$	Ausfahrverspätungserwartungswert	[s]
μ_H	Haftreibungsbeiwert	[-]

$\mu_{n,Fg}$	Fahrgastanzahlerwartungswert	[-]
$\mu_{Sg,\Delta t}$	Signalsperrzeiterwartungswert	[s]
$\mu_{t,soll}$	Planzeiterwartungswert	[s]
$\mu_{\Delta t,Fg}$	Fahrgastwechselzeiterwartungswert	[s]
ξ_{Es}	Netzspeicheranfangsladezustand	[-]
$\xi_{Fz,m}$	Fahrzeugmassenzuschlagsfaktor	[-]
ξ_{FzEs}	Fahrzeugspeicheranfangsladezustand	[-]
$Q_{E,FzAl}^*$	Endstationshilfsbetriebebereitschaftsauslastung	[-]
Q_{FzAl}	Fahrzeughilfsbetriebeauslastungsgrad	[-]
Q_{FzAl}^*	Einsatzhilfsbetriebebereitschaftsauslastung	[-]
Q_L	Spezifischer elektrischer Widerstand	[$\Omega \cdot m$]
Q_{LE}	Abnutzungsgrad eines Leiterelements	[%]
Q_{LG}	Vermaschungsgrad einer Leitergruppe	[%]
$\sigma_{E,\tau}$	Ausfahrverspätungsstandardabweichung	[s]
$\sigma_{n,Fg}$	Fahrgastanzahlstandardabweichung	[-]
$\sigma_{Sg,\Delta t}$	Signalsperrzeitstandardabweichung	[s]
$\sigma_{t,soll}$	Planzeitstandardabweichung	[s]
$\sigma_{\Delta t,Fg}$	Fahrgastwechselzeitstandardabweichung	[s]
τ	Verspätung	[s]
τ_E	Endstationsausfahrverspätung	[s]
$\tau_{neg(2)}$	Verfrühungsreferenzzeit	[s]
$\tau_{pos(1)}$	Verspätungsreferenzzeit	[s]
φ	Rotations- bzw. Schnittwinkel	[rad]
φ_i	Fahrersichtwinkel	[rad]
φ_S	Steigungswinkel	[rad]
χ	Iterationszahl für das KM-Verfahren	[-]
χ_{max}	Maximale Iterationen beim KM-Verfahren	[-]
$\psi_{Fz,Tr}$	Fahrzeugtraktionsachsenverhältnis	[-]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Nutzung von Energie ist in heutigen Industriegesellschaften von zentraler Bedeutung. Wir benötigen sie einerseits in Form von Wärme und andererseits in Form von mechanischer Arbeit. In der Natur ist Energie als fossile Energie (Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Torf), als Kernenergie (Uran) und als regenerative Energie (Solarenergie, Biomasse, Windkraft, Wasserkraft, Geothermie) vorhanden [63]. Diese Energie steht uns allerdings nicht in der gewünschten Form und am gewünschten Ort zur Verfügung. Daher muss die ursprünglich vorkommende Primärenergie in nutzbare Endenergie umgewandelt und zum Verbraucher übertragen werden. Dieser Prozess ist verlustbehaftet, so dass ein sorgsamer und umweltschonender Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen von großem Interesse ist. Die öffentlichen Diskussionen um Energieverbrauch, Schadstoffausstoß, Umweltbelastung und Klimawandel machen das Energiemanagement zu einem gesellschaftlich relevanten Thema.

Mit der Industriellen Revolution im 19. Jahrhundert entstanden die ersten Großstädte wie London, Paris und New York. Heute lebt bereits über die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen und eine Grundvoraussetzung für wirtschaftliches Wachstum. Die wachsenden Metropolen stehen aufgrund von Verkehrsstaus, Parkraumknappheit und Feinstaubbelastung vor großen Herausforderungen. Umso bedeutsamer ist eine gut ausgebaute und leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur. Elektrische Verkehrssysteme sind auf dem Vormarsch. Gründe hierfür sind die hohe Energieeffizienz und die gute Regelbarkeit der elektrischen Maschinen. Zudem trägt die Elektromobilität in den Innenstädten und Ballungsräumen im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei.

1.1.1 Elektrifizierte Schienennetze

Energieversorgungsnetze übertragen und verteilen elektrische Energie über bestimmte Distanzen. Als Stromsysteme kommen hierfür folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Gleichstrom (DC)
- Einphasenwechselstrom (AC)
- Dreiphasenwechselstrom (3AC)

Für die elektrische Traktion von Schienenfahrzeugen zählen die folgenden Stromsysteme zu den wichtigsten [29]:

- Nahverkehrsbahnen: DC 600 V; DC 750 V
- Hauptbahnen: DC 1,5 kV; DC 3 kV;
AC 15 kV 16,7 Hz; AC 25 kV 50 Hz

Nahverkehrsbahnen werden typischerweise mit Gleichstrom elektrifiziert, da vor dem Zeitalter der Halbleiter-Leistungselektronik die Gleichstrom-Reihenschlussmaschine fahrzeugseitig die einfachste Antriebslösung darstellte. Die Leistungssteuerung der Motoren konnte problemlos über Vorwiderstände erfolgen. In heutigen Nahverkehrssystemen bleiben DC-Netze erste Wahl, da im Vergleich zu AC-Netzen keine Blindleistung anfällt. Die niedrige Netzspannung bietet den Vorteil, dass kein schwerer Transformator notwendig ist und die Isolierabstände klein gehalten werden können. Die Nachteile der niedrigen Netzspannung sind hinnehmbar, da die Traktionsleistungen der Nahverkehrsfahrzeuge im Vergleich zu Hauptbahnen verhältnismäßig gering sind und nur über kurze Distanzen übertragen werden müssen. In [9] wird ausführlich über die geschichtliche Entwicklung der Bahnenergieversorgung von DC-Nahverkehrsbahnen berichtet.

Für Hauptbahnen sind DC-Systeme aufgrund ihrer großen Netzausdehnung eher ungünstig. Dennoch sind sie aus historischen Gründen u. a. in Italien, Spanien, Belgien, Polen, den Niederlanden und im südlichen Teil von Frankreich verbreitet. Um viele Einspeisepunkte und Fahrleitungen mit großem Querschnitt zu vermeiden, werden Hauptbahnen im Allgemeinen mit

Einphasenwechselstrom elektrifiziert. Der große Vorteil an AC-Netzen ist, dass sich Wechselstrom in Transformatoren umspannen und auf einem hohen Spannungsniveau verlustarm über große Entfernungen verteilen lässt. In den deutschsprachigen Ländern, in Schweden und Norwegen sowie teilweise an der amerikanischen Ostküste haben sich AC-Netze mit einer gegenüber dem öffentlichen Stromnetz verminderten Frequenz durchgesetzt. Die Frequenz beträgt in den europäischen Ländern 16,7 Hz anstatt der üblichen 50 Hz bzw. in den USA 25 Hz anstelle von 60 Hz. Die Gründe hierfür sind historisch bedingt, da Anfang des 20. Jahrhunderts ohne Leistungselektronik noch keine leistungsfähigen und drehzahlvariablen Fahrmotoren mit hohen Frequenzen betrieben werden konnten. Nachteilig an der Sonderfrequenz ist, dass hierfür ein separates Energieversorgungsnetz notwendig ist. Heutzutage können Antriebe durch die erzielten Fortschritte in der Leistungselektronik aus dem 50 Hz- bzw. 60 Hz-Landesnetz versorgt werden. Daher wird Einphasenwechselstrom in Landesfrequenz bei Neuelektrifizierungen von Hauptbahnen zukünftig bevorzugt gewählt. Unvorteilhaft bei der einpoligen Fahrleitung ist die asymmetrische Belastung des dreiphasigen Landesnetzes, was jedoch nur bei schwachen Netzen zu Problemen führt.

Eine Versorgung von Hauptbahnen mit Dreiphasenwechselstrom direkt aus dem Landesnetz eignet sich wegen der komplizierten mehrpoligen Fahrleitung nicht. Infolgedessen haben 3AC-Netze bei der Bahnenergieversorgung keine weite Verbreitung gefunden [30].

1.1.2 Öffentlicher Personennahverkehr

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) gilt als umweltfreundliches Verkehrsmittel und leistet in Zeiten der fortschreitenden Urbanisierung einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung. In vielen Fußgängerzonen sind Fahrzeuge des ÖPNV die einzigen erlaubten Verkehrsmittel. Aufgabe der Verkehrsbetriebe ist, eine kostengünstige Transportleistung für die Bürger in den Städten bereitzustellen. Bis vor kurzem wurde der ÖPNV fast ausschließlich durch die öffentliche Hand betrieben. Zukünftig wird die Konkurrenz unter den Verkehrsunternehmen zunehmen. Mit den wachsenden

Mobilitätsansprüchen der Fahrgäste, verbunden mit den ständig steigenden Energiepreisen, rücken daher neben den ökologischen auch die ökonomischen Gesichtspunkte in den Vordergrund. In der Konsequenz hat die wirtschaftliche Geschäftsführung für die Betreiber des ÖPNV eine hohe und zukunftsweisende Relevanz.

Der ÖPNV setzt sich aus den folgenden Verkehrsmitteln zusammen:

- Busse
- Straßenbahnen
- Stadtbahnen
- U-Bahnen (U-Bahn)
- Stadtschnellbahnen (S-Bahn)

Darüber hinaus existieren noch weitere ÖPNV-Verkehrsmittel wie Fähren oder Seilbahnen, die an bestimmte geografische Gegebenheiten wie Flüsse oder Berge gebunden sind.

Tab. 1.1: Vergleich der Verkehrsmittel im ÖPNV (vgl. [90])

	Bus	Straßenbahn	Stadtbahn	U-Bahn	S-Bahn
Fahrgäste pro h und Richtung	7 500	10 000	25 000	35 000	50 000
Haltestellenabstand in m	300	500	800	1 000	> 1 000
Anzahl der Sitz-/Stehplätze	100	150	200	250	300
Beförderungstempo in km/h	15-25	20-30	25-35	30-35	35-40
Investitionskosten pro km in Mio. EUR	0-5	3-8	10-20	40-80	
Wirtschaftliche Stadtgröße in Einw.	10 000	100 000	300 000	500 000	

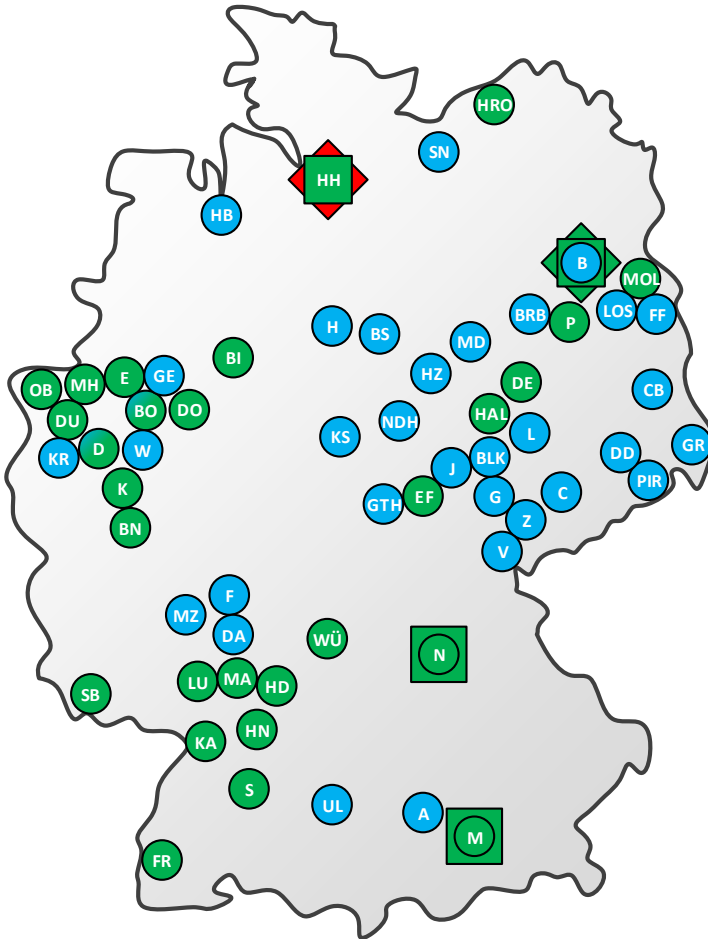
Straßenbahnen zählen zum „leichten Nahverkehr“ und werden in der Regel auf einem straßenbündigen Bahnkörper geführt. Wie Busse teilen sie sich den

öffentlichen Verkehrsraum mit dem Individualverkehr. U- und S-Bahnen gehören zum „schweren Nahverkehr“ und haben einen eigenen unabhängigen Bahnkörper. Deshalb ist der Investitionsaufwand für solche Verkehrssysteme deutlich höher. U-Bahn-Strecken verlaufen häufig unterirdisch und S-Bahnen ermöglichen schnelle Verbindungen in die umliegenden Ballungsräume [90]. Die Stadtbahnen stehen zwischen diesen beiden Nahverkehrsgruppierungen, da sie auf Straßenbahnlinien und auf eigenen Gleiskörpern fahren. Weitere Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln des ÖPNV sind der Tab. 1.1 zu entnehmen.

In Deutschland fuhr im Jahre 1881 die erste elektrische Straßenbahn in Berlin-Lichterfelde. Heute gibt es in über 50 deutschen Mittel- und Großstädten schienengebundene Nahverkehrsbetriebe [77]. In Abb. 1.1 wird ein Überblick über alle mit DC elektrifizierten Nahverkehrsbahnen in Deutschland gegeben. Die einzelnen Städte wurden mit ihrem Kfz-Kennzeichen beschriftet. In hochbelasteten Nahverkehrssystemen, wie S-Bahnen, kommen sowohl DC- als auch AC-Systeme zum Einsatz. Alle Nahverkehrsbahnen, die mit AC betrieben werden, sind auf der Karte nicht eingezeichnet. Beispiele hierfür sind die S-Bahnen in München, Stuttgart oder im Rhein-Main-, Rhein-Neckar- und Rhein-Ruhr-Gebiet.

Die Betriebsführung des Personenverkehrs mit S-, Regional- und Fernverkehrsbahnen ist in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) geregelt. Die Betriebsführung des innerstädtischen Verkehrs mit Straßenbahnen, Stadtbahnen und U-Bahnen unterliegt der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab). Regionalstadtbahnen, die auf EBO- und auf BOStrab-Strecken verkehren, müssen für beide Betriebsarten zugelassen sein.

In Karlsruhe kam in den 1980er-Jahren die Idee auf, das innerstädtische Straßenbahnnetz mit dem umliegenden Eisenbahnnetz der Deutschen Bahn (DB) zu verbinden. Dadurch kann der Fahrgast aus dem Umland ohne Umsteigen direkt in die Innenstadt hineinfahren [16]. Dieses Konzept ist unter der Bezeichnung „Karlsruher Modell“ bzw. „Tram-Train“ weltweit bekannt geworden und wurde mittlerweile in anderen Städten wie Saarbrücken, Kassel, Strasbourg oder Mulhouse umgesetzt.



○	Straßen-/Stadtbahn	●	DC 600 V
□	U-Bahn	●	DC 750 V
◇	S-Bahn	●	DC 1200 V

Abb. 1.1: DC-Nahverkehrsbahnen in Deutschland (vgl. [77])

In Abb. 1.2 ist der Karlsruher Verkehrsverbund (KVV) mit dem Straßenbahnnetz der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und dem Stadtbahnnetz der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) abgebildet. Insgesamt ist ein Zugbetrieb auf über 600 km Streckenlänge in der Region um Karlsruhe möglich [50].

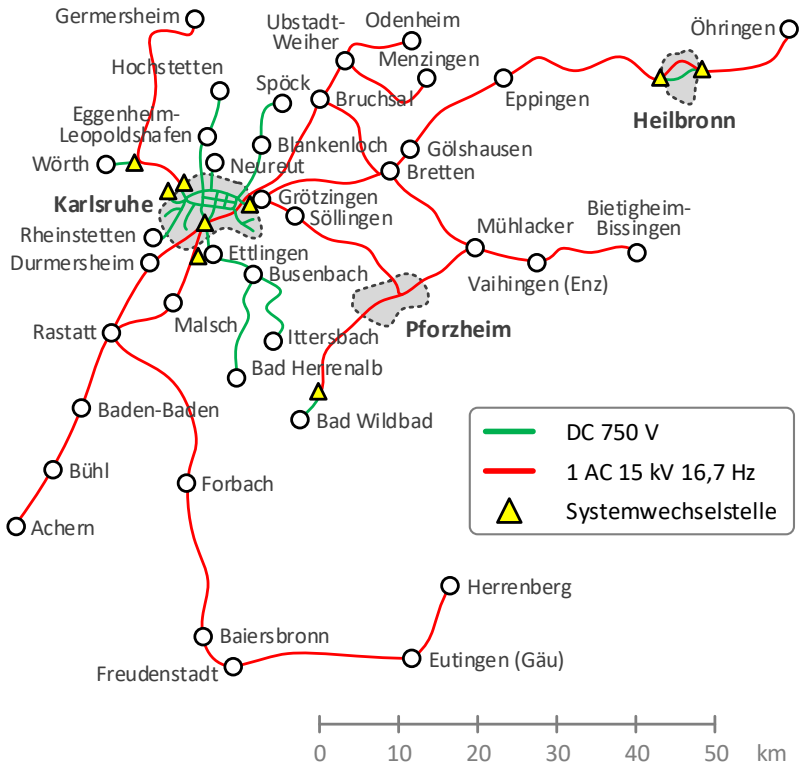


Abb. 1.2: Karlsruher Verkehrsverbund (vgl. [16])

1.2 Hintergrund

Die weiteren Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf schienengebundene und mit DC elektrifizierte Nahverkehrssysteme im städtischen Raum.

1.2.1 Gleichstromnahverkehrsnetze

DC-Nahverkehrsnetze sind aus verkehrs- und versorgungstechnischer Sicht geschlossene Systeme. In speziellen Fällen, wie beim Karlsruher Modell, ist das Nahverkehrsnetz mit dem Eisenbahnnetz des Regional- und Fernverkehrs verbunden. Hier wird die Systemgrenze an den Übergängen zwischen dem DC- und dem AC-Netz gezogen. Diese sogenannten Systemwechselstellen trennen die beiden Netze durch Isolierstücke voneinander und werden von den Fahrzeugen in einer Schwungfahrt durchfahren. In Abb. 1.2 sind diese Stellen durch gelbe Dreiecke gekennzeichnet.

1.2.1.1 Eigenschaften von DC-Netzen

Die elektrische Energie wird in Kraftwerken erzeugt und über Hochspannungsleitungen in die Städte transportiert. Dort steht sie im öffentlichen 3AC-Mittelspannungsnetz (10-30 kV) des örtlichen Energieversorgungsunternehmens zur Verfügung. Wie in Abb. 1.3 dargestellt, beziehen Unterwerke aus diesem 3AC-Netz die im DC-Netz (600-750 V) zur Fortbewegung der Schienenfahrzeuge benötigte Energie. Die Dioden-Gleichrichter-Unterwerke sind entlang der Fahrstrecke in Abständen von 1,5 km bis 6 km angeordnet [51]. Sie erlauben einen Energiefluss in nur eine Richtung, aus dem 3AC-Netz heraus und in das DC-Netz hinein.

Die Übertragung der Energie von den ortsfesten Unterwerken zu den sich ändernden Standorten der Fahrzeuge ist Aufgabe des Fahrleitungsnetzes. Zur Überwindung der Fahrwiderstände wandeln die Fahrmotoren der angetriebenen Fahrzeuge die elektrische Energie in mechanische Energie um. Die dichten Zugfolgen und die häufigen Anfahr- und Bremsvorgänge aufgrund der

geringen Haltestellenabstände führen zu großen zeit- und ortsabhängigen Lastspitzen. In Kombination mit der geringen Netzennennspannung und den dadurch bedingten hohen Traktionsströmen kommt es zu starken Netzspannungsschwankungen [15] [18].

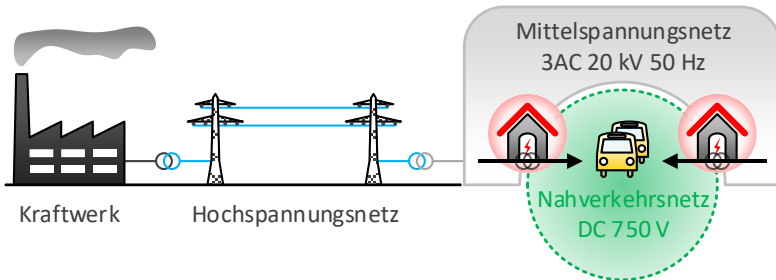


Abb. 1.3: Unterwerke zwischen dem 3AC- und dem DC-Netz

Durch elektromotorisches Bremsen kann die Bewegungs- und Lageenergie der Fahrzeuge wieder in elektrische Energie zurückgewandelt werden. Im Vergleich zu AC-Netzen ist die Aufnahmefähigkeit von DC-Netzen für die rekuperierte Bremsenergie jedoch nur begrenzt möglich. Die Gründe hierfür liegen einerseits in den Gleichrichter-Unterwerken, die nur einen unidirektionalen Energiefluss in das DC-Netz ermöglichen und den Energierückfluss in das übergeordnete 3AC-Netz verhindern. Folglich führen die rückspeisenden Fahrzeuge zusammen mit den nicht rückspeisefähigen Unterwerken zu einem Netzleistungsungleichgewicht. Andererseits ist die Energieübertragung im DC-Netz über größere Entfernungen nicht möglich, da entweder das Netz nicht vollständig durchgekuppelt ist oder der Spannungsabfall so beträchtlich ist, dass nur noch ein Bruchteil der Energie am Ziel ankommt. Daher kann die Bremsenergie nur dann nutzbringend vom Fahrleitungsnetz aufgenommen werden, wenn in der Nähe des bremsenden Fahrzeugs zeitgleich ein Abnehmer für diese Energie vorhanden ist (Nutzbremsung). Dieser Fall tritt ein, wenn sich die Brems- und Beschleunigungsphasen der Fahrzeuge örtlich und zeitlich überschneiden. Andernfalls wird ein Großteil der

Bremsenergie in den Bremswiderständen auf den Fahrzeugdächern nutzlos in Wärme umgesetzt (Widerstandsbremung).

1.2.1.2 Energieeffizienz in DC-Netzen

In DC-Nahverkehrsnetzen hat der Energieverbrauch einen wesentlichen Anteil an den Betriebsaufwendungen. Nach [55] belaufen sich die jährlichen Energiekosten einer Straßenbahn auf durchschnittlich 30 000 EUR. Folglich ist für die Verkehrsbetriebe die Steigerung der Energieeffizienz eines der vorrangigen Ziele.

Früher waren die Fahrleitungsnetze in separate Speisebereiche unterteilt, die einseitig von einem Unterwerk gespeist wurden. Ab den 1970er-Jahren hat man damit begonnen, sie nach und nach durchzukuppeln. Damit kann die ins DC-Netz zurückgespeiste Bremsenergie über die Sammelschienen der Unterwerke in andere aufnahmebereite Speisebereiche fließen [19] [81].

Eine Voraussetzung für den Austausch von Bremsenergie sind rückspeisefähige Fahrzeuge. Noch bis vor wenigen Jahrzehnten haben viele Fahrzeuge ihre gesamte kinetische und potenzielle Energie entweder durch mechanisches Bremsen als Reibungswärme oder durch elektrisches Bremsen als Bremswiderstandswärme an die Umgebung abgegeben [2]. Mittlerweile verfügt nahezu jedes elektrische Schienenfahrzeug über moderne Antriebstechnik mit umrichter gespeisten Asynchronmaschinen. Damit ist es grundsätzlich in der Lage, durch generatorisches Bremsen einen Teil der ursprünglich konsumierten Energie zurückzugewinnen. Die Verluste im Antriebsstrang betragen bezüglich der aus dem Netz aufgenommenen Energie nur noch rund 10 %. Hier ist zukünftig kein großes Energieeinsparpotenzial mehr zu erwarten [84].

Mit rückspeisefähigen Wechselrichter-Unterwerken kann die Bremsenergie direkt vom übergeordneten 3AC-Mittelspannungsnetz aufgenommen werden [23]. Diese Praxis wird allerdings von den Energieversorgungsunternehmen kaum unterstützt, da die nur kurzzeitigen und unregelmäßigen Rückspeiselasten grundsätzlich nicht erwünscht sind. Darüber hinaus wäre die Wirtschaftlichkeit solcher Unterwerke maßgeblich von der Tarifpolitik der Energie lieferanten abhängig, da rückgespeiste Energie im Verhältnis zu bezogener

Energie wesentlich geringer vergütet wird [67]. Ein weiteres Problem ist, dass sich Kreisströme im verzweigten DC-Netz bilden können, wenn die Unterwerke die Energieflüsse in beide Richtungen passieren lassen würden. Daher kommen solche Unterwerke nur vereinzelt und vorwiegend bei Gebirgsbahnen zum Einsatz, da hier die Bremsleistungen aufgrund der langen und gleichmäßig verlaufenden Talfahrten über einen längeren Zeitraum konstant bleiben. Als Beispiel hierfür ist die Jungfrauabahn in den Schweizer Alpen zu nennen. Neben den geringeren Energiekosten konnte infolge der rückspeisefähigen Unterwerke der Instandhaltungsaufwand an den Bremswiderständen der Zahnradbahnen reduziert werden [83].

Auch der Fahrer rückt immer mehr in den Fokus, der mit seiner Fahrweise einen Beitrag zur Energieeinsparung leisten kann [33]. In [13] wird die klassische Fahrweise mit einer Ausrollphase und die alternative Fahrweise mit einer Beharrungsphase untereinander verglichen. Als Ergebnis konnte ermittelt werden, dass sich die erste Fahrweise positiv auf den Energieverbrauch und die zweite Fahrweise günstig auf die Belastungsspitzen auswirkt. Zudem hat die maximale Fahrgeschwindigkeit, auf die das Fahrzeug bis zum Beginn der Ausrollphase bzw. Beharrungsphase beschleunigt wird, einen starken Einfluss auf den Energieverbrauch des Fahrspiels. Modellrechnungen in [48] haben gezeigt, dass der zusätzliche Energieverbrauch bei einer Heraufsetzung der Höchstgeschwindigkeit in keinem Verhältnis zum dadurch erzielten Fahrzeitgewinn steht. Ferner kann der Fahrer mit Fahrerassistenzsystemen in einer energetisch optimal auf den Stadtverkehr abgestimmten Fahrweise unterstützt werden [14]. In manchen nicht vom Individualverkehr beeinflussten Systemen, wie z. B. der U-Bahn in Nürnberg, wird bereits ganz auf den Fahrer verzichtet [93]. Die fahrerlosen Fahrzeuge werden in dem Fall zentral von der Leitstelle aus gesteuert. So wäre es in naher Zukunft denkbar, die Beschleunigungs- und Bremsphasen der einzelnen Fahrzeuge durch eine intelligente Verkehrskoordination zu synchronisieren und damit in Bezug auf den Bremsenergieaustausch besser aufeinander abzustimmen.

Davon abgesehen kann eine Verbesserung der Energieeffizienz durch zusätzliche Unterwerke, eine höhere Netznennspannung oder kleinere Leitungswiderstände ermöglicht werden. Simulationsberechnungen haben gezeigt,

dass eine netzumfassende Anhebung des Spannungsniveaus den größten Nutzen hinsichtlich der Spannungshaltung und dem Austausch von Bremsenergie bringen würde [78]. Einer Studie von ELBAS aus dem Jahr 2009 zufolge führt im Dresdner Straßenbahnnetz eine Erhöhung der Netznennspannung von DC 600 V auf DC 750 V zu einer Energieeinsparung von 3,95 GWh/a, was einer Kostensenkung von rund 450 000 EUR/a entspräche. Mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 0,596 kg/kWh als Maßstab würde sich damit der CO₂-Ausstoß um mehr als 2 350 t/a verringern [26]. In Schwerin sind mit dem Abschluss der Modernisierung des Netzes im Jahre 2011 die Unterwerke und Fahrzeuge für eine Erhöhung der Netzspannung auf DC 750 V vorbereitet worden [32]. Im Stadtbahnnetz von Potsdam wurde 2015 dieser Schritt vollzogen. Hier konnte in einer Studie bezüglich der maximalen Bremsenergienutzung eine optimale Leerlaufspannung der Unterwerke von DC 830 V ermittelt werden [57]. Im Rostocker Straßenbahnnetz ist für das Jahr 2017 eine Umstellung auf DC 750 V geplant [3]. Hingegen zeigten Simulationsergebnisse für das Stadtbahnnetz von Hannover, dass eine erhöhte Netzspannung ohne großen Nutzen sein würde. Der hohe durchschnittliche Netzurückspeisegrad von 36,25 % ist hier vor allem dem gut vermaschten DC-Netz sowie den im Jahre 2001 umgesetzten Energieeinsparmaßnahmen zu verdanken, bei denen u. a. knapp die Hälfte der Fahrzeuge mit Speicherheizungen (75 kW) ausgerüstet wurden. Diese nehmen die Bremsenergie aus dem DC-Netz auf, speichern sie nach dem Nachtspeicherprinzip und geben sie dann kontinuierlich an den Fahrgastraum ab [48]. Weitere mögliche Energieeinsparkonzepte werden in [37] aufgeführt. Bei den Leipziger Verkehrsbetrieben konnte [33] zufolge der Jahresenergieverbrauch durch Energiemanagementmaßnahmen von 115 GWh im Jahr 1988 auf 55 GWh im Jahr 2007 gesenkt werden.

1.2.2 Energiespeicher

Eine der am meisten diskutierten Lösungsmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz und der Leistungsfähigkeit von DC-Nahverkehrsnetzen liegt in der Einbindung von Energiespeichern in diese Systeme. Durch die zeitliche

Entkopplung von Energieaufnahme und Energieabgabe können Speicher temporäre Überkapazitäten aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben.

1.2.2.1 Speicherstandorte

Als Speicherstandorte kommen die folgenden Möglichkeiten in Betracht:

- Mobil auf dem Fahrzeug
- Stationär an der Fahrstrecke

Mobile Speicher erhöhen zwar die Fahrzeugmasse, benötigen dafür aber keine zusätzlichen Speicheraufstellplätze und verursachen keine Übertragungsverluste im Fahrleitungsnetz. Allerdings gibt es wenig Spielraum beim Speichergewicht und beim Speichervolumen, da sich die Fahrzeugachslasten am oberen Grenzwert befinden und beengte Platzverhältnisse auf den Fahrzeugdächern vorherrschen.

Stationäre Speicher bieten an energetisch optimalen Positionen den Vorteil, dass von ihnen alle Fahrzeuge profitieren können, die sich gerade in diesem Netzbereich aufhalten. Sie tragen damit zu einer verbesserten Netzaufnahmefähigkeit für überschüssige Bremsenergie bei. In anschlussfertigen Containern besitzen sie zudem einen gewissen Grad an Mobilität, indem sie an vorübergehend stark belasteten Streckenabschnitten, wie z. B. vor und nach Großereignissen, aufgestellt werden können [39].

1.2.2.2 Speicherstrategien

Beim Speichereinsatz sind die folgenden Speicherstrategien denkbar [66]:

- Speicherung von temporär überschüssiger Bremsenergie
- Stabilisierung der Netzspannung und Ausgleich von Lastspitzen
- Autonomer Betrieb auf fahrleitungsfreien Streckenabschnitten

Messungen zufolge stehen durchschnittlich 40 % der vom Fahrzeug aufgenommenen Energie als Bremsenergie zur Verfügung, wovon unter realen Bedingungen nur 15 % ins Netz zurückgespeist werden. Mit Speichern kann die aus dem vorangegangenen Bremsvorgang gewonnene Energie bei der

nächsten Anfahrt genutzt werden. Damit lässt sich der Energieverbrauch um bis zu 25 % reduzieren [38] [56].

Eine Stabilisierung der Netzspannung ermöglicht einerseits Einsparungen in den Infrastrukturkosten, da dadurch größere Unterwerksabstände oder kleinere Fahrleitungsdurchmesser möglich sind. Andererseits können leistungsfähigere Fahrzeuge eingesetzt oder die Fahrzeugdichte erhöht werden. Nach [84] lässt sich der Netzspitzenleistungsbedarf mit Speichern um bis zu 50 % reduzieren. Eine Glättung der Lastspitzen wirkt sich positiv auf die Energiepreisbildung aus, da sich die Energiekosten eines Unterwerks größtenteils aus dem Bereitstellungspreis für die angeschlossene Leistung ableiten. Dazu wird üblicherweise ein Mittelwert aus den Momentanleistungen über ein Zeitintervall von je 15 min bestimmt. Die drei Jahreshöchstwerte dieser Leistungsmittelwerte bestimmen dann das zu entrichtende Leistungsentgelt [38].

Ein fahrleitungsfreier Betrieb ist nur mit mobilen Speichern möglich. Je nach Jahreszeit benötigen moderne Stadtbahnfahrzeuge ca. 2-4 kWh/km. Netzfremde Streckenabschnitte werten das Stadtbild z. B. vor historischen Gebäuden optisch auf. Im Übrigen sind mobile Speicher besonders in schwachen Netzen hilfreich, da bei Netzstörungen die Strecke geräumt und die Fahrt zumindest bis zur nächsten Haltestelle fortgesetzt werden kann.

1.2.2.3 Speichertechnologien

Energie lässt sich in thermischer, chemischer, mechanischer und elektrischer Form speichern. Die am Markt erhältlichen Speichertechnologien unterliegen zurzeit einem großen Wandel. Nach dem Stand der Technik eignen sich für mobile Anwendungsfälle folgende Speicherarten [41]:

- Akkumulatoren (AKKU)
- Schwungmassenspeicher (SMS)
- Doppelschichtkondensatoren (DSK)

Druckluftspeicher und supraleitende magnetische Energiespeicher sind theoretisch denkbar, wurden aber in den letzten Jahren bei der Entwicklung von anwendungsreifen Fahrzeugspeichersystemen kaum berücksichtigt. In [62]

wird der Stand der Entwicklung von Speichern für DC-Nahverkehrsbahnen erläutert. Das in Abb. 1.4 dargestellte Ragone-Diagramm vergleicht die drei Speicherarten hinsichtlich ihrer Energie- und Leistungsdichte. Es trägt die auf die Masse bezogene spezifische Energiedichte logarithmisch über der spezifischen Leistungsdichte auf. Neben einer hohen Energie- und Leistungsdichte sind ein hoher Wirkungsgrad, eine hohe Lastzyklenfestigkeit und Lebensdauer sowie kurze Lade-, Entlade- und Zugriffszeiten als weitere wichtige Anforderungen an die Speicher zu nennen. Selbstentladungsverluste sind hingegen weniger relevant, da die Energie in der Regel nur für eine kurze Zeitdauer gespeichert werden muss.

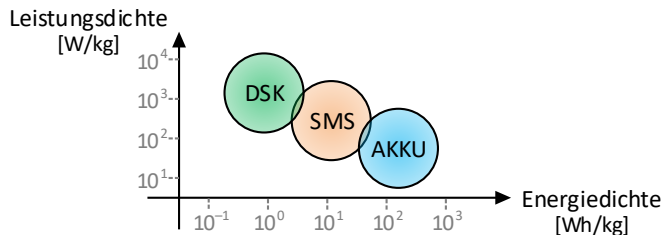


Abb. 1.4: Ragone-Diagramm (vgl. [88] [96])

AKKUs speichern die Energie auf chemischer Basis. Zur Auswahl stehen Blei- (Pb), Nickel-Cadmium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Lithium-Ionen- (Li-Ion)-Batterien [42]. In Nizza wurde von Alstom ein fahrleitungsloser Straßenbahnbetrieb auf einer Länge von insgesamt 1 000 m mit einer NiMH-Batterie erprobt [88]. Für den Bahnbetrieb eignen sich Batterien derzeit aufgrund der geringen Lastzyklenverträglichkeit und der kurzen Lade- und Entladezeiten nur bedingt [34], wobei in der Batterieentwicklung gerade große Fortschritte erzielt werden. Im Jahre 2011 konnte eine von Stadler mit einer Li-Ion-Hochleistungsbatterie ausgestattete Straßenbahn im Testbetrieb eine Fahrstrecke von über 16 km Länge ohne externe Leistungszufuhr zurücklegen. Dieser Versuch stand in Zusammenhang mit dem geplanten fahrleitungslosen Streckenabschnitt durch den Englischen Garten in München [17].

SMS sind mechanische Speicher. Bei diesen rotierenden Speichern dreht sich ein zylindrischer Massenkörper mit variabler Drehzahl um die eigene Achse, der aufgrund seines Massenträgheitsmoments Energie aufnehmen und wieder abgeben kann. [67] zufolge wird der SMS idealerweise von einer permanenterregten Synchronmaschine angetrieben. In den Energieinhalt gehen das Massenträgheitsmoment der Schwungmasse linear und deren Drehzahl quadratisch ein [41] [69]. In langsamlaufenden Systemen werden aus Stahl gefertigte Schwungräder mit Drehzahlen von bis zu $4\,000\text{ min}^{-1}$ eingesetzt, deren Massenträgheitsmomente bei $350\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ liegen. Sie kamen als stationäre Speichersysteme 1999 im Stadtbahnnetz von Hannover [19] und 2007 im Hamburger U-Bahn-Netz [47] zum Einsatz. Die Steuerung und Regelung dieser Speicher wird detailliert in [39] beschrieben. Beispielsweise lassen sich die unterschiedlichen Speicherstrategien mit einer adaptiven Regelung dynamisch an die während des Tages wechselnden Anforderungen anpassen. Schnelllaufende Systeme verwenden für den Massenkörper aufgrund des besseren Berstverhaltens Faserverbundwerkstoffe. Hohe Drehzahlen von über $15\,000\text{ min}^{-1}$ gleichen das im Bereich um die $20\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ liegende geringe Massenträgheitsmoment der Drehmasse aus. Um die Reibung zu minimieren, können Schwungräder magnetisch gelagert werden und in einer Helium-Atmosphäre bzw. in Vakuumpfäßen rotieren [96]. In [38] wird über den Einsatz und die Betriebserfahrungen eines schnelldrehenden SMS berichtet, der seit 2000 in einem Kölner Unterwerk auf einer Ausläuferstrecke im Dauerbetrieb ist. Seit 2007 wird ein stationärer SMS mit einem 165 kg schweren Schwungrad und 6 kWh Speicherkapazität in Zwickau eingesetzt [91]. In Rotterdam wurde in den Jahren 2005 und 2006 eine Straßenbahn von Alstom versuchsweise mit einem SMS auf dem Dach ausgerüstet [88]. Jedoch kommen SMS als mobile Speicher aus Abmessungs- und Sicherheitsgründen sowie aufgrund der gyroskopischen Effekte nur eingeschränkt infrage.

DSK gehören zu den elektrischen Speichern. Bei diesen statischen Speichern gehen die Kapazität der Kondensatoren linear und deren Spannung quadratisch in den Energieinhalt ein. Hier wurden in den letzten Jahren große Entwicklungssprünge gemacht. Einzelne Kondensatorzellen erreichen bei Zellenspannungen von $2,5\text{ V}$ bereits Kapazitäten von mehr als $2\,000\text{ F}$. Der

Speicherblock besteht aus einem Feld mit mehreren hundert seriell und parallel geschalteten Kondensatorzellen. DSK sind im Vergleich zu SMS wartungsarm und zeichnen sich vor allem durch eine hohe Leistungsdichte sowie eine gute Zyklenfestigkeit aus [62] [66]. Eine betriebsspezifische Auslegung von mobilen DSK-Energiespeichern und deren Steuer- und Regelstrategien werden in [52] und [53] vorgestellt. Das stationäre DSK-Speichersystem SITRAS SES von Siemens mit einem Energieinhalt von 2,3 kWh und einer Speicherleistung von 1 MW kommt seit 2002 im regulären Fahrbetrieb u. a. in Portland, Madrid, Köln, Dresden und Bochum-Gelsenkirchen zum Einsatz [34]. Die Verkehrsbetriebe im Rhein-Neckar-Dreieck mit den Städten Mannheim, Heidelberg und Ludwigshafen sind eine der ersten, die Stadtbahnen mit der DSK-Speichertechnologie MITRAC ES von Bombardier im täglichen Fahrgastbetrieb einsetzen [12]. Ein solches Speichermodul hat ein Speichervermögen von 0,75 kWh und eine Speicherleistung von 300 kW. Das Gewicht ist mit 477 kg und die Größe mit 1,90x0,95x0,46 m angegeben [84]. Der Aufbau dieses DSK-Speichersystems sowie die Erfahrungen aus dem Betriebseinsatz werden in [55] geschildert. Auch im Rostocker Straßennetz befinden sich mittlerweile Straßennetze mit diesen Speichern zur Lastspitzenreduktion im Einsatz [3].

1.2.2.4 Speichernutzen

Um das Energieeinsparpotenzial von Speichersystemen abschätzen zu können, wurden in Dresden durch das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme Messungen durchgeführt. Dabei wurde die Leistung im Bremswiderstand einer Straßennbahn im regulären Fahrbetrieb über einen Zeitraum von 104 Tagen gemessen [52]. Beobachtet wurde, dass die ungenutzte Bremsenergie einerseits vom Stadtzentrum zum Stadtrand und andererseits von den Wintermonaten zu den Sommermonaten zunimmt. Erklärbar sind diese Messergebnisse zum einen durch die abnehmende Fahrzeugdichte zum Stadtrand hin und zum anderen durch den geringeren Energieumsatz in den Nebenverbrauchern während der Sommermonate. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass das untersuchte Fahrzeug über keine Fahrgastraumklimatisierung verfügte. Im Mittel konnten 56 % der

verfügbaren Bremsenergie entweder durch die eigenen Hilfsbetriebe oder durch NetZRückspeisung genutzt werden. Die übrigen 44 % wurden ungenutzt dem Bremswiderstand zugeführt. Bezieht man diese ungenutzte Bremsenergie auf die ab dem Unterwerk bezogene Energie, ergibt sich daraus ein Energieeinsparpotenzial von über 20 % [53]. Die Messungen am Bremswiderstand in einer Hamburger U-Bahn ergaben, dass im Innenstadtbereich ein hoher NetZRückspeisegrad vorhanden ist und die Bremswiderstände kaum verwendet werden. Mit dem installierten Speicher am Standrand hingegen werden bis zu 430 MWh/a an Energie eingespart. Damit beträgt die Amortisationszeit für den Speicher unter Berücksichtigung aller Investitions- und Betriebskosten neun Jahre [47]. In Hannover nahmen durch die Inbetriebnahme der beiden stationären Speicher die Häufigkeiten der Netzüberlastungen und die Anzahl der Streckenschalterauslösungen in den Unterwerken ab. Dadurch ließen sich die Zugfahrtszeiten aufgrund der höheren Netzverfügbarkeit verkürzen. Zudem wurde eine Energieeinsparung von rund 10 % gemessen [19]. In Köln konnten mit dem Speicher bis zu 120 kWh/h an Energie eingespart werden [38].

Der mobile Speichereinsatz in Rotterdam führte zu einer Reduzierung der Spitzenleistung [88]. In Mannheim wurden 2011 Verbrauchsmessungen auf einem Stadtbahnfahrzeug durchgeführt. Dazu wurde jede Messtrecke einmal mit und einmal ohne Energiespeicher befahren. Die Einsparung an Traktionsenergie betrug im innerstädtischen Bereich 6,15 %, im städtischen Bereich 19,25 % und im Überlandbereich 29,37 %. In Streckenabschnitten mit Höchstgeschwindigkeiten unterhalb von 30 km/h konnte keine Energieeinsparung nachgewiesen werden. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass für die Messfahrten alle Heiz- und Klimaanlage abgeschaltet und somit nahezu keine potenziellen fahrzeuginternen Abnehmer für die Bremsenergie vorhanden waren [55].

Neben den positiven Erfahrungen mit Speichern gibt es auch gegenteilige. So kam im Dresdner Straßenbahnnetz bereits Ende der 1990er-Jahre ein stationärer Speicher zu Testzwecken an mehreren Standorten zum Einsatz, wobei der erhoffte energetische Effekt aber ausblieb. Die Gründe hierfür werden in [26] nicht näher erläutert. Nach [57] ergaben Untersuchungen im

Stadtbahnnetz von Potsdam, dass der zu erbringende Aufwand für das Nachrüsten von Speichern nicht den Nutzen decken würde. [67] kam zu einem ähnlichen Ergebnis. Ein Speichereinsatz bringt zwar Vorteile mit sich, ist aber nur unter günstigsten Randbedingungen ökonomisch sinnvoll. Dieser Fall trifft zu, wenn bedeutende Mengen an ungenutzter Bremsenergie anfallen, wozu folgende Netzeigenschaften beitragen:

- Hohe Fahrgeschwindigkeiten → große kinetische Energiemengen
- Große Höhendifferenzen → große potenzielle Energiemengen
- Viele Streckentrenner und wenige Fahrzeuge → geringer Bremsenergieaustausch

Diese Voraussetzungen sind in Straßenbahnnetzen weniger gegeben [71]. Alle hier aufgeführten Beispiele dienen als Überblick und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.3 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, mit der unter Berücksichtigung möglichst aller systemrelevanten Zusammenhänge die Energieeffizienz in Nahverkehrsnetzen quantitativ analysiert werden kann. Dies soll an einem realen DC-Netz durchgeführt werden. Darauf aufbauend sind Szenarien mit energieoptimierenden Strategien zu ergründen. Anschließend ist zu bewerten, inwieweit sich diese Maßnahmen im Hinblick auf die Energiebilanz als sinnvoll erweisen.

1.3.1 Problemstellung und Zielsetzung

Schienegebundene und mit DC elektrifizierte Nahverkehrsnetze sind komplexe Systeme, in denen die drei Systemgruppen:

- Infrastruktur
- Fahrzeug
- Betrieb

wie in Abb. 1.5 veranschaulicht in Wechselwirkung zueinander stehen und auf bestimmte Weise miteinander agieren.

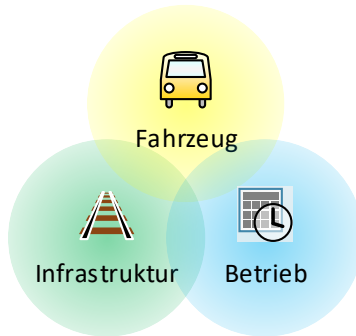


Abb. 1.5: Nahverkehrssystem

Die Beispiele aus dem letzten Kap. 1.2 haben gezeigt, dass in DC-Nahverkehrsnetzen Potenzial besteht, die Energieeffizienz durch bestimmte Maßnahmen zu steigern. Dabei stehen den Einsparungen der Energiekosten immer die Investitions- und Folgekosten dieser Maßnahmen gegenüber. Insofern liegen hinsichtlich ihres Nutzens teilweise kontroverse Bewertungen vor. Die meisten Verkehrsbetreiber besitzen kaum Informationen über die Energieflüsse in ihren historisch gewachsenen Netzen. Die wenigen Erkenntnisse darüber wurden größtenteils aus Messungen gewonnen. Allerdings können Messungen zum einen nur den Ist-Zustand erfassen, so dass die Auswirkungen von möglichen Maßnahmen nur schwer zu beurteilen sind. Zum anderen lassen Messungen an einzelnen Systemelementen nur in begrenztem Maße Rückschlüsse auf das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten untereinander zu. Insbesondere Fahrzeuge verteilen sich aufgrund ihrer Mobilität im gesamten Netz und bilden keine zusammenhängenden Systemeinheiten. Infolgedessen müssten Messungen an allen Systemelementen gleichzeitig durchgeführt werden, was nicht mit vertretbarem Aufwand zu realisieren wäre.

Da sich die Systemparameter unter den einzelnen Verkehrsunternehmen und Einsatzorten teilweise stark unterscheiden, sind ohnehin individuelle Systembetrachtungen nötig. Schlussfolgerungen aus Messungen oder Simulationen in einem System sind nicht ohne weiteres auf ein anderes System übertragbar.

1.3.1.1 Systemkomplexität

Die Fahrzeugflotte eines größeren Verkehrsunternehmens kann weit über hundert Fahrzeuge umfassen. Die Umlauf- und Fahrpläne geben für jedes Fahrzeug die zeitlichen und örtlichen Parameter vor, auf deren Grundlage die Fahrbewegungen durchgeführt werden. Daraus ergeben sich die veränderlichen Positionen und Leistungen der Fahrzeuge. Vor allem im Stadtzentrum treffen viele Linien aufeinander, so dass das Fahrverhalten der Fahrzeuge maßgeblich von den anderen Fahrzeugen beeinflusst wird. Außerdem spielen die Fahrzeug- und Streckenparameter, das Fahrer- und Fahrgastverhalten sowie die Umweltbedingungen eine große Rolle. Allein die planmäßigen Halteabfolgen an den Haltestellen führen täglich zu vielen tausend Anfahr- und Bremsvorgängen. Aufgrund der stochastischen Einflussparameter, wie z. B. variierende Warte- und Haltezeiten vor Signalen oder an Haltestellen, ergeben sich von Tag zu Tag unterschiedliche Fahrzeugkonstellationen, selbst wenn exakt der gleiche Fahrplan zugrunde liegt. Daher können keine hinterlegten Geschwindigkeitsprofile abgefahren werden, da die Fahrer der Fahrzeuge stets auf unvorhersehbare Verkehrssituationen reagieren müssen.

Neben dem Verkehrsnetz ist auch das Versorgungsnetz einzubeziehen. In allgemeinen Energieversorgungsnetzen ist die Netztopologie statisch und die Netzknoten lassen sich eindeutig als Erzeuger (Kraftwerke) und Verbraucher (Fabriken, Haushalte) identifizieren. Da sich die Lasten über den Tagesverlauf nur allmählich ändern, ist eine Netzberechnung im Minuten- bis Viertelstundentakt meistens ausreichend. Im Vergleich dazu sind Bahnenergieversorgungsnetze hochdynamisch und unterscheiden sich vor allem in den folgenden beiden Punkten:

- Kontinuierliche Änderung der Netztopologie
- Unvorhersehbare Lastsprünge bei den Netzknoten

Ursache hierfür sind die Fahrbewegungen. Zum einen muss die Netztopologie ständig neu konfiguriert werden, da viele Netzknoten fortlaufend ihre Positionen ändern und damit ihre Nachbarknoten wechseln. Zum anderen führen die Lastsprünge permanent zu neuen Energieflussaufteilungen. Die Fahrzeuglasten setzen sich zum einen aus den auf den Fahrspielen basierenden Traktionsleistungen und zum anderen aus den fahrzeuginternen Hilfsbetriebeleistungen zusammen. Lastsprünge mit Vorzeichenwechsel bewirken sogar eine Rollenänderung der betreffenden Netzknoten. Dadurch werden Verbraucher von einem Zeitpunkt auf den anderen zu Erzeugern und umgekehrt. Eine allgemeine Problematik der Energieflussberechnung ist, dass die vorgegebenen Fahrzeugleistungen zu nichtlinearen Gleichungssystemen führen und die Energieflüsse nicht analytisch, sondern nur numerisch bestimmt werden können. Die Systemkomplexität wird dadurch erhöht, dass Unterwerke nicht rückspeisefähig sind und demnach keine Verbraucher sein können. Folglich führt die überschüssige Bremsenergie zu einem Ungleichgewicht in der Leistungsbilanz, das durch gezielte Leistungseinschränkungen bei bestimmten Netzknoten wieder in ein Gleichgewicht zu bringen ist.

Um Rückschlüsse über den Austauschgrad der Bremsenergie unter den einzelnen Fahrzeugen ziehen zu können, muss das System im Ganzen betrachtet werden, d. h. eine Zerlegung des Netzes in Teilnetze ist ungeeignet [76]. Der Grund hierfür liegt darin, dass energetisch gesehen alle Fahrzeuge durch das elektrische Netz miteinander verbunden sind. Betrachtet man netzweit nur ein Fahrzeug oder autonom versorgte Fahrzeuge wie z. B. Busse oder Pkws, ist die Fragestellung nach der ungenutzten Bremsenergie deutlich trivialer. Möchte man hingegen das Zusammenspiel der sich bewegenden Fahrzeuge untereinander betrachten, so spielen örtliche und zeitliche Einflussfaktoren eine große Rolle. Neben der Art der Fahrleitungsschaltung haben vor allem die Anzahl und Positionen der beteiligten Unterwerke und Fahrzeuge einen maßgeblichen Einfluss auf die Energieflussaufteilung und damit auf die effektive Nutzung der Bremsenergie [8]. Verschieben sich die Fahrspielzyklen zweier Fahrzeuge nur um wenige Sekunden, so ist das darüber entscheidend, ob sich die Beschleunigungsphase des einen mit der Verzögerungsphase des anderen Fahrzeugs überschneidet oder nicht.

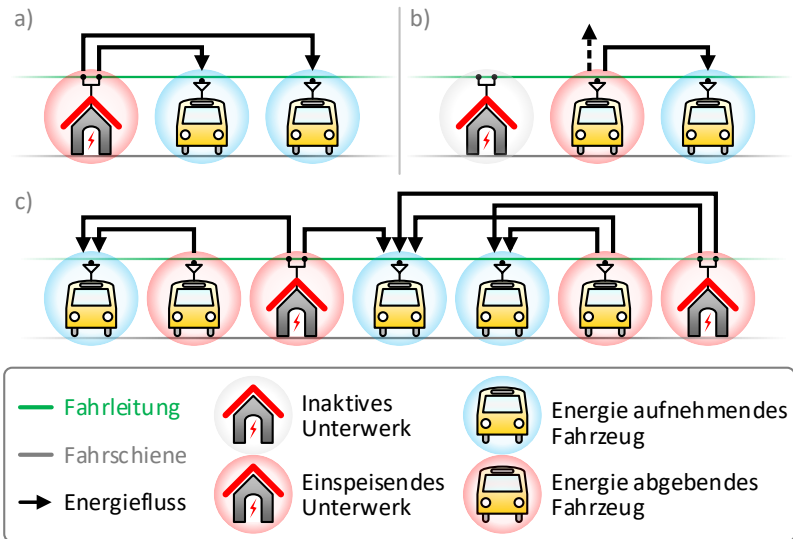


Abb. 1.6: Energieflussaufteilung unter den Fahrzeugen

In Abb. 1.6 werden bezüglich der Energieflussaufteilung drei einfache Beispiele in einem nicht verzweigten Netz aufgezeigt. Im Fall a) und b) stehen ein Unterwerk und zwei Fahrzeuge in Wechselwirkung zueinander. Im Fall c) wird die Anzahl der Unterwerke auf zwei und die Anzahl der Fahrzeuge auf fünf erhöht. In a) nehmen beide Fahrzeuge Energie aus dem DC-Netz auf, die durch das Unterwerk eingespeist wird. In b) gibt das erste Fahrzeug Energie ab, während das zweite Fahrzeug Energie aufnimmt. Im dargestellten Fall kann das erste Fahrzeug mit seiner Bremsenergie das zweite Fahrzeug vollständig versorgen und das Unterwerk bleibt inaktiv. Der gestrichelte Pfeil symbolisiert die überschüssige Bremsenergie, die als Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben wird. Ist die Bremsenergie des ersten Fahrzeugs nicht ausreichend, wäre das Unterwerk nicht mehr inaktiv und würde für das zweite Fahrzeug den fehlenden Betrag zuzüglich der Übertragungsverluste einspeisen. In c) wird eine von vielen Möglichkeiten der Energieflussaufteilung unter mehreren Unterwerken sowie mehreren anfahren- und bremsenden Fahrzeugen aufgezeigt. Wie sich die Energieflüsse letztendlich einstellen hängt von vielen

Faktoren ab, wie z. B. von den einzelnen Leistungsbeträgen oder den Abständen zwischen den einzelnen Teilnehmern.

Im Grundsatz liegt das Problem der Untersuchungsfrage in erster Linie an der Systemkomplexität und der Notwendigkeit der kompletten Systembetrachtung.

1.3.1.2 Lösungsansatz

Zur Lösung der Fragestellung wird eine Simulationsstudie durchgeführt, die das DC-Nahverkehrssystem vereinfacht in einem Modell nachbildet und anschließend die dynamischen Prozesse in einer ausreichend hohen zeitlichen Auflösung durch Simulationsrechnungen analysiert. Damit können ausgewählte Systemzustände untersucht werden, die im realen System gar nicht oder nur durch erheblichen Aufwand zu realisieren sind. Die erlangten Erkenntnisse lassen sich dann auf das reale System übertragen.

In der Literatur sind Ansätze für ein derartiges Vorgehen zu finden. So legt [43] einen objektorientierten Vorschlag zur Modellierung von Bahnenergieversorgungsanlagen vor. In [14] werden Simulationsverfahren zur Zugsteuerung mit Fahrkennlinien entwickelt. [76] befasst sich mit der Berechnung der elektrischen Verhältnisse bei DC-Bahnen. Die beiden Lastflussprogramme TOPAS von der AEG und SIDYZUG von Siemens werden in [11] vorgestellt. Mit SIDYZUG wurden die dynamischen Zustände von DC-Bahnen in [29] und [38] nachgebildet. Zudem wurden bereits einige Simulationstools in Matlab/Simulink umgesetzt, um den Energieverbrauch einer Straßenbahn mit und ohne Energiespeicher zu untersuchen [5] [6] [7]. Dabei handelt es sich zumeist um vereinfachte Modelle, mit denen es möglich ist, ein bis zwei Unterwerke und Fahrzeuge mit vorgegebenen Fahrspielzyklen in einem unvermaschten Netz zu simulieren. Darüber hinaus stehen diverse kommerzielle Programme für die Zugfahrtsimulation mit integrierter Lastflussberechnung zur Verfügung, mit denen vorwiegend Systemauslegungen in DC- und AC-Bahnsystemen durchgeführt werden. Als Beispiele hierfür sind die Simulationswerkzeuge SINAnet von ELBAS/SIGNON [32] [61], μ PAS/ZFS von Proleitec [1], FABEL von ENOTRAC [71] und Sitras Sidytrac von Siemens zu nennen. OpenPowerNet ist eine Netzberechnungssoftware des Instituts für Bahntechnik aus Dresden, die

mit dem Eisenbahnbetriebssimulator OpenTrack der ETH Zürich in einer Co-Simulation läuft [40].

Diese Programme kamen jedoch für die hier beschriebene Problemstellung aus verschiedenen Gründen nicht infrage. Entweder waren sie nicht verfügbar, konnten nur kleine Netze mit wenigen Knoten abbilden, besaßen nicht den gewünschten Detaillierungsgrad oder konnten in der Problemlösung bezüglich der nicht rückspeisefähigen Unterwerke wenig überzeugen. Davon abgesehen sind insbesondere bei kommerziellen Softwareprodukten umfangreichere Modellerweiterungen oder Einblicke in die Berechnungsabläufe gar nicht oder nur bedingt möglich. Gerade bei der Systemanalyse mit unterschiedlichen durchzuspielenden Szenarien sind diese Programmfunktionen jedoch besonders wichtig. Um z. B. Speicher in das System zu integrieren, muss das Anwendungsprogramm dementsprechend modifizierbar sein. Aus diesen Gründen wurde die Entscheidung getroffen, ein eigenes Simulationsprogramm zu entwickeln.

1.3.2 Aufbau und Inhalt der Arbeit

In dieser Arbeit werden die wichtigsten Modellelemente aus dem entwickelten Simulationsprogramm mit dem Namen „BSTsim“ vorgestellt. Dabei wird auf programmiertechnische Details weitgehend verzichtet. Der Aufbau der Software bzw. dieser Arbeit ist in Abb. 1.7 dargestellt. Insgesamt gliedert sich die Arbeit in sechs Kapitel.

Kap. 2 befasst sich mit der Netzmodellierung (Dateneingabe) und beinhaltet den Modellaufbau sowie die grafische Netzgestaltung.

Die Computersimulation (Datenverarbeitung) berechnet die Fahrspiele im Verkehrsnetz (Kap. 3) und die Energieflüsse im Versorgungsnetz (Kap. 4). Diese beiden Hauptprozesse sind untereinander gekoppelt. Sie greifen auf die implementierten Fahrer- und Fahrzeugmodelle sowie auf die entwickelten Verfahren zur Lösung der nichtlinearen elektrischen Netzgleichungen zurück. In Kap. 5 werden die Simulationsergebnisse (Datenausgabe) ausgewertet und interpretiert. Als Grundlage für die Untersuchungen wird das Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetz herangezogen.

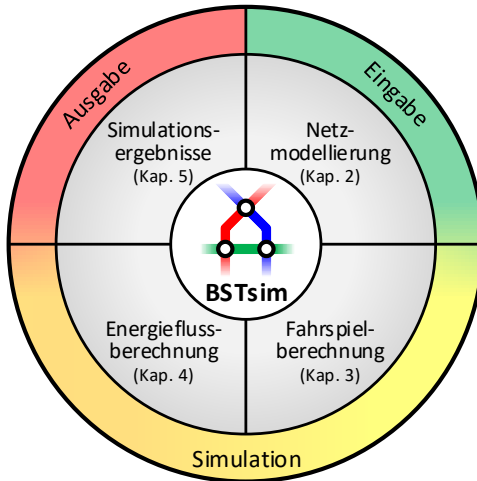


Abb. 1.7: Aufbau des Simulationsprogramms „BSTsim“

Abschließend wird in Kap. 6 eine Zusammenfassung dieser Arbeit und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten gegeben.

2 Netzmodellierung

Das Simulationsprogramm „BSTsim“ wurde in der Entwicklungsumgebung Visual Studio von Microsoft in der Programmiersprache C# erstellt und nach dem MVVM-Entwurfsmuster [87] aufgebaut. Weitere Informationen hierzu können dem Anhang A.1 entnommen werden.

In diesem Kapitel wird der Modellaufbau des zu simulierenden Netzwerks beschrieben, das sich in die folgenden beiden Netze unterteilen lässt:

- Spurgeführtes Verkehrsnetz (Kap. 2.1)
- Elektrisches Versorgungsnetz (Kap. 2.2)

In Abb. 2.1 sind die Hauptelemente dieser beiden Netze dargestellt.

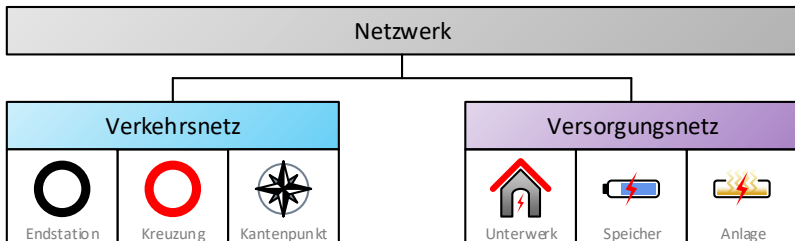


Abb. 2.1: Spurgeführtes und elektrisches Netzwerk

2.1 Verkehrsnetz

Das Verkehrsnetz bildet maßstabsgetreu das Schienennetz ab, das für die spurgeführte Fortbewegung der Fahrzeuge erforderlich ist. In Abb. 2.2 wird die im Simulationsprogramm umgesetzte grafische Gestaltung des Verkehrsnetzes an einem kleinen Beispielnetz dargestellt.

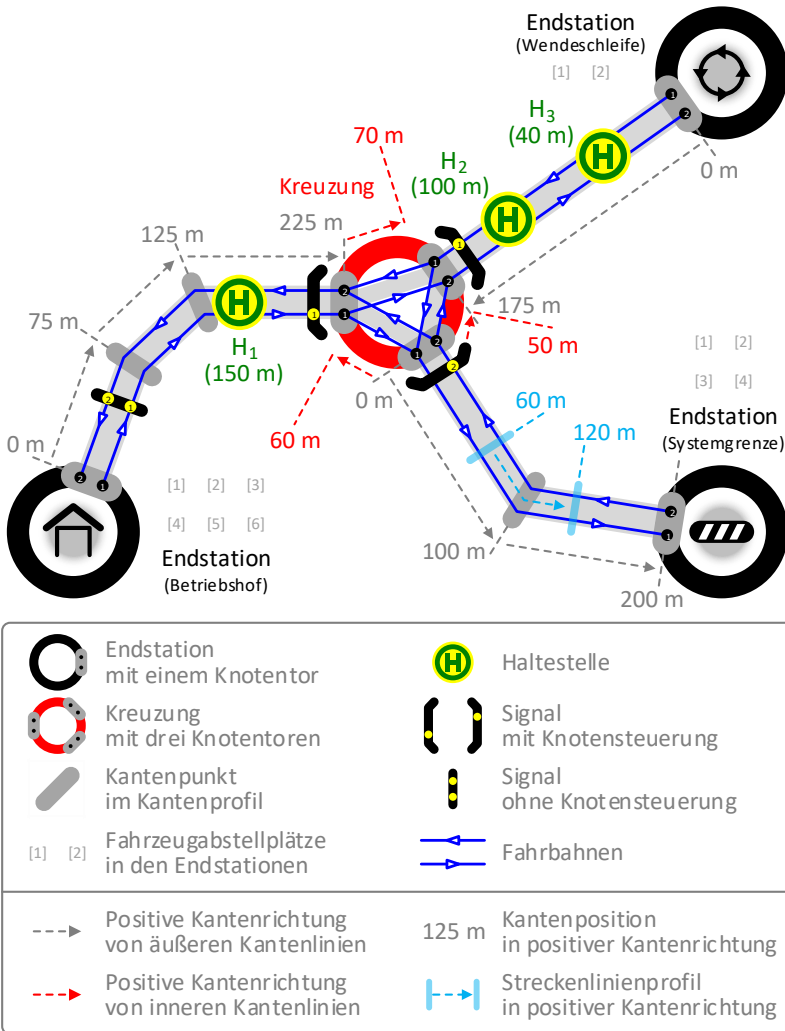


Abb. 2.2: Verkehrsnetzinfrastruktur

2.1.1 Verkehrsknoten

Verkehrsknoten sind zweidimensionale Knoten (2D-Knoten), die das Grundgerüst der Verkehrsnetztopologie bilden. Ein Überblick über diese Knoten wird in Abb. 2.3 gegeben. Endstationen werden durch schwarze Kreise und Kreuzungen durch rote Kreise abgebildet. Mit Kantenpunkten lassen sich angewinkelte Verkehrskanten realisieren.

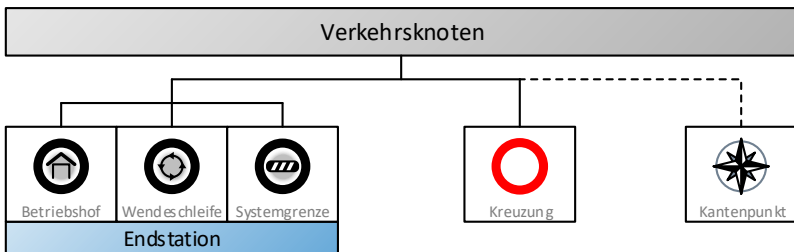


Abb. 2.3: Knoten des Verkehrsnetzes

Die Positionen (Koordinaten) und Größen (Durchmesser) der Knoten können geändert werden. Zudem lässt sich jeder Knoten wieder löschen. Die Grundeigenschaften der Knoten sind in der Tab. 2.1 aufgelistet.

Tab. 2.1: Knotenparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Mindestabstand (2D-Knoten)	$d_{2D,min}$	50	[m]
x-Koordinate	x	–	[m]
y-Koordinate	y	–	[m]
Durchmesser	D_K	100	[m]
Max. Anzahl an Knotentoren	$n_{T,max}$	4	[–]

Endstationen und Kreuzungen besitzen einen Knotenkörper, um deren räumliche Ausdehnung abbilden zu können. Der Durchmesser D_K ist nach unten auf

50 m und nach oben auf 250 m begrenzt. Der Zugang in bzw. aus dem Knotenkörper erfolgt über sogenannte Knotentore (T). Kantenpunkte hingegen besitzen keinen Knotenkörper und keine Knotentore.

2.1.1.1 Knotenverbindungen

Jeweils zwei Verkehrsknoten lassen sich durch eine Verkehrskante miteinander verbinden. Im Folgenden werden die auf diese Weise erstellten Verkehrskanten als äußere Kanten bezeichnet und die beiden beteiligten Knoten als:

- Erster Knoten: Alpha-Knoten (A)
- Zweiter Knoten: Omega-Knoten (Z)

In Abb. 2.4 ist der linke Knoten $A(x_A, y_A)$ mit dem rechten Knoten $Z(x_Z, y_Z)$ verbunden. Für das Vorzeichen der Kantenrichtung gilt:

- $A \rightarrow Z$ (positive Kantenrichtung): $+\vec{e}_{AZ}$
- $Z \rightarrow A$ (negative Kantenrichtung): $-\vec{e}_{AZ}$

Die Grundlagen zur Vektorgeometrie sind im Anhang A.1.2.2 zu finden. Der Einheitsvektor der Kantenlinie \vec{e}_{AZ} ergibt sich nach Formel (A.3) und (A.5) aus den beiden Knotenkoordinaten.

Nachdem eine Kante erstellt wurde, werden an den beiden Knoten automatisch folgende Knotentore erstellt:

- A: Alpha-Knotentor (AT)
- Z: Omega-Knotentor (ZT)

Mit der Knotenkoordinate und dem halbierten Knotendurchmesser erhält man die Koordinate des Alpha-Knotentors $AT(x_{AT}, y_{AT})$ durch:

$$\begin{pmatrix} x_{AT} \\ y_{AT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix} + \left(0,5 \cdot D_{K,A} \cdot (+\vec{e}_{AZ}) \right) \quad (2.1)$$

und die Koordinate des Omega-Knotentors $ZT(x_{ZT}, y_{ZT})$ durch:

$$\begin{pmatrix} x_{ZT} \\ y_{ZT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_Z \\ y_Z \end{pmatrix} + \left(0,5 \cdot D_{K,Z} \cdot (-\vec{e}_{AZ}) \right) \quad (2.2)$$

Wird A oder Z verschoben bzw. $D_{K,A}$ oder $D_{K,Z}$ geändert, müssen die Koordinaten von AT und ZT aktualisiert werden.

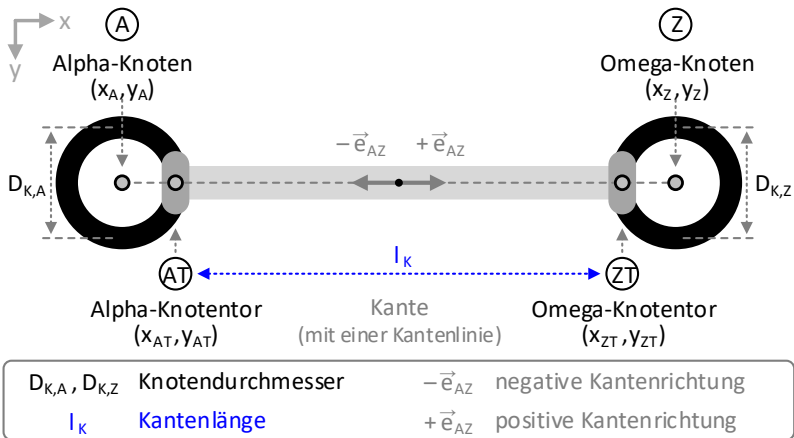


Abb. 2.4: Kante als Knotenverbindung

Die Kante besteht im ursprünglichen Zustand, d. h. ohne die im Kap. 2.1.1.4 beschriebenen Kantenpunkte, aus einer Kantenlinie. Die Kantenlänge l_K ist der Abstand zwischen AT und ZT und wird nach Formel (A.4) berechnet. Die Kantenpositionen s_K der beiden Knotentore sind damit:

- AT: $s_K = 0$
- ZT: $s_K = l_K$

Die Kante kann nicht erstellt werden, falls:

- A und Z der gleiche Knoten ist,
- A und Z bereits durch eine Kante verbunden sind,
- A oder Z bereits $n_{T,max}$ Knotentore haben,
- der Abstand zwischen AT und ZT kleiner als $d_{2D,min}$ ist.

Sobald ein Knoten verschoben, verkleinert oder vergrößert wird, ändern sich die Längen aller mit ihm verbundenen Kanten. Bei diesen Vorgängen ist zu

beachten, dass zwischen allen benachbarten Knoten der in Tab. 2.1 definierte Mindestabstand $d_{2D,min}$ zuzüglich der Knotenradien eingehalten wird. Dazu müssen die Knotenkoordinaten ggf. nach Formel (A.9) aus dem Anhang A.1.2.3 angepasst werden.

2.1.1.2 Endstationen

Nach Abb. 2.3 werden Betriebshöfe, Wendeschleifen und Systemgrenzen unter dem Obergriff Endstation (E) zusammengefasst. Jede Endstation verfügt über einen Knotenkörper mit in Reihen und Spalten angeordneten Fahrzeugabstellplätzen.

Betriebshöfe sind überdachte Abstellhallen, in denen die Fahrzeuge auch gereinigt, gewartet und repariert werden. An Wendeschleifen verweilen die Fahrzeuge kurzzeitig zwischen einer Hin- und Rückfahrt. Systemgrenzen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie keine Fahrzeuge deponieren. Sie repräsentieren die im Kap. 1.2.1 erwähnten Systemwechselstellen, an denen ein Übergang in ein Fremdnetz stattfindet. Die Fremdsysteme werden als Black Box modelliert, d. h. es werden nur ihre Input-Output-Beziehungen betrachtet. Damit aber die Anzahl der Fahrzeuge während der Simulation konstant bleibt, werden in den Systemgrenzen alle Fahrzeuge gesammelt, die sich momentan außerhalb des DC-Nahverkehrsnetzes befinden.

2.1.1.3 Kreuzungen

Kreuzungen stellen die einzige Möglichkeit dar, das Netzwerk zu verzweigen. Der Knotenkörper einer Kreuzung enthält innere Kanten, die alle Knotentore der Kreuzung verbinden. Die inneren Kanten werden automatisch erstellt, sobald der Kreuzung ein neues Knotentor hinzugefügt wird. Ebenso werden beim Löschen des Knotentors die dazugehörigen inneren Kanten wieder automatisch gelöscht. Die Anzahl der inneren Kanten n_{IK} wird durch die Anzahl der Knotentore n_T bestimmt:

$$n_{IK} = n_T \cdot \frac{n_T - 1}{2} \quad (2.3)$$

Wird eine Kreuzung verschoben, müssen ihre Knotentore und inneren Kanten aktualisiert werden. Ist die Kreuzung über äußere Kanten mit anderen Kreuzungen verbunden, ändern sich in den Nachbarkreuzungen auch die Positionen der Knotentore sowie die Längen der inneren Kanten.

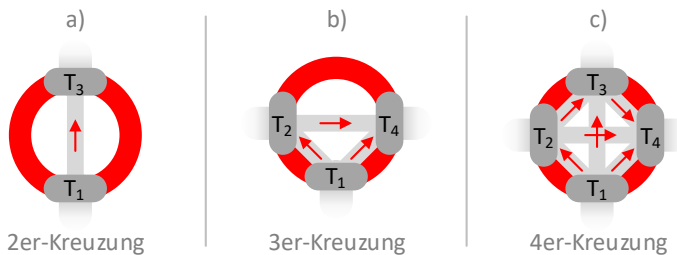


Abb. 2.5: Kreuzung mit zwei, drei und vier Knotentoren

In Abb. 2.5 sind drei Kreuzungen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Knotentoren abgebildet. Aus verkehrstechnischer Sicht sind Kreuzungen nicht als einzelne Knoten zu betrachten, sondern aufgrund ihrer Knotentore als eine Menge von Teilknoten, die eine Verzweigung des Netzwerks in verschiedene Richtungen ermöglichen. Nach Tab. 2.1 ist die Anzahl der Knotentore $n_{T,max}$ pro Knoten auf vier begrenzt. Die Anzahl der inneren Kanten ergibt sich aus Formel (2.3). Die roten Pfeile kennzeichnen die positiven Kantenrichtungen der inneren Kanten. Im Gegensatz zu den äußeren Kanten sind die Kantenrichtungen von inneren Kanten nicht beeinflussbar und werden in Abhängigkeit der Reihenfolge, in der die Knotentore erstellt wurden, festgelegt.

2.1.1.4 Kantenprofil

Das Kantenprofil einer neu erstellten Kante besteht zunächst aus einer Kantenlinie ohne Kantenpunkte. Wie aus Abb. 2.6 hervorgeht, unterteilen eingefügte und anschließend verschobene Kantenpunkte die äußere Kante in mehrere Kantenlinien mit verschiedenen Richtungsvektoren. Dadurch lässt sich die ursprüngliche Kantenlänge l_K auf die Länge der einzelnen Kantenlinien vergrößern.

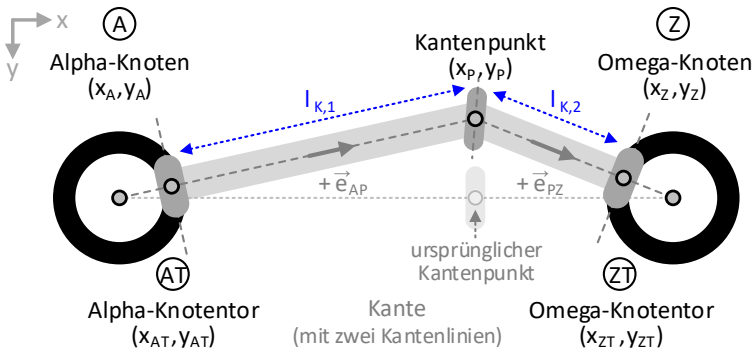


Abb. 2.6: Kantenpunkt auf einer Kante

2.1.2 Verkehrskanten

Verkehrskanten verbinden die einzelnen Knotentore von Endstationen oder Kreuzungen. Für jede Verkehrskante lassen sich die Profile der Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur aus Abb. 2.7 definieren.

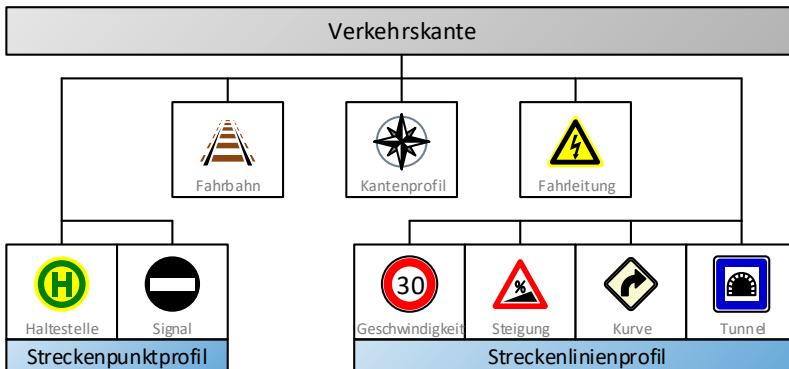


Abb. 2.7: Kante des Verkehrsnetzes

Das im Kap. 2.1.1.4 vorgestellte Kantenprofil bildet die geometrische Basis für alle weiteren Profile. Im Fahrbahnprofil werden die Schienen für das Verkehrsnetz (Kap. 2.1.2.1) und im Fahrleitungsprofil die Leitungen für das Versorgungsnetz (Kap. 2.2) erstellt.

2.1.2.1 Fahrbahnprofil

Die Fahrschienen können im Fahrbahnprofil der Verkehrskanten nach den Fahrtrichtungen ausgewählt und erstellt werden. Jede Fahrbahn besteht aus einem Schienenpaar, das als Gleis bezeichnet wird und jeweils an einem Fahrbahnanschluss beginnt bzw. endet. Die Fahrbahnanschlüsse befinden sich in den Knotentoren und werden bei Bedarf automatisch erstellt.

In Abb. 2.8 a) ist die Anordnung der Fahrbahnanschlüsse einer äußeren Kante zu sehen. Bei äußeren Kanten sind die Fahrbahngleise im Alpha- und Omega-Knotentor auf beiden Kantenseiten identisch:

- Gleis 0: Mittleres Gleis bei eingleisigen Fahrstrecken
- Gleis 1: Erstes Gleis auf der rechten Kantenseite (R)
- Gleis 2: Erstes Gleis auf der linken Kantenseite (L)
- Gleis 3: Zweites Gleis auf der rechten Kantenseite (R)
- Gleis 4: Zweites Gleis auf der linken Kantenseite (L)

Bei inneren Kanten ist das nicht der Fall. Hier sind die vier in Abb. 2.8 b)-e) aufgezeigten Kombinationen möglich, in Abhängigkeit davon, mit welchen beiden Knotentorarten (AT oder ZT) die innere Kante verbunden wurde.

Die Koordinaten der Fahrbahnanschlüsse $(x_{F,g}, y_{F,g})$ für die einzelnen Gleise $g = 0, \dots, 4$ werden mit den Knotentorkoordinaten $T(x_T, y_T)$, dem Fahrbahngleisabstand $d_{F,g}$ und dem nach Formel (A.7) bestimmten orthogonalen Einheitsvektor der Kantenlinie \vec{e}_{AZ}^\perp ermittelt:

$$\begin{pmatrix} x_{F,g} \\ y_{F,g} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} + (d_{F,g} \cdot (+\vec{e}_{AZ}^\perp)) & \text{für rechte Kantenseite} \\ \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} + (d_{F,g} \cdot (-\vec{e}_{AZ}^\perp)) & \text{für linke Kantenseite} \end{cases} \quad (2.4)$$

Die Berechnung der gleisabhängigen Koordinaten in Kantenpunkten und Signalen erfolgt auf ähnliche Weise. Hierbei sind allerdings bezüglich der

Fahrbahngeometrie einige Besonderheiten zu beachten. Detailliertere Informationen hierzu werden im Anhang A.1.2.6 erläutert.

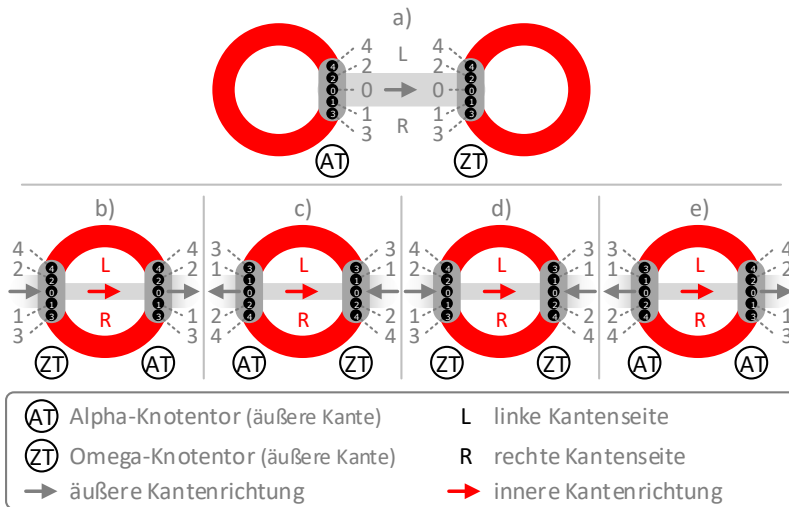


Abb. 2.8: Fahrbahnanschlüsse bei äußeren und inneren Kanten

Für die Gleisbelegung gibt es insgesamt 13 Möglichkeiten. Fünf für äußere Kanten (Abb. 2.9) und acht für innere Kanten (Abb. 2.10).

Auf äußeren Kanten zeigt die Fahrtrichtung der Fahrbahnen auf der rechten Kantenseite in die positive und auf der linken Kantenseite in die negative Kantenrichtung. Folgende Gleisbelegungen sind möglich:

- Abb. 2.9 a) Zweigleisigkeit: Ein Gleis in jede Fahrtrichtung
- Abb. 2.9 b) Viergleisigkeit: Zwei Gleise in jede Fahrtrichtung
- Abb. 2.9 c) Eingleisigkeit: Ein Gleis für beide Fahrtrichtungen

Zweigleisige äußere Kanten stellen den Standardfall dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die maximale Anzahl der Gleise auf vier beschränkt. Bei eingleisigen Kanten müssen Signale sicherstellen, dass die Fahrbahn nur für eine Fahrtrichtung freigegeben wird.

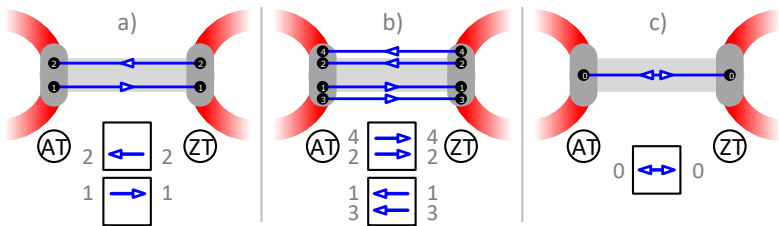


Abb. 2.9: Gleisbelegung auf äußeren Kanten

Auf inneren Kanten sind folgende Gleisbelegungen umsetzbar:

- Abb. 2.10 a) Zweigleisigkeit mit einem Gleis in jede Fahrtrichtung
- Abb. 2.10 b) Beginn (R) und Ende (L) der Viergleisigkeit
- Abb. 2.10 c) Ende (R) und Beginn (L) der Viergleisigkeit
- Abb. 2.10 d) Beginn (R und L) der Eingleisigkeit
- Abb. 2.10 e) Ende (R und L) der Eingleisigkeit

Im Standardfall ermöglichen zweigleisige innere Kanten in 3er- oder 4er-Kreuzungen die Fahrbahnverzweigung in zwei oder drei unterschiedliche Richtungen. In den anderen vier Fällen liegen 2er-Kreuzungen vor, die den Übergang von der Zweigleisigkeit zur Ein- bzw. Viergleisigkeit herstellen.

In Abb. 2.10 entspricht die abgebildete Knotentorkombination dem Fall aus Abb. 2.8 c), d. h. linksseitig das AT und rechtsseitig das ZT.

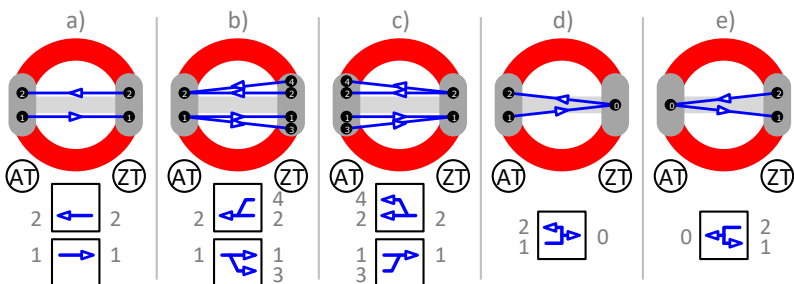


Abb. 2.10: Gleisbelegung auf inneren Kanten

2.1.2.2 Streckenpunktprofile

Profilpunkte sind eindimensionale Knoten (1D-Knoten), die im Gegensatz zu den 2D-Knoten nicht frei auf der Ebene, sondern nur auf ihrer zugrundeliegenden Kante verschoben werden können. Dabei ist es erforderlich, die zweidimensionalen Koordinaten in Kantenpositionen s_K umzurechnen. Dies erfolgt mit den im Anhang A.1.2.4 aufgeführten Formeln. Profilpunkte können nur auf äußeren Kanten erstellt werden.

Jeder Profilpunkt muss den in Tab. 2.2 definierten Mindestabstand $d_{1D,min}$ zu seinem Vorgänger und Nachfolger einhalten. Dieser Abstand gilt auch nach dem AT ($s_K = 0$) und vor dem ZT ($s_K = l_K$), was bedeutet:

- Kantenposition des ersten Profilpunkts: $\geq d_{1D,min}$
- Kantenposition des letzten Profilpunkts: $\leq (l_K - d_{1D,min})$

Zu den Streckenpunktprofilen gehören die Haltestellen- und Signalprofile. Sie werden so bezeichnet, da sie nur Profilpunkte und keine Profillinien beinhalten.

Die Haltestellen spielen eine wesentliche Rolle bei der Erstellung von Fahrplänen, die im Kap. 2.3 behandelt werden. Damit die Haltestellen voneinander zu unterscheiden sind, ist jede Haltestelle eindeutig zu benennen. Für jedes Signal lassen sich Signallichter für die gewünschten Fahrbahnen aktivieren. Die Steuerung der Signale wird im Kap. 2.5 beschrieben.

2.1.2.3 Streckenlinienprofile

Zu den Streckenlinienprofilen gehören das Geschwindigkeits-, Steigungs-, Kurven- und Tunnelprofil. Im ursprünglichen Zustand existiert in jedem Streckenlinienprofil eine Profillinie, für die eine der spezifischen Eigenschaften aus Tab. 2.2 festgelegt werden kann. Durch zusätzliche Profilpunkte erhöht sich die Anzahl der Profillinien und damit die Möglichkeit, ein differenzierteres Streckenlinienprofil zu erstellen.

Das Geschwindigkeitsprofil besteht aus Profillinien mit definierten Geschwindigkeitslimits v_{lim} . Die zulässige Geschwindigkeit wird häufig im innerstädtischen Bereich, an Straßenkreuzungen und in engen Kurven

begrenzt. Auf Fahrstrecken ohne Tempolimit fahren die Fahrzeuge mit der Höchstgeschwindigkeit, sofern dies aus betrieblicher Sicht möglich ist.

Tab. 2.2: Kantenprofilparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Mindestabstand (1D-Knoten)	$d_{1D,min}$	25	[m]
Geschwindigkeitslimit	v_{lim}	13,89	[m/s]
Steigungsgrad	g_S	0	[‰]
Kurvenradius	r_K	50	[m]
Tunnelquerschnittsfläche	A_T	40	[m ²]

Das Steigungsprofil bildet die Höhenunterschiede im Gelände mittels Steigungsgraden ab. Hierfür werden den Profillinien die gemittelten Steigungen von zusammengefassten Streckenabschnitten zugewiesen. Die Berechnung der Steigungsgrade g_S erfolgt nach Formel (A.16) aus dem Anhang A.1.2.5. Das Steigungsprofil ist das einzige Streckenlinienprofil mit einem vorzeichenbehafteten Parameter, weshalb hier die Kantenrichtung beachtet werden muss.

Das Kurvenprofil enthält Profillinien mit Kurvenradien r_K . Nach BOStrab liegt der kleinste befahrbare Bogenhalbmesser bei 25 m [20]. Auf geraden Strecken geht der Wert von r_K gegen unendlich. Streckenkrümmungen sind vor allem in Kreuzungen und an Kantenpunkten vorzufinden, wo sie in Kombination mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auftreten.

Das Tunnelprofil wird bei einer unterirdischen Streckenführung benötigt. Die Tunnelquerschnittsfläche A_T dient als Parameter für die Profillinien. Insbesondere Tunnelröhren von U-Bahnen haben ein kleines Lichtraumprofil. Der Grund hierfür ist, dass die Energieversorgung durch in Bodennähe verlegte Stromschienen erfolgen kann, weil U-Bahnen einen eigenen, vom Straßenverkehr getrennten Fahrweg haben. Dadurch entfallen die Stromabnehmer auf dem Fahrzeugdach.

2.2 Versorgungsnetz

Das Versorgungsnetz bildet das Leitungsnetz ab, das zur Energieversorgung der Fahrzeuge erforderlich ist.

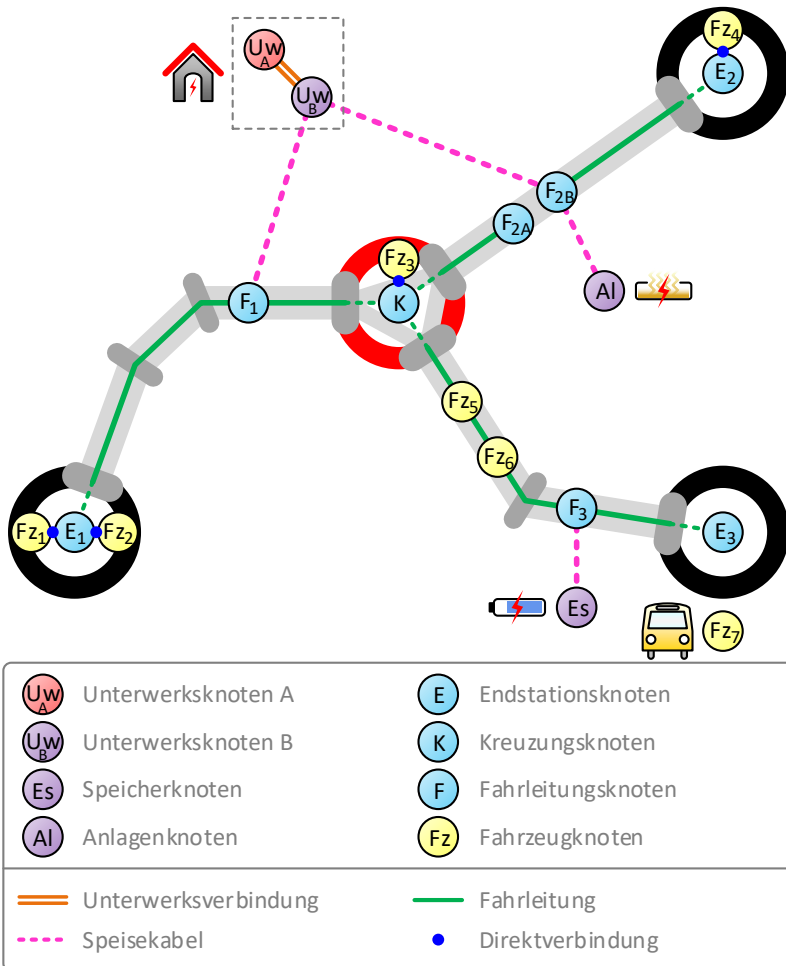


Abb. 2.11: Versorgungsnetzinfrastruktur

In Abb. 2.11 ist das Versorgungsnetz als Gegenstück zum in Abb. 2.2 abgebildeten Verkehrsnetz dargestellt. Das skizzierte Versorgungsnetz entspricht aber nicht der Anzeige im Simulationsprogramm, da aus Übersichtlichkeitsgründen nur bestimmte elektrische Netzwerkelemente angezeigt werden. Die elektrotechnischen Grundlagen sind im Anhang A.3 vorzufinden.

2.2.1 Versorgungsknoten

Versorgungsknoten sind 2D-Knoten, die die Versorgungsnetztopologie definieren. Ein Überblick über diese Knoten wird in Abb. 2.12 gegeben.

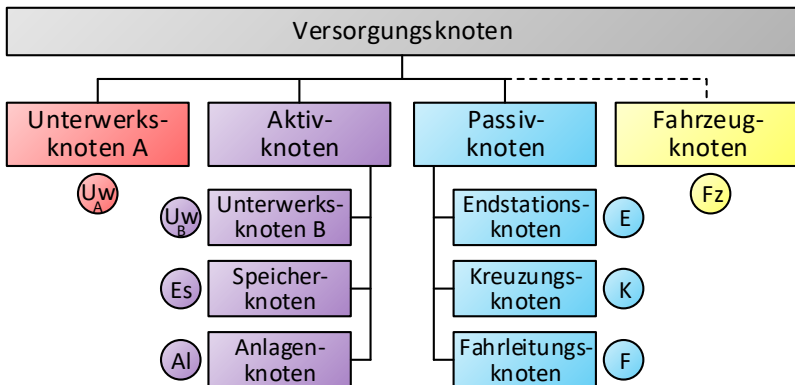


Abb. 2.12: Knoten des Versorgungsnetzes

2.2.1.1 Aktive elektrische Knoten

Aktive elektrische Knoten sind leistungsaktiv und beeinflussen damit direkt die Energieflussverteilung. Zur Verfügung stehen folgende aktive Knoten:

- Unterwerke (Uw)
- Speicher (Es)
- Anlagen (Al)

Unterwerke werden intern durch zwei verbundene elektrische Knoten ($U_{WA}+U_{WB}$) modelliert. U_w , E_s und A_l lassen sich auf gleiche Weise wie die 2D-Knoten des Verkehrsnetzes erstellen, verschieben, modifizieren und löschen. Jedoch ist kein Knotendurchmesser definierbar, da elektrische Knoten gegenüber Endstationen oder Kreuzungen über keine räumliche Ausdehnung verfügen.

Fahrzeuge (F_z) sind aktive elektrische Knoten, die allerdings erst im späteren Simulationsablauf hinzukommen. Sie werden für die Energieflussberechnung (Kap. 4) als dynamische Knoten in das elektrische Netz eingebunden, wodurch sich die Topologie des Versorgungsnetzes fortlaufend ändert.

Nähere Informationen zur Modellierung der aktiven elektrischen Knoten folgen in den Kap. 4.2.2 bis Kap. 4.2.5.

2.2.1.2 Passive elektrische Knoten

Passive elektrische Knoten sind leistungsneutral und nehmen daher keinen direkten Einfluss auf die Energieflussverteilung.

Endstationen (E) und Kreuzungen (K) bilden nicht nur die Grundstruktur für das Verkehrsnetz, sondern auch für das Versorgungsnetz. Für jeden E - bzw. K -Verkehrsknoten wird automatisch ein E - bzw. K -Versorgungsknoten erstellt.

Die auf den Kanten liegenden Fahrleitungsknoten (F) erweitern das im Kap. 2.1.2 erwähnte Fahrleitungsprofil. Sie lassen sich wie alle anderen ein-dimensionalen Profilpunkte auf ihrer zugrundeliegenden Kante verschieben. Jeder Fahrleitungsknoten gehört einer der folgenden beiden Arten an:

- Einspeisepunkt
- Streckentrenner

Der Einspeisepunkt besteht aus einem Profilpunkt. Hingegen setzt sich der Streckentrenner aus zwei Profilpunkten zusammen, wobei die dazwischenliegende Profillinie elektrisch nicht leitend ist, d. h. einen unendlich hohen Widerstand hat.

2.2.1.3 Anzahl der elektrischen Knoten

Mit der folgenden Anzahl an Versorgungselementen:

- n_{UW} Unterwerke
- n_{ES} Speicher
- n_{Al} Anlagen
- n_{FZ} Fahrzeuge
- n_E Endstationsknoten
- n_K Kreuzungsknoten
- n_F Fahrleitungsknoten (n_{F1} Einspeisepunkte, n_{F2} Streckentrenner)

beträgt die Gesamtanzahl n_{EK} der elektrischen Knoten im Netzwerk:

$$n_{EK} = 2 n_{UW} + n_{ES} + n_{Al} + n_{FZ} + n_E + n_K + n_{F1} + 2 n_{F2} \quad (2.5)$$

Unterwerke und Streckentrenner stellen elektrische Doppelknoten dar. Die Doppelknoten von Unterwerken sind elektrisch verbunden, die von Streckentrennern hingegen nicht.

Das Beispiel-Versorgungsnetz aus Abb. 2.11 besteht aus einem Unterwerk, einem Speicher, einer Anlage, drei Endstationsknoten, einem Kreuzungsknoten, drei Fahrleitungsknoten (zwei Einspeisepunkte und ein Streckentrenner) und sieben Fahrzeugknoten. Nach Formel (2.5) ergibt sich dadurch ein Netzwerk mit 19 elektrischen Knoten.

2.2.2 Versorgungsleitungen

Die Versorgungsknoten werden durch Versorgungsleitungen miteinander verbunden. In Abb. 2.13 sind die verschiedenen Leitungsarten aufgelistet. Darüber hinaus werden alle Verbindungskombinationen aufgezeigt, die zwischen einem elektrischen Alpha-Knoten (A) und einem elektrischen Omega-Knoten (Z) möglich sind.

Das Beispiel-Versorgungsnetz aus Abb. 2.11 setzt sich aus 17 elektrischen Leitungen zusammen, davon eine Unterwerksverbindung, vier Speisekabel, acht Fahrleitungen und vier Direktverbindungen. Die Anzahl der Fahrleitungen und Direktverbindungen ist aufgrund der mobilen Fahrzeugknoten dynamisch.

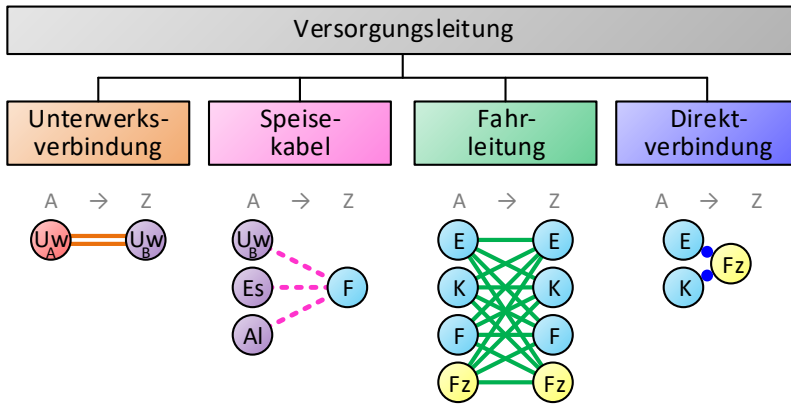


Abb. 2.13: Leitungen des Versorgungsnetzes

2.2.2.1 Leitungsarten

Die Unterwerksverbindung verknüpft den Unterwerksdoppelknoten. Der elektrische Widerstand dieser Leitung entspricht dem definierbaren Innenwiderstand des Unterwerks.

Die aktiven Knoten Uw , Es und Al lassen sich nur durch Speisekabel (SK) mit den auf den Kanten liegenden passiven Fahrleitungsknoten (F) verbinden. Speisekabel werden nicht maßstabsgetreu abgebildet, so dass die Leitungslängen explizit angegeben werden müssen. Standardmäßig sind Speisekabel widerstandslos.

Die Fahrleitungen (FL) entsprechen den Profillinien des Fahrleitungsprofils. Im ursprünglichen Zustand existiert eine Fahrleitung pro äußere Kante. Mit jedem zusätzlichen Fahrleitungsknoten erhöht sich die Anzahl der Fahrleitungen und damit die Möglichkeit, die Leitungsart zu ändern. Um die Anzahl der Versorgungsknoten möglichst klein zu halten, wird das Fahrleitungsprofil in Kreuzungen vereinfacht. Folglich befindet sich in jeder Kreuzung genau ein K-Versorgungsknoten und die auf den inneren Kanten liegenden Fahrleitungen sind widerstandslos. Fahrleitungen auf äußeren Kanten haben standardmäßig

einen unendlich hohen Widerstand. Wird diese Einstellung nicht geändert, bleibt der erstellte Streckenabschnitt fahrleitungslos.

Sogenannte Direktverbindungen (DV) existieren für Fahrzeuge, die sich momentan in Betriebshöfen, Wendeschleifen oder Kreuzungen befinden. Sie sind widerstandslos und verbinden diese Fahrzeuge direkt mit dem Versorgungsnetz.

Die vordefinierten Leitungsparameter sind in der Tab. 2.3 vorzufinden.

Tab. 2.3: Leitungsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Widerstand der Unterwerksverbindung	R_{UW}^*	0,20	[Ω]
Max. Anzahl an Speisekabeln je Unterwerk, Speicher oder Anlage	$n_{SK,max}$	6	[–]
Länge des Speisekabels	l_{SK}	100	[m]
Widerstandsbelag des Speisekabels	R'_{SK}	0	[Ω/km]
Widerstandsbelag der Fahrleitung	R'_{FL}	∞	[Ω/km]
Widerstand der Direktverbindung	R_{DV}	0	[Ω]

Bei Speisekabeln und Fahrleitungen stellt die Leitungslänge einen wichtigen Leitungsparameter dar. Damit die elektrischen Parameter nicht für jede einzelne Leitung erneut definiert werden müssen, lassen sich im Simulationsprogramm Versorgungsprofile (Kap. 2.2.2.4) anlegen, die in einer zentralen Liste gespeichert werden. Daraufhin kann jeder Leitung eines dieser Versorgungsprofile zugewiesen werden. Aus den darin hinterlegten Widerstandsbelägen berechnet das Programm mithilfe der Leitungslänge und den Formeln aus dem Anhang A.3.1.3 die individuellen Widerstandswerte der Leitungen. Weitere Informationen hierzu liefert das Leitungsmodell, das im Anhang A.3.2 beschrieben wird.

2.2.2.2 Hin- und Rückleiter

Um einen geschlossenen DC-Stromkreis zwischen den Unterwerken und den Fahrzeugen herzustellen, ist ein zweipoliger Anschluss notwendig:

- Pluspol am Hinleiter: Einspeisekabel + Fahrleitung
- Minuspol am Rückleiter: Rückspeisekabel + Fahrschiene

Die Hinleiter übertragen die Traktionsenergie zu den Fahrzeugen, während die Rückleiter die Stromrückführung zu den Unterwerken übernehmen. Das Fahrzeug stellt mit dem Stromabnehmer an der Fahrleitung den Kontakt zum Pluspol und mit seinen Stahlrädern an der Fahrschiene den Kontakt zum Minuspol her.

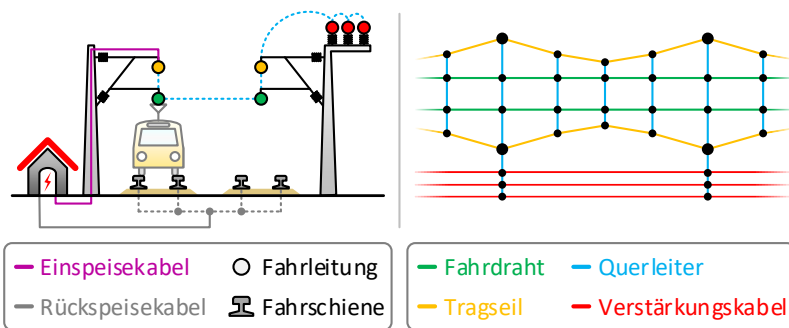


Abb. 2.14: Versorgungsleitungen im DC-Netz

In Abb. 2.14 ist auf der linken Seite ein Querschnitt der Leitungsschaltung eines DC-Netzes dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Fahrleitung aus der Sicht von oben abgebildet. Sie kann aus den folgenden Komponenten bestehen, wobei die letzten drei optional sind:

- Fahrdraht
- Querleiter
- Tragseil
- Verstärkungskabel

Bei einer zweigleisigen Fahrstrecke verlaufen die beiden Fahrdrähte und die vier Fahrschienen parallel. Durch in regelmäßigen Abständen angebrachte Querleiter werden die Fahrdrähte bzw. die Fahrschienen miteinander verbunden. Auf diese Weise können die Leitungen beider Fahrtrichtungen (Gleis 1 und 2) genutzt werden, was einer Verdopplung der Leitungsquerschnitte entspricht. Fahrleitungen, die nur aus Fahrdrähten und Querleitern bestehen, werden als Einfachoberleitungen bezeichnet. Sie kommen vor allem im Stadtzentrum aus ästhetischen Gründen zum Einsatz. Bei höheren Geschwindigkeiten außerhalb des Stadtzentrums werden in der Regel Kettenoberleitungen eingesetzt, bei denen der Fahrdraht von einem darüber liegenden Tragseil auf konstanter Höhe gehalten wird [90]. Auf Überlandstrecken mit großen Unterwerksabständen können zusätzlich noch weitere Verstärkungskabel parallel zur Fahrstrecke verlegt werden.

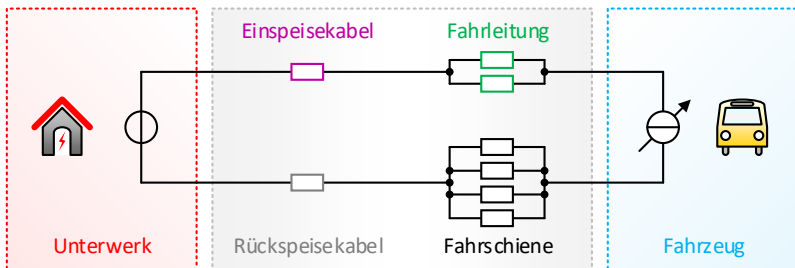


Abb. 2.15: Hin- und Rückleiter

Der geschlossene Stromkreis für eine zweigleisige Fahrstrecke zwischen einem Unterwerk (Spannungsquelle) und einem Fahrzeug (variable Stromquelle) ist aus Abb. 2.15 ersichtlich.

2.2.2.3 Leitungsschaltung

In Abb. 2.16 wird ein Ausschnitt aus einem Versorgungsnetz mit zwei Unterwerken dargestellt. Die Speisebereiche werden an den Einspeisekabeln unterwerksseitig durch DC-Schnellstromschalter gegen Kurzschlüsse geschützt.

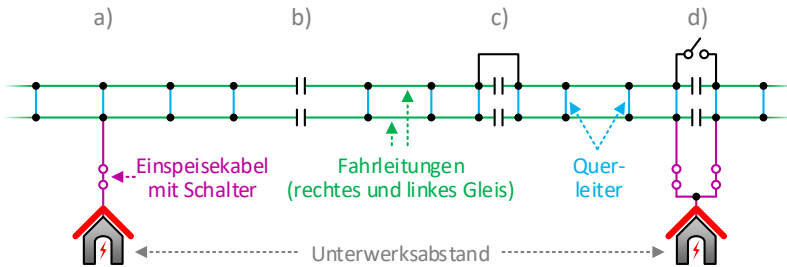


Abb. 2.16: Einspeisepunkte und Streckentrenner

In DC-Nahverkehrsnetzen sind in erster Linie die folgenden vier Leitungsschaltungen vorzufinden:

- Abb. 2.16 a) Einspeisepunkt
- Abb. 2.16 b) Streckentrenner
- Abb. 2.16 c) Trennstelle mit herausnehmbarer Brücke
- Abb. 2.16 d) Trennstelle mit handbetriebenem Kuppelschalter

Einspeisepunkte (a) und Streckentrenner (b) sind nach Kap. 2.2.1.2 durch einen Fahrleitungsknoten modellierbar. Der Einspeisepunkt ist mit einem Unterwerk verbunden und der Streckentrenner unterteilt die Fahrleitung in einzelne Speisebereiche. Die überbrückte Trennstelle (c) kommt ohne Fahrleitungsknoten aus, indem sie als durchgehende Fahrleitung modelliert wird. Die Trennstelle mit Kuppelschalter (d) stellt eine Kombination aus (a) und (b) dar und ist durch zwei Fahrleitungsknoten realisierbar. Trotz des geöffneten Kuppelschalters kann zwischen den beiden Speisebereichen über die Einspeisekabel und die Sammelschiene des Unterwerks ein Energieaustausch stattfinden. Daher kann (d) vereinfachend als (a) modelliert werden, wodurch ein elektrischer Knoten eingespart wird. Der Bremsenergieaustausch zwischen den Fahrzeugen wird durch die folgenden beiden Maßnahmen erhöht:

- Längskupplung, d. h. zweiseitige Speisung der Speisebereiche
- Querkupplung, d. h. Parallelschaltung der Fahrleitungen

Bei einer längs durchgekuppelten Fahrleitungsanlage werden die Speisebereiche von mehreren Unterwerken versorgt. Die Modellierung der Querkupplungen wird vereinfacht, da für jeden Querleiter zwei zusätzliche elektrische Knoten notwendig wären. Daher werden die Fahrleitungen der einzelnen Gleise in einer Parallelschaltung zusammengefasst.

2.2.2.4 Versorgungsprofile

Im Simulationsprogramm lassen sich beliebig viele Versorgungsprofile anlegen. Die Hin- und Rückleiter können in bis zu vier Leitergruppen (LG):

- Anzahl n_{LG} [-]
- Vermaschungsgrad q_{LG} [%]

mit jeweils bis zu acht Leiterelementen (LE):

- Anzahl n_{LE} [-]
- Querschnitt A_{LE} [mm²]
- Abnutzungsgrad q_{LE} [%]
- Elektrische Leitfähigkeit κ_{LE} [S·(m/mm²)]

untergliedert werden. Die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer (Fahrleitung) ist mit $58 \cdot 10^6$ S/m deutlich höher als die von Eisen (Fahrschiene) mit $10 \cdot 10^6$ S/m [60]. Dennoch sind die Widerstandsbeläge der Fahrleitungen (Hinleiter), bedingt durch die großen Querschnittsunterschiede, um ein Vielfaches höher als die der Fahrschienen (Rückleiter). Weitere Informationen zu den Fahrleitungs- und Fahrschientypen bei DC-Bahnen werden im Anhang A.3.2.3 gegeben.

Der Leitwertbelag für den Hinleiter $G'_{L,1}$ bzw. Rückleiter $G'_{L,2}$ ergibt sich nach Formel (A.66) aus der Summe der einzelnen parallelgeschalteten Leitergruppen und Leiterelemente:

$$G'_{L,1/L,2} = \frac{q_{LG}}{100 \%} \cdot \sum_{k=1}^{n_{LG}} \left(n_{LE,k} \cdot \kappa_{LE,k} \cdot \left(\left(1 - \frac{q_{LE,k}}{100 \%} \right) \cdot A_{LE,k} \right) \right) \quad (2.6)$$

Um eine Verdopplung der Anzahl an Versorgungsknoten zu vermeiden, werden die Leitungsbeläge vom Hin- und Rückleiter in einer Reihenschaltung zusammengefasst. Daraus ergibt sich nach Formel (A.65) der Gesamtleitwertbelag G'_L der Leitung aus:

$$G'_L = \frac{1}{\frac{1}{G'_{L,1}} + \frac{1}{G'_{L,2}}} \quad (2.7)$$

In Abb. 2.17 wird das an einem Beispiel verdeutlicht. Auf der linken Seite werden vier Knoten benötigt. Das Schienenpotenzial beträgt DC 3 V. Auf der rechten Seite wird der gleiche Fall mit zwei Knoten modelliert. Hier beziehen sich alle Knotenpotenziale (Knoten 1 und 2) auf das Erdpotenzial (Knoten 0). Der Spannungsabfall auf der Fahrschiene wird zum Spannungsabfall auf der Fahrleitung hinzuaddiert. Der Nachteil dabei ist, dass das Schienenpotenzial nicht mehr berechnet werden kann.

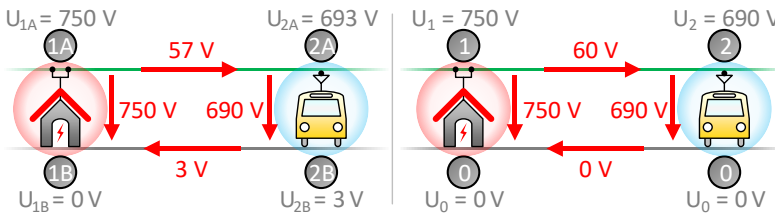


Abb. 2.17: Fahrleitungs- und Fahrschiennenpotenziale

2.3 Fahrpläne

Im Simulationsprogramm lassen sich beliebig viele Fahrpläne anlegen. Im ÖPNV werden regelmäßig bediente Fahrwege als Linien bezeichnet, die sich aus einer Abfolge von Fahrplanhalten zusammensetzen. In der Regel werden für jede Linie zwei Fahrpläne erstellt, einen für die Hinfahrt und einen für die Rückfahrt. In Taktfahrplänen wiederholen sich die Fahrplanfahrten in periodischen Zeitabständen.

Der Zeilenindex nummeriert die horizontal angeordneten Fahrplanhalte in aufsteigender Reihenfolge. Pro Fahrplanhalt muss eine im Verkehrsnetz erstellte Haltestelle sowie das dazugehörige Fahrbahngleis ausgewählt werden. Die drei letzten Parameter d)-f) beziehen sich jeweils auf den Fahrweg zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrplanhalten. In der n-ten Zeile wird der Fahrweg zwischen dem (n-1)-ten und n-ten Fahrplanhalt betrachtet. Die Fahrwegbestimmung wird im Kap. 2.3.2 beschrieben. Sobald ein Fahrweg zwischen zwei Fahrplanhalten ermittelt werden kann, wird die Fahrweglänge automatisch berechnet und angezeigt. Die Fahrwegzeit gibt minutengenau die geplante Fahrdauer zwischen den beiden Fahrplanhalten an. Sie beträgt standardmäßig 1 min und kann im Intervall von 0-15 min eingestellt werden. Sie hat keinen Einfluss auf den späteren Simulationsablauf, sondern erleichtert die Eingabe der Fahrplanzeiten. Der örtliche Fahrgastindex definiert das erwartete Fahrgastaufkommen in Bezug auf den Ort.

2.3.1.2 Fahrplanfahrt

Für jede Fahrplanfahrt sind folgende Parameter definiert (Abb. 2.18):

- g) Spaltenindex
- h) Zeitlicher Fahrgastindex

Der Spaltenindex nummeriert die vertikal angeordneten Fahrplanfahrten in aufsteigender Reihenfolge. Der zeitliche Fahrgastindex definiert das erwartete Fahrgastaufkommen in Bezug auf die Zeit.

Die Kurve der Verkehrsnachfrage wird üblicherweise durch eine ausgeprägte Morgenspitze und einen breiteren Nachmittagsbuckel charakterisiert. In Abb. 2.19 wird ein typischer Verlauf des zeitlichen Fahrgastindex über den Tagesablauf aufgezeigt.

Jede Fahrplanfahrt enthält für jede Zeile ein Feld, das folgende Fahrplanzeiten beinhaltet (Abb. 2.18):

- i) Ankunftszeit
- j) Abfahrtszeit

In einem neu erstellten Fahrplan sind zunächst alle Fahrplanzeiten undefiniert. In der Regel werden Ankunftszeiten aufgerundet und Abfahrtszeiten abgerundet, da Verspätungen beim Fahrgast zwar unerwünscht, Verfrühungen jedoch inakzeptabel sind [85]. Für jedes Fahrplanfeld lässt sich die Ankunftszeit als Uhrzeit in [h] und [min] und die Abfahrtszeit als Haltezeit in [min] angeben. Die Haltezeit ist die Abweichung der Abfahrtszeit von der Ankunftszeit und liegt standardmäßig bei 0 min. In diesem Fall wird im Fahrplanfeld nur die Ankunftszeit angezeigt. Das bedeutet, dass die Fahrt unmittelbar nach dem Fahrgastwechsel fortgesetzt wird. Folglich warten im späteren Simulationsablauf selbst verfrühte Fahrzeuge nicht an den Haltestellen, da sie sonst die Fahrbahn für nachfolgende Fahrzeuge blockieren würden. Möchte man hingegen erzwingen, dass ein Fahrzeug bis zu einer bestimmten Uhrzeit an einer Haltestelle verweilt, muss explizit die Abfahrtszeit definiert werden. In diesem Fall weichen die Ankunfts- und Abfahrtszeiten voneinander ab und im entsprechenden Fahrplanfeld werden beide Uhrzeiten übereinander angegeben. Die Haltezeit ist maximal auf eine Dauer von 15 min beschränkt. Generell müssen alle Fahrplanzeiten einer Fahrplanfahrt aufsteigend sortiert sein.

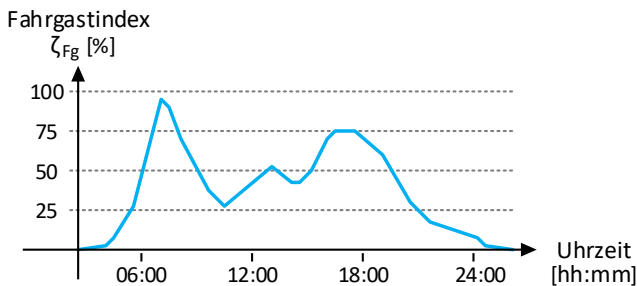


Abb. 2.19: Zeitlicher Fahrgastindex

Jeder Fahrplan enthält eine große Menge an Fahrplanfeldern. Im Simulationsprogramm sind daher Funktionen implementiert, die eine zeiteinsparende Eingabe der Fahrplanzeiten ermöglichen. Beispielsweise werden mithilfe der

Fahrwegzeiten (Abb. 2.18 e)) alle weiteren Felder einer Fahrplanfahrt ausgefüllt, sobald eine Fahrplanzeit eingegeben wird. Zudem ist es möglich, eine Taktfolge mit bestimmten Taktzeiten anzugeben. In diesem Fall werden alle Felder mehrerer Fahrplanfahrten in einem Schritt ausgefüllt.

Es ist nicht erforderlich, in jedes Fahrplanfeld eine Fahrplanzeit einzutragen. Bei leeren Feldern werden die entsprechenden Fahrplanhalte ausgelassen. Damit lassen sich einerseits Fahrten zu Nebenverkehrszeiten und andererseits Fahrten von Eilzügen abbilden.

2.3.2 Fahrwegbestimmung

Der Gesamtfahrweg eines Fahrplans besteht aus den einzelnen Fahrwegen zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Fahrplanhalten. Bei n Fahrplanhalten besteht der Gesamtfahrweg aus $(n-1)$ Fahrwegen. Grundvoraussetzung für die Fahrwegbestimmung ist, dass an allen Fahrplanhalten jeweils eine Haltestelle in Kombination mit dem Fahrbahngleis ausgewählt wurde und Fahrbahnen diese Haltepunkte verbinden.

2.3.2.1 Fahrwege zwischen zwei Haltestellen

In Abb. 2.20 wird die Fahrwegbestimmung an einem einfachen Beispiel mit einer Endstation (E_1), drei Kreuzungen (K_1, K_2, K_3) und fünf Haltestellen (H_1, H_2, H_3, H_4, H_5) auf vier äußeren Kanten aufgezeigt. Die Start- und Zielposition eines Fahrwegs wird über die beiden Kantenpositionen an der Start- und Ziel-Haltestelle bestimmt. Die Kantenrichtung beeinflusst die Kantenpositionen und die Anordnung der Fahrbahngleise. Sie ist in der Richtung von (AT) nach (ZT) positiv. Auf den Kanten verlaufen die Fahrbahnen zwischen den Fahrbahnanschlüssen immer durchgehend. Abgesehen von der Kante zwischen K_2 und K_3 mit einem eingleisigen Fahrbahnprofil sind alle übrigen Kanten zweigleisig.

Die Fahrwegbestimmung zwischen zwei Fahrplanhalten ist einfach, wenn sich die beiden Haltestellen in einer Abfolge auf der gleichen Kante befinden und das Gleis identisch ist. In diesem Fall liegt der Fahrweg auf einem bestimmten Abschnitt der zugrundeliegenden Fahrbahn. Im abgebildeten Beispiel existiert

für die Haltestellenabfolge $H_2 \rightarrow H_3$ der Fahrweg (1), wenn an beiden Haltestellen das Gleis 2 ausgewählt wurde. Die Haltestellenabfolge $H_2 \rightarrow H_3 \rightarrow H_4$ erfolgt für das gleiche Gleis über die beiden Fahrwege (2) und (3). Für die Gegenrichtung, z. B. für $H_4 \rightarrow H_2$, muss Gleis 1 ausgewählt werden. Daraus ergibt sich der Fahrweg (4), bei dem H_3 übersprungen wird.

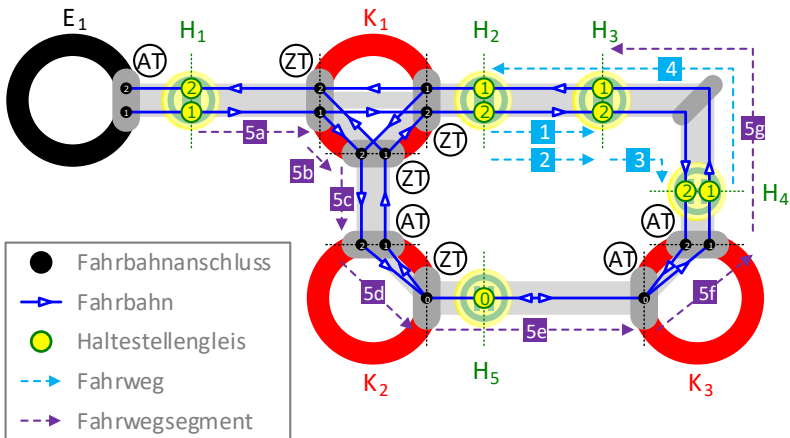


Abb. 2.20: Fahrwege zwischen den Haltestellen

Die Fahrwegbestimmung wird wesentlich aufwändiger, wenn die Haltestellen von zwei aufeinanderfolgenden Fahrplanhalten nicht mehr auf der gleichen Kante oder auf dem gleichen Gleis liegen. In diesem Fall existieren mindestens drei Fahrwegsegmente, deren Fahrbahnen auf unterschiedlichen Kanten liegen:

- Erstes Fahrwegsegment (beginnend an der Start-Haltestelle)
- Mittlere Fahrwegsegmente
- Letztes Fahrwegsegment (endend an der Ziel-Haltestelle)

Befinden sich zwischen der Kante mit der Start-Haltestelle und der Kante mit der Ziel-Haltestelle weitere Kanten und Kreuzungen, so existieren mehrere mittlere Fahrwegsegmente.

Zum besseren Verständnis wird hierzu die Haltestellenabfolge $H_1 \rightarrow H_3$ betrachtet. Der Fahrweg (5) besteht aus sieben Fahrwegsegmenten. Das erste und letzte Fahrwegsegment (5a) bzw. (5g) ist einfach zu bestimmen. (5a) besteht aus dem Fahrbahnabschnitt von H_1 auf Gleis 1 in Richtung K_1 und (5g) aus dem Fahrbahnabschnitt von K_3 in Richtung H_3 auf Gleis 1. Die mittleren Fahrwegsegmente (5b – 5f) zwischen dem Start-Fahrbahnschluss im ZT der Kante $E_1 - K_1$ und dem Ziel-Fahrbahnanschluss im AT der Kante $K_3 - K_1$ bestehen aus ganzen Fahrbahnen. Da in großen vermaschten Netzen ggf. mehrere Verbindungsmöglichkeiten existieren, wird immer die kürzeste Fahrbahnabfolge zwischen dem Start- und Ziel-Fahrbahnanschluss gesucht. Im Simulationsprogramm erfolgt diese Suche mit dem Dijkstra-Algorithmus (Kap. 2.3.2.2).

Eingleisige Haltestellen erschweren die Fahrwegbestimmung zusätzlich, da sich die Anzahl der Kombinationen an möglichen Start- und Ziel-Fahrbahnanschlüssen erhöht und deshalb die Suche nach der kürzesten Fahrbahnabfolge mehr als einmal durchgeführt werden muss.

Über Endstationen können keine Fahrwege bestimmt werden. Fahrwege, die das Einfahren in eine Endstation bzw. das Ausfahren aus einer Endstation beinhalten, sind Gegenstand der Umlaufplanung (Kap. 2.4.2).

2.3.2.2 Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus ist aus der Graphentheorie bekannt und berechnet die kürzesten Pfade als Knotenfolge in einem kantengewichteten Graphen [22]. Bei der Fahrwegbestimmung entsprechen die Knoten den Fahrbahnanschlüssen und die Kanten den Fahrbahnen. Die Kantengewichtung stellt die Fahrbahnlänge dar. Für den Algorithmus müssen die folgenden drei Listen erstellt werden:

- Anschlussliste (AL)
- Distanzliste (DL)
- Vorgängerliste (VL)

Die AL enthält alle noch nicht untersuchten Fahrbahnanschlüsse. Zu Beginn befinden sich alle Anschlüsse des Verkehrsnetzes in der AL. In der DL und VL

wird für jeden Anschluss ein Feld reserviert. Anfangs wird in der DL die Distanz des Start-Anschlusses auf null und alle anderen Einträge auf unendlich gesetzt. In der VL sind zunächst nur leere Einträge enthalten.

Nachdem die Listen initialisiert wurden, beginnt der Schleifendurchlauf. Als Erstes wird der aktuelle Anschluss ausgewählt. Er ist der noch nicht untersuchte Anschluss aus der AL mit der kürzesten Distanz in der DL. Für ihn werden alle Distanzen zu seinen Nachbaranschlüssen berechnet. Als Nachbaranschlüsse kommen nur diejenigen Anschlüsse infrage, die mit dem aktuellen Anschluss verbunden sind und zugleich noch nicht untersucht wurden, d.h. die sich noch in der AL befinden. Bei gerichteten Fahrbahnen werden als Nachbaranschlüsse nur diejenigen Anschlüsse berücksichtigt, die sich am Ende der betrachteten Fahrbahn befinden. Bei eingleisigen Fahrbahnen entfällt diese Überprüfung, da sie ungerichtet sind. Die Distanz zum Nachbaranschluss setzt sich aus der Distanz des aktuellen Anschlusses in der DL und der Distanz der Fahrbahn zum Nachbaranschluss zusammen. Falls die neue Distanz kleiner als der in der DL gespeicherte Wert ist, wird dieser in der DL ersetzt und der aktuelle Anschluss als Vorgängeranschluss in die VL eingetragen. Als Letztes wird der aktuelle Anschluss aus der AL entfernt. Der Schleifendurchlauf wird solange wiederholt, bis der aktuelle Anschluss der gewünschte Ziel-Fahrbahnanschluss ist.

2.3.3 Fahrgastaufkommen

Das Fahrgastaufkommen hat einen großen Einfluss auf die betrieblichen Vorgänge in der Fahrspielberechnung (Kap. 3). Es wird angenommen, dass es stochastischen Einflüssen unterliegt. Die Grundlagen hierzu sind im Anhang A.1.3 zu finden.

2.3.3.1 Fahrgastanzahl

Die momentane Fahrgastanzahl n_{Fg} ergibt sich aus den zusteigenden und aussteigenden Fahrgästen an den Haltestellen. Während des Simulationsablaufs wird n_{Fg} an jeder Haltestelle für die Fahrt bis zum nächsten Fahrplanhalt

bestimmt. Für n_{Fg} werden während des Simulationsablaufs Zufallsgrößen mithilfe von Formel (A.24) und den beiden normalverteilten Parametern:

- Erwartungswert der Fahrgastanzahl $\mu_{n,Fg}$
- Standardabweichung der Fahrgastanzahl $\sigma_{n,Fg}$

generiert. n_{Fg} darf weder negativ sein noch die Fahrgastkapazität $n_{FzFg,max}$ aus dem Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) überschreiten.

In den Fahrplänen ist pro Fahrplanhalt ein örtlicher Fahrgastindex $\zeta_{Fg,s}$ und pro Fahrplanfahrt ein zeitlicher Fahrgastindex $\zeta_{Fg,t}$ definiert. Der Fahrgastindex für ein bestimmtes Fahrplanfeld ζ_{Fg} ergibt sich aus dem Mittelwert des örtlichen und zeitlichen Fahrgastindex:

$$\zeta_{Fg} = \frac{\zeta_{Fg,s} + \zeta_{Fg,t}}{2} \quad (2.8)$$

Fahrgastindizes werden in [%] angegeben und dienen der Bestimmung des zu erwartenden Fahrgastaufkommens. Ein Fahrgastindex von 100 % bezieht sich auf die maximale Fahrgastanzahl $n_{Fg,max}$, die in den allgemeinen Simulationseinstellungen im Kap. 3.1.1.2 in der Tab. 3.2 auf S. 82 definiert wird. Folglich ergibt sich $\mu_{n,Fg}$ aus:

$$\mu_{n,Fg} = \frac{\zeta_{Fg}}{100 \%} \cdot n_{Fg,max} \quad (2.9)$$

Die Streuung der Fahrgastzahlen wird hingegen nicht in jedem Fahrplanfeld, sondern allgemein gültig mit $\sigma_{n,Fg}$ in Tab. 3.2 definiert.

Die Fahrgastanzahl beeinflusst die folgenden beiden Simulationsgrößen:

- Fahrgastgewicht m_{Fg}
- Fahrgastwechselzeit Δt_{Fg}

m_{Fg} erhöht als zusätzliches Gewicht die Gesamtmasse des Fahrzeugs und wird in Formel (3.52) zur Berechnung der Fahrwiderstände berücksichtigt.

2.3.3.2 Fahrgastwechselzeit

Die Fahrgastwechselzeit Δt_{Fg} ist die Zeitspanne, die die Fahrgäste zum Ein- und Aussteigen an einer Haltestelle benötigen. Für Δt_{Fg} werden während des Simulationsablaufs Zufallsgrößen mithilfe von Formel (A.24) und den beiden normalverteilten Parametern:

- Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit $\mu_{\Delta t, Fg}$
- Standardabweichung der Fahrgastwechselzeit $\sigma_{\Delta t, Fg}$

generiert. Δt_{Fg} darf nicht negativ sein und muss ggf. nach unten auf null begrenzt werden.

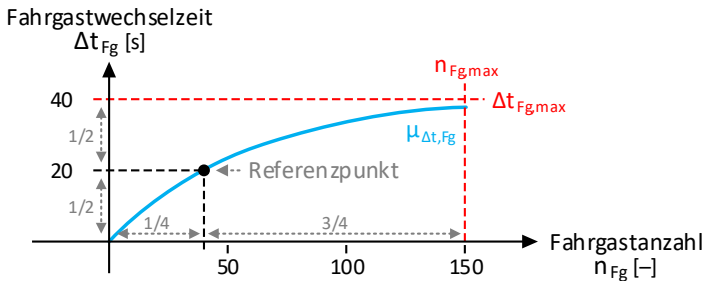


Abb. 2.21: Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit

Im Simulationsprogramm wird $\mu_{\Delta t, Fg}$ nach dem Modell des beschränkten Wachstums bestimmt:

$$\mu_{\Delta t, Fg} = \Delta t_{Fg, max} \cdot (1 - e^{-k_{Fg} \cdot n_{Fg}}) \quad (2.10)$$

Dieses Wachstumsmodell wurde gewählt, da angenommen wird, dass die Fahrgastwechselzeit mit zunehmender Anzahl an Fahrgästen zwar monoton steigt, jedoch nur degressiv zunimmt. Nach oben ist sie durch die in Tab. 3.2 festgelegte Wachstumsschranke $\Delta t_{Fg, max}$ begrenzt. Je größer dieser Wert ist, desto länger halten die Fahrzeuge an den Haltestellen.

Die Wachstumskonstante k_{Fg} wird mit einem Referenzpunkt bestimmt, der sich im Koordinatensystem in Abb. 2.21 an folgender Position befindet:

- Horizontale Achse:
25 % ($f_{n,Fg} = 0,25$) der maximalen Fahrgastanzahl $n_{Fg,max}$
- Vertikale Achse:
50 % ($f_{t,Fg} = 0,5$) der beschränkten Fahrgastwechselzeit $\Delta t_{Fg,max}$

Setzt man diesen Referenzpunkt in Formel (2.10) ein:

$$(f_{t,Fg} \cdot \Delta t_{Fg,max}) = \Delta t_{Fg,max} \cdot (1 - e^{-k_{Fg} \cdot (f_{n,Fg} \cdot n_{Fg,max})}) \quad (2.11)$$

und löst diese Gleichung nach k_{Fg} auf, erhält man:

$$k_{Fg} = -\frac{\ln(1 - f_{t,Fg})}{f_{n,Fg} \cdot n_{Fg,max}} = 0,0185 \quad (2.12)$$

Die Streuung der Fahrgastwechselzeiten wird allgemein gültig mit $\sigma_{\Delta t,Fg}$ in Tab. 3.2 definiert. Wegen der Streuung liegt Δt_{Fg} manchmal über $\Delta t_{Fg,max}$.

2.4 Umlaufpläne

Im Simulationsprogramm lassen sich beliebig viele Umlaufpläne anlegen. Umlaufpläne sind Tabellen mit einer Abfolge von Umlaufplanfahrten und legen den Einsatz der Fahrzeuge mit dem Ziel fest, die Fahrpläne möglichst effizient abzuwickeln. Zur Vereinfachung entspricht jeder Umlaufplan einem konkreten Fahrzeug, das allerdings erst zu Beginn der Simulation erstellt wird. Die Fahrzeugtypen werden mit dem Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) definiert und stehen in einer Liste zur Verfügung.

2.4.1 Umlaufplantabelle

In Abb. 2.22 ist ein Ausschnitt aus einem Umlaufplan mit fünf Umlaufplanfahrten abgebildet.

	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
			Auftrag	Start	Ziel	Fahrer	Verband
1	4175 m	Betriebsfahrt	Betriebshof A	04:35 Uhr	Wendes chleife A >>>	zufällig	
2	190 m	Einsetzfahrt	Wendes chleife A	04:57 Uhr	Tivoli [2] >>>	>>>	
3	6530 m	Nutzfahrt <3>1	Tivoli	[2] 04:57 Uhr	Heide [1] 05:20 Uhr	>>>	
4	150 m	Aussetzfahrt	Heide	[1] >>>	Wendes chleife B >>>	>>>	
5	7386 m	Betriebsfahrt	Wendes chleife B	12:00 Uhr	Betriebshof B >>>	Fahrer 1	<423> 17

Abb. 2.22: Umlaufplan

In jedem Umlaufplan können Zeilen an einem beliebigen Index hinzugefügt und gelöscht werden. Jede Zeile entspricht einer Umlaufplanfahrt, für die folgende Parameter definiert sind (Abb. 2.22):

- a) Zeilenindex
- b) Fahrstreckenlänge
- c) Auftragsart
- d) Start-Ort und Start-Zeit
- e) Ziel-Ort und Ziel-Zeit
- f) Fahrertypauswahl
- g) Fahrzeugverband (Mehrfachtraktion)

Der Zeilenindex nummeriert die horizontal angeordneten Umlaufplanfahrten in aufsteigender Reihenfolge. Sobald zwischen dem Start und dem Ziel der Umlaufplanfahrt eine Fahrstrecke ermittelt werden kann, wird die Fahrstreckenlänge automatisch berechnet und angezeigt. Jeder Umlaufplanfahrt muss eine der folgenden Auftragsarten zugewiesen werden [85]:

- Nutzfahrt
- Einsetzfahrt
- Aussetzfahrt
- Überführungsfahrt
- Betriebsfahrt

Diese fünf Auftragsarten werden im Kap. 2.4.2 näher beschrieben.

2.4.1.1 Start und Ziel

Die Start- und Zielparameter einer Umlaufplanfahrt sind von der Auftragsart abhängig. Start- und Ziel-Orte sind entweder Endstationen oder Haltestellen. Für die Fahrstreckenbestimmung müssen Start-Endstationen ausgehende und Ziel-Endstationen eingehende Fahrbahnen haben. Bei Haltestellen ist die Angabe des Fahrbahngleises erforderlich. Die Start- und Ziel-Zeiten werden als Uhrzeiten in [h] und [min] angegeben.

Die Gesamtfahrstrecke eines Umlaufplans bzw. eines Fahrzeugs setzt sich aus den einzelnen Fahrstrecken der Umlaufplanfahrten zusammen. Die Grundvoraussetzung ist, dass die erste Umlaufplanfahrt an einer Endstation beginnt und die letzte Umlaufplanfahrt an einer Endstation endet. Darüber hinaus müssen alle aufeinanderfolgenden Fahrten sowohl räumlich als auch zeitlich zusammenpassen, d. h. zwischen den Umlaufplanfahrten dürfen keine Ortssprünge und keine rückwärtsläufigen Zeitsprünge auftreten. Diese Orts- und Zeitüberprüfungen werden vom Simulationsprogramm übernommen.

2.4.1.2 Planzeiten

Es wird angenommen, dass alle Planzeiten t_{soll} aus den Fahr- und Umlaufplänen stochastischen Schwankungen unterliegen. Dadurch wird verhindert, dass die Fahrzeuge immer genau zur vollen Minute ihre geplante Fahrt beginnen. Aus diesem Grund werden für t_{soll} während des Simulationsablaufs Zufallsgrößen mithilfe von Formel (A.24) und den beiden normalverteilten Parametern:

- Erwartungswert der Planzeit $\mu_{t,soll}$
- Standardabweichung der Planzeit $\sigma_{t,soll}$

generiert. $\mu_{t,soll}$ entspricht der geplanten Abfahrtszeit, d. h. der Start-Zeit der nächsten Fahr- bzw. Umlaufplanfahrt. Die Streuung der Planzeiten wird allgemein gültig mit $\sigma_{t,soll}$ in Tab. 3.2 definiert.

2.4.1.3 Fahrertypauswahl

Jeder Umlaufplanfahrt muss ein Fahrertyp zugewiesen werden. Die Fahrertypen werden mit dem Fahrermodell (Kap. 3.3) definiert und stehen in einer Liste zur Verfügung. Bei der Fahrerauswahl kann zwischen den folgenden Möglichkeiten gewählt werden:

- Auswahlfahrer
- Zufallsfahrer
- Bestandsfahrer

Bei der Option Auswahlfahrer wird ein konkreter Fahrertyp aus der Liste ausgewählt.

Bei der Option Zufallsfahrer erfolgt die Wahl des Fahrertyps aus der Liste zufällig. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten lassen sich für jeden Fahrertyp individuell festlegen.

Bei der Option Bestandsfahrer wird der gleiche Fahrer aus der letzten Umlaufplanfahrt erneut eingesetzt. Diese Auswahlmöglichkeit wird am häufigsten gewählt, da ein und derselbe Fahrer in der Regel mehrere Umlaufplanfahrten hintereinander ausführt. Bei der ersten Umlaufplanfahrt kann allerdings nur zwischen dem Auswahl- und Zufallsfahrer gewählt werden.

2.4.1.4 Fahrzeugverband

Die vereinigte Führung von mehreren Triebfahrzeugen wird als Mehrfachtraktion bezeichnet. Dazu werden mehrere Fahrzeuge zu einem Verband gekoppelt und von einem Führerstand aus bedient. Bei der Bildung und Auflösung von Fahrzeugverbänden unterscheidet man folgende Vorgänge [85]:

- Stärken: Dem Verband wird ein Fahrzeug angehängt.
- Schwächen: Dem Verband wird ein Fahrzeug abgehängt.

Im Simulationsprogramm können zwar in der letzten Spalte der Umlaufplattabelle Fahrzeugverbände bestehend aus zwei oder drei Fahrzeugen definiert werden, allerdings haben sie keine Auswirkungen auf die spätere Simulation.

Da die Vereinigungs- und Trennvorgänge bei der Änderung von Fahrzeugverbänden programmieretechnisch nur mit großem Aufwand umzusetzen sind, werden die Funktionen der Mehrfachtraktion nicht in das Simulationsprogramm implementiert.

2.4.2 Umlaufplanaufträge

Der Umlaufplanauftrag bestimmt die Art der Umlaufplanfahrt. Es wird zwischen der Nutzfahrt und der Leerfahrt unterschieden.

2.4.2.1 Nutzfahrten

Die Nutzfahrt ist eine Umlaufplanfahrt mit Fahrgästen, die sich aus einem der erstellten Fahrpläne ergibt. Die Fahrstrecke der Nutzfahrt setzt sich aus den Fahrwegen zwischen den einzelnen Fahrplanhalten zusammen. Jede Nutzfahrt bezieht sich auf eine konkrete Fahrplanfahrt:

- Start-Ort: Haltestelle und Fahrbahngleis des ersten Fahrplanhalts
Start-Zeit: Abfahrtszeit des ersten Fahrplanhalts
- Ziel-Ort: Haltestelle und Fahrbahngleis des letzten Fahrplanhalts
Ziel-Zeit: Ankunftszeit des letzten Fahrplanhalts

Es ist möglich, die Fahrplanfahrt in mehrere Nutzfahrten aufzuteilen. Dies kann beispielsweise bei einem Fahrerwechsel erforderlich sein. Hierfür sind die gewünschten Start- und Ziel-Orte jeder Teilnutzfahrt manuell auszuwählen.

Die Start-Zeit ist die Zeit, zu der die Nutzfahrt frühestens beginnt. Die Ziel-Zeit dient nur als Richtzeit, da auf der Fahrstrecke viele zufällige, den Fahrtablauf beeinflussende, Ereignisse auftreten können. Im späteren Simulationsablauf lassen sich mit den Start- und Ziel-Zeiten der einzelnen Fahrwege die Verfrühungen und Verspätungen der Fahrzeuge ermitteln.

2.4.2.2 Leerfahrten

Einsetz-, Aussetz-, Überführungs- und Betriebsfahrten sind zusätzliche und betrieblich notwendige Leerfahrten, mit denen keine Fahrgäste befördert

werden. Aus ökonomischen Gründen ist die Anzahl und Dauer von Leerfahrten so klein bzw. kurz wie möglich zu halten. An Endstationen beginnende und endende Umlaufplanfahrten sind immer Leerfahrten:

- Ausfahren aus einer Endstation: Einsetz- oder Betriebsfahrt
- Einfahren in eine Endstation: Aussetz- oder Betriebsfahrt

Einsetzfahrten beginnen in einer Endstation und enden an der Start-Haltestelle der nachfolgenden Umlaufplanfahrt. Aussetzfahrten sind das Pendant dazu und beginnen an der Ziel-Haltestelle der vorherigen Umlaufplanfahrt und enden in einer Endstation.

Überführungsfahrten verbinden zwei Umlaufplanfahrten miteinander, ohne dass eine Endstation angefahren wird. Sie sind z. B. erforderlich, wenn das Fahrzeug während der Fahrt einen Linienwechsel vollzieht und die Ziel-Haltestelle der alten Linie nicht der Start-Haltestelle der neuen Linie entspricht.

Betriebsfahrten werden durchgeführt, wenn ein Fahrzeug das Depot wechseln muss oder wenn Werkstatt-, Probe- oder Messfahrten anstehen. Der Start- und Ziel-Ort ist jeweils eine Endstation.

Tab. 2.4: Leerfahrten

	Start		Ziel	
	Ort	Zeit	Ort	Zeit
Einsetzfahrt	Endstation	hh:mm	Haltestelle	–
Aussetzfahrt	Haltestelle	(hh:mm)	Endstation	–
Überführungsfahrt	Haltestelle	(hh:mm)	Haltestelle	–
Betriebsfahrt	Endstation	hh:mm	Endstation	–

Die Start- und Zielparameter der einzelnen Leerfahrten werden in der Tab. 2.4 zusammengefasst. Die Angabe einer Start-Zeit ist bei Einsetz- und Betriebsfahrten obligatorisch und bei Überführungs- und Aussetzfahrten optional. Ohne Angabe einer Start-Zeit wird die Umlaufplanfahrt direkt im Anschluss an die vorherige Umlaufplanfahrt ausgeführt.

Die Bestimmung der Fahrstrecken von Leerfahrten erfolgt auf die gleiche Weise wie die im Kap. 2.3.2 beschriebene Bestimmung der Fahrwege für die

Nutzfahrten aus den Fahrplänen. Zu beachten ist, dass Endstationen bis zu vier Knotentore und damit mehrere ein- und ausgehende Fahrbahnen besitzen können. Dadurch kommen ggf. mehrere Kombinationen von Fahrstrecken in Betracht. In diesem Fall werden alle möglichen Fahrstrecken bestimmt und daraufhin die Kombination mit der kürzesten Distanz ausgewählt.

2.4.2.3 Auftragsabfolgen

In Abb. 2.23 sind alle 13 Übergangsmöglichkeiten zwischen jeweils zwei Umlaufplanfahrten dargestellt. Die häufigste Kombination ist das Trio aus Einsatzfahrt, Nutzfahrt und Aussetzfahrt.

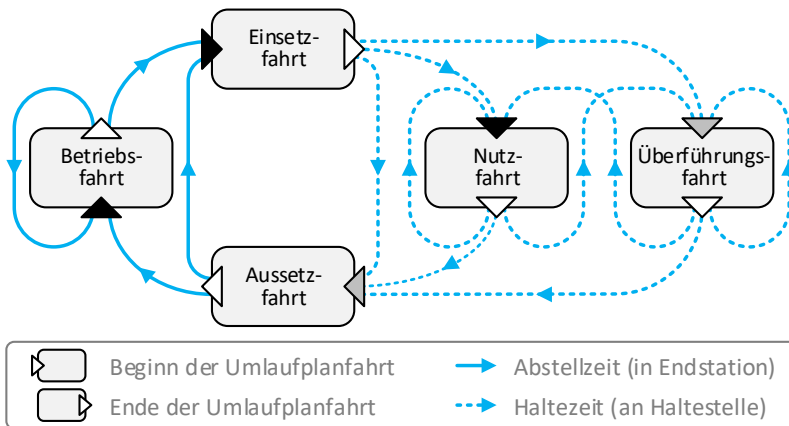


Abb. 2.23: Mögliche Abfolgen von Umlaufplanfahrten





Die eingehenden Dreiecke symbolisieren den Beginn einer Umlaufplanfahrt und sind entweder schwarz (Start-Zeit obligatorisch) oder grau (Start-Zeit optional) ausgefüllt. Die ausgehenden Dreiecke stellen das Ende einer Umlaufplanfahrt dar. Einsatz-, Überführungs- und Nutzfahrten enden an einer Haltestelle. Die Haltezeiten an Haltestellen (gestrichelte Linien) sollten von kurzer Dauer sein, da die Fahrbahnen solange für andere Fahrzeuge blockiert werden. Betriebs- und Aussetzfahrten enden in einer Endstation. Rangierfahrten in Endstationen werden nicht abgebildet. Die Abstellzeiten in Endstationen

(durchgehende Linien) sind in der Regel von längerer Dauer. Sie dienen zum einen den gesetzlich vorgeschriebenen Pausen für die Fahrer und zum anderen dem Verspätungsausgleich. Damit wird ein Zeitpuffer aufgebaut, der verhindert, dass die Verspätungen der letzten Fahrt auf die nächste Fahrt übertragen werden. Aus Effizienzgründen sollten diese zeitlichen Lücken möglichst klein sein, da die Verkehrsbetreiber mit stehenden Fahrzeugen kein Geld verdienen [85].

2.5 Lichtsignale

Im Simulationsprogramm werden die Signallichtzustände zur besseren Unterscheidung nicht durch die im Schienennahverkehr üblichen Balkensignale, sondern durch Farbsignale visualisiert. Die vier möglichen Signallichtzustände sind in der Tab. 2.5 aufgeführt.

Tab. 2.5: Signallichtzustände

Bezeichnung	Farbe	Bedeutung
Rotlicht		Kein Fahrzeug am Signal angemeldet
Orangelicht		Erste Signalfreigabebedingung nicht erfüllt
Gelblicht		Zweite Signalfreigabebedingung nicht erfüllt
Grünlicht		Angemeldetes Fahrzeug erhält Signalfreigabe

2.5.1 Signalanmeldung

Der zeitliche Ablauf der Schaltung der Lichtzustände eines Signallichts bei der Signalanmeldung wird in Abb. 2.24 aufgezeigt. Ein Fahrzeug, das sich vor einem Signal befindet, muss sich dort anmelden, um nach Erfüllung der Signalfreigabebedingungen (SFB) die Streckenfreigabe erteilt zu bekommen. Die Anmeldung erfolgt, sobald das Fahrzeug den Signalmeldepunkt passiert, der sich um die Signalmeldepunktentfernung $d_{sg,\Delta s}$ vor dem Signallicht befindet.

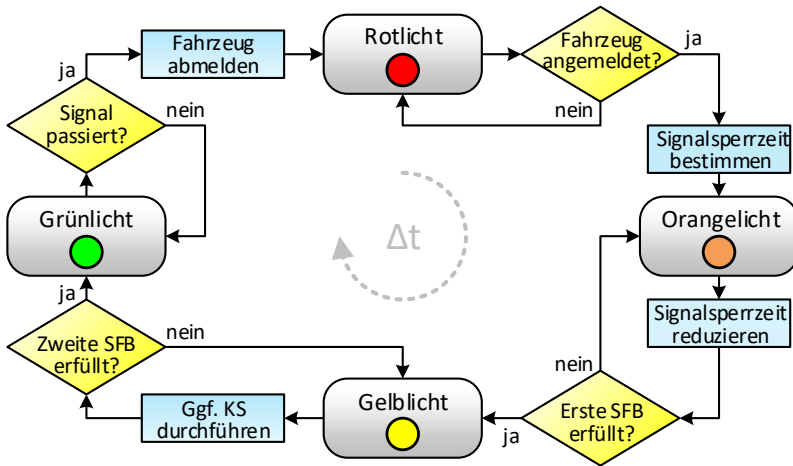


Abb. 2.24: Ablaufdiagramm für die Signallichtzustandsänderung

In Abb. 2.25 sind drei Signale mit insgesamt vier Signallichtern und deren Signalmeldepunkte abgebildet. Im Signalprofil der Verkehrskante ist $d_{Sg,\Delta s}$ für jedes aktivierte Signallicht einstellbar. $d_{Sg,\Delta s}$ ist nach unten auf 30 m und nach oben auf die restliche Teillänge der Verkehrskante begrenzt.

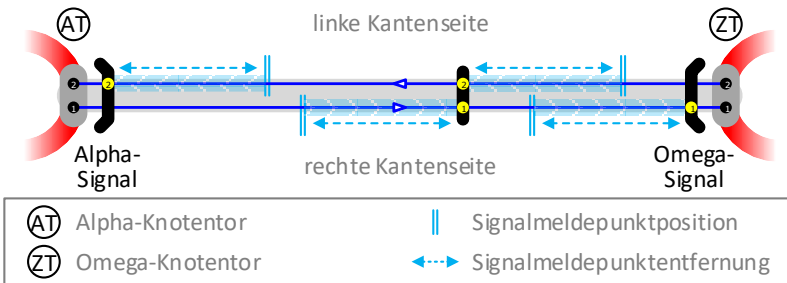


Abb. 2.25: Signalmeldepunkte vor Signallichtern

Die Anmeldungen der Fahrzeuge werden in einer Anmeldeliste registriert und nach dem FIFO-Prinzip sortiert. Unmittelbar nach der Anmeldung schaltet das Signallicht vom roten in den orangenen Lichtzustand.

2.5.1.1 Erste Signalfreigabebedingung

Das Signallicht verbleibt im orangenen Lichtzustand, solange die erste SFB nicht erfüllt ist. Die erste SFB bezieht sich auf die zufälligen Wartezeiten an den Kreuzungen, die vom Individualverkehr abhängig sind. Unter der Annahme, dass die Signalsperrzeiten Δt_{Sg} je nach Verkehrsaufkommen stochastischen Schwankungen unterliegen, werden während des Simulationsablaufs mithilfe von Formel (A.24) und den beiden normalverteilten Parametern:

- Erwartungswert der Signalsperrzeit $\mu_{Sg,\Delta t}$
- Standardabweichung der Signalsperrzeit $\sigma_{Sg,\Delta t}$

Zufallsgrößen für Δt_{Sg} generiert. Δt_{Sg} darf nicht negativ sein und muss ggf. nach unten auf null begrenzt werden. Die in der Tab. 2.6 definierten Parameter lassen sich für jedes Signal individuell einstellen.

Tab. 2.6: Signalparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Signalmeldepunktentfernung	$d_{Sg,\Delta s}$	50	[m]
Signalsperrzeiterwartungswert	$\mu_{Sg,\Delta t}$	15	[s]
Signalsperrzeitstandardabweichung	$\sigma_{Sg,\Delta t}$	10	[s]

Um die Signalsperrzeit über den Tagesablauf variieren zu können, ist es möglich, für jedes Signal bis zu fünf Zeitbereiche mit verschiedenen Werten für $\mu_{Sg,\Delta t}$ und $\sigma_{Sg,\Delta t}$ anzugeben.

Nachdem die zufällige Signalsperrzeit bestimmt wurde, wird sie mit jedem fortschreitenden Simulationszeitschritt bis auf null heruntergezählt. Sobald die Signalsperrzeit mit $\Delta t_{Sg} \leq 0$ abgelaufen ist, ist die erste SFB erfüllt und das Signallicht schaltet vom orangenen in den gelben Lichtzustand.

Bei Haupt- und S-Bahnen hat der Schienenverkehr absolute Priorität vor dem Straßenverkehr. Die Signalmeldepunkte liegen weit vor den Bahnübergängen, so dass sie frühzeitig für den Straßenverkehr gesperrt werden. U-Bahn-Netze

sind kreuzungsfrei und damit unabhängig von anderen städtischen Verkehrssystemen.

2.5.1.2 Zweite Signalfreigabebedingung

Das Signallicht verbleibt im gelben Lichtzustand, solange die zweite SFB nicht erfüllt ist. Die zweite SFB bezieht sich auf den sicheren Zugbetrieb an Verkehrsknotenpunkten. Zunächst lassen sich folgende Signalarten unterscheiden:

- Signale ohne Knotensteuerung
- Signale mit Knotensteuerung

Ein neu erstelltes Signal ist standardmäßig ein Signal ohne Knotensteuerung (KS). In Abb. 2.25 stellt das mittlere Signal ein solches Signal dar. Bei Signalen ohne KS ist die zweite SFB gleich erfüllt. Sie schalten innerhalb eines Simulationszeitschritts vom gelben in den grünen Lichtzustand.

Signale mit KS lassen sich untergliedern in:

- Endstationssignale
- Kreuzungssignale

Im Signalprofil der Verkehrskante können Signale ohne KS in Signale mit KS umgewandelt werden. Diese müssen sich unmittelbar vor dem zu steuernden Knoten (Endstation oder Kreuzung) befinden. Damit kann jede äußere Kante nur maximal die folgenden beiden Signale mit KS besitzen:

- Alpha-Signal: Steuerung des Alpha-Knotens
- Omega-Signal: Steuerung des Omega-Knotens

Dazwischen können sich beliebig viele Signale ohne KS befinden. Wie aus Abb. 2.25 ersichtlich, werden Endstations- und Kreuzungssignale durch zwei zusätzliche angewinkelte Balken, die in Richtung des zu steuernden Knotens zeigen, gekennzeichnet. Signallichter können beim Alpha-Signal nur auf der linken Kantenseite (Gleis 2 bzw. 4) und beim Omega-Signal nur auf der rechten Kantenseite (Gleis 1 bzw. 3) aktiviert werden.

Die Signale mit KS werden im Kap. 2.5.2 detaillierter beschrieben. Die Erfüllung der zweiten SFB ist von der Verkehrsknotenart abhängig:

- Endstation: Verfügbare freie Abstellplätze.
- Kreuzung: Keine Sperrung der Überquerungsfahrbahn.

Sobald die zweite SFB erfüllt ist, schaltet das Signallicht vom gelben in den grünen Lichtzustand. Die Fahrstrecke ist nun für das angemeldete Fahrzeug freigegeben. Der grüne Lichtzustand gilt ausschließlich für das direkt vor dem Signallicht befindliche Fahrzeug, dessen Registrierung in der Anmeldeleiste an oberster Stelle steht. Befinden sich noch weitere angemeldete Fahrzeuge vor dem Signal, so müssen diese warten, bis das erste Fahrzeug das Signallicht passiert hat. Erst dann wird dieses Fahrzeug vom Signal abgemeldet, indem die Registrierung aus der Anmeldeleiste entfernt wird. Daraufhin schaltet das Signallicht vom grünen wieder in den roten Lichtzustand. Daraufhin kann die Anmeldung des nächsten Fahrzeugs bearbeitet werden.

2.5.1.3 Zugsicherungssignale

Für Nahverkehrssysteme kommen folgende Abstandshalteverfahren in Betracht:

- Fahren im Raumabstand
- Fahren im Sichtabstand

Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten (S-/U-Bahnen) gewährleisten Zugsicherungssignale den sicheren Zugbetrieb. Dazu wird die Fahrstrecke in Blockabschnitte eingeteilt, in denen sich jeweils nur ein Fahrzeug befinden darf. Zugsicherungssignale, die das Fahren im Raumabstand ermöglichen, können im Simulationsprogramm nicht erstellt werden, da in dieser Arbeit schwerpunktmäßig straßenbündige Nahverkehrssysteme betrachtet werden. Stattdessen wird ein Fahrermodell (Kap. 3.3) implementiert, das das Fahren im Sichtabstand ermöglicht. Hierbei muss der Fahrer die aktuelle Verkehrssituation selbst einschätzen und auf diese geeignet reagieren können. Dieses Abstandshalteverfahren entspricht dem Fahren im Bremswegabstand und wird bevorzugt bei Straßen- und Stadtbahnen mit Fahrgeschwindigkeiten bis 70 km/h eingesetzt [74].

2.5.2 Signalsteuerung

Bei Signalen mit KS muss die zweite SFB erfüllt werden, damit sie in den grünen Lichtzustand schalten.

2.5.2.1 Endstationssignale

Endstationen haben eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugabstellplätzen. Das Endstationssignal steuert die in die Endstation einfahrenden Fahrzeuge. Die zweite SFB ist direkt erfüllt, solange freie Fahrzeugabstellplätze verfügbar sind. Andernfalls wird gewartet, bis eines der abgestellten Fahrzeuge aus der Endstation ausfährt und einen Abstellplatz freigibt.

2.5.2.2 Kreuzungssignale

Kreuzungssignale regeln den Verkehr in der Kreuzung und verhindern dadurch die folgenden beiden Vorgänge:

- Kollision von zwei Fahrzeugen auf sich kreuzenden Fahrbahnen, die in unterschiedlicher Fahrtrichtung unterwegs sind
- Plötzliches Einscheren eines Fahrzeugs vor ein anderes Fahrzeug, das in gleicher Fahrtrichtung unterwegs ist

Kreuzungssignale sind an allen Knotentoren von Kreuzungen aufzustellen. Fehlende Kreuzungssignale führen in der Simulation zwar zu keiner Kollision, hätten aber deutlich kürzere Umlaufplanfahrten zur Folge. Der Grund liegt darin, dass die Kreuzungen durchfahren werden, ohne die Wartezeiten sowie die Brems- und Anfahrvorgänge an den Kreuzungen zu berücksichtigen. Zudem führen plötzlich einscherende Fahrzeuge beim hinteren Fahrzeug zu abrupten Bremsvorgängen, da auf diese Weise auf einmal ein vorausliegendes Hindernis auftaucht. Eine Kreuzung kann nach Tab. 2.1 maximal vier Knotentore ($n_{T,max} = 4$) und damit bis zu vier Kreuzungssignale besitzen. Aus Sicht des jeweiligen Signals werden die Knotentore der Kreuzung wie folgt bezeichnet:

- Eingangstor ET
- Linkes Ausgangstor LT
- Mittleres Ausgangstor MT
- Rechtes Ausgangstor RT

Das Eingangstor ist das Knotentor, an dem das betrachtete Kreuzungssignal steht und durch das das angemeldete Fahrzeug in die Kreuzung einfährt. Links, mittig und rechts vom ET befinden sich die möglichen Ausgangstore, durch die das Fahrzeug wieder aus der Kreuzung ausfahren kann. Nicht alle Kreuzungen besitzen vier Knotentore. Die Anzahl der Knotentore n_T entscheidet, welche Ausgangstorarten tatsächlich existieren:

- 2er-Kreuzung ($n_T = 2$) mit einem Ausgangstor: MT
- 3er-Kreuzung ($n_T = 3$) mit zwei Ausgangstoren: LT + RT
- 4er-Kreuzung ($n_T = 4$) mit drei Ausgangstoren: LT + MT + RT

Das Problem mit der Identifizierung der individuell platzierten Ausgangstore wird mithilfe einer Winkelbetrachtung gelöst, die die Lage der Knotentore ermittelt. Dazu wird anhand der Koordinaten der Kreuzung $K(x_K, y_K)$ und des jeweiligen Knotentors $T(x_T, y_T)$ mit den folgenden beiden Vektoren:

- Horizontaler Bezugsvektor: $\vec{v}_h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
- Knotentor-Richtungsvektor: $\vec{v}_{KT} = \begin{pmatrix} x_{KT} \\ y_{KT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_K \\ y_K \end{pmatrix}$

der dazwischenliegende Schnittwinkel φ_{KT} berechnet:

$$\varphi_{KT} = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\vec{v}_h \cdot \vec{v}_{KT}}{|\vec{v}_h| \cdot |\vec{v}_{KT}|}\right) & \text{im Quadrant I + II} \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\vec{v}_h \cdot \vec{v}_{KT}}{|\vec{v}_h| \cdot |\vec{v}_{KT}|}\right) & \text{im Quadrant III + IV} \end{cases} \quad (2.13)$$

Aufgrund der im Anhang A.1.2.1 beschriebenen Achsenanordnung sind die vier Quadranten des Koordinatensystems im Uhrzeigersinn angeordnet. In Abb. 2.26 liegt das Knotentor bei einem Schnittwinkel von 225° im dritten Quadranten.

Nachdem die Schnittwinkel für alle Knotentore berechnet sind, werden alle Ausgangstorwinkel, die kleiner als der Eingangstorwinkel sind, um einen Vollwinkel von 360° erhöht. Anschließend werden die Ausgangstorwinkel aufsteigend sortiert. Beginnend beim Ausgangstor mit dem kleinsten Winkel, erfolgt die Zuweisung der Ausgangstorart von links nach rechts.

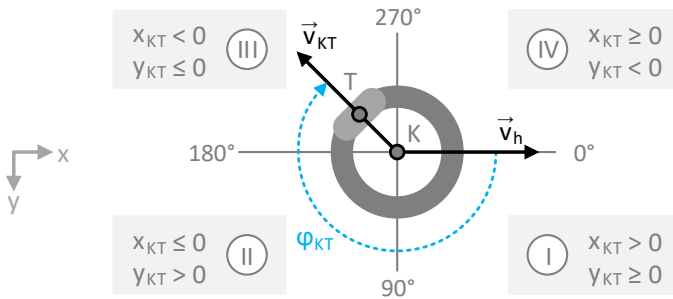


Abb. 2.26: Quadranten im Koordinatensystem einer Kreuzung

Eine Kreuzung mit vier Ausgangstoren kann in drei verschiedene Richtungen verlassen werden, sofern die hierfür entsprechenden Fahrbahnen auf den inneren Kanten erstellt wurden. Damit kann eine Kreuzung aus maximal zwölf Fahrbahnen bestehen. Die Fahrbahn in der Kreuzung, die das Eingangstor mit dem gewünschten Ausgangstor verbindet, wird im Folgenden als die zu überquerende Fahrbahn bezeichnet. Folgende drei Überquerungsfälle sind möglich:

- Fall 1: Linksabbiegen $ET \rightarrow LT$
- Fall 2: Geradeausfahrt $ET \rightarrow MT$
- Fall 3: Rechtsabbiegen $ET \rightarrow RT$

In der Kreuzung müssen alle Fahrbahnen, die die zu überquerende Fahrbahn kreuzen, für andere Fahrzeuge gesperrt werden. In Abb. 2.27 ist die zu überquerende Fahrbahn durch einen schwarzen Pfeil dargestellt. Die zu sperrenden Fahrbahnen sind durch rote Pfeile gekennzeichnet. Die Matrix enthält die zwölf möglichen Start-Ziel-Fahrbahnkombinationen zwischen den vier

Gehört die Fahrbahn, mit der dieses Fahrzeug die Kreuzung überqueren möchte, zu den aktuell gesperrten Fahrbahnen, ist dies nicht der Fall und das Signallicht seines Kreuzungssignals bleibt im gelben Lichtzustand. Eine Änderung dieses Zustands ist erst möglich, wenn alle Fahrzeuge die Kreuzung verlassen haben, die die gewünschte Fahrbahn sperren. Deshalb werden die Positionen der in der Freigabeliste registrierten Fahrzeuge in jedem Simulationszeitschritt überprüft, damit der Zeitpunkt, an dem sie aus der Kreuzung ausfahren, nicht verpasst wird. Sobald ein Fahrzeug die Kreuzung verlässt, wird seine Registrierung aus der Freigabeliste gelöscht. Wenn die zweite SFB für das erste wartende Fahrzeug erfüllt ist, erhält es durch ein grünes Signallicht die Erlaubnis, die Kreuzung zu überqueren. Dazu wird seine Registrierung von der Warteliste in die Freigabeliste verschoben. Alle in der Freigabeliste befindlichen Fahrzeuge definieren die aktuell gesperrten Fahrbahnen in der Kreuzung nach dem Prinzip aus Abb. 2.27.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich ausschließlich auf Kreuzungen mit einer zweigleisigen Gleisbelegung (Abb. 2.10 a). Wie aus Kap. 2.1.2.1 bekannt, stellen Kreuzungen die einzige Möglichkeit dar, zweigleisige Fahrbahnen in die Viergleisigkeit (Abb. 2.10 b-c) oder in die Eingleisigkeit (Abb. 2.10 d-e) zu überführen. Signale für diese Kreuzungsarten werden im nächsten Unterkapitel betrachtet.

2.5.2.3 Signale für ein- und viergleisige Fahrstrecken

Bei ein- und viergleisigen Fahrstrecken sind zwei Kreuzungen mit jeweils zwei Knotentoren und zwei Kreuzungssignalen beteiligt. In Abb. 2.28 ist dargestellt, an welchen Positionen die Kreuzungssignale in Abhängigkeit der Gleisbelegung aufgestellt werden müssen.

Bei Eingleisigkeit befinden sich die beiden Kreuzungssignale außerhalb, d. h. nicht auf der Kante mit der eingleisigen Fahrstrecke. Ihre Aufgabe ist, die eingleisige Fahrstrecke nur für eine Fahrtrichtung freizugeben. Das Simulationsprogramm erkennt automatisch, wenn Kreuzungen mit eingleisigen Fahrstrecken verbunden sind. In diesem Fall sperrt es sowohl in der ersten als auch in der zweiten Kreuzung alle nicht benötigten Fahrbahnen, sobald ein Fahrzeug die Signalfreigabe für eine Fahrtrichtung erhält. Die Sperrung der Fahrbahnen

für die entgegengesetzte Fahrtrichtung wird solange aufrechterhalten, bis dieses Fahrzeug die erste Kreuzung, die eingleisige Fahrstrecke und die zweite Kreuzung passiert hat. Ein zweites Fahrzeug, das die eingleisige Fahrstrecke in der gleichen Fahrtrichtung wie das erste Fahrzeug passieren möchte, erhält nach seiner Signalanmeldung sofort die Signalfreigabe, sofern sich am Kreuzungssignal auf der anderen Seite nicht bereits ein drittes Fahrzeug für die entgegengesetzte Fahrtrichtung angemeldet hat.

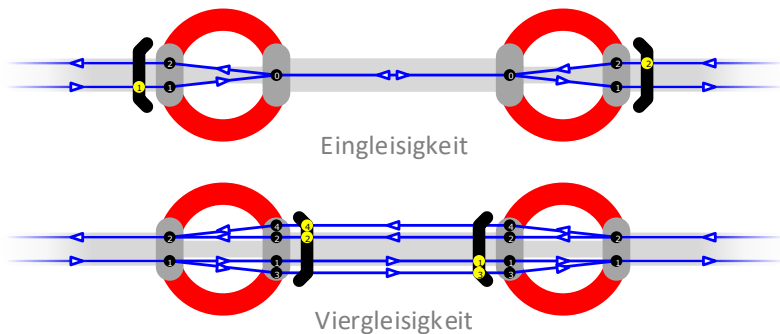


Abb. 2.28: Signalsteuerung bei ein- und viergleisigen Fahrstrecken

Bei Viergleisigkeit befinden sich die beiden Kreuzungssignale innerhalb, d. h. auf der Kante mit der viergleisigen Fahrstrecke. Ihre Aufgabe ist, in der Kreuzung pro Fahrtrichtung nur eine der beiden zusammenführenden Fahrbahnen freizugeben. Im Grunde funktionieren sie wie die im Kap. 2.5.2.2 beschriebenen Kreuzungssignale. Die Besonderheit hierbei ist, dass zwei Fahrbahnen vom Eingangstor (ET) zum Ausgangstor (MT) führen und die Fahrbahn, die nicht für die Überquerung der Kreuzung genutzt wird, die einzige zu sperrende Fahrbahn ist.

3 Fahrspielberechnung

Mit dem Aufbau des Verkehrs- und Versorgungsnetzes und der Erstellung der Fahr- und Umlaufpläne steht die Basis für die Netzsimulation bereit. Die Fahrspielberechnung stellt eine der beiden Säulen der Netzsimulation dar und ist Gegenstand dieses Kapitels. Sie greift auf die implementierten Fahrer- und Fahrzeugmodelle zurück, die auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Fahrkinematik und Fahrdynamik beruhen.

3.1 Netzsimulation

Die Netzsimulation lässt sich starten, sobald die Netzmodellierung abgeschlossen ist.

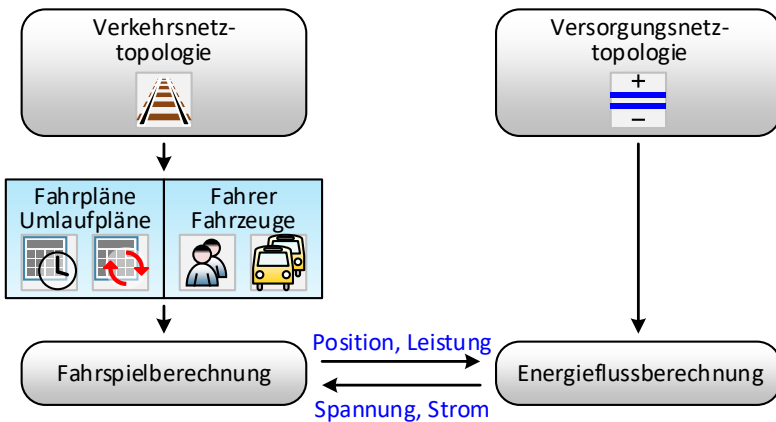


Abb. 3.1: Netzsimulation

Eine Übersicht über die Netzsimulation ist in Abb. 3.1 dargestellt. Während des Simulationsablaufs werden die Fahrspiele und Energieflüsse berechnet, deren Prozesse untereinander gekoppelt sind [76].

Die Fahrspielberechnung hat zum Ziel, die Positionen und Leistungen der Fahrzeuge zu bestimmen. Grundlage hierfür bilden die Fahr- und Umlaufpläne, die dem Fahrer den Fahrweg und die Fahrzeit vorgeben. Die daraus resultierenden Fahrspielzyklen führen zu den orts- und zeitveränderlichen Lasten im elektrischen Netzwerk. Durch die Fahrzeugbewegungen wird das Versorgungsnetz zu einem dynamischen Netz. Die sich aus der Energieflussberechnung ergebenden Netzspannungen und Netzströme beeinflussen wiederum die Fahrspielzyklen, da sie Auswirkungen auf die Fahrzeugleistungen haben.

3.1.1 Programmparameter

Mit den Programmparametern werden die Rahmenbedingungen für die spätere Netzsimulation gesetzt.

3.1.1.1 Simulationszeiten

Bevor die Simulation gestartet wird, ist zunächst der Simulationstag festzulegen, der von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Jahreszeit (Frühling, Sommer, Herbst, Winter)
- Wochentag (Mo-Fr, Sa, So, Feiertag, Schulferien)

Die Jahreszeit beeinflusst den Fahrbahnzustand sowie den witterungsbedingten Einsatz von Heizungs- und Klimaanlage in den Fahrzeugen. Der Wochentag wirkt sich besonders auf das Fahrgast- und Verkehrsaufkommen und damit auf das Fahrtenangebot im Fahrplan aus.

Zudem müssen die folgenden Simulationszeiten festgelegt werden:

- Simulationsanfangszeit t_{anf}
- Simulationsendzeit t_{end}
- Simulationszeitschrittweite Δt

Bei der Einstellung der Simulationszeiten müssen die in der Tab. 3.1 definierten unteren und oberen Grenzwerte eingehalten werden. Das Simulationsprogramm ist in der Lage, einen ganzen Tagesablauf zu simulieren. Dabei werden alle Zeiten in [s] umgerechnet. Ein Tag mit 24 h hat 86 400 s. Beim ÖPNV liegt die Betriebspause üblicherweise zwischen 02:00 Uhr und 04:00 Uhr nachts [85]. Um Fahrten zu ermöglichen, die über die Tagesgrenze um Mitternacht hinausgehen, wird der Simulationstag auf 30 h erweitert, d. h. es sind Uhrzeiten bis 29:59 Uhr (107 940 s) möglich.

Die Zeitschrittweite ist die Länge des Zeitintervalls, um die sich die Simulation in jeder Iteration auf der Zeitachse nach vorne bewegt. Der Standardwert für Δt beträgt 0,5 s und entspricht nach Anhang A.2.1.4 der unteren menschlichen Reaktionszeit. Mit den Simulationszeiten lässt sich die Anzahl der Simulationszeitschritte $n_{\Delta t}$ ermitteln durch:

$$n_{\Delta t} = \left\lceil \frac{t_{end} - t_{anf}}{\Delta t} \right\rceil + 1 \quad (3.1)$$

3.1.1.2 Simulationseinstellungen

Die konstanten Simulationsparameter, die nicht verändert werden können, sind in der Tab. 3.1 aufgelistet.

Tab. 3.1: Konstante Simulationsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Minimale Simulationszeit	t_{min}	0	[s]
Maximale Simulationszeit	t_{max}	107 940	[s]
Kleinste Simulationszeitschrittweite	Δt_{min}	0,1	[s]
Größte Simulationszeitschrittweite	Δt_{max}	2,0	[s]
Gravitationsbeschleunigung	g	9,81	[m/s ²]
Luftdichte	ρ	1,25	[kg/m ³]

Die allgemeinen Simulationsparameter, die angepasst werden können, sind in der Tab. 3.2 zusammengefasst. Mit diesen Parametern lässt sich der Simulationsablauf beeinflussen.

Tab. 3.2: Allgemeine Simulationsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Netznenntspannung	$U_{dc,N}$	750	[V]
Untere Netzspannungsgrenze	$U_{dc,min}$	525	[V]
Obere Netzspannungsgrenze	$U_{dc,max}$	900	[V]
Fahrzeughilfsbetriebeauslastungsgrad	ϱ_{FzAl}^*	0,50	[-]
Fahrzeugspeicheranfangsladezustand	ξ_{FzEs}	0,00	[-]
Netzspeicheranfangsladezustand	ξ_{Es}	0,00	[-]
Haftreibungsbeiwert	μ_H	0,25	[-]
Mindesthaltezeit	$\Delta t_{H,min}$	10	[s]
Planzeitstandardabweichung	$\sigma_{t,soll}$	15	[s]
Endstationsausfahrmindestzeitspanne	$\Delta t_{E,min}$	30	[s]
Fahrgastgewicht	m_{Fg}	75	[kg]
Maximale Fahrgastanzahl (Fahrgastindex = 100 %)	$n_{Fg,max}$	150	[-]
Fahrgastanzahlstandardabweichung	$\sigma_{n,Fg}$	25	[-]
Fahrgastwechselzeitwachstumsschranke	$\Delta t_{Fg,max}$	40	[s]
Fahrgastwechselzeitstandardabweichung	$\sigma_{\Delta t,Fg}$	10	[s]
Hinderniserfassungsabstand	ΔS_j	1 000	[m]
Signalanhalteabstand	ΔS_{Sg}	20	[m]

3.1.2 Programmablauf

In der digitalen Simulationstechnik werden dynamische Vorgänge als diskretisierte Zeitpunkte mit der Zeitschrittweite Δt betrachtet. Dazu wird ein Zeitgeber eingesetzt, der kontinuierlich in äquidistanten Zeitintervallen fortgeschaltet wird. Nach jeder zeitlichen Inkrementierung werden alle im letzten Zeitabschnitt aufgetretenen Zustandsänderungen durchgeführt. Je kleiner das Zeitinkrement gewählt wird, desto genauer sind die Ergebnisse, aber umso länger die Rechenzeiten. Bei sehr kleinen Zeitinkrementen spricht man nicht mehr von diskreter, sondern von quasi-kontinuierlicher Simulation.

In der Netzsimulation stellen Fahrzeuge die Hauptakteure dar. In jedem Simulationszeitschritt müssen die Fahrzustände (Kap. 3.2) für alle n_{Fz} Fahrzeuge aktualisiert werden.

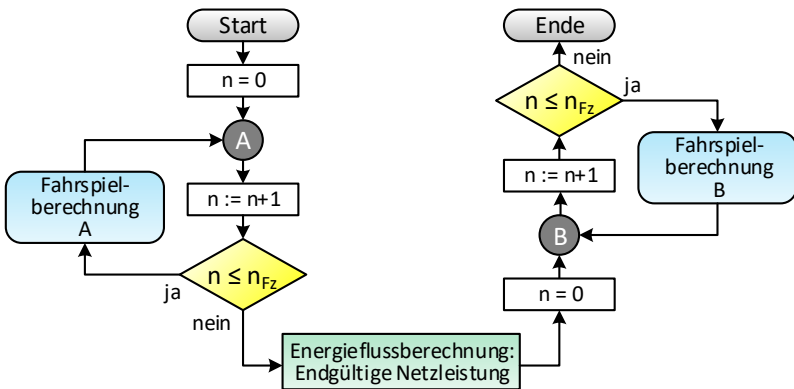


Abb. 3.2: Programmablaufdiagramm der Fahrzeugsimulation

Das Programmablaufdiagramm ist für einen Simulationszeitschritt in Abb. 3.2 skizziert und lässt sich in folgende drei Abschnitte untergliedern:

- Fahrspielberechnung A (vor der Energieflussberechnung)
- Energieflussberechnung
- Fahrspielberechnung B (nach der Energieflussberechnung)

Demnach werden die Fahrspiele der einzelnen Fahrzeuge für jeden Simulationszeitschritt in zwei Schleifendurchläufen berechnet. Der erste erfolgt vor und der zweite nach der Energieflussberechnung.

3.1.2.1 Vor der Energieflussberechnung

Das Ziel der in Abb. 3.3 dargestellten Fahrspielberechnung A ist, für jedes Fahrzeug die vorläufige Fahrzeugnetzleistung zu ermitteln.

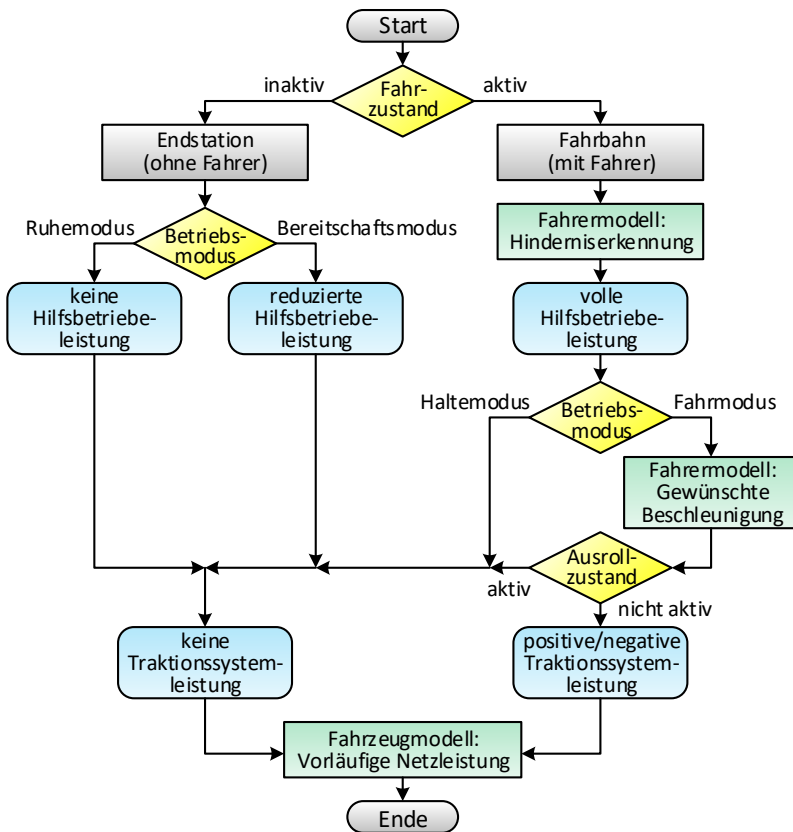


Abb. 3.3: Fahrspielberechnung A (vor Energieflussberechnung)

Die vorläufige Fahrzeugnetzleistung setzt sich aus den folgenden beiden Komponenten zusammen:

- Hilfsbetriebeleistung
- Traktionssystemleistung

Diese Leistungen sind abhängig vom Fahrzustand (Kap. 3.2). In den drei Betriebsmodi Ruhemodus, Bereitschaftsmodus und Haltemodus ist die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs gleich null. Im Fahrmodus wird mithilfe des Fahrermodells (Kap. 3.3) die Wunschbeschleunigung ermittelt. Sie ergibt sich aus der aktuellen Verkehrssituation, die mit der Hinderniserkennung analysiert wird. Letztendlich wird mit dem Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) die vorläufige Fahrzeugnetzleistung berechnet.

3.1.2.2 Nach der Energieflussberechnung

In der Energieflussberechnung (Kap. 4) wird das elektrische Gesamtnetz mit den Wechselwirkungen der Fahrzeuge untereinander betrachtet. Sie liefert unter Berücksichtigung aller Systemabhängigkeiten die endgültigen Fahrzeugnetzleistungen, mit der im Fahrzeugmodell die endgültigen Beschleunigungen berechnet werden. Darauf aufbauend wird die in Abb. 3.4 skizzierte Fahrspielberechnung B durchgeführt.

Im inaktiven Fahrzustand wird die Abstellzeit Δt_E in der Endstation um einen Simulationszeitschritt reduziert. Sobald Δt_E abgelaufen ist, erfolgt der Wechsel in den aktiven Fahrzustand.

Im aktiven Fahrzustand kann sich das Fahrzeug im Halte- oder Fahrmodus befinden. Im Haltemodus wird die Haltezeit Δt_H an der Haltestelle um einen Simulationszeitschritt reduziert. Sobald Δt_H abgelaufen ist, erfolgt der Wechsel in den Fahrmodus. Im Fahrmodus wird mit der endgültigen Beschleunigung die Geschwindigkeits- und Wegänderung des Fahrzeugs anhand der fahrkinematischen Regeln (Anhang A.2.1) berechnet. Wird die nächste Endstation erreicht, erfolgt der Wechsel in den inaktiven Fahrzustand. Andernfalls werden mit der neuen Fahrstreckenposition bei Bedarf die Fahrstreckensektoren aktualisiert, die im Kap. 3.2.2 detaillierter erläutert werden. Wird die nächste Haltestelle erreicht, erfolgt der Wechsel in den Haltemodus.

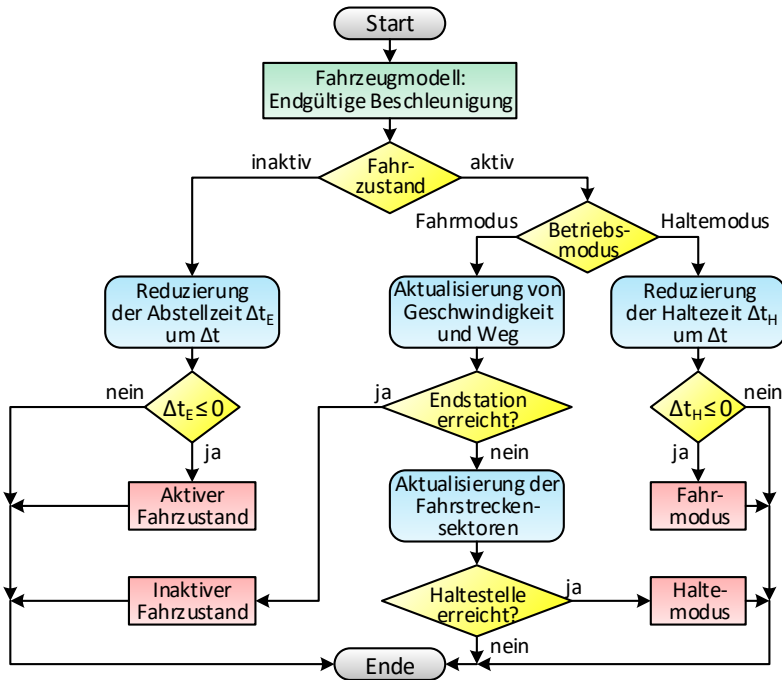


Abb. 3.4: Fahrspielberechnung B (nach Energieflussberechnung)

3.2 Fahrzustände

Während des Simulationsablaufs befindet sich jedes Fahrzeug in einem der folgenden beiden Fahrzustände:

- Inaktiver Fahrzustand
- Aktiver Fahrzustand

Im inaktiven Fahrzustand ist das Fahrzeug in einer Endstation abgestellt und im aktiven Fahrzustand führt das Fahrzeug eine Umlaufplanfahrt aus. Der Fahrzustandswechsel ist von den folgenden Parametern abhängig:

- inaktiv → aktiv: Start-Zeit der nächsten Umlaufplanfahrt
- aktiv → inaktiv: Ziel-Ort der aktuellen Umlaufplanfahrt

3.2.1 Inaktiver Fahrzustand

Zu Beginn der Simulation befinden sich alle Fahrzeuge im inaktiven Fahrzustand. Anhand der Simulationsanfangszeit t_{anf} wird für jedes Fahrzeug die nächste Einsetz- bzw. Betriebsfahrt ermittelt. Umlaufplanfahrten, die zum Zeitpunkt t_{anf} bereits begonnen haben, werden nicht mehr ausgeführt. Die Fahrzeuge werden am Start-Ort der ermittelten nächsten Umlaufplanfahrt platziert.

Tab. 3.3: Endstationsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Einfahrtsgeschwindigkeit	$v_{E, ein}$	-/-/13,89	[m/s]
Ausfahrtsgeschwindigkeit	$v_{E, aus}$	-/-/13,89	[m/s]
Ausfahrverspätungserwartungswert	$\mu_{E, \tau}$	0/0/0	[s]
Ausfahrverspätungsstandardabweichung	$\sigma_{E, \tau}$	30/15/45	[s]
Hilfsbetriebsbereitschaftszeit	$\Delta t_{E, FzAl}$	180/60/-	[s]
Hilfsbetriebsbereitschaftsauslastung	$Q_{E, FzAl}^*$	0,5/0,5/-	[-]

Für jede Endstation lassen sich die in der Tab. 3.3 aufgelisteten Parameter definieren. Die Standardwerte beziehen sich in der Reihenfolge auf die drei Endstationsarten: Betriebshof, Wendeschleife und Systemgrenze.

3.2.1.1 Ein- und Ausfahrgeschwindigkeit

Die Ein- und Ausfahrgeschwindigkeit $v_{E, \text{ein}}$ bzw. $v_{E, \text{aus}}$ ist die vorgegebene Geschwindigkeit, mit der das Fahrzeug seine Fahrt beendet (Einfahrt) bzw. beginnt (Ausfahrt). Für Betriebshöfe und Wendeschleifen betragen diese Parameter 0 m/s. An Systemgrenzen fahren die Fahrzeuge in einer Schwungfahrt mit einer individuell definierbaren Geschwindigkeit in das Fremdnetz ein bzw. aus. Der Standardwert beträgt 13,89 m/s (50 km/h).

3.2.1.2 Ein- und Ausfahrzeit

Bei der Einfahrt eines Fahrzeugs in die Endstation wird seine Endstations-einfahrzeit $t_{E, \text{ein}}$ erfasst, die der momentanen Simulationszeit t_{ist} entspricht:

$$t_{E, \text{ein}} = t_{\text{ist}} \quad (3.2)$$

Die Endstationsausfahrzeit $t_{E, \text{aus}}$, zu der das Fahrzeug wieder aus der Endstation ausfährt, lässt sich ermitteln durch:

$$t_{E, \text{aus}} = \max\{(t_{E, \text{ein}} + \Delta t_{H, \text{min}}), (t_{\text{soll}} + \tau_E)\} \quad (3.3)$$

und ist von folgenden Einflussfaktoren abhängig:

- Einhaltung der Mindesthaltezeit $\Delta t_{H, \text{min}}$ (aus Tab. 3.2)
- Abfahrtsplanzeit t_{soll} (als Erwartungswert)
- Endstationsausfahrverspätung τ_E (als Erwartungswert)
- Einhaltung der Endstationsausfahrmindestzeitspanne $\Delta t_{E, \text{min}}$

Die Abfahrtsplanzeit t_{soll} ist die Start-Zeit der nächsten Einsetz- oder Betriebsfahrt und unterliegt nach Kap. 2.4.1.2 stochastischen Einflüssen.

Das gleiche gilt für die in der Endstation definierte Ausfahrverspätung τ_E . Daher werden während des Simulationsablaufs mithilfe von Formel (A.24) und den beiden normalverteilten Parametern aus Tab. 3.3:

- Erwartungswert der Ausfahrverspätung $\mu_{E, \tau}$
- Standardabweichung der Ausfahrverspätung $\sigma_{E, \tau}$

Zufallsgrößen für τ_E generiert. Ein negativer Wert entspricht einer Ausfahrverfrühung.

Nach der letzten Umlaufplanfahrt wird $t_{E,aus}$ nicht definiert, d. h. das Fahrzeug verbleibt bis zur Simulationsendzeit t_{end} im inaktiven Fahrzustand.

3.2.1.3 Abstellplatz

Fahrzeuge werden in der Endstation aufsteigend nach $t_{E,aus}$ auf den nummerierten Abstellplätzen platziert. Die verbleibende Abstellzeit Δt_E eines Fahrzeugs beträgt zur momentanen Simulationszeit t_{ist} :

$$\Delta t_E = t_{E,aus} - t_{ist} \quad (3.4)$$

Mit der in den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) definierten Ausfahrmindestzeitspanne $\Delta t_{E,min}$ wird verhindert, dass mehrere Fahrzeuge zeitgleich aus einer Endstation ausfahren.

3.2.1.4 Bereitschaftszeit

In jedem Simulationszeitschritt wird für alle Fahrzeuge, die sich im inaktiven Fahrzustand befinden, der aktuelle Betriebsmodus ermittelt. Für Fahrzeuge in Endstationen existieren die folgenden beiden Betriebsmodi:

- Ruhemodus
- Bereitschaftsmodus

Der Betriebsmodus hat Auswirkungen auf die Fahrzeuganlagen (FzAl). Der endgültige Hilfsbetriebeauslastungsgrad q_{FzAl} ergibt sich aus:

$$q_{FzAl} = \begin{cases} 0 & \text{im Ruhemodus} \\ q_{E,FzAl}^* \cdot q_{FzAl}^* & \text{im Bereitschaftsmodus} \\ q_{FzAl}^* & \text{im aktiven Fahrzustand} \end{cases} \quad (3.5)$$

Während im Ruhemodus alle Hilfsbetriebe ausgeschaltet sind, ergibt sich q_{FzAl}^* im Bereitschaftsmodus einerseits aus dem in der Tab. 3.2 definierten Auslastungsgrad der Fahrzeughilfsbetriebe q_{FzAl}^* und andererseits aus dem in der Tab. 3.3 aufgeführten Endstationsparameter $q_{E,FzAl}^*$. Der Standardwert für

$q_{E,FzAl}^*$ beträgt 0,5, d. h. im Bereitschaftsmodus beträgt die Hilfsbetriebeleistung 50 % des Werts aus dem aktiven Fahrzustand. Werden die Fahrzeuge beispielsweise in den Wintermonaten in den Endstationen vorgeheizt, ergeben sich deutlich höhere Auslastungsgrade. Ein Fahrzeug befindet sich zur momentanen Simulationszeit t_{ist} im Bereitschaftsmodus, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Nach der Einfahrt: $(t_{ist} - t_{E,ein}) \leq \Delta t_{E,FzAl}$
- Vor der Ausfahrt: $(t_{E,aus} - t_{ist}) \leq \Delta t_{E,FzAl}$

Die Zeitspanne nach der letzten Einfahrt bzw. vor der nächsten Ausfahrt wird mit der Hilfsbetriebebereitschaftszeit $\Delta t_{E,FzAl}$ aus Tab. 3.3 festgelegt.

3.2.2 Aktiver Fahrzustand

Zu Beginn der Simulation wird für jedes Fahrzeug die Gesamtfahrstrecke aus dem Umlaufplan in die folgenden acht Fahrstreckensektorenarten unterteilt:

- Haltepunktsektoren
- Fahrbahn- und Fahrleistungssektoren
- Signalsektoren
- Geschwindigkeits-, Steigungs-, Kurven- und Tunnelsektoren

Auf der Gesamtfahrstrecke markiert jede Endstation den Anfang bzw. das Ende eines aktiven Fahrzustands. An den Endstationen findet jeweils ein Wechsel aller acht Fahrstreckensektoren statt.

Jeder Fahrstreckensektor besitzt die folgenden Eigenschaften:

- Start-Fahrstreckenposition s_{F1}
- Ziel-Fahrstreckenposition s_{F2}

Die Fahrstreckensektoren legen fest, bei welcher Fahrstreckenposition sich ein Streckenparameter ändert. Die Anzahl und Länge der einzelnen Fahrstreckensektoren ist sektorenspezifisch. Die Fahrstreckenpositionen beziehen sich

immer auf die Gesamtfahrstrecke des Fahrzeugs. Die Umrechnung der Kantenpositionen s_K in Fahrstreckenpositionen s_F erfolgt durch:

$$s_F = \begin{cases} s_{F1} + s_K - s_{K1} & \text{falls Kantenrichtung positiv} \\ s_{F2} - s_K + s_{K2} & \text{falls Kantenrichtung negativ} \end{cases} \quad (3.6)$$

In Formel (3.6) entsprechen s_{K1} bzw. s_{K2} den Kantenpositionen an den Fahrstreckenpositionen s_{F1} und s_{F2} .

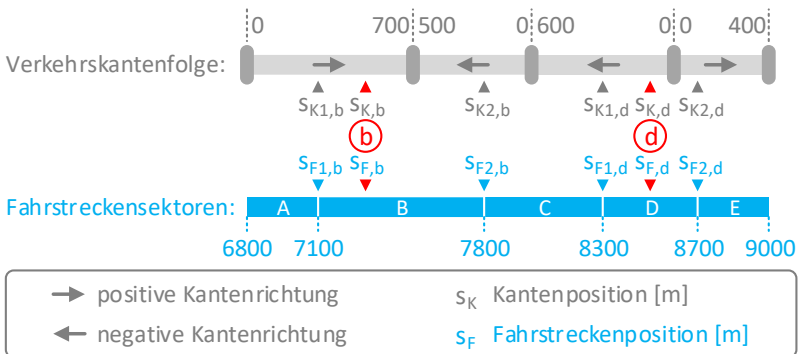


Abb. 3.5: Fahrstreckensektoren

Zum besseren Verständnis ist in Abb. 3.5 beispielhaft ein 2,2 km langer Fahrstreckenausschnitt skizziert, der zwischen den Fahrstreckenpositionen 6 800 m und 9 000 m liegt und aus fünf Fahrstreckensektoren A-E besteht. Die erste Position (b) liegt auf der ersten Verkehrskante bei $s_{K,b} = 500 \text{ m}$ im Fahrstreckensektor B und die zweite Position (d) liegt auf der dritten Verkehrskante bei $s_{K,d} = 100 \text{ m}$ im Fahrstreckensektor D. Nach Formel (3.6) ergeben sich für (b) und (d) folgende Fahrstreckenpositionen:

- $s_{F,b} = 7100 + 500 - 300 = 7300 \text{ m}$
- $s_{F,d} = 8700 - 100 - 100 = 8500 \text{ m}$

3.2.2.1 Haltepunktsektoren

Für Fahrzeuge auf der Fahrstrecke existieren die folgenden beiden Betriebsmodi:

- Fahrmodus
- Haltemodus

Die Haltepunktsektoren unterteilen die Gesamtfahrstrecke in Abschnitte, an deren Anfang und Ende das Fahrzeug dem Fahr- und Umlaufplan zufolge anhalten muss. Nach jedem Haltepunkt, d. h. nach jeder Haltestelle oder Endstation, beginnt ein neuer Haltepunktsektor. An Haltestellen verbleibt das Fahrzeug im aktiven Fahrzustand und setzt nach der Haltezeit seine Fahrt im nächsten Haltepunktsektor fort.

Die verbleibende Haltezeit Δt_H an der Haltestelle lässt sich ermitteln durch:

$$\Delta t_H = \max\{\Delta t_{H,min}, (t_{soll} - t_{ist}), \Delta t_{Fg}\} \quad (3.7)$$

und ist von den folgenden Parametern abhängig:

- Momentane Simulationszeit t_{ist}
- Einhaltung der Mindesthaltezeit $\Delta t_{H,min}$ (aus Tab. 3.2)
- Abfahrtsplanzeit t_{soll} (als Erwartungswert)
- Fahrgastwechselzeit Δt_{Fg} (als Erwartungswert)

Die Abfahrtsplanzeit t_{soll} ist die Start-Zeit der nächsten Nutz-, Aussetz- oder Überführungsfahrt und unterliegt nach Kap. 2.4.1.2 stochastischen Einflüssen. t_{soll} ist nur vorhanden, falls für die entsprechende Umlaufplanfahrt explizit eine Start-Zeit definiert wurde. Andernfalls ist der Term $(t_{soll} - t_{ist})$ in Formel (3.7) gleich null. Die im Kap. 2.3.3.2 beschriebene Fahrgastwechselzeit Δt_{Fg} hat bei Nutzfahrten einen positiven Wert, bei Leerfahrten ist sie gleich null. Innerhalb eines Haltepunktsektors bleiben die Fahrgastanzahl, der Fahrer und der Fahrzeugverband unverändert. Bei jedem Wechsel des Haltepunktsektors müssen diese Parameter aktualisiert werden. Die Bestimmung der Fahrgastanzahl n_{Fg} wurde im Kap. 2.3.3.1 und die Wahl des Fahrertyps im Kap. 2.4.1.3 beschrieben.

Bei einer Nutzfahrt wird die momentane Verspätung τ als Abweichung der Istzeit t_{ist} (momentane Zeit) von der Sollzeit t_{soll} (planmäßige Zeit) in jedem Simulationszeitschritt bestimmt. Das Fahrzeug, das sich momentan auf der Fahrstreckenposition s_{ist} zwischen zwei Haltestellen befindet, hat eine Verspätung von:

$$\begin{aligned}\tau &= t_{ist} - t_{soll} \\ &= t_{ist} - \left(t_1 + (s_{ist} - s_1) \cdot \left(\frac{t_2 - t_1}{s_2 - s_1} \right) \right)\end{aligned}\quad (3.8)$$

Das Verspätungsverhalten wird im Kap. 3.3.4.2 behandelt. In Formel (3.8) wird t_{soll} aus dem linearen Verhältnis zwischen den Ankunftsplanzeiten t_1 bzw. t_2 und den Fahrstreckenpositionen s_1 bzw. s_2 der beiden Haltestellen berechnet. Bei einer Betriebs- oder Aussetzfahrt befindet sich am Ende eines Haltepunktsektors eine Endstation. Wird das Ende des Haltepunktsektors erreicht, wechselt das Fahrzeug vom aktiven in den inaktiven Fahrzustand.

3.2.2.2 Fahrbahn- und Fahrleitungssektoren

In der Tab. 3.4 werden die möglichen Fahrzeugstandorte im Verkehrs- und Versorgungsnetz in Abhängigkeit des Fahrzustands aufgezeigt. Während des Simulationsablaufs wird jedes Fahrzeug einem dieser Standorte zugewiesen. Bei einem Standortwechsel muss sich das Fahrzeug am aktuellen Standort abmelden und am neuen Standort anmelden.

Tab. 3.4: Fahrzeugstandorte während des Simulationsablaufs

	inaktiver Fahrzustand	aktiver Fahrzustand
Verkehrsnetz	Endstation (Verkehrsknoten)	Fahrbahn
Versorgungsnetz	Endstation (Versorgungsknoten)	Fahrleitung

Die Fahrbahnsektoren geben die Fahrstreckenpositionen an, an denen das Fahrzeug die Fahrbahn wechseln muss. Da die Fahrbahnen auf den Kanten

durchgehend verlaufen, erfolgt der Wechsel nach jedem Knotentor einer Kreuzung oder Endstation.

Die Fahrleitungssektoren legen die Fahrstreckenpositionen fest, an denen sich die Fahrleitungsart und damit die Fahrleitungswiderstandsbeläge ändern. Nach jedem elektrischen E-, K-, F-Knoten des Versorgungsnetzes beginnt ein neuer Fahrleitungssektor.

Alle Bahnhöfe und alle Fahrleitungen verwalten die ihnen zugewiesenen Fahrzeuge in einer Liste und ordnen sie nach den Fahrstreckenpositionen. Mithilfe dieser Fahrzeuglisten werden bei der Hinderniserkennung (Kap. 3.3.1) vorausfahrende Fahrzeuge identifiziert und bei der Energieflussberechnung (Kap. 4.3.1) mobile Fahrzeugknoten in das elektrische Netz integriert.

3.2.2.3 Signalsektoren

Mit den Signalsektoren lässt sich jederzeit die Entfernung zum nächsten Signal berechnen. Es werden nur Signale berücksichtigt, für die am befahrenen Fahrbahngleis ein Signallicht aktiviert wurde. Der Abstand zum nächsten Signal ist einerseits für die Signalanmeldung (Kap. 2.5.1) und andererseits für die Hinderniserkennung (Kap. 3.3.1) erforderlich.

3.2.2.4 Streckenliniensektoren

Die Geschwindigkeits-, Steigungs-, Kurven- und Tunnelsektoren werden unter dem Oberbegriff Streckenliniensektoren zusammengefasst. Ein Streckenliniensektor kann sich über mehrere Kanten erstrecken, wenn der Profilparameter auf den nacheinander folgenden Kanten identisch ist. Beim Steigungssektor ist zu beachten, dass aufgrund des vorzeichenbehafteten Steigungsgrads nicht nur der Wert, sondern auch die Kantenrichtung zu überprüfen ist.

Dem Geschwindigkeitssektor kommt im Fahrermodell (Kap. 3.3) bei der Festlegung der Beschleunigung eine besondere Bedeutung zu. Die übrigen Streckenliniensektoren werden zur Berechnung der Fahrwiderstände im Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) benötigt.

3.3 Fahrermodell

Das Fahrermodell beschreibt den Fahrer, der das Fahrzeug im Sichtabstand durch das Verkehrsnetz navigiert. Es basiert auf den fahrkinematischen Grundlagen aus dem Anhang A.2.1.

Im Simulationsprogramm lassen sich beliebig viele Fahrerprofile anlegen. Das implementierte Fahrermodell beruht auf dem in [97] beschriebenen und in [31] [45] erweiterten psycho-physischen Fahrzeug-Folge-Modell. Hierbei handelt es sich um ein mikroskopisches Simulationsmodell, das den Straßenverkehrsfluss mathematisch in zeitdiskreten Schritten beschreibt und neben den physischen Aspekten zusätzlich die psychologischen Faktoren des Fahrers berücksichtigt. Damit das ursprünglich für den Straßenverkehr entwickelte Modell auf den Schienenverkehr übertragen werden, müssen viele Modellparameter angepasst werden.

3.3.1 Hinderniserkennung

Der betrachtete Fahrer i reagiert im aktiven Fahrzustand auf die sich stets ändernde Verkehrssituation, die sich in seinem Sichtfeld abspielt. Dabei wird das Fahrverhalten des Fahrers maßgeblich durch das unmittelbar vorausliegende Hindernis j beeinflusst.

Tab. 3.5: Zeitabhängige Fahrer- und Hindernisparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Maßeinheit
Position des Fahrers	s_i	[m]
Geschwindigkeit des Fahrers	v_i	[m/s]
Fahrzeughöchstgeschwindigkeit	$v_{Fz,max}$	[m/s]
Position des Hindernisses	s_j	[m]
Länge des Hindernisses	l_j	[m]
Geschwindigkeit des Hindernisses	v_j	[m/s]

Während des Simulationsablaufs muss für jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit das vorausliegende Hindernis für den jeweiligen Simulationszeitschritt identifiziert werden. Die Suche erfolgt mithilfe der Haltepunkt-, Signal-, Geschwindigkeits- und Fahrbahnsektoren (Kap. 3.2.2). Als Ergebnis erhält man die in der Tab. 3.5 aufgelisteten Fahrer- und Hindernisparameter. Die Suche wird abgebrochen, wenn sich kein Hindernis innerhalb des in der Tab. 3.2 definierten Hinderniserfassungsabstands Δs_j befindet. Als Hindernisse kommen die folgenden vier Möglichkeiten in Betracht:

- Haltepunkte
- Signale
- Geschwindigkeitslimits
- Fahrzeuge

Abgesehen von den vier genannten Hindernisarten werden weitere unvorhersehbare Störgrößen, wie z. B. systemfremde Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, PKWs), nicht berücksichtigt. Auch äußere Einflussfaktoren, wie beispielsweise die aktuellen Wetter- und Sichtbedingungen, werden nicht beachtet.

Der Hindernisparameter v_j hat in Abhängigkeit von seiner Beweglichkeit:

- Stationäres Hindernis (Haltepunkt, Signal, Geschwindigkeitslimit)
- Mobiles Hindernis (vorausfahrendes Fahrzeug)

eine unterschiedliche Bedeutung. Bei stationären Hindernissen ist v_j die Geschwindigkeit, die der Fahrer an der Position s_j erreichen soll. Bei mobilen Hindernissen entspricht v_j der Geschwindigkeit, mit der sich das Hindernis fortbewegt.

3.3.1.1 Haltepunkt

Der Haltepunkt ist ein stationäres Hindernis und befindet sich am Ende des aktuellen Haltepunktsektors. Befindet sich der Fahrer auf einer Nutz- oder Überführungsfahrt, ist der Haltepunkt, wie aus Abb. 3.6 ersichtlich, die nächste fahrplanmäßige Haltestelle. Bei Aussetz- und Betriebsfahrten ist er die im Umlaufplan definierte nächste Endstation.

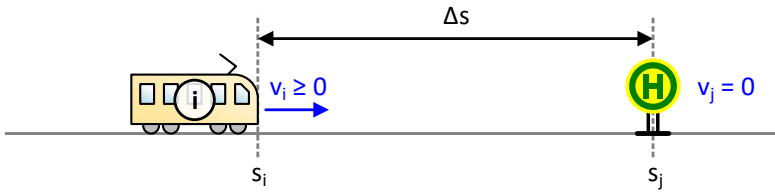


Abb. 3.6: Haltepunkt als Hindernis

Bei Haltestellen, Betriebshöfen und Wendeschleifen gilt: $v_j = 0$ und $l_j = 0$, d. h. der Fahrer hat das Ziel, genau an der Position des Haltepunkts s_j zum Stehen zu kommen. Bei Systemgrenzen ist mit $v_j > 0$ eine Einfahrtsgeschwindigkeit definiert.

3.3.1.2 Signal

Das Signal ist ein stationäres Hindernis mit veränderlichem Signallichtzustand (Kap. 2.5) und befindet sich am Ende des aktuellen Signalsektors. Solange das Signal dem Fahrer keine Streckenfreigabe erteilt, stellt das Signal ein Hindernis mit $v_j = 0$ und $l_j > 0$ dar. l_j entspricht dem in den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) definierten Signalanhalteabstand Δs_{Sg} .

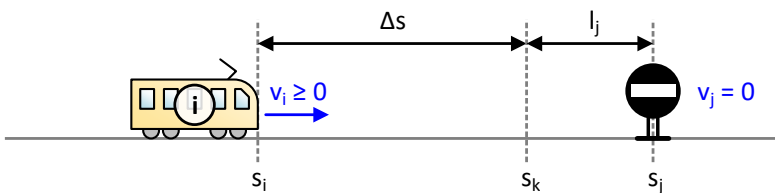


Abb. 3.7: Signal als Hindernis

Die Position $s_k = s_j - l_j$ in Abb. 3.7 markiert die Stelle vor dem Signal, an der der Fahrer auf die Streckenfreigabe warten muss. Zu beachten ist, dass die Signalmeldepunktentfernung $d_{Sg,\Delta s}$ (Kap. 2.5.1) größer als Δs_{Sg} ist, da sich

andernfalls das Fahrzeug nicht am Signal anmelden kann und das Signal im Rotlichtzustand verbleibt.

3.3.1.3 Geschwindigkeitslimit

Das Geschwindigkeitslimit ist ein stationäres Hindernis mit $l_j = 0$, das sich am Anfang des nächsten Geschwindigkeitssektors befindet, sofern gilt: $v_i > v_j$. Dabei entspricht v_j der maximal zulässigen Geschwindigkeit v_{lim} im nächsten Geschwindigkeitssektor.

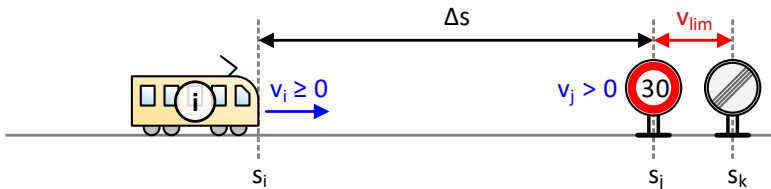


Abb. 3.8: Geschwindigkeitslimit als Hindernis

In Abb. 3.8 beträgt die Geschwindigkeitsbegrenzung 8,33 m/s (30 km/h). Innerhalb des geschwindigkeitsbegrenzten Fahrstreckenabschnitts ($s_j \leq s_i \leq s_k$) dient v_{lim} als Richtgeschwindigkeit v^* (Kap. 3.3.4.1) für den Fahrer.

3.3.1.4 Fahrzeug

Das vorausfahrende Fahrzeug ist ein mobiles Hindernis mit $l_j > 0$, dessen Position s_j und Geschwindigkeit v_j sich kontinuierlich ändern. l_j ist die Fahrzeuglänge l_{Fz} , die in der Tab. 3.12 des Fahrzeugmodells definiert wird. Die Bestimmung des vorausfahrenden Fahrzeugs erfolgt mithilfe der Fahrzeugliste der aktuellen Fahrbahn, in der alle Fahrzeuge verwaltet werden, die sich momentan auf dieser Fahrbahn befinden. Ist im aktuellen Fahrbahnsektor kein Fahrzeug mit $s_j > s_i$ vorhanden, werden in einem Schleifendurchlauf die nachfolgenden Fahrbahnsektoren durchsucht, bis das nächste Fahrzeug identifiziert wird.

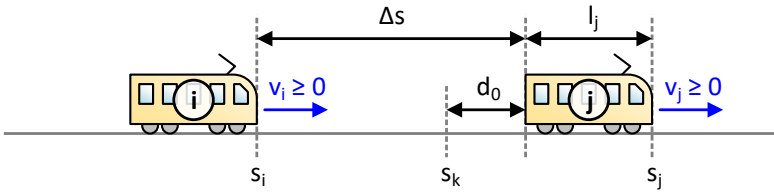


Abb. 3.9: Fahrzeug als Hindernis

Wie aus Abb. 3.9 ersichtlich, ergibt sich Δs aus dem Abstand zwischen der Rückseite des vorderen Fahrzeuges und der Frontseite des hinteren Fahrzeuges. Der fahrerindividuelle Stillstandsabstand d_0 stellt den Abstand dar, den der Fahrer selbst dann zu seinem Vordermann einhalten möchte, wenn beide Fahrzeuge stehen.

3.3.2 Folgeabstand und Relativgeschwindigkeit

Das Fahrverhalten vom Fahrer i wird in Abhängigkeit zum Hindernis j durch die folgenden beiden Größen bestimmt:

- Folgeabstand Δs
- Relativgeschwindigkeit Δv

Der Folgeabstand lässt sich durch:

$$\Delta s = s_j - l_j - s_i \quad (3.9)$$

und die Relativgeschwindigkeit durch:

$$\Delta v = v_j - v_i \quad (3.10)$$

ermitteln. Beim Folgeabstand handelt es sich um den Nettoabstand, bei dem die Länge des Hindernisses l_j rausgerechnet wird. Während die Relativgeschwindigkeit bei stationären Hindernissen immer negativ ist, kann sie bei mobilen Hindernissen beide Vorzeichen annehmen.

Nach [31] ist der Fahrer bestrebt, zu jeder Zeit die folgenden beiden in Wechselwirkung stehenden Aufgaben zu erfüllen:

- Einhaltung des gewünschten Folgeabstands
- Angleichen der Relativgeschwindigkeit

Zur Einhaltung des gewünschten Folgeabstands Δs zum vorausliegenden Hindernis werden die folgenden vier Abstände definiert [31]:

- Risikoabstand (RA)
- Bremsabstand (BA)
- Sicherheitsabstand (SA)
- Wunschabstand (WA)

Diese Abstände sind Funktionen der Relativgeschwindigkeit Δv und lassen sich mit den Folgeabstandsparametern aus Tab. 3.6 einstellen.

Tab. 3.6: Fahrerindividuelle Folgeabstandsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Stillstandsabstand zum mobilen Hindernis	$d_{0,Fz}$	10	[m]
Risikoabstandszeitlücke	$t_{\Delta s,RA}$	1,8	[s]
Wunschabstandszeitlücke	$t_{\Delta s,WA}$	7,2	[s]
Wunschmindestabstand zum mobilen Hindernis	$\Delta s_{WA,Fz}$	40	[m]

Neben den Abständen werden noch zwei weitere fahrerspezifische Kenngrößen definiert:

- Negative Wahrnehmungsschwelle (NWS)
- Positive Wahrnehmungsschwelle (PWS)

Diese beiden Wahrnehmungsschwellen sind Funktionen des Folgeabstands Δs und lassen sich mit den Relativgeschwindigkeitsparametern aus Tab. 3.7 einstellen.

Tab. 3.7: Fahrerindividuelle Relativgeschwindigkeitsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Negative Relativgeschwindigkeit bei $\Delta s_{NWS(1)} = 0 \text{ m}$	$\Delta v_{NWS(1)}$	-2,78	[m/s]
Folgeabstand bei $\Delta v_{NWS(2)} = -19,44 \text{ m/s}$	$\Delta s_{NWS(2)}$	300	[m]
Positive Relativgeschwindigkeit bei $\Delta s_{PWS(1)} = 0 \text{ m}$	$\Delta v_{PWS(1)}$	+5,56	[m/s]
Folgeabstand bei $\Delta v_{PWS(2)} = +19,44 \text{ m/s}$	$\Delta s_{PWS(2)}$	200	[m]

Alle Abstände und Wahrnehmungsschwellen werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Sie werden im Fahrerzonendiagramm, das im Kap. 3.3.3.1, Abb. 3.14 auf S. 111 dargestellt ist, als Kurven visualisiert.

3.3.2.1 Risikoabstand

Der Risikoabstand Δs_{RA} wird in Abb. 3.14 als rote Kurve dargestellt und lässt sich berechnen durch:

$$\Delta s_{RA} = \begin{cases} 0 & \text{falls Hindernis stationär} \\ d_0 + (t_{\Delta s, RA} \cdot v_j) & \text{falls Hindernis mobil} \end{cases} \quad (3.11)$$

Der Stillstandsabstand d_0 ist der Mindestabstand, den der Fahrer im stehenden Zustand zu einem anderen Fahrzeug einhalten möchte:

$$d_0 = \begin{cases} 0 & \text{falls Hindernis stationär} \\ d_{0, FZ} & \text{falls Hindernis mobil} \end{cases} \quad (3.12)$$

Die Risikoabstandszeitlücke $t_{\Delta s, RA}$ drückt den geschwindigkeitsabhängigen Abstand aus. Sie wird in der Einheit [s] bzw. [m/(km/h)] angegeben.

$$t_{\Delta s, RA} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{km/h}} = \frac{0,5 \text{ m}}{\left(\frac{1}{3,6}\right) \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{0,5 \text{ m}}{0,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,8 \text{ s} \quad (3.13)$$

Nach dem Beispiel (3.13) beträgt die Abstandzeitlücke 1,8 s, wenn sich der Abstand pro Stundenkilometer um einen halben Meter erhöhen soll.

3.3.2.2 Bremsabstand

Der Bremsabstand Δs_{BA} ist in Abb. 3.14 als orangene Kurve abgebildet und lässt sich ermitteln durch:

$$\Delta s_{BA} = \begin{cases} \Delta s_{RA} & \text{falls } v_j \geq v_i \\ \max \left\{ \Delta s_{RA}, \left(d_0 + \frac{v_j^2 - v_i^2}{2 \cdot f_\tau \cdot a_{neg,min}^*} \right) \right\} & \text{falls } v_j < v_i \end{cases} \quad (3.14)$$

Bei einer positiven Relativgeschwindigkeit muss der Fahrer nicht bremsen, so dass Δs_{BA} und Δs_{RA} identisch sind. Ist die Geschwindigkeit des Fahrers hingegen höher als die des Hindernisses, ergibt sich Δs_{BA} aus dem Bremsweg, der sich nach Formel (A.33) aus dem Weg- und Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz herleiten lässt. Die in Tab. 3.8 definierte Wunschverzögerung $a_{neg,min}^*$ gehört zu den fahrerindividuellen Beschleunigungsparametern, mit der der Fahrer am Ende des Bremsvorgangs maximal verzögern möchte. Sie wird mit dem Verspätungsfaktor f_τ multipliziert. Das Verspätungsverhalten wird im Kap. 3.3.4.2 behandelt.

3.3.2.3 Sicherheitsabstand

Der Sicherheitsabstand Δs_{SA} wird in Abb. 3.14 als gelbe Kurve dargestellt und kann als Vorbremskurve interpretiert werden. Ohne Δs_{SA} würde der Fahrer konstant über den gesamten Geschwindigkeitsbereich mit $a_{neg,min}^*$ verzögern. Demzufolge wird besonders bei höheren Geschwindigkeiten der größte Anteil der Bremskraft durch mechanisches anstatt durch elektrisches Bremsen aufgebracht. Um den Verzögerungsvorgang realistischer abzubilden, wird die geschwindigkeitsabhängige Wunschverzögerung a_{neg,v_i}^* an v_i mittels linearer Interpolation angepasst:

$$a_{neg,v_i}^* = \left(\frac{a_{neg,v_i}^* - a_{neg,min}^*}{v_{Fz,max}} \cdot \min\{v_i, v_{Fz,max}\} \right) + a_{neg,min}^* \quad (3.15)$$

Nach Abb. 3.10 entspricht a_{neg,v_i}^* bei der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs $v_{Fz,max}$ (Tab. 3.13) der Wunschanfangsverzögerung $a_{neg,anf}^*$ (Tab. 3.8). Mit abnehmender Geschwindigkeit wird a_{neg,v_i}^* auf den Wert der Wunschendverzögerung $a_{neg,min}^*$ angenähert.

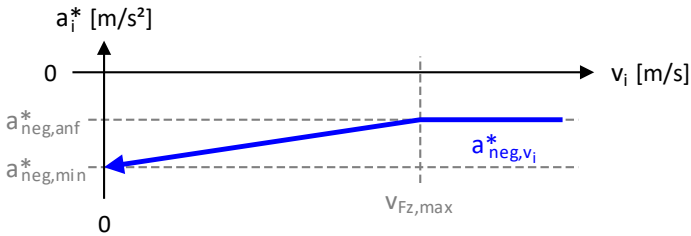


Abb. 3.10: Geschwindigkeitsabhängige Wunschverzögerung

Abgesehen von der Wunschverzögerung wird der Sicherheitsabstand auf gleiche Weise wie der Bremsabstand berechnet:

$$\Delta s_{SA} = \begin{cases} \Delta s_{RA} & \text{falls } v_j \geq v_i \\ \max \left\{ \Delta s_{RA}, \left(d_0 + \frac{v_j^2 - v_i^2}{2 \cdot f_t \cdot a_{neg,v_i}^*} \right) \right\} & \text{falls } v_j < v_i \end{cases} \quad (3.16)$$

Wegen:

$$\lim_{v_i \rightarrow 0} a_{neg,v_i}^* = a_{neg,min}^* \quad (3.17)$$

laufen die Sicherheits- und Bremsabstandskurven mit kleiner werdendem Δs immer weiter zusammen.

3.3.2.4 Wunschabstand

Der Wunschabstand Δs_{WA} wird in Abb. 3.14 als grüne Kurve abgebildet und lässt sich berechnen durch:

$$\Delta s_{WA} = \max \left\{ \Delta s_{RA}, \Delta s_{WA,min}, \left(d_0 + (t_{\Delta s,WA} \cdot v_i) \right) \right\} \quad (3.18)$$

Der Wunschmindestabstand $\Delta s_{WA,min}$ ist der Mindestabstand, den der Fahrer im fahrenden Zustand zu einem anderen Fahrzeug einhalten möchte:

$$\Delta s_{WA,min} = \begin{cases} 0 & \text{falls Hindernis stationär} \\ \Delta s_{WA,Fz} & \text{falls Hindernis mobil} \end{cases} \quad (3.19)$$

Die Wunschabstandszeitlücke $t_{\Delta s,WA}$ ist mindestens so groß wie $t_{\Delta s,RA}$ und wird auf gleiche Weise nach Formel (3.13) berechnet. Im Vergleich zum Risikoabstand ist der Wunschabstand eine Funktion von v_i und nicht von v_j . Im Vergleich zum Straßenverkehr sind im Schienenverkehr die Werte von $t_{\Delta s,WA}$ aufgrund der größeren Bremswege deutlich höher.

3.3.2.5 Wahrnehmungsschwellen

Die Grundidee der Wahrnehmungsschwellen beruht darauf, dass erst ein durch die Wahrnehmung ausgelöster Reiz zu einer Reaktion des Fahrers führt. Nach [97] erkennt der Fahrer eine Relativbewegung nur dann, wenn sich die durch die Bewegung hervorgerufene scheinbare Größe des betrachteten Fahrzeugs verändert.

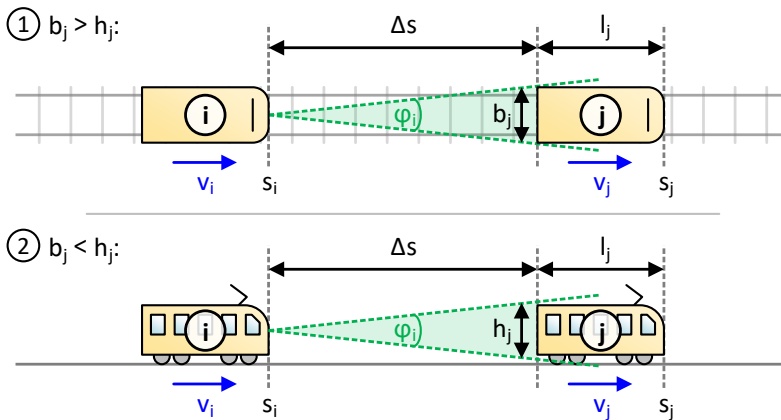


Abb. 3.11: Sichtwinkel zum vorausfahrenden Fahrzeug (vgl. [31])

In Abb. 3.11 wird der Sichtwinkel zum vorausfahrenden Fahrzeug einerseits aus der Sicht von oben (Fall 1) und andererseits aus der horizontalen Perspektive (Fall 2) veranschaulicht. Da normalerweise die Höhe h_j bei Nahverkehrsbahnen größer als die Breite b_j ist, wird in den nachfolgenden Formeln die Höhe verwendet. Mathematisch gesehen ergibt sich ein gleichschenkliges Dreieck, an dessen Spitze mit dem Winkel φ_i der Fahrer sitzt. Die Seitenlänge der Dreiecksbasis auf der gegenüberliegenden Seite entspricht der maximalen Ausdehnung des vorderen Fahrzeugs.

Die Seitenlänge der beiden gleich langen Schenkel des Dreiecks beträgt etwa den Wert von Δs . Nach den trigonometrischen Regeln gilt zwischen dem Winkel und den Seitenverhältnissen im Dreieck folgende Beziehung:

$$\tan(0,5 \cdot \varphi_i) = \frac{(0,5 \cdot h_j)}{\Delta s} \quad (3.20)$$

Nach Umstellung der Formel (3.20) beträgt der Sichtwinkel φ_i :

$$\varphi_i = 2 \cdot \arctan\left(\frac{h_j}{2 \cdot \Delta s}\right) \quad (3.21)$$

Die Bewegung der Fahrzeuge führt zu einer zeitlichen Änderung von φ_i .

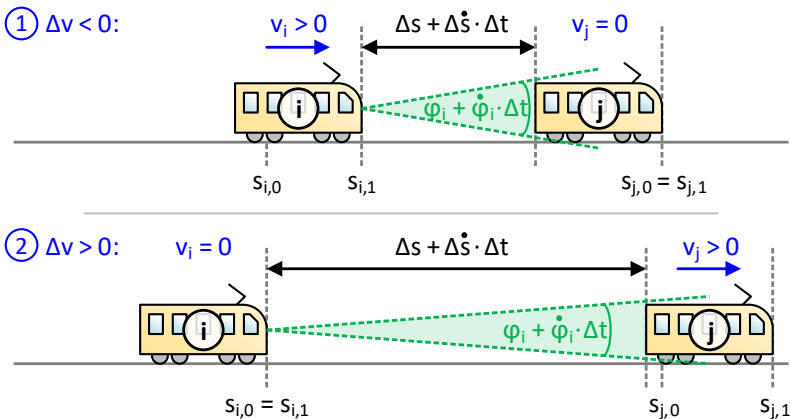


Abb. 3.12: Wahrnehmung von Relativbewegungen

In Abb. 3.12 wird der Zusammenhang zwischen der Winkeländerung $\dot{\varphi}_i$ und der Folgeabstandsänderung $\Delta\dot{s}$ für das Zeitintervall $\Delta t = t_1 - t_0$ aufgezeigt. Unterschieden werden die beiden Fälle in Bezug auf das Vorzeichen der Relativgeschwindigkeit Δv . Hiervon hängt das Vorzeichen für die Folgeabstands- und Winkeländerung ab:

- Fall (1) $\Delta v < 0 \rightarrow (\Delta\dot{s} < 0), (\dot{\varphi}_i > 0)$:
Der Fahrer nähert sich dem vorderen Fahrzeug,
wodurch der Folgeabstand kleiner und der Sichtwinkel stumpfer wird.
- Fall (2) $\Delta v > 0 \rightarrow (\Delta\dot{s} > 0), (\dot{\varphi}_i < 0)$:
Das vordere Fahrzeug entfernt sich vom Fahrer,
wodurch der Folgeabstand größer und der Sichtwinkel spitzer wird.

Leitet man Formel (3.21) nach der Zeit t ab, ist $\dot{\varphi}_i$:

$$\dot{\varphi}_i = \frac{d}{dt} [\varphi_i] = \frac{d}{dt} \left[2 \cdot \arctan \left(\frac{h_j}{2 \cdot \Delta s} \right) \right] \quad (3.22)$$

Aus Gleichung (3.22) erhält man mit:

$$\frac{d}{dt} [2 \cdot \arctan(f(t))] = 2 \cdot \frac{1}{1 + f(t)^2} \cdot f'(t) \quad (3.23)$$

und den bekannten Regeln aus der Differenzialrechnung:

$$\dot{\varphi}_i = 2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{h_j}{2 \cdot \Delta s} \right)^2} \cdot \frac{-(h_j \cdot 2 \cdot \Delta\dot{s})}{(2 \cdot \Delta s)^2} = \frac{-h_j \cdot \Delta\dot{s}}{(\Delta s)^2 + \frac{h_j^2}{4}} \quad (3.24)$$

Die Wahrnehmungsschwellen drücken die gerade noch wahrnehmbare Relativgeschwindigkeit aus. Formel (A.26) zufolge kann in Gleichung (3.24) die Folgeabstandsänderung $\Delta\dot{s}$ durch die Relativgeschwindigkeit Δv ersetzt werden. Damit ist die Winkeländerung als stimulierende Größe nach einer bestimmten Wahrnehmungsdauer proportional zu Δv und umgekehrt proportional zu Δs . Löst man die Gleichung nach Δv auf, erhält man eine quadratische Funktion der Form:

$$\Delta v = \left(-\frac{\dot{\phi}_i}{h_j} \cdot (\Delta s)^2 \right) - \frac{\dot{\phi}_i \cdot h_j}{4} \quad (3.25)$$

Aus Gleichung (3.25) wird ersichtlich, dass bei doppeltem Δs ungefähr das vierfache Δv erforderlich ist, um beim Fahrer den gleichen Reiz auszulösen. Fasst man die Terme zusammen, lässt sich die quadratische Funktion durch die beiden Parameter c und k beschreiben [31]:

$$\Delta v = k (\Delta s)^2 + c \quad (3.26)$$

Diese beiden Parameter werden mittels der fahrerindividuellen Stützpunkte (1) und (2) aus Tab. 3.7 für die negative bzw. positive Wahrnehmungsschwelle bestimmt. Die Stützpunkte haben folgenden Einfluss:

- Stützpunkt (1)
mit $(\Delta v_{NWS(1)}, \Delta s_{NWS(1)})$ bzw. $(\Delta v_{PWS(1)}, \Delta s_{PWS(1)})$:
Sensibilität auf das Hindernis bei geringem Folgeabstand.
- Stützpunkt (2)
mit $(\Delta v_{NWS(2)}, \Delta s_{NWS(2)})$ bzw. $(\Delta v_{PWS(2)}, \Delta s_{PWS(2)})$:
Vorausschauendes Fahren bei hohen Relativgeschwindigkeiten.

Der erste Stützwert $\Delta v_{NWS(1)}$ bzw. $\Delta v_{PWS(1)}$ bezieht sich auf den Folgeabstand von 0 m. Eine Veränderung des Scheitelparameters c bewirkt eine Verschiebung in Δv -Richtung. Diese Verschiebung entspricht dem jeweils ersten Stützwert:

$$c_{NWS} = \Delta v_{NWS(1)} < 0 \quad (3.27)$$

bzw.:

$$c_{PWS} = \Delta v_{PWS(1)} > 0 \quad (3.28)$$

Der zweite Stützwert $\Delta s_{NWS(2)}$ bzw. $\Delta s_{PWS(2)}$ bezieht sich auf die beiden Relativgeschwindigkeiten $\pm 19,44$ m/s (± 70 km/h). Diese Referenzwerte entsprechen dem Standardwert der Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs $v_{Fz,max}$ (Tab. 3.13). Der Krümmungsparameter k ist für die Form der Kurve

verantwortlich. Der Graph öffnet sich für einen negativen Wert nach links (NWS) und für einen positiven Wert nach rechts (PWS). Mithilfe des zweiten Stützpunkts erhält man den Krümmungsparameter:

$$k_{NWS} = \frac{\Delta v_{NWS(2)} - \Delta v_{NWS(1)}}{(\Delta s_{NWS(2)})^2} < 0 \quad (3.29)$$

bzw.:

$$k_{PWS} = \frac{\Delta v_{PWS(2)} - \Delta v_{PWS(1)}}{(\Delta s_{PWS(2)})^2} > 0 \quad (3.30)$$

Setzt man die beiden Parameter in Gleichung (3.25) ein, ergibt sich die negative Wahrnehmungsschwelle durch:

$$\Delta v_{NWS} = (k_{NWS} \cdot (\Delta s)^2) + c_{NWS} \quad (3.31)$$

und die positive Wahrnehmungsschwelle durch:

$$\Delta v_{PWS} = (k_{PWS} \cdot (\Delta s)^2) + c_{PWS} \quad (3.32)$$

Die Kurven der NWS und PWS sind mit ihren beiden Stützpunkten in Abb. 3.13 abgebildet.

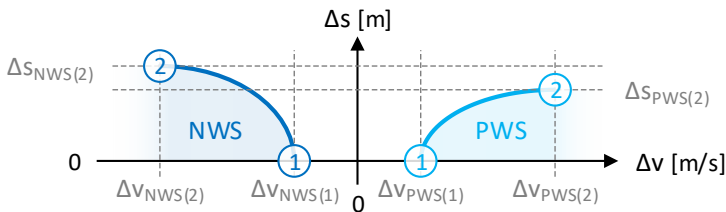


Abb. 3.13: Stützpunkte der Wahrnehmungsschwellen

Ein Fahrer reagiert auf ein sich annäherndes Hindernis sensibler als auf ein sich entfernendes Hindernis, da ihm die Annäherung ein Gefühl der Gefahr und die Entfernung ein Gefühl der Entspannung vermittelt [31]. Daher ist die NWS im Vergleich zur PWS steiler.

Im Gegensatz zu den vier fahrerindividuellen Abständen liegen die Kurven der NWS und PWS unbeweglich im Fahrerzonendiagramm (Abb. 3.14). Sobald die Wahrnehmungsschwellen überschritten werden:

- $\Delta v \leq \Delta v_{NWS}$
- $\Delta v \geq \Delta v_{PWS}$

beginnt der Fahrer damit, seine Geschwindigkeit an die seines Vorgängers anzugleichen. Dieser Vorgang wird beendet, wenn Δv so klein geworden ist, dass er die Differenz nicht mehr wahrnehmen kann. In diesem Fall liegt Δv zwischen den beiden Grenzkurven innerhalb des Trichters $\Delta v_{NWS} < \Delta v < \Delta v_{PWS}$. Aufgrund des menschlichen Unvermögens, einem Fahrzeug mit exakt dem gleichen Abstand zu folgen, pendelt Δs in diesem Bereich um den gewünschten Wert [97]. Der Trichter öffnet sich nach oben, so dass es mit zunehmendem Δs einer immer größeren Δv bedarf, um eine der beiden Wahrnehmungsschwellen zu überschreiten.

3.3.3 Wunschbeschleunigung

Das Fahrverhalten des Fahrers resultiert aus seiner Wunschbeschleunigung a_i^* im momentanen Simulationszeitschritt, die durch den Fahrhebel eingestellt wird.

Um eindeutig zwischen negativer, neutraler und positiver Beschleunigung unterscheiden zu können, werden im simulierten Fahrspielprozess sehr kleine Beschleunigungswerte vermieden. Dafür werden die folgenden beiden Schwellenwerte definiert:

- $a_{neg,max} = -0,2 \text{ m/s}^2$ (oberer Schwellenwert)
- $a_{pos,min} = +0,2 \text{ m/s}^2$ (unterer Schwellenwert)

Damit liegt die Wunschbeschleunigung des Fahrers a_i^* in einem der folgenden drei Wertebereiche:

$$a_i^* = \begin{cases} \min\{a_i^*, a_{neg,max}\} & \text{falls } a_i^* < 0 \\ 0 & \text{falls } a_i^* = 0 \\ \max\{a_{pos,min}, a_i^*\} & \text{falls } a_i^* > 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

Die fahrerindividuellen Beschleunigungsparameter sind der Tab. 3.8 zu entnehmen.

Tab. 3.8: Fahrerindividuelle Beschleunigungsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Wunschendbeschleunigung	$a_{pos,max}^*$	+0,9	[m/s ²]
Wunschendbeschleunigung bei Fahrzeughöchstgeschwindigkeit $v_{Fz,max}$	$a_{pos,end}^*$	+0,6	[m/s ²]
Beschleunigungsbegrenzungsbereich in Zone 6 für Δs	$\Delta s_{Z6,lim_a}$	75	[m]
Beschleunigungsbegrenzungsbereich in Zone 7 für Δv	$\Delta v_{Z7,lim_a}$	5,56	[m/s]
Wunschanfangsverzögerung (SA)	$a_{neg,anf}^*$	-0,6	[m/s ²]
Wunschendverzögerung (BA)	$a_{neg,min}^*$	-0,9	[m/s ²]
Gefahrenverzögerung	$a_{abs,min}^*$	-2,7	[m/s ²]
Einhaltungsfaktor für die Richtgeschwindigkeit v^*	f_{v^*}	0,95	[-]

Bei der Festlegung der Beschleunigungswerte müssen aus Konsistenzgründen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- $0 > a_{neg,max} \geq a_{neg,\alpha}^* \geq a_{neg,anf}^* \geq a_{neg,min}^* \geq a_{abs,min}^*$
- $0 < a_{pos,min} \leq a_{pos,\alpha}^* \leq a_{pos,end}^* \leq a_{pos,max}$

Die Ausrollparameter $a_{neg,\alpha}^*$ und $a_{pos,\alpha}^*$ werden in der Tab. 3.10 festgelegt.

3.3.3.1 Fahrerzonendiagramm

Die Wunschbeschleunigung des Fahrers a_i^* wird aus dem momentanen Folgeabstand Δs und der momentanen Relativgeschwindigkeit Δv bezüglich seines nächsten vorausliegenden Hindernisses bestimmt. Wie aus dem in Abb. 3.14 dargestellten Fahrerzonendiagramm ersichtlich, werden mit den sechs fahrerspezifischen Kurven aus Kap. 3.3.2 sieben Zonen definiert, aus denen das aktuelle Fahrverhalten abgeleitet wird. Auf die sich ändernde Verkehrssituation reagiert der Fahrer in Form von Beschleunigungsänderungen, sobald sie von ihm als notwendig erachtet werden. Dies erfolgt bei einem Zonenwechsel.

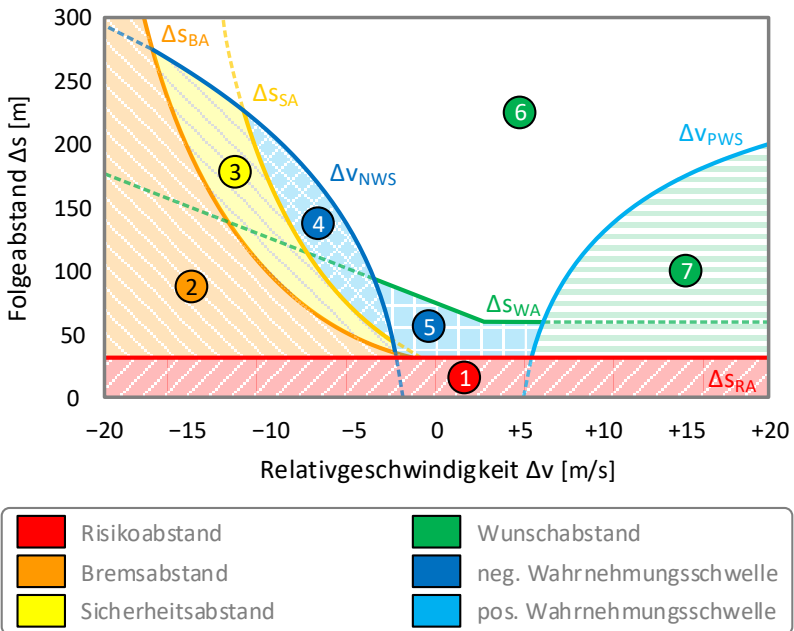


Abb. 3.14: Fahrerzonendiagramm (vgl. [31])

Nach Formel (3.10) ist Δv eine Funktion aus der Geschwindigkeit des Fahrers v_i und des Hindernisses v_j . Da sich das Zonendiagramm auf den Fahrer bezieht, werden die Kurven für ein variables v_i und ein konstantes v_j angezeigt.

Daher wird der nur von v_j abhängige Risikoabstand als Gerade dargestellt. Das abgebildete Zonendiagramm ergibt sich, wenn sich mit den Standard-einstellungen für die Kurvenparameter ein mobiles Hindernis mit einer Geschwindigkeit v_j von 5 m/s vor dem Fahrer befindet.

Zu beachten ist, dass situationsbedingt nur ein Teilbereich der horizontalen Achse des Zonendiagramms gültig ist, da Geschwindigkeiten nicht negativ sein können. Demnach darf für den abgebildeten Fall nur der Teilbereich von Δv im Intervall $[-20 \text{ m/s}, +5 \text{ m/s}]$ betrachtet werden. Bei stationären Hindernissen, deren v_j gleich 0 m/s beträgt, ist ausschließlich die linke Seite des Zonendiagramms mit negativem Δv relevant.

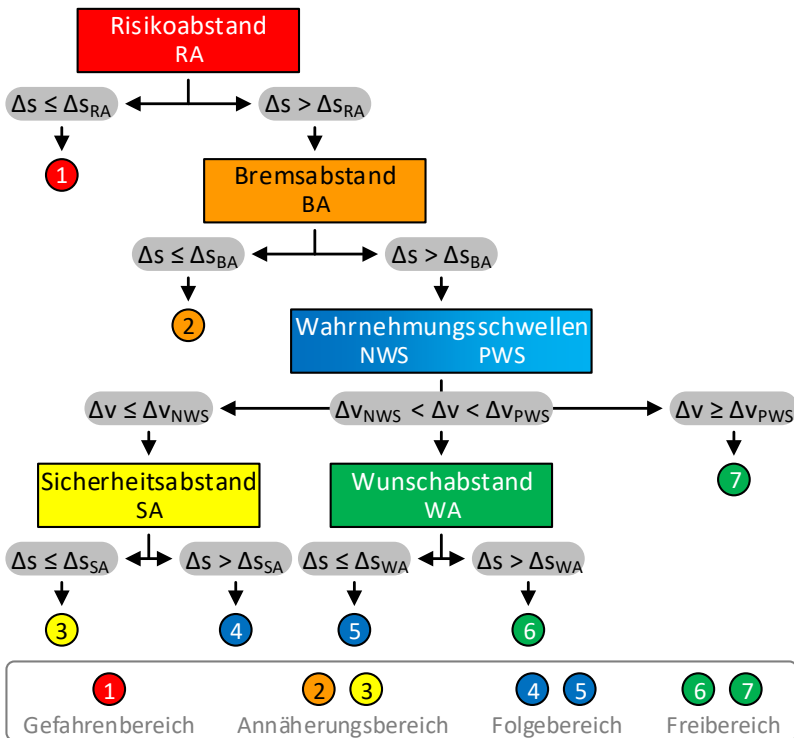


Abb. 3.15: Zuweisungsbaum für die Fahrerzonenbereiche

Im Zonendiagramm befindet sich der Fahrer in Abhängigkeit von Δs und Δv in einer der sieben Zonen. Die Zuweisung der Zonen erfolgt nach dem in Abb. 3.15 aufgezeigten Zuweisungsbaum.

In Bezug auf die Wunschbeschleunigung des Fahrers lassen sich die sieben Zonen in folgende vier Zonenbereiche zusammenfassen [45]:

- Gefahrenbereich (Zone 1)
- Annäherungsbereich (Zone 2 und 3)
- Folgebereich (Zone 4 und 5)
- Freibereich (Zone 6 und 7)

Im Gefahren- und Annäherungsbereich wird die Geschwindigkeit reduziert, im Folgebereich beibehalten und im Freibereich erhöht. Generell ist die Wunschbeschleunigung a_i^* so festzulegen, dass die Geschwindigkeit v_i im nächsten Simulationszeitschritt nie negativ wird:

$$a_i^* = \begin{cases} a_i^* & \text{falls } a_i^* \geq 0 \\ \max\left\{\frac{-v_i}{\Delta t}, a_i^*\right\} & \text{falls } a_i^* < 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

Um große Beschleunigungsdifferenzen an den Zonenübergängen zu vermeiden, ist in einigen Grenzbereichen ein weicher Übergang erforderlich.

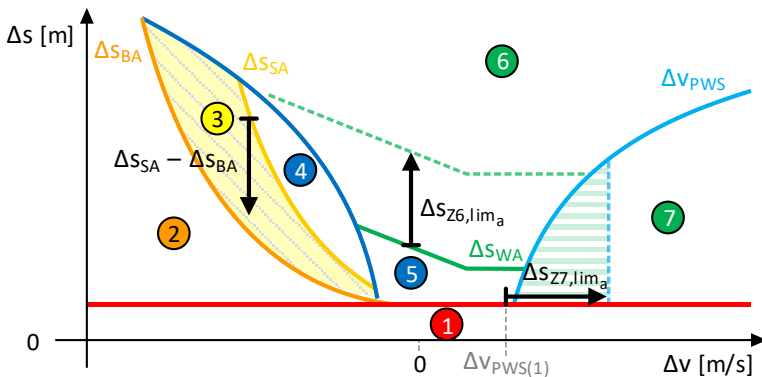


Abb. 3.16: Δs - und Δv -abhängige Zonenbereiche

Diese speziellen Grenzbereiche werden in Abb. 3.16 aufgezeigt und betreffen die Zonen 3, 6 und 7. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Zonenbereiche erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln.

3.3.3.2 Gefahrenbereich (Zone 1)

Den Gefahrenbereich möchte der Fahrer so schnell wie möglich verlassen bzw. erst gar nicht betreten. a_i^* wird innerhalb der NWS auf die Gefahrenverzögerung $a_{abs,min}^*$, ansonsten auf die Wunschendverzögerung $a_{neg,min}^*$ gesetzt:

$$a_i^* = \begin{cases} a_{abs,min}^* & \text{falls } \Delta v \leq \Delta v_{NWS} \\ a_{neg,min}^* & \text{falls } \Delta v > \Delta v_{NWS} \end{cases} \quad (3.35)$$

Dadurch wird verhindert, dass bei stationären Hindernissen gegen Ende des Bremsvorgangs die Gefahrenverzögerung ausgelöst wird.

3.3.3.3 Annäherungsbereich (Zone 2 und 3)

Im Annäherungsbereich möchte der Fahrer durch einen Bremsvorgang seine Geschwindigkeit reduzieren. Im optimalen Fall spielt sich der gesamte Bremsvorgang in Zone 3 ab und endet ggf. erst gegen Ende in Zone 2.

Die Zone 2 ist der Bremsbereich, in dem stark verzögert wird. Innerhalb der NWS errechnet sich a_i^* aus der umgestellten Bremswegformel (A.33) und wird nach unten auf $a_{abs,min}^*$ begrenzt. Außerhalb der NWS wird a_i^* auf $a_{neg,min}^*$ gesetzt, um aufgrund der diskreten Simulationszeitschrittweite unrealistisch hohe Verzögerungswerte auf den letzten Bremswegmetern zu vermeiden:

$$a_i^* = \begin{cases} \max \left\{ \frac{v_f^2 - v_i^2}{2 \cdot (\Delta s - d_0)}, a_{abs,min}^* \right\} & \text{falls } \Delta v \leq \Delta v_{NWS} \\ a_{neg,min}^* & \text{falls } \Delta v > \Delta v_{NWS} \end{cases} \quad (3.36)$$

Die Zone 3 ist der Bremsbereich, in dem Δs zwischen dem Bremsabstand Δs_{BA} und dem Sicherheitsabstand Δs_{SA} liegt. In Abb. 3.16 wird diese Zone durch den linken Pfeil gekennzeichnet. Hier möchte der Fahrer seine Geschwindigkeit so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich verringern.

In Zone 3 wird die von Δs abhängige Wunschbeschleunigung $a_{neg,\Delta s}^*$ linear im Intervall $[a_{neg,max}^*, a_{neg,min}^*]$ interpoliert:

$$a_{neg,\Delta s}^* = \left(\frac{a_{neg,max}^* - a_{neg,min}^*}{\Delta s_{SA} - \Delta s_{BA}} \cdot (\Delta s - \Delta s_{BA}) \right) + a_{neg,min}^* \quad (3.37)$$

Wie in Abb. 3.17 dargestellt, beginnt die Verzögerung beim oberen Schwellenwert für die negative Beschleunigung $a_{neg,max}^*$, auch wenn Δs_{SA} nach Formel (3.15) mit den Verzögerungswerten aus dem Intervall $[a_{neg,anf}^*, a_{neg,min}^*]$ berechnet wird. Die Berechnungspraxis hat gezeigt, dass mit einer anfangs kleineren Verzögerung verhindert wird, dass es zu häufigen Sprüngen zwischen der Zone 3 und den Zonen 4, 5 oder 6 kommt.

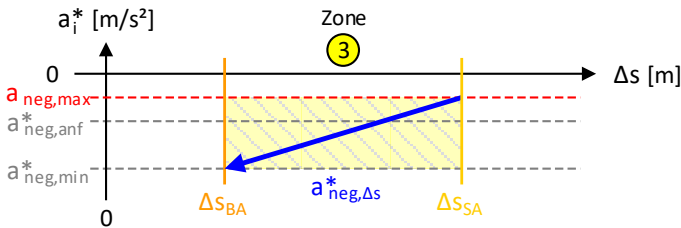


Abb. 3.17: Δs -abhängige Wunschverzögerung

Für Zone 3 beträgt a_i^* unter Berücksichtigung des Verspätungsfaktors f_τ :

$$a_i^* = f_\tau \cdot a_{neg,\Delta s}^* \quad (3.38)$$

3.3.3.4 Folgebereich (Zone 4 und 5)

Der Folgebereich wird in erster Linie durch die beiden Wahrnehmungsschwellen des Fahrers definiert. In diesem Bereich möchte der Fahrer seine Geschwindigkeit beibehalten, so dass a_i^* gleich null ist:

$$a_i^* = 0 \quad (3.39)$$

3.3.3.5 Freibereich (Zone 6 und 7)

Im Freibereich nimmt der Fahrer kein vor ihm liegendes Hindernis wahr. Er hat freie Fahrt und strebt seine persönliche Wunschgeschwindigkeit v_i^* (Kap. 3.3.4.1) an. Der Freibereich ist der einzige Bereich, in dem Ausrollphasen (Kap. 3.3.4.3) möglich sind. In Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit v_i und dem aktuellen Ausrollzustand z_α wird a_i^* unter Beachtung des Verspätungsfaktors f_τ bestimmt durch:

$$a_i^* = \begin{cases} \begin{cases} f_\tau \cdot a_{pos,Z6vZ7}^* & \text{falls } z_\alpha = \{0, 1\} \\ f_\tau \cdot a_{pos,\alpha}^* & \text{falls } z_\alpha = 2 \\ \text{n. def.} & \text{falls } z_\alpha = 3 \end{cases} & \text{falls } v_i < v_i^* \\ 0 & \text{falls } v_i = v_i^* \\ \begin{cases} f_\tau \cdot a_{neg,anf}^* & \text{falls } z_\alpha = \{0, 1\} \\ f_\tau \cdot a_{neg,\alpha}^* & \text{falls } z_\alpha = 2 \\ \text{n. def.} & \text{falls } z_\alpha = 3 \end{cases} & \text{falls } v_i > v_i^* \end{cases} \quad (3.40)$$

Generell beschleunigt der Fahrer bei $v_i < v_i^*$ und verzögert bei $v_i > v_i^*$.

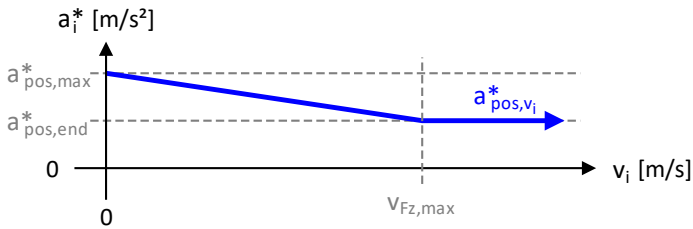
Für einen weicheren Zonenübergang werden die Zonen 6 und 7 in jeweils zwei Teilzonen untergliedert:

$$a_{pos,Z6vZ7}^* = \begin{cases} \begin{cases} a_{pos,Z6}^* & \text{falls Zone 6a} \\ a_{pos,v_i}^* & \text{falls Zone 6b} \end{cases} & \text{falls Zone 6} \\ \begin{cases} a_{pos,Z7}^* & \text{falls Zone 7a} \\ a_{pos,v_i}^* & \text{falls Zone 7b} \end{cases} & \text{falls Zone 7} \end{cases} \quad (3.41)$$

Die angestrebte von v_i abhängige Wunschbeschleunigung a_{pos,v_i}^* wird an die Fahrgeschwindigkeit mittels linearer Interpolation angepasst:

$$a_{pos,v_i}^* = \left(\frac{a_{pos,end}^* - a_{pos,max}^*}{v_{Fz,max}} \cdot \min\{v_i, v_{Fz,max}\} \right) + a_{pos,max}^* \quad (3.42)$$

Nach Abb. 3.18 bewegt sich a_{pos,v_i}^* zwischen $a_{pos,max}^*$ und $a_{pos,end}^*$ (Tab. 3.8) und nimmt über der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs $v_{Fz,max}$ (Tab. 3.13) nicht weiter ab.

Abb. 3.18: v_i -abhängige Wunschbeschleunigung

Die Unterteilung der Zone 6 erfolgt in Abhängigkeit von Δs :

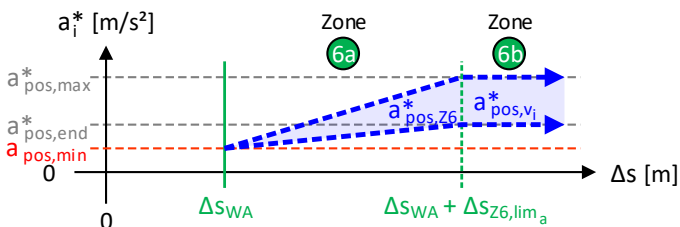
- Zone 6a: $\Delta s \leq (\Delta s_{WA} + \Delta s_{Z6,lim_a})$
- Zone 6b: $\Delta s > (\Delta s_{WA} + \Delta s_{Z6,lim_a})$

In Abb. 3.16 wird die Zone 6b durch den mittleren Pfeil gekennzeichnet.

Der in Tab. 3.8 definierte Beschleunigungsbereich $\Delta s_{Z6,lim_a}$ gibt für Zone 6 den zusätzlichen Folgeabstand zum Wunschabstand an, in dem die Wunschbeschleunigung linear von $a_{pos,min}$ auf a_{pos,v_i}^* ansteigt:

$$a_{pos,Z6}^* = \left(\frac{a_{pos,v_i}^* - a_{pos,min}}{\Delta s_{Z6,lim_a}} \cdot (\Delta s - \Delta s_{WA}) \right) + a_{pos,min} \quad (3.43)$$

In Abb. 3.19 wird Zone 6a durch zwei Pfeile eingegrenzt. Die von Δs abhängige Beschleunigung nimmt in Pfeilrichtung zu.

Abb. 3.19: Δs -abhängige Wunschbeschleunigung

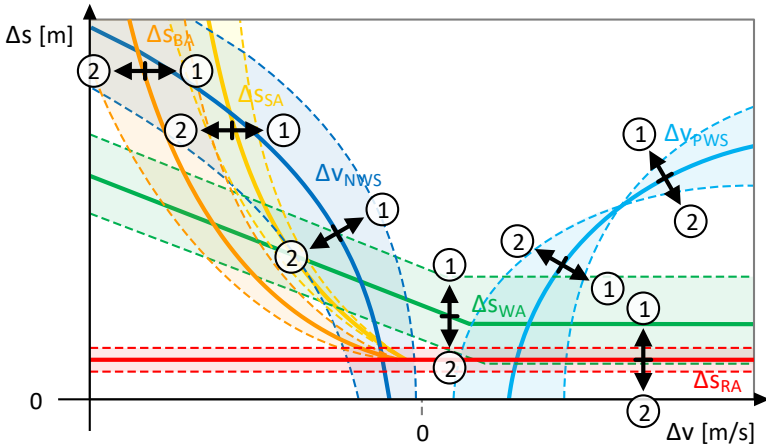


Abb. 3.21: Parametervariation im Fahrerzonendiagramm

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden weitere Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten aufgeführt.

3.3.4.1 Richt- und Wunschgeschwindigkeit

Die Richtgeschwindigkeit v^* wird anhand der fest vorgegebenen Fahrzeughöchstgeschwindigkeit $v_{Fz,max}$ und dem momentanen Geschwindigkeitslimit v_{lim} der befahrenen Strecke ermittelt durch:

$$v^* = \min\{v_{Fz,max}, v_{lim}\} \quad (3.45)$$

Die Wunschgeschwindigkeit v_i^* des Fahrers wird mit dem in der Tab. 3.8 definierten Einhaltungsfaktor f_{v^*} für die Richtgeschwindigkeit festgelegt:

$$v_i^* = f_{v^*} \cdot v^* \quad (3.46)$$

Im Freibereich ist v_i^* die Geschwindigkeit, die der Fahrer erreichen möchte.

3.3.4.2 Verspätungsverhalten

Nach Formel (3.8) ist die momentane Verspätung τ die Abweichung der Istzeit von der Sollzeit. Die Parameter für das fahrerindividuelle Verspätungsverhalten sind in der Tab. 3.9 vorzufinden.

Tab. 3.9: Fahrerindividuelle Verspätungsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Verspätungsverhalten aktiviert	β_τ	1	[-]
Referenzzeit für die Verspätung	$\tau_{pos(1)}$	+600	[s]
Maximaler Referenzfaktor für die Wunschbeschleunigung a_i^* bei $\tau_{pos(1)}$	$f_{\tau,max(1)}$	1,10	[-]
Referenzzeit für die Verfrühung	$\tau_{neg(2)}$	-600	[s]
Minimaler Referenzfaktor für die Wunschbeschleunigung a_i^* bei $\tau_{neg(2)}$	$f_{\tau,min(2)}$	0,90	[-]

Wie in Abb. 3.22 dargestellt, werden zur Bestimmung von f_τ zwei Stützpunkte (1) und (2) mit jeweils einer Referenzzeit und einem Referenzfaktor definiert. Zwischen den Stützpunkten wird f_τ linear interpoliert.

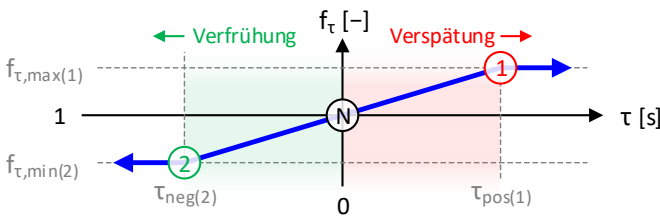


Abb. 3.22: Verspätung und Verfrühung

Liegt die Verspätung außerhalb des farbig markierten Referenzbereichs $\tau = [\tau_{neg(2)}, \tau_{pos(1)}]$, wird f_τ nach unten auf $f_{\tau,min(2)}$ bzw. nach oben auf $f_{\tau,max(1)}$ begrenzt:

$$f_{\tau} = \begin{cases} \min \left\{ \left(1 + \left(\frac{f_{\tau, \max(1)} - 1}{\tau_{\text{pos}(1)}} \cdot \tau \right) \right), f_{\tau, \max(1)} \right\} & \text{falls } \tau > 0 \\ 1 & \text{falls } \tau = 0 \\ \max \left\{ f_{\tau, \min(2)}, \left(1 + \left(\frac{f_{\tau, \min(2)} - 1}{\tau_{\text{neg}(2)}} \cdot \tau \right) \right) \right\} & \text{falls } \tau < 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

Der Einfluss der Verspätung wird beim Brems- und Sicherheitsabstand sowie in Zone 3 und Zone 6-7 in den Formeln (3.14), (3.16), (3.38) und (3.40) berücksichtigt. Wird das Verspätungsverhalten deaktiviert, beträgt der Verspätungsfaktor zu jeder Zeit $f_{\tau} = 1$.

3.3.4.3 Ausrollverhalten

Der Ausrollzustand stellt im Fahrspielzyklus einen Sonderfall dar, da der Fahrer den Fahrhebel auf die Neutralstellung setzt. Das bedeutet, dass die Antriebs- und Bremskräfte gleich null sind und sich die Beschleunigung des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrwiderstände einstellt. Ausrollphasen sind nur im Freibereich (Kap. 3.3.3.5) möglich. Der aktuelle Ausrollzustand wird durch die Variable z_{α} ausgedrückt:

$$z_{\alpha} = \begin{cases} 0 & \text{falls Ausrollen ausgeschaltet} \\ 1 & \text{vor dem Ausrollen} \\ 2 & \text{nach dem Ausrollen} \\ 3 & \text{beim Ausrollen} \end{cases} \quad (3.48)$$

Ist das Ausrollverhalten für den Fahrer ausgeschaltet, lässt er das Fahrzeug zu keiner Zeit ausrollen. Ist es eingeschaltet, sind die letzten drei Ausrollzustände möglich. Nur im Zustand $z_{\alpha} = 3$ befindet sich der Fahrer in der aktiven Ausrollphase. In den Zuständen $z_{\alpha} = \{1, 2\}$ vor bzw. nach dem Ausrollen ist der Fahrer bestrebt, seine Wunschgeschwindigkeit v_i^* zu erreichen. Im Anschluss daran leitet er erneut eine aktive Ausrollphase ein, sofern es die Verkehrssituation zulässt.

In der Tab. 3.10 werden die definierbaren Ausrollparameter aufgelistet.

Tab. 3.10: Fahrerindividuelle Ausrollparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Ausrollzustand	z_α	1	[-]
Unterer Ausrollfaktor für die Fahrerwunschgeschwindigkeit v_i^*	$f_{\alpha,min}$	0,85	[-]
Wunschbeschleunigung unter v_i^*	$a_{pos,\alpha}^*$	+0,3	[m/s ²]
Oberer Ausrollfaktor für die Fahrerwunschgeschwindigkeit v_i^*	$f_{\alpha,max}$	1,05	[-]
Wunschverzögerung über v_i^*	$a_{neg,\alpha}^*$	-0,3	[m/s ²]

Der Ausrollbereich wird durch die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers v_i^* bestimmt und liegt zwischen der unteren Ausrollgeschwindigkeitsgrenze:

$$v_{\alpha,min} = f_{\alpha,min} \cdot v_i^* \tag{3.49}$$

und der oberen Ausrollgeschwindigkeitsgrenze:

$$v_{\alpha,max} = f_{\alpha,max} \cdot v_i^* \tag{3.50}$$

In Abb. 3.23 wird der Ausrollvorgang zwischen den drei möglichen Ausrollzuständen für zwei Verläufe aufgezeigt. Beim ersten Verlauf (1) sind die Fahrwiderstände positiv und beim zweiten Verlauf (2) sind sie negativ.

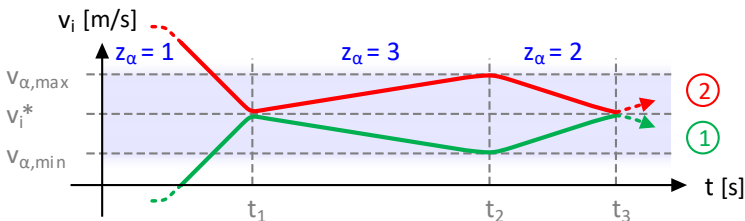


Abb. 3.23: Ausrollvorgang

3.4 Fahrzeugmodell

Das Fahrzeugmodell beschreibt die Fahrzeuge, mit denen die Beschleunigungswünsche der Fahrer umgesetzt werden. Es basiert auf den fahrdynamischen Grundlagen aus dem Anhang A.2.2.

Tab. 3.11: Momentane Simulationsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Maßeinheit
Fahrgeschwindigkeit	v_{Fz}	[m/s]
Gewünschte Fahrzeugbeschleunigung	a_{Fz}^*	[m/s ²]
Fahrgastanzahl	n_{Fg}	[-]
Steigungsgrad	g_S	[‰]
Kurvenradius	r_K	[m]
Tunnelquerschnittsfläche	A_T	[m ²]
Geschwindigkeitslimit	v_{lim}	[m/s]
Bewegungs-/Lageenergie des Fahrzeugs	E_{FzTr}	[W·s]
Energieinhalt des mobilen Speichers	E_{FzES}	[W·s]
Positive Fahrzeugnetzausgangsleistungsgrenze	$P_{FzDc,max}$	[W]
Negative Fahrzeugnetzeingangsleistungsgrenze	$P_{FzDc,min}$	[W]

Im Simulationsprogramm lassen sich beliebig viele Fahrzeugprofile anlegen. Während des Simulationsablaufs müssen für jedes Fahrzeug alle momentanen Simulationsparameter aus Tab. 3.11 bekannt sein.

3.4.1 Fahrwiderstände

Bei Fahrzeugen wird der entsprechende Bewegungszustand über die Fahrzeugtraktionskraft F_{FzTr} hergestellt, mit der die Fahrwiderstandskraft F_{FzFw} zu überwinden ist. In Abb. 3.24 sind alle im Simulationsprogramm berücksichtigten Fahrwiderstandskomponenten dargestellt.

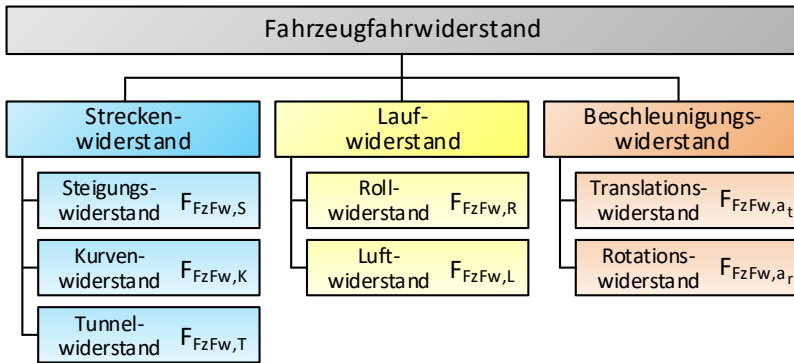


Abb. 3.24: Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand F_{FzFw} lässt sich in folgende drei Gruppen aufteilen [30] [46]:

- Streckenwiderstand
- Laufwiderstand
- Beschleunigungswiderstand

F_{FzFw} ist die Summe aller Kräfte, die bei der Fahrzeugbewegung auftreten:

$$\begin{aligned}
 F_{FzFw} = & F_{FzFw,S} + F_{FzFw,K} + F_{FzFw,T} + \\
 & F_{FzFw,R} + F_{FzFw,L} + \\
 & F_{FzFw,a_t} + F_{FzFw,a_r}
 \end{aligned} \quad (3.51)$$

Die Vorzeichen der Fahrwiderstandskräfte sind so festgelegt, dass sie entgegen der Fahrtrichtung positiv sind. Die Steigungs- und Beschleunigungswiderstände können beide Vorzeichen annehmen. Weichen- und Anfahrwiderstände werden vernachlässigt.

Die Fahrzeuggesamtmasse $m_{Fz,ges}$ ergibt sich aus dem Leergewicht m_{Fz} und der Zuladung des Fahrzeugs:

$$m_{Fz,ges} = m_{Fz} + (\min\{n_{Fg}, n_{FzFg,max}\} \cdot m_{Fg}) + m_{FzEs} \quad (3.52)$$

Tab. 3.12: Fahrzeugspezifische Fahrwiderstandsparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Leergewicht	m_{Fz}	$40,0 \cdot 10^3$	[kg]
Fahrgastkapazität	$n_{FzFg,max}$	150	[-]
Massenzuschlagsfaktor	$\xi_{Fz,m}$	1,12	[-]
Traktionsachsenverhältnis	$\psi_{Fz,Tr}$	0,67	[-]
Rollwiderstandsbeiwert	$c_{Fz,R}$	2,3	[‰]
Luftwiderstandsbeiwert	$c_{Fz,L}$	0,8	[-]
Tunnelwiderstandsbeiwert	$c_{Fz,T}$	4,8	[-]
Fahrzeugstirnfläche	A_{Fz}	10,0	[m ²]
Schienenspurweite	$d_{Fz,b}$	1,44	[m]
Drehgestellachsabstand	$d_{Fz,c}$	1,8	[m]
Fahrzeuglänge	l_{Fz}	30	[m]

Die Zuladung ist abhängig von der momentanen Fahrgastanzahl n_{Fg} , die durch die Fahrgastkapazität $n_{FzFg,max}$ begrenzt ist und vom Fahrgastgewicht m_{Fg} , das in den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) definiert wird. Ggf. wird noch die Masse des mobilen Energiespeichers m_{FzES} (Kap. 3.4.3.2) hinzuzugediert. Alle weiteren benötigten fahrzeugspezifischen Fahrwiderstandsparameter sind in der Tab. 3.12 aufgeführt.

3.4.1.1 Streckenwiderstand

Der Streckenwiderstand besteht aus den folgenden Bestandteilen:

- Steigungswiderstand $F_{FzFw,S}$
- Kurvenwiderstand $F_{FzFw,K}$
- Tunnelwiderstand $F_{FzFw,T}$

Der Steigungswiderstand entspricht der Hangabtriebskraft an einer schiefen Ebene mit dem Steigungswinkel φ_S , die eine Kraftkomponente der nach Formel (A.38) berechneten Fahrzeuggewichtskraft $F_{Fz,G}$ darstellt:

$$F_{FzFw,S} \approx F_{Fz,G} \cdot \tan(\varphi_S) = \frac{g_S}{10^3 \text{ ‰}} \cdot F_{Fz,G} \quad (3.53)$$

Das Kräfteparallelogramm ist im Anhang A.1.2.5 in Abb. A.4 abgebildet.

Die Fahrzeuge werden im Gegensatz zur Folgeabstandsrechnung als Massenpunkte ohne Länge betrachtet. Der Steigungsgrad g_S wird nach Formel (A.16) berechnet und liegt im Schienenverkehr, abgesehen von Zahnradbahnen, nicht über $g_S = 100 \text{ ‰}$ [30] [95].

Der Kurvenwiderstand wird in erster Linie durch die Wegdifferenz zwischen der Innen- und Außenschiene verursacht, die durch den momentanen Bogenradius r_K und die Schienenspurweite $d_{Fz,b}$ bestimmt wird. Da die Radscheiben fest mit der Achswelle verbunden sind, können sich die Radsätze in der Bogenkrümmung nicht radial einstellen [46]. In die verwendete Formel fließt neben dem Achsabstand $d_{Fz,c}$ der beiden Radsätze im Drehgestell noch der Haftreibungsbeiwert μ_H ein [65] [82]:

$$F_{FzFw,K} = \frac{\mu_H \cdot \left((0,72 \cdot d_{Fz,b}) + (0,47 \cdot d_{Fz,c}) \right)}{r_K} \cdot F_{Fz,G} \quad (3.54)$$

Obwohl die Reibung zwischen der Außen- und Innenschiene geschwindigkeitsabhängig ist [58], wird die Fahrgeschwindigkeit nicht in die Formel (3.54) einbezogen.

Der Tunnelwiderstand gibt den zusätzlichen Anteil des Luftwiderstands an, der im begrenzten Lichtraumprofil des Tunnels entsteht:

$$F_{FzFw,T} = k_T \cdot c_{Fz,T} \cdot A_{Fz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Fz}^2 \quad (3.55)$$

In Formel (3.55) entspricht der Versperrungskoeffizient k_T dem Verhältnis aus der Fahrzeugstirnfläche A_{Fz} zur Tunnelquerschnittsfläche A_T . Der Tunnelwiderstandsbeiwert $c_{Fz,T}$ drückt den Faktor aus, um den sich der Luftwiderstand im Tunnel erhöht. Messungen der SBB zufolge weist er in einspurigen Tunneln etwa den dreifachen und in zweispurigen Tunneln den doppelten Wert gegenüber offenen Strecken auf [79].

3.4.1.2 Laufwiderstand

Der Laufwiderstand setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Rollwiderstand $F_{FzFw,R}$
- Luftwiderstand $F_{FzFw,L}$

Der Rollwiderstand resultiert aus der rollenden Reibung zwischen dem Rad und der Schiene sowie aus der Reibung der rotierenden Antriebsteile in den Achslagern:

$$F_{FzFw,R} = \frac{c_{Fz,R}}{10^3 \text{ ‰}} \cdot F_{Fz,G} \quad (3.56)$$

In Formel (3.56) ist der Rollwiderstandsbeiwert $c_{Fz,R}$ ein spezifischer Koeffizient, der sich auf die Fahrzeuggewichtskraft $F_{Fz,G}$ bezieht, da das Rad-Schiene-Paar in erster Linie durch die Gewichtskraft der Radlast beansprucht wird. Für $c_{Fz,R}$ gibt [30] bei mäßigen Fahrgeschwindigkeiten einen spezifischen Wert von 2,5 N/kN an.

Der Luftwiderstand entsteht durch den auf die Stirnfläche des Fahrzeugs A_{Fz} auftreffenden Luftstrom, der vor dem Fahrzeug einen Überdruck und hinter dem Fahrzeug einen Unterdruck erzeugt. Den Erkenntnissen aus der Strömungslehre zufolge kann nach dem Gesetz von Bernoulli der Druckunterschied mit der Dichte und Fließgeschwindigkeit des strömenden Fluids berechnet werden [60]. Mit der Luftdichte ρ ist der Luftwiderstand quadratisch proportional zur Fahrgeschwindigkeit v_{Fz} :

$$F_{FzFw,L} = c_{Fz,L} \cdot A_{Fz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Fz}^2 \quad (3.57)$$

Die aerodynamische Form, Länge und Oberflächenrauigkeit des Fahrzeugs wird in Formel (3.57) durch den Luftwiderstandsbeiwert $c_{Fz,L}$ einbezogen. Der Windeinfluss wird vernachlässigt.

Ausrollversuche in Karlsruhe ergaben für eine vollbesetzte achtachsige Straßenbahn mit der Masse von 74,4 t folgende Formel [89]:

$$F_{FzFw,R} + F_{FzFw,L} = 1630 \text{ N} + 16,2 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot v_{Fz} + 3,24 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot v_{Fz}^2 \quad (3.58)$$

In Formel (3.58) entspricht die geschwindigkeitsunabhängige Konstante einem gewichtskraftbezogenen Rollwiderstandskoeffizienten von 2,23 %. Der proportional und im Quadrat zur Fahrgeschwindigkeit abhängige Anteil repräsentiert den Luftwiderstand.

3.4.1.3 Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand lässt sich unterteilen in:

- Translationswiderstand F_{FzFw,a_t}
- Rotationswiderstand F_{FzFw,a_r}

Der translatorische Beschleunigungswiderstand ist der zur Überwindung der Fahrzeugmassenträgheit notwendige Kraftanteil:

$$F_{FzFw,a_t} = a_{Fz} \cdot m_{Fz,ges} \quad (3.59)$$

mit der Beschleunigung a_{Fz} und der Gesamtmasse $m_{Fz,ges}$ des Fahrzeugs.

Der rotatorische Beschleunigungswiderstand ergibt sich aus der zusätzlich beschleunigten Drehmasse $m_{Fz,rot}$:

$$\begin{aligned} F_{FzFw,a_r} &= a_{Fz} \cdot m_{Fz,rot} \\ &= a_{Fz} \cdot (\xi_{Fz,m} - 1) \cdot m_{Fz} \end{aligned} \quad (3.60)$$

mit dem Massenzuschlagsfaktor $\xi_{Fz,m}$ und dem Leergewicht m_{Fz} des Fahrzeugs.

3.4.2 Traktionssystem

Das Traktionssystem dient der kraftbetriebenen Fortbewegung des Fahrzeugs und besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Stromrichter
- Fahrmotor
- Getriebe
- Triebradsatz

In Abb. 3.25 sind diese Traktionssystemelemente schematisch abgebildet.

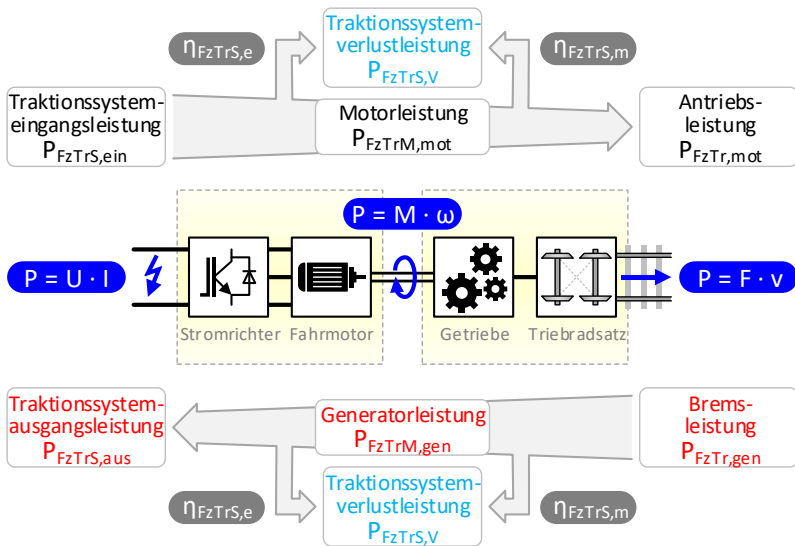


Abb. 3.25: Fahrzeugtraktionssystem

Im Betrieb sind die folgenden zwei Zustände möglich:

- Motorbetrieb (Treiben)
- Generatorbetrieb (Bremsen)

Im motorischen Betrieb wird elektrische Leistung am Eingang des Traktionssystems P_{FzTrS} in mechanische rotatorische Leistung an der Motorwelle P_{FzTrM} und schließlich in mechanische translatorische Antriebsleistung auf der Fahrschiene P_{FzTr} umgewandelt. Im generatorischen Betrieb wird der Traktionsstrang in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen.

3.4.2.1 Traktionskraftgrenze

Die fahrzeugspezifischen Traktionssystemparameter sind der Tab. 3.13 zu entnehmen.

Tab. 3.13: Fahrzeugspezifische Traktionssystemparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Max. Traktionssystemeingangsleistung	$P_{FzTrS,max}$	$+550 \cdot 10^3$	[W]
Min. Traktionssystemausgangsleistung	$P_{FzTrS,min}$	$-550 \cdot 10^3$	[W]
Elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{FzTrS,e}$	0,92	[-]
Mechanischer Wirkungsgrad	$\eta_{FzTrS,m}$	0,98	[-]
Max. elektrische Antriebskraft	$F_{FzTr,max}$	$+75 \cdot 10^3$	[N]
Min. elektrische Bremskraft	$F_{FzTr,min}$	$-75 \cdot 10^3$	[N]
Min. mechanische Bremskraft	$F_{FzMb,min}$	$-100 \cdot 10^3$	[N]
Min. Widerstandsbremsleistung	$P_{FzEb,min}$	$-750 \cdot 10^3$	[W]
Höchstgeschwindigkeit	$v_{Fz,max}$	19,44	[m/s]

Mit der definierten maximalen Eingangsleistung $P_{FzTrS,max}$ und der minimalen Ausgangsleistung $P_{FzTrS,min}$ des Traktionssystems werden mit dem elektrischen und mechanischen Wirkungsgrad $\eta_{FzTrS,e}$ bzw. $\eta_{FzTrS,m}$ die Traktionsleistungen an den Triebbradsätzen bestimmt. So beträgt die maximale Antriebsleistung $P_{FzTr,max}$:

$$P_{FzTr,max} = \eta_{FzTrS,e} \cdot \eta_{FzTrS,m} \cdot P_{FzTrS,max} \quad (3.61)$$

und die minimale Bremsleistung $P_{FzTr,min}$:

$$P_{FzTr,min} = \frac{1}{\eta_{FzTrS,e} \cdot \eta_{FzTrS,m}} \cdot P_{FzTrS,min} \quad (3.62)$$

Die beiden Wirkungsgrade führen zur Traktionssystemverlustleistung $P_{FzTrS,V}$. Zur Vereinfachung sind die Wirkungsgrade konstant.

Die in Tab. 3.13 definierte maximale Antriebskraft $F_{FzTr,max}$ und minimale Bremskraft $F_{FzTr,min}$ beziehen sich auf die Kräfte an den Triebbradsätzen, so dass hierfür die Wirkungsgrade nicht berücksichtigt werden.

Die Übergangsgeschwindigkeit trennt den Spannungsstellbereich vom Feldschwächebereich des Fahrmotors. Mit den Traktionsleistungen und Traktionskräften erhält man $v_{Fz,\dot{u}_{mot}}$ für den Motorbetrieb:

$$v_{Fz,\dot{u}_{mot}} = \min \left\{ \frac{P_{FzTr,max}}{F_{FzTr,max}}, v_{Fz,max} \right\} \quad (3.63)$$

bzw. $v_{Fz,\dot{u}_{gen}}$ für den Generatorbetrieb:

$$v_{Fz,\dot{u}_{gen}} = \min \left\{ \frac{P_{FzTr,min}}{F_{FzTr,min}}, v_{Fz,max} \right\} \quad (3.64)$$

Die Traktionskraftgrenze ist von der Fahrgeschwindigkeit v_{Fz} abhängig und lässt sich diesbezüglich in drei Bereiche einteilen. Im Spannungsstellbereich ist die Traktionskraft konstant und die Traktionsleistung nimmt mit steigender v_{Fz} zu. Im Feldschwächebereich ist die Traktionsleistung konstant und die Traktionskraft nimmt mit steigender v_{Fz} ab. Im dritten Bereich über $v_{Fz,max}$ ist die Traktionskraft und Traktionsleistung gleich null.

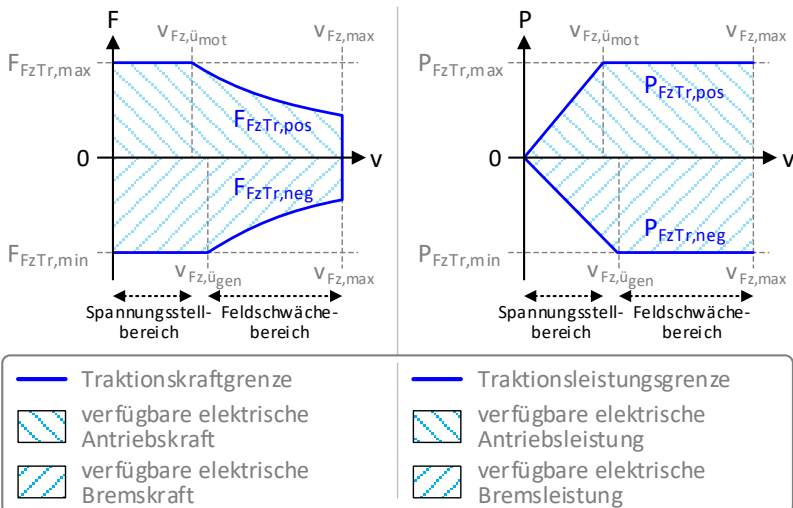


Abb. 3.26: Traktionskraft- und Traktionsleistungshyperbel

In Abb. 3.26 ist auf der linken Seite das Traktionskraft-Geschwindigkeits-Diagramm abgebildet. Es stellt die Antriebskraftgrenze $F_{FzTr,pos}$:

$$F_{FzTr,pos} = \begin{cases} F_{FzTr,max} & \text{falls } v_{Fz} \leq v_{Fz,\ddot{u}mot} \\ \frac{P_{FzTr,max}}{v_{Fz}} & \text{falls } v_{Fz,\ddot{u}mot} < v_{Fz} \leq v_{Fz,max} \\ 0 & \text{falls } v_{Fz,max} < v_{Fz} \end{cases} \quad (3.65)$$

und die Bremskraftgrenze $F_{FzTr,neg}$:

$$F_{FzTr,neg} = \begin{cases} F_{FzTr,min} & \text{falls } v_{Fz} \leq v_{Fz,\ddot{u}gen} \\ \frac{P_{FzTr,min}}{v_{Fz}} & \text{falls } v_{Fz,\ddot{u}gen} < v_{Fz} \leq v_{Fz,max} \\ 0 & \text{falls } v_{Fz,max} < v_{Fz} \end{cases} \quad (3.66)$$

als blau eingezeichnete Hyperbel in Abhängigkeit von v_{Fz} dar. Auf der rechten Seite befindet sich die dazugehörige Traktionsleistungs-Geschwindigkeits-Kurve.

Die Traktionskraftkurve stellt das maximal positive und minimal negative Leistungsvermögen des Traktionssystems dar. Durch den Stromrichter sind alle Betriebspunkte innerhalb der von der Traktionskrafthyperbel umschlossenen Fläche stufenlos ansteuerbar und dauerhaft realisierbar.

Nach [95] werden Traktionssysteme von Straßenbahnen so ausgelegt, dass mit der konstanten maximalen Zugkraft bei mittlerer Besetzung eine Anfangsbeschleunigung von 1,2-1,4 m/s² möglich ist. In der Regel liegen die Übergangsgeschwindigkeiten bei ca. 40 % der Höchstgeschwindigkeit und der mittlere Gesamtwirkungsgrad des Traktionssystems bei 88-90 %.

3.4.2.2 Kraftschlussgrenze

Die Traktionskräfte werden basierend auf dem von Coulomb formulierten Reibungsgesetz durch Adhäsion auf die Schiene übertragen. Die maximale übertragbare Traktionskraft wird beeinflusst durch:

- Haftreibungsbeiwert μ_H
- Traktionsachsenverhältnis $\psi_{Fz,Tr}$

Der Haftreibungsbeiwert μ_H liegt im Schienenverkehr zwischen 0,1 und 0,4 [30]. Im Simulationsprogramm beträgt der Standardwert 0,25. Zur Vereinfachung wird μ_H als konstant angenommen, obwohl er von den Rad- und Schienenparametern, der Fahrgeschwindigkeit und dem Radschlupf beeinflusst wird. Der maximale Haftreibungsbeiwert wird nach [95] bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h und einem Schlupf von ca. 5 % erreicht. Darüber hinaus werden Zwischenmedien, die die Kraftschlussbildung beeinflussen, nicht berücksichtigt.

Die zur Ausübung der Haftreibung wirksame Fahrzeuggewichtskraft $F_{Fz,G}$ entspricht dem Anteil der Gewichtskraft, der auf die angetriebenen Radsätze entfällt. Dieses Verhältnis aus den Trieb- und Laufachsen wird mit dem Traktionsachsenverhältnis $\psi_{Fz,Tr}$ ausgedrückt.

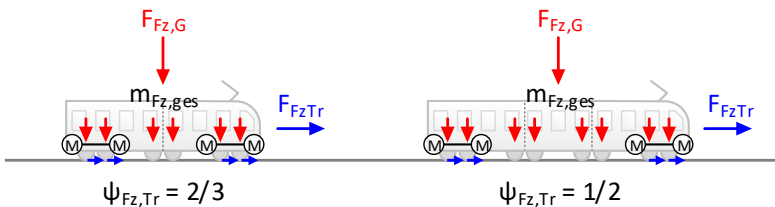


Abb. 3.27: Traktionsachsenverhältnis beim 6-/8-achsigen Fahrzeug

In Abb. 3.27 ist auf der linken Seite ein zweiteiliger und auf der rechten Seite ein dreiteiliger Gelenktriebwagen abgebildet. Die Wagenkästen stützen sich auf die dazwischenliegenden Drehgestelle mit jeweils zwei Radsätzen ab. Für BOStrab-Fahrzeuge liegen die maximal zulässigen Achslasten bei 10 t [20]. Bei beiden Fahrzeugen wird jeweils das erste und letzte Drehgestell angetrieben. Dadurch ergibt sich ein $\psi_{Fz,Tr}$ von $2/3$ beim sechsachsigen und $1/2$ beim achtachsigen Fahrzeug. Im Folgenden wird angenommen, dass sich die Fahrgäste homogen über das Fahrzeug verteilen und alle Radaufstandspunkte gleichmäßig belastet werden.

Der Kraftschluss bestimmt die übertragbare elektrische Antriebskraft $F_{\mu H, pos}$:

$$F_{\mu H, pos} = +(\mu_H \cdot \psi_{Fz, Tr} \cdot F_{Fz, G}) \quad (3.67)$$

bzw. die übertragbare elektrische Bremskraft $F_{\mu H, neg}$:

$$F_{\mu H, neg} = -(\mu_H \cdot \psi_{Fz, Tr} \cdot F_{Fz, G}) \quad (3.68)$$

3.4.2.3 Vorläufige Traktionsleistung

Die Traktionskraft des elektrischen Traktionssystems, mit der die Fahrwiderstandskraft zu überwinden ist, wird durch die folgenden beiden Grenzen beschränkt:

- Kraftschlussgrenze $F_{\mu H, pos}$ bzw. $F_{\mu H, neg}$ (übertragbar)
- Traktionskraftgrenze $F_{FzTr, pos}$ bzw. $F_{FzTr, neg}$ (verfügbar)

Das Vorzeichen der gewünschten Fahrwiderstandskraft F_{FzFw}^* entscheidet, ob sich das Traktionssystem im motorischen oder generatorischen Betriebszustand befindet. Zu bestimmen sind die folgenden Werte:

- vorläufige Antriebs-/Bremskraft an den Triebradsätzen $F_{FzTr, mot/gen}^*$
- vorläufige Ein-/Ausgangsleistung des Traktionssystems $P_{FzTrS, ein/aus}^*$

Im Folgenden werden gewünschte oder vorläufige Werte mit einem Sternchen im Formelzeichen gekennzeichnet.

Im motorischen Betriebszustand ist Antriebskraft erforderlich, die in Abb. 3.28 der blauen Fläche entspricht. Im dargestellten F-v-Diagramm ist die Kraftschlussgrenze (gelbe Kurve), die Traktionskraftgrenze (blaue Kurve) und die positive gewünschte Fahrwiderstandskraft F_{FzFw}^* (rote Kurve) eingezeichnet. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 3.28 vier fiktive Geschwindigkeitspunkte abgebildet. Bei v_1 kann die gewünschte Fahrzeugbeschleunigung a_{Fz}^* realisiert werden. Die schraffierte Fläche über der Fahrwiderstandskurve entspricht dem Antriebskraftüberschuss, so dass sogar noch weiteres Beschleunigungspotenzial vorhanden wäre. Bei v_2 , v_3 und v_4 hingegen ist a_{Fz}^* nicht möglich. Bei diesen Fahrgeschwindigkeiten muss F_{FzFw}^* auf eine der rot gestrichelten Linien

reduziert werden. Bei v_2 und v_4 liegt die Fahrwiderstandskraft über der elektrischen Antriebskraftgrenze $F_{FzTr,pos}$. Bei v_3 überschreitet die Fahrwiderstandskraft die obere Kraftschlussgrenze $F_{\mu_H,pos}$.

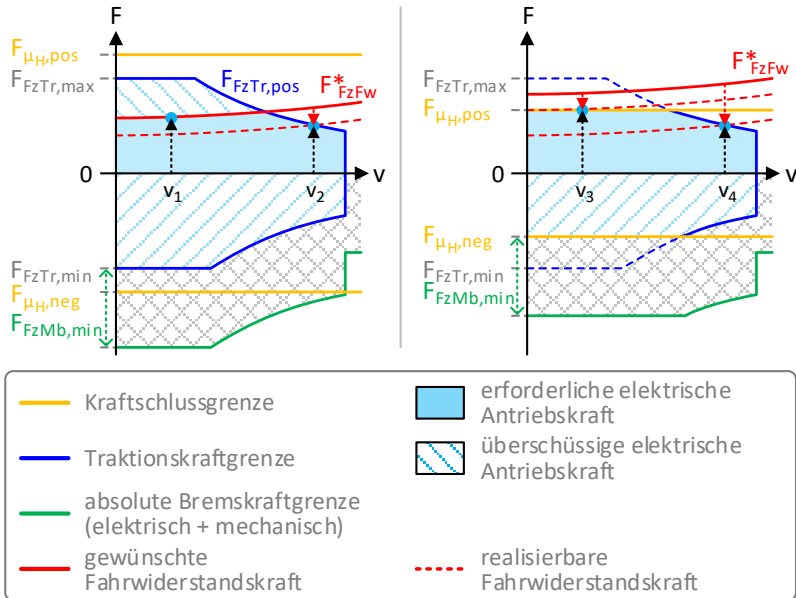


Abb. 3.28: Antriebskraft und positive Fahrwiderstandskraft

Die vorläufige elektrische Antriebskraft $F_{FzTr,mot}^*$ des Traktionssystems wird aus dem Minimum der positiven Fahrwiderstandskraft, der Antriebskraftgrenze und der positiven Kraftschlussgrenze ermittelt:

$$F_{FzTr,mot}^* = \min\{F_{FzFw}^*, F_{FzTr,pos}, F_{\mu_H,pos}\} \quad (3.69)$$

Die vorläufige Traktionssystemeingangsleistung $P_{FzTrS,ein}^*$ ist unter Berücksichtigung der Traktionssystemwirkungsgrade nach Formel (A.45):

$$P_{FzTrS,ein}^* = \frac{1}{\eta_{FzTrS,e} \cdot \eta_{FzTrS,m}} \cdot F_{FzTr,mot}^* \cdot v_{Fz} \quad (3.70)$$

$P_{FzTrs, ein}^*$ ist die Leistung, die am Eingang des Traktionssystems benötigt wird, um mit $F_{FzTr, mot}^*$ den Fahrwiderstand überwinden zu können.

Im generatorischen Betriebszustand ist Bremskraft erforderlich, die aufgebracht werden kann durch:

- Elektrisches Bremsen
- Mechanisches Bremsen

Da das elektrische Bremsen die folgenden Vorteile bietet:

- Geringe thermische Kapazität
- Verschleißfreiheit
- Energierückgewinnung

wird es gegenüber dem mechanischen Bremsen bevorzugt eingesetzt. Wenn die erzeugte Bremskraft nicht ausreichend ist, wird anteilig die mechanische Bremsanlage hinzugeschaltet. Sie besteht aus den folgenden beiden Komponenten:

- Laufwerksbremse (adhäsionsabhängig)
- Schienenbremse (adhäsionsunabhängig)

Die mechanische Bremsanlage kann die in Tab. 3.13 definierte minimale Bremskraft $F_{FzMb, min}$ zur Verfügung stellen. Die absolute Bremskraftgrenze ist die Summe aus der Bremskraftgrenze des elektrischen Traktionssystems $F_{FzTr, neg}$ und der mechanischen Bremsanlage $F_{FzMb, min}$. Nach BOStrab müssen Straßenbahnen im Gefahrenfall mit $-2,7 \text{ m/s}^2$ verzögern können [20], da der öffentliche Verkehrsraum mitbenutzt wird.

Im dargestellten F-v-Diagramm aus Abb. 3.29 entspricht die erforderliche elektrische Bremskraft der blauen Fläche und die erforderliche mechanische Bremskraft der grauen Fläche. Die grüne Kurve ist die absolute Bremskraftgrenze. Die gewünschte Fahrzeugbeschleunigung a_{Fz}^* ist bei allen vier fiktiven Geschwindigkeitspunkten realisierbar, da in allen Fällen ausreichend überschüssige Bremskraft vorhanden ist. Bei v_5 entsprechen die beiden schraffierten Flächen unter F_{FzFw}^* dem Bremskraftüberschuss, der noch

weiteres Verzögerungspotenzial ermöglicht. Bei v_6 liegt F_{FzFw}^* zwar unter der elektrischen Bremskraftgrenze $F_{FzTr,neg}$, aber durch zusätzliche mechanische Bremskraft, die durch den zweiten schwarzen Pfeil symbolisiert wird, kann F_{FzFw}^* mithilfe der Laufwerksbremse dennoch überwunden werden. Bei v_7 wird der unter der Kraftschlussgrenze $F_{\mu_H,neg}$ liegende Anteil von F_{FzFw}^* von der adhäsionsunabhängigen Schienenbremse übernommen. Fall v_8 stellt eine Kombination aus den beiden Fällen v_6 und v_7 dar.

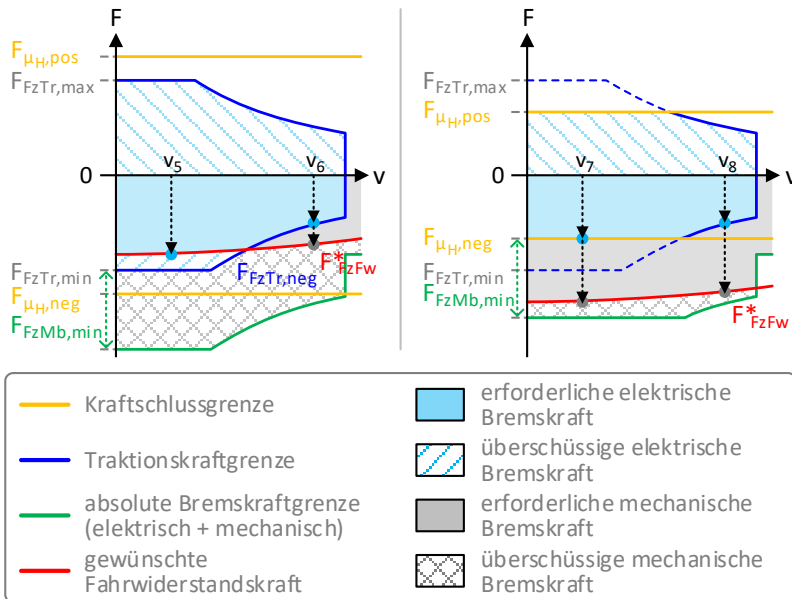


Abb. 3.29: Bremskraft und negative Fahrwiderstandskraft

Die vorläufige elektrische Bremskraft $F_{FzTr,gen}^*$ des Traktionssystems wird aus dem Maximum der negativen Fahrwiderstandskraft, der Bremskraftgrenze und der negativen Kraftschlussgrenze ermittelt:

$$F_{FzTr,gen}^* = \max\{F_{FzFw}^*, F_{FzTr,neg}, F_{\mu_H,neg}\} \quad (3.71)$$

Die vorläufige Traktionssystemausgangsleistung $P_{FzTrS,aus}^*$ ist unter Berücksichtigung der Traktionssystemwirkungsgrade nach Formel (A.45):

$$P_{FzTrS,aus}^* = \eta_{FzTrS,e} \cdot \eta_{FzTrS,m} \cdot F_{FzTr,gen}^* \cdot v_{Fz} \quad (3.72)$$

$P_{FzTrS,aus}^*$ ist die Leistung, die am Ausgang des Traktionssystems durch elektrisches Bremsen mit $F_{FzTr,gen}^*$ zur Verfügung steht.

Die Bestimmung der mechanischen Bremskraft $F_{FzMb,V}$ und der mechanischen Bremsleistung in Form von Reibungsbremsverlusten $P_{FzMb,V}$ erfolgt im Kap. 3.4.3.4.

3.4.2.4 Wunschbeschleunigungswiderstand

Im Gegensatz zu den Strecken- und Laufwiderständen ist der Beschleunigungswiderstand der einzige Parameter, der geändert werden kann.

Der Wunschbeschleunigungswiderstand $F_{FzFw,a}^*$ ergibt sich aus der gewünschten Fahrzeugbeschleunigung a_{Fz}^* und dem translatorischen und rotatorischen Massenanteil aus den Formeln (3.59) und (3.60):

$$F_{FzFw,a}^* = a_{Fz}^* \cdot (m_{Fz,ges} + m_{Fz,rot}) \quad (3.73)$$

Analog zu Formel (3.51) beträgt die gewünschte Fahrwiderstandskraft F_{FzFw}^* :

$$F_{FzFw}^* = F_{FzFw,a}^* + F_{FzFw,S} + F_{FzFw,V} \quad (3.74)$$

mit den ausschließlich positiven Kurven-, Tunnel-, Roll- und Laufwiderständen als Verlustfahrwiderstandskräfte $F_{FzFw,V}$:

$$F_{FzFw,V} = F_{FzFw,K} + F_{FzFw,T} + F_{FzFw,R} + F_{FzFw,L} \quad (3.75)$$

3.4.2.5 Ausrollbeschleunigung

Im aktiven Ausrollzustand ist die Wunschbeschleunigung des Fahrers nach Formel (3.40) aus Kap. 3.3.3.5 nicht definiert. In diesem Fall stellt sich die Ausrollbeschleunigung a_{Fz}^* in Abhängigkeit von $F_{FzFw,S}$ und $F_{FzFw,V}$ ein:

$$a_{Fz}^* = \frac{-(F_{FzFw,S} + F_{FzFw,V})}{m_{Fz,ges} + m_{Fz,rot}} \quad (3.76)$$

Mit a_{Fz}^* kann $F_{FzFw,a}^*$ nach Formel (3.73) berechnet werden.

3.4.3 Leistungsverteilung

Das Fahrzeug besteht aus den folgenden Komponenten, die für die fahrzeug-internen Energieflüsse von Bedeutung sind:

- Traktionssystem
- Hilfsbetriebe
- Energiespeicher (optional)
- Bremswiderstand

In Abb. 3.30 wird ein Überblick über die fahrzeuginternen Energieflüsse gegeben. Es sind zwei Energieflussrichtungen (A und Z) erkennbar, wobei die Vorzeichen der Energieflüsse komponentenspezifisch sind. Die Ziffern A1-A4 bzw. Z1-Z5 geben die Priorisierung der Fahrzeugkomponenten für jede der beiden Richtungen an.

Die vorläufige Ein- bzw. Ausgangsleistung des im Kap. 3.4.2 beschriebenen Traktionssystems wird aus der gewünschten Fahrwiderstandskraft bestimmt:

- Traktionssystemeingangsleistung $P_{FzTrS,ein}^*$ (positiv)
im motorischen Betrieb bei positiver Fahrwiderstandskraft
- Traktionssystemausgangsleistung $P_{FzTrS,aus}^*$ (negativ)
im generatorischen Betrieb bei negativer Fahrwiderstandskraft

Im Anschluss werden die vorläufigen Leistungen der übrigen Fahrzeugkomponenten ermittelt. Diese Werte sind vorläufig, da erst das Ergebnis der Energieflussberechnung (Kap. 4) Aufschluss darüber gibt, welche Leistungen tatsächlich aus dem Netz bezogen bzw. in das Netz zurückgespeist werden können.

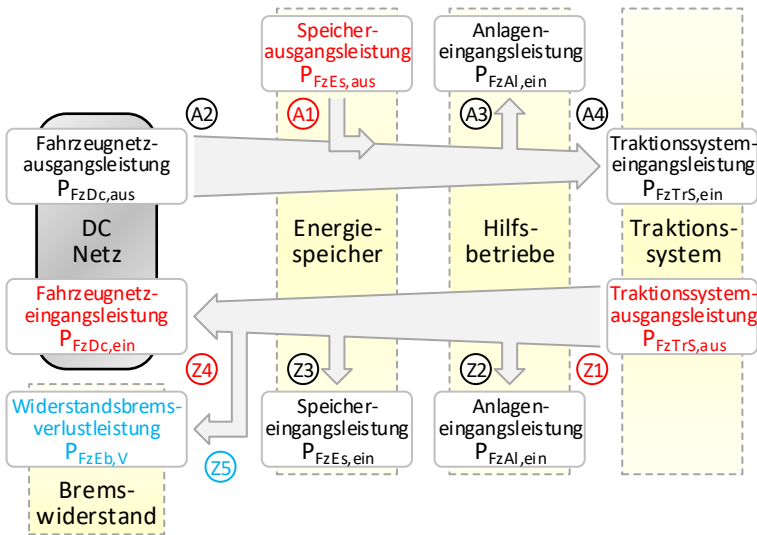


Abb. 3.30: Leistungsverteilung im Fahrzeug

Die fahrzeugspezifischen Parameter für die Hilfsbetriebe und den ggf. installierten Energiespeicher sind in der Tab. 3.14 aufgeführt.

Tab. 3.14: Fahrzeugspezifische Komponentenparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Hilfsbetriebeeingangsleistung bei 100 % Auslastung	$P_{FzAl,max}$	$50 \cdot 10^3$	[W]
Hilfsbetriebewirkungsgrad	η_{FzAl}	0,90	[-]
Speicherexistenz	β_{FzEs}	0	[-]
Speicherkapazität	$E_{FzEs,lim}$	$5,4 \cdot 10^6$	[W·s]
Max. Speichereingangsleistung	$P_{FzEs,max}$	$+600 \cdot 10^3$	[W]
Min. Speicherausgangsleistung	$P_{FzEs,min}$	$-600 \cdot 10^3$	[W]
Speicherwirkungsgrad	η_{FzEs}	0,95	[-]
Speichergewicht	m_{FzEs}	1000	[kg]

Die Grenzwerte für die mechanische Bremskraft $F_{FzMb,min}$ und die Widerstandsbremsleistung $P_{FzEb,min}$ des Fahrzeugs wurden bereits in der Tab. 3.13 definiert.

3.4.3.1 Hilfsbetriebe

Zu den Hilfsbetrieben gehören alle elektrischen Anlagen im Fahrzeug, die nicht direkt für die Traktion des Fahrzeugs zuständig sind. Dazu gehören beispielsweise Kompressoren zur Druckluftherzeugung, Heiz-, Klima- und Lüftungsanlagen sowie das Bordnetz. Im Gegensatz zum Traktionssystem benötigen die Hilfsbetriebe eine weitgehend konstante Leistung. Nach [6] [7] [14] liegt die durchschnittliche Hilfsbetriebeleistung im Bereich von 20-60 kW.

Im Simulationsprogramm kann mit $P_{FzAl,max}$ aus Tab. 3.14 die maximale Hilfsbetriebeeingangsleistung angegeben werden, die sich auf einen Hilfsbetriebeauslastungsgrad von $q_{FzAl}^* = 1,0$ (100 %) bezieht. Der Auslastungsgrad wird in den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) definiert. Dadurch lässt sich die witterungsabhängige Hilfsbetriebeauslastung in einem Schritt für alle Fahrzeuge variieren.

Die vorläufige Hilfsbetriebeeingangsleistung $P_{FzAl,ein}^*$ ist positiv und lässt sich berechnen durch:

$$P_{FzAl,ein}^* = q_{FzAl} \cdot P_{FzAl,max} \quad (3.77)$$

Mit dem endgültigen Hilfsbetriebeauslastungsgrad q_{FzAl} wird nach Formel (3.5) aus Kap. 3.2.1.4 berücksichtigt, ob sich das Fahrzeug gerade im aktiven oder inaktiven Fahrzustand befindet.

3.4.3.2 Energiespeicher

Optional können Fahrzeuge mit einem Energiespeicher ausgerüstet sein. Zum Anfangszeitpunkt der Simulation ($t = t_{anf}$) wird die momentane Speicherenergie E_{FzES} auf den definierten Anfangsladezustand des Fahrzeugspeichers ξ_{FzES} (Tab. 3.2) in Bezug auf dessen Speicherkapazität $E_{FzES,lim}$ gesetzt:

$$E_{FzES}(t_{anf}) = \begin{cases} 0 & \text{ohne Speicher} \\ \xi_{FzES} \cdot E_{FzES,lim} & \text{mit Speicher} \end{cases} \quad (3.78)$$

Mobile Speicher nehmen überschüssige Bremsenergie auf. Ist beim Bremsvorgang $P_{FzTrS,aus}^*$ größer als $P_{FzAl,ein}^*$, wird die Differenzenergie, sofern möglich, im Speicher zwischengespeichert. Diese kann nach dem Bremsvorgang für die Hilfsbetriebe bzw. für den nächsten Anfahrvorgang verwendet werden.

Die Speicherleistung kann beide Vorzeichen annehmen:

- Speicherausgangsleistung $P_{FzEs,aus}$ (negativ) im Entlademodus
- Speichereingangsleistung $P_{FzEs,ein}$ (positiv) im Lademodus

Die vorläufige Speicherleistung $P_{FzEs,aus/ein}^*$ wird durch den negierten Wert aus der vorläufigen Ein- bzw. Ausgangsleistung des Traktionssystems und der vorläufigen Eingangsleistung der Hilfsbetriebe bestimmt:

$$P_{FzEs,aus/ein}^* = \begin{cases} 0 & \text{ohne Speicher} \\ -(P_{FzTrS,ein/aus}^* + P_{FzAl,ein}^*) & \text{mit Speicher} \end{cases} \quad (3.79)$$

$P_{FzEs,aus/ein}^*$ wird durch die folgenden beiden Faktoren begrenzt:

- Leistungsgrenze $P_{FzEs,min}$ bzw. $P_{FzEs,max}$ (konstanter Wert)
- Kapazitätsgrenze $P_{FzEs,neg}$ bzw. $P_{FzEs,pos}$ (momentaner Wert)

Die endgültige Speicherleistung $P_{FzEs,aus/ein}$ kann bereits vor der Energieflussberechnung bestimmt werden, da sie unabhängig vom DC-Netz ist.

Beim Entladen des Speichers mit $P_{FzEs,aus}^*$ wird die untere Leistungsgrenze durch die minimale Speicherausgangsleistung $P_{FzEs,min}$ bestimmt. Die negative Kapazitätsgrenze $P_{FzEs,neg}$ lässt sich berechnen durch:

$$P_{FzEs,neg} = \eta_{FzEs} \cdot \frac{-E_{FzEs}}{\Delta t} \quad (3.80)$$

Die Speicherleistung ergibt sich nach Formel (A.47) aus dem Quotienten der momentanen Speicherenergie E_{FzEs} , die den aktuellen Energieinhalt angibt und der Simulationszeitschrittweite Δt . Ist der Speicher leer, ist die Kapazitätsgrenze gleich null.

Die endgültige Speicherausgangsleistung $P_{FzEs,aus}$ ist das Maximum aus den folgenden drei Werten:

$$P_{FzES,aus} = \max\{P_{FzES,aus}^*, P_{FzES,min}, P_{FzES,neg}\} \quad (3.81)$$

Beim Laden des Speichers mit $P_{FzES,ein}^*$ wird die obere Leistungsgrenze durch die maximale Speichereingangsleistung $P_{FzES,max}$ bestimmt. Die positive Kapazitätsgrenze $P_{FzES,pos}$ lässt sich berechnen durch:

$$P_{FzES,pos} = \frac{1}{\eta_{FzES}} \cdot \frac{E_{FzES,lim} - E_{FzES}}{\Delta t} \quad (3.82)$$

Die Differenz aus der Speicherkapazität $E_{FzES,lim}$ und der momentanen Speicherenergie E_{FzES} gibt an, wie viel Platz im Speicher noch zur Verfügung steht. Ist der Speicher voll, ist die Kapazitätsgrenze gleich null.

Die endgültige Speichereingangsleistung $P_{FzES,ein}$ ist das Minimum aus den folgenden drei Werten:

$$P_{FzES,ein} = \min\{P_{FzES,ein}^*, P_{FzES,max}, P_{FzES,pos}\} \quad (3.83)$$

3.4.3.3 DC-Netz und Bremswiderstand

Die Fahrzeugnetzleistung P_{FzDC} kann beide Vorzeichen annehmen:

- Fahrzeugnetzausgangsleistung $P_{FzDC,aus}$ (positiv)
im Aufnahmemodus (Leistungsausspeisung aus dem DC-Netz)
- Fahrzeugnetzeingangsleistung $P_{FzDC,ein}$ (negativ)
im Abgabemodus (Leistungsrückspeisung in das DC-Netz)

Die vorläufige Fahrzeugnetzleistung P_{FzDC}^* wird durch die Summe der vorläufigen Ein- bzw. Ausgangsleistung des Traktionssystems, der vorläufigen Eingangsleistung der Hilfsbetriebe und der endgültigen Ein- bzw. Ausgangsleistung des ggf. installierten Speichers bestimmt:

$$P_{FzDC,aus/ein}^* = P_{FzTrS,ein/aus}^* + P_{FzAl,ein}^* + P_{FzES,aus/ein} \quad (3.84)$$

Aus Formel (3.84) wird ersichtlich, dass der mobile Speicher, sofern er vorhanden ist, Priorität vor dem DC-Netz hat. Der Speicher wird entladen, bevor Leistung aus dem DC-Netz bezogen wird und er wird geladen, bevor Leistung in das DC-Netz zurückgespeist wird.

Das DC-Netz kann nicht jede beliebige Leistung abgeben oder aufnehmen. Die Energieflussberechnung (Kap. 4) liefert in Abhängigkeit vom Vorzeichen der vorläufigen Fahrzeugnetzleistung eine der folgenden beiden Netzleistungsgrenzen:

- Positive Fahrzeugnetzausgangsleistungsgrenze $P_{FzDc,max}$
bei $P_{FzDc}^* \geq 0$ mit $P_{FzDc,max} = [0, P_{FzDc,aus}^*]$
- Negative Fahrzeugnetzeingangsleistungsgrenze $P_{FzDc,min}$
bei $P_{FzDc}^* < 0$ mit $P_{FzDc,min} = [P_{FzDc,ein}^*, 0]$

Sobald es zu einer Netzleistungsbegrenzung kommt, müssen die vorläufigen Leistungen des Traktionssystems oder der Hilfsbetriebe begrenzt werden. Im Aufnahmemodus beträgt die aus dem DC-Netz aufgenommene endgültige Fahrzeugnetzausgangsleistung $P_{FzDc,aus}$:

$$P_{FzDc,aus} = \min\{P_{FzDc,aus}^*, P_{FzDc,max}\} \quad (3.85)$$

Die endgültige Widerstandsbremsverlustleistung $P_{FzEb,V}$ ist im Aufnahmemodus gleich null:

$$P_{FzEb,V} = 0 \quad (3.86)$$

Ist P_{FzTrS}^* positiv, lässt sich die endgültige Traktionssystemeingangsleistung $P_{FzTrS,ein}$ ermitteln durch:

$$P_{FzTrS,ein} = \max\{0, (P_{FzDc,aus} - P_{FzEs,aus} - P_{FzAl,ein}^*)\} \quad (3.87)$$

Ist P_{FzTrS}^* negativ, wird die endgültige Hilfsbetriebeeingangsleistung $P_{FzAl,ein}$ begrenzt auf:

$$P_{FzAl,ein} = P_{FzDc,aus} - P_{FzEs,aus} - P_{FzTrS,ein}/aus \quad (3.88)$$

Im Abgabemodus beträgt die an das DC-Netz abgegebene endgültige Fahrzeugnetzeingangsleistung $P_{FzDc,ein}$:

$$P_{FzDc,ein} = \max\{P_{FzDc,min}, P_{FzDc,ein}^*\} \quad (3.89)$$

Beim elektrischen Bremsen treten folgende Ereignisse ein, wenn die Bremsenergie nicht vollständig für den Eigenbedarf genutzt werden kann:

- Netzbremsen: Rückspeisung der Energie ins DC-Netz
- Widerstandsbremsen: Umwandlung der Energie in Wärme

Die endgültige Widerstandsbremsverlustleistung $P_{FzEb,V}$ ist die Differenz aus vorläufiger und endgültiger Fahrzeugnetzeingangsleistung:

$$P_{FzEb,V} = \left| \max\{P_{FzEb,min}, (P_{FzDc,ein}^* - P_{FzDc,ein})\} \right| \quad (3.90)$$

Nach unten ist sie durch die minimale Widerstandsbremsleistung $P_{FzEb,min}$ (Tab. 3.13) begrenzt. Die endgültige Hilfsbetriebeeingangsleistung $P_{FzAL,ein}$ entspricht ihrem vorläufigen Wert:

$$P_{FzAL,ein} = P_{FzAL,ein}^* \quad (3.91)$$

Ist der Bremswiderstand nicht ausreichend dimensioniert, wird die mechanische Bremsleistung erhöht und $P_{FzTrS,aus}$ begrenzt auf:

$$P_{FzTrS,aus} = P_{FzDc,ein} - P_{FzEb,V} - P_{FzEs,ein} - P_{FzAL,ein} \quad (3.92)$$

3.4.3.4 Endgültige Traktionsleistung und Beschleunigung

Im motorischen Betrieb beträgt die endgültige Antriebsleistung $P_{FzTr,mot}$:

$$P_{FzTr,mot} = \eta_{FzTrS,e} \cdot \eta_{FzTrS,m} \cdot P_{FzTrS,ein} \quad (3.93)$$

und die endgültige Traktionssystemverlustleistung $P_{FzTrS,V}$:

$$P_{FzTrS,V} = P_{FzTrS,ein} - P_{FzTr,mot} \quad (3.94)$$

Die endgültige elektrische Antriebskraft $F_{FzTr,mot}$ ist nach Formel (A.45):

$$F_{FzTr,mot} = \begin{cases} F_{FzTr,mot}^* & \text{falls } v_{Fz} = 0 \\ \frac{P_{FzTr,mot}}{v_{Fz}} & \text{falls } v_{Fz} > 0 \end{cases} \quad (3.95)$$

Zur Vermeidung der Division durch null wird $F_{FzTr,mot}$ bei $v_{Fz} = 0$ auf die vorläufige elektrische Antriebskraft $F_{FzTr,mot}^*$ aus Formel (3.69) gesetzt.

Im motorischen Betrieb kommt die mechanische Bremsanlage nicht zum Einsatz. Damit ist die mechanische Bremskraft $F_{FzMb,V}$ und somit auch die Reibungsbremsverlustleistung $P_{FzMb,V}$ gleich null:

$$F_{FzMb,V} = 0 \quad (3.96)$$

bzw.:

$$P_{FzMb,V} = 0 \quad (3.97)$$

Im generatorischen Betrieb beträgt die endgültige Bremsleistung $P_{FzTr,gen}$:

$$P_{FzTr,gen} = \frac{1}{\eta_{FzTr,e} \cdot \eta_{FzTr,m}} \cdot P_{FzTrS,aus} \quad (3.98)$$

und die endgültige Traktionssystemverlustleistung $P_{FzTrS,V}$:

$$P_{FzTrS,V} = |P_{FzTr,gen} - P_{FzTrS,aus}| \quad (3.99)$$

Die endgültige elektrische Bremskraft $F_{FzTr,gen}$ ist analog zu Formel (3.95):

$$F_{FzTr,gen} = \begin{cases} F_{FzTr,gen}^* & \text{falls } v_{Fz} = 0 \\ \frac{P_{FzTr,gen}}{v_{Fz}} & \text{falls } v_{Fz} > 0 \end{cases} \quad (3.100)$$

Zur Vermeidung der Division durch null wird $F_{FzTr,gen}$ bei $v_{Fz} = 0$ auf die vorläufige elektrische Bremskraft $F_{FzTr,gen}^*$ aus Formel (3.71) gesetzt.

Wie im Kap. 3.4.2.3 beschrieben, wird die mechanische Bremsanlage bei Bedarf unterstützend zum elektrischen Traktionssystem zugeschaltet. Die mechanische Bremskraft $F_{FzMb,V}$ ergibt sich aus der Differenz der gewünschten Fahrwiderstandskraft und der endgültigen elektrischen Bremskraft:

$$F_{FzMb,V} = \max\{F_{FzMb,min}, (F_{FzFw}^* - F_{FzTr,gen})\} \quad (3.101)$$

Nach unten ist sie durch die minimale mechanische Bremskraft $F_{FzMb,min}$ (Tab. 3.13) begrenzt.

Die endgültige Reibungsbremsverlustleistung $P_{FzMb,V}$ wird basierend auf Formel (A.45) berechnet durch:

$$P_{FzMb,V} = |F_{FzMb,V} \cdot v_{Fz}| \quad (3.102)$$

Der endgültige Beschleunigungswiderstand $F_{FzFw,a}$ ergibt sich aus der Summe der Antriebs- oder Bremskräfte an den Triebbradsätzen des elektrischen Traktionssystems und den Bremskräften der mechanischen Bremsanlage abzüglich der Steigungs- und Verlustfahrwiderstandskräfte:

$$F_{FzFw,a} = (F_{FzTr,mot/gen} + F_{FzMb,V}) - (F_{FzFw,S} + F_{FzFw,V}) \quad (3.103)$$

Damit lässt sich die endgültige Fahrbeschleunigung a_{Fz} ermitteln mit:

$$a_{Fz} = \frac{F_{FzFw,a}}{m_{Fz,ges} + m_{Fz,rot}} \quad (3.104)$$

3.4.3.5 Kinetische und potenzielle Energie

In Abb. 3.31 wird der Zusammenhang zwischen der Traktionsleistung, Fahrwiderstandsverlustleistung und Fahrzeugenergie dargestellt. In Abhängigkeit vom Vorzeichen der Fahrwiderstandskraft sind die folgenden beiden Energieflussrichtungen erkennbar:

- $F_{FzFw} > 0$: Zunahme der Fahrzeugenergie
- $F_{FzFw} < 0$: Abnahme der Fahrzeugenergie

Die Fahrwiderstandsverlustleistung $P_{FzFw,V}$ wird mit den in Formel (3.75) zusammengefassten Verlustfahrwiderstandskräften $F_{FzFw,V}$ berechnet:

$$P_{FzFw,V} = F_{FzFw,V} \cdot v_{Fz} \quad (3.105)$$

Diese Verlustleistungen entstehen in beiden Energieflussrichtungen und haben keinen Einfluss auf die Fahrzeugenergie. Hingegen können die Beschleunigungs- und Steigungswiderstandskräfte $F_{FzFw,a}$ bzw. $F_{FzFw,S}$ sowohl

positive als auch negative Werte annehmen und damit die Fahrzeugenergie erhöhen oder verringern.

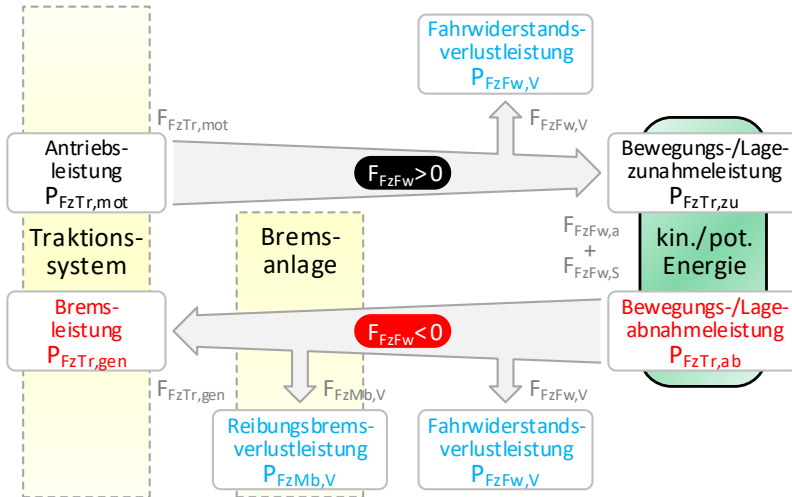


Abb. 3.31: Bewegungs- und Lageenergie des Fahrzeugs

Die momentane Fahrzeugenergie E_{FzTr} ist die Summe aus der Bewegungsenergie $E_{FzTr,kin}$ und der Lageenergie $E_{FzTr,pot}$:

$$E_{FzTr} = E_{FzTr,kin} + E_{FzTr,pot} \quad (3.106)$$

Mit der für den Beschleunigungswiderstand aufgebrauchten Kraft wird die Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Fz} entweder erhöht oder verringert. Die Bewegungsenergie des Fahrzeugs $E_{FzTr,kin}$, die auch als kinetische Energie bezeichnet wird, ergibt sich nach Formel (A.41) zu:

$$E_{FzTr,kin} = \frac{1}{2} \cdot (m_{Fz,ges} + m_{Fz,rot}) \cdot v_{Fz}^2 \quad (3.107)$$

In Formel (3.107) ist zu beachten, dass zur Fahrzeuggesamtmasse die Zuschlagsmasse für alle rotierenden Massen des Traktionssystems hinzugerechnet wird.

Mit der für den Steigungswiderstand aufgebrauchten Kraft nimmt die Fahrzeughöhenlage entweder zu oder ab. Die Lageenergie des Fahrzeugs $E_{FzTr,pot}$, die auch als potenzielle Energie bezeichnet wird, wird nach Formel (A.42) berechnet durch:

$$E_{FzTr,pot} = m_{Fz,ges} \cdot g \cdot h \quad (3.108)$$

Während des Simulationsablaufs wird die Fahrzeugenergie nicht mit den beiden Formeln (3.107) und (3.108) berechnet, sondern schrittweise mit der sich aus dem Beschleunigungs- und Steigungswiderstand ergebenden Leistung. Diese positive oder negative Leistung, die die Fahrzeugenergie erhöht bzw. verringert, wird im Folgenden als Zunahme- bzw. Abnahmeleistung $P_{FzTr,zu/ab}$ bezeichnet:

$$P_{FzTr,zu/ab} = (F_{FzFw,a} + F_{FzFw,s}) \cdot v_{Fz} \quad (3.109)$$

Die Fahrzeugenergie E_{FzTr} ergibt sich für den Zeitschritt t_1 aus der Summe der Fahrzeugenergie im vorherigen Zeitschritt t_0 und der Zunahme oder Abnahme der Fahrzeugenergie im Simulationszeitintervall $\Delta t = t_1 - t_0$:

$$E_{FzTr}(t_1) = E_{FzTr}(t_0) + (P_{FzTr,zu/ab} \cdot \Delta t) \quad (3.110)$$

Damit ändert sich die Fahrzeugenergie in jedem Simulationszeitschritt aufgrund der Geschwindigkeits- und Höhenlageänderungen.

4 Energieflussberechnung

Die Energieflussberechnung stellt die zweite Säule der Netzsimulation dar und steht mit der Fahrspielberechnung in Wechselwirkung. Als Eingangsgrößen dienen die vorläufigen Netzleistungen der Fahrzeuge, die sich vordergründig aus den gewünschten Beschleunigungen der Fahrer ergeben. Die Ausgangsgrößen sind die Knotenspannungen und Zweigströme im elektrischen Netz, aus denen sich die endgültigen Netzleistungen und Beschleunigungen der Fahrzeuge ermitteln lassen.

4.1 Netzberechnung

Die Berechnung des elektrischen Netzes bestimmt das Verhältnis der Spannungen und Stromstärken im geschlossenen Stromkreis unter quasi-stationären Bedingungen. Das bedeutet, dass die zeitabhängigen Größen innerhalb eines Simulationszeitschrittes als konstant angesehen und keine transienten Vorgänge abgebildet werden. Die treibende Kraft der Ströme sind Spannungsunterschiede, die durch Leistungsüberschüsse (Quellen) bzw. Leistungsdefizite (Senken) in den einzelnen elektrischen Knoten verursacht werden. Dieses Leistungsungleichgewicht wird über das elektrische Versorgungsnetz in Form von Energieflüssen ausgeglichen, die längs der Leitungen Spannungsabfälle hervorrufen [86].

4.1.1 Netzgleichungen

Im Simulationsprogramm kommt das Knotenpotenzialverfahren zum Einsatz. Alle Netzgleichungen werden in einem Gleichungssystem (GLS) zusammengefasst. Die Grundlagen der Netzwerkanalyse sind im Anhang A.3.3 vorzufinden.

4.1.1.1 Knotenspezifikation

In DC-Netzen lässt sich das lineare GLS (A.70) als:

$$[G] [U] = [I] \quad (4.1)$$

bzw. durch Einbezug der Knotenleistungen basierend auf Formel (A.68) als nichtlineares Energieflussproblem (EFP) formulieren:

$$[G] [U] = \frac{[P]}{[U]} \quad (4.2)$$

mit den folgenden Elementen:

- Knotenleitwertmatrix $[G]$ (G-Matrix)
- Knotenspannungsvektor $[U]$ (U-Vektor)
- Knotenstromvektor $[I]$ (I-Vektor)
- Knotenleistungsvektor $[P]$ (P-Vektor)

Die quadratischen Zusammenhänge zwischen den Spannungen und Leistungen führen zu einem nichtlinearen Problem, das durch einen iterativen Prozess numerisch gelöst wird (Kap. 4.1.2).

Alle Knotenspannungen beziehen sich auf einen willkürlich gewählten Bezugspunkt, der als Referenzknoten (Knoten 0) bezeichnet wird. Setzt man seine Knotenspannung U_0 auf das Erdpotenzial mit 0 V:

$$U_0 = 0 \quad (4.3)$$

kann die entsprechende Zeile und Spalte aus dem GLS gestrichen werden, da alle Produkte mit U_0 gleich null ergeben [72] [76] [86].

Tab. 4.1: Knotenzustände in Gleichstromnetzen

Knotenzustand	gegeben	gesucht
Spannungsknoten (U-Knoten)	U	P
Leistungsknoten (P-Knoten)	P	U

Die Knotenzustände werden in der Tab. 4.1 aufgeführt. Jeder Knoten k hat einen Vorgabewert und zwei Grenzwerte als Nebenbedingungen. Im Folgenden werden Vorgabewerte mit einem Sternchen im Formelzeichen gekennzeichnet. Das ergibt für die U-Knoten:

- Vorgegebene Knotenspannung U_k^*
- Untere Knotenleistungsgrenze $P_{k,min} (\leq 0)$
- Obere Knotenleistungsgrenze $P_{k,max} (\geq 0)$

und für die P-Knoten:

- Vorgegebene Knotenleistung P_k^*
- Untere Knotenspannungsgrenze $U_{k,min} (< U_{k,max})$
- Obere Knotenspannungsgrenze $U_{k,max} (> U_{k,min})$

Das EFP wird zunächst mit den Vorgabewerten gelöst. Ohne die Berücksichtigung der Spannungs- und Leistungsgrenzen ergeben sich folgende Ergebnisse aus der Energieflussberechnung:

- U-Knoten: Knotenleistung P_k , so dass sich U_k^* einstellt.
- P-Knoten: Knotenspannung U_k , so dass sich P_k^* einstellt.

Anschließend wird überprüft, ob alle Nebenbedingungen eingehalten werden. Falls nicht, müssen die Knotenzustände von bestimmten Knoten temporär geändert werden (Kap. 4.3.2). Dieser Fall tritt wegen der nicht rückspeisefähigen Unterwerke häufig ein.

4.1.1.2 Knotengleichungen

Die Anwendung des im Anhang A.3.1 aufgeführten Knotensatzes (A.63) erfordert, dass die Leitungswiderstände $R_{km} = R_{mk}$ zwischen dem k -ten und m -ten Knoten nach Formel (A.57) in Leitungsleitwerte $G_{km} = G_{mk}$ umgerechnet werden. Dem Knotensatz zufolge gilt für den k -ten Knoten die folgende Gleichung:

$$\sum_{m=0}^w I_{km} = I_{k0} + I_{k1} + \dots + I_{kw} = 0 \quad (4.4)$$

Dabei entspricht I_{kk} dem Belastungsknotenstrom.

In Abb. 4.1 sind alle Ströme für den k -ten Knoten abgebildet, der mit $1, 2, \dots, w$ Nachbarknoten verbunden ist.

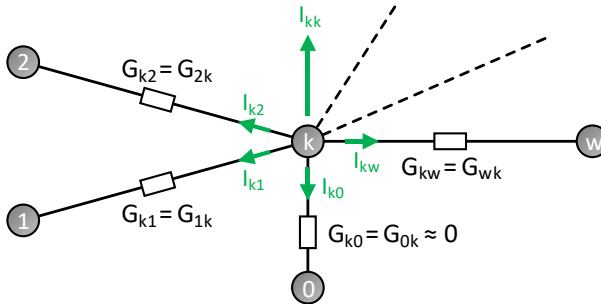


Abb. 4.1: Belastungsknotenstrom und Zweigströme

Bringt man den Belastungsknotenstrom auf die rechte Seite und drückt die anderen Zweigströme auf Grundlage des ohmschen Gesetzes (A.56) und Formel (A.57) durch Leitwerte und Knotenspannungen aus, erhält man aus der Gleichung (4.4):

$$G_{k0}(U_k - U_0) + G_{k1}(U_k - U_1) + \dots + G_{kw}(U_k - U_w) = -I_{kk} \quad (4.5)$$

Unter Einbezug von Formel (4.3) ergibt das Ausmultiplizieren von Gleichung (4.5):

$$(G_{k0} + G_{k1} + \dots + G_{kw}) U_k - G_{k1} U_1 - \dots - G_{kw} U_w = -I_{kk} \quad (4.6)$$

Da es den Leitwert mit dem Index kk nicht gibt, wird G_{kk} für den negativen Umlaufleitwert des k -ten Knoten verwendet. Der Umlaufleitwert ist die negative Summe der vom k -ten Knoten ausgehenden Kopplungsleitwerte:

$$G_{kk} = - \sum_{m=0, m \neq k}^w G_{km} = -G_{k0} - G_{k1} - \dots - G_{kw} \quad (4.7)$$

Bei ausreichender Isolierung gegen die Erde gilt für den Ableitungsleitwert des Referenzknotens: $G_{k0} \approx 0$. Infolgedessen kann der Ableitungsstrom I_{k0} vernachlässigt werden. Setzt man die Formel (4.7) in die Gleichung (4.6) ein und multipliziert sie mit (-1) , ergibt sich geordnet nach den Indizes der Knotenspannungen die folgende Knotengleichung für den k -ten Knoten:

$$G_{k1} U_1 + \dots + G_{kk} U_k + \dots + G_{kw} U_w = I_k \quad (4.8)$$

In der Gleichung (4.8) wird der Belastungsknotenstrom I_{kk} vereinfachend durch I_k ausgedrückt. Wiederholt man diese Prozedur für alle n Knoten des Netzwerks, erhält man das aus Gleichung (4.1) bekannte lineare GLS:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

In der G-Matrix befinden sich auf der Hauptdiagonalen die Umlaufleitwerte und auf den Nebendiagonalen die Kopplungsleitwerte.

4.1.1.3 Eigenschaften der Knotenleitwertmatrix

Die G-Matrix aus der Gleichung (4.9) hat die folgenden Eigenschaften [80]:

- quadratisch
- symmetrisch
- diagonaldominant
- dünnbesetzt
- singulär

Ein lineares GLS mit einer quadratischen nxn -Koeffizientenmatrix ist eindeutig lösbar, wenn die Matrix regulär ist, d. h. wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- Die Determinante der Matrix ist ungleich null: $\det [G] \neq 0$
- Der Rang der Matrix ist gleich ihrer Ordnung: $\text{rg} [G] = n$

Reguläre Matrizen sind invertierbar und besitzen n linear unabhängige Zeilen. Da die G-Matrix singulär ist, muss mindestens ein Knoten als U-Knoten gewählt werden, für den die Knotenspannung festgelegt wird [86]. Auf diese Weise

geht die Koeffizientenmatrix in eine reguläre Matrix über und es sind maximal $(n - 1)$ Knotenspannungen zu bestimmen.

4.1.2 Newton-Raphson-Verfahren

Das Newton-Raphson-Verfahren (NR-Verfahren) stellt ein schnell konvergierendes Verfahren zur Nullstellenbestimmung dar [68]. Das Ziel ist, die Knotenleistung $P = f(U)$ als Funktion der Knotenspannung im Ausgangspunkt zu linearisieren. Grafisch dargestellt wird die Funktion f an der Stelle U durch ihre Tangente im Punkt $(U, f(U))$ mit dem Anstieg $f'(U)$ ersetzt. Die somit erhaltene verbesserte Näherung der Nullstelle dient dann als Ausgangspunkt für den nächsten Iterationsschritt. Im Folgenden werden die Iterationsschritte durch eingeklammerte Indizes (ϑ) angegeben. Ausgehend von einem Startwert $(\vartheta = 0)$ für die Knotenspannung $U_{(0)}$ wird die Iteration:

$$U_{(\vartheta+1)} = U_{(\vartheta)} - \frac{f(U_{(\vartheta)})}{f'(U_{(\vartheta)})} \quad (4.10)$$

solange wiederholt, bis die Änderung $\Delta U_{(\vartheta)}$:

$$\Delta U_{(\vartheta)} = U_{(\vartheta+1)} - U_{(\vartheta)} \quad (4.11)$$

der sukzessive angenäherten Lösung einen definierten Grenzwert ε_{NR} unterschreitet. Das NR-Verfahren konvergiert jedoch nur, wenn die Startwerte für die Knotenspannungen hinreichend gut sind.

4.1.2.1 Nichtlineares Gleichungssystem

Das nichtlineare GLS (4.2) lautet nach Umstellung:

$$\begin{bmatrix} U_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & U_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Im GLS (4.12) wurden die auf der rechten Seite im Nenner stehenden Knotenspannungen U_1, \dots, U_n auf die linke Seite gebracht und als Diagonalmatrix

vorangestellt. Für die Knotenleistungen P_1, \dots, P_n gelten die folgenden Vorzeichen:

- Positiv: Knoten nimmt Leistung auf
- Negativ: Knoten gibt Leistung ab

In Gleichung (4.12) sind alle G- und P-Parameter bekannt und alle U-Parameter unbekannt. Die Werte der G-Matrix ergeben sich aus den in Kap. 4.1.1 beschriebenen Netzgleichungen und die Werte des P-Vektors werden wie folgt festgelegt:

- U-Knoten: $P_k = 0$
- P-Knoten: $P_k = P_k^*$

P_k^* ist die vorgegebene Knotenleistung des k -ten Knotens.

4.1.2.2 Startwerte des Knotenspannungsvektors

Die Startwerte für die Knotenspannungen $U_{k(0)}$, die sich in der U-Diagonalmatrix bzw. im U-Vektor des GLS (4.13) befinden, sind vom Knotenzustand abhängig:

- U-Knoten: $U_{k(0)} = U_k^*$
- P-Knoten: $U_{k(0)} = U_{dc,N}$

U_k^* ist die vorgegebene Knotenspannung des k -ten Knotens und $U_{dc,N}$ entspricht der Nennspannung des Versorgungsnetzes.

4.1.2.3 Abweichung des Knotenleistungsvektors

In jedem Iterationsdurchlauf wird zu Beginn der P-Vektor für den (ϑ) -ten Iterationsschritt berechnet:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} = \begin{bmatrix} U_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \cdot \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \quad (4.13)$$

Die Knotenleistung des k -ten Knotens ergibt sich nach Formel (4.13) durch:

$$P_{k(\vartheta)} = U_{k(\vartheta)} \cdot \sum_{m=1}^n (G_{km} \cdot U_{m(\vartheta)}) \quad (4.14)$$

Im Anschluss daran kann der Abweichungsvektor der Knotenleistungen $[\Delta P]_{(\vartheta)}$ für den (ϑ) -ten Iterationsschritt berechnet werden:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \quad (4.15)$$

4.1.2.4 Linearisierung des Gleichungssystems

Die Linearisierung in der Umgebung der Näherungswerte der Knotenspannungen $[U]_{(\vartheta)}$ erfolgt durch eine nach dem ersten Glied abgebrochenen Taylor-Reihe [4] [86]. Für eine Veränderliche U lautet die Taylor-Reihenentwicklung der Funktion P um den Arbeitspunkt $U_{(\vartheta)}$:

$$\begin{aligned} P(U) &\approx \sum_{d=0}^{\infty} \frac{P^{(d)}(U_{(\vartheta)})}{d!} \cdot (U - U_{(\vartheta)})^d \\ &\approx P(U_{(\vartheta)}) + \frac{P'(U_{(\vartheta)})}{1!} \cdot (U - U_{(\vartheta)})^1 + \\ &\quad \frac{P''(U_{(\vartheta)})}{2!} \cdot (U - U_{(\vartheta)})^2 + \frac{P'''(U_{(\vartheta)})}{3!} \cdot (U - U_{(\vartheta)})^3 + \dots \end{aligned} \quad (4.16)$$

Die Summe der ersten beiden Terme der Taylor-Reihe aus der Gleichung (4.16) bezeichnet man als Linearisierung von $P(U)$ an der Stelle $U_{(\vartheta)}$:

$$P(U) \approx P(U_{(\vartheta)}) + \frac{\partial P(U_{(\vartheta)})}{\partial U_{(\vartheta)}} \cdot (U - U_{(\vartheta)}) \quad (4.17)$$

Gleichung (4.17) entspricht der Iterationsvorschrift (4.10) für:

$$f(U_{(\vartheta)}) = -\left(P(U) - P(U_{(\vartheta)})\right) = -\Delta P_{(\vartheta)} \quad (4.18)$$

In einem Netzwerk mit mehreren Knoten handelt es sich um Funktionen P_k (mit $k = 1, \dots, n$) mehrerer Veränderlicher U_m (mit $m = 1, \dots, n$). Die Entwicklung der Knotenleistung $P_k(U_1, \dots, U_n)$ des k -ten Knotens als Funktion eines Satzes von Näherungswerten für die Knotenspannungen $U_{1(\vartheta)}, \dots, U_{n(\vartheta)}$ in einer Taylor-Reihe ist gegeben durch:

$$P_k \approx P_{k(\vartheta)} + \sum_{m=1}^n \left(\frac{\partial P_{k(\vartheta)}}{\partial U_{m(\vartheta)}} \cdot (U_m - U_{m(\vartheta)}) \right) \quad (4.19)$$

Mit den Abweichungen der Knotenleistung $\Delta P_{k(\vartheta)}$ und der Knotenspannung $\Delta U_{m(\vartheta)}$ des (ϑ) -ten Iterationsschrittes:

- $P_k - P_{k(\vartheta)} = \Delta P_{k(\vartheta)}$
- $U_m - U_{m(\vartheta)} = \Delta U_{m(\vartheta)}$

folgt aus der Gleichung (4.19):

$$\Delta P_{k(\vartheta)} \approx \frac{\partial P_{k(\vartheta)}}{\partial U_{1(\vartheta)}} \cdot \Delta U_{1(\vartheta)} + \dots + \frac{\partial P_{k(\vartheta)}}{\partial U_{n(\vartheta)}} \cdot \Delta U_{n(\vartheta)} \quad (4.20)$$

Nun kann das linearisierte GLS mit den Abweichungsvektoren der Knotenleistungen $[\Delta P]_{(\vartheta)}$ (ΔP -Vektor) und der Knotenspannungen $[\Delta U]_{(\vartheta)}$ (ΔU -Vektor) basierend auf Formel (4.20) aufgestellt werden [70]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \quad (4.21)$$

Die Matrix sämtlicher erster partieller Ableitungen der Funktionen $P_1(U_{1(\vartheta)}, \dots, U_{n(\vartheta)}), \dots, P_n(U_{1(\vartheta)}, \dots, U_{n(\vartheta)})$ wird als Jacobi-Matrix $[J]_{(\vartheta)}$ (J-Matrix) bezeichnet:

$$[J]_{(\vartheta)} = \frac{\partial [P]_{(\vartheta)}}{\partial [U]_{(\vartheta)}} = \frac{\partial (P_{1(\vartheta)}, \dots, P_{n(\vartheta)})}{\partial (U_{1(\vartheta)}, \dots, U_{n(\vartheta)})} \quad (4.22)$$

Die einzelnen Matrixelemente der J-Matrix J_{km} lassen sich nach Formel (4.22) für die Hauptdiagonalelemente ($k = m$) mit:

$$J_{km(\vartheta)} = \frac{\partial P_{k(\vartheta)}}{\partial U_{m(\vartheta)}} = 2 \cdot G_{km} \cdot U_{k(\vartheta)} + \sum_{w=1, w \neq k}^n (G_{kw} \cdot U_{w(\vartheta)}) \quad (4.23)$$

und für die Nebendiagonalelemente ($k \neq m$) mit:

$$J_{km(\vartheta)} = \frac{\partial P_{k(\vartheta)}}{\partial U_{m(\vartheta)}} = G_{km} \cdot U_{k(\vartheta)} \quad (4.24)$$

bestimmen [25].

4.1.2.5 Einbeziehung der Spannungsknoten

Für die Einbeziehung der U-Knoten in das GLS (4.21) gibt es zwei Möglichkeiten:

- Streichen der Zeilen und Spalten von allen U-Knoten aus der J-Matrix und Streichen der Zeilen von allen U-Knoten aus dem ΔP -Vektor und ΔU -Vektor
- Setzen der Hauptdiagonalelemente von allen U-Knoten in der J-Matrix auf eins, Setzen der Nebendiagonalelemente der Zeilen und Spalten von allen U-Knoten in der J-Matrix auf null und Setzen der Zeilen von allen U-Knoten im ΔP -Vektor auf null

Für die programmtechnische Umsetzung stellt die zweite Möglichkeit die günstigere Alternative dar, da die Ordnung des GLS beibehalten wird.

4.1.2.6 Lösung des Gleichungssystems

Das lineare quadratische GLS (4.21) entspricht mit der J-Matrix als Koeffizientenmatrix, dem ΔU -Vektor als Lösungsvektor und dem ΔP -Vektor als Bedingungsvektor der Form:

$$[J]_{(\vartheta)} [\Delta U]_{(\vartheta)} = [\Delta P]_{(\vartheta)} \quad (4.25)$$

Im Simulationsprogramm wird das GLS mit dem Eliminationsverfahren von Gauß gelöst. Die Dreiecksfaktorisierung zerlegt die Matrix in das Produkt einer linken unteren Dreiecksmatrix $[L]_{(\vartheta)}$ und einer rechten oberen Dreiecksmatrix $[R]_{(\vartheta)}$:

$$[J]_{(\vartheta)} = [L]_{(\vartheta)} [R]_{(\vartheta)} \quad (4.26)$$

und wird deshalb als LR-Zerlegung bezeichnet. Die Zerlegung der Matrix erfolgt nach dem Doolittle-Verfahren mit dem folgenden als Pseudocode vorliegenden Algorithmus [22]:

$$\begin{aligned} [LR]_{(\vartheta)} &:= [J]_{(\vartheta)} \\ \text{for } k &= 1, \dots, (n-1): \\ \quad \text{for } m &= (k+1), \dots, n: \\ \quad \quad LR_{mk(\vartheta)} &:= \frac{LR_{mk(\vartheta)}}{LR_{kk(\vartheta)}} \\ \quad \quad \text{for } w &= (k+1), \dots, n: \\ \quad \quad \quad LR_{mw(\vartheta)} &:= LR_{mw(\vartheta)} - (LR_{mk(\vartheta)} \cdot LR_{kw(\vartheta)}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Im Algorithmus (4.27) werden aus Speicherplatzgründen beide Dreiecksmatrizen zu einer $[LR]_{(\vartheta)}$ -Matrix zusammengefasst. In der m -Schleife werden die Werte der linken unteren und in der w -Schleife die Werte der rechten oberen Dreiecksmatrix berechnet.

Bei der Vorwärtselimination wird zunächst das GLS:

$$[L]_{(\vartheta)} [\Delta V]_{(\vartheta)} = [\Delta P]_{(\vartheta)} \quad (4.28)$$

für den Hilfsvektor $[\Delta V]_{(\vartheta)}$ mit $\Delta V_{1(\vartheta)}, \Delta V_{2(\vartheta)}, \dots, \Delta V_{n(\vartheta)}$ gelöst:

$$\Delta V_{k(\vartheta)} = \Delta P_{k(\vartheta)} - \sum_{m=1}^{k-1} (L_{km(\vartheta)} \cdot \Delta V_{m(\vartheta)}) \quad (4.29)$$

Bei der Rückwärtssubstitution wird anschließend das GLS:

$$[R]_{(\vartheta)} [\Delta U]_{(\vartheta)} = [\Delta V]_{(\vartheta)} \quad (4.30)$$

für den Lösungsvektor $[\Delta U]_{(\vartheta)}$ mit $\Delta U_{n(\vartheta)}, \Delta U_{n-1(\vartheta)}, \dots, \Delta U_{1(\vartheta)}$ gelöst:

$$\Delta U_{k(\vartheta)} = \frac{1}{R_{kk(\vartheta)}} \cdot \left(\Delta V_{k(\vartheta)} - \sum_{m=k+1}^n (R_{km(\vartheta)} \cdot \Delta U_{m(\vartheta)}) \right) \quad (4.31)$$

Die Anzahl der benötigten Rechenoperationen liegt bei einer nxn -Matrix bei n^3 . Die LR-Zerlegung hat den Nachteil, dass aus dünnbesetzten Matrizen häufig vollbesetzte Matrizen werden [80].

4.1.2.7 Berechnung der Knotenparameter

Nach Formel (4.11) ergibt sich der U-Vektor $[U]_{(\vartheta+1)}$ für den nächsten Iterationsschritt durch:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta+1)} = \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} + \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \quad (4.32)$$

Solange das Konvergenzkriterium:

$$\max \left| \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix}_{(\vartheta)} \right| \leq \varepsilon_{NR} \quad (4.33)$$

nicht erfüllt ist, wird der aktuelle Iterationsschritt um eins erhöht:

$$\vartheta := \vartheta + 1 \quad (4.34)$$

und der Iterationsprozess, wie ab Kap. 4.1.2.3 beschrieben, wiederholt.

Die Iterationsschleife wird beendet, wenn sich die iterativ bestimmten Werte im U-Vektor $[U]_{(\vartheta+1)}$ zum vorherigen Iterationsschritt nur noch geringfügig verbessern. Dieser Grenzwert wird durch den Abbruchswert für das Konvergenzkriterium ε_{NR} festgelegt.

Das Ergebnis ist für den k -ten Knoten die endgültige Knotenspannung U_k :

$$U_k = U_{k(\vartheta)} \quad (4.35)$$

der endgültige Knotenstrom I_k nach Gleichung (4.9):

$$I_k = \sum_{m=1}^n (G_{km} \cdot U_m) \quad (4.36)$$

und die endgültige Knotenleistung P_k nach Gleichung (A.68):

$$P_k = U_k \cdot I_k \quad (4.37)$$

Die endgültigen Knotenparameter werden im Folgenden als Netzspannung U_{dc} , Netzstrom I_{dc} und Netzleistung P_{dc} des jeweiligen Knotens bezeichnet.

4.1.2.8 Bestimmung der Zweigparameter

Als Zweigparameter werden die richtungsabhängigen elektrischen Größen eines Zweigs zwischen dem Knoten k und dem Knoten m bezeichnet. Zu ihnen gehören die Zweigspannung U_{km} :

$$U_{km} = U_k - U_m \quad (4.38)$$

die Zweigströme I_{km} :

$$I_{km} = G_{km} \cdot U_{km} \quad (4.39)$$

und die Zweigleistungen P_{km} , die den ohmschen Leitungsverlusten entsprechen:

$$P_{km} = U_{km} \cdot I_{km} \quad (4.40)$$

4.1.3 Energieflüsse

Unterwerke (Uw), Speicher (Es), Anlagen (Al) und Fahrzeuge (Fz) sind aktive elektrische Knoten (Kap. 2.2.1.1), die im Kap. 4.2 detaillierter beschrieben werden. Sie lösen aufgrund ihrer positiven oder negativen Netzleistungen Energieflüsse im elektrischen Netzwerk aus.

4.1.3.1 Aktive Netzwerkkomponenten

Die Eigenschaften der aktiven elektrischen Knoten sind der Tab. 4.2 zu entnehmen.

Tab. 4.2: Eigenschaften von elektrischen Knoten

	Unterwerk ($U_{WA}+U_{WB}$)	Speicher (Es)	Anlage (Al)	Fahrzeug (Fz)
System-standort	stationär	stationär	stationär	mobil
Standard-knotenzustand	Spannung	Leistung	Leistung	Leistung
System-energie	–	elektrisch mechanisch chemisch	–	kinetisch potenziell
System-grenze	Einfuhr (Ausfuhr) Verlust	Verlust	(Einfuhr) Ausfuhr Verlust	Verlust

Die stationären Knoten haben eine feste Position im elektrischen Netz. Fahrzeuge hingegen stellen mit ihrem Traktionssystem und ihren Speichern und Anlagen mobile Knoten dar, die fortlaufend ihren Standort ändern. Die internen Energieflüsse in einem Fahrzeug wurden im Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) behandelt.

Den Unterwerken wird als Knotenzustand standardmäßig der U-Knoten zugewiesen. Hingegen sind Speicher, Anlagen sowie Fahrzeuge im Ausgangszustand P-Knoten.

Die momentane Systemenergie $E_{Sys}(t)$ ergibt sich aus der Summe der in den Speicher- und Fahrzeugknoten momentan gespeicherten Energie:

$$E_{Sys} = \sum_{k=1}^{n_{Es}} E_{k,Es} + \sum_{k=1}^{n_{Fz}} E_{k,FzEs} + \sum_{k=1}^{n_{Fz}} E_{k,FzTr} \quad (4.41)$$

Die n_{ES} stationären und n_{Fz} mobilen Speicher können bereits am Simulationsanfang bzw. noch zum Simulationseende über Energie verfügen. Zum Anfangszeitpunkt der Simulation ($t = t_{anf}$) werden anhand der Ladezustände der Netzspeicher ξ_{ES} und der Fahrzeugspeicher ξ_{FzES} aus den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) und mithilfe der Formeln (4.54) und (3.78) die Energieinhalte der Speicher $E_{ES}(t_{anf})$ bzw. $E_{FzES}(t_{anf})$ festgelegt.

Die momentane Fahrzeuenergie E_{FzTr} in den n_{Fz} Fahrzeugen setzt sich nach Formel (3.106) aus deren Bewegungsenergie $E_{FzTr,kin}$ und deren Lageenergie $E_{FzTr,pot}$ zusammen. Am Anfang und zum Ende der Simulation ist kinetische Energie in allen Fahrzeugen enthalten, die sich außerhalb der Systemgrenze befinden und mit einer bestimmten Geschwindigkeit in das Nahverkehrssystem einfahren werden bzw. ausgefahren sind. Auch Fahrzeuge, die zum Simulationseende ihre Fahrt noch nicht beendet haben, speichern kinetische Energie. Hingegen lässt sich die potenzielle Energie am Simulationsanfang nicht quantifizieren. Das liegt daran, dass das Höhenprofil nur mit Steigungsgraden und nicht mit absoluten Höhenlagepunkten definiert wurde. Deshalb ist die Wahl eines Bezugspunkts nicht möglich, so dass die Fahrzeuenergie mit $E_{FzTr}(t_{anf}) = 0$ als relative Größe bezüglich des Simulationsanfangs zu betrachten ist. Folglich können E_{FzTr} und E_{Sys} negative Werte annehmen.

4.1.3.2 Systembezogene Energieflüsse

Ein physikalisches System wird von der Umgebung durch eine Systemgrenze getrennt. Das DC-Nahverkehrsnetz wird als geschlossenes System betrachtet. Geschlossene Systeme können keine Materie, aber Energie mit ihrer Umgebung austauschen. Nach Tab. 4.2 sind alle aktiven elektrischen Knoten an den systembezogenen Energieflüssen beteiligt, da sie Verlustenergie aus dem System führen. Verlustenergie ist nicht nutzbare Energie, die an die Umgebung in Form von Wärme abgegeben wird. Nutzbare Energie kann im System in stationären Speicherknoten und mobilen Fahrzeugknoten gespeichert werden. Darüber hinaus führen Unterwerksknoten in der Regel Energie in das System ein und Anlagenknoten Energie aus dem System aus. In Abb. 4.2 sind die systembezogenen Energieflüsse dargestellt.

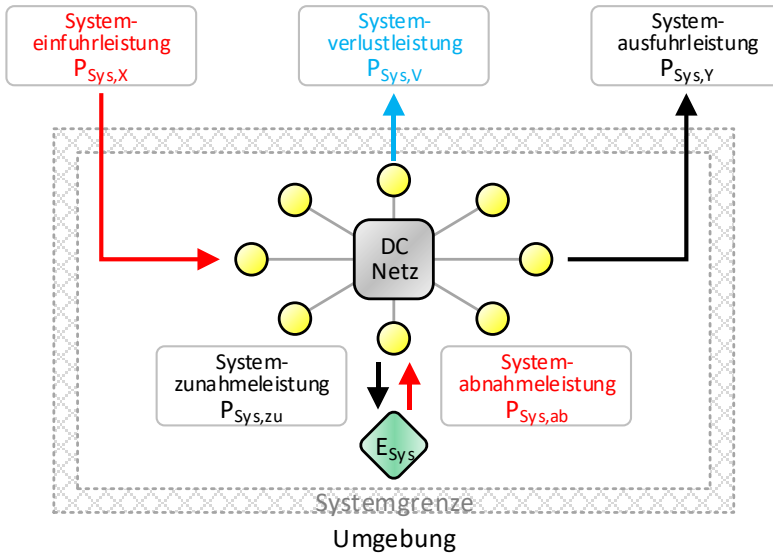


Abb. 4.2: Systembezogene Energieflüsse

In der Tab. 4.3 sind die Formelindizes und Vorzeichen aufgelistet.

Tab. 4.3: Systembezogene Energieflüsse

Bezeichnung	Formelindex	Vorzeichen
Einfuhrleistung: Energiefluss in das System hinein	X	negativ (roter Pfeil)
Ausfuhrleistung: Energiefluss aus dem System heraus	Y	positiv (schwarzer Pfeil)
Verlustleistung: Energiefluss aus dem System heraus	V	positiv (blauer Pfeil)
Zunahmeleistung: Energiefluss, der $E_{Sys}(t)$ erhöht	zu	positiv (schwarzer Pfeil)
Abnahmeleistung: Energiefluss, der $E_{Sys}(t)$ verringert	ab	negativ (roter Pfeil)

Die im System gespeicherte Energie wird durch die momentane Systemenergie $E_{\text{Sys}}(t)$ ausgedrückt. Systembezogene Energieflüsse überqueren entweder die Systemgrenze oder ändern die momentane Systemenergie.

4.1.3.3 Netzbezogene Energieflüsse

In Abb. 4.3 sind die netzbezogenen Energieflüsse dargestellt.

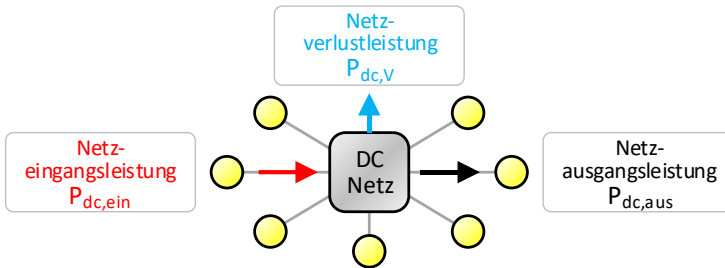


Abb. 4.3: Netzbezogene Energieflüsse

Die netzbezogenen Energieflüsse ergeben sich aus den einzelnen Knotenspannungen als Ergebnis der Energieflussberechnung.

In der Tab. 4.4 sind die Formelindizes und Vorzeichen aufgelistet.

Tab. 4.4: Netzbezogene Energieflüsse

Bezeichnung	Formelindex	Vorzeichen
Netzeingangsleistung: Energiefluss vom Knoten ins DC-Netz	$P_{\text{dc,ein}}$	negativ (roter Pfeil)
Netzausgangsleistung: Energiefluss aus DC-Netz zum Knoten	$P_{\text{dc,aus}}$	positiv (schwarzer Pfeil)
Netzverlustleistung: Ohmsche Leitungsverluste	$P_{\text{dc,v}}$	positiv (blauer Pfeil)

Nach der definierten Vorzeichenkonvention sind die Energieflüsse, die in das DC-Netz führen, negativ und die Energieflüsse, die aus dem DC-Netz führen, positiv.

Das DC-Netz, bestehend aus den Fahrleitungen und den Fahrschienen, dient der Leistungsübertragung zwischen den einzelnen elektrischen Knoten. Die Knotenspannungen verhalten sich in Abhängigkeit vom Vorzeichen der Knotenleistungen:

- Leistungseinspeisung $P_{dc, ein}$ in das DC-Netz:
Zunahme der Netzspannung
- Leistungsausspeisung $P_{dc, aus}$ aus dem DC-Netz:
Abnahme der Netzspannung

Sobald Leistung über das DC-Netz übertragen wird, führen die durch die elektrischen Leitungen fließenden Ströme zur Erwärmung der Leitungen, die als Netzverlustleistung an die Umgebung abgegeben wird. Diese Übertragungsverluste führen entlang der elektrischen Leitungen zu Spannungsabfällen. Sie sind vor allem in DC-Netzen ausgeprägt, da aufgrund der geringen Netzennspannung hohe Ströme fließen. Nach Formel (A.68) steigen die thermischen Übertragungsverluste quadratisch mit der Stromstärke an, weshalb große Leitungsquerschnitte oder hohe Übertragungsspannungen vorteilhaft sind.

4.2 Netzwerkkomponenten

Die Modellierung des Versorgungsnetzes wurde im Kap. 2.2 behandelt. In diesem Kapitel werden die aktiven Netzwerkkomponenten detailliert beschrieben.

4.2.1 DC-Netz

Die passiven elektrischen Knoten bilden zusammen mit den elektrischen Leitungen das Grundgerüst des verzweigten und vermaschten Netzwerks, das im Folgenden als DC-Netz bezeichnet wird. Endstationsknoten (E) bilden die

Randpunkte und Kreuzungsknoten (K) die Verzweigungspunkte im elektrischen Netz. Fahrleitungsknoten (F) sind zusätzliche Knoten für folgende Aufgaben:

- Anschluss der stationären aktiven Knoten (Uw, Es, Al)
- Änderung der Leitungsparameter der Fahrleitung
- Unterbrechung der Fahrleitung durch Streckentrenner

Passive Knoten haben eine konstante vorgegebene Knotenleistung von $P_k^* = 0^*$ und ändern nie ihren Knotenzustand.

4.2.1.1 Leitungsleitwerte

Die Leitungsleitwerte G_L befinden sich als Nebendiagonalelemente in der G-Matrix. Die Erstellung der G-Matrix wird im Kap. 4.3.1 beschrieben. Aus rechentechnischen Gründen werden die Leitungsleitwerte auf die folgenden beiden Grenzwerte beschränkt:

- Minimaler Leitungsleitwert $G_{L,min} = 1 S \quad (1 \Omega)$
- Maximaler Leitungsleitwert $G_{L,max} = 10^6 S \quad (1 \mu\Omega)$

Existiert zwischen zwei elektrischen Knoten keine elektrische Leitung, so ist der Leitwert gleich null. Alle Leitungen, deren Leitwert kleiner als $G_{L,min}$ ist, werden als Nullleitungen mit $G_L = 0$ bezeichnet.

Der Leitwert der Unterwerksverbindung ergibt sich aus dem definierten Innenwiderstand des Unterwerks R_{Uw}^* . Für die weiteren elektrischen Leitungen kann G_L durch Umstellung der Formel (A.62) mit ihrem Leitungsleitwertbelag G'_L und ihrer Leitungslänge l_L bestimmt werden. Jeder aktive elektrische Knoten kann durch bis zu sechs Speisekabel mit dem Fahrleitungs- und Fahrschienen-netz verbunden werden. Die Längen und Leitwerte von Speisekabeln sind statisch. Im Gegensatz dazu sind die Parameter der Fahrleitungen von den mobilen Fahrzeugknoten abhängig. Jedes Fahrzeug unterteilt die ursprüngliche Fahrleitung in Teilstücke. Damit ändern sich die Anzahl der Fahrleitungen und deren Leitwerte kontinuierlich. Zur Vereinfachung werden Betriebshöfe, Wendeschleifen und Kreuzungen zu jeweils einem elektrischen Knoten zusammengefasst. Daher haben Fahrleitungen innerhalb dieser passiven

elektrischen Knoten keinen Widerstand. Darin befindliche Fahrzeuge sind deshalb durch sogenannte Direktverbindungen mit dem DC-Netz verbunden. Der Leitwert einer temporär vorhandenen Direktverbindung geht gegen unendlich und wird daher nach oben auf $G_{L,max}$ beschränkt.

4.2.1.2 Netzspannungsgrenzen

Die Spannungsschwankungen in DC-Nahverkehrsnetzen dürfen sich nur in einem definierten Toleranzbereich befinden. Nach [28] liegt die zulässige Netzspannung 30 % unter und 20 % über der Netznennspannung $U_{dc,N}$. Damit gelten für alle elektrischen Knoten folgende Spannungsgrenzwerte:

- Untere Netzspannungsgrenze $U_{dc,min} = 0,7 \cdot U_{dc,N}$
- Obere Netzspannungsgrenze $U_{dc,max} = 1,2 \cdot U_{dc,N}$

Für die in den allgemeinen Simulationseinstellungen (Tab. 3.2) definierte Netznennspannung $U_{dc,N} = 750 \text{ V}$ ergibt sich damit ein zulässiger Spannungsbereich von $U_{dc} = [525 \text{ V}, 900 \text{ V}]$.

4.2.1.3 Netzverlustleistung

Da die elektrischen Leitungen nur als Wirkwiderstände und nicht als induktive oder kapazitive Blindwiderstände modelliert werden, kann das DC-Netz keine Energie speichern. Demnach ist folgende Leistungsbilanz zu jedem Zeitpunkt erfüllt:

$$P_{dc,ein} + P_{dc,aus} + P_{dc,v} = 0 \quad (4.42)$$

Die Netzverlustleistung $P_{dc,v}$:

$$P_{dc,v} = \left| \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{n_{Uw}} P_{UwDc,ein/aus,k} + \sum_{k=1}^{n_{Es}} P_{EsDc,ein/aus,k} + \\ \sum_{k=1}^{n_{Al}} P_{AlDc,ein/aus,k} + \sum_{k=1}^{n_{Fz}} P_{FzDc,ein/aus,k} \end{array} \right| \quad (4.43)$$

wird für den momentanen Simulationszeitschritt durch eine betragsmäßige Summenbildung der Netzleistungen aller aktiven elektrischen Knoten berechnet.

4.2.2 Unterwerke

Unterwerksknoten sind stationäre Erzeugerknoten im System und sorgen für den Ausgleich der Leistungsbilanz. Sie sind neben der Fahrstrecke angeordnet und über Speisekabel mit dem Fahrleitungs- und Fahrschienenetz verbunden.

In DC-Nahverkehrsnetzen werden fast ausschließlich Gleichrichter-Unterwerke eingesetzt. Sie bestehen aus einem Transformator und einem Gleichrichter und erlauben nur einen unidirektionalen Energiefluss aus dem übergeordneten 3AC-Netz in das DC-Netz hinein. Technisch umsetzbar sind Wechselrichter-Unterwerke, die einen bidirektionalen Energiefluss zwischen den beiden Stromnetzen ermöglichen. In diesem Fall stellen Unterwerke sowohl Erzeuger- als auch Verbraucher-knoten dar.

4.2.2.1 Modellierung des Unterwerks

In Unterwerken kommen sechspulsige (B6) oder zwölfpulsige (B12) Dioden-Gleichrichter zum Einsatz [90]. In Abb. 4.4 ist der Schaltplan für eine Zwölfpuls-schaltung abgebildet. Der Transformator setzt die Spannung des 3AC-Netzes auf die Eingangsspannung des Gleichrichters herunter. Dabei wird die Wechselspannung in Abhängigkeit des Windungsverhältnisses zwischen der Primärwicklung und den beiden Sekundärwicklungen reduziert. Für den Transformator sind verschiedene Schaltgruppen möglich. In der Abbildung liegt eine überspannungsseitige Dreiecksschaltung und eine unterspannungsseitige Dreiecks- bzw. Sternschaltung vor. Der Gleichrichter besteht aus zwei parallel geschalteten dreiphasigen Sechspulsbrücken und wandelt den dreiphasigen Wechselstrom in Gleichstrom um. Weisen die beiden Sekundärwicklungen eine Phasenverschiebung von 30° auf, wird dadurch eine zwölfpulsige Gleichspannung mit geringer Restwelligkeit erreicht [10].

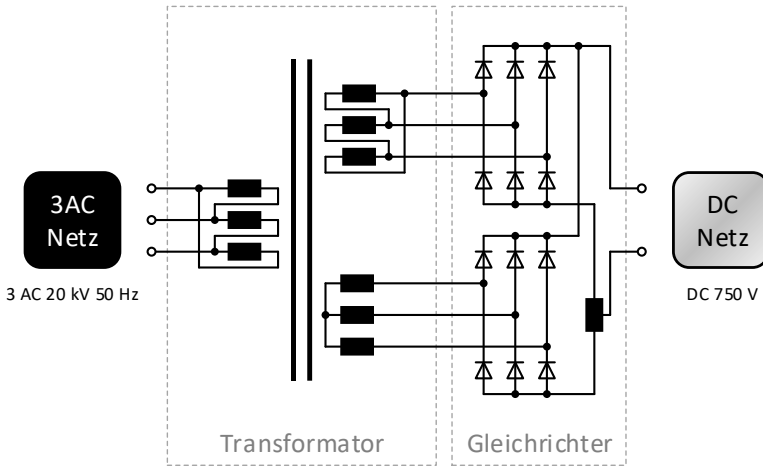


Abb. 4.4: Unterwerksschaltplan

Im Ersatzschaltbild von Abb. 4.5 werden die nicht idealen Eigenschaften der Unterwerkskomponenten aus Abb. 4.4 durch eine geringe Anzahl an Parametern mithilfe von linearen Bauelementen beschrieben.

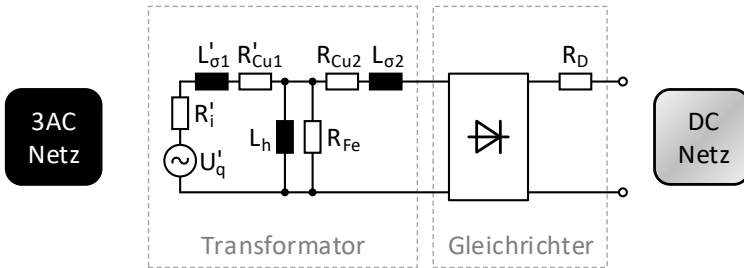


Abb. 4.5: Unterwerksersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild besteht aus einer primärseitigen idealen Wechselspannungsquelle U'_q mit dem Innenwiderstand R'_i . Darüber hinaus sind neben der den Magnetisierungsstrom verursachenden Hauptinduktivität L_h die beiden Streuinduktivitäten $L'_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ und die beiden Wicklungswiderstände

R'_{Cu1} , R_{Cu2} eingezeichnet. Bei den mit einem Strich gekennzeichneten Größen handelt es sich um von der Primär- auf die Sekundärseite transformierte Größen. Mit R_{Fe} werden die Eisenverluste berücksichtigt, die im Kern durch die periodische Ummagnetisierung entstehen. Die Verluste in den Siliziumhalbleitern des Gleichrichters werden zu R_D zusammengefasst.

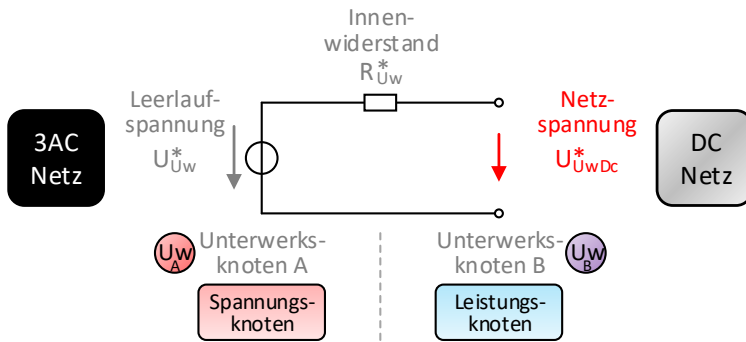


Abb. 4.6: Unterwerksmodell

Wie der Abb. 4.6 zu entnehmen ist, wird das Unterwerksmodell weiter vereinfacht und als ideale Gleichspannungsquelle mit Innenwiderstand modelliert. Nach [8] ergibt sich die Leerlaufspannung U^*_{Uw} mit der gleichrichterseitigen aus dem Windungsverhältnis ergebenden Nennspannung des Transformators $U_{Uw,N}$ näherungsweise durch:

$$U^*_{Uw} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{Uw,N} \quad (4.44)$$

und der Innenwiderstand R^*_{Uw} mit der Leerlaufspannung U^*_{Uw} , dem Nenngleichstrom $I_{Uw,N}$ und der relativen Kurzschlussspannung $u_{Uw,K}$ des Transformators durch:

$$R^*_{Uw} = \frac{u_{Uw,K}}{100\%} \cdot \frac{U^*_{Uw}}{2 \cdot I_{Uw,N}} \quad (4.45)$$

$u_{Uw,K}$ gibt das Verhalten der Ausgangsspannung des Transformators an, wenn er belastet wird. In [67] wird für R_{Uw}^* bei einer Leerlaufspannung von 845 V und einer Nennleistung von 1600 kVA ein Wert von 20 m Ω genannt. Hingegen werden in [14] für die Unterwerke der Berliner S-Bahn 9,2 m Ω angegeben. Nach Abb. 4.6 ist das Unterwerk ein Doppelknoten, der sich standardmäßig aus einem U-Knoten und einem passiven P-Knoten zusammensetzt. Die benutzerdefinierten Unterwerksparameter sind in der Tab. 4.5 aufgelistet.

Tab. 4.5: Unterwerksparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Leerlaufspannung	U_{Uw}^*	825	[V]
Innenwiderstand	R_{Uw}^*	0,02	[Ω]
Wirkungsgrad	η_{Uw}	0,98	[-]
Min. Netzeingangsleistung	$P_{UwDc,min}$	$-2,5 \cdot 10^6$	[W]
Max. Netzausgangsleistung	$P_{UwDc,max}$	$+0,0 \cdot 10^6$	[W]

Die beiden elektrischen Knoten U_{wA} und U_{wB} sind durch eine Unterwerksverbindung mit dem Innenwiderstand R_{Uw}^* verbunden. In R_{Uw}^* werden alle Bauelemente aus dem Ersatzschaltbild von Abb. 4.5 zusammengefasst. Mit R_{Uw}^* lässt sich die belastungsabhängige Abweichung der Unterwerksnetzspannung U_{UwDc}^* von der Unterwerksleerlaufspannung U_{Uw}^* simulieren.

4.2.2.2 Energieflüsse in Unterwerken

Die Unterwerksnetzleistung P_{UwDc} lässt sich in Abhängigkeit des Vorzeichens unterscheiden in:

- Unterwerksnetzeingangsleistung $P_{UwDc,ein}$ (negativ) im Einspeisemodus
- Unterwerksnetzausgangsleistung $P_{UwDc,aus}$ (positiv) im Rückspeisemodus

In Abb. 4.7 sind die system- und netzbezogenen Energieflüsse von Unterwerken dargestellt.

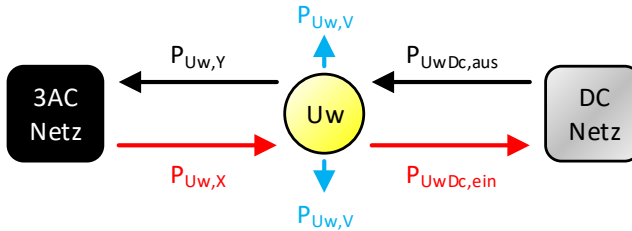


Abb. 4.7: Energieflüsse in Unterwerksknoten

Die Unterwerkseinspeiseleistung $P_{Uw,X}$, die aus dem 3AC-Netz eingeführt wird, beträgt:

$$P_{Uw,X} = \frac{1}{\eta_{Uw}} \cdot P_{UwDc,ein} \quad (4.46)$$

mit der dazugehörigen Unterwerksverlustleistung $P_{Uw,Y}$:

$$P_{Uw,Y} = |P_{Uw,X} - P_{UwDc,ein}| \quad (4.47)$$

Die Unterwerksrückspeiseleistung $P_{Uw,Y}$, die in das 3AC-Netz ausgeführt wird, beträgt:

$$P_{Uw,Y} = \eta_{Uw} \cdot P_{UwDc,aus} \quad (4.48)$$

mit der dazugehörigen Unterwerksverlustleistung $P_{Uw,Y}$:

$$P_{Uw,Y} = P_{UwDc,aus} - P_{Uw,Y} \quad (4.49)$$

Für die Berechnung von $P_{Uw,Y}$ wird der in Tab. 4.5 definierte Wirkungsgrad η_{Uw} verwendet. Die umgesetzte Leistung im Innenwiderstand R_{Uw}^* eignet sich hierfür nicht, da die Induktivitäten aus dem Ersatzschaltbild in Abb. 4.5 im Gegensatz zu den Widerständen mit einem weitaus größeren Gewicht in R_{Uw}^* eingehen.

4.2.2.3 Knotenmodifikation bei Unterwerken

Unterwerksknoten können folgende drei Knotenzustände einnehmen:

- Standard-U-Knoten (1) im Ein- oder Rückspeisemodus:
 U_{WA}: U-Knoten mit $U_k^* = U_{UW}^*$
 U_{WB}: P-Knoten mit $P_k^* = 0^*$
- Unterer P-Knoten (2) im Einspeisemodus:
 U_{WA}: P-Knoten mit $P_k^* = 0^*$
 U_{WB}: P-Knoten mit $P_k^* = P_{UwDc,min}$
- Oberer P-Knoten (3) im Rückspeisemodus:
 U_{WA}: P-Knoten mit $P_k^* = 0^*$
 U_{WB}: P-Knoten mit $P_k^* = P_{UwDc,max}$

Die Ergebnisse der Energieflussberechnung sind im Knotenzustand (1):

- U_{WA} (U-Knoten): $P_k = P_{UwA}$
- U_{WB} (P-Knoten): $U_k = U_{UwB}$

und in den Knotenzuständen (2) oder (3):

- U_{WA} (P-Knoten): $U_k = U_{UwA}$
- U_{WB} (P-Knoten): $U_k = U_{UwB}$

Daraus wird die Unterwerksnetzspannung U_{UwDc} und die Unterwerksnetzleistung P_{UwDc} berechnet. Die beiden Werte lassen sich im Knotenzustand (1) durch:

$$U_{UwDc} = U_{UwB} \quad \text{und} \quad P_{UwDc} = U_{UwB} \cdot \frac{P_{UwA}}{U_{UwA}} \quad (4.50)$$

und in den Knotenzuständen (2) oder (3) durch:

$$U_{UwDc} = U_{UwA} = U_{UwB} \quad \text{und} \quad P_{UwDc} = P_{UwB} \quad (4.51)$$

bestimmen. P_{UwDc} wird für die Berechnung der Netzverlustleistung nach Formel (4.43) benötigt.

In Abhängigkeit des Knotenzustands können die folgenden vier Nebenbedingungen verletzt werden:

- Standard-U-Knoten (1):
 - Fall 12 $P_{UwDc} < (P_{k,min} = P_{UwDc,min})$:
→ Umwandlung in unteren P-Knoten (2)
 - Fall 13 $P_{UwDc} > (P_{k,max} = P_{UwDc,max})$:
→ Umwandlung in oberen P-Knoten (3)
- Unterer P-Knoten (2):
 - Fall 21 $U_{UwDc} > (U_{k,max} = U_{UwDc,inf}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-U-Knoten (1)
- Oberer P-Knoten (3):
 - Fall 31 $U_{UwDc} < (U_{k,min} = U_{UwDc,sup}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-U-Knoten (1)

Die Knotenleistungsgrenzen $P_{k,min}$ und $P_{k,max}$ für den Knotenzustand (1) sind in der Tab. 4.5 definiert. Bei den Nebenbedingungen der beiden Knotenzustände (2) und (3) muss die Spannungsdifferenz im Doppelknoten aufgrund des Innenwiderstands berücksichtigt werden. Daher ergibt sich für den Knotenzustand (2) die obere Knotenspannungsgrenze $U_{k,max} (\leq U_{Uw}^*)$ durch:

$$U_{UwDc,inf}^* = U_{Uw}^* + \left(R_{Uw}^* \cdot \frac{P_{UwDc,min}}{U_{Uw}^*} \right) \quad (4.52)$$

und für den Knotenzustand (3) die untere Knotenspannungsgrenze $U_{k,min} (\geq U_{Uw}^*)$ durch:

$$U_{UwDc,sup}^* = U_{Uw}^* + \left(R_{Uw}^* \cdot \frac{P_{UwDc,max}}{U_{Uw}^*} \right) \quad (4.53)$$

Das Ablaufdiagramm zur Überprüfung der Nebenbedingungen von Unterwerksknoten mit ggf. erforderlicher Knotenumwandlung ist in Abb. 4.8 dargestellt.

In den folgenden Knotenmodifikationsdiagrammen werden die Knotenzustände mit bezifferten Kreisen und die Knotenumwandlungsfälle aufgrund verletzter Nebenbedingungen mit bezifferten Quadraten gekennzeichnet. Die

beiden Ziffern bezeichnen den Anfangs- und Endknoten bei der Knotenumwandlung.

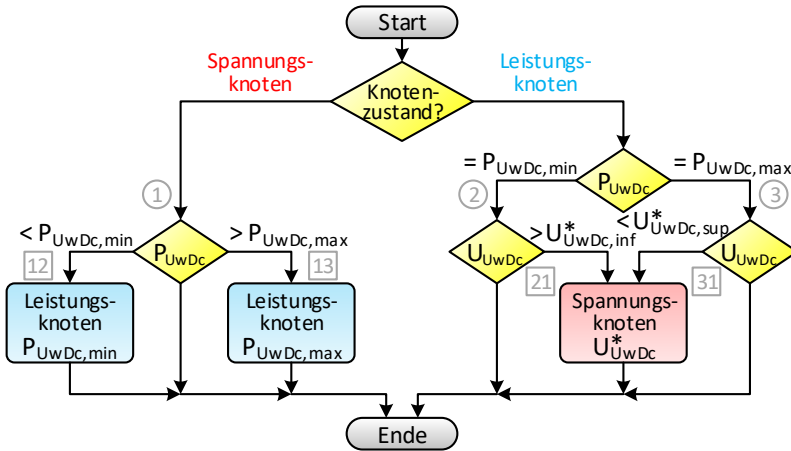


Abb. 4.8: Knotenmodifikationsdiagramm für Unterwerksknoten

4.2.3 Speicher

Speicherknoten besitzen die Fähigkeit, Energie im System zu speichern.

Tab. 4.6: Speicherparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Netzentladespannung	$U_{EsDc,inf}^*$	820	[V]
Netzladespannung	$U_{EsDc,sup}^*$	830	[V]
Speicherkapazität	$E_{Es,lim}$	$18,0 \cdot 10^6$	[W·s]
Min. Netzeingangsleistung	$P_{EsDc,min}$	$-1,0 \cdot 10^6$	[W]
Max. Netzausgangsleistung	$P_{EsDc,max}$	$+1,0 \cdot 10^6$	[W]
Speicherwirkungsgrad	η_{Es}	0,95	[-]

Die benutzerdefinierten Speicherparameter sind in der Tab. 4.6 aufgelistet. Zum Anfangszeitpunkt der Simulation ($t = t_{anf}$) wird die momentane Speicherenergie E_{ES} auf den definierten Anfangsladezustand des Netzspeichers ξ_{ES} (Tab. 3.2) in Bezug auf die Speicherkapazität $E_{ES,lim}$ gesetzt:

$$E_{ES}(t_{anf}) = \xi_{ES} \cdot E_{ES,lim} \quad (4.54)$$

4.2.3.1 Energieflüsse in Speichern

Die Speichernetzleistung P_{ESDC} lässt sich in Abhängigkeit des Vorzeichens unterscheiden in:

- Speichernetzleistung $P_{ESDC} = 0$
im Passivmodus
- Speichernetzeingangsleistung $P_{ESDC,ein}$ (negativ)
im Entlademodus
- Speichernetzaustragsleistung $P_{ESDC,aus}$ (positiv)
im Lademodus

In Abb. 4.9 sind die system- und netzbezogenen Energieflüsse von Speichern dargestellt. Die momentane Speicherenergie $E_{ES}(t)$ wird durch die grüne Raute symbolisiert. Selbstentladungsverluste werden nicht berücksichtigt, da die Energie nicht über einen langen Zeitraum gespeichert werden muss.

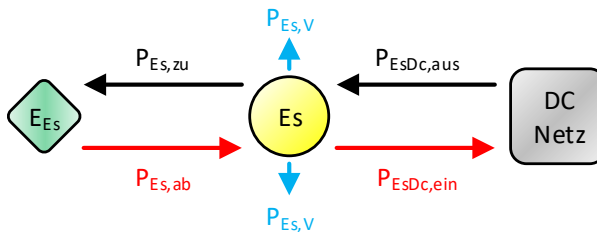


Abb. 4.9: Energieflüsse in Speicherknoten

Die stationäre Speicherentladeleistung $P_{Es,ab}$, durch die die Systemenergie abnimmt, beträgt:

$$P_{Es,ab} = \frac{1}{\eta_{Es}} \cdot P_{EsDc,ein} \quad (4.55)$$

mit der dazugehörigen stationären Speicherverlustleistung $P_{Es,V}$:

$$P_{Es,V} = |P_{Es,ab} - P_{EsDc,ein}| \quad (4.56)$$

Die stationäre Speicherladeleistung $P_{Es,zu}$, durch die die Systemenergie zunimmt, beträgt:

$$P_{Es,zu} = \eta_{Es} \cdot P_{EsDc,aus} \quad (4.57)$$

mit der dazugehörigen stationären Speicherverlustleistung $P_{Es,V}$:

$$P_{Es,V} = P_{EsDc,aus} - P_{Es,zu} \quad (4.58)$$

4.2.3.2 Knotenmodifikation bei Speichern

Speicherknoten können folgende fünf Knotenzustände einnehmen:

- Standard-P-Knoten (1) im Passivmodus:
P-Knoten mit $P_k^* = 0^*$
- Unterer U-Knoten (2) im Entlademodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{EsDc,inf}^*$
- Oberer U-Knoten (3) im Lademodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{EsDc,sup}^*$
- Unterer P-Knoten (4) im Entlademodus:
P-Knoten mit $P_k^* = P_{EsDc,inf}^*$
- Oberer P-Knoten (5) im Lademodus:
P-Knoten mit $P_k^* = P_{EsDc,sup}^*$

Das Ergebnis des EFP ist in Abhängigkeit vom Knotenzustand entweder die Speichernetzspannung U_{EsDc} oder die Speichernetzleistung P_{EsDc} :

- P-Knoten (1), (4), (5): $U_k = U_{EsDc}$
- U-Knoten (2), (3): $P_k = P_{EsDc}$

In Abhängigkeit des Knotenzustands können die folgenden acht Nebenbedingungen verletzt werden:

- Standard-P-Knoten (1):
 - Fall 12 $U_{EsDc} < (U_{k,min} = U_{EsDc,inf}^*)$:
→ Umwandlung in unteren U-Knoten (2)
 - Fall 13 $U_{EsDc} > (U_{k,max} = U_{EsDc,sup}^*)$:
→ Umwandlung in oberen U-Knoten (3)
- Unterer U-Knoten (2):
 - Fall 24 $P_{EsDc} < (P_{k,min} = P_{EsDc,inf})$:
→ Umwandlung in unteren P-Knoten (4)
 - Fall 21 $P_{EsDc} > (P_{k,max} = 0^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)
- Oberer U-Knoten (3):
 - Fall 31 $P_{EsDc} < (P_{k,min} = 0^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)
 - Fall 35 $P_{EsDc} > (P_{k,max} = P_{EsDc,sup})$:
→ Umwandlung in oberen P-Knoten (5)
- Unterer P-Knoten (4):
 - Fall 42 $U_{EsDc} > (U_{k,max} = U_{EsDc,inf}^*)$:
→ Umwandlung in unteren U-Knoten (2)
- Oberer P-Knoten (5):
 - Fall 53 $U_{EsDc} < (U_{k,min} = U_{EsDc,sup}^*)$:
→ Umwandlung in oberen U-Knoten (3)

Die Knotenspannungsgrenzen $U_{k,min} (\geq U_{dc,min})$ und $U_{k,max} (\leq U_{dc,max})$ für die Knotenzustände (1), (4) und (5) sind in der Tab. 4.6 definiert und müssen innerhalb der Netzspannungsgrenzen (Tab. 3.2) liegen.

Für den Knotenzustand (2) ergibt sich im Entlademodus die untere Knotenleistungsgrenze $P_{k,min}$ aus dem Maximum der in Tab. 4.6 definierten minimalen Netzeingangsleistung $P_{EsDc,min}$ und der analog zu Formel (3.80)

4.2.3.3 Stationäre Speicherenergie

Die momentane Speicherenergie E_{Es} ändert sich in jedem Simulationszeitschritt in Abhängigkeit vom Speichermodus:

- Entlademodus ($P_{Es} < 0$): Abnahme der Speicherenergie
- Lademodus ($P_{Es} > 0$): Zunahme der Speicherenergie

Die Speicherenergie im Zeitschritt t_1 ist die Summe aus der Speicherenergie im vorherigen Zeitschritt t_0 und der mithilfe von Formel (4.55) bzw. (4.57) berechneten Entlade- bzw. Ladeenergie des stationären Speichers im Simulationszeitintervall $\Delta t = t_1 - t_0$:

$$E_{Es}(t_1) = E_{Es}(t_0) + (P_{Es,ab/zu} \cdot \Delta t) \quad (4.61)$$

4.2.4 Anlagen

Anlagenknoten sind stationäre Verbraucher-knoten im System. Mit ihnen lassen sich zusätzliche aus dem DC-Netz gespeiste Lastknoten, wie z. B. Bahnsteigbeleuchtungen oder Weichenheizungen, abbilden. Ähnlich zu den Unterwerken kann bei Anlagen der entgegengesetzte Energiefluss eingestellt werden. In diesem Fall werden Anlagen zu Erzeugerknoten.

Die benutzerdefinierten Anlagenparameter sind in der Tab. 4.7 aufgelistet.

Tab. 4.7: Anlagenparameter

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Vorläufige Netzeingangs- bzw. Netzausgangsleistung	P_{ALDC}^*	0	[W]
Wirkungsgrad	η_{Al}	0,98	[-]

Um die vorläufige Anlagennetzleistung P_{ALDC}^* über den Tagesablauf variieren zu können, ist es möglich, für jede Anlage bis zu zehn Zeitbereiche mit verschiedenen Werten für P_{ALDC}^* anzugeben.

4.2.4.1 Energieflüsse in Anlagen

Die Anlagennetzleistung P_{AlDc} lässt sich in Abhängigkeit des Vorzeichens unterscheiden in:

- Anlagennetzaustragsleistung $P_{AlDc,aus}$ (positiv) im Verbrauchermodus
- Anlagennetzeintragsleistung $P_{AlDc,ein}$ (negativ) im Erzeugermodus

In Abb. 4.11 sind die system- und netzbezogenen Energieflüsse von Anlagen dargestellt.

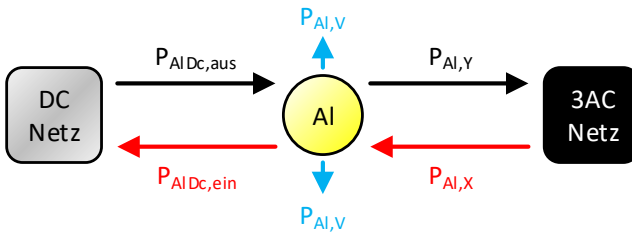


Abb. 4.11: Energieflüsse in Anlagenknoten

Die Anlagenverbraucherleistung $P_{Al,Y}$, die in das 3AC-Netz ausgeführt wird, beträgt:

$$P_{Al,Y} = \eta_{Al} \cdot P_{AlDc,aus} \quad (4.62)$$

mit der dazugehörigen Anlagenverlustleistung $P_{Al,V}$:

$$P_{Al,V} = P_{AlDc,aus} - P_{Al,Y} \quad (4.63)$$

Die Anlagenerzeugerleistung $P_{Al,X}$, die aus dem 3AC-Netz eingeführt wird, beträgt:

$$P_{Al,X} = \frac{1}{\eta_{Al}} \cdot P_{AlDc,ein} \quad (4.64)$$

mit der dazugehörigen Anlagenverlustleistung $P_{AL,V}$:

$$P_{AL,V} = |P_{AL,X} - P_{ALDC,ein}| \quad (4.65)$$

4.2.4.2 Knotenmodifikation bei Anlagen

Anlagenknoten können folgende drei Knotenzustände einnehmen:

- Standard-P-Knoten (1) im Verbraucher- oder Erzeugermodus:
P-Knoten mit $P_k^* = P_{ALDC}^*$
- Unterer U-Knoten (2) im Verbrauchermodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{dc,min}$
- Oberer U-Knoten (3) im Erzeugermodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{dc,max}$

Das Ergebnis des EFP ist in Abhängigkeit vom Knotenzustand entweder die Anlagennetzspannung U_{ALDC} oder die Anlagennetzleistung P_{ALDC} :

- P-Knoten (1): $U_k = U_{ALDC}$
- U-Knoten (2), (3): $P_k = P_{ALDC}$

In Abhängigkeit des Knotenzustands können die folgenden vier Nebenbedingungen verletzt werden:

- Standard-P-Knoten (1):
Fall 12 $U_{ALDC} < (U_{k,min} = U_{dc,min})$:
→ Umwandlung in unteren U-Knoten (2)
Fall 13 $U_{ALDC} > (U_{k,max} = U_{dc,max})$:
→ Umwandlung in oberen U-Knoten (3)
- Unterer U-Knoten (2):
Fall 21 $P_{ALDC} > (P_{k,max} = P_{ALDC}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)
- Oberer U-Knoten (3):
Fall 31 $P_{ALDC} < (P_{k,min} = P_{ALDC}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)

Die Knotenspannungsgrenzen $U_{k,min}$ und $U_{k,max}$ für den Knotenzustand (1) sind die beiden Netzspannungsgrenzen aus Tab. 3.2. Die obere Knotenleistungsgrenze $P_{k,max}$ für den Knotenzustand (2) bzw. die untere Knotenleistungsgrenze $P_{k,min}$ für den Knotenzustand (3) entspricht der vorläufigen Anlagennetzleistung P_{AlDc}^* .

Das Ablaufdiagramm zur Überprüfung der Nebenbedingungen von Anlagenknoten mit ggf. erforderlicher Knotenumwandlung ist in Abb. 4.12 dargestellt.

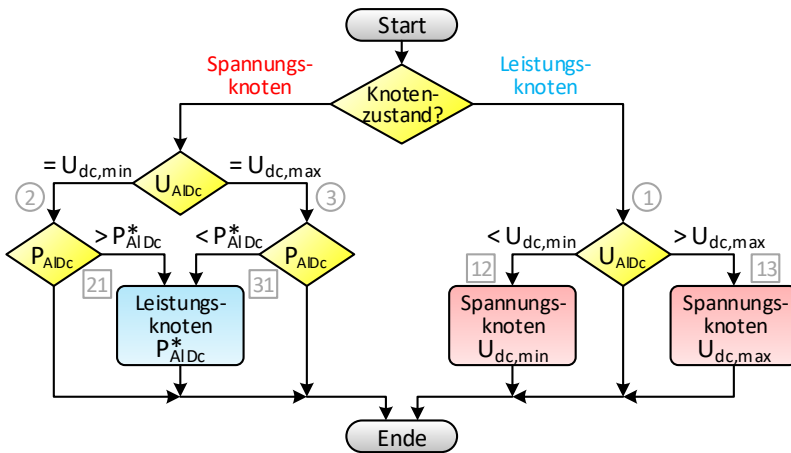


Abb. 4.12: Knotenmodifikationsdiagramm für Anlagenknoten

4.2.5 Fahrzeuge

Fahrzeugknoten sind mobile Verbraucherknoten im System. Sie besitzen die Fähigkeit, Energie im System zu speichern. Fahrzeuge sind im inaktiven Fahrzustand mit einem Endstationsknoten und im aktiven Fahrzustand mit dem Fahrleitungs- und Fahrschienennetz verbunden. Im Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) sind die benutzerdefinierten Fahrzeugparameter in der Tab. 3.13 und in der Tab. 3.14 aufgelistet. Die vorläufige Fahrzeugnetzleistung P_{FzDc}^* wurde im Kap. 3.4.3.3 in Formel (3.84) bestimmt.

4.2.5.1 Energieflüsse in Fahrzeugen

Die Fahrzeugnetzleistung P_{FzDc} lässt sich in Abhängigkeit des Vorzeichens unterscheiden in:

- Fahrzeugnetzausgangsleistung $P_{FzDc,aus}$ (positiv) im Aufnahmemodus
- Fahrzeugnetzeingangsleistung $P_{FzDc,ein}$ (negativ) im Abgabemodus

In Abb. 4.13 sind die system- und netzbezogenen Energieflüsse von Fahrzeugen dargestellt. Die momentane Fahrzeugenergie $E_{FzTr}(t)$ und die ggf. verfügbare Speicherenergie $E_{FzEs}(t)$ wird durch die grünen Rauten symbolisiert.

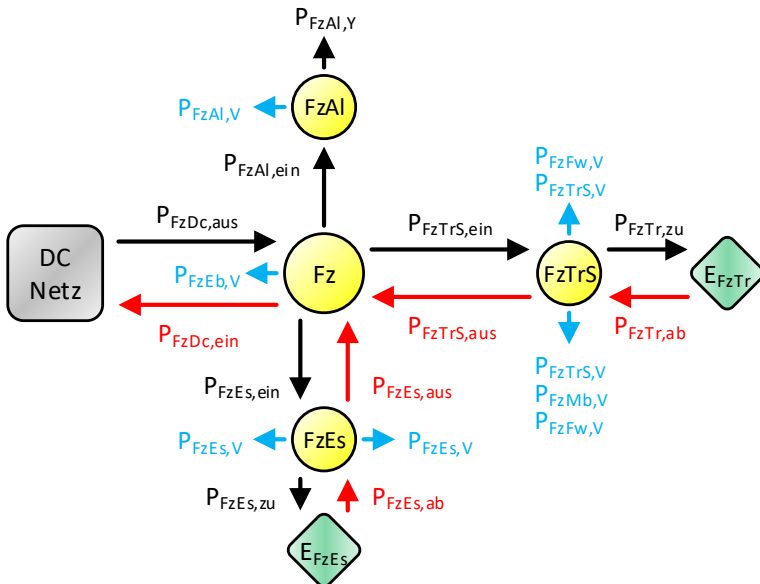


Abb. 4.13: Energieflüsse in Fahrzeugknoten

Die Energieflüsse des Fahrzeugtraktionssystems wurden im Kap. 3.4.2 und im Kap. 3.4.3 ermittelt. Neben den Fahrwiderstandsverlusten $P_{FzFw,V}$ aus Formel (3.105) entstehen durch elektrisches Bremsen, mechanisches Bremsen und nicht mögliches Netzbremsen die folgenden weiteren Verlustleistungen:

- Traktionssystemverluste $P_{FzTrs,V}$ (Formel (3.94), (3.99))
- Reibungsbremsverluste $P_{FzMb,V}$ (Formel (3.97), (3.102))
- Widerstandsbremsverluste $P_{FzEb,V}$ (Formel (3.86), (3.90))

Für die Hilfsbetriebeanlagen und für den optional installierten mobilen Fahrzeugspeicher werden die folgenden Energieflüsse ermittelt:

- Hilfsbetriebeeingangsleistung $P_{FzAl,ein}$ (Formel (3.91))
- Speicherausgangsleistung $P_{FzEs,aus}$ (Formel (3.81))
- Speichereingangsleistung $P_{FzEs,ein}$ (Formel (3.83))

Die Hilfsbetriebeverbraucherleistung $P_{FzAl,Y}$, die aus dem System ausgeführt wird, beträgt:

$$P_{FzAl,Y} = \eta_{FzAl} \cdot P_{FzAl,ein} \quad (4.66)$$

mit der dazugehörigen Hilfsbetriebeverlustleistung $P_{FzAl,V}$:

$$P_{FzAl,V} = P_{FzAl,ein} - P_{FzAl,Y} \quad (4.67)$$

Die mobile Speicherentladeleistung $P_{FzEs,ab}$, durch die die Systemenergie abnimmt, beträgt:

$$P_{FzEs,ab} = \frac{1}{\eta_{FzEs}} \cdot P_{FzEs,aus} \quad (4.68)$$

mit der dazugehörigen mobilen Speicherverlustleistung $P_{FzEs,V}$:

$$P_{FzEs,V} = |P_{FzEs,ab} - P_{FzEs,aus}| \quad (4.69)$$

Die mobile Speicherladeleistung $P_{FzEs,zu}$, durch die die Systemenergie zunimmt, beträgt:

$$P_{FzEs,zu} = \eta_{FzEs} \cdot P_{FzEs,ein} \quad (4.70)$$

mit der dazugehörigen mobilen Speicherverlustleistung $P_{FzEs,V}$:

$$P_{FzEs,V} = P_{FzEs,ein} - P_{FzEs,zu} \quad (4.71)$$

4.2.5.2 Knotenmodifikation bei Fahrzeugen

Fahrzeugknoten können folgende drei Knotenzustände einnehmen:

- Standard-P-Knoten (1) im Aufnahme- oder Abgabemodus:
P-Knoten mit $P_k^* = P_{FzDc}^*$
- Unterer U-Knoten (2) im Aufnahmemodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{dc,min}$
- Oberer U-Knoten (3) im Abgabemodus:
U-Knoten mit $U_k^* = U_{dc,max}$

Das Ergebnis des EFP ist in Abhängigkeit vom Knotenzustand entweder die Fahrzeugnetzspannung U_{FzDc} oder die Fahrzeugnetzleistung P_{FzDc} :

- P-Knoten (1): $U_k = U_{FzDc}$
- U-Knoten (2), (3): $P_k = P_{FzDc}$

In Abhängigkeit des Knotenzustands können die folgenden vier Nebenbedingungen verletzt werden:

- Standard-P-Knoten (1):
Fall 12 $U_{FzDc} < (U_{k,min} = U_{dc,min})$:
→ Umwandlung in unteren U-Knoten (2)
- Fall 13 $U_{FzDc} > (U_{k,max} = U_{dc,max})$:
→ Umwandlung in oberen U-Knoten (3)
- Unterer U-Knoten (2):
Fall 21 $P_{FzDc} > (P_{k,max} = P_{FzDc}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)
- Oberer U-Knoten (3):
Fall 31 $P_{FzDc} < (P_{k,min} = P_{FzDc}^*)$:
→ Umwandlung in Standard-P-Knoten (1)

Die Knotenspannungsgrenzen $U_{k,min}$ und $U_{k,max}$ für den Knotenzustand (1) sind die beiden Netzspannungsgrenzen aus der Tab. 3.2. Die obere Knotenleistungsgrenze $P_{k,max}$ für den Knotenzustand (2) bzw. die untere Knotenleistungsgrenze $P_{k,min}$ für den Knotenzustand (3) entspricht der vorläufigen Fahrzeugnetzleistung P_{FzDc}^* .

Das Ablaufdiagramm zur Überprüfung der Nebenbedingungen von Fahrzeugknoten mit ggf. erforderlicher Knotenumwandlung ist in Abb. 4.14 dargestellt.

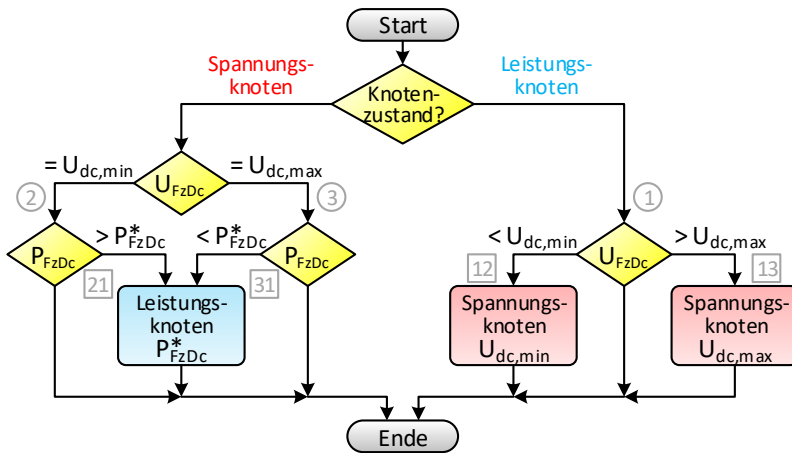


Abb. 4.14: Knotenmodifikationsdiagramm für Fahrzeugknoten

4.2.5.3 Mobile Speicherenergie

Die momentane Fahrzeugenergie E_{FzTr} ist die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeugs (Kap. 3.4.3.5).

Die momentane Speicherenergie E_{FzES} ändert sich in jedem Simulationszeitschritt in Abhängigkeit vom Speichermodus:

- Entlademodus ($P_{FzES} < 0$): Abnahme der Speicherenergie
- Lademodus ($P_{FzES} > 0$): Zunahme der Speicherenergie

Die Speicherenergie im Zeitschritt t_1 ist die Summe aus der Speicherenergie im vorherigen Zeitschritt t_0 und der mithilfe der Formel (4.68) bzw. (4.70) berechneten Entlade- bzw. Ladeenergie des mobilen Speichers im Simulationszeitintervall $\Delta t = t_1 - t_0$:

$$E_{FzEs}(t_1) = E_{FzEs}(t_0) + (P_{FzEs,ab/zu} \cdot \Delta t) \quad (4.72)$$

4.3 Berechnungsablauf

Die Problematik der nicht rückspeisefähigen Unterwerke in Kombination mit den rückspeisefähigen Fahrzeugen bei der Energieflussberechnung in DC-Nahverkehrsnetzen wird u. a. in [14] [18] [67] beschrieben. Hier wird vorgeschlagen, rückspeisende Unterwerke temporär abzuschalten und rückspeisende Fahrzeuge im Falle eines nicht aufnahmefähigen DC-Netzes als Spannungsquelle anstatt als Stromquelle zu modellieren. Im Grunde entspricht dies einer Umwandlung der betroffenen Unterwerke in leistungslose P-Knoten und einer Umwandlung der betroffenen Fahrzeuge in auf die Maximalspannung gesetzte U-Knoten.

Für das Simulationsprogramm wurde ein Knotenmodifikationsverfahren (KM-Verfahren) entwickelt, das bei Bedarf alle aktiven elektrischen Netzwerkkomponenten nach den in den Kap. 4.2.2 bis Kap. 4.2.5 beschriebenen Abläufen modifiziert. Nach jeder Knotenmodifikation muss das EFP mit dem Newton-Raphson-Verfahren (NR-Verfahren) aus Kap. 4.1.2 erneut gelöst werden. Um Endlosschleifen zu verhindern, werden die maximalen Schleifendurchläufe beim NR- und KM-Verfahren auf 100 beschränkt. Zudem wird das NR-Verfahren direkt abgebrochen, wenn während der Iteration die Knotenspannung eines P-Knotens unter $U_{NR,min}$ fällt bzw. über $U_{NR,max}$ steigt. Dadurch können die Knoten, die zu einem unlösbaren EFP führen, direkt identifiziert werden, was z. B. bei der Bestimmung von Nullknoten (Kap. 4.3.1.1) hilfreich ist.

Die für den Berechnungsablauf erforderlichen Simulationsparameter sind in der Tab. 4.8 aufgelistet.

Tab. 4.8: Simulationsparameter der Energieflussberechnung

Bezeichnung	Formelzeichen	Standardwert	Maßeinheit
Zulässiges Verhältnis von Nullknoten zur Gesamtanzahl	r_{NK}	0,25	[-]
Abbruchwert für das Konvergenzkriterium beim NR-Verfahren	ε_{NR}	0,1	[V]
Untere Abbruchsgrenze der Knotenspannung beim NR-Verfahren	$U_{NR,min}$	$0,7 \cdot U_{dc,min}$	[V]
Obere Abbruchsgrenze der Knotenspannung beim NR-Verfahren	$U_{NR,max}$	$1,3 \cdot U_{dc,max}$	[V]
Maximale Iterationen beim NR-Verfahren	ϑ_{max}	100	[-]
Maximale Iterationen beim KM-Verfahren	χ_{max}	100	[-]

4.3.1 Knotenleitwertmatrix

Zu Beginn der Simulation werden zunächst alle Nullknoten identifiziert. Anschließend werden in jedem Simulationszeitschritt für alle elektrischen Leitungen die Leitwerte als Nichtdiagonalelemente in die G-Matrix eingetragen. Aufgrund der Symmetrie der Matrix (Kap. 4.1.1.3) erfolgt dies für jeden Leitwert zweimal. Abschließend werden die nach Formel (4.7) berechneten Hauptdiagonalelemente in die G-Matrix eingefügt.

4.3.1.1 Bestimmung der Nullelemente

Als Nullknoten werden alle P-Knoten bezeichnet, die mit keinem U-Knoten verbunden sind. Sie werden zu Beginn der Simulation in dauerhafte U-Knoten mit $U^* = 0 \text{ V}$ und $P^* = 0 \text{ W}$ umgewandelt.

Zur Bestimmung der Nullknoten wird ein Testdurchlauf für das Netzwerk durchgeführt. Hierzu werden alle U_{WA} -Knoten als U-Knoten und alle übrigen elektrischen Knoten als P-Knoten definiert. Die U-Knoten werden auf ihre Leerlaufspannung gesetzt und alle P-Knoten mit einem fiktiven Testwert von 1 kW belastet. Anschließend wird versucht, das EFP zu lösen. Bei diesem Vorgehen wird überprüft, ob die Energieübertragung von den U-Knoten zu allen P-Knoten möglich ist. Das NR-Verfahren konvergiert nicht, wenn P-Knoten vorhanden sind, für die das nicht zutrifft. Diese Knoten werden in dauerhafte Nullknoten umgewandelt. Anschließend wird erneut versucht, das EFP zu lösen. Sobald eine Lösung gefunden wird, sind alle Nullknoten des Netzwerks identifiziert.

Alle elektrischen Knoten, die mit Nullknoten verbunden sind, sind ebenfalls Nullknoten. Werden Betriebshöfe oder Wendeschleifen als Nullknoten deklariert, so werden auch alle sich darin befindlichen Fahrzeuge in Nullknoten umgewandelt, da sie keinen Zugang zum Versorgungsnetz haben. Die Simulation wird gleich zu Beginn abgebrochen, falls mehr als 25 % der elektrischen Knoten ($r_{NK} = 0,25$) als Nullknoten identifiziert werden oder falls das EFP zu einer Endlosschleife führt und bereits im Testdurchlauf nicht gelöst werden kann.

Alle elektrischen Leitungen, deren Alpha- und Omega-Knoten ein Nullknoten ist oder deren Leitwert den definierten minimalen Leitungsleitwert $G_{L,min}$ unterschreitet, werden als Nullleitungen bezeichnet. Nullleitungen stellen mit $G_L = 0 S$ versorgungsfreie Abschnitte im elektrischen Netz dar.

Alle Fahrzeuge, die sich außerhalb der Systemgrenzen oder auf Nullleitungen befinden, werden in temporäre U-Knoten mit $U^* = 0 V$ und $P^* = 0 W$ umgewandelt.

4.3.1.2 Bestimmung der Leitungsleitwerte

Die Leitwerte von Unterwerksverbindungen und Speisekabeln sind für jeden Simulationszeitschritt identisch. Im Gegensatz dazu müssen die Leitwerte der Fahrleitungen in jedem Simulationszeitschritt neu ermittelt werden. Die Anzahl der Teilstücke einer Fahrleitung $n_{FL,G}$ ergibt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge $n_{FL,FZ}$, die momentan von der Fahrleitung gespeist werden:

$$n_{FL,G} = n_{FL,Fz} + 1 \quad (4.73)$$

Ohne Fahrzeuge kann der Leitwert G_L direkt nach Formel (A.62) ermittelt werden. Mit Fahrzeugen ist der Alpha-Knoten nicht mehr mit dem Omega-Knoten der Fahrleitung verbunden. In diesem Fall wird die Fahrleitung durch $n_{FL,G}$ temporäre Teilfahrleitungen ersetzt. In Abb. 4.15 wird dies beispielhaft für $n_{FL,Fz} = 7$ Fahrzeuge veranschaulicht.

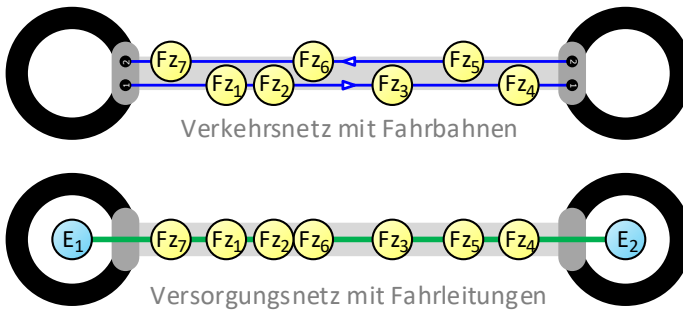


Abb. 4.15: Aufteilung der Fahrleitung in Fahrzeugabschnitte

Wie im Kap. 2.2.2.3 beschrieben, werden im Versorgungsnetz die Fahrleitungen von allen Fahrbahnen einer Verkehrskante in einer Parallelschaltung zusammengefasst. Für das in Abb. 4.15 dargestellte Beispiel müssen die Fahrzeuge Fz_1 bis Fz_4 auf der rechten Fahrbahn (positive Kantenrichtung) und die Fahrzeuge Fz_5 bis Fz_7 auf der linken Fahrbahn (negative Kantenrichtung) entsprechend ihrer Positionen in eine Reihenfolge in Bezug auf die positive Kantenrichtung gebracht werden. Anschließend lassen sich die Längen und damit die Leitwerte der $n_{L,G} = 8$ temporären Fahrleitungen berechnen und in die G-Matrix eintragen.

Zuletzt werden die Direktverbindungen in die G-Matrix eingefügt. Alle Fahrzeuge, die sich in einem Betriebshof oder in einer Wendeschleife befinden, werden widerstandslos mit ihrem Endstationsknoten verbunden.

4.3.1.3 Besetzungsmuster der G-Matrix

In Abb. 4.16 wird das Besetzungsmuster der G-Matrix für das Beispiel-Versorgungsnetz aus Kap. 2.2, Abb. 2.11 dargestellt.

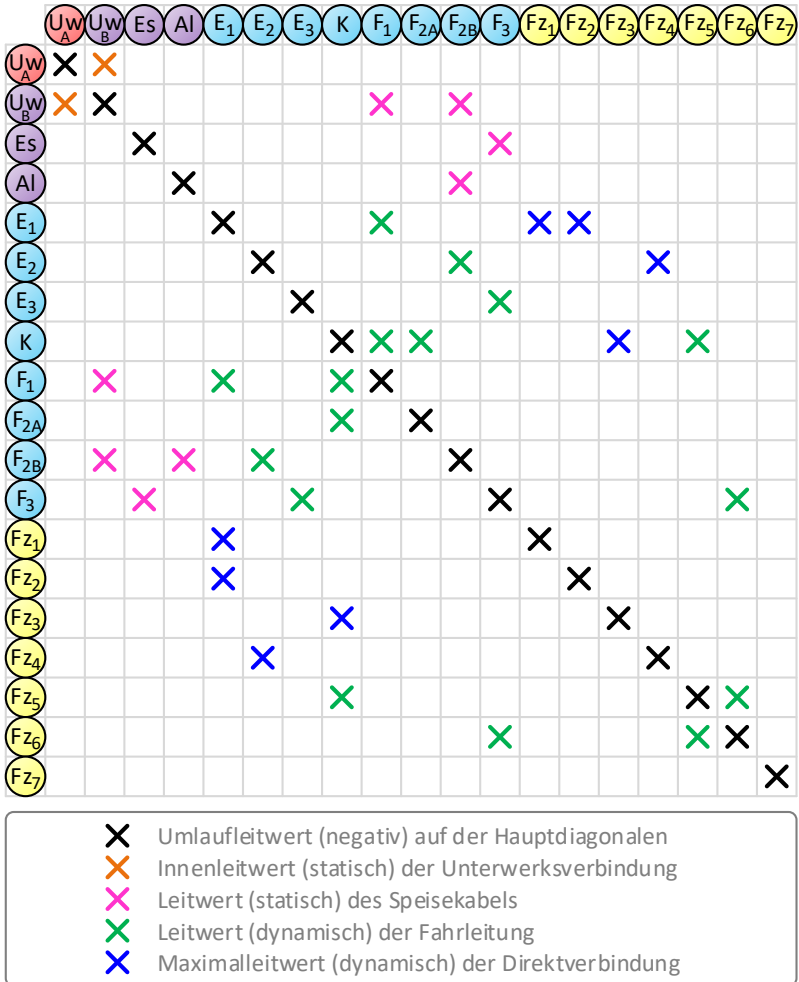


Abb. 4.16: Besetzungsmuster der Knotenleitwertmatrix

Es setzt sich nach Kap. 2.2.1 und Kap. 2.2.2 aus 19 elektrischen Knoten und 17 elektrischen Leitungen zusammen. Die mit Leitwerten besetzten Matrixfelder werden durch Kreuze gekennzeichnet. In allen übrigen Matrixfeldeinträgen sind die Leitwerte gleich null, d. h. es existiert keine elektrische Verbindung zwischen den jeweiligen Knotenpaaren. Damit hat die G-Matrix 19 Hauptdiagonalelemente und 34 von null verschiedene Nebendiagonalelemente.

4.3.2 Knotenmodifikationsverfahren

Das basierend auf [21] entwickelte Knotenmodifikationsverfahren (KM-Verfahren) hat die Aufgabe, die zahlreichen Nebenbedingungen bei der Berechnung von DC-Nahverkehrsnetzen zu erfüllen, die aus den in Kap. 4.2 aufgeführten Spannungs- und Leistungsgrenzen der aktiven elektrischen Knoten resultieren. Hierbei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, das bei Bedarf bestimmte P- in U- bzw. U- in P-Knoten in mehreren äußeren und inneren Schleifendurchläufen umwandelt. Nach jeder Knotenumwandlung kommt das NR-Verfahren (Kap. 4.1.2) zur Lösung des EFP erneut zum Einsatz. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis die U- bzw. P-Kriterien für alle elektrischen Knoten erfüllt werden.

In jedem einzelnen Simulationszeitschritt wird die G-Matrix von Grund auf neu erstellt (Kap. 4.3.1) und alle elektrischen Knoten, abgesehen von den Nullknoten, in ihren standardmäßigen Knotenzustand versetzt. Die Iterationsvariable χ des KM-Verfahrens wird auf eins gesetzt und bei jeder Durchführung des NR-Verfahrens um eins erhöht.

In Abb. 4.17 ist das Ablaufdiagramm für das KM-Verfahren abgebildet. Darin erkennbar sind drei Schleifenpunkte:

- A-Schleife: Netzüberlastung
- B-Schleife: Knotenumwandlung
- C-Schleife: Knotenzwangsumwandlung

Um Endlosschleifen bei unlösbaren EFP zu verhindern, wird das KM-Verfahren bei Überschreitung der definierten Anzahl an maximalen Iterationen χ_{max} (Tab. 4.8) abgebrochen.

Die beschrifteten Quadrate in Abb. 4.17 markieren die fünf möglichen Abbruchfälle A, B1, B2, C1, C2, C3 in den einzelnen Schleifendurchläufen. Sobald einer dieser Fälle eintritt, ist es nicht möglich, das KM-Verfahren für den momentanen Simulationszeitschritt erfolgreich zu beenden. Daraufhin werden die Knotenspannungen und Knotenleistungen von allen elektrischen Knoten auf null gesetzt: $U_k = 0 V$ und $P_k = 0 W$. Zudem werden alle Abbruchfälle in einer Protokolldatei vermerkt.

4.3.2.1 Netzüberlastung (A-Schleife)

Im ersten Iterationsschritt ($\chi = 1$) wird das EFP zunächst ohne Berücksichtigung der Nebenbedingungen gelöst. Bei einer Netzüberlastung ist das EFP mit den Vorgabewerten aufgrund zu kleiner Speisespannungen der U-Knoten, zu hoher Leistungsanforderungen der P-Knoten oder nicht ausreichender G-Werte der elektrischen Leitungen nicht lösbar. In diesem Fall ist es erforderlich, die Knotenleistungen der Fahrzeug- und Anlagenknoten zu reduzieren. Dazu müssen die P-Knoten identifiziert werden, die aufgrund einer zu hohen positiven oder negativen Leistung das Netz überlasten. Da sich diese Identifizierung allerdings in keinem verhältnismäßigen Aufwand realisieren lässt, werden zur Vereinfachung die Knotenleistungen aller P-Knoten reduziert. Hierfür wird ein sogenannter Knotenleistungsfaktor f_P (P-Faktor) eingeführt, der zu Beginn $f_P = 1,0$ (100 %) beträgt. Mit den beiden Parametern:

- Reduzierungsschrittweite des P-Faktors $\Delta f_P = 0,05$ (5 %)
- Untere Grenze des P-Faktors $f_{P,min} = 0,5$ (50 %)

wird f_P in jedem Durchlauf der A-Schleife schrittweise um Δf_P verringert. Der Iterationsschritt der A-Schleife wird durch den Index (χ_A) angegeben:

$$f_{P(\chi_{A+1})} = f_{P(\chi_A)} - \Delta f_P \quad (4.74)$$

Daraufhin werden die Knotenleistungen der P-Knoten reduziert auf:

$$P_{k(\chi_{A+1})}^* = \frac{f_{P(\chi_{A+1})}}{f_{P(\chi_A)}} \cdot P_{k(\chi_A)}^* \quad (4.75)$$

Die A-Schleife wird wiederholt, solange das EFP nicht gelöst werden kann. Nach unten ist der P-Faktor durch $f_{P,min}$ begrenzt. Bei einer Reduzierung des P-Faktors um jeweils 5 % ist nach maximal 10 Wiederholungen der A-Schleife keine weitere Reduzierung der Knotenleistungen mehr möglich. In diesem Fall gilt das EFP als unlösbar und der Abbruchfall (A) tritt ein. Andernfalls kann die A-Schleife erfolgreich durchlaufen werden. Jeder Netzüberlastungsfall wird zusammen mit dem P-Faktor, der letztendlich zu einem lösbaren EFP geführt hat, in der Protokolldatei dokumentiert.

4.3.2.2 Knotenumwandlung (B-Schleife)

Nachdem das EFP im ersten Iterationsschritt ohne Berücksichtigung der Nebenbedingungen gelöst wurde, werden die U- bzw. P-Kriterien von allen aktiven elektrischen Knoten überprüft. Nullknoten, temporär auf null gesetzte U-Knoten und passive elektrische Knoten müssen nicht überprüft werden, da ihre U- und P-Kriterien jederzeit erfüllt sind. Die B-Schleife muss durchlaufen werden, wenn nicht alle Nebenbedingungen erfüllt sind, d. h. wenn mindestens einer der folgenden beiden Fälle eintritt:

- Verletzung des U-Kriteriums bei mindestens einem P-Knoten
- Verletzung des P-Kriteriums bei mindestens einem U-Knoten

Andernfalls kann das KM-Verfahren für diesen Simulationszeitschritt beendet werden.

Aufgabe der B-Schleife ist, bestimmte Knoten so umzuwandeln, dass letztendlich alle Nebenbedingungen eingehalten werden. Das U-Kriterium wird vor dem P-Kriterium untersucht [67]. Sind nicht alle U-Kriterien der P-Knoten erfüllt, werden diese Knoten absteigend nach dem Betrag der Spannungsabweichung ΔU_k :

$$\Delta U_k = \begin{cases} U_k - U_{k,min} & \text{falls } U_k < U_{k,min} \\ U_k - U_{k,max} & \text{falls } U_k > U_{k,max} \end{cases} \quad (4.76)$$

von der Knotenspannungsgrenze $U_{k,min}$ bzw. $U_{k,max}$ sortiert. Daraufhin werden diese P-Knoten nach den in den Kap. 4.2.2 bis Kap. 4.2.5 beschriebenen Abläufen in U-Knoten umgewandelt. Führt die Erhöhung der

Iterationsvariablen χ zu einer Endlosschleife, tritt der Abbruchsfall (B1) ein. Andernfalls wird das NR-Verfahren ausgeführt. Ist das EFP lösbar, wird das KM-Verfahren am Startpunkt der B-Schleife fortgesetzt. Falls nicht, kommt es zum Abbruchsfall (B2).

Sind alle U-Kriterien der P-Knoten erfüllt, aber nicht alle P-Kriterien der U-Knoten, werden letztere absteigend nach dem Betrag der Leistungsabweichung ΔP_k :

$$\Delta P_k = \begin{cases} P_k - P_{k,min} & \text{falls } P_k < 0 \\ P_k - P_{k,max} & \text{falls } P_k > 0 \end{cases} \quad (4.77)$$

von der Knotenleistungsgrenze $P_{k,min}$ bzw. $P_{k,max}$ sortiert. Anschließend wird nur der U-Knoten in einen P-Knoten umgewandelt, dessen betragsmäßige Leistungsabweichung am größten ist. Daraufhin wird das NR-Verfahren ausgeführt, sofern die um eins erhöhte Iterationsvariable χ nicht zum Abbruchsfall (C1) infolge einer Endlosschleife führt. Ist das EFP mit dem NR-Verfahren unlösbar, muss eine Knotenzwangsumwandlung mit der C-Schleife durchgeführt werden. Andernfalls wird das KM-Verfahren am Startpunkt der B-Schleife weitergeführt.

4.3.2.3 Knotenzwangsumwandlung (C-Schleife)

Die C-Schleife ist eine innere Schleife, die innerhalb der B-Schleife aufgerufen wird. Die C-Schleife muss durchlaufen werden, falls sich nach der Umwandlung eines U-Knotens in einen P-Knoten anschließend zu wenige U-Knoten im Netzwerk befinden. In diesem Fall muss ein anderer P-Knoten in einen U-Knoten zwangsumgewandelt werden. Als P-Knoten kommen hierfür nur Fahrzeug- und Anlagenknoten infrage. Die Herausforderung besteht darin, den richtigen P-Knoten zu finden. Dazu werden vor dem Durchlauf der C-Schleife zunächst alle P-Knoten aufsteigend nach ihrer Knotenspannung sortiert. Daraufhin beginnt die C-Schleife. In Abhängigkeit vom Vorzeichen der Leistungsabweichung ΔP_k bei der letzten Knotenumwandlung in der B-Schleife wird eine der folgenden beiden Zwangsumwandlungen durchgeführt:

- $\Delta P_k < 0$: Fz bzw. Al mit kleinster U_k in unteren U-Knoten
- $\Delta P_k > 0$: Fz bzw. Al mit größter U_k in oberen U-Knoten

Ist die Knotenzwangsumwandlung erfolgreich, wird die Iterationsvariable χ ein weiteres Mal erhöht. Daraufhin folgt das NR-Verfahren, sofern nicht aufgrund einer Endlosschleife der Abbruchsfall (C2) eingeleitet wird. Kann das EFP gelöst werden, wird das KM-Verfahren am Startpunkt der B-Schleife fortgesetzt. Andernfalls kommt es zu einem Widerruf der Knotenzwangsumwandlung, da der falsche Knoten umgewandelt wurde. Anschließend geht es zurück zum Startpunkt der C-Schleife. Daraufhin wird der P-Knoten (Fahrzeug- bzw. Anlagenknoten) mit der zweitkleinsten bzw. zweitgrößten Knotenspannung für die Knotenzwangsumwandlung ausgewählt und die C-Schleife erneut durchlaufen. Kann keine Knotenzwangsumwandlung mehr durchgeführt werden, tritt der Abbruchsfall (C3) ein.

Kommt es während des KM-Verfahrens zu keinem Abbruchsfall, konnte das EFP unter Einhaltung aller Nebenbedingungen gelöst werden. Zum Schluss sind noch die ohmschen Leitungsverluste im DC-Netz für den momentanen Simulationszeitschritt nach Formel (4.43) zu ermitteln.

4.4 Energiebilanz

Die Aufstellung der Energiebilanz beruht auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Demzufolge ändert sich die Energie eines Systems nur durch die Ein- und Ausfuhr von Energie über die Systemgrenzen [63].

Die Energiebilanz wird am Ende der Simulation aufgestellt. Dazu werden alle systembezogenen Energieflüsse für:

- alle $t = t_{anf}, \dots, t_{end}$ Simulationszeitschritte
- alle $k = 1, \dots, n$ Netzwerkkomponenten

zur folgenden Energieflussgröße E_{Σ} aufsummiert:

$$E_{\Sigma} = \sum_{t=t_{anf}}^{t_{end}} \sum_{k=1}^n (P_k(t) \cdot \Delta t) \tag{4.78}$$

Im Folgenden werden aufsummierte Energieflussgrößen durch ein Summenzeichen im Index des Formelzeichens gekennzeichnet.

4.4.1 Systembilanz

In Abb. 4.18 werden alle systembezogenen Energieflussgrößen dargestellt.

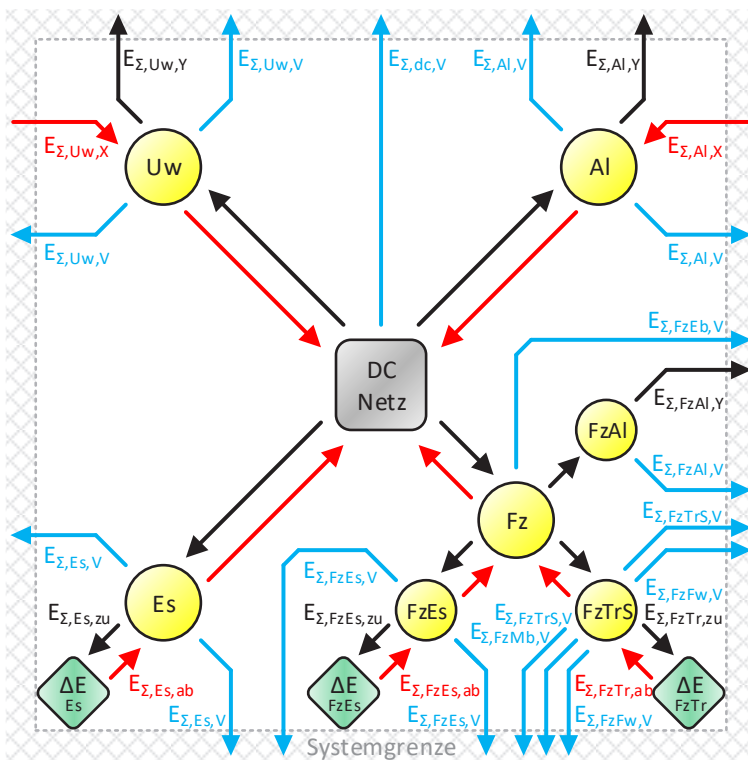


Abb. 4.18: Energiebilanz für das Nahverkehrssystem

Diese Energieflussgrößen setzen sich, geordnet nach den einzelnen Netzwerkkomponenten, zusammen aus:

- n_{Uw} Unterwerke (Uw):
 - Unterwerkseinspeiseenergie $E_{\Sigma,Uw,X}$
 - Unterwerksrückspeiseenergie $E_{\Sigma,Uw,Y}$
 - Unterwerksverlustenergie $E_{\Sigma,Uw,V}$
- n_{Es} Speicher (Es):
 - Stationäre Speicherladeenergie $E_{\Sigma,Es,zu}$
 - Stationäre Speicherentladeenergie $E_{\Sigma,Es,ab}$
 - Stationäre Speicherverlustenergie $E_{\Sigma,Es,V}$
- n_{Al} Anlagen (Al):
 - Anlagenerzeugerenergie $E_{\Sigma,Al,X}$
 - Anlagenverbraucherenergie $E_{\Sigma,Al,Y}$
 - Anlagenverlustenergie $E_{\Sigma,Al,V}$
- n_{Fz} Fahrzeuge (Fz):
 - Bewegungs-/Lageakkumulationsenergie $E_{\Sigma,FzTr,zu}$
 - Bewegungs-/Lagerekuperationsenergie $E_{\Sigma,FzTr,ab}$
 - Traktionssystemverlustenergie $E_{\Sigma,FzTrS,V}$
 - Fahrwiderstandsverlustenergie $E_{\Sigma,FzFw,V}$
 - Reibungsbremsverlustenergie $E_{\Sigma,FzMb,V}$
 - Widerstandsbremsverlustenergie $E_{\Sigma,FzEb,V}$
 - Hilfsbetriebeverbraucherenergie $E_{\Sigma,FzAl,Y}$
 - Hilfsbetriebeverlustenergie $E_{\Sigma,FzAl,V}$
 - Mobile Speicherladeenergie $E_{\Sigma,FzEs,zu}$
 - Mobile Speicherentladeenergie $E_{\Sigma,FzEs,ab}$
 - Mobile Speicherverlustenergie $E_{\Sigma,FzEs,V}$
- DC-Netz:
 - Netzverlustenergie $E_{\Sigma,dc,V}$

Die systembezogenen Energieflussgrößen haben auf das System nach Abb. 4.2 eine der folgenden beiden Auswirkungen:

- Energieaustausch mit der Systemumgebung (Indizes: X, Y, V)
- Energieänderung innerhalb des Systems (Indizes: zu, ab)

Fasst man die systembezogenen Energieflussgrößen indexbezogen zusammen, lautet die Energiebilanz für das System:

$$E_{\Sigma, Sys, X} + E_{\Sigma, Sys, Y} + E_{\Sigma, Sys, V} + E_{\Sigma, Sys, zu} + E_{\Sigma, Sys, ab} = 0 \quad (4.79)$$

Die zusammengefassten Energieflussgrößen der Netzwerkkomponenten werden im Kap. 4.4.1.1 und im Kap. 4.4.1.2 näher beschrieben.

4.4.1.1 Energieaustausch mit der Systemumgebung

Die Energieflussgrößen, die innerhalb der Simulationsdauer die Systemgrenze überquert und damit einen Austausch mit der Systemumgebung ermöglicht haben, lassen sich zur negativen Systemeinfuhrenergie $E_{\Sigma, Sys, X}$:

$$E_{\Sigma, Sys, X} = E_{\Sigma, Uw, X} + E_{\Sigma, Al, X} \quad (4.80)$$

zur positiven Systemausfuerenergie $E_{\Sigma, Sys, Y}$:

$$E_{\Sigma, Sys, Y} = E_{\Sigma, Uw, Y} + E_{\Sigma, Al, Y} + E_{\Sigma, FzAl, Y} \quad (4.81)$$

und zur positiven Systemverlustenergie $E_{\Sigma, Sys, V}$:

$$\begin{aligned} E_{\Sigma, Sys, V} = & E_{\Sigma, dc, V} + \\ & E_{\Sigma, Uw, V} + E_{\Sigma, Al, V} + E_{\Sigma, Es, V} + \\ & E_{\Sigma, FzTrs, V} + E_{\Sigma, FzFw, V} + E_{\Sigma, FzMb, V} + E_{\Sigma, FzEb, V} + \\ & E_{\Sigma, FzAl, V} + E_{\Sigma, FzEs, V} \end{aligned} \quad (4.82)$$

zusammenfassen.

4.4.1.2 Energieänderung innerhalb des Systems

Die Energieflussgrößen, die innerhalb der Simulationsdauer die Systemenergie erhöht oder verringert haben, werden zur positiven Systemzunahmeenergie $E_{\Sigma, Sys, zu}$:

$$E_{\Sigma, Sys, zu} = E_{\Sigma, Es, zu} + E_{\Sigma, FzEs, zu} + E_{\Sigma, FzTr, zu} \quad (4.83)$$

und zur negativen Systemabnahmeenergie $E_{\Sigma, Sys, ab}$:

$$E_{\Sigma, Sys, ab} = E_{\Sigma, Es, ab} + E_{\Sigma, FzEs, ab} + E_{\Sigma, FzTr, ab} \quad (4.84)$$

zusammengefasst.

Die Abweichung der Speicher- und Fahrzeugenergie ΔE_{Es} , ΔE_{FzEs} und ΔE_{FzTr} zwischen dem Anfangszeitpunkt $t = t_{anf}$ und dem Endzeitpunkt $t = t_{end}$ der Simulation lässt sich bestimmen durch:

$$\begin{aligned} \Delta E_{Es} &= E_{\Sigma, Es, zu} + E_{\Sigma, Es, ab} \\ \Delta E_{FzEs} &= E_{\Sigma, FzEs, zu} + E_{\Sigma, FzEs, ab} \\ \Delta E_{FzTr} &= E_{\Sigma, FzTr, zu} + E_{\Sigma, FzTr, ab} \end{aligned} \quad (4.85)$$

In Summe beträgt die Abweichung der Systemenergie ΔE_{Sys} :

$$\Delta E_{Sys} = E_{\Sigma, Sys, zu} + E_{\Sigma, Sys, ab} \quad (4.86)$$

Alternativ lässt sich ΔE_{Sys} mit der nach Formel (4.41) berechneten momentanen Systemenergie $E_{Sys}(t)$ bestimmen. Dazu wird die noch zum Simulationsende vorhandene Systemenergie von der bereits am Simulationsanfang vorhandenen Systemenergie subtrahiert:

$$\Delta E_{Sys} = E_{Sys}(t_{end}) - E_{Sys}(t_{anf}) \quad (4.87)$$

Anhand der beiden Formeln (4.86) und (4.87) lässt sich überprüfen, ob am Ende die in jedem Simulationszeitschritt durchgeführten sukzessiven Energieänderungen mit den aufsummierten Zunahme- und Abnahmeenergieflussgrößen übereinstimmen.

4.4.2 Fahrzeugbilanz

Die Fahrzeuge haben als standardmäßig aktive P-Knoten den größten Einfluss auf die Energiebilanz. In [54] werden Bewertungskriterien in Form von system- und fahrzeugbezogenen Bilanzgrößen vorgestellt, mit denen die Rückspeisefähigkeit von Triebfahrzeugen beurteilt werden kann.

In Abb. 4.19 ist der Kreislauf der Energieflussgrößen zwischen den Unterwerken und den Fahrzeugen schematisch abgebildet.

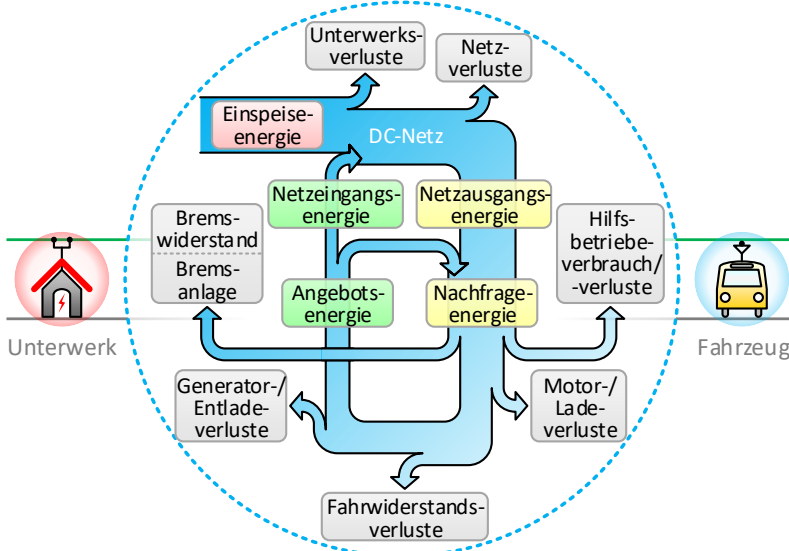


Abb. 4.19: Energiekreislauf

Für die Fahrzeugbilanz sind zum einen die folgenden netzbezogenen bzw. fahrzeugexternen Energieflussgrößen relevant:

- Fahrzeugnetzausgangsenergie $E_{\Sigma, FzDc, aus}$ (positiv)
- Fahrzeugnetzeingangsenergie $E_{\Sigma, FzDc, ein}$ (negativ)

Diese beiden Energieflussgrößen werden mit den jeweiligen Netzausgangsleistungen $P_{FzDc, aus}$ und Netzeingangsleistungen $P_{FzDc, ein}$ der Fahrzeuge nach Formel (4.78) berechnet.

Zum anderen sind die folgenden fahrzeuginternen bzw. systembezogenen Energieflussgrößen relevant:

- Fahrzeugnachfrageenergie $E_{\Sigma,Fz,pos}$ (positiv)
- Fahrzeugangebotsenergie $E_{\Sigma,Fz,neg}$ (negativ)

$E_{\Sigma,Fz,pos}$ und $E_{\Sigma,Fz,neg}$ lassen sich berechnen durch:

$$\begin{aligned}
 E_{\Sigma,Fz,pos} = & E_{\Sigma,FzTr,zu} + E_{\Sigma,FzTr,S,V} + E_{\Sigma,FzFw,V} + \\
 & E_{\Sigma,FzMb,V} + E_{\Sigma,FzEb,V} + \\
 & E_{\Sigma,FzAl,Y} + E_{\Sigma,FzAl,V} + \\
 & E_{\Sigma,FzEs,zu} + E_{\Sigma,FzEs,V}
 \end{aligned} \tag{4.88}$$

bzw.:

$$E_{\Sigma,Fz,neg} = E_{\Sigma,FzTr,ab} + E_{\Sigma,FzEs,ab} \tag{4.89}$$

Für die Energiebilanz der Fahrzeuge gilt, dass die Abweichung zwischen der aus dem DC-Netz aufgenommenen und der an das DC-Netz abgegebenen Energie identisch mit der Abweichung zwischen der nachgefragten und angebotenen Energie sein muss:

$$E_{\Sigma,FzDc,aus} - |E_{\Sigma,FzDc,ein}| = E_{\Sigma,Fz,pos} - |E_{\Sigma,Fz,neg}| \tag{4.90}$$

4.4.2.1 Fahrzeugnetzzurückspeisegrad

Der Fahrzeugnetzzurückspeisegrad $\lambda_{FzDc,ein/aus}$ gibt an, welchen Anteil die Fahrzeuge über den gesamten Simulationsablauf wieder an das DC-Netz zurückspeisen. Er ergibt sich aus folgendem Verhältnis:

$$\lambda_{FzDc,ein/aus} = \left| \frac{E_{\Sigma,FzDc,ein}}{E_{\Sigma,FzDc,aus}} \right| \tag{4.91}$$

In Formel (4.91) müssen zwei Sonderfälle beachtet werden:

- ($E_{\Sigma,FzDc,aus} = 0$) \wedge ($E_{\Sigma,FzDc,ein} = 0$):
Der Netzzurückspeisegrad ist null.
- ($E_{\Sigma,FzDc,aus} = 0$) \wedge ($E_{\Sigma,FzDc,ein} \neq 0$):
Der Netzzurückspeisegrad geht gegen unendlich.

Der zweite Fall tritt nur in Ausnahmefällen ein, da in der Regel gilt: $E_{\Sigma,FzDc,aus} > |E_{\Sigma,FzDc,ein}|$. Der Ausnahmefall ist möglich, wenn die Fahrzeuge zum Anfangszeitpunkt der Simulation über ausreichend eigene kinetische oder potenzielle Energie E_{FzTr} bzw. Speicherenergie E_{FzEs} verfügen, um damit bis zum Simulationsende ihre gesamte Nachfrage decken zu können, ohne Energie aus dem DC-Netz aufnehmen zu müssen.

Mit dem NetZRückspeisegrad werden nur die fahrzeugexternen Energieflussgrößen zwischen den Fahrzeugen und dem DC-Netz berücksichtigt. Je kleiner $\lambda_{FzDc,ein/aus}$ ist, desto stärker weicht die negative von der positiven Netzbelastung ab. Für die fahrzeuginternen Energieflussgrößen wird als zweite Bilanzkennzahl der Rekuperationsgrad definiert.

4.4.2.2 Fahrzeugrekuperationsgrad

Der Fahrzeugrekuperationsgrad $\lambda_{Fz,neg/pos}$ gibt Auskunft darüber, welcher Anteil der von den Fahrzeugen nachgefragten Energie aus der kinetischen, potenziellen oder gespeicherten Energie theoretisch, d. h. vor allen Verlusten, zurückgewonnen werden kann. Er bildet sich aus folgendem Verhältnis:

$$\lambda_{Fz,neg/pos} = \frac{|E_{\Sigma,Fz,neg}|}{|E_{\Sigma,Fz,pos}|} \quad (4.92)$$

Für Formel (4.92) müssen die gleichen Sonderfälle wie für Formel (4.91) beachtet werden.

Die zur Verfügung stehende Fahrzeugangebotsenergie teilt sich in die folgenden Energieflüsse auf:

- fahrzeugintern: Eigenbedarf $(E_{\Sigma,Fz,eig})$
 Bremswiderstand $(E_{\Sigma,FzEb,V})$
 Bremsanlage $(E_{\Sigma,FzMb,V})$
- fahrzeugextern: NetZRückspeisung $(E_{\Sigma,FzDc,ein})$

Der fahrzeuginterne Energiefluss $E_{\Sigma,Fz,intern}$ wird in Abb. 4.19 durch den mittig platzierten und nach rechts unten zeigenden Pfeil dargestellt. Er stellt den Anteil der rekuperierten Energie dar, der im Fahrzeug verbleibt. Anders

ausgedrückt handelt es sich bei $E_{\Sigma,Fz,intern}$ um den Anteil der Fahrzeugnachfrageenergie $E_{\Sigma,Fz,pos}$, der nicht aus dem DC-Netz aufgenommen werden muss bzw. um den Anteil der Fahrzeugangebotsenergie $E_{\Sigma,Fz,neg}$, der nicht an das DC-Netz abgegeben wird:

$$\begin{aligned} E_{\Sigma,Fz,intern} &= E_{\Sigma,FzDc,aus} - E_{\Sigma,Fz,pos} \\ &= E_{\Sigma,Fz,neg} - E_{\Sigma,FzDc,ein} \end{aligned} \quad (4.93)$$

$E_{\Sigma,Fz,intern}$ wird als negierte Summe aus den folgenden drei Energieflussgrößen berechnet:

$$E_{\Sigma,Fz,intern} = -(E_{\Sigma,Fz,eig} + E_{\Sigma,FzEb,V} + E_{\Sigma,FzMb,V}) \quad (4.94)$$

Durch Umstellung der Gleichung (4.94) lässt sich $E_{\Sigma,Fz,eig}$ ermitteln. Der Eigenbedarf setzt sich aus den übrigen Fahrzeugenergiekomponenten zusammen, wie beispielsweise aus der Hilfsbetriebeverbraucher- und Speicherladeenergie, sowie aus den Verlusten im Traktionssystem oder aufgrund des Fahrwiderstands.

Ein hoher Eigenbedarf führt zu einem großen fahrzeuginternen Energiefluss und verringert die an das DC-Netz abgegebene Energie, selbst wenn das DC-Netz hierfür aufnahmefähig wäre. Ein hoher Eigenbedarf tritt bei einem großen Hilfsbetriebeauslastungsgrad oder bei einem mitgeführten Speicher auf. Je größer der fahrzeuginterne Energiefluss ist, desto weniger Energie muss aus dem DC-Netz aufgenommen werden.

5 Simulationsergebnisse

Das entwickelte und in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Simulationsprogramm „BSTsim“ wird am Beispiel des Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetzes angewendet. In diesem Kapitel werden zunächst das aufgebaute Netz und die simulierten Betriebsszenarien beschrieben. Anschließend folgt die Darstellung und Analyse der berechneten Simulationsergebnisse.

Für die Datenausgabe speichert das Simulationsprogramm alle relevanten Ergebnisse in einer in die Anwendung eingebetteten SQL-Datenbank ab. Dazu wird für jedes Simulationsobjekt eine Tabelle angelegt, in der für jeden Simulationszeitschritt eine neue Zeile hinzugefügt wird. In den Spalten werden die verschiedenen Fahrspiel- bzw. Energieflussgrößen aufgezeichnet. Die Anzahl der Spalten ist damit objektspezifisch. Alle aufgezeichneten Simulationen können schließlich im Programm mit einem einstellbaren Wiedergabetempo abgespielt werden.

5.1 Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetz

Für die Simulationsberechnungen wird das von der VBK und AVG gleichstrombetriebene Karlsruher Nahverkehrsnetz auf Grundlage der Daten von [36] [50] [94] so realitätsnah wie möglich abgebildet.

5.1.1 Netzbeschreibung

Das Karlsruher Netz ist in Abb. 5.1 dargestellt. Die Außenbereiche ab Leopoldshafen und Friedrichstal im Norden sowie ab Busenbach im Süden werden aufgrund der großen Netzausdehnung nicht mehr maßstabsgetreu abgebildet.

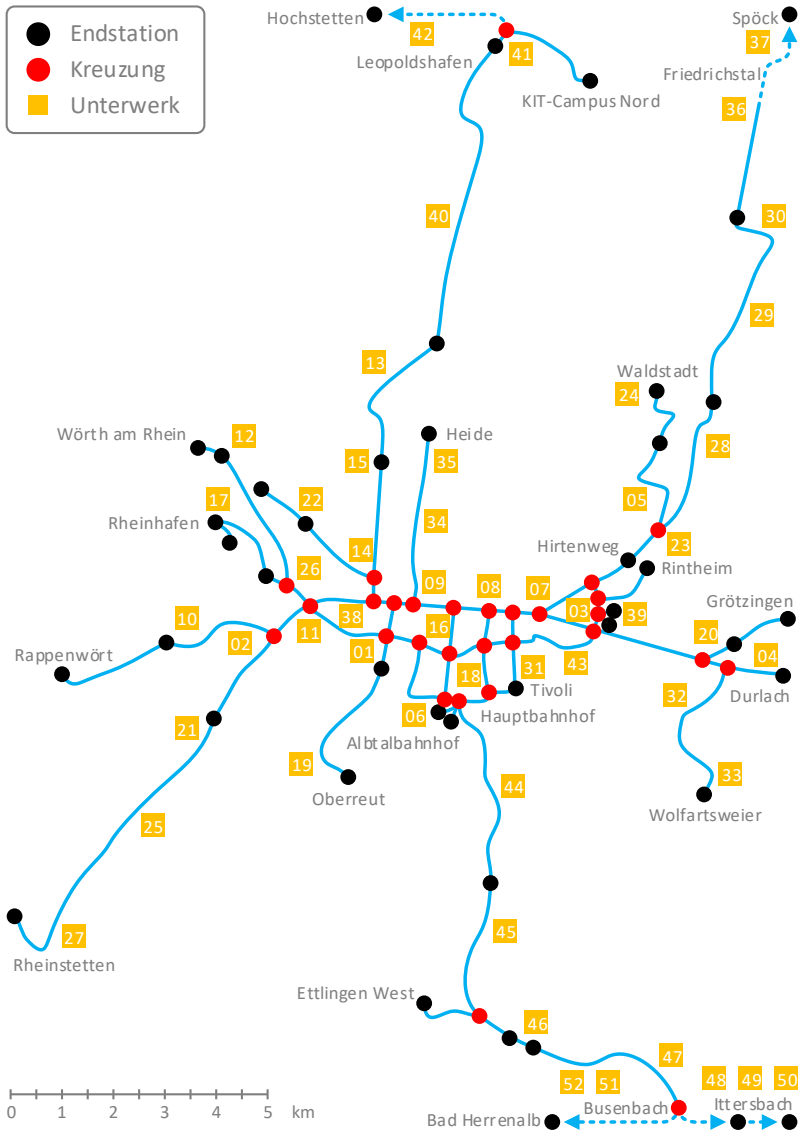


Abb. 5.1: Karlsruher Netz

5.1.1.1 Infrastruktur

Das Verkehrsnetz besteht aus den folgenden Verkehrsknoten:

- 4 Betriebshöfe
- 33 Wendeschleifen
- 5 Systemgrenzen
- 106 Kreuzungen

In Abb. 5.1 sind alle 42 Endstationen dargestellt. Von den Kreuzungen sind nur die Richtungswechselkreuzungen eingezeichnet, die eine Verzweigung in zwei oder drei Richtungen ermöglichen. Aus Übersichtsgründen wurde in der Abbildung auf die Wendeschleifen- und Gleisänderungskreuzungen verzichtet. Erstere ermöglichen den Abzweig zur Wendeschleife und letztere den Wechsel von Zwei- auf Ein- oder Viergleisigkeit. Auf der Linie S1/S11 nach Bad Herrenalb, Ittersbach und Hochstetten sowie auf der Linie S2 nach Spöck und Rheinstetten existieren mehrere längere eingleisige Streckenabschnitte. Am Hauptbahnhof ist ein kurzer viergleisiger Streckenabschnitt vorzufinden.

Die 148 Verkehrsknoten besitzen 314 Knotentore, die durch 386 Verkehrskanten verbunden sind. Auf ihnen befinden sich 136 Kantenpunkte, 687 Fahrbahnen und folgende Streckenprofilelemente:

- 210 Haltestellen
- 275 Signale mit 334 Signallichtern
- 359 Geschwindigkeitsprofilinien
- 91 Steigungsprofilinien
- 298 Kurvenprofilinien

Jede Haltestelle besitzt in Abhängigkeit von der Gleisbelegung ein bis vier Haltepunkte. Die Signale werden bezüglich der Signalsperrzeiten mit Erwartungswerten zwischen 5 s und 40 s sowie unterschiedlichen Standardabweichungen in sechs Kategorien eingeteilt. Die Dauer der Signalsperrzeiten ist an den Hauptverkehrskreuzungen sowie zu den Hauptverkehrszeiten am längsten.

Das Geschwindigkeitslimit liegt im Innenstadtbereich und in geschlossenen Ortschaften bei 50 km/h. In Kreuzungen, Fußgängerzonen, Betriebshöfen und

Wendeschleifen sowie auf eingleisigen Fahrstrecken beträgt es 30 km/h und in engen Kurven 15 km/h. Im außerstädtischen Bereich existiert in der Regel kein Tempolimit. Ausnahme bilden die eingleisigen Fahrstrecken auf der Linie S1/S11 nach Bad Herrenalb und Ittersbach, auf denen eine Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h zulässig ist.

Karlsruhe liegt in der Oberrheinischen Tiefebene auf einer durchschnittlichen Höhe von 115 m über dem Meeresspiegel. Aufgrund des Flachlands sind die Höhenunterschiede im Streckennetz gering. Kurze Steigungsabschnitte mit bis zu $\pm 40\%$ sind vor allem bei Brücken und Unterführungen vorzufinden. Eine Ausnahme bildet die Linie S1/S11 ab dem Albtalbahnhof, die nach Bad Herrenalb bzw. Ittersbach in den Nordschwarzwald führt. In Abb. 5.2 ist das Höhenprofil dieser Fahrstrecke abgebildet.

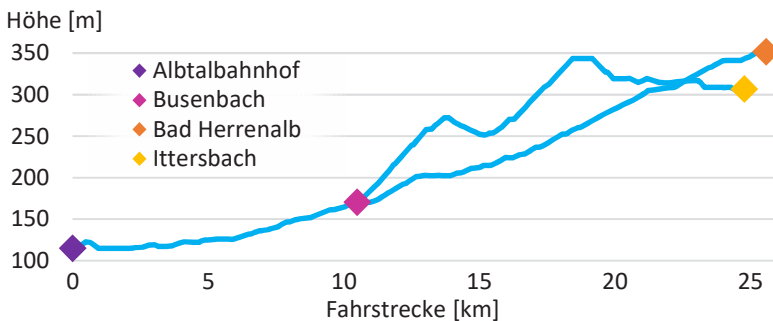


Abb. 5.2: Höhenprofil eines Streckenabschnitts der Linie S1/S11

Die kurvigen Streckenabschnitte werden in Bezug auf ihre Bogenradien in vier Kategorien zwischen 50 m und 200 m eingeteilt.

Das Versorgungsnetz besteht aus 445 elektrischen Knoten und 573 elektrischen Leitern. Das elektrische Netz ist vollständig durchgekuppelt und wird über 52 Gleichrichter-Unterwerke aus dem 20 kV-Netz der Stadtwerke Karlsruhe GmbH bzw. der EnBW AG gespeist. Die Standorte der Unterwerke und ihrer Leerlaufspannungen sind der Abb. 5.1 bzw. der Tab. 5.1 zu entnehmen. Die Unterwerke sind über 67 Speisekabel mit 69 Fahrleitungsknoten verbunden. Zur Verringerung der Knotenzahl werden nahe

beieinanderliegende Fahrleitungsknoten zusammengefasst. Für die Fahrleitungen stehen 15 definierte Leitungsarten zur Auswahl.

Tab. 5.1: Unterwerke und Leerlaufspannungen (vgl. [36])

01 Weinbrennerplatz	840 V	27 Mörsch Merkurstraße	850 V
02 Silcherstraße	800 V	28 DB-Brücke	850 V
03 Betriebshof Ost	850 V	29 Tolna-Platz	840 V
04 Durlach Wasserwerk	760 V	30 Blankenloch Nord	840 V
05 Eichbäumle	760 V	31 Tivoli	790 V
06 Albtalbahnhof	800 V	32 Ellmendinger Straße	800 V
07 Durlacher Tor	850 V	33 Wolfartsweier Nord	850 V
08 Marktplatz	830 V	34 Erzbergerstraße	850 V
09 Rathaus West	830 V	35 Eislaufhalle	860 V
10 Hammweg	800 V	36 Friedrichstal Kreisstraße	830 V
11 Staudingerstraße	790 V	37 Friedrichstal Rheinstraße	830 V
12 Rheinbergstraße	800 V	38 Kühler Krug	–
13 Neureut Mittelortstraße	800 V	39 Betriebshof Gerwigstraße	840 V
14 Blücherstraße	850 V	40 Eggenstein	800 V
15 Haus Bethlehem	820 V	41 Linkenheim Süd	830 V
16 Europaplatz/Postgalerie	830 V	42 Linkenheim Nord	830 V
17 Betriebshof West	840 V	43 Südost-Bahn	830 V
18 Zoo	840 V	44 Rüppurr	820 V
19 Oberreut	820 V	45 Seehof	820 V
20 Durlach Bahnhof	850 V	46 Ettlingen	845 V
21 Rheinstrandsiedlung	820 V	47 Busenbach	870 V
22 Neureuter Straße	850 V	48 Reichenbach	820 V
23 Hirtenweg	850 V	49 Hamberg	830 V
24 Europäische Schule	800 V	50 Ittersbach	820 V
25 Forchheim Hallenbad	800 V	51 Fischweier	790 V
26 Mühlburg Bahnhof	850 V	52 Frauenalb	840 V

Zusätzliche elektrische Verbraucher in Form von Anlagenknoten für z. B. Bahnsteigbeleuchtungen oder Weichenheizungen werden vernachlässigt.

5.1.1.2 Fahrer und Fahrzeuge

Für die Simulation werden drei Fahrertypen erstellt, denen folgende Auswahlwahrscheinlichkeiten als relative Häufigkeiten zugewiesen werden:

- Defensiver Fahrertyp (1/4)
- Normaler Fahrertyp (1/2)
- Aggressiver Fahrertyp (1/4)

Im Schienenverkehr ist die Vielfalt der Fahrertypen bezüglich des Fahrstils im Gegensatz zum Straßenverkehr geringer, da es sich bei den Fahrern ausschließlich um Berufsfahrer handelt. Im Vergleich zum normalen Fahrertyp wird beim defensiven bzw. aggressiven Fahrer eine um $0,2 \text{ m/s}^2$ niedrigere bzw. höhere Wunschbeschleunigung festgelegt. Außerdem unterscheiden sich die drei definierten Fahrertypen hinsichtlich der im Fahrermodell (Kap. 3.3) beschriebenen Folgeabstände sowie beim Verspätungs- und Ausrollverhalten. In der Fahrzeugflotte eines Verkehrsbetreibers gibt es unter den einzelnen Fahrzeugen in Bezug auf ihre fahrdynamischen Eigenschaften nur geringfügige Unterschiede. Daher werden für die Simulationen im Karlsruher Netz zur Vereinfachung nur zwei Fahrzeugtypen mit folgendem Leergewicht und folgender Höchstgeschwindigkeit definiert:

- GT6-70D/N (40 t, 70 km/h)
- GT8-80D/M (60 t, 80 km/h)

Die Parameter des Niederflurfahrzeugs GT6-70D/N sind im Fahrzeugmodell (Kap. 3.4) vorzufinden.

Wie im Kap. 2.4.1.4 erwähnt, wurde die Funktion zur Bildung von Fahrzeugverbänden im Simulationsprogramm nicht realisiert.

5.1.1.3 Betrieb

Das Liniennetz der VBK/AVG ist in Abb. 5.3 schematisch dargestellt.

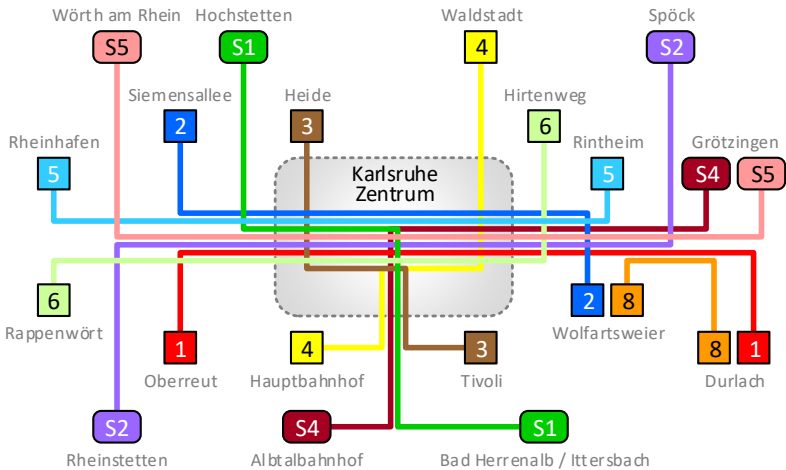


Abb. 5.3: VBK-/AVG-Liniennetz

Die Linien werden in die folgenden sieben Straßenbahnlinien:

- 1 Durlach – Oberreut
- 2 Wolfartsweier – Siemensallee
- 3 Tivoli – Heide
- 4 Waldstadt – Hauptbahnhof
- 5 Rintheim – Rheinhafen
- 6 Hirtenweg – Daxlanden
- 8 Wolfartsweier – Durlach

und in die folgenden vier Stadtbahnlinien:

- S1/S11 Bad Herrenalb / Ittersbach – Hochstetten
- S2 Spöck – Rheinstetten
- S4/S41 Grötzingen – Albtalbahnhof
- S5/S51/S52 Grötzingen – Wörth am Rhein

untergliedert. Insgesamt verkehren im Karlsruher Gleichstromnetz elf Linien. Für jede der elf Linien wird jeweils die erste und letzte Endstation angegeben.

Alle Linien führen durch das Karlsruher Zentrum. Die S4- und S5-Linien sind überregionale Stadtbahnlinien, die jeweils an einer Systemgrenze beginnen bzw. enden. Daher sind für diese Linien Zweisystemfahrzeuge erforderlich. Alle betrieblichen Daten beziehen sich auf die Kursbücher aus den Jahren 2010 und 2016. Infolge des in den letzten Jahren durchgeführten Großprojekts „Kombilösung“, bei dem ein Stadtbahntunnel unter der Kaiserstraße im Karlsruher Zentrum gegraben wird, müssen aufgrund der Baustellen die Linien 2, 5, S1/S11 und S4/S41 umgeleitet werden. Daher werden für diese Linien die älteren Kursbuchdaten verwendet. Die Linienparameter sind in der Tab. 5.2 aufgelistet.

Tab. 5.2: Linienparameter

Linie	Fahr- zeuge	Fahrplan- halte	Fahrplan- fahrten	Fahrplan- einträge	Strecke [km]	Betriebszeit [hh:mm]
1	10	26	206	5 254	2 387	04:42-01:19
2	14	41	202	8 282	3 585	04:48-01:34
3	7	16	203	3 248	1 395	04:50-01:25
4	10	24	204	4 896	2 194	04:42-01:26
5	9	22	198	4 356	1 802	05:05-01:29
6	12	27	200	5 140	2 508	04:46-01:27
8	3	12	68	782	307	07:23-19:35
S1	21	56	216	9 511	7 354	04:18-01:34
S2	18	47	204	8 212	5 050	04:30-01:35
S4	9	15	143	1 803	1 047	04:03-01:53
S5	12	22	201	4 422	2 546	04:40-01:37

Die Anzahl der Fahrzeuge bezieht sich auf die in der Simulation eingesetzten Fahrzeuge. In der Realität existieren mehr Fahrzeuge im Karlsruher Netz, von denen sich allerdings viele außerhalb der Systemgrenzen befinden. Da nur das Gleichstromnetz simuliert wird, ist es aus Rechenzeit- und Speicherplatzgründen sinnvoll, die Fahrzeuge vorzeitig wieder einzusetzen und auf diese Weise die Anzahl der Fahrzeuge zu reduzieren. Die Anzahl der Fahrplanhalte

bezieht sich auf eine Fahrtrichtung, während sich die Anzahl der Fahrplanfahrten und der Fahrplaneinträge aus beiden Fahrtrichtungen ergibt.

Bei den Simulationen wird jeweils ein Werktag (Schultag) simuliert, da das Fahrplanangebot an Wochenend- und Feiertagen eingeschränkt ist. Insgesamt werden 125 Fahrzeuge benötigt, die pro Tag 2 045 Nutzfahrten ausführen. Vor bzw. nach jeder Nutzfahrt ist in der Regel eine Einsetz- bzw. Aussetzfahrt erforderlich, so dass sich insgesamt 6 272 Umlaufplaneinträge ergeben. Zusätzliche Fahrten wie Betriebs- und Überführungsfahren werden vernachlässigt. Aus diesem Grund starten bzw. enden die Fahrzeuge morgens bzw. abends nicht an den Betriebshöfen, sondern an den Wendeschleifen oder Systemgrenzen, die der ersten bzw. letzten Haltestelle jeweils am nächsten liegen. Spezielle Fahraufträge wie Nachtfahrten (Nightliner), Eilfahrten oder die Fahrten der Linie S51 und S52 bleiben unberücksichtigt, da sie in unregelmäßigen Abständen oder in geringer Häufigkeit auftreten.

Die 55 906 Fahrplaneinträge entsprechen der täglichen Anzahl der fahrplanmäßigen Halte. Diese Zahl gibt die Häufigkeit der Anfahr- und Bremsvorgänge an, die die Fahrzeuge allein aufgrund der Haltestellen durchführen müssen. In Summe legen die Fahrzeuge eine Gesamtstrecke von 30 175 km pro Tag zurück.

Um möglichst alle betrieblichen Vorgänge abzubilden, werden folgende Simulationsparameter eingestellt:

- Simulationsanfang: 04:00 Uhr morgens
- Simulationsende: 02:00 Uhr nachts
- Zeitschrittweite: 0,5 s

Der Simulationszeitraum von 22 h führt bei der gewählten Zeitschrittweite nach Formel (3.1) aus Kap. 3.1.1.1 zu 158 401 Zeitschritten in jedem Simulationsdurchlauf.

Alle weiteren Simulationsparameter sind aus den Tabellen der einzelnen Kapitel zu entnehmen. Die Standardwerte beziehen sich jeweils auf das Standardszenario (Kap. 5.1.2) für das Karlsruher Netz. Die allgemeinen Simulationsparameter sind in der Tab. 3.2 vorzufinden.

5.1.2 Simulationsszenarien

Die Simulationsszenarien werden zur Unterscheidung mithilfe von römischen Ziffern nummeriert. Das Simulationsszenario für das in der Realität vorhandene und im letzten Unterkapitel 5.1.1 beschriebene Karlsruher Netz wird im Folgenden als:

- Szenario I : Standardszenario

bezeichnet. Darüber hinaus werden 15 weitere Simulationsszenarien definiert. Mit ihnen sollen die Auswirkungen auf die Energiebilanz des Systems analysiert werden, die bestimmte Änderungen an den Systemparametern nach sich ziehen. Dazu werden die fiktiven Simulationsszenarien mit dem Standardszenario verglichen, das den Ist-Zustand des Karlsruher Netzes darstellt. Auf diese Weise sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, inwieweit die Systembilanz durch bestimmte Maßnahmen optimiert werden kann. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die fiktiven Simulationsszenarien kurz beschrieben.

5.1.2.1 Fahreinfluss

Der Einfluss der Fahrer wird mit den folgenden beiden Szenarien untersucht:

- Szenario II : Defensive Fahrweise
- Szenario III : Aggressive Fahrweise

Das gewünschte Beschleunigungsverhalten der Fahrer beeinflusst die Leistungsaufnahme der Fahrzeuge in großem Maße. Während im Szenario I in Abhängigkeit der definierten Auswahlwahrscheinlichkeit sowohl defensive, normale als auch aggressive Fahrertypen eingesetzt werden, sind in den Szenarien II und III alle Fahrer ausschließlich vom defensiven bzw. aggressiven Fahrertyp. Der Wunschbeschleunigungsbereich liegt bei der defensiven Fahrweise zwischen $\pm 0,4 \text{ m/s}^2$ und $\pm 0,7 \text{ m/s}^2$ und bei der aggressiven Fahrweise zwischen $\pm 0,8 \text{ m/s}^2$ und $\pm 1,1 \text{ m/s}^2$. Im Vergleich dazu liegt der Bereich bei der normalen Fahrweise nach Tab. 3.8 aus Kap. 3.3.3 zwischen $\pm 0,6 \text{ m/s}^2$ und $\pm 0,9 \text{ m/s}^2$.

5.1.2.2 Fahrzeugeinfluss

Der Einfluss der Fahrzeuge wird mit den folgenden drei Szenarien untersucht:

- Szenario IV : Minimale Hilfsbetriebeauslastung von 0 %
- Szenario V : Maximale Hilfsbetriebeauslastung von 100 %
- Szenario VI : Keine Nutzung der Bremsenergie

Die Hilfsbetriebe haben einen großen Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Fahrzeuge. Im Szenario I ist die Hilfsbetriebeauslastung auf den Mittelwert von 50 % festgelegt, was je nach Fahrzeugtyp einer konstanten Leistung von 25-30 kW entspricht. Mit den beiden Szenarien IV und V werden die beiden Extrema abgebildet, in denen die Fahrzeuge in ihrem aktiven Fahrzustand entweder keine oder die volle Hilfsbetriebeleistung benötigen. Damit lassen sich Rückschlüsse auf den Einfluss der Jahreszeiten ziehen, da der Energieverbrauch für die Hilfsbetriebe in den Winter- und Sommermonaten aufgrund von Heiz- und Kühlleistungen hoch und in den Übergangszeiten im Frühling und Herbst niedrig ist. Ein höherer Hilfsbetriebeauslastungsgrad begünstigt im Allgemeinen die Aufnahmebereitschaft des DC-Netzes für überschüssige Bremsenergie.

Im Szenario VI bremsen alle Fahrzeuge ausschließlich mit der mechanischen Bremsanlage und wandeln die gesamte Bremsenergie in Reibungswärme um. Wie in früheren Zeiten üblich, kann in diesem Szenario keine Bremsenergie durch elektromotorisches Bremsen zurückgewonnen und genutzt werden.

5.1.2.3 Speichereinfluss

Der Einfluss von systemintegrierten Speichern wird mit den folgenden beiden Szenarien untersucht:

- Szenario VII : Mobile Speicher in allen Fahrzeugen
- Szenario VIII: Stationäre Speicher zwischen allen Unterwerken

Im Szenario VII werden alle Fahrzeuge mit einem mobilen Speicher ausgerüstet. Die Speicherkapazitäten betragen jeweils 1,5 kWh, die Speicherleistungen ± 600 kW und die Speicherwirkungsgrade 95 %.

Im Szenario VIII werden zwischen allen Unterwerken sowie an den Streckenendpunkten in Summe 59 stationäre Speicher installiert. Die Lade- und Entladenetzspannungen der Speicher wird auf ± 5 V über bzw. unter der Leerlaufspannung der Unterwerke festgelegt. Aus diesem Grund ist ein einheitliches Netzspannungsniveau erforderlich, so dass in diesem Szenario alle Leerlaufspannungen auf den Durchschnittswert von DC 825 V gesetzt werden müssen. Die Speicherkapazitäten betragen jeweils 5,0 kWh, die Speicherleistungen ± 1000 kW und die Speicherwirkungsgrade 95 %.

Die Wirkungsgrade gelten pro Lade- bzw. Entladevorgang, woraus sich ein Gesamtwirkungsgrad von 90,25 % ergibt. Die Speicher werden nicht zu klein dimensioniert, um aus den späteren Berechnungsergebnissen anhand des durchschnittlichen Speicherfüllgrads die optimale Speichergröße ermitteln zu können.

5.1.2.4 Unterwerkseinfluss

Der Einfluss der Unterwerke wird mit den folgenden drei Szenarien untersucht:

- Szenario IX : Rückspeisefähigkeit bei allen Unterwerken
- Szenario X : Reduzierung der Netzennspannung auf DC 600 V
- Szenario XI : Erhöhung der Netzennspannung auf DC 1200 V

Im Szenario IX sind alle Unterwerke mit Wechselrichtern ausgerüstet und damit rückspeisefähig. Infolgedessen kann überschüssige Bremsenergie im DC-Netz jederzeit in das übergeordnete 3AC-Netz des örtlichen Energieversorgungsunternehmens zurückgespeist werden.

In den beiden Szenarien X und XI wird die Netzennspannung von DC 750 V aus dem Szenario I reduziert bzw. erhöht. Da die Leerlaufspannungen der Unterwerke durchschnittlich 10 % über der Netzennspannung liegen, werden sie einheitlich im Szenario X auf DC 660 V und im Szenario XI auf DC 1320 V gesetzt. Bei einer höheren Netzennspannung sind die Leitungsverluste geringer und Energie kann über größere Distanzen übertragen werden. Bei einer niedrigeren Netzennspannung wird eine höhere Netzüberlastungsquote (Kap. 4.3.2.1) erwartet.

5.1.2.5 Leitungseinfluss

Der Einfluss der elektrischen Leitungen wird mit den folgenden drei Szenarien untersucht:

- Szenario XII : Streckentrenner zwischen allen Unterwerken
- Szenario XIII : Reduzierung des Leitungsquerschnitts auf 50 %
- Szenario XIV : Erhöhung des Leitungsquerschnitts auf 200 %

Ein vollständig durchgekuppeltes Versorgungsnetz ermöglicht einen Austausch der Bremsenergie zwischen den Fahrzeugen über größere Distanzen. Im Szenario XII werden die einzelnen Speisebereiche der Unterwerke voneinander getrennt, indem zwischen allen Unterwerken ein Streckentrenner platziert wird. Auf diese Weise sind keine Energieflüsse mehr in benachbarte Speisebereiche möglich.

In den beiden Szenarien XIII und XIV werden alle Leitungsquerschnitte im gesamten Versorgungsnetz halbiert bzw. verdoppelt. Hier werden ähnliche Effekte wie bei den Änderungen der Netzennennspannungen in den Szenarien X und XI erwartet.

5.1.2.6 Umlaufplaneinfluss

Der Einfluss der Umlaufpläne wird mit den folgenden beiden Szenarien untersucht:

- Szenario XV : Doppeltraktion bei allen Stadtbahnlinien
- Szenario XVI : Reduzierung der Umlaufplanfahrten auf 25 %

Um die Auswirkungen von Doppeltraktionsfahrten analysieren zu können, obwohl die Bildung von Fahrzeugverbänden nicht möglich ist, wird im Szenario XV für jedes Stadtbahnfahrzeug die Traktionssystemleistung, das Fahrzeugleergewicht, die Fahrzeuglänge und die Hilfsbetriebeleistung verdoppelt. Davon betroffen sind 60 der 125 Fahrzeuge, die auf den Linien S1, S2, S4 und S5 verkehren. Die Änderung der Fahrzeugparameter ist äquivalent zu einer Zunahme der Fahrzeugdichte um 48 %.

Im Szenario XVI wird die Anzahl der Umlaufplanfahrten auf ein Viertel reduziert. Dazu wird nur noch jeder vierte Umlaufplan berücksichtigt, so dass sich die Anzahl der Fahrzeuge auf 35 verringert. Dadurch nimmt die Fahrzeugdichte um 72 % ab. Je geringer die Fahrzeugdichte ist, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Bremsenergie netzweit genutzt werden kann.

5.2 Analyse

Die Analyseergebnisse beruhen auf den Annahmen und Vereinfachungen, die im Simulationsprogramm bei der Netzmodellierung (Kap. 2) sowie bei den Fahrspiel- und Energieflussberechnungen (Kap. 3 und Kap. 4) getroffen bzw. vorgenommen wurden. Das simulierte Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetz wurde im Kap. 5.1.1 beschrieben.

Für die Analyse der in Kap. 5.1.2 aufgeführten Szenarien werden über 150 Simulationstage berechnet. Die Berechnungszeit beträgt ca. 200 Stunden pro Simulationstag. Dabei entstehen Datenmengen von jeweils mehr als 5 GB. Bei den nachfolgenden Berechnungsergebnissen handelt es sich um gemittelte Werte aus mindestens drei Simulationsdurchläufen. Die Abweichungen ergeben sich aus den Zufallsgrößen einiger Systemparameter, da nicht alle betrieblichen Vorgänge deterministisch beschrieben werden.

5.2.1 Systemuntersuchung

In diesem Unterkapitel werden die Simulationsergebnisse erläutert, die sich auf die Systembilanz (Kap. 4.4.1) beziehen.

5.2.1.1 Aufteilung der Systemenergie

Die Systemenergie setzt sich aus den fünf Anteilen zusammen, die in Abb. 5.4 für das Szenario I aufgezeigt werden.

Für das Karlsruher Netz beträgt den Simulationsergebnissen zufolge die Systemeinfuhrenergie $E_{\Sigma, Sys, X}$ (Formel (4.80)) im Durchschnitt 110,4 MWh pro Tag. $E_{\Sigma, Sys, X}$ entspricht der aufsummierten Einspeiseenergie $E_{\Sigma, Uw, X}$ der 52

Unterwerke, die aus dem übergeordneten 3AC-Netz in das DC-Netz eingeführt werden muss.

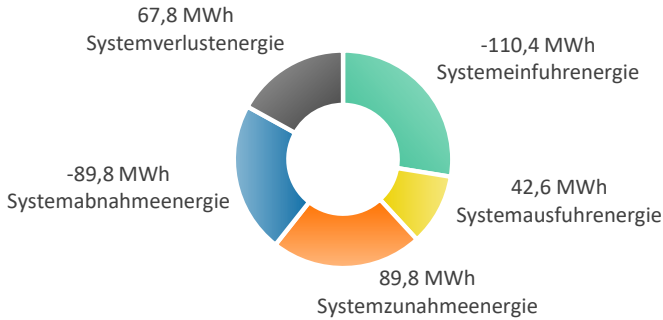


Abb. 5.4: Systemenergie im Szenario I

Die Systemausfuerenergie $E_{\Sigma, Sys, Y}$ (Formel (4.81)) entspricht mit 42,6 MWh der aufsummierten Verbraucherenergie $E_{\Sigma, FZAL, Y}$ für die Hilfsbetriebe der 125 eingesetzten Fahrzeuge. Die Systemzunahme- und Systemabnahmeenergie $E_{\Sigma, Sys, zu}$ (Formel (4.83)) bzw. $E_{\Sigma, Sys, ab}$ (Formel (4.84)) resultiert mit jeweils 89,8 MWh aus der aufsummierten positiven und negativen Bewegungs- und Lageenergie der Fahrzeuge. Da der Bewegungszustand und der Standort aller Fahrzeuge zwischen dem Simulationsanfang und dem Simulationsende nahezu identisch sind, heben sich beide Beträge gegenseitig auf. Die Systemverlustenergie $E_{\Sigma, Sys, V}$ (Formel (4.82)) beläuft sich täglich auf einen durchschnittlichen Wert von 67,8 MWh. Die Systembilanz geht nach Formel (4.79) auf, da die Summe aller fünf Anteile gleich null ist.

In Abb. 5.5 wird ein Überblick über die Aufteilung der Systemenergie für alle 16 Simulationsszenarien gegeben. Vergleicht man die Szenarien miteinander, so liegt $E_{\Sigma, Sys, X}$ bzw. $E_{\Sigma, Uw, X}$ in einem Bereich zwischen 32,3 MWh (Szenario XVI) und 171,1 MWh (Szenario VI). Szenario XVI stellt einen Sonderfall dar, da hier nur ein Viertel der Fahrten angeboten wird. Eine detaillierte Aufteilung der von den Unterwerken eingespeisten Energie erfolgt im Kap. 5.2.1.2.

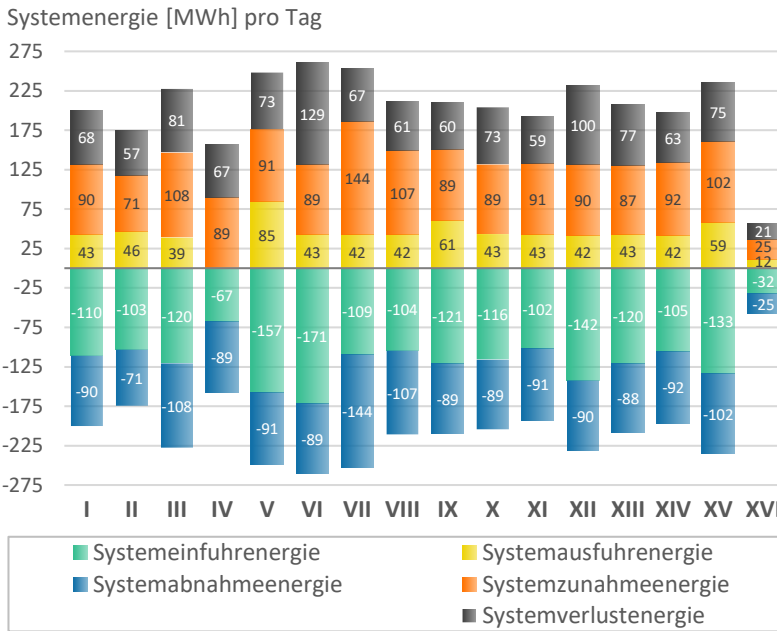


Abb. 5.5: Aufteilung der Systemenergie

Bei $E_{\Sigma, Sys, Y}$ bzw. $E_{\Sigma, FzAL, Y}$ sind geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Szenarien zu verzeichnen. Eine Ausnahme bilden die fünf Szenarien IV, V, IX, XV und XVI. Der Wert weist im Szenario IV mit 0,0 MWh den kleinsten Betrag und im Szenario V mit 84,9 MWh den größten Betrag auf, da hier die Hilfsbetriebeauslastungsgrade bei 0 % bzw. 100 % liegen. Die Abweichung im Szenario IX ist durch die rückspeisefähigen Unterwerke zu erklären, wodurch sich $E_{\Sigma, Sys, Y}$ um die Rückspeiseenergie $E_{\Sigma, Uw, Y}$ von 18,2 MWh auf 60,8 MWh erhöht. Die im Szenario XV in Doppeltraktion fahrenden Fahrzeuge benötigen mehr Energie für die Hilfsbetriebe, so dass $E_{\Sigma, FzAL, Y}$ auf 58,5 MWh ansteigt. Hingegen verringert sich $E_{\Sigma, FzAL, Y}$ im Szenario XVI aufgrund der geringen Fahrzeuganzahl auf 11,6 MWh.

Bei $E_{\Sigma, Sys, zu}$ und $E_{\Sigma, Sys, ab}$ gibt es in Bezug auf Szenario I nennenswerte Abweichungen bei den Szenarien II, III, VII, VIII, XV und XVI. In den Szenarien II und III

ist hierfür der Fahrstil der Fahrer verantwortlich. Bei der defensiven Fahrweise im Szenario II sind die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen länger und die zulässige Höchstgeschwindigkeit wird seltener erreicht. Dadurch sinken die beiden Werte auf 71,4 MWh, während sich bei der aggressiven Fahrweise im Szenario III die gegenteiligen Effekte feststellen lassen. Hier steigen die beiden Werte auf 107,5 MWh. Die Energiespeicher in den beiden Szenarien VII und VIII tragen mit 143,9 MWh und 107,2 MWh ebenfalls zu einer Erhöhung der im System gespeicherten Energie bei. Davon werden 52,1 MWh in den mobilen und 17,0 MWh in den stationären Speichern geladen bzw. entladen. Da sich die im System befindliche kinetische oder potenzielle Energie in den Szenarien XV und XVI aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugmassen vergrößert bzw. verkleinert, ändern sich hier die Werte auf 101,8 MWh bzw. 24,9 MWh.

Bei der Betrachtung von $E_{\Sigma,sys,V}$ fallen bezüglich der Abweichungen besonders die Szenarien VI und XII auf. Im Szenario VI wird keine Bremsenergie genutzt, weshalb $E_{\Sigma,sys,V}$ auf einen Wert von 128,6 MWh ansteigt. Im Szenario XII wird der Austausch der Bremsenergie unter den Fahrzeugen durch Streckentrenner eingeschränkt, so dass $E_{\Sigma,sys,V}$ mit 99,9 MWh vergleichsweise hoch ist.

5.2.1.2 Aufteilung der Unterwerkseinspeiseenergie

In Abb. 5.6 ist die Aufteilung der Unterwerkseinspeiseenergie $E_{\Sigma,UW,X}$ für das Szenario I dargestellt.

Von den täglich durch die Unterwerke eingespeisten 110,4 MWh sind 7,7 MWh Übertragungsverluste, die im Unterwerk und im DC-Netz entstehen. Die Fahrwiderstandsverluste haben einen Anteil von 21,6 MWh. Im Traktionssystem ergeben sich durch die Umwandlungsprozesse im motorischen und generatorischen Betriebszustand weitere Verluste von 23,5 MWh. Bei einer Auslastung der Hilfsbetriebe von 50 % benötigen die Fahrzeuge über den gesamten Tag insgesamt 47,3 MWh für ihre Nebenaggregate. Von der rekupe-rierten Bremsenergie werden 2,7 MWh durch mechanisches Bremsen in der Bremsanlage und 7,7 MWh durch elektrisches Bremsen im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Der restliche Anteil wird entweder intern oder extern genutzt und verringert dadurch die Einspeiseenergie der Unterwerke.

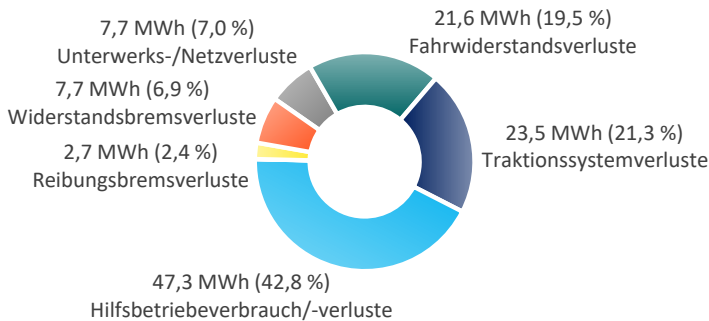


Abb. 5.6: Unterwerkseinspeiseenergie im Szenario I

Eine Übersicht über die absolute und prozentuale Aufteilung von $E_{\Sigma,Uw,X}$ ist für alle 16 Simulationsszenarien der Abb. 5.7 zu entnehmen. Um das Standardszenario I mit den übrigen 15 Szenarien vergleichen zu können, werden die prozentualen Abweichungen von $E_{\Sigma,Uw,X}$ bezüglich des Szenarios I in Abb. 5.8 veranschaulicht.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass sich $E_{\Sigma,Uw,X}$ durch eine defensive Fahrweise (Szenario II) um 6,7 % verringert und durch eine aggressive Fahrweise (Szenario III) um 9,0 % erhöht.

Die Szenarien ohne bzw. mit voller Hilfsbetriebeleistung zeigen, dass der Hilfsbetriebeauslastungsgrad einen großen Einfluss auf $E_{\Sigma,Uw,X}$ hat. So sinkt $E_{\Sigma,Uw,X}$ im Szenario IV um 38,9 % auf 67,4 MWh und steigt im Szenario V um 42,7 % auf 157,5 MWh. Im letzteren Fall beträgt die aufsummierte Hilfsbetriebeenergie 94,3 MWh, was einem Anteil von 59,9 % an der eingespeisten Energie entspricht.

Der höchste Wert von $E_{\Sigma,Uw,X}$ fällt im Szenario VI mit 171,1 MWh an. In diesem Fall kann die Bremsenergie aufgrund von ausschließlich mechanischem Bremsen nicht genutzt werden, so dass die Unterwerke 55,0 % mehr Energie einspeisen müssen. Auf diese Weise werden in diesem Szenario täglich 79,6 MWh an Bremsenergie nutzlos in Reibungswärme umgesetzt, was einem Anteil von 46,5 % an $E_{\Sigma,Uw,X}$ entspricht. Der Anteil der Traktionssystemverluste reduziert sich im Vergleich zu den anderen Szenarien auf

14,1 MWh, da der generatorische Betriebszustand in diesem Szenario nicht eintritt.

Unterwerkseinspeiseenergie [MWh] pro Tag

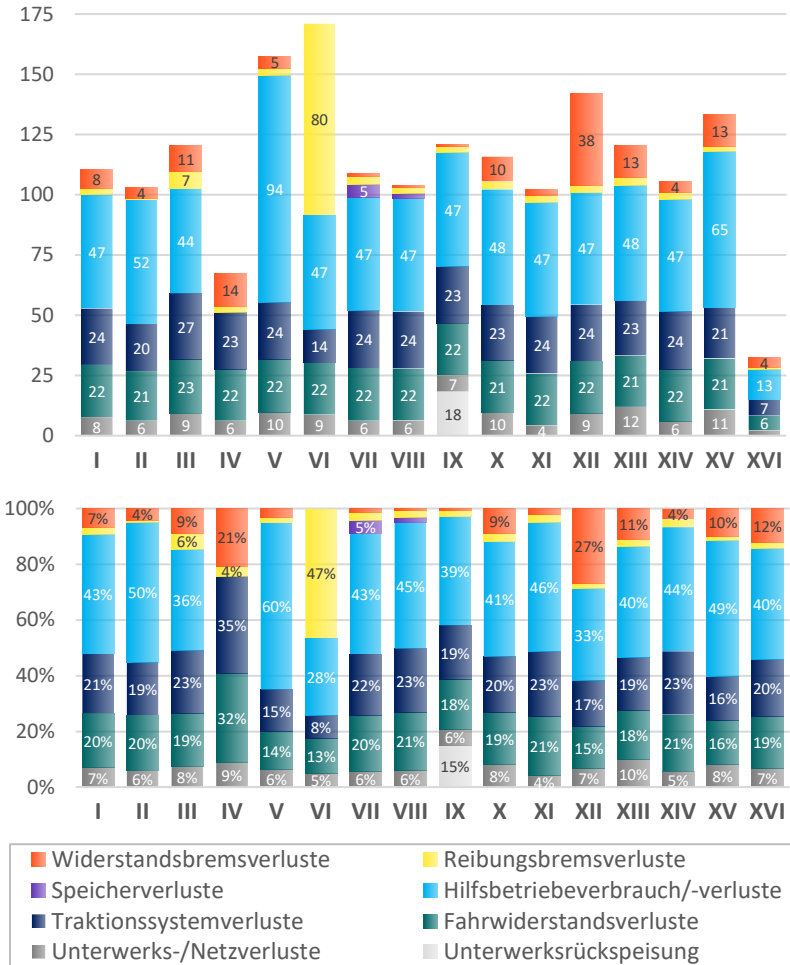


Abb. 5.7: Aufteilung der Unterwerkseinspeiseenergie

Entgegen den Erwartungen haben Energiespeicher, wie aus den Szenarien VII und VIII ersichtlich, keine großen Auswirkungen auf $E_{\Sigma,UW,X}$. Mit mobilen Speichern verringert sich $E_{\Sigma,UW,X}$ um 1,4 MWh bzw. 1,3 % auf 109,0 MWh. Der Grund hierfür liegt in den häufigen Lade- und Entladevorgängen der Speicher, die zu Speicherverlusten von 5,3 MWh führen. Mit stationären Speichern kann $E_{\Sigma,UW,X}$ um 6,4 MWh bzw. 5,8 % auf 104,0 MWh gesenkt werden. Die Speicherverluste betragen in diesem Fall 1,7 MWh.

Da das Szenario VII gegenüber dem Szenario VIII schlechter abschneidet, wird es für eine weitere Analyse auf zwei Arten modifiziert. Zum einen wird die Kapazität der mobilen Speicher auf 5,0 MWh erhöht. Dadurch lässt sich $E_{\Sigma,UW,X}$ gegenüber dem Szenario I um 2,4 % bzw. 2,7 MWh auf 107,7 MWh reduzieren. Daraus wird deutlich, dass die ursprüngliche Speicherkapazität von 1,5 kWh in einigen Fällen nicht ausreichend ist. Zum anderen wird der Gesamtwirkungsgrad der mobilen Speicher auf 98 % erhöht. Dadurch verringern sich die Speicherverluste auf 2,2 MWh. Hieraus wird der große Einfluss der Speicherwirkungsgrade auf $E_{\Sigma,UW,X}$ ersichtlich. Der Wert liegt mit 105,9 MWh nun um 4,1 % bzw. 4,5 MWh unter dem Wert aus dem Standardszenario.

Das Szenario IX erfordert eine genauere Betrachtung. Zwar erhöht sich durch rückspeisefähige Unterwerke $E_{\Sigma,UW,X}$ um 9,4 % auf 120,8 MWh, lässt man allerdings die Rückspeiseenergie von 18,2 MWh in die Systembilanz einfließen, ergibt sich letztendlich eine Energieersparnis von 7,0 % gegenüber dem Szenario I.

Die Auswirkungen der Leitungsverluste sind in den Szenarien X, XI, XIII und XIV erkennbar. Zunehmende Leitungsverluste durch eine geringere Netzspannung (Szenario X) oder aufgrund von kleineren Leitungsquerschnitten (Szenario XIII) lassen $E_{\Sigma,UW,X}$ um 4,9 % bzw. 9,0 % ansteigen. Im Gegensatz dazu können 7,7 % bzw. 4,6 % durch abnehmende Leitungsverluste, ermöglicht durch eine höhere Netzspannung (Szenario XI) oder durch größere Leitungsquerschnitte (Szenario XIV), eingespart werden. Streckentrenner (Szenario XII) zwischen den einzelnen Unterwerken erhöhen den Einspeiseenergiebedarf um 28,6 % auf 141,9 MWh.

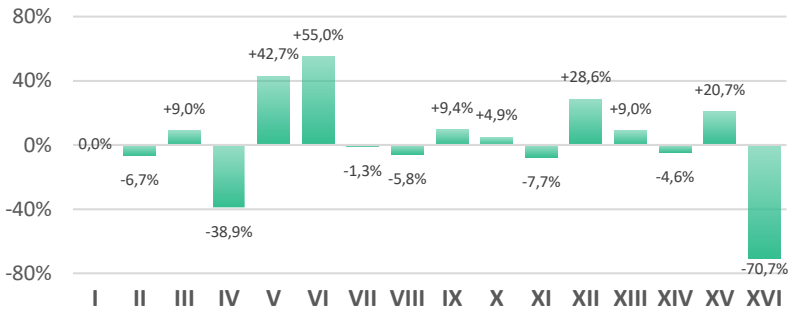


Abb. 5.8: Vergleich der Unterwerkseinspeisungen

Im Szenario XV fahren 48 % der Fahrzeuge in Doppeltraktion, wodurch $E_{\Sigma,UW,X}$ um 20,7 % im Vergleich zum Standardszenario ansteigt. Dagegen führt die um 72 % geringere Fahrzeugdichte im Szenario XVI zu einer Senkung des Werts um 70,7 %. Da in den anderen Szenarien das gleiche Fahrplanangebot gilt, sind die absoluten Werte der Unterwerks- und Netzverluste sowie der Fahrwiderstands- und Traktionssystemverluste in den einzelnen Szenarien ähnlich. Größere Unterschiede treten bei den Widerstandsbremsverlusten auf, die im folgenden Kapitel 5.2.1.3 näher betrachtet werden.

5.2.1.3 Einsparpotenzial durch Energiespeicher

Der in Abb. 5.7 dargestellte Anteil der Widerstandsbremsverlustenergie $E_{\Sigma,FzEb,V}$ ist ein Hauptindikator dafür, welches Energieeinsparpotenzial bei einem Speichereinsatz prinzipiell besteht. Je größer dieser Anteil ist, desto mehr Bremsenergie kann mithilfe von Speichern zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwendet werden, anstatt diese nutzlos in den Bremswiderständen in Wärmeenergie umzuwandeln.

Im Szenario I beträgt die im Bremswiderstand umgesetzte Energie 7,7 MWh, was einem Anteil von 6,9 % an der eingespeisten Energie entspricht. Dieser geringe Anteil lässt sich durch das vollständig durchgekuppelte Fahrleitungsnetz sowie durch die hohe Fahrzeugdichte erklären. Dadurch wird ein hoher Austauschgrad der Bremsenergie zwischen den Fahrzeugen ermöglicht. Aus diesem Grund fallen die durch Energiespeicher erwarteten Einspareffekte

gering aus, wie die Ergebnisse aus den beiden Szenarien VII und VIII aufzeigen. In Abb. 5.9 werden alle Szenarien bezüglich der Abweichungen der Widerstandsbremsverlustenergie mit dem Szenario I verglichen. In den beiden Energiespeicherszenarien VII und VIII kann der absolute Wert von $E_{\Sigma, FzEb, V}$ um 81 % auf 1,5 MWh bzw. um 90 % auf 0,8 MWh gesenkt werden.

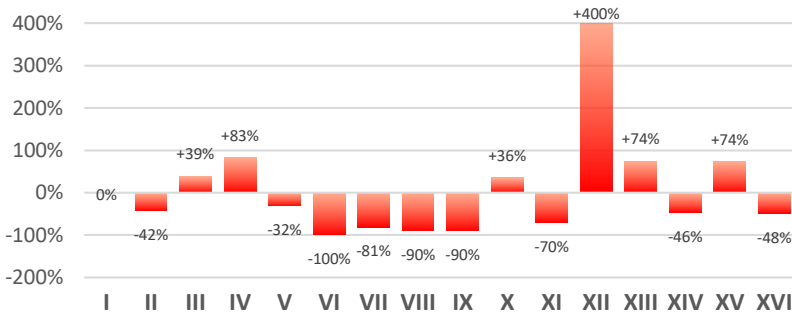


Abb. 5.9: Vergleich der Widerstandsbremsverluste

Im Szenario VI reduziert sich $E_{\Sigma, FzEb, V}$ um 100 % gegenüber dem Standardszenario. In diesem Szenario besteht kein Einsparpotenzial durch Energiespeicher, da keine nutzbare Bremsenergie zur Verfügung steht. Ferner lassen rückspeisefähige Unterwerke (Szenario IX) oder eine höhere Netzspannung (Szenario XI) $E_{\Sigma, FzEb, V}$ um 90 % auf 0,8 MWh bzw. um 70 % auf 2,3 MWh abnehmen, so dass Energiespeicher in diesen Szenarien gleichermaßen wenig effektiv sein würden.

Die Szenarien XV und XVI sind genauer zu betrachten, da hier die Fahrzeugdichte im Vergleich zu den anderen Szenarien abweicht. Im Szenario XV ist die Fahrzeugdichte um 48 % höher, dennoch steigt $E_{\Sigma, FzEb, V}$ mit 74 % überproportional auf 13,3 MWh an. Der Grund hierfür ist, dass sich beim Bremsvorgang von zwei zu einem Fahrzeugverband gekoppelten Fahrzeugen die Bremsleistungen verdoppeln. Die Wahrscheinlichkeit, dass die großen anfallenden Energiemengen von anderen Fahrzeugen zeitgleich aufgenommen werden können, ist deutlich geringer als bei bremsenden Einzelfahrzeugen. Im Szenario XVI reduziert sich $E_{\Sigma, FzEb, V}$ zwar um 48 % auf 4,0 MWh, allerdings

wird hierbei nicht die um 72 % geringere Fahrzeugdichte berücksichtigt. Setzt man diesen Wert mit der dezimierten Anzahl von 35 Fahrzeugen in Relation, ergibt sich ein Anstieg von $E_{\Sigma, FzEb, V}$ um 85 %. Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass bei einer kleinen Fahrzeuganzahl die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass andere Fahrzeuge die temporär nicht nutzbare Bremsenergie eines Fahrzeugs aufnehmen können. Damit kann generell festgehalten werden, dass die im Bremswiderstand umgesetzte Energie zunimmt, je mehr Fahrzeuge zu einem Fahrzeugverband zusammengeschlossen oder je weniger Fahrzeuge netzweit eingesetzt werden.

Die größten Energieeinsparungen mit Speichern sind im Szenario XII zu erzielen. Die durch Streckentrenner eingeschränkte Aufnahmebereitschaft des DC-Netzes für rekuperierte Bremsenergie erhöht $E_{\Sigma, FzEb, V}$ um 400 % auf 38,3 MWh. Aus diesem Grund wird dieses Szenario für eine weitere Untersuchung mit dem Einsatz von Energiespeichern modifiziert. Bei den Ergebnissen der zusätzlich durchgeführten Simulationen lässt sich eine deutliche Reduzierung der ursprünglichen Unterwerkseinspeiseenergie $E_{\Sigma, Uw, X}$ von 141,9 MWh beobachten. Mit mobilen Speichern, d. h. einer Kombination der beiden Szenarien XII und VII, wird $E_{\Sigma, Uw, X}$ auf 113,4 MWh gesenkt. Mit stationären Speichern, d. h. einer Kombination der Szenarien XII und VIII, kann $E_{\Sigma, Uw, X}$ auf 104,4 MWh reduziert werden. Demnach können im nicht durchgekuppelten Netz täglich 28,5 MWh bzw. 37,5 MWh an Einspeiseenergie eingespart werden. Das entspricht einem Rückgang von 20,1 % bzw. 26,4 %. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um das maximal mögliche Einsparpotenzial handelt. Es kann nur realisiert werden, wenn Energiespeicher in allen Fahrzeugen bzw. in allen Speisebereichen installiert werden.

Darüber hinaus weist $E_{\Sigma, FzEb, V}$ bei den folgenden vier Szenarien einen ebenfalls bedeutend höheren Wert gegenüber dem Standardszenario auf. Er liegt bei einer geringeren Netznennspannung (Szenario X) um 36 %, bei einer aggressiven Fahrweise (Szenario III) um 39 %, bei einem geringeren Leitungsquerschnitt (Szenario XIII) um 74 % und ohne Hilfsbetriebe (Szenario IV) um 83 % höher als im Szenario I. Allerdings haben weitere Simulationen gezeigt, dass die Einspareffekte durch Energiespeicher bei diesen Szenarien nur gering ausfallen. Der Grund liegt darin, dass die Menge der eingesparten Energie

nicht ausreichend ist, so dass die Einspareffekte durch die Speicherverluste, die beim Laden und Entladen der Speicher entstehen, größtenteils wieder kompensiert werden. Zudem eignen sich für die Szenarien X und XIII keine stationären Speicher, da die Leitungsverluste aufgrund der schlechteren Netzeigenschaften unverhältnismäßig ansteigen.

5.2.1.4 Netzstabilität

Der Grund für ein nicht lösbares Energieflussproblem ist in der Regel eine Netzüberlastung (Kap. 4.3.2). Sobald dieser Fall eintritt, werden die gewünschten Knotenleistungen schrittweise reduziert, bis alle elektrischen Netzgleichungen lösbar sind. In Abb. 5.10 wird der Anteil der Simulationszeitschritte angegeben, in denen eine Leistungsreduzierung erforderlich ist.

Im Szenario I sind 3,9 %, d. h. 6 213 der 158 401 Simulationszeitschritte betroffen. Dieses Ergebnis legt dar, dass das Karlsruher Netz im jetzigen Zustand keine großen Leistungsreserven mehr besitzt und eine Ausweitung der Netzbelastung zu einer höheren Netzinstabilität führt.

Wie die defensive Fahrweise im Szenario II zeigt, lässt die Reduzierung der gewünschten Beschleunigungswerte der Fahrer den Anteil der Leistungsreduzierungen auf 1,7 % sinken. Dagegen erhöht sich dieser Anteil bei der aggressiven Fahrweise im Szenario III auf 4,9 %. Auch eine geringe Fahrzeugdichte (Szenario XVI) wirkt sich positiv auf die Netzstabilität aus, da die Fahrzeugnetzleistungen in Summe abnehmen.

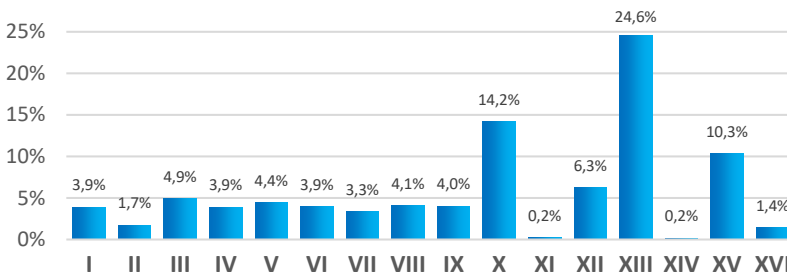


Abb. 5.10: Simulationszeitschrittanteil mit Leistungsreduzierungen

Die beste Netzstabilität lässt sich mit einer hohen Netzennspannung (Szenario XI) oder einem großen Leitungsquerschnitt (Szenario XIV) erzielen. In beiden Fällen sinkt der Anteil der Leistungseinschränkungen auf 0,2 %. Andererseits nehmen die Netzüberlastungsfälle bei höheren Stromspitzen aufgrund von Doppeltraktionsfahrten (Szenario XV), bei einer niedrigen Netzennspannung (Szenario X) oder bei einem schwach dimensionierten Leitungsnetz (Szenario XIII) mit 10,3 %, 14,2 % bzw. 24,6 % stark zu. Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass mit einem steigenden Anteil der Netzüberlastungen die Verspätungen der Fahrzeuge zunehmen, da die Wunschbeschleunigungen nicht mehr zu realisieren sind. Die Netzininstabilitäten führen besonders auf hochfrequentierten Streckenabschnitten zu einer vermehrten Staubildung der Fahrzeuge, wodurch das Risiko von punktuellen Netzüberlastungen weiter zunimmt. Im Extremfall bricht das Netz dauerhaft zusammen. Im Szenario XIII sind die Verspätungen einiger Fahrzeuge so groß, dass von der Tagesgesamstrecke mit 30 175 km bis zum Simulationsende nur 29 950 km zurückgelegt werden. Zusätzlich durchgeführte Simulationen haben gezeigt, dass die Netzüberlastungsquote bei einer Kombination der Szenarien X und XIII auf 59,2 % ansteigt. Infolgedessen werden in diesem Szenario nur noch 24 774 km der Gesamstrecke zurückgelegt. Dadurch befinden sich am Ende des Simulationstags noch Fahrzeuge auf der Strecke, die aufgrund der Netzininstabilität noch nicht ihre gesamten Umlaufplanfahrten ausführen konnten.

5.2.2 Fahrzeuguntersuchung

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Simulationsergebnissen, welche die Fahrzeugbilanz (Kap. 4.4.2) betreffen.

5.2.2.1 Fahrzeugbilanzgrößen

In Abb. 5.11 werden alle 16 Simulationsszenarien in Bezug auf die fahrzeugexternen Energiemengen verglichen. Hierzu zählen zum einen die Netzausgangsenergie $E_{\Sigma, FzDc, aus}$, die von den Fahrzeugen aus dem DC-Netz bezogen wird und zum anderen die Netzeingangsenergie $E_{\Sigma, FzDc, ein}$, die von

den Fahrzeugen in das DC-Netz zurückgespeist wird. Das Verhältnis aus diesen beiden Größen wird als NetZRückspeisegrad in Abb. 5.13 veranschaulicht.

Im Szenario I nehmen die Fahrzeuge täglich 155,5 MWh aus dem DC-Netz auf und geben davon 52,8 MWh wieder an das DC-Netz zurück. Dadurch ergibt sich ein NetZRückspeisegrad von 34,0 %. Je größer der NetZRückspeisegrad ist, umso mehr werden die Unterwerke entlastet.

Die Ergebnisse aus den Szenarien II und III zeigen, dass eine defensive Fahrweise sowohl $E_{\Sigma,FzDc,aus}$ als auch $E_{\Sigma,FzDc,ein}$ reduziert. Hingegen erhöht eine aggressive Fahrweise die beiden Werte. Da sich beide Größen jeweils in einem ähnlichen Verhältnis ändern, kommt es beim NetZRückspeisegrad mit 30,5 % bzw. 35,5 % zu keinen großen Abweichungen gegenüber dem Szenario I. Größere Unterschiede liegen dagegen bei den Szenarien IV und V vor. Der Hilfsbetriebeauslastungsgrad beeinflusst das Verhältnis von $E_{\Sigma,FzDc,aus}$ und $E_{\Sigma,FzDc,ein}$ wesentlich. So sinkt $E_{\Sigma,FzDc,aus}$ im Szenario IV auf einen Wert von 115,1 MWh und steigt im Szenario V auf einen Wert von 196,7 MWh. Darauf bezogen wird im Szenario IV eine große und im Szenario V eine kleine Energiemenge in das Fahrleitungsnetz zurückgespeist, woraus die unterschiedlichen NetZRückspeisegrade von 46,7 % und 24,9 % resultieren. Eine hohe Hilfsbetriebeauslastung trägt dazu bei, dass ein Großteil der rekuperierten Bremsenergie fahrzeugintern verwendet werden kann. Im Szenario VI ist die Nutzung der Bewegungs- und Lageenergie der Fahrzeuge nicht möglich, weshalb der NetZRückspeisegrad 0,0 % beträgt.

Im Szenario VII mit den mobilen Speichern geht $E_{\Sigma,FzDc,aus}$ einerseits auf einen Wert von 108,3 MWh zurück, da aufgrund der fahrzeuginternen Speicher weniger Energie aus dem DC-Netz benötigt wird. Andererseits verringert sich $E_{\Sigma,FzDc,ein}$ auf 5,5 MWh, da der größte Anteil der Bremsenergie für das Laden der Speicher verwendet wird. Daher liegt der NetZRückspeisegrad in diesem Szenario bei nur 5,1 %. Hingegen lassen stationäre Speicher (Szenario VIII) sowie rückspeisefähige Unterwerke (Szenario IX) den NetZRückspeisegrad steigen. Allerdings liegt er mit 38,5 % bzw. 38,3 % nur geringfügig über dem von Szenario I, was ein Indiz dafür ist, dass bereits im Standardszenario ausreichend aufnahmebereite Fahrzeuge vorhanden sind.

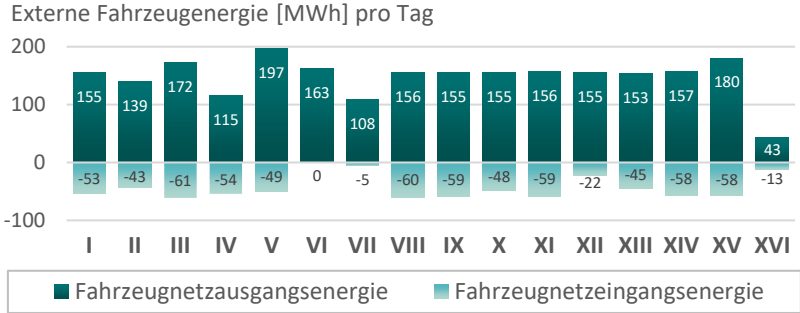


Abb. 5.11: Fahrzeugexterne Energiegrößen

Ein nicht durchgekoppeltes Netz mit Streckentrennern (Szenario XII) führt zu einem niedrigen NetZRückspeisegrad von 14,4 %, da abhängig von der Größe der Speisebereiche weniger aufnahmebereite Fahrzeuge verfügbar sind.

In Abb. 5.12 werden die fahrzeuginternen Energiemengen für die 16 Simulationsszenarien miteinander verglichen. Zu ihnen zählen die Nachfrageenergie $E_{\Sigma,Fz,pos}$ und die Angebotsenergie $E_{\Sigma,Fz,neg}$. Das Verhältnis aus diesen beiden Größen wird als Rekuperationsgrad in Abb. 5.13 dargestellt. $E_{\Sigma,Fz,pos}$ ist die Energiemenge, die von den Fahrzeugen für die Traktionssysteme, Hilfsbetriebeanlagen, Bremsanlagen, Bremswiderstände und ggf. Energiespeicher benötigt wird. Demgegenüber steht die Energiemenge $E_{\Sigma,Fz,neg}$. Sie entspricht der rekuperierbaren Energiemenge, die den Fahrzeugen aufgrund der kinetischen, potenziellen oder gespeicherten Energie theoretisch zur Verfügung steht und durch den generatorischen Betriebszustand bzw. durch den Speicherehladevorgang wieder in nutzbare Energie umgewandelt werden kann.

Im Szenario I benötigen die Fahrzeuge 192,5 MWh pro Tag, wovon 89,8 MWh wieder zur Verfügung stehen. Der Rekuperationsgrad liegt demnach bei 46,7 %. Wie aus Abb. 5.11 ersichtlich, werden 52,8 MWh von $E_{\Sigma,Fz,neg}$ in das DC-Netz zurückgespeist. Die Differenz von 37,0 MWh setzt sich aus den fahrzeuginternen Energiemengen zusammen, die nach Formel (4.94) aus Kap. 4.4.2.2 berechnet werden.

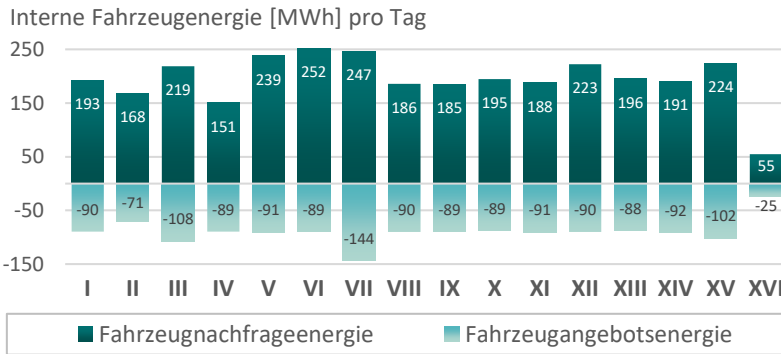


Abb. 5.12: Fahrzeuginterne Energiegrößen

In den Szenarien III, V, VI, VII, XII und XV liegt $E_{\Sigma, Fz, pos}$ erkennbar über dem Wert aus dem Standardszenario. Die Gründe für die höhere Energienachfrage sind für jedes dieser sechs Szenarien unterschiedlich. Im Szenario III ist sie damit zu begründen, dass aufgrund der aggressiveren Fahrweise die Fahrzeugtraktionssysteme mehr Antriebsenergie benötigen. Hingegen führt im Szenario V der hohe Hilfsbetriebeauslastungsgrad zu einem größeren Energieverbrauch der Nebenaggregate. In den Szenarien VI und XII wird ein hoher Energieanteil der Bremsanlage (79,6 MWh) bzw. dem Bremswiderstand (38,3 MWh) zugeführt. Im Szenario VII lässt die Ladeenergie der mobilen Speicher die fahrzeuginterne Energiegröße $E_{\Sigma, Fz, pos}$ auf 246,7 MWh ansteigen. In diesem Szenario ist außerdem $E_{\Sigma, Fz, neg}$ mit 143,9 MWh erheblich größer als in den anderen Szenarien, da die Fahrzeuge durch die Entladeenergie der mobilen Speicher mehr rekuperierte Bremsenergie anbieten können. Bei Fahrzeugverbänden (Szenario XV) resultiert die erhöhte Energienachfrage von 224,4 MWh zum einen aus der größeren zu bewegenden Fahrzeugmasse und zum anderen aus dem höheren Hilfsbetriebeverbrauch. Da die zusätzliche Fahrzeugmasse die kinetische und potenzielle Energie der Fahrzeuge erhöht, steigt das Energieangebot auf 101,8 MWh.

Bei der Interpretation des Rekuperationsgrads in Abb. 5.13 muss beachtet werden, dass insbesondere in den Szenarien VI und XII ein Großteil der

rekuperierten Energie nicht nutzbar ist, da sie fahrzeugintern den Bremsanlagen (Szenario VI) bzw. den Bremswiderständen (Szenario XII) zugeführt wird. Bereinigt man $E_{\Sigma,Fz,neg}$ um diese Größen, verringert sich der Rekuperationsgrad für das Szenario VI von 35,5 % auf 3,9 % und für das Szenario XII von 40,4 % auf 22,1 %.

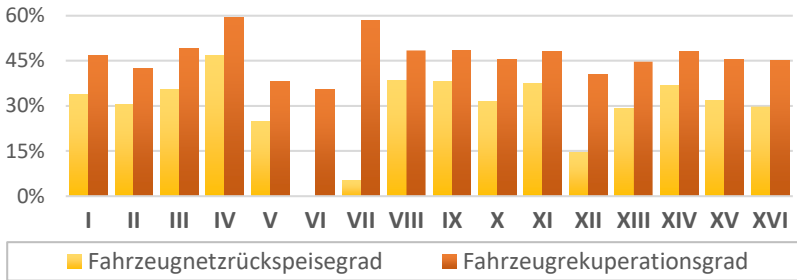


Abb. 5.13: Prozentuale Fahrzeugbilanzgrößen

5.2.2.2 Aufteilung der Fahrzeugangebotsenergie

Die Fahrzeugangebotsenergie $E_{\Sigma,Fz,neg}$ aus Abb. 5.12 teilt sich den Ausführungen aus Kap. 4.4.2.2 zufolge in die NetZRückspeise-, Eigenbedarfs-, Bremsanlagen- und Bremswiderstandsenergie auf.

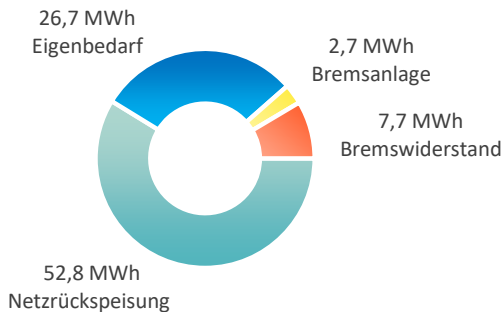


Abb. 5.14: Fahrzeugangebotsenergie im Szenario I

In Abb. 5.4 wird diese Aufteilung für das Szenario I aufgezeigt. In diesem Szenario beträgt $E_{\Sigma,Fz,neg}$ 89,8 MWh. Davon werden 52,8 MWh (58,8 %) in das DC-Netz zurückgespeist und 26,7 MWh (29,8 %) für den Eigenbedarf verwendet. 2,7 MWh (3,0 %) werden durch mechanisches Bremsen und 7,7 MWh (8,5 %) durch Widerstandsbremsen in Wärme umgewandelt. Damit werden 88,6 % genutzt und 11,5 % nicht genutzt.

In Abb. 5.15 wird diese Aufteilung für alle Szenarien sowohl in absoluten als auch in prozentualen Werten dargestellt. Abgesehen von den Szenarien VI und XII liegt der Nutzanteil von $E_{\Sigma,Fz,neg}$ in allen übrigen Szenarien jeweils über 80 %. Durchschnittlich zwei Drittel dieser Energiemenge stellen den Netzzurückspeiseanteil dar und das restliche Drittel den Eigenbedarfsanteil. Eine Ausnahme bildet das Szenario VII, dessen Nutzanteil mit 139,4 MWh (96,8 %) am höchsten liegt. Hier überwiegt mit 133,9 MWh (93,0 %) der Eigenbedarfsanteil, um neben der Versorgung der Hilfsbetriebe die mobilen Speicher zu laden. Im Szenario III ist ein hoher Bremsanlagenanteil von 7,0 MWh (6,5 %) zu beobachten. Dieser resultiert aus der aggressiven Fahrweise, bei der häufig im hohen Geschwindigkeitsbereich stark verzögert wird. Wie aus der Kennlinienform im Traktionskraft-Geschwindigkeits-Diagramm (Abb. 3.26) aus Kap. 3.4.2.1 abzulesen ist, nimmt die elektrische Bremskraft mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit ab, so dass die mechanische Bremsanlage hinzugeschaltet werden muss.

Der geringe Hilfsbetriebeauslastungsgrad im Szenario IV lässt den Eigenbedarfsanteil auf 19,1 MWh (21,4 %) sinken und im Gegenzug den Widerstandsbremsanteil auf 14,0 MWh (15,7 %) steigen. Gegenteilige Auswirkungen hat der hohe Hilfsbetriebeauslastungsgrad im Szenario V, bei dem sich der Eigenbedarfsanteil auf 33,9 MWh (37,3 %) und der Widerstandsbremsanteil auf 5,2 MWh (5,8 %) belaufen.

In den Szenarien X, XIII und XVI ist gegenüber dem Standardszenario mit 54,7 %, 51,0 % und 51,3 % ein geringerer Netzzurückspeiseanteil und mit 11,7 %, 15,2 % und 16,0 % ein höherer Widerstandsbremsanteil zu verzeichnen. In allen drei Fällen ist das DC-Netz weniger aufnahmefähig, da die Netznennspannung, die Leitungsquerschnitte bzw. die Fahrzeugdichte geringer sind. Im Szenario XV ist der Widerstandsbremsanteil von 13,1 % auf die großen nicht

vom DC-Netz aufzunehmenden Leistungsspitzen zurückzuführen, die in den Bremsphasen von Fahrzeugverbänden entstehen.

Fahrzeugangebotsenergie [MWh] pro Tag

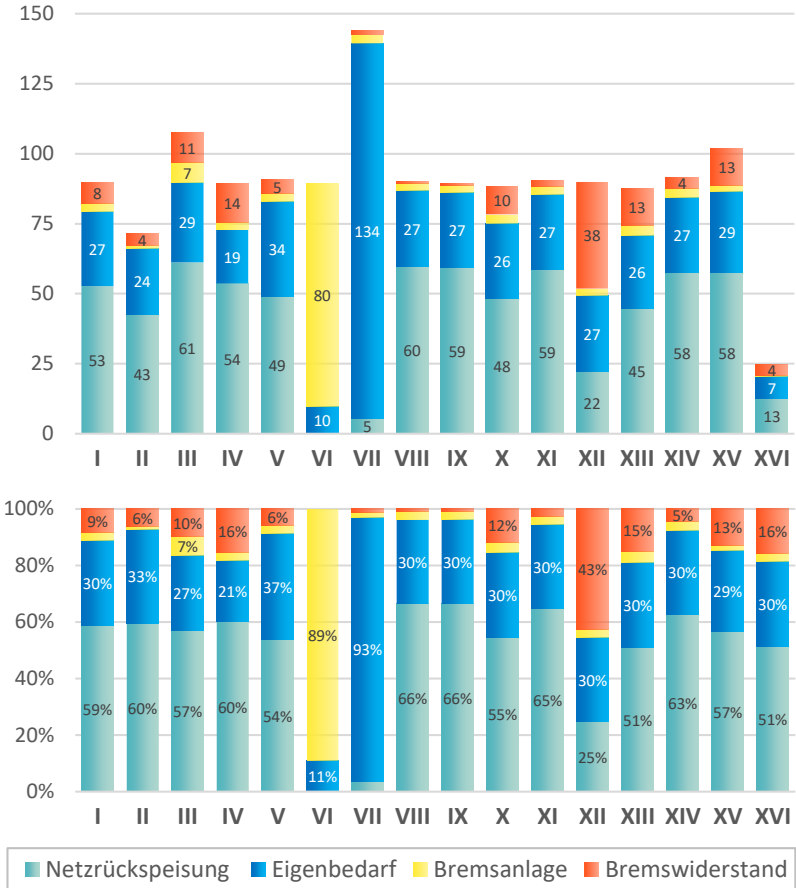


Abb. 5.15: Aufteilung der Fahrzeugangebotsenergie

Mit 49,2 MWh (54,6 %) weist Szenario XII einen geringen Nutzanteil auf. Aufgrund der Streckentrenner kann weniger Bremsenergie im DC-Netz verteilt

werden, so dass insgesamt 38,3 MWh (42,5 %) von $E_{\Sigma, Fz, neg}$ dem Bremswiderstand zugeführt werden müssen. Im Szenario VI sinkt der Anteil der genutzten Angebotsenergie auf 9,8 MWh (10,9 %). Diese dem Eigenbedarf zugeordnete Energiemenge entspricht nach Abb. 3.31 aus Kap. 3.4.3.5 einem Teil der Fahrwiderstandsverluste. Nutzbare Bremsenergie für die Netzurückspeisung oder die eigenen Hilfsbetriebe ist in diesem Szenario nicht verfügbar.

5.2.3 Netzuntersuchung

In diesem Unterkapitel werden ausgewählte Simulationsdaten aus den Berechnungen bestimmter Simulationsszenarien analysiert.

5.2.3.1 Standardszenario

Für das Szenario I sind in Abb. 5.16 und Abb. 5.17 die Verläufe der Netzspannungen und Netzleistungen repräsentativ für zwei Unterwerke im Zeitraum zwischen 04:00 Uhr morgens und 02:00 Uhr nachts dargestellt.

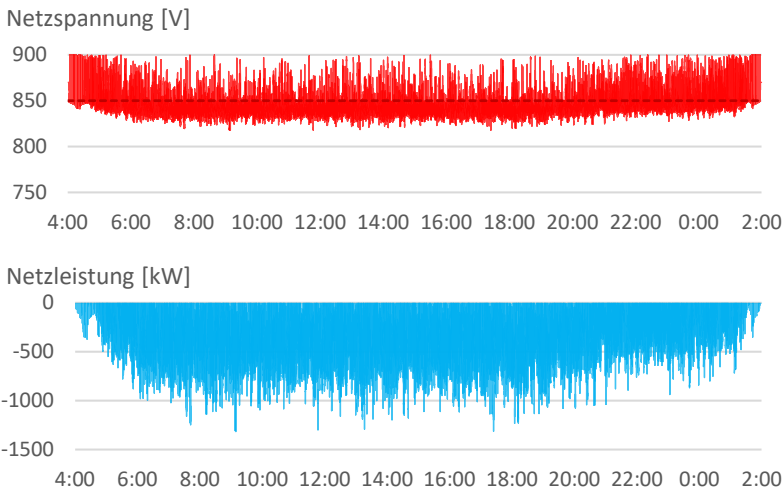


Abb. 5.16: Unterwerk Uw07 im Szenario I

Das erste Unterwerk befindet sich in der Innenstadt (Uw07 am Durlacher Tor) und das zweite Unterwerk auf einer Ausläuferstrecke der Linie S2 (Uw37 bei Spöck). In den Netzspannungsdiagrammen markieren die gestrichelten Linien die jeweiligen Leerlaufspannungen der Unterwerke. Der Vergleich der Netzspannungen zwischen den beiden Unterwerken zeigt, dass die Schwankungen beim Uw07 geringer sind und näher um den Leerlaufspannungswert liegen. Nur in den frühen Morgenstunden und zu den späteren Abendstunden, wenn die Anzahl der Fahrzeuge im aktiven Fahrzustand gering ist, nähert sich die Netzspannung häufiger ihrem maximal zulässigen Wert von DC 900 V. Dagegen tritt dieses Ereignis beim Uw37 kontinuierlich ein. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Netz in diesem Bereich für überschüssige Bremsenergie oftmals nicht aufnahmefähig ist.

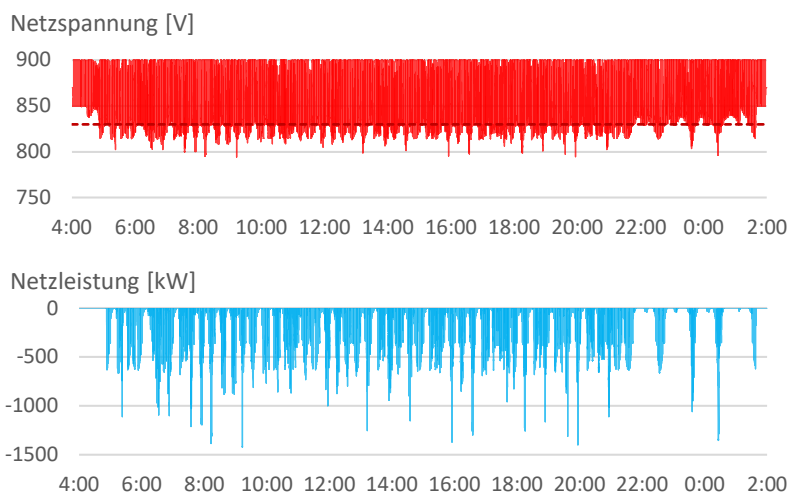


Abb. 5.17: Unterwerk Uw37 im Szenario I

Beim Vergleich der Einspeiseleistungen wird deutlich, dass sie beim Uw07 dauerhaft hoch ist, während beim Uw37 nur kurzzeitig ausgeprägte Leistungsspitzen auftreten. Die durchschnittlichen Netzleistungen betragen gemittelt über den gesamten 22h-Simulationstag für das Uw07 -302 kW bzw. für das

Uw37 –67 kW. Diese Differenz ist durch die unterschiedlich hohen Fahrzeugdichten zu erklären, die in den beiden Netzbereichen vorherrschen.

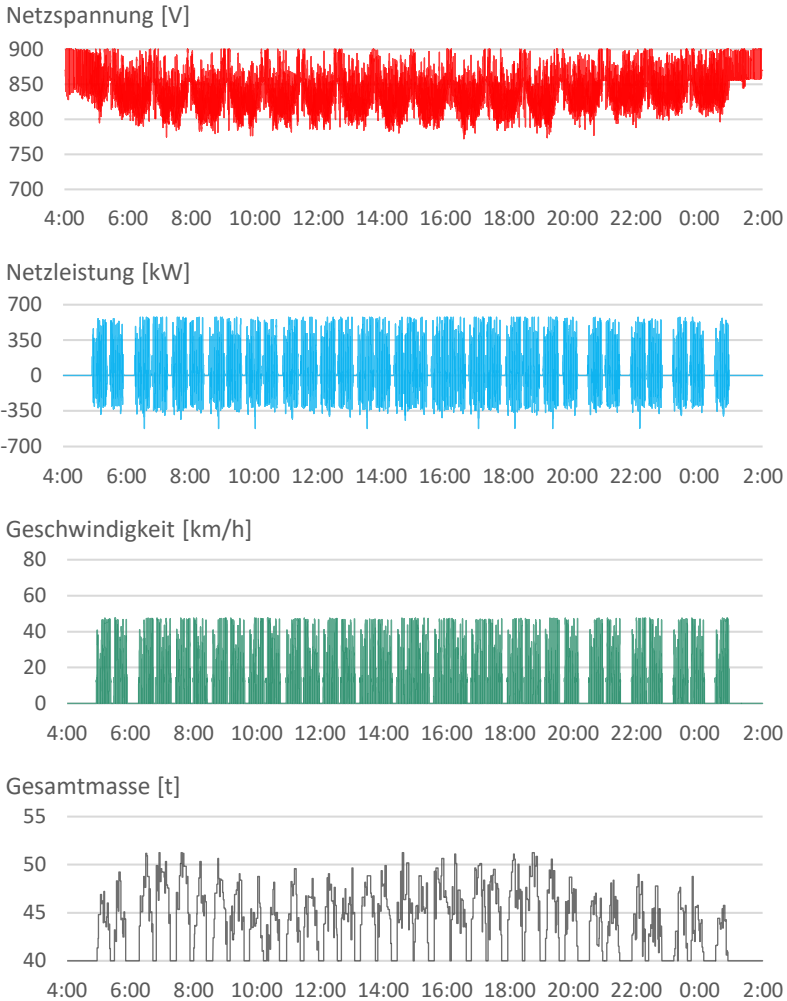


Abb. 5.18: Fahrzeug der Linie 3 im Szenario I

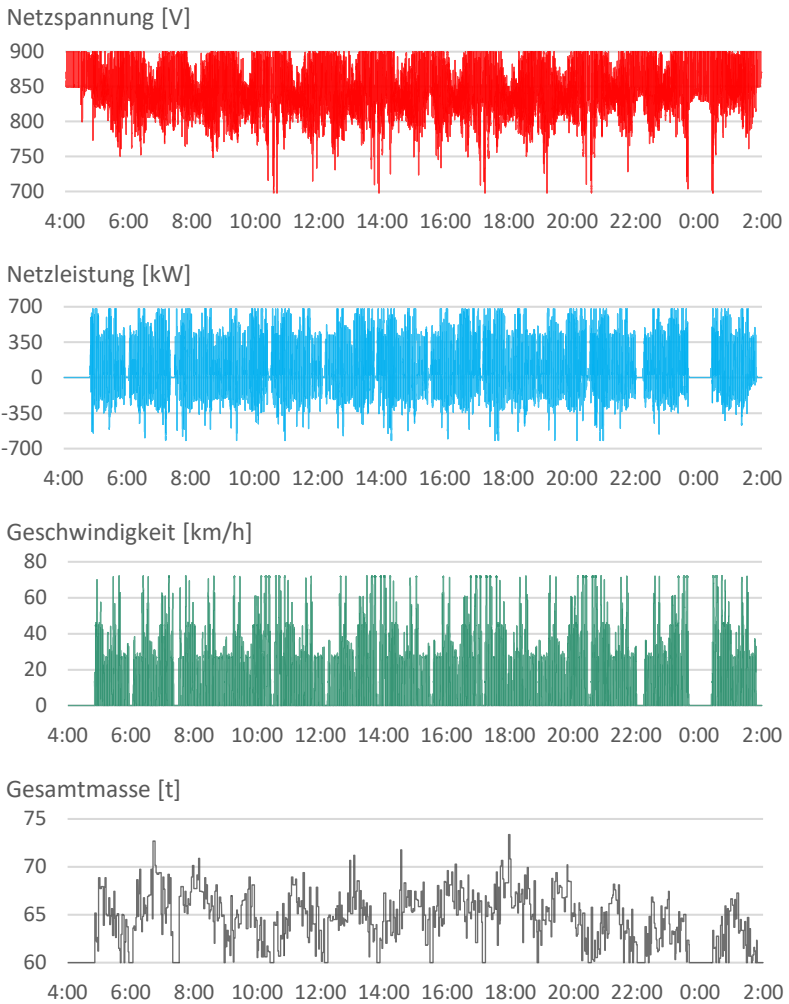


Abb. 5.19: Fahrzeug der Linie S2 im Szenario I

Die Simulationsergebnisse für zwei Fahrzeuge unterschiedlicher Linien sind in Abb. 5.18 und Abb. 5.19 vorzufinden. Neben den Netzspannungs- und Netzleistungsverläufen werden zusätzlich die Geschwindigkeits- und Gesamtmassenprofile dargestellt. Die Spannungsabfälle nehmen aufgrund der

Leitungswiderstände zu, je weiter sich das Fahrzeug von einem Unterwerk entfernt befindet. Aus den negativen Netzleistungen ist ersichtlich, dass im Szenario I ein hoher Netzurückspeisegrad vorliegt. Aus dem Geschwindigkeitsprofil ist die Abfolge der Fahrspielphasen erkennbar. Bedingt durch die orts- und zeitabhängige variierende Anzahl an Fahrgästen unterliegt die Fahrzeuggesamtmasse großen Schwankungen.

Die Diagramme in Abb. 5.18 stammen von einem Fahrzeug der Straßenbahnlinie 3, die zwischen den beiden Endstationen Tivoli und Heide durch das Karlsruher Zentrum führt. Im Vergleich dazu sind in Abb. 5.19 die Simulationsergebnisse für ein Fahrzeug der Stadtbahnlinie S2 abgebildet, die zwischen Spöck und Rheinstetten verläuft. Da die Linie S2 lange Ausläuferstrecken beinhaltet, sind hier deutlich höhere Netzspannungsabfälle als beim Fahrzeug auf der Linie 3 zu beobachten. Zum einen liegt das an den größeren Unterwerksabständen in den außerstädtischen Bereichen und zum anderen daran, dass im Gegensatz zum Innenstadtbereich kaum Fahrzeuge vorhanden sind, die die Netzspannung durch eine Netzurückspeisung anheben. Andererseits wird beim Fahrzeug auf der Linie S2 die obere Netzspannungsgrenze häufiger erreicht. Dieses Ereignis tritt ein, sobald das Fahrzeug aufgrund fehlender Abnehmer keine Bremsenergie mehr in das DC-Netz zurückspeisen kann. Vergleicht man die Netzleistungen miteinander, sind diese beim Stadtbahnfahrzeug höher, weil hier die Leistungsaufnahme des Traktionssystems und der Hilfsbetriebe wegen des höheren Fahrzeuggewichts bzw. Fahrzeugvolumens größer ist. Darüber hinaus weist die Stadtbahnlinie im Durchschnitt höhere Geschwindigkeiten auf, da sich weite Fahrstreckenanteile außerhalb des Stadtgebiets befinden.

5.2.3.2 Auslastung der Unterwerke

Die Netzleistungsverläufe der Unterwerke aus Abb. 5.16 und Abb. 5.17 haben gezeigt, dass sie von Unterwerk zu Unterwerk verschieden sind. Um einen netzweiten Überblick über die Auslastung der Unterwerke zu erhalten, sind auf der linken Seite von Abb. 5.20 die täglich eingespeisten Energiemengen für jedes einzelne Unterwerk aufsummiert. Die großen Unterschiede bei den Werten der Einspeiseenergie geben Aufschluss darüber, wie ungleich die 52

Unterwerke ausgelastet sind. Da hierbei offenbar ein Zusammenhang mit den aus Tab. 5.1 eingestellten Leerlaufspannungen besteht, werden diese auf der rechten Seite von Abb. 5.20 aufgelistet. Die Leerlaufspannungen bewegen sich in einer Spannweite zwischen DC 760 V und DC 870 V. Das Uw38 wird im Folgenden nicht berücksichtigt, da sich dieses Unterwerk derzeit außer Betrieb befindet.

Das Uw14 am Städtischen Klinikum speist mit 9,0 MWh die größte Tagesenergiemenge ein. Weitere über dem Durchschnitt ausgelastete Unterwerke sind das Uw03 am Betriebshof Ost, das Uw07 am Durlacher Tor, das Uw47 bei Busenbach, das Uw20 am Durlacher Bahnhof, das Uw23 am Hirtenweg, das Uw26 am Mühlburger Bahnhof sowie das Uw18 am Zoologischen Stadtgarten. Alle genannten Unterwerke weisen eine Leerlaufspannung von mindestens DC 840 V auf und speisen täglich jeweils mehr als 5 MWh in das DC-Netz ein. Dagegen beträgt die Einspeiseenergie von Unterwerken mit einer geringen Leerlaufspannung von höchstens DC 800 V maximal 1,2 MWh. Am geringsten ausgelastet sind die Unterwerke Uw04 und Uw32 in Durlach, das Uw05 im Eichbäumle, das Uw11 am Entenfang und das Uw31 am Tivoli. Die Einspeiseenergie dieser fünf Unterwerke beträgt in Summe nur 36,7 kWh pro Tag. Demnach dienen sie eher als Reserve für den Notfall, wenn ein benachbartes Unterwerk ausfällt. Obwohl das Uw39 in der Realität im Betrieb ist, speist es in den Simulationen keine Energie ein. Der Grund hierfür ist, dass es ausschließlich den Betriebshof in der Gerwigstraße versorgt, in den infolge der vereinfachten Umlaufpläne keine Fahrzeuge ein- und ausfahren.

Die inhomogene Unterwerksauslastung ist in allen Szenarien zu beobachten, in denen die gleichen Unterwerksleerlaufspannungen wie im Standardszenario eingestellt sind. Allerdings variieren je nach Szenario die Energiemengen. So beläuft sich die tägliche Einspeiseenergie von Uw14 im Szenario VI, dem Szenario mit der größten Systemzufuhrenergie, auf 14,6 MWh.

Um den Einfluss der Leerlaufspannungen zu untermauern, ist auf der linken Seite von Abb. 5.21 die Unterwerksauslastung für ein modifiziertes Szenario I zu sehen, bei dem die Leerlaufspannungen in allen Unterwerken identisch sind. Hierfür wurde der Durchschnittswert von DC 825 V gewählt. Erkennbar ist eine deutlich homogenere Verteilung der Einspeiseenergie. Da in den

Szenarien VIII, IX, X und XI ebenfalls in allen Unterwerken gleiche Leerlaufspannungen eingestellt sind, lässt sich hier eine ähnliche Verteilung beobachten.

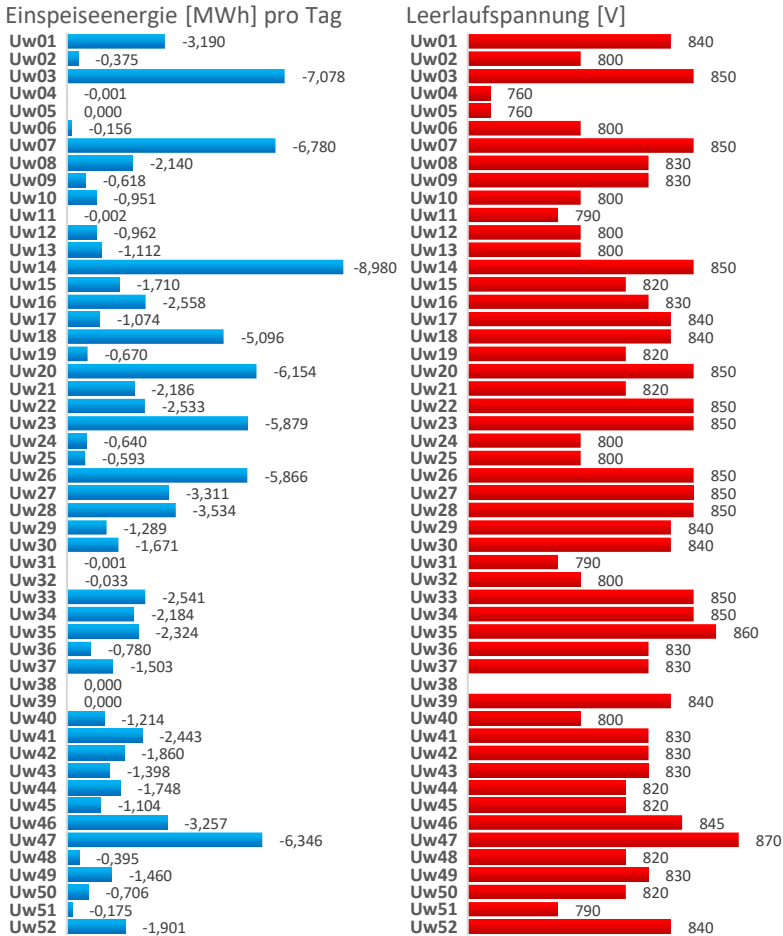


Abb. 5.20: Unterwerksauslastung im Szenario I

Einspeiseenergie pro Tag [MWh]

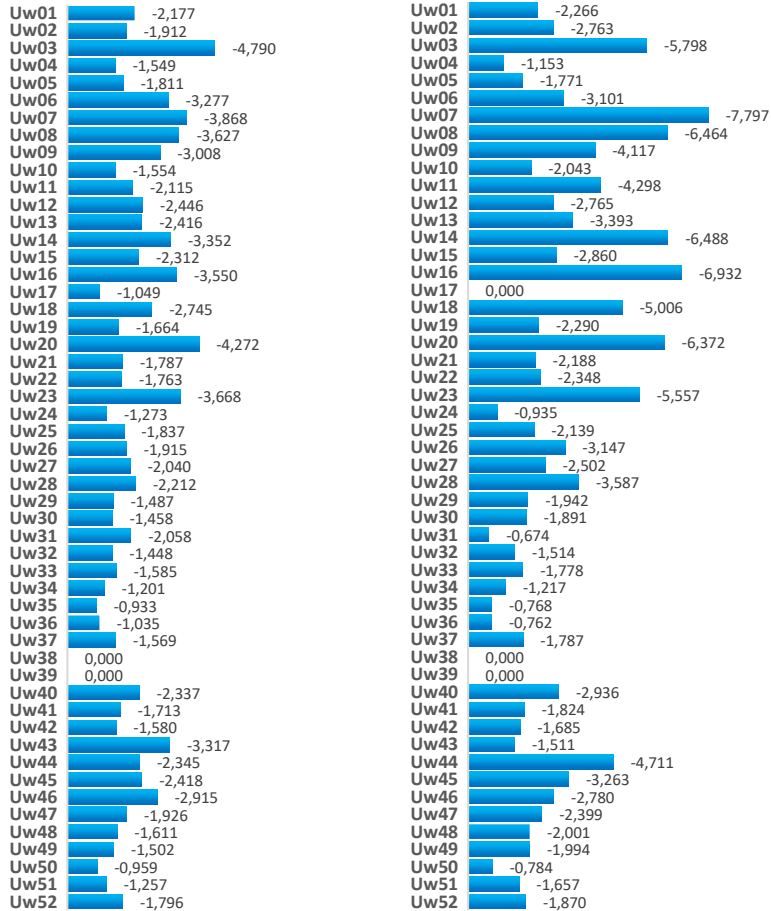


Abb. 5.21: Unterwerksauslastung bei DC 825 V und im Szenario XII

Im Szenario XII sind alle Einspeisebereiche durch Streckentrenner voneinander getrennt. In diesem Fall ergibt sich die auf der rechten Seite von Abb. 5.21 skizzierte Unterwerksauslastung. Diese wird nicht mehr vordergründig durch die Leerlaufspannungen, sondern durch die Standorte der Unterwerke beeinflusst. Mit diesen Berechnungsergebnissen kann ermittelt werden, in welchem

Netzbereich der erforderliche Energiebedarf über den gesamten Tagesverlauf am größten ist. Allerdings muss beachtet werden, dass bei dieser Betrachtung kein Rückschluss auf die Fahrzeugdichte in den einzelnen Einspeisebereichen gezogen werden kann, da die Größen der Speisebereiche teilweise erheblich voneinander abweichen.

In den Speisebereichen der Unterwerke Uw03, Uw07, Uw08, Uw14 und Uw16 im Stadtzentrum sowie Uw20 und Uw23 am östlichen Stadtrand sind täglich mehr als 5 MWh erforderlich. Im Gegensatz dazu befinden sich, mit Ausnahme von Uw31 und Uw43, alle Speisebereiche mit erforderlichen Energiemengen von weniger als 2 MWh ausschließlich auf den Ausläuferstrecken der einzelnen Linien. Da sich der Speisebereich von Uw17 aufgrund eines Streckentrenners auf den Betriebshof West verkleinert, speist dieses Unterwerk in diesem Simulationsszenario aus den gleichen Gründen wie bei Uw39 keine Energie in das DC-Netz ein.

5.2.3.3 Schwankungen der Netzspannungen

Die Verläufe der Netzspannungen aus dem Szenario I haben gezeigt, dass sie teilweise großen Schwankungen unterliegen. Wesentlichen Anteil daran haben die rückspeisefähigen Fahrzeuge in Kombination mit den nicht rückspeisefähigen Unterwerken. Da Fahrzeuge temporär zu elektrischen Erzeugern werden, Unterwerke jedoch nie zu elektrischen Verbrauchern, ist das DC-Netz für die Bremsenergie nur begrenzt aufnahmefähig, so dass die obere Netzspannungsgrenze von DC 900 V häufig erreicht wird.

Den Simulationsergebnissen zufolge fallen gegenüber dem Szenario I die Netzspannungsschwankungen in den Szenarien II, V, VI, VII, VIII und IX merklich kleiner aus. Verdeutlicht wird dies durch einen Vergleich der Netzspannung aus Abb. 5.16 (Szenario I) mit den Netzspannungsverläufen aus Abb. 5.22 (Szenario VI) und Abb. 5.23 (Szenario IX) am Beispiel des Unterwerks Uw07 am Durlacher Tor. Ohne rückspeisefähige Fahrzeuge bzw. mit rückspeisefähigen Unterwerken treten Spannungsausschläge oberhalb der Leerlaufspannung des Unterwerks nur noch vereinzelt auf. Dies führt zu einer starken Glättung der Netzspannungen am Unterwerk.

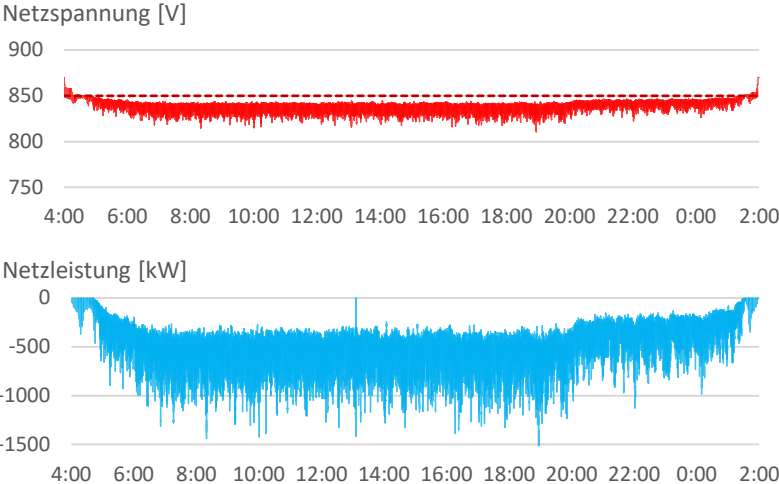


Abb. 5.22: Unterwerk Uw07 im Szenario VI

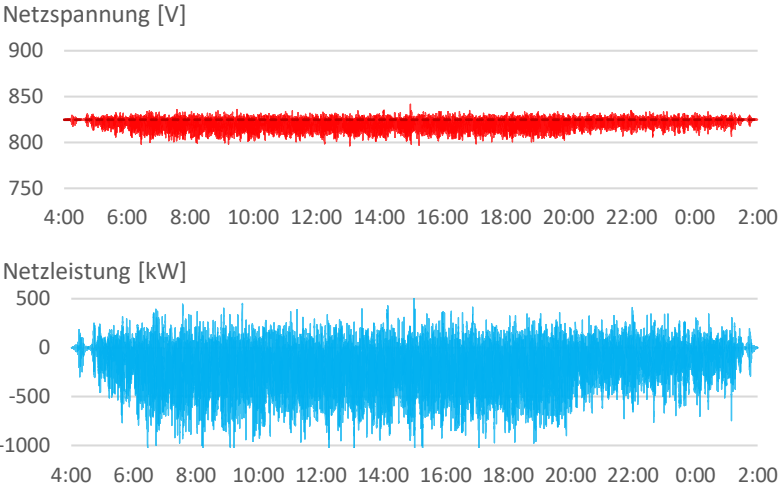


Abb. 5.23: Unterwerk Uw07 im Szenario IX

Ferner lassen sich Unterschiede bei den Netzleistungen erkennen. Wie aus Abb. 5.22 ersichtlich, muss das Unterwerk im Szenario VI durch den Wegfall der Fahrzeugrückspeiseleistungen dauerhaft Energie in das DC-Netz einspeisen. Da inaktive Phasen kaum noch vorhanden sind, steigen die durchschnittlichen Netzleistungen im Vergleich zum Szenario I von -302 kW auf -466 kW. Im Szenario IX nehmen die Netzleistungen aufgrund der Unterwerksrückspeiseleistungen auch positive Werte an, wie im unteren Diagramm von Abb. 5.23 zu sehen ist.

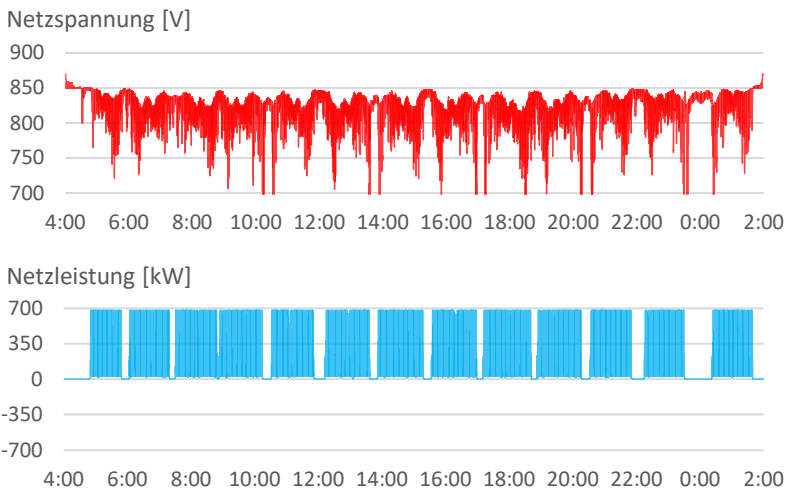


Abb. 5.24: Fahrzeug der Linie S2 im Szenario VI

Bei einer Gegenüberstellung der Fahrzeugsimulationsdaten aus den verschiedenen Szenarien sind ebenfalls große Unterschiede bei den Netzspannungsschwankungen beobachtbar. Als Vergleich hierfür werden die Simulationsergebnisse für das Fahrzeug der Stadtbahnlinie S2 aus dem Standardszenario herangezogen, die in Abb. 5.19 dargestellt wurden.

Wie bei den Unterwerken nähert sich die Netzspannung der Fahrzeuge in den Szenarien VI, VII, VIII und IX nur noch selten der oberen Netzspannungsgrenze. Wie am Beispiel der Simulationsdaten aus dem Szenario VI in Abb. 5.24 zu

sehen ist, sinkt infolgedessen das durchschnittliche Netzspannungsniveau, wodurch die Spannungsabfälle aufgrund der höheren Leitungsströme zunehmen.

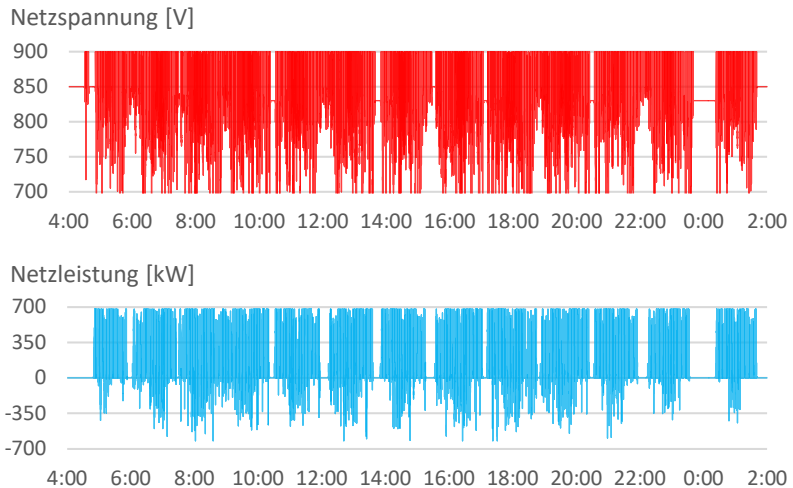


Abb. 5.25: Fahrzeug der Linie S2 im Szenario XII

Auf der anderen Seite nehmen die Netzspannungsschwankungen in den Szenarien XII, XIII und XV im Vergleich zum Standardszenario stark zu. Hier tragen Streckentrenner, ein schwach dimensioniertes Leitungsnetz bzw. Doppeltraktionsfahrten dazu bei, dass insbesondere Spannungsabfälle unterhalb von DC 700 V vermehrt auftreten. Als Beispiel hierfür werden in Abb. 5.25 die Simulationsergebnisse aus dem Szenario XII aufgezeigt.

5.2.4 Speicheruntersuchung

In den beiden Speicherszenarien VII und VIII werden 125 mobile Energiespeicher mit je 1,5 kWh bzw. 59 stationäre Energiespeicher mit je 5,0 kWh eingesetzt. Da ein Speichereinsatz in diesem Ausmaß in der Realität aus wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar ist, liegt im Folgenden der Fokus auf der

optimalen Positionierung und Dimensionierung der Speicher. Auf der Suche nach geeigneten Standorten innerhalb des Netzes stellen die Energieumsätze der Speicher einen wichtigen Anhaltspunkt dar. Sie lassen sich aus den gemittelten Beträgen zwischen der aufsummierten Lade- und Entladeenergie berechnen. Dazu werden die Ladeenergien nach und die Entladeenergien vor den Speicherverlusten betrachtet. Der Energieumsatz eines Speichers gibt Auskunft über dessen Aktivitäten während des Simulationstages.

5.2.4.1 Mobile Energiespeicher

Da die Fahrzeugspeicher keinen festen Standort haben, kommt die Frage auf, in welchen Fahrzeugen mit ihnen der größte energetische Nutzen zu erzielen ist. Die Fahrzeugpositionen sind maßgeblich von den Linien abhängig, sofern die Fahrzeuge stets auf den gleichen Linien eingesetzt werden. Aus diesem Grund liegt es nahe, die Speicherenergieumsätze aus dem Szenario VII für jeweils alle Fahrzeuge einer Linie zusammenzufassen.

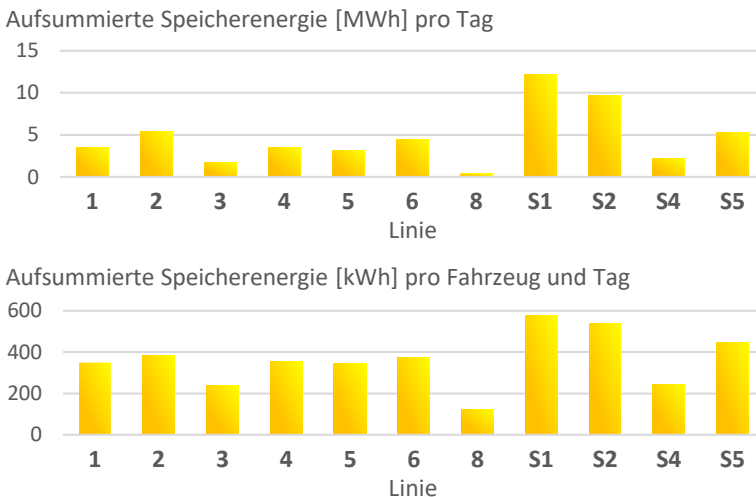


Abb. 5.26: Energieumsätze in mobilen Speichern

Nach Abb. 5.26 weisen die mobilen Speicher auf den Fahrzeugen der beiden Stadtbahnlinien S1 und S2 die größte Aktivität auf. Aus dem oberen Diagramm ist zu entnehmen, dass die auf diesen Linien insgesamt in den Speichern geladene bzw. entladene Energie täglich 12,1 MWh bzw. 9,7 MWh beträgt. Im unteren Diagramm wird die unterschiedliche Anzahl der Fahrzeuge berücksichtigt, die Tab. 5.2 zufolge auf den Linien zum Einsatz kommen. Demnach belaufen sich die aufsummierten Speicherenergien bei den Linien S1 und S2 durchschnittlich auf 576 kWh bzw. 539 kWh pro Fahrzeug und Tag.

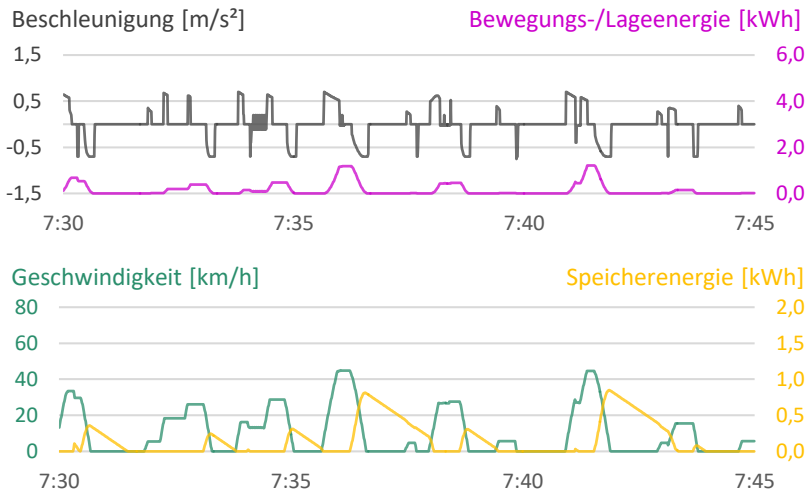


Abb. 5.27: Fahrzeug der Linie 3 im Szenario VII

In Abb. 5.27 und Abb. 5.28 werden für einen 15-minütigen Zeitabschnitt die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofile sowie die momentanen Bewegungs-, Lage- und Speicherenergien von zwei Fahrzeugen der Straßenbahnlinie 3 und der Stadtbahnlinie S2 aufgezeigt. Mit den Informationen über die momentane Bewegungs- und Lageenergie des Fahrzeugs kann beurteilt werden, ob die Kapazität seines Speichers den Bedürfnissen entsprechend bemessen ist.

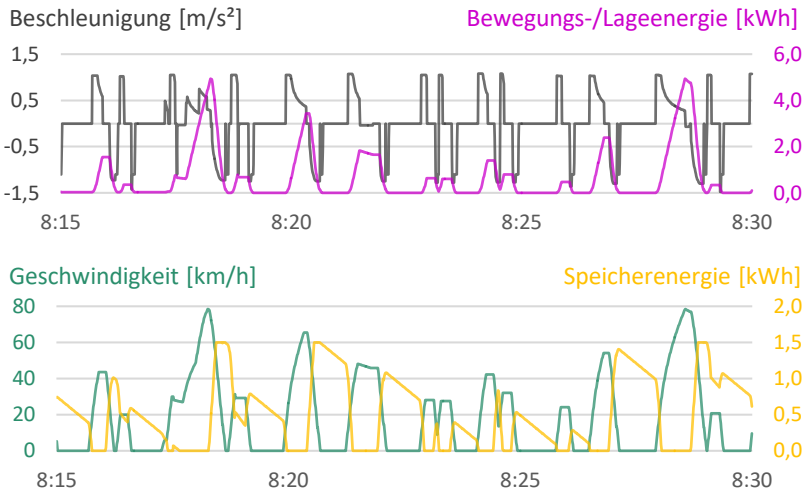


Abb. 5.28: Fahrzeug der Linie S2 im Szenario VII

Ein Vergleich der beiden Abbildungen bestätigt die bereits getroffenen Aussagen aus Abb. 5.26. Bedingt durch die höhere Fahrgeschwindigkeit und die größere Fahrzeugmasse ist der mobile Energiespeicher auf der Stadtbahnlinie stärker ausgelastet. Zudem lässt sich feststellen, dass bei der Straßenbahnlinie eine Speicherkapazität von 1,0 kWh ausreicht, während beim Speicher auf der Stadtbahnlinie die bei 1,5 kWh liegende Kapazitätsgrenze in den meisten Bremsphasen ausgereizt wird. Der Grund hierfür ist, dass die kinetische Energie des Stadtbahnfahrzeugs bei der Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h auf knapp 5,0 kWh ansteigt. Bei einer Berg- und Talstrecke, wie sie auf der Stadtbahnlinie S1 vorzufinden ist, addiert sich hierzu noch die potenzielle Energie. Für diese Einsatzbereiche müssen mobile Speicher größer dimensioniert sein, um die gesamte Bremsenergie aufnehmen zu können. Allerdings ist eine Vergrößerung der Fahrzeugspeicher aufgrund ihres Gewichts und Platzbedarfs nur bedingt möglich.

5.2.4.2 Stationäre Energiespeicher

Im Szenario VIII werden zwischen allen Unterwerken und an einigen Streckenenden stationäre Speicher installiert. Um die Standorte dieser Speicher identifizieren zu können, setzen sich ihre Bezeichnungen aus einer vierstelligen Zahl zusammen, deren erste und letzte Doppelziffern die Nummern der beiden Unterwerke darstellen, zwischen denen sich die Speicher befinden. Zwei gleiche Doppelziffern bedeuten, dass sich der Speicher an einem Streckenende in der Nähe des bezifferten Unterwerks befindet. Einen Überblick über die Lage der Unterwerke im Karlsruher Netz gibt Abb. 5.1. Die Ergebnisse über die aufsummierten Lade- bzw. Entladeenergien werden für alle stationären Speicher in Abb. 5.29 gegenübergestellt.

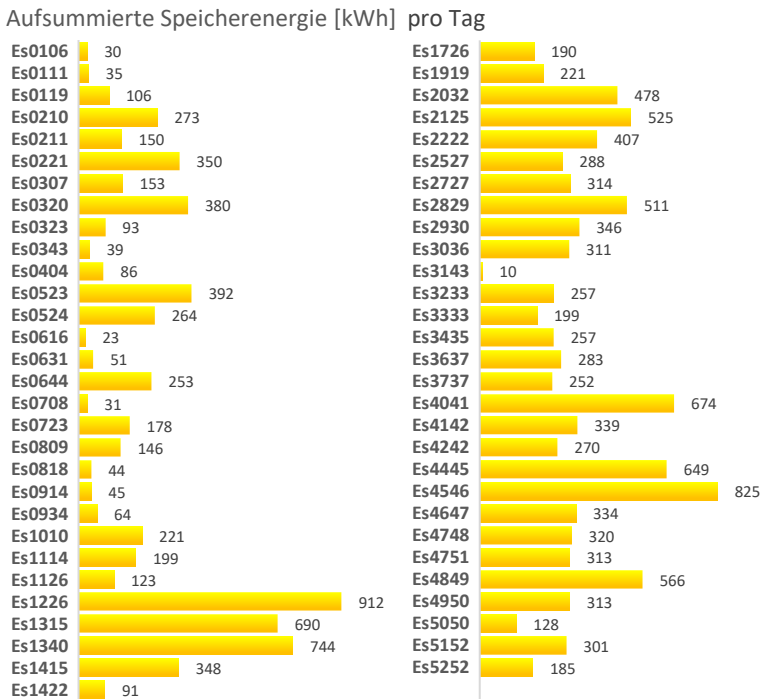


Abb. 5.29: Energieumsätze in stationären Speichern

Unter der Annahme, dass im Hinblick auf die Energiebilanz von den Speichern der größte Nutzen ausgeht, deren Energieumsätze über 500 kWh pro Tag liegen, erhält man die folgenden neun optimalen Speicherstandorte:

- Linie S5 → Wörth am Rhein: Es1226
- Linie S1 → Bad Herrenalb / Ittersbach: Es4546, Es4445, Es4849
- Linie S1 → Hochstetten: Es1340, Es1315, Es4041
- Linie S2 → Rheinstetten: Es2125
- Linie S2 → Spöck: Es2829

Der Speicher Es1226 zwischen den Unterwerken Uw12 und Uw26 setzt mit 912 kWh die meiste Energie um. Für die Stadtbahnlinie S1 werden drei stationäre Speicher im südlichen Teil in Richtung Bad Herrenalb bzw. Ittersbach (2 040 kWh) und drei weitere Speicher im nördlichen Teil in Richtung Hochstetten (2 109 kWh) vorgeschlagen. Außerdem ist es sinnvoll, auf der Stadtbahnlinie S2 je einen Speicher auf halber Strecke zwischen dem Stadtzentrum und Spöck in nordöstlicher Richtung (511 kWh) sowie Rheinstetten in südwestlicher Richtung (525 kWh) zu platzieren.

In Abb. 5.30 und Abb. 5.31 werden die Simulationsdaten von zwei beispielhaft ausgewählten Speichern veranschaulicht.

Der erste Speicher Es0708 befindet sich zwischen dem Durlacher Tor und dem Marktplatz und der zweite Speicher Es4748 an der nach Ittersbach führenden Linie hinter Busenbach. Da die Leerlaufspannungen aller Unterwerke DC 825 V betragen, nehmen die Speicher oberhalb von DC 830 V Energie auf und geben sie unterhalb von DC 820 V wieder ab. Innerhalb dieser beiden Netzspannungswerte sind die Speicher inaktiv.

Da der maximale Energieinhalt von 5,0 kWh beim Es0708 nicht annähernd ausgeschöpft wird, steigt die Netzspannung über den gesamten Tagesverlauf nie über die Ladespannungsgrenze. Dagegen treten Spannungsabfälle unterhalb der Entladespannungsgrenze auf, wenn nicht mehr genügend Energie im Speicher vorhanden ist. Wie aus dem Diagramm der Netzleistungen zu ersehen ist, sind die Lade- und Entladeleistungen gering. Aufgrund der hohen Fahrzeugdichte im Stadtzentrum wird der Speicher häufig geladen und entladen, so dass der über den Simulationstag gemittelte Energieinhalt lediglich

0,036 kWh beträgt. Aus dem geringen Energieumsatz von täglich 30,7 MWh kann gefolgert werden, dass stationäre Speicher im Innenstadtbereich keinen großen Nutzen mit sich bringen.

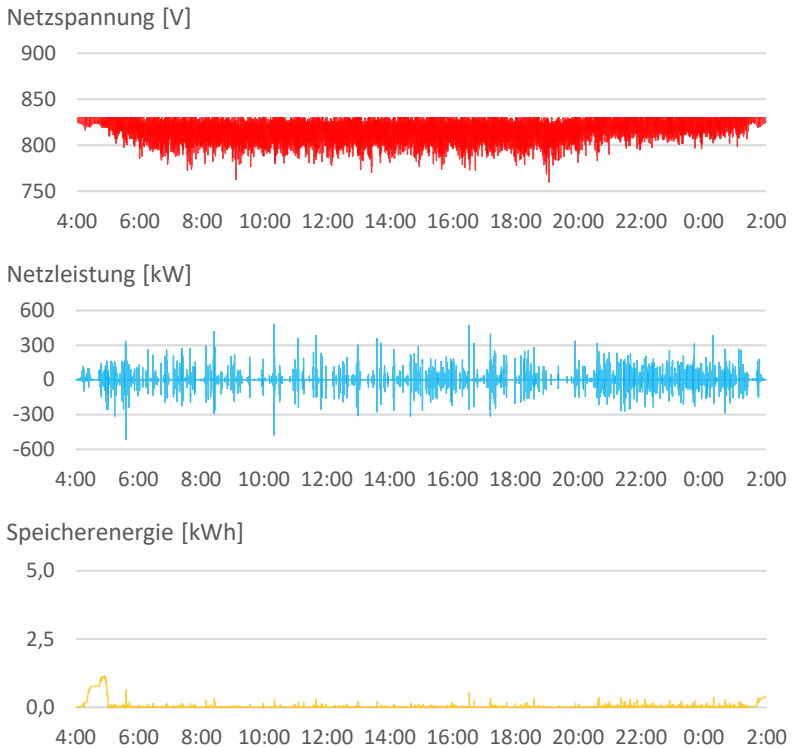


Abb. 5.30: Stationärer Speicher Es0708 im Szenario VIII

Im Vergleich dazu wird die Speicherkapazität beim Es4748 wesentlich besser ausgenutzt. Da sich dieser Speicher an einer Ausläuferstrecke mit großer Steigung bzw. großem Gefälle befindet, liegen der durchschnittliche Energieinhalt bei 2,7 kWh und der Energieumsatz bei 319,9 MWh. Sobald der Speicher keine weitere Energie mehr aufnehmen kann, steigt die Netzspannung über die Ladespannungsgrenze. Da diese Fälle nur vereinzelt auftreten und die

maximale Netzspannungsgrenze von DC 900 V nie erreicht wird, ist der Speicher mit 5,0 kWh ausreichend dimensioniert. Die weiteren Simulationsergebnisse zeigen, dass stationäre Speicher an Ausläuferstrecken ohne nennenswerte Höhenlageänderungen mit einem Energieinhalt von 2,0 kWh ein gutes Maß zwischen Kosten und Nutzen darstellen.

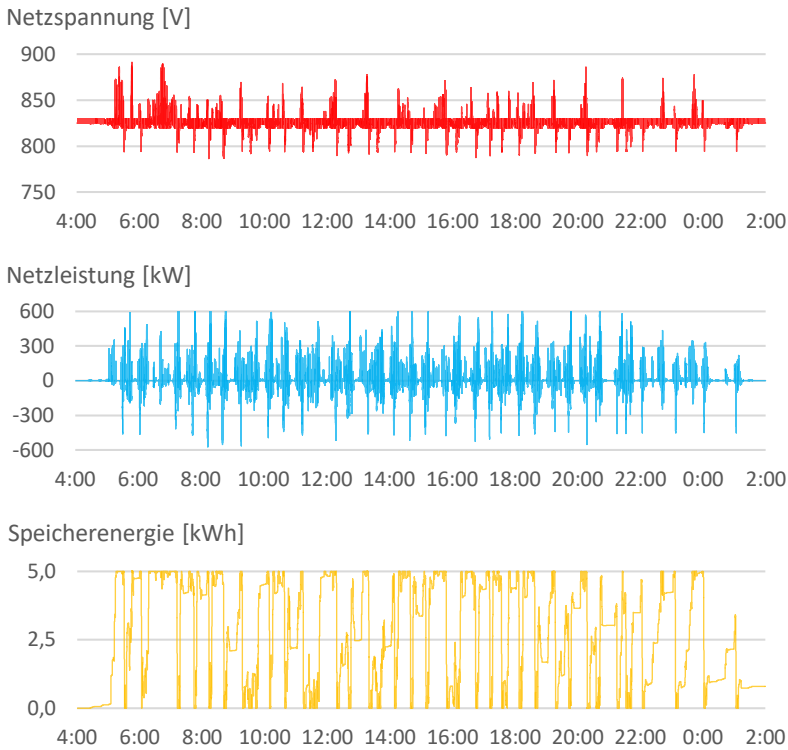


Abb. 5.31: Stationärer Speicher Es4748 im Szenario VIII

5.2.4.3 Berg- und Talfahrt

Auf einer Gefällestrecke steht zusätzlich potenzielle Bremsenergie zur Verfügung. Um die Auswirkungen von Energiespeichern für diesen Anwendungsfall

zu untersuchen, werden in den folgenden drei Diagrammen Abb. 5.32, Abb. 5.33 und Abb. 5.34 die Szenarien I, VII und VIII miteinander verglichen. Hierbei wird ein zweistündiger Ausschnitt der Hin- und Rückfahrt eines Stadtbahnfahrzeugs der Linie S1 vom Albtalbahnhof nach Bad Herrenalb abgebildet. Wie dem Höhenprofil aus Abb. 5.2 zu entnehmen ist, liegt zwischen der ersten und letzten Haltestelle eine Höhendifferenz von knapp 250 m.

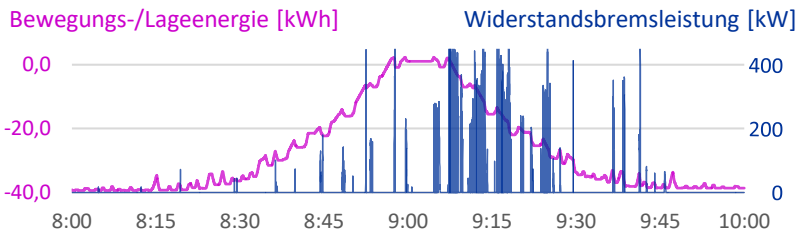


Abb. 5.32: Fahrzeug der Linie S1 im Szenario I

Auf der Fahrstrecke nimmt die potenzielle Energie des Fahrzeugs um ca. 40 kWh zu bzw. ab. Darüber hinaus nimmt die kinetische Energie des Fahrzeugs aufgrund von Geschwindigkeitsänderungen stetig zu und ab. Verantwortlich hierfür sind in erster Linie die 19 Haltestellen, die sich auf diesem Streckenabschnitt in jeder Fahrtrichtung befinden. Sie führen sowohl bei der Bergauffahrt als auch bei der Talabfahrt zu mehreren Anfahr- und Bremsphasen.

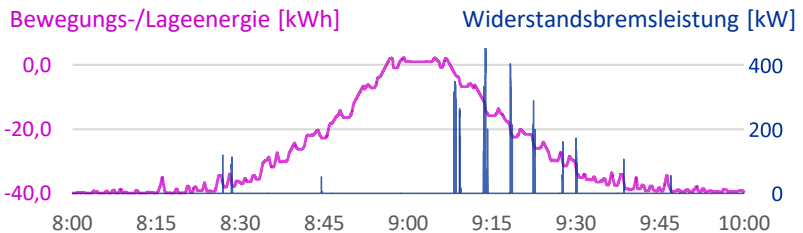


Abb. 5.33: Fahrzeug der Linie S1 im Szenario VII

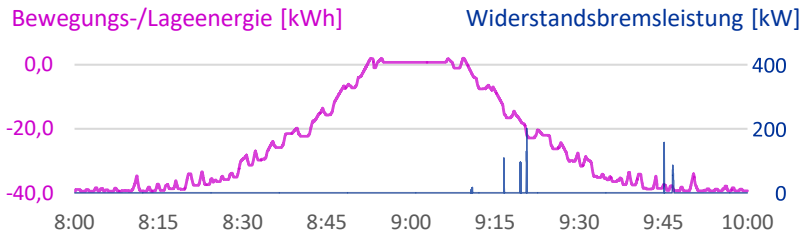


Abb. 5.34: Fahrzeug der Linie S1 im Szenario VIII

Aus den Widerstandsbremsleistungskurven kann man schließen, dass überschüssige Bremsenergie vor allem bei der Talabfahrt vorhanden ist. Ein Vergleich mit dem Szenario I lässt erkennen, dass die im Bremswiderstand nutzlos in Wärme umgewandelte Energie in den beiden Speicherszenarien VII und VIII deutlich abnimmt. Das Szenario mit den stationären Speichern ist im Vorteil, da zum einen die Speicher größer dimensioniert sind und zum anderen das Fahrzeug auf mehrere Speicher entlang der Fahrstrecke zugreifen kann. Zudem wird auf diese Weise der Energieaustausch mit anderen Fahrzeugen erhöht, wenn beispielsweise zur gleichen Zeit ein Fahrzeug den Berg hinunter- und ein anderes Fahrzeug den Berg hinauffährt. Demgegenüber können die Fahrzeuge im Szenario mit den mobilen Speichern nur jeweils den eigenen Speicher nutzen. Besonders ungünstig wirkt sich diese Einschränkung auf längeren Fahrstrecken mit großem Gefälle und wenigen Haltestellen aus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Simulationsprogramm in C#/WPF mit dem Ziel entwickelt, die Energieeffizienz in schienengebundenen und gleichstromgespeisten Nahverkehrssystemen quantitativ zu analysieren. Der Fokus lag darauf, die relevanten Systemzusammenhänge einzubeziehen und die Auswirkungen von unterschiedlichen Strategien zur Energieoptimierung aufzuzeigen.

Im ersten Schritt wurde die Infrastruktur des Verkehrs- und Versorgungsnetzes modelliert. Auf einer grafischen Benutzeroberfläche kann ein ausgedehntes Netzwerk flexibel und maßstabsgetreu aufgebaut werden. Das Verkehrsnetz setzt sich aus Endstationen und Kreuzungen zusammen. Auf dem mehrgleisigen Schienennetz lassen sich Haltestellen, Signale, Geschwindigkeits-, Steigungs-, Kurven- und Tunnelprofile anlegen. Zur Gestaltung des Versorgungsnetzes stehen Unterwerke, Speicher und Anlagen zur Verfügung, die über ein elektrisches Leitungsnetz, bestehend aus Speisekabeln und Fahrleitungen, verbunden werden.

Im zweiten Schritt wurden die betrieblichen Vorgänge integriert. Die Erstellung der Fahr- und Umlaufpläne erfolgt über tabellenartige Schablonen. Neben Nutzfahrten sind Einsetz-, Aussetz-, Betriebs- und Überführungsfahrten definierbar. Der implementierte Algorithmus bestimmt alle Fahrwege zwischen den einzelnen Halteorten unter Berücksichtigung der ausgewählten Fahrbahn- und -gleise. Darüber hinaus wurde eine Signalsteuerung programmiert, die während des Simulationsablaufs den Verkehr an Kreuzungen sowie auf eingleisigen Streckenabschnitten regelt. Systemparameter, die stochastischen Einflüssen unterliegen, wurden mithilfe von Zufallsgrößen beschrieben. Betroffen hiervon sind beispielsweise das orts- und zeitabhängige Fahrgastaufkommen, die Abfahrtsplanzeiten oder die Signalsperrzeiten.

Im dritten Schritt wurden die Fahrer- und Fahrzeugmodelle umgesetzt. Diese beiden Elemente bilden den Kern der Fahrspielberechnung, die auf einer

mikroskopischen Verkehrsflusssimulation beruht und in diskreten Zeitschritten abläuft. Das Fahrermodell wurde nach dem Fahren im Sichtabstand konzipiert. Das Fahrverhalten wird dabei maßgeblich vom Folgeabstand und der Relativgeschwindigkeit zum vorausliegenden Hindernis beeinflusst. Mögliche Hindernisse sind Haltepunkte, Signale, Geschwindigkeitsbegrenzungen und andere Fahrzeuge. Daraus ergeben sich unter Berücksichtigung des Verspätungs- und Ausrollverhaltens die Wunschbeschleunigungen der Fahrer. Im Fahrzeugmodell wurde das Traktionssystem anhand von Kennlinien und Wirkungsgradbetrachtungen abgebildet. Es ermittelt aus den Fahrwiderständen die Traktionsleistungen und berechnet die Leistungen der übrigen Fahrzeugkomponenten.

Im vierten Schritt wurde die Energieflussberechnung ergänzt. Aufgrund der mobilen Fahrzeugknoten ändert sich die Topologie des elektrischen Netzes fortlaufend. Daher mussten Berechnungsroutinen eingebunden werden, die die Knotenleitwertmatrix in jedem Simulationszeitschritt neu erstellen. Zur Lösung der nichtlinearen Netzgleichungen kommt das iterative Newton-Raphson-Verfahren zum Einsatz. Die Kombination aus den nicht rückspeisefähigen Unterwerken und den rückspeisefähigen Fahrzeugen führt zu einem Energieflussproblem mit zahlreichen Nebenbedingungen. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Methode entwickelt, die in mehreren ineinander geschachtelten Schleifendurchläufen die Zustände von bestimmten Knoten umwandelt, bis alle Nebenbedingungen erfüllt sind und das Energieflussproblem gelöst werden kann.

Im letzten Schritt wurde der Frage nachgegangen, wie die Energiebilanz im Karlsruher Straßen- und Stadtbahnnetz ausfällt. Dazu wurde das gesamte Netz im Simulationsprogramm so realitätsnah wie möglich aufgebaut. Daran anschließend wurden 16 Simulationsszenarien mit jeweils unterschiedlichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz definiert. Aufgrund der grafischen Netzgestaltung konnten die Änderungen am komplexen System für die einzelnen Szenarien schnell und übersichtlich vorgenommen werden. Davon abgesehen wurde die Verifikation der Simulationsergebnisse durch die visuelle Wiedergabe der berechneten Simulationsdaten erheblich erleichtert.

Alle Simulationsabläufe erfolgten im Zeitschrittverfahren mit einer Schrittweite von 0,5 s.

Mit den Auswertungen der Simulationsdaten konnten für jedes Szenario die system- und netzrelevanten Energieflussgrößen quantitativ ermittelt werden. Im Standardszenario belief sich der Systemenergieverbrauch auf 110,4 MWh pro Tag. Dabei wurde festgestellt, dass die Fahrzeuge durch elektromotorisches Bremsen einen Großteil der verfügbaren Bremsenergie wieder in nutzbare Energie umwandeln können. Ohne Nutzbremung würde der tägliche Energiebedarf um 55 % auf 171,1 MWh ansteigen. Zudem stellte sich heraus, dass die Fahrzeughilfsbetriebe bei einer mittleren Auslastung von 25-30 kW mit 43 % einen wesentlichen Anteil am Systemenergieverbrauch haben. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Widerstandsbremsverluste im durchgekuppelten Karlsruher Netz in Kombination mit der hohen Fahrzeugdichte insgesamt gering ausfallen. Die Fahrzeuge konnten von der kinetischen und potenziellen Energie 59 % in das DC-Netz zurückspeisen und 30 % für den Eigenbedarf nutzen. So wurden netzweit nur knapp 9 % nutzlos den Bremswiderständen zugeführt, was einer täglichen Energiemenge von 7,7 MWh entsprach. Daraus wurde deutlich, dass das durch Energiespeicher erzielbare Einsparpotenzial aufgrund des hohen Bremsenergieaustauschs unter den Fahrzeugen sehr begrenzt ist. Dies wurde auch bei den Untersuchungen der Szenarien mit den Energiespeichern bestätigt.

Der Systemenergieverbrauch konnte mit den mobilen Speichern um 1,4 MWh und mit den stationären Speichern um 6,4 MWh pro Tag reduziert werden. Eine detaillierte Analyse der Speicherszenarien ergab, dass ausschließlich die Speicher auf den Ausläuferstrecken der beiden Stadtbahnlinien S1 und S2 ausgelastet waren. Da sich auf diesen Streckenabschnitten gemessen an der Gesamtanzahl nur wenige Fahrzeuge befanden, hatten die Energiespeicherumsätze einen geringen Anteil am Gesamtenergieumsatz. Dennoch konnten neun optimale Standorte für den stationären Speichereinsatz identifiziert werden. Hingegen war die Speicherkapazität der mobilen Speicher mit 1,5 kWh insbesondere auf den bergigen Ausläuferstrecken nicht ausreichend. Ferner hat sich die gewählte Fahrzeugspeicherstrategie, bei der die Energiespeicherung der Netzurückspeisung vorgezogen wird, als ineffizient

herausgestellt. Der Grund hierfür war, dass die mobilen Speicher wegen der zahlreichen Brems- und Anfahrvorgänge ständig geladen und entladen wurden, weshalb die Speicherverluste auf 5,4 MWh anstiegen. Allerdings konnten mit dem Speichereinsatz andere positive Effekte erzielt werden. So wurde ein Rückgang der Verspätungen auf allen Linien beobachtet. Dies ist damit zu begründen, dass die Speicher zusätzliche Energiereserven bereitstellten, wodurch das Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge zunahm. Der größte Speichernutzen konnte in einem nicht durchgekuppelten Netz ermittelt werden, in dem Streckentrenner den Bremsenergieaustausch der Fahrzeuge zwischen den einzelnen Speisebereichen unterbinden. Hier ließ sich mit Energiespeichern der Systemenergieverbrauch um mehr als 20 % senken.

Mit den Simulationsergebnissen wurden außerdem Erkenntnisse darüber gewonnen, dass eine defensivere Fahrweise, höhere Netznennspannungen bzw. größere Leitungsquerschnitte positive Auswirkungen auf die Netzspannungsschwankungen und die Netzstabilität haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem entwickelten Simulationsprogramm „BSTsim“ ein Werkzeug zur Verfügung steht, mit dem eine systemumfassende Analyse von spurgeführten und elektrifizierten Nahverkehrssystemen durchgeführt werden kann.

Für den Ausblick sind vordergründig vier Punkte zu nennen, die im Simulationsprogramm noch zu überarbeiten sind.

Der erste Punkt betrifft die Regelstrategie der mobilen Speicher. Eine effektivere Speichernutzung ist beispielsweise mit einer prädiktiven Speichersteuerung denkbar, wenn dem Bordrechner Informationen zum befahrenden Streckenabschnitt vorliegen. Auf diese Weise kann die erwartete Traktions- bzw. Bremsenergie vorausberechnet und die Speicheraktivität dementsprechend angepasst werden.

Der zweite Punkt bezieht sich auf die Berechnung der Energieflüsse in einem überlasteten Netz. Tritt dieser Fall ein, werden zur Vereinfachung die Knotenleistungen aller Fahrzeuge schrittweise reduziert. Das Verfahren ist so zu verbessern, dass ausschließlich die Netzleistungen der Knoten begrenzt werden, die zu dem unlösbaren Energieflussproblem führen. Ferner ist zu ermitteln, ob

das DC-Netz durch weitere stationäre elektrische Anlagen, die bisher nicht berücksichtigt wurden, versorgt und damit zusätzlich belastet wird.

Der dritte Punkt betrifft die Fahrzeughilfsbetriebeleistungen, die im aktiven Fahrzustand als konstant angenommen wurden. Da die Hilfsbetriebe einen beträchtlichen Anteil am Systemenergieverbrauch haben, ist zu überprüfen, inwieweit diese Vereinfachung zulässig ist. Zudem sind Überlegungen anzustellen, wie der Hilfsbetriebeenergieverbrauch zum Beispiel durch intelligente Steuerungsverfahren reduziert werden kann.

Der vierte Punkt bezieht sich auf die Umlaufplanung. Bislang konnten keine Fahrzeugverbände gebildet werden. Die Ergebnisse aus dem Szenario, in dem Doppeltraktionsfahrten vereinfacht durch eine Verdopplung der Fahrzeugwiderstandsparameter simuliert wurden, haben jedoch gezeigt, dass sie die Systembilanz wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grund ist das Simulationsprogramm mit dieser Funktion zu erweitern. Darüber hinaus müssen die fehlenden Leerfahrten hinzugefügt werden. Hierdurch steigt einerseits die Anzahl der Fahrzeugfahrten und andererseits kommt es zu einer anderen Verteilung der Fahrzeuge auf die Endstationen innerhalb der inaktiven Fahrzustandsphasen. Dies betrifft vor allem die Betriebshöfe, die in den bisherigen Simulationsszenarien nicht angefahren werden.

Durch eine Modifikation des Simulationsprogramms lassen sich weitere Simulationsszenarien untersuchen. Werden Zugsicherungssignale zu den bereits implementierten Signalarten hinzugefügt, kann das Fahren im Raumabstand simuliert werden, wie es bei U- und S-Bahnen üblich ist. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Verkehrsflüsse zu optimieren, wenn alle Fahrzeuge fahrerlos zentral durch eine Leitstelle gesteuert werden. Zum anderen ist es möglich, das oberleitungslose Fahren zu analysieren. Eine Idee hierbei ist, die Fahrzeuge an den Haltestellen aufzuladen und die Fahrstrecke anschließend bis zur nächsten Haltestelle mithilfe von Energiespeichern zu überbrücken.

Letztendlich ist eine Validierung der Simulationsergebnisse durch Messungen erforderlich. Außerdem sind wirtschaftliche Betrachtungen durchzuführen, um beurteilen zu können, ob die energieeinsparenden Maßnahmen der einzelnen Szenarien ökologisch und ökonomisch sinnvoll sind.

A Anhang

A.1 Programmierung

Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Computerprogramms „BSTsim“ wurde der in Kap. 2 beschriebene Modellentwurf unter Einbezug der Simulationsanweisungen und Berechnungsalgorithmen aus Kap. 3 und Kap. 4 in ausführbaren Programmcode umgesetzt.

A.1.1 .NET-Framework (C# und WPF)

Das Simulationsprogramm wurde in der Entwicklungsumgebung Visual Studio von Microsoft erstellt. Mit dem integrierten .NET-Framework steht eine Plattform zur Verfügung, auf der Anwendungen entwickelt, kompiliert und ausgeführt werden. Als Programmiersprache wurde C# gewählt. Sie zählt zu den objektorientierten Programmierhochsprachen, die die Konzepte der Abstraktion, Kapselung, Vererbung und Polymorphie unterstützen. Anhand von Klassen kann der Programmierer Datentypen definieren, die die Merkmale (Variablen) und das Verhalten (Methoden) von Objekten festlegen. Objekte bilden real existierende Dinge oder Vorgänge nach und sind konkrete Ausprägungen eines Datentyps, die zur Laufzeit aus den Klassen instanziiert werden [49].

Für die Gestaltung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) kam das Grafik-Framework Windows Presentation Foundation (WPF) zum Einsatz. Es basiert auf DirectX und erlaubt das optimierte, Hardware-beschleunigte Rendern von Benutzeroberflächen, wodurch die CPU von der GPU unterstützt wird. Die Fensterinhalte der Anwendung lassen sich durch frei skalierbare Vektorgrafiken darstellen. Mit der auf XML basierenden deklarativen Beschreibungssprache XAML werden die Elemente der Benutzerschnittstelle ausgehend von

einem Wurzelement hierarchisch in einem logischen und visuellen Objektbaum verwaltet. Steuerelement- und Datenvorlagen ermöglichen ein einheitliches Aussehen der Objekte [44].

A.1.1.1 Programmaufbau

Das Programm ist nach dem MVVM-Entwurfsmuster aufgebaut, das die Geschäftslogik von der Präsentationsansicht trennt und folgende drei Komponenten enthält [87]:

- Model
- ViewModel
- View

Das Model enthält die Daten, das ViewModel stellt die Daten in aufbereiteter Form zur Verfügung und die View repräsentiert die Daten und reagiert auf Benutzereingaben. Die Kommunikation zwischen der GUI und den Daten erfolgt über die sogenannte Datenbindung, die eine Weiterleitung von Befehlen, Ereignissen und Benachrichtigungen über Datenänderungen zwischen den einzelnen Programmebenen ermöglicht.

Das entwickelte Simulationsprogramm besteht aus 727 Klassen und einem Quellcode von ca. 175 000 kommentierten Zeilen. Aufgrund dieses Umfangs wird in dieser Arbeit auf die Applikationsarchitektur mit den strukturellen Beziehungen zwischen den einzelnen Klassen untereinander nicht näher eingegangen.

A.1.1.2 Programmmenü

Die Menüleiste beinhaltet folgende Funktionen:

- Datei erstellen
- Datei öffnen
- Datei speichern
- Werkzeugleiste ein-/ausblenden
- Simulationsberechnung starten
- Programminformationen anzeigen

Beim Starten des Programms wird eine neue Datei für das Datenmodell erstellt. Alle Daten des Modells müssen dauerhaft speicherbar und wiederherstellbar sein. Dies erfolgt durch einen Prozess, der als Serialisierung bezeichnet wird. Hierbei werden die im Arbeitsspeicher des Computers befindlichen Objekte in ein bestimmtes Format konvertiert und anschließend als Datei auf ein nichtflüchtiges Speichermedium geschrieben. Die Deserialisierung stellt den umgekehrten Prozess dar. Das Simulationsprogramm speichert die serialisierten Daten in einem binären Dateiformat ab. Sobald der Programmbenutzer eine Änderung am Modell vornimmt, muss die Dateispeicherung aktualisiert werden, um die Persistenz der Objekte sicherzustellen.

A.1.2 Grafische Netzgestaltung

In der Graphentheorie werden Netztopologien durch Knoten und Kanten dargestellt. Auf der GUI steht zur grafischen Gestaltung des Verkehrs- und Versorgungsnetzes ein Panel zur Verfügung, das die einzelnen Netzwerkelemente aufnehmen und positionieren kann. Über die Werkzeugleiste können diese per Drag & Drop auf die GUI projiziert werden.

A.1.2.1 Zweidimensionales Netzwerk

Im konkreten Anwendungsfall führen die verbundenen Netzwerkelemente zu einem dreidimensionalen Netzwerk, in dem die folgenden drei Bewegungsrichtungen möglich sind:

- Längsbewegung entlang der Fahrbahn in x-Richtung
- Seitenbewegung während einer Kurvenfahrt in y-Richtung
- Höhenbewegung während einer Berg-Tal-Fahrt in z-Richtung

Im Simulationsprogramm wird das Netzwerk zur Vereinfachung im zweidimensionalen Raum abgebildet. Wie in Abb. A.1 veranschaulicht, werden die Informationen über die Höhe nicht mehr in den Koordinaten der Knoten, sondern auf der Kante gespeichert, die die beiden Knoten verbindet. Die hierfür erforderlichen Eigenschaften sind Kantenlänge, Kantenrichtung und Höhendifferenz.

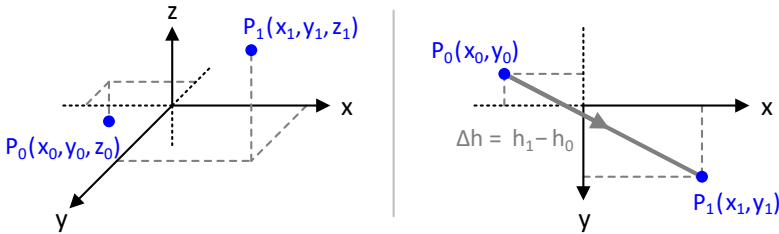


Abb. A.1: Koordinaten im drei- und zweidimensionalen Raum

Das Simulationsprogramm wird in einem Fenster angezeigt. Die maximale Fenstergröße ist sowohl von der Bildschirmgröße als auch von der Bildschirmauflösung abhängig. Innerhalb des Programmfensters sind folgende drei grafische Steuerelemente eingebettet:

- Panel
- Skalierungsbalken
- Anzeigeübersicht

Das Panel enthält alle Netzwerkelemente. Beim Aufbau des Netzes wird die Größe des Panels automatisch an die Ausdehnung der Netzwerkelemente angepasst. Dabei entspricht ein Pixel der Bildschirmauflösung einem Meter in der realen Welt. Sobald das Panel größer als das Fenster ist, kann es nicht mehr vollständig angezeigt werden. Aus diesem Grund muss das Panel verschiebbar und skalierbar sein. Der aktuelle Skalierungsfaktor f_S wird im Skalierungsbalken angezeigt. Die Anzeigeübersicht gibt Auskunft darüber, welcher Ausschnitt des Panels im Fenster gerade sichtbar ist.

Die Transformationen der Koordinatensysteme erfolgt durch:

$$x' = \frac{x'' - \Delta x'}{f_S} \quad \text{bzw.} \quad y' = \frac{y'' - \Delta y'}{f_S} \quad (\text{A.1})$$

und

$$x = x' - \Delta x \quad \text{bzw.} \quad y = y' - \Delta y \quad (\text{A.2})$$

Bei jeder Änderung der Fensteransicht oder des Netzwerks müssen die Koordinatensysteme überprüft werden. Wird beispielsweise das Netzwerk nach links oder nach oben erweitert oder skaliert, wird automatisch eine angepasste Verschiebung des Panels und eine Ursprungsverschiebung für das Netzwerk durchgeführt. Dadurch weichen die Netzwerkelemente aus Sicht des Programmbenutzers nicht von ihrer ursprünglichen Position ab.

Um die einzelnen Netzwerkelemente geeignet darstellen zu können, besteht das Panel aus sieben übereinander gelegten, durchsichtigen Ebenen. Auf diese Weise wird verhindert, dass die Unterelemente von ihren Hauptelementen überdeckt werden. Da jede Benutzerinteraktion eine große Anzahl an Aktualisierungen der angezeigten Netzwerkelemente nach sich zieht, war es aus Performancegründen nicht möglich, auf vordefinierte Steuerelemente zurückzugreifen. Aus diesem Grund wurden für jedes Netzwerkelement eigene Grafikelemente programmiert.

A.1.2.2 Vektorgeometrie

Im zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem werden jedem Punkt zwei Zahlen für die horizontale und vertikale Achse zugeordnet. Zwischen den beiden Punkten $A(x_A, y_A)$ und $Z(x_Z, y_Z)$ ist der Richtungsvektor \vec{v}_{AZ} definiert durch:

$$\vec{v}_{AZ} = \begin{pmatrix} x_{AZ} \\ y_{AZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_Z - x_A \\ y_Z - y_A \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Der euklidische Abstand d_{AZ} zwischen diesen beiden Punkten ist die Länge bzw. der Betrag des Vektors \vec{v}_{AZ} , der nach dem Satz des Pythagoras berechnet wird:

$$d_{AZ} = |\vec{v}_{AZ}| = \sqrt{\vec{v}_{AZ} \cdot \vec{v}_{AZ}} = \sqrt{x_{AZ}^2 + y_{AZ}^2} \quad (\text{A.4})$$

Als Einheitsvektor \vec{e}_{AZ} wird der normierte Vektor von \vec{v}_{AZ} mit der Länge 1 bezeichnet. Die x- und y-Werte von Einheitsvektoren werden durch ein Dach über dem Formelzeichen gekennzeichnet:

$$\vec{e}_{AZ} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{AZ} \\ \hat{y}_{AZ} \end{pmatrix} = \frac{\vec{v}_{AZ}}{|\vec{v}_{AZ}|} \quad (\text{A.5})$$

Der Normalenvektor \vec{v}_{AZ}^\perp ist der orthogonal auf \vec{v}_{AZ} stehende Vektor:

$$\vec{v}_{AZ}^\perp = \begin{pmatrix} -y_{AZ} \\ +x_{AZ} \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Die Drehung erfolgt aufgrund der im Kap. A.1.2.1 festgelegten Richtung der Koordinatensystemachsen im Uhrzeigersinn, d. h. der Normalenvektor zeigt nach rechts.

Der orthogonale Einheitsvektor \vec{e}_{AZ}^\perp wird als Einheitsnormale bezeichnet und analog zu Formel (A.5) ermittelt:

$$\vec{e}_{AZ}^\perp = \begin{pmatrix} \hat{x}_{AZ}^\perp \\ \hat{y}_{AZ}^\perp \end{pmatrix} = \frac{\vec{v}_{AZ}^\perp}{|\vec{v}_{AZ}^\perp|} \quad (\text{A.7})$$

In Abb. A.3 werden die beiden Punkte $A(x_A, y_A)$ und $Z(x_Z, y_Z)$ durch eine Gerade verbunden.

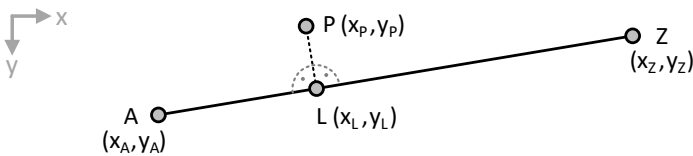


Abb. A.3: Gerade und Lotfußpunkt

Die Gerade AZ kann mit der Steigung m_{AZ} und dem y-Achsenabschnitt c_{AZ} durch folgende Geradengleichung definiert werden:

$$\begin{aligned}
 y &= m_{AZ} x + c_{AZ} \\
 &= \frac{y_Z - y_A}{x_Z - x_A} \cdot x + \left(y_A - \frac{y_Z - y_A}{x_Z - x_A} \cdot x_A \right)
 \end{aligned}
 \tag{A.8}$$

A.1.2.3 Verkehrsknotenabstand

Nach Kap. 2.1.1.1 muss der Mindestabstand $d_{2D,min}$ zwischen allen verbundenen Verkehrsknoten eingehalten werden. Wird ein Knoten $M(x_M, y_M)$ in Richtung seines benachbarten Knotens $N(x_N, y_N)$ verschoben und unterschreitet währenddessen den Mindestabstand, wird seine Koordinate auf den mit $d_{2D,min}$ definierten Kreisumfang um den benachbarten Knoten eingeschränkt:

$$\begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \end{pmatrix} + \left(d_{2D,min} + \frac{D_{K,M}}{2} + \frac{D_{K,N}}{2} \right) \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{MN}) \\ \sin(\varphi_{MN}) \end{pmatrix}
 \tag{A.9}$$

mit dem Winkel φ_{MN} und $x = x_M - x_N$ bzw. $y = y_M - y_N$:

$$\varphi_{MN} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{falls } (x > 0) \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{falls } (x < 0) \wedge (y \geq 0) \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{falls } (x < 0) \wedge (y < 0) \\ +\frac{\pi}{2} & \text{falls } (x = 0) \wedge (y > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & \text{falls } (x = 0) \wedge (y < 0) \end{cases}
 \tag{A.10}$$

Der Winkel φ_{MN} ist von der Position der beiden Knoten zueinander abhängig. Durch die Fallunterscheidung in Formel (A.10) wird der Winkel im korrekten Quadranten des Koordinatensystems ermittelt.

A.1.2.4 Verkehrskantenprofilpunkte

Wie aus Kap. 2.1.2 hervorgeht, liegen eindimensionale Profilpunkte auf den Verkehrskanten. Bei grafischen Operationen ist es häufig erforderlich, für einen neben der Kante liegenden Punkt $P(x_P, y_P)$ den dazugehörigen auf der Kante liegenden Lotfußpunkt $L(x_L, y_L)$ zu bestimmen (Abb. A.3). Ist die

Gerade senkrecht (Fall 1: $x_A = x_Z$) oder waagrecht (Fall 2: $y_A = y_Z$), ist L problemlos zu ermitteln durch:

$$\text{Fall 1) } \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A \\ y_P \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \text{Fall 2) } \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_A \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Andernfalls wird die durch P gehende und senkrecht zur Geraden stehende Lotgerade mit der Steigung m_{AZ}^\perp und dem y-Achsenabschnitt c_{AZ}^\perp bestimmt:

$$\begin{aligned} y &= m_{AZ}^\perp x + c_{AZ}^\perp \\ &= -\frac{x_Z - x_A}{y_Z - y_A} \cdot x + \left(y_P + \frac{x_Z - x_A}{y_Z - y_A} \cdot x_P \right) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Setzt man die beiden Ausdrücke (A.8) und (A.12) gleich und löst nach x bzw. y auf, erhält man L durch:

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{AZ}^\perp - c_{AZ}}{m_{AZ} - m_{AZ}^\perp} \\ \frac{m_{AZ}^\perp c_{AZ} - m_{AZ} c_{AZ}^\perp}{m_{AZ}^\perp - m_{AZ}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Ein konkreter Anwendungsfall hierfür ergibt sich aus der Bestimmung der Position eines eindimensionalen Profilpunkts auf einer Verkehrskante. Die Umrechnung der Koordinate $P(x_P, y_P)$ in eine Kantenposition s_K erfolgt durch:

$$s_K = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^j l_{K,i} \right) + \frac{x_P - x_M}{\hat{x}_{MN}} & \text{falls } |\hat{x}_{MN}| > \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \left(\sum_{i=1}^j l_{K,i} \right) + \frac{y_P - y_M}{\hat{y}_{MN}} & \text{falls } |\hat{x}_{MN}| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Die Kantenlinie, auf der sich der Profilpunkt P befindet, hat den Anfangsknoten $M(x_M, y_M)$ und den Endknoten $N(x_N, y_N)$. In Formel (A.14) werden zunächst die Längen $l_{K,i}$ der in der Anzahl j vorhandenen Vorgänger-Kantenlinien aufsummiert. Anschließend wird ausgehend von M die Teillänge bis zu P berechnet.

A.1.2.5 Steigungsprofil

Dem Kap. A.1.2.1 zufolge liegen die Knotenpositionen des Verkehrsnetzes nur als 2D- und nicht als 3D-Koordinaten vor, weshalb das Steigungsprofil (Kap. 2.1.2.3) nach Abb. A.1 auf den Kanten definiert wird. In Abb. A.4 ist zwischen den beiden Profilpunkten P_0 und P_1 eine Profillinie mit einer konstanten Höhenlageänderung dargestellt. Zusätzlich ist das für den Steigungswiderstand (Kap. 3.4.1.1) relevante Kräfteparallelogramm für ein Fahrzeug der Masse $m_{Fz,ges}$ eingezeichnet. Es zerlegt die Fahrzeuggewichtskraft $F_{Fz,G}$ in eine Hangabtriebskraft $F_{FzFw,S}$ und eine Normalkraft $F_{Fz,N}$.

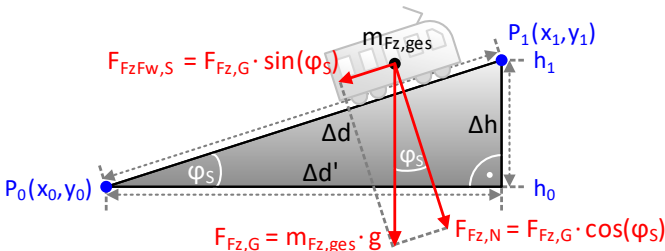


Abb. A.4: Streckensteigung

Nach dem Satz des Pythagoras ist die Fahrwegdistanz Δd die resultierende Länge aus der horizontalen Distanz $\Delta d'$ und der vertikalen Distanz Δh :

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta d')^2 + (\Delta h)^2} \quad (\text{A.15})$$

Der Steigungsgrad g_S ergibt sich aus dem Verhältnis der letzten beiden Distanzen und wird in der Maßeinheit [m/km] bzw. [%] angegeben:

$$g_S = \frac{\Delta h}{\Delta d'} \cdot 10^3 = \frac{\Delta h}{\sqrt{(\Delta d')^2 + (\Delta h)^2}} \cdot 10^3 = \tan(\varphi_S) \cdot 10^3 \quad (\text{A.16})$$

mit dem Steigungswinkel φ_S :

$$\varphi_S = \arctan\left(\frac{\Delta h}{\Delta d'}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta h}{\Delta d}\right) \quad (\text{A.17})$$

Bei der Definition des Steigungsgrads muss beachtet werden, dass sich das Vorzeichen von g_s stets auf die positive Kantenrichtung bezieht:

- Positive Steigung ($g_s > 0$): Höhenzunahme ($h_0 < h_1$)
- Negative Steigung ($g_s < 0$): Höhenabnahme ($h_0 > h_1$)

A.1.2.6 Fahrbahngeometrie

Im Kap. 2.1.2.1 des Fahrprofil wurde beschrieben, wie die gleisabhängigen Fahrbahnanschlusskoordinaten berechnet werden. Dazu ist in Abb. A.5 zur besseren Veranschaulichung eine viergleisige äußere Verkehrskante mit einem Kantenpunkt und zwei Kantenlinien abgebildet.

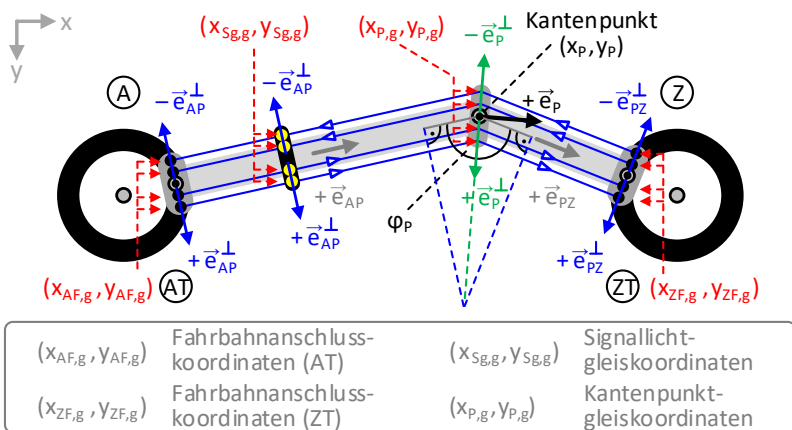


Abb. A.5: Gleisabhängige Fahrbahnkoordinaten

Damit die einzelnen Fahrbahnen auf der GUI nicht zu dicht beieinander liegen und visuell zu unterscheiden sind, wurden im Simulationsprogramm die Fahrbahngleisabstände um den ca. 6-fachen Faktor erhöht. Dies hat zur Konsequenz, dass die folgenden beiden Anpassungen durchgeführt werden müssen:

- Verlängerung der Fahrbahngleisabstände in den Kantenpunkten
- Kompensation der Fahrbahnlängen für die Kantenpositionen

Da Kantenpunkte die Fahrbahngeometrie verzerren, ist es erforderlich, die Fahrbahngleisabstände $d_{F,g}$ in den Kantenpunkten zu verlängern, damit die Fahrbahnen weiterhin parallel zur Kantenlinie verlaufen. Im Kantenpunkt ergibt sich der Einheitsvektor \vec{e}_P nach Formel (A.5) aus der Summe der beiden Einheitsvektoren der Vorgänger- und Nachfolger-Kantenlinie:

$$\vec{e}_P = \frac{\vec{e}_{AP} + \vec{e}_{PZ}}{|\vec{e}_{AP} + \vec{e}_{PZ}|} \quad (\text{A.18})$$

Mit dem orthogonalen Einheitsvektor \vec{e}_P^\perp können nach Formel (2.4) die gleisabhängigen Koordinaten im Kantenpunkt $(x_{P,g}, y_{P,g})$ bestimmt werden. Um eine Fahrbahnverzerrung zu vermeiden, müssen die $d_{F,g}$ verlängert werden und zwar umso mehr, je spitzer der innere Kantenpunktwinkel φ_P :

$$\varphi_P = \arccos\left(\frac{-\vec{e}_{AP} \cdot \vec{e}_{PZ}}{|\vec{e}_{AP}| \cdot |\vec{e}_{PZ}|}\right) \quad (\text{A.19})$$

zwischen der Vorgänger- und Nachfolger-Kantenlinie des Kantenpunkts ist. Die verlängerten Fahrbahngleisabstände $d'_{F,g}$ betragen damit:

$$d'_{F,g} = \frac{d_{F,g}}{\sin\left(\frac{\varphi_P}{2}\right)} \quad (\text{A.20})$$

In Abb. A.5 sind die geometrischen Zusammenhänge in vergrößerter Form dargestellt. Die grün gestrichelte Linie ist im Vergleich zu den blau gestrichelten Linien länger. Analog zu Formel (2.4) ergeben sich die visuell korrigierten Kantenpunktgleiskoordinaten durch:

$$\begin{pmatrix} x_{P,g} \\ y_{P,g} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \end{pmatrix} + (d'_{F,g} \cdot (+\vec{e}_P^\perp)) & \text{für rechte Kantenseite} \\ \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \end{pmatrix} + (d'_{F,g} \cdot (-\vec{e}_P^\perp)) & \text{für linke Kantenseite} \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Aufgrund von $d_{F,g}$ sind die Fahrbahnlängen l_F auf der rechten und linken Kantenseite unterschiedlich lang. Bei der Fahrwegbestimmung (Kap. 2.3.2) allerdings entsprechen die Fahrbahnlängen beider Kantenseiten immer einheitlich der Kantenlänge l_K . Demzufolge werden bei der Berechnung die unterschiedlichen Fahrbahnlängen über den Kompensationsfaktor f_F :

$$f_F = \frac{l_{F,i}}{l_{K,i}} \quad (\text{A.22})$$

ausgeglichen. Er setzt die ggf. abweichende Teillänge der Fahrbahn $l_{F,i}$ und die Länge der Kantenlinie $l_{K,i}$ ins Verhältnis. Multipliziert man die Fahrbahnposition mit f_F , so erhält man daraus die tatsächliche Kantenposition.

A.1.3 Stochastische Einflüsse

Im Simulationsprogramm unterliegen die folgenden Simulationsparameter stochastischen Einflüssen:

- Fahrgastanzahl (Kap. 2.3.3.1)
- Fahrgastwechselzeiten (Kap. 2.3.3.2)
- Abfahrtsplanzeiten (Kap. 2.4.1.2)
- Endstationsausfahrverspätungen (Kap. 3.2.1.2)
- Signalsperrzeiten (Kap. 2.5.1.1)

A.1.3.1 Zufallsgrößen

Simulationen, bei denen alle Ereignisse durch Vorbedingungen eindeutig festgelegt sind, liefern bei jedem Durchlauf exakt die gleichen Ergebnisse. Jedoch können nicht alle Vorgänge deterministisch beschrieben werden, da einige Details oder Zusammenhänge nicht bekannt sind. Mithilfe von Zufallszahlen lässt sich ein stochastisches Verhalten in den Simulationsablauf bringen. Die Zufallsprozesse beruhen auf den Gesetzen der mathematischen Statistik. Während des Simulationsablaufs werden Zufallsgrößen für die fünf aufgezählten Simulationsparameter generiert.

A.1.3.2 Normalverteilung

Viele zufällige Vorgänge lassen sich dem zentralen Grenzwertsatz zufolge annähernd genau mit der Normalverteilung (Gauß-Verteilung) beschreiben. Die normalverteilte Dichtefunktion $f(x)$ ist definiert durch:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{A.23})$$

und hat die folgenden beiden Parameter:

- Erwartungswert μ
- Standardabweichung σ

$f(x)$ ist symmetrisch zum Erwartungswert μ und hat an dieser Stelle ihr Maximum. Dadurch ergibt sich die in Abb. A.6 dargestellte Glockenkurve. Ihre Breite, d. h. die Streuung der Werte um μ , wird durch die Standardabweichung σ bestimmt. Rund 68,27 % aller Werte liegen innerhalb des Intervalls $\mu \pm \sigma$ [80].

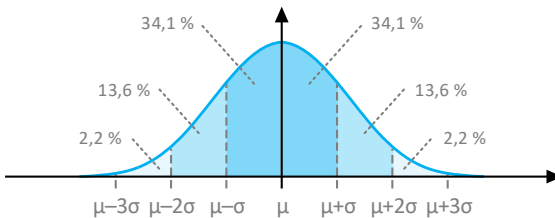


Abb. A.6: Dichtefunktion der Normalverteilung

Im Simulationsprogramm erfolgt die Erzeugung von normalverteilten Zufallsvariablen nach der Box-Muller-Methode [35]. Dazu werden zunächst zwei unabhängige, gleichverteilte und reelle Zufallszahlen z_1 und z_2 im Intervall $[0, 1]$ benötigt. Diese werden vom Programm während der Laufzeit mithilfe eines Pseudozufallszahlengenerators erstellt. Im Anschluss daran lässt sich die (μ, σ) -normalverteilte Zufallsvariable z mit folgender Transformationsvorschrift generieren:

$$z = \mu + \left(\sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(z_1)} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot z_2) \right) \quad (\text{A.24})$$

A.2 Mechanische Grundlagen

Die mechanischen Grundlagen lassen sich in zwei Abschnitte untergliedern. Die Fahrkinematik bezieht sich auf das Fahrermodell (Kap. 3.3) und die Fahrdynamik auf das Fahrzeugmodell (Kap. 3.4).

A.2.1 Fahrkinematik

Die Fahrkinematik beschreibt die räumliche und zeitliche Bewegung von Körpern, die als masselose Punkte betrachtet werden. Im Gegensatz zur Dynamik betrachtet die Kinematik das Bewegungsverhalten von Körpern ohne den Einfluss von Kräften. Die Grundgrößen der Kinematik sind:

- Weg s
- Zeit t

Aus ihnen lassen sich die folgenden beiden physikalischen Größen ableiten:

- Geschwindigkeit v
- Beschleunigung a

Die Geschwindigkeit beschreibt den Bewegungszustand und die Beschleunigung die Änderung dieses Zustands. In den weiteren Betrachtungen werden geradlinige Bewegungen vorausgesetzt, so dass die vektoriellen Größen der Mechanik als richtungsunabhängige Skalare dargestellt werden können [60].

A.2.1.1 Geschwindigkeit

Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} ist die Wegänderung Δs pro Zeitintervall Δt :

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_1 - s_0}{t_1 - t_0} \quad (\text{A.25})$$

Die Indizierung der Parameter in Formel (A.25) bezieht sich auf den Anfangs- und Endzustand. Der Übergang $\Delta t \rightarrow 0$ führt zu einem Grenzwert der mittleren Geschwindigkeit, der als Differenzialquotient bezeichnet wird. Die momentane Geschwindigkeit $v(t)$ ist die erste Ableitung des Wegs $s(t)$ nach der Zeit t :

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{d}{dt}[s(t)] = \dot{s}(t) \quad (\text{A.26})$$

Bei der gleichförmigen Bewegung $v = \text{const}$ werden gleiche Wegabschnitte Δs in gleichen Zeitabschnitten Δt zurückgelegt. In diesem Fall ist die mittlere und momentane Geschwindigkeit identisch.

A.2.1.2 Beschleunigung

Die mittlere Beschleunigung \bar{a} ist die Geschwindigkeitsänderung Δv pro Zeitintervall Δt :

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} \quad (\text{A.27})$$

Die momentane Beschleunigung $a(t)$ ist die erste Ableitung der Geschwindigkeit $v(t)$ bzw. die zweite Ableitung des Wegs $s(t)$ nach der Zeit t :

$$\begin{aligned} a(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d}{dt}[v(t)] = \dot{v}(t) \\ &= \frac{d^2}{dt^2}[s(t)] = \ddot{s}(t) \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

mit den folgenden Vorzeichen:

- Positive Beschleunigung ($a > 0$):
Geschwindigkeit nimmt mit der Zeit zu ($v_0 < v_1$)
- Neutrale Beschleunigung ($a = 0$):
Geschwindigkeit ändert sich mit der Zeit nicht ($v_0 = v_1$)
- Negative Beschleunigung ($a < 0$):
Geschwindigkeit nimmt mit der Zeit ab ($v_0 > v_1$)

Die negative Beschleunigung wird auch als Verzögerung bezeichnet.

A.2.1.3 Bewegungsgesetze

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung $a = \text{const}$ ist die mittlere und momentane Beschleunigung identisch. Durch einfache Integration über die Zeit erhält man das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_0 + \Delta v \\ &= v_0 + \int_{t_0}^{t_1} a \, dt = v_0 + a \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

bzw. durch zweifache Integration über die Zeit das Weg-Zeit-Gesetz:

$$\begin{aligned} s_1 &= s_0 + \Delta s \\ &= s_0 + \int_{t_0}^{t_1} v \, dt = s_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

mit der Anfangsposition s_0 und der Anfangsgeschwindigkeit v_0 zum Anfangszeitpunkt t_0 . Bei verzögerter Bewegung ($a < 0$) sind diese Gleichungen nur bis zum Stillstand des Körpers gültig, d. h. solange $v \geq 0$ ist.

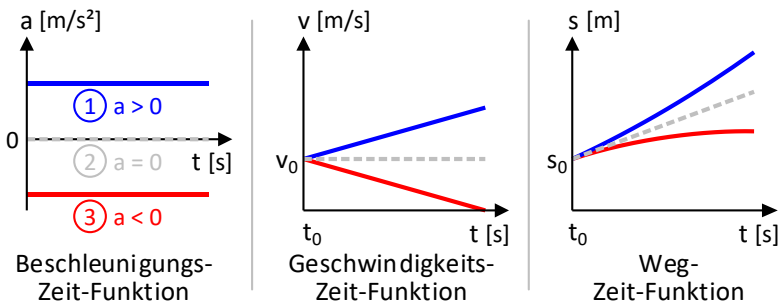


Abb. A.7: Gleichmäßig beschleunigte Bewegung ($a = \text{const}$)

In Abb. A.7 werden die beiden Bewegungsgleichungen (A.29) und (A.30) für eine konstante positive (1), neutrale (2) und negative (3) Beschleunigung dargestellt.

Löst man Formel (A.29) nach a auf und setzt diesen Ausdruck in (A.30) ein, erhält man das Weg-Zeit-Gesetz in Abhängigkeit der Anfangs- und Endgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 :

$$s_1 = s_0 + \frac{1}{2} \cdot (v_0 + v_1) \cdot \Delta t \quad (\text{A.31})$$

Stellt man Gleichung (A.29) um, erhält man die verstrichene Zeit Δt :

$$\Delta t = \frac{v_1 - v_0}{a} \quad (\text{A.32})$$

Setzt man diesen Ausdruck in Gleichung (A.30) ein, ergibt sich daraus der zurückgelegte Weg Δs :

$$\begin{aligned} \Delta s &= v_0 \cdot \left(\frac{v_1 - v_0}{a} \right) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{v_1 - v_0}{a} \right)^2 \\ &= \frac{2 v_0 v_1 - 2 v_0^2 + v_1^2 - 2 v_0 v_1 + v_0^2}{2 a} \\ &= \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 a} \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

Δs entspricht für $a < 0$ und $v_0 > v_1$ dem relativen Bremsweg.

A.2.1.4 Verkehrssimulation

Die Verkehrssimulation bildet die Verkehrsabläufe eines Verkehrssystems ab. Modelle zur Verkehrssimulation lassen sich einteilen in [98]:

- Makroskopische Modelle (Kontinuumstheorie)
- Mikroskopische Modelle (Fahrzeugfolgetheorie)

Makroskopische Modelle beruhen auf den Regeln der Strömungslehre und betrachten den Verkehrsstrom als kontinuierlich fließendes Medium. In [24] wird das makroskopische Verkehrsflussmodell durch die folgenden Variablen beschrieben:

- Verkehrsdichte p (Fahrzeuge pro Längeneinheit)
- Verkehrsstärke q (Fahrzeuge pro Zeiteinheit)
- Verkehrsgeschwindigkeit \bar{v} (Längeneinheit pro Zeiteinheit)

Dabei handelt es sich um aggregierte Größen, die sich auf einen bestimmten Ort s und eine bestimmte Zeit t beziehen. Diese drei Größen stehen nach [59] in folgendem Zusammenhang:

$$q(s, t) = p(s, t) \cdot \bar{v}(s, t) \quad (\text{A.34})$$

Mikroskopische Modelle betrachten demgegenüber einzelne Fahrzeuge. Es werden Fahrspielzyklen betrachtet, die wie in Abb. A.8 dargestellt in fünf Bewegungsphasen unterteilt werden können [46] [82].

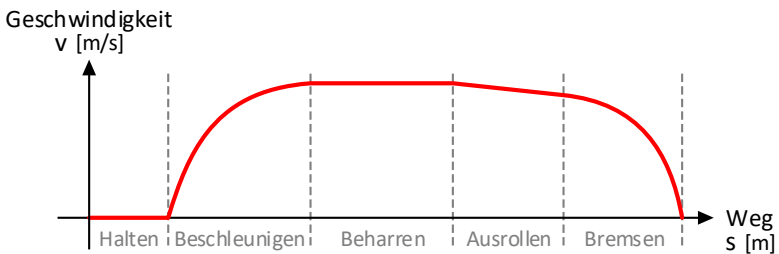


Abb. A.8: Fahrspielzyklus

Hierbei steht die Beschleunigung des Fahrers \ddot{s}_i in einem nichtlinearen Zusammenhang mit der eigenen Geschwindigkeit \dot{s}_i sowie dem Folgeabstand Δs und der Relativgeschwindigkeit $\Delta \dot{s}$ zum vorausliegenden Hindernis:

$$\ddot{s}_i(t + \Delta t) = f(\dot{s}_i(t), \Delta s(t), \Delta \dot{s}(t)) \quad (\text{A.35})$$

Die fahrkinematischen Berechnungen erfolgen mit dem Zeitschrittverfahren, das die Bewegungsgrößen sukzessive berechnet. Als Zeitintervall Δt eignet sich die übliche menschliche Reaktionszeit, die nach [31] [97] zwischen 0,5 s und 2,0 s liegt.

A.2.2 Fahrdynamik

Der Fahrer gibt mit dem Fahrhebel die Traktionskraft vor, aus der die Beschleunigung resultiert. Die Fahrdynamik befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen Kraft (Ursache) und Bewegung (Wirkung). Im Folgenden werden bewegte Körper vereinfachend als starre Körper und als Massenpunkte betrachtet [60].

A.2.2.1 Kräfte am Massenpunkt

Gemäß dem Trägheitsgesetz versucht ein Körper seinen Bewegungszustand beizubehalten. Jede auf ihn einwirkende Kraft ändert diesen Zustand. Bei positiver Kraft wird der Körper beschleunigt und bei negativer Kraft, d. h. der Bewegung entgegenwirkend, verzögert.

Das Grundgesetz der Dynamik besagt, dass die auf einen Körper wirkende Kraft F gleich dem Produkt aus der trägen Masse m und der resultierenden Beschleunigung a des Körpers ist:

$$F = m a \quad (\text{A.36})$$

Reibungskräfte sind bewegungshemmende Kräfte, deren Ursache in der Wechselwirkung zwischen der Körperoberfläche und den Grenzflächen anderer Medien (fest, flüssig, gasförmig) liegt. Aus diesem Grund kommt jeder bewegte Körper irgendwann zum Stillstand. Nach dem von Coulomb aufgestellten Reibungsgesetz wird das Verhältnis aus der Reibungskraft F_R und Normalkraft F_N durch den Haftreibungsbeiwert μ_H ausgedrückt:

$$\mu_H = \frac{F_R}{F_N} \quad (\text{A.37})$$

Die gegenseitige Anziehung von Körpern angesichts ihrer Massen und Entfernung zueinander wird als Gravitation bezeichnet. Die Gewichtskraft F_G ist die Kraft, mit der die Masse m eines Körpers aufgrund seines Schwerfelds mit der Gravitationsbeschleunigung g angezogen wird:

$$F_G = m g \quad (\text{A.38})$$

An der Erdoberfläche ist g gleich $9,81 \text{ m/s}^2$.

A.2.2.2 Arbeit und Leistung

Die Arbeit W entspricht der mechanischen Energie, die auf einen Körper übertragen wird, wenn eine Kraft F längs eines Wegs s auf ihn einwirkt:

$$W(s) = \int_{s_0}^s F(s) ds \quad (\text{A.39})$$

Unter Annahme einer konstanten Kraft $F = \text{const}$ gilt:

$$\Delta W = F \cdot \Delta s \quad (\text{A.40})$$

Um eine Masse durch eine Kraft von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 auf die Endgeschwindigkeit v_1 zu beschleunigen, ist Beschleunigungsarbeit ΔW_a erforderlich. Man erhält sie, indem man die Kraft aus Formel (A.36) und den zurückgelegten Weg Δs aus Formel (A.33) in die Gleichung (A.40) einsetzt:

$$\begin{aligned} \Delta W_a &= m \cdot a \cdot \frac{v_1^2 - v_0^2}{2a} \\ &= \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_0^2) \end{aligned} \quad (\text{A.41})$$

Soll die Masse im Schwerfeld der Erde zwischen der Anfangslage h_0 und der Endlage h_1 entgegengesetzt zur Richtung der Schwerkraft verschoben werden, wird folgende Hubarbeit ΔW_h benötigt:

$$\begin{aligned} \Delta W_h &= m \cdot g \cdot \Delta h \\ &= m g (h_1 - h_0) \end{aligned} \quad (\text{A.42})$$

Ist die Geschwindigkeits- oder Höhendifferenz negativ, d. h. $v_0 > v_1$ bzw. $h_0 > h_1$, wird Arbeit abgegeben.

Die mittlere Leistung \bar{P} ist die verrichtete Arbeit ΔW pro Zeitintervall Δt :

$$\bar{P} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{W_1 - W_0}{t_1 - t_0} \quad (\text{A.43})$$

Die momentane Leistung $P(t)$ ist die Ableitung der Arbeit $W(t)$ nach der Zeit t :

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{d}{dt} [W(t)] \quad (\text{A.44})$$

Ist die Arbeit linear von der Zeitdauer abhängig, ist die mittlere und momentane Leistung identisch. Dies trifft bei konstanter Kraft und gleichförmiger Bewegung zu.

Setzt man die Gleichung (A.40) in (A.44) ein, erhält man mithilfe von Formel (A.26) die momentane Leistung:

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = F \cdot \frac{d}{dt} [s(t)] = F \cdot v(t) \quad (\text{A.45})$$

Aus Formel (A.44) folgt:

$$W(t) = \int_{t_0}^t P(t) dt \quad (\text{A.46})$$

Unter Annahme einer konstanten Leistung $P = \text{const}$ gilt:

$$\Delta W = P \cdot \Delta t \quad (\text{A.47})$$

Die Verfügbarkeit von Arbeit für einen Körper wird durch eine Zustandsgröße erfasst, die als Energie $E(t)$ bezeichnet wird. Die Änderung der Energie ΔE ist die Summe aller Teilarbeiten W_i :

$$\Delta E = E_1 - E_0 = \sum_i \Delta W_i \quad (\text{A.48})$$

Formel (A.48) zufolge führt jede geleistete Arbeit in Abhängigkeit des Vorzeichens zu einer Zunahme oder Abnahme der Energie. Damit sind Arbeit und Energie gleichwertig. Stimmen Anfangszustand E_0 und Endzustand E_1 überein, d. h. sind Ort und Geschwindigkeit des Körpers am Anfang und am Ende identisch, so ist $\Delta E = 0$.

A.2.2.3 Rotationsbewegung

Ein rollendes Rad führt neben der Translationsbewegung zusätzlich eine Rotationsbewegung aus. Bei Rotationsbewegungen ergibt sich das Drehmoment M eines Kräftepaars aus dem Produkt der Länge des Hebelarms l und dem Betrag der Kraft F :

$$M = l \cdot F \quad (\text{A.49})$$

Nach dem Grundgesetz der Dynamik gilt bei Rotationsbewegungen:

$$M = \Theta \cdot \alpha \quad (\text{A.50})$$

mit dem Massenträgheitsmoment Θ und der Winkelbeschleunigung α .

Unter Annahme eines konstanten Drehmoments $M = \text{const}$ gilt:

$$\Delta W = M \cdot \Delta \varphi \quad (\text{A.51})$$

Die momentane Leistung beträgt:

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \cdot \Delta \varphi}{\Delta t} = M \cdot \frac{d}{dt} [\varphi(t)] = M \cdot \omega(t) \quad (\text{A.52})$$

mit dem Rotationswinkel φ und der Winkelgeschwindigkeit ω .

A.3 Elektrotechnische Grundlagen

Die elektrotechnischen Grundlagen, basierend auf [60], nehmen Bezug auf das Versorgungsnetz (Kap. 2.2) und die Energieflussberechnung (Kap. 4).

A.3.1 Gleichstrom

In Abb. A.9 ist ein geschlossener Stromkreis mit einer Spannungsquelle und drei Widerständen dargestellt.

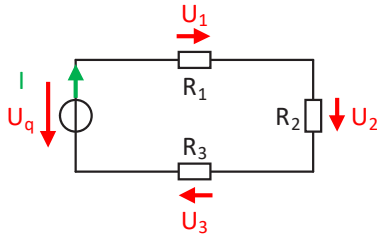


Abb. A.9: Geschlossener Gleichstromkreis

Die Spannung eines Punkts gegenüber einem willkürlich festgelegten Nullpunkt als Bezugspunkt im Leitersystem wird als Potenzial bezeichnet. Elektrischer Strom fließt immer von Punkten höheren Potentials zu Punkten niedrigeren Potentials.

A.3.1.1 Elektrischer Strom

Der elektrische Strom I entsteht durch die Bewegung einer elektrischen Ladung Q in der Zeit t . Bei konstanter Stromstärke entspricht er:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{A.53})$$

A.3.1.2 Elektrische Spannung

Die Quellenspannung U_q ist die Ursache des elektrischen Stroms, die die Ladungsträger in Bewegung setzt:

$$U_q = \frac{E_{zu}}{Q} \quad (\text{A.54})$$

Der Spannungsquelle muss zuvor selbst Energie E_{zu} zugeführt werden, wodurch die elektrischen Ladungen Q räumlich in positive und negative Ladungen getrennt werden.

Im geschlossenen äußeren Stromkreis fließt der elektrische Strom vom Pluspol zum Minuspol der Spannungsquelle. Dabei bewegt sich die Ladung durch die einzelnen elektrischen Widerstände des Stromkreises. Dort wird die Energie

E_{ab} abgegeben und in andere Energieformen umgesetzt. Der Energieumsatz bewirkt über jedem Widerstand einen Spannungsabfall U :

$$U = \frac{E_{ab}}{Q} \quad (\text{A.55})$$

A.3.1.3 Elektrischer Widerstand

Jeder Körper leitet den elektrischen Strom unterschiedlich. Der elektrische Widerstand R ist als Verhältnis aus dem Spannungsabfall U am Körper und der durch ihn fließenden Stromstärke I definiert. Dieser lineare Zusammenhang zwischen U und I wird als ohmsches Gesetz bezeichnet:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{A.56})$$

Der reziproke Wert von R ist der elektrische Leitwert G :

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{A.57})$$

Der elektrische Widerstand eines Leiters R_L ist proportional zu seiner Länge l_L und umgekehrt proportional zu seiner Querschnittsfläche A_L :

$$R_L = \varrho_L \cdot \frac{l_L}{A_L} \quad (\text{A.58})$$

Außerdem ist R_L vom Leitermaterial abhängig. Dies wird durch den Proportionalitätsfaktor ϱ_L mit der Maßeinheit $[\Omega \cdot \text{m}]$ ausgedrückt, der als spezifischer elektrischer Widerstand bezeichnet wird. Da der Leiterquerschnitt:

$$A_L = \frac{D_L^2 \cdot \pi}{4} \quad (\text{A.59})$$

bzw. der Leiterdurchmesser D_L häufig in $[\text{mm}^2]$ angegeben werden, ist für ϱ_L auch die nicht SI-konforme Maßeinheit $[\Omega \cdot (\text{mm}^2/\text{m})]$ üblich. Der spezifische elektrische Widerstand ist temperaturabhängig und nimmt bei Kaltleitern mit steigender Temperatur zu.

Die elektrische Leitfähigkeit κ_L ist der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstands:

$$\kappa_L = \frac{1}{\rho_L} \quad (\text{A.60})$$

Sie ist das Maß für die Fähigkeit des elektrischen Leiters, den elektrischen Strom zu leiten. Sie wird in der Maßeinheit [S/m] bzw. [S·(m/mm²)] angegeben. Der Widerstandsbelag R'_L der Leitung mit der Maßeinheit [Ω/m] beschreibt den ohmschen Widerstand einer elektrischen Leitung bezogen auf ihre Länge [51]:

$$R'_L = \frac{R_L}{l_L} = \frac{\rho_L}{A_L} \quad (\text{A.61})$$

Analog zu Formel (A.57) wird der reziproke Wert von R'_L als Leitwertbelag G'_L der Leitung mit der Maßeinheit [S·m] bezeichnet:

$$G'_L = G_L \cdot l_L = \kappa_L \cdot A_L \quad (\text{A.62})$$

A.3.1.4 Knotensatz (1. Kirchhoffsches Gesetz)

Der Knotensatz beruht auf dem Ladungserhaltungssatz. Demnach sind für einen bestimmten Zeitpunkt die einem Knoten zufließenden und abfließenden Ladungen gleich. Für die Knotenströme gelten die folgenden Vorzeichen:

- Positiv: Vom Knoten abfließende Ströme
- Negativ: Dem Knoten zufließende Ströme

Folglich ist die Summe aller elektrischen Stromstärken in einem Stromverzweigungspunkt mit ν Verzweigungen gleich null:

$$\sum_{k=1}^{\nu} I_k = 0 \quad (\text{A.63})$$

A.3.1.5 Maschensatz (2. Kirchhoffsches Gesetz)

Als Masche wird ein einzelner geschlossener Stromkreis bzw. Teilstromkreis bezeichnet. Wird durch eine Masche Ladung transportiert, ist dem Energieerhaltungssatz zufolge die zugeführte und abgegebene Energie gleich groß. Demzufolge ist in einer Masche die Summe der v Quellenspannungen (Formel (A.54): E_{zu}) und die Summe der w Spannungsabfälle an den Widerständen (Formel (A.55): E_{ab}) gleich null:

$$\sum_{i=1}^v U_{q_i} + \sum_{j=1}^w U_j = 0 \quad (\text{A.64})$$

A.3.1.6 Unverzweigter Stromkreis

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist nach dem Maschensatz die Quellenspannung gleich der Summe der Spannungsabfälle. Der sich ergebende Gesamtwiderstand R_{ges} bzw. Gesamtleitwert G_{ges} beträgt bei m Widerständen:

$$R_{ges} = \sum_{k=1}^m R_k \quad \text{bzw.} \quad G_{ges} = \left(\sum_{k=1}^m \frac{1}{G_k} \right)^{-1} \quad (\text{A.65})$$

Nach Formel (A.65) liegt an einem größeren Teilwiderstand der größere Spannungsabfall an und umgekehrt.

A.3.1.7 Verzweigter Stromkreis

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen ist nach dem Knotensatz die Gesamtstromstärke gleich der Summe der Teilstromstärken. Bei m Widerständen beträgt R_{ges} bzw. G_{ges} :

$$R_{ges} = \left(\sum_{k=1}^m \frac{1}{R_k} \right)^{-1} \quad \text{bzw.} \quad G_{ges} = \sum_{k=1}^m G_k \quad (\text{A.66})$$

Nach Formel (A.66) fließt durch den größeren Widerstand stets der kleinere elektrische Strom und umgekehrt.

A.3.1.8 Elektrische Energie und Leistung

Aus den Formeln (A.53), (A.55), (A.56) und (A.57) erhält man die umgesetzte elektrische Energie E :

$$E = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (\text{A.67})$$

und die elektrische Leistung P :

$$P = \frac{U \cdot Q}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = G \cdot U^2 \quad (\text{A.68})$$

A.3.2 Leitungsmodell

Das Leitungsmodell bezieht sich auf die Modellierung der Speisekabel und Fahrleitungen aus dem Kap. 2.2.2.1.

A.3.2.1 Leitungsbeläge

Elektrische Leitungen werden im Allgemeinen durch die in der Tab. A.1 aufgelisteten und auf eine bestimmte Länge Δl bezogenen Leitungsbeläge beschrieben. Die ersten beiden Leitungsbeläge werden als Längsbeläge, die letzten beiden als Querbeläge bezeichnet.

Tab. A.1: Beläge von elektrischen Leitungen

Bezeichnung	Formel	Maßeinheit
Widerstandsbelag	$R'_L = \Delta R / \Delta l$	[Ω/m]
Induktivitätsbelag	$L'_L = \Delta L / \Delta l$	[H/m]
Kapazitätsbelag	$C'_0 = \Delta C / \Delta l$	[F/m]
Ableitungsbelag	$G'_0 = \Delta G / \Delta l$	[S/m]

Der Widerstandsbelag drückt die ohmschen Verluste in stromführenden metallischen Leitern aus. Der Ableitungsbelag erfasst Isolationsverluste infolge von Kriechströmen, dielektrische Verluste aufgrund von Polarisierungseffekten

und Koronaverluste bedingt durch elektrische Entladungen in einem nicht leitenden Medium. Die Induktivitäts- und Kapazitätsbeläge resultieren aus dem Auf- und Abbau der magnetischen und elektrischen Felder zwischen den Hin- und Rückleitern. Dadurch treten u. a. Skin- und Proximity-Effekte auf, die zu inhomogenen Stromdichten in den Leitern bzw. zu Stromverdrängungen zwischen den benachbarten Leitern führen [64].

A.3.2.2 T-/ π -Ersatzschaltbild

Die Leitungsparameter können als konzentrierte Elemente in Form einer T- oder π -Ersatzschaltung dargestellt werden. In Abb. A.10 ist ein Leitungstück zwischen zwei Knoten auf der linken Seite als T-Glied und auf der rechten Seite als π -Glied abgebildet. Das π -Modell wird dem T-Modell in der knotenorientierten Berechnungspraxis (Kap. 4) vorgezogen, da hierbei kein zusätzlicher dritter Knoten benötigt wird [73].

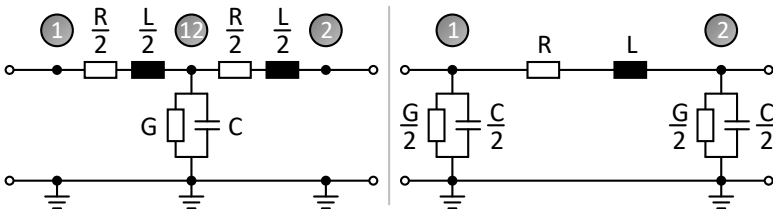


Abb. A.10: Elektrische Leitung als T- und π -Modell

In AC-Netzen wird die Gesamtimpedanz durch die Frequenz, die geometrische Anordnung der Leiter und durch die ohmsch-induktive Kopplung aller Leiter beeinflusst. In DC-Netzen hingegen gibt es keine elektromagnetische Kopplung zwischen den Hin- und Rückleiterströmen. Bei DC-Bahnen sind die Fahrschienen aus Gründen des Korrosionsschutzes hochohmig gegen Erde zu verlegen, damit die Rückströme in der vorgesehenen Rückleitung geführt werden können. Die Stromanteile, die dennoch aus den Fahrschienen austreten und über das Erdreich fließen, werden als Streuströme bezeichnet. Sie führen an den in der Erde verlegten Metallteilen zu elektrolytischer Korrosion. Nach [27]

liegt der Grenzwert für den Ableitungsbelag bei 0,5 S/km. Die Maßnahmen zum Schutz gegen die Streustromausbildung erhöhen das Gleis-Erde-Potenzial. Diese Spannungen längs der Strecke entlang werden als Schienenpotenziale bezeichnet und müssen die zulässigen Werte für den Personenschutz einhalten.

Je nach Spannungsebene und Stromart können die einzelnen Elemente R , L , C , G aus dem Leitungsmodell vernachlässigt werden [86]:

- $R \rightarrow 0$ in Hochspannungsnetzen
- $L \rightarrow 0$ in Gleichstromnetzen
- $C \rightarrow 0$ bei Freileitungen in Niederspannungsnetzen
- $G \rightarrow 0$ bei ausreichender Isolierung gegen die Erde

In dieser Arbeit wird angenommen, dass für die Modellierung der Gleichstromnetze von Nahverkehrsbahnen die letzten drei Punkte zutreffen. Folglich wird im Leitungsmodell nur noch der ohmsche Widerstand berücksichtigt.

Außerdem werden zur weiteren Vereinfachung Wechselstromanteile, Oberschwingungen sowie Ausgleichsvorgänge vernachlässigt.

A.3.2.3 Fahrleitungs-/Fahrschientypen bei DC-Bahnen

In DC-Nahverkehrsnetzen muss die Leitfähigkeit der elektrischen Leitungen aufgrund der geringen Nennspannung und der hohen Traktionsströme möglichst hoch sein. Häufig anzutreffende Fahrleitungstypen sind für Einfach- oberleitungen:

- Ri 100 (223 m Ω /km bzw. 250 m Ω /km)
- RiS 120 (186 m Ω /km bzw. 208 m Ω /km)

und für Kettenoberleitungen [78] [92]:

- RiS 120 + E-Cu70 (108 m Ω /km bzw. 120 m Ω /km)
- RiS 120 + E-Cu95 (100 m Ω /km bzw. 111 m Ω /km)
- RiS 120 + E-Cu150 (73 m Ω /km bzw. 81 m Ω /km)

Die Fahrleitungen bestehen entweder aus reinem Kupfer oder aus Silberlegierungen. Die Zahlen in der Bezeichnung der Fahrleitungstypen repräsentieren den Leitungsquerschnitt in [mm²]. Der Fahrdrahtverschleiß wird durch die Kontaktierung des Stromabnehmers mit der Oberleitung verursacht. Nach BOStrab ist eine Fahrdrahtabnutzung von maximal 40 % zulässig [20]. Die Angaben zum temperaturabhängigen Widerstandsbelag beziehen sich auf ein Gleis und auf eine Temperatur von 20 °C bzw. 50 °C. Die Erwärmung der Fahrleitungen wird einerseits durch den Leiterstrom und andererseits durch die meteorologischen Umweltbedingungen wie Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Windrichtung beeinflusst. Stromschienen sind aus Aluminium oder Stahl und haben im Vergleich zu Oberleitungen mit ca. 4830 mm² einen wesentlich größeren Querschnitt [90].

Häufig anzutreffende Fahrschientypen sind Rillenschienen im straßenbündigen Verkehr:

- Ri 59 N
- Ph 37 a

und Vignolschienen auf eigenen Gleiskörpern [51] [82]:

- S 49 (6297 mm²)
- S 54 (6948 mm²)
- UIC 60 (7686 mm²)

A.3.3 Netzwerkanalyse

Die Netzwerkanalyse bildet die Grundlage der Energieflussberechnung (Kap. 4). Ein elektrisches Netzwerk mit k Knoten und z Zweigen besitzt [75]:

- $n = (k - 1)$ unabhängige Knotengleichungen
- $m = z - (k - 1)$ unabhängige Maschengleichungen
- z Spannungs-Strom-Zweigbeziehungen

Eine Masche ist ein über Zweige geschlossener Umlauf. Ein Zweig ist eine Verbindung zwischen zwei Knoten. In Abb. A.11 ist ein einfaches Netzwerk mit einer Spannungsquelle, einer Stromquelle und sechs Impedanzen abgebildet. Das Netzwerk besteht aus $k = 4$ Knoten und $z = 6$ Zweigen.

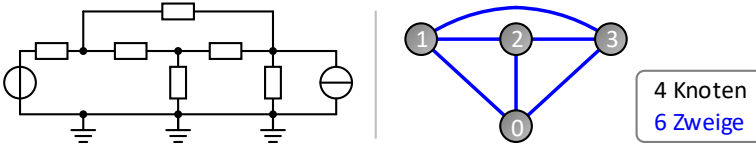


Abb. A.11: Netzschaltbild und Netzgraph

Ein System von unabhängigen Maschengleichungen erhält man, wenn bei jedem Maschenumlauf mindestens ein neuer Zweig einbezogen wird, der noch in keiner der vorherigen Maschen enthalten war. Unabhängige Maschen können mit der Methode des vollständigen Baums gefunden werden. Ein vollständiger Baum ist ein nicht geschlossener Linienzug, der alle k Knoten miteinander verbindet. Alle Zweige, die zum vollständigen Baum gehören, werden als Baumzweige bezeichnet. Alle übrigen Zweige heißen Brücken-zweige. Jede unabhängige Masche enthält genau einen Brücken-zweig, aber beliebig viele Baumzweige.

Für die Netzwerkanalyse stehen mehrere Verfahren zur Verfügung:

- Zweigstromverfahren
- Maschenstromverfahren
- Knotenpotenzialverfahren

Als weiteres Verfahren steht das Überlagerungsverfahren nach dem Superpositionsprinzip zur Verfügung. Da bei der Energieflussberechnung keine linearen Zusammenhänge gelten, eignet es sich hierfür nicht [75].

A.3.3.1 Zweigstromverfahren

Im Zweigstromverfahren werden alle n Knotengleichungen und m Maschengleichungen unter Einbezug der z Spannungs-Strom-Beziehungen der Netzwerkelemente in einem Gleichungssystem (GLS) aufgestellt. Daraus ergeben sich z Gleichungen mit z Unbekannten, die zu lösen sind. Aufgrund der großen Anzahl an Gleichungen ist das Zweigstromverfahren ineffizient und eignet sich für größere Netzwerke nicht.

A.3.3.2 Maschenstromverfahren

Im Maschenstromverfahren wird gegenüber dem Zweigstromverfahren die Anzahl der Gleichungen reduziert, indem auf die Knotengleichungen verzichtet wird. Dazu wird für jede unabhängige Masche ein Maschenstrom als Hilfsgröße eingeführt, der nur in dieser Masche fließt. Aus den m unabhängigen Maschengleichungen ergibt sich ein GLS der Form:

$$[\underline{Z}] [\underline{I}] = [\underline{U}] \quad (\text{A.69})$$

mit den folgenden Elementen:

- Maschenimpedanzmatrix $[\underline{Z}]$
- Maschenstromvektor $[\underline{I}]$
- Spannungsquellenvektor $[\underline{U}]$

Die Bestimmung von unabhängigen Gleichungen mit der Baumsuche gestaltet sich als aufwändig. Das gilt besonders für dynamische Netze, in denen sich die Netztopologie ständig ändert.

A.3.3.3 Knotenpotenzialverfahren

Im Knotenpotenzialverfahren wird auf die Maschengleichungen verzichtet. Dazu werden zwischen den einzelnen Knoten und einem frei wählbaren Bezugsknoten sogenannte Knotenspannungen als Hilfsgrößen eingeführt. Als Resultat erhält man aus den n unabhängigen Knotengleichungen ein GLS der Form:

$$[\underline{Y}] [\underline{U}] = [\underline{I}] \quad (\text{A.70})$$

mit den folgenden Elementen:

- Knotenadmittanzmatrix $[\underline{Y}]$
- Knotenspannungsvektor $[\underline{U}]$
- Stromquellenvektor $[\underline{I}]$

Das Knotenpotenzialverfahren bietet den Vorteil, dass sich das GLS der Knotenspannungen direkt aus dem Netzwerk ablesen lässt. Außerdem sind nicht vorhandene Zweige aus rechentechnischer Sicht mit Admittanzen ($\underline{Y} = 0$) leichter zu handhaben als mit Impedanzen ($\underline{Z} \rightarrow \infty$). Daher bildet dieses Verfahren die Grundlage für alle Simulationsprogramme, die elektrische Schaltungen analysieren.

In DC-Netzen ändern sich die Polarität der Spannung und die Richtung des Stromes zeitlich nicht. Die Frequenz und der Phasenverschiebungswinkel sind gleich null. Folglich bestehen die Admittanzen nur aus ihrem Wirkleitwert G und die Leistungen nur aus ihrem Wirkleistungsanteil P , so dass weder Blindwiderstände noch Blindleistungen auftreten.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	DC-Nahverkehrsbahnen in Deutschland	6
Abb. 1.2:	Karlsruher Verkehrsverbund.....	7
Abb. 1.3:	Unterwerke zwischen dem 3AC- und dem DC-Netz.....	9
Abb. 1.4:	Ragone-Diagramm.....	15
Abb. 1.5:	Nahverkehrssystem	20
Abb. 1.6:	Energieflussaufteilung unter den Fahrzeugen	23
Abb. 1.7:	Aufbau des Simulationsprogramms „BSTsim“	26
Abb. 2.1:	Spurgeführtes und elektrisches Netzwerk.....	27
Abb. 2.2:	Verkehrsnetzinfrastruktur	28
Abb. 2.3:	Knoten des Verkehrsnetzes	29
Abb. 2.4:	Kante als Knotenverbindung.....	31
Abb. 2.5:	Kreuzung mit zwei, drei und vier Knotentoren.....	33
Abb. 2.6:	Kantenpunkt auf einer Kante	34
Abb. 2.7:	Kante des Verkehrsnetzes.....	34
Abb. 2.8:	Fahrbahnanschlüsse bei äußeren und inneren Kanten.....	36
Abb. 2.9:	Gleisbelegung auf äußeren Kanten	37
Abb. 2.10:	Gleisbelegung auf inneren Kanten	37
Abb. 2.11:	Versorgungsnetzinfrastruktur.....	40
Abb. 2.12:	Knoten des Versorgungsnetzes	41
Abb. 2.13:	Leitungen des Versorgungsnetzes.....	44
Abb. 2.14:	Versorgungsleitungen im DC-Netz	46
Abb. 2.15:	Hin- und Rückleiter.....	47
Abb. 2.16:	Einspeisepunkte und Streckentrenner	48
Abb. 2.17:	Fahrleitungs- und Fahrschienenpotenziale.....	50
Abb. 2.18:	Fahrplan	51
Abb. 2.19:	Zeitlicher Fahrgastindex.....	53
Abb. 2.20:	Fahrwege zwischen den Haltestellen.....	55
Abb. 2.21:	Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit	59

Abb. 2.22:	Umlaufplan.....	61
Abb. 2.23:	Mögliche Abfolgen von Umlaufplanfahrten.....	66
Abb. 2.24:	Ablaufdiagramm für die Signallichtzustandsänderung.....	68
Abb. 2.25:	Signalmeldepunkte vor Signallichtern.....	68
Abb. 2.26:	Quadranten im Koordinatensystem einer Kreuzung.....	74
Abb. 2.27:	Überquerungsfälle in der signalgesteuerten Kreuzung.....	75
Abb. 2.28:	Signalsteuerung bei ein- und viergleisigen Fahrstrecken.....	77
Abb. 3.1:	Netzsimulation.....	79
Abb. 3.2:	Programmablaufdiagramm der Fahrzeugsimulation.....	83
Abb. 3.3:	Fahrspielberechnung A (vor Energieflussberechnung).....	84
Abb. 3.4:	Fahrspielberechnung B (nach Energieflussberechnung).....	86
Abb. 3.5:	Fahrstreckensektoren.....	91
Abb. 3.6:	Haltepunkt als Hindernis.....	97
Abb. 3.7:	Signal als Hindernis.....	97
Abb. 3.8:	Geschwindigkeitslimit als Hindernis.....	98
Abb. 3.9:	Fahrzeug als Hindernis.....	99
Abb. 3.10:	Geschwindigkeitsabhängige Wunschverzögerung.....	103
Abb. 3.11:	Sichtwinkel zum vorausfahrenden Fahrzeug.....	104
Abb. 3.12:	Wahrnehmung von Relativbewegungen.....	105
Abb. 3.13:	Stützpunkte der Wahrnehmungsschwellen.....	108
Abb. 3.14:	Fahrerzonendiagramm.....	111
Abb. 3.15:	Zuweisungsbaum für die Fahrerzonenbereiche.....	112
Abb. 3.16:	Δs - und Δv -abhängige Zonenbereiche.....	113
Abb. 3.17:	Δs -abhängige Wunschverzögerung.....	115
Abb. 3.18:	v_i -abhängige Wunschbeschleunigung.....	117
Abb. 3.19:	Δs -abhängige Wunschbeschleunigung.....	117
Abb. 3.20:	Δv -abhängige Wunschbeschleunigung.....	118
Abb. 3.21:	Parametervariation im Fahrerzonendiagramm.....	119
Abb. 3.22:	Verspätung und Verfrühung.....	120
Abb. 3.23:	Ausrollvorgang.....	122
Abb. 3.24:	Fahrwiderstand.....	124
Abb. 3.25:	Fahrzeugtraktionssystem.....	129
Abb. 3.26:	Traktionskraft- und Traktionsleistungshyperbel.....	131

Abb. 3.27:	Traktionsachsenverhältnis beim 6-/8-achsigen Fahrzeug.....	133
Abb. 3.28:	Antriebskraft und positive Fahrwiderstandskraft	135
Abb. 3.29:	Bremskraft und negative Fahrwiderstandskraft	137
Abb. 3.30:	Leistungsverteilung im Fahrzeug	140
Abb. 3.31:	Bewegungs- und Lageenergie des Fahrzeugs	148
Abb. 4.1:	Belastungsknotenstrom und Zweigströme	154
Abb. 4.2:	Systembezogene Energieflüsse	166
Abb. 4.3:	Netzbezogene Energieflüsse.....	167
Abb. 4.4:	Unterwerksschaltplan	172
Abb. 4.5:	Unterwerkseinsatzschaltbild	172
Abb. 4.6:	Unterwerksmodell.....	173
Abb. 4.7:	Energieflüsse in Unterwerksknoten	175
Abb. 4.8:	Knotenmodifikationsdiagramm für Unterwerksknoten	178
Abb. 4.9:	Energieflüsse in Speicherknoten	179
Abb. 4.10:	Knotenmodifikationsdiagramm für Speicherknoten	182
Abb. 4.11:	Energieflüsse in Anlagenknoten	184
Abb. 4.12:	Knotenmodifikationsdiagramm für Anlagenknoten	186
Abb. 4.13:	Energieflüsse in Fahrzeugknoten	187
Abb. 4.14:	Knotenmodifikationsdiagramm für Fahrzeugknoten	190
Abb. 4.15:	Aufteilung der Fahrleitung in Fahrzeugabschnitte	194
Abb. 4.16:	Besetzungsmuster der Knotenleitwertmatrix.....	195
Abb. 4.17:	Ablaufdiagramm des Knotenmodifikationsverfahrens	197
Abb. 4.18:	Energiebilanz für das Nahverkehrssystem	202
Abb. 4.19:	Energiekreislauf	206
Abb. 5.1:	Karlsruher Netz.....	212
Abb. 5.2:	Höhenprofil eines Streckenabschnitts der Linie S1/S11	214
Abb. 5.3:	VBK-/AVG-Liniennetz.....	217
Abb. 5.4:	Systemenergie im Szenario I.....	225
Abb. 5.5:	Aufteilung der Systemenergie	226
Abb. 5.6:	Unterwerkseinspeiseenergie im Szenario I.....	228
Abb. 5.7:	Aufteilung der Unterwerkseinspeiseenergie	229
Abb. 5.8:	Vergleich der Unterwerkseinspeisungen	231
Abb. 5.9:	Vergleich der Widerstandsbremsverluste	232

Abb. 5.10:	Simulationszeitschrittanteil mit Leistungsreduzierungen	234
Abb. 5.11:	Fahrzeugexterne Energiegrößen	237
Abb. 5.12:	Fahrzeuginterne Energiegrößen	238
Abb. 5.13:	Prozentuale Fahrzeugbilanzgrößen	239
Abb. 5.14:	Fahrzeugangebotsenergie im Szenario I	239
Abb. 5.15:	Aufteilung der Fahrzeugangebotsenergie	241
Abb. 5.16:	Unterwerk Uw07 im Szenario I	242
Abb. 5.17:	Unterwerk Uw37 im Szenario I	243
Abb. 5.18:	Fahrzeug der Linie 3 im Szenario I	244
Abb. 5.19:	Fahrzeug der Linie S2 im Szenario I	245
Abb. 5.20:	Unterwerksauslastung im Szenario I	248
Abb. 5.21:	Unterwerksauslastung bei DC 825 V und im Szenario XII.....	249
Abb. 5.22:	Unterwerk Uw07 im Szenario VI.....	251
Abb. 5.23:	Unterwerk Uw07 im Szenario IX.....	251
Abb. 5.24:	Fahrzeug der Linie S2 im Szenario VI.....	252
Abb. 5.25:	Fahrzeug der Linie S2 im Szenario XII	253
Abb. 5.26:	Energieumsätze in mobilen Speichern	254
Abb. 5.27:	Fahrzeug der Linie 3 im Szenario VII.....	255
Abb. 5.28:	Fahrzeug der Linie S2 im Szenario VII.....	256
Abb. 5.29:	Energieumsätze in stationären Speichern.....	257
Abb. 5.30:	Stationärer Speicher Es0708 im Szenario VIII	259
Abb. 5.31:	Stationärer Speicher Es4748 im Szenario VIII	260
Abb. 5.32:	Fahrzeug der Linie S1 im Szenario I	261
Abb. 5.33:	Fahrzeug der Linie S1 im Szenario VII.....	261
Abb. 5.34:	Fahrzeug der Linie S1 im Szenario VIII.....	262
Abb. A.1:	Koordinaten im drei- und zweidimensionalen Raum	272
Abb. A.2:	Kartesische Koordinatensysteme in der GUI.....	273
Abb. A.3:	Gerade und Lotfußpunkt.....	275
Abb. A.4:	Streckensteigung	278
Abb. A.5:	Gleisabhängige Fahrbahnkoordinaten	279
Abb. A.6:	Dichtefunktion der Normalverteilung	282
Abb. A.7:	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung ($a = \text{const}$)	285
Abb. A.8:	Fahrspielzyklus.....	287

Abb. A.9: Geschlossener Gleichstromkreis	292
Abb. A.10: Elektrische Leitung als T- und π -Modell	297
Abb. A.11: Netzschaltbild und Netzgraph	300

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1:	Vergleich der Verkehrsmittel im ÖPNV	4
Tab. 2.1:	Knotenparameter	29
Tab. 2.2:	Kantenprofilparameter	39
Tab. 2.3:	Leitungsparameter	45
Tab. 2.4:	Leerfahrten	65
Tab. 2.5:	Signallichtzustände.....	67
Tab. 2.6:	Signalparameter	69
Tab. 3.1:	Konstante Simulationsparameter.....	81
Tab. 3.2:	Allgemeine Simulationsparameter	82
Tab. 3.3:	Endstationsparameter	87
Tab. 3.4:	Fahrzeugstandorte während des Simulationsablaufs	93
Tab. 3.5:	Zeitabhängige Fahrer- und Hindernisparameter	95
Tab. 3.6:	Fahrerindividuelle Folgeabstandsparameter	100
Tab. 3.7:	Fahrerindividuelle Relativgeschwindigkeitsparameter	101
Tab. 3.8:	Fahrerindividuelle Beschleunigungsparameter	110
Tab. 3.9:	Fahrerindividuelle Verspätungsparameter	120
Tab. 3.10:	Fahrerindividuelle Ausrollparameter	122
Tab. 3.11:	Momentane Simulationsparameter	123
Tab. 3.12:	Fahrzeugspezifische Fahrwiderstandsparameter	125
Tab. 3.13:	Fahrzeugspezifische Traktionssystemparameter	130
Tab. 3.14:	Fahrzeugspezifische Komponentenparameter	140
Tab. 4.1:	Knotenzustände in Gleichstromnetzen	152
Tab. 4.2:	Eigenschaften von elektrischen Knoten	164
Tab. 4.3:	Systembezogene Energieflüsse	166
Tab. 4.4:	Netzbezogene Energieflüsse.....	167
Tab. 4.5:	Unterwerksparameter	174
Tab. 4.6:	Speicherparameter.....	178
Tab. 4.7:	Anlagenparameter	183

Tab. 4.8:	Simulationsparameter der Energieflussberechnung	192
Tab. 5.1:	Unterwerke und Leerlaufspannungen.....	215
Tab. 5.2:	Linienparameter	218
Tab. A.1:	Beläge von elektrischen Leitungen	296

Literaturverzeichnis

- [1] Aeberhard, Martin; Basler, Egon; Deutschmann, Peter;
Holderegger, Martin; Kaiser, Walter:
*Zugfahrtsimulationen
in landesweiten Bahnenergieversorgungsnetzen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5, 2015
- [2] Ahlbrecht, Hans:
Regeneratives Bremsen
In: Skudelny, Hans-Christoph (Hrsg.):
Elektrische Antriebe für Fahrzeuge des öffentlichen Nahverkehrs,
ETG-Fachbericht 50, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1994
- [3] Albrecht, Klaus; Monzó Perez, Miguel; Wieden, Ingo:
*Komfortable Niederflur-Straßenbahnen mit Energiespeicher
für Rostock*
In: Elektrische Bahnen, Heft 1, 2015
- [4] Arrillaga, Jos; Watson, Neville R.:
Computer Modelling of Electrical Power Systems
John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2001
- [5] Barnes, Mike; Chymera, Martyn Z.; Holden, John;
Renfrew, Alasdair C.:
Modeling electrified transit systems
In: IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume 59, Issue 6),
IEEE, 2010
- [6] Barrade, Philippe; Destraz, Blaise; Klohr, Markus; Rufer, Alfred:
*Study and Simulation of the Energy Balance
of an Urban Transportation Network*
European Conference on Power Electronics and Applications,
Aalborg, IEEE, 2007

- [7] Barrero, Ricardo; Mierlo, Joeri van; Tackoen, Xavier:
Energy savings in public transport
In: IEEE Vehicular Technology Magazine (Volume 3, Issue 3),
IEEE, 2008
- [8] Becker, Winfried:
*Einfluss der Fahrleitungsschaltung von Gleichstrombahnen
auf die Netzbremung der Fahrzeuge*
In: Elektrische Bahnen, Heft 10, 1992
- [9] Becker, Winfried; George, Gerhard; Schlechter, Ewald:
*Entwicklung der Bahnenergieversorgung
für Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 6, 2003
- [10] Becker, Winfried; Gottschlich, Helmut; Heilmaier, Martin:
Aufbau und Auslegung moderner Gleichstrom-Unterwerke
In: Klau, Ragnar (Hrsg.):
Energieversorgung von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen,
ETG-Fachbericht 36, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1991
- [11] Becker, Winfried; Parsch, Claus Peter:
Simulation von Gleichstrombahnen zur Systemoptimierung
In: Klau, Ragnar (Hrsg.):
Energieversorgung von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen,
ETG-Fachbericht 36, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1991
- [12] Beek, Martin in der; Kerber, Andreas; Nowak-Hertweck, Georg:
*Rhein-Neckar-Verkehr –
Unternehmensfusion mit Vorbildcharakter*
In: Elektrische Bahnen, Heft 11, 2010
- [13] Behmann, Uwe:
Energiebedarf und Belastungsspitzen bei kurzen Halteabständen
In: Elektrische Bahnen, Heft 3, 2004

- [14] Biella, Wolfgang:
Die rechnergesteuerte adaptive Fahrkennlinienvorgabe zur Energieoptimierung bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen
Dissertation, Technische Universität Berlin, 1988
- [15] Biesenack, Hartmut; George, Gerhard; Hofmann, Gerhard; Schmieder, Axel:
Energieversorgung elektrischer Bahnen
B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH,
Wiesbaden, 2006
- [16] Bindewald, Klaus:
50 Jahre Albtal-Verkehrs-Gesellschaft
In: Elektrische Bahnen, Heft 1-2, 2008
- [17] Block, Rüdiger:
Hochleistungsspeicher für die Variobahn
In: Verkehr und Technik, Heft 3, 2012
- [18] Bopp, Karl:
Gleichstrom-Bahnnetz mit Rücklieferung der Bremsenergie
In: Elektrische Bahnen, Heft 8, 1987
- [19] Briest, Ralf; Kähler, Steffen; Schusdzarra, Waldemar; Victor, Matthias:
Einsatz rotierender Energiespeicher im Fahrleitungsnetz der üstra Hannover
In: Elektrische Bahnen, Heft 5-6, 2000
- [20] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz:
Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOSTrab)
Bundesrepublik Deutschland, 1987

- [21] Cai, Yueming; Case, S. H.; Irving, Malcolm R.:
Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking
In: IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution (Volume 142, Issue 5),
The Institution of Engineering and Technology (IET), 1995
- [22] Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford:
Introduction to Algorithms
The MIT Press, Cambridge, 2009
- [23] Cornic, Daniel:
Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation
Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, 2010
- [24] Cremer, Michael:
Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen
In: Syrbe, Max; Thoma, Manfred (Hrsg.):
Fachberichte Messen, Steuern, Regeln (Band 3), Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1979
- [25] Das, J. C.:
Power System Analysis – Short-Circuit Load Flow and Harmonics
CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2012
- [26] Diener, Thomas; Jacob, Klaus; Quaas, Harry; Thiede, Jens:
Elektrotechnische Ausrüstung der Dresdner Straßenbahn
In: Elektrische Bahnen, Heft 1, 2015
- [27] DIN EN 50122-2, VDE 0115-4:
Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen
Beuth Verlag GmbH / VDE-Verlag GmbH, 2011

- [28] DIN EN 50163, VDE 0115-102:
*Bahnanwendungen –
Speisespannungen von Bahnnetzen*
Beuth Verlag GmbH / VDE-Verlag GmbH, 2005
- [29] Edel, Roland; Schneider, Egid; Schweller, Mike:
*Systemauslegung der Bahnstromversorgung
von Gleichstrom- und Wechselstrombahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 7, 1998
- [30] Filipović, Žarko:
*Elektrische Bahnen –
Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2015
- [31] Fritzsche, Hans-Thomas:
*Entwicklung und Anwendung eines mikroskopischen Modells
zur Verkehrssimulation auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen*
Dissertation, Universität Stuttgart, 1999
- [32] Fronzke, Hans-Joachim; Maack, Andreas; Schumann, Frank:
Bahnenergieversorgung der Schweriner Straßenbahn
In: Elektrische Bahnen, Heft 12, 2011
- [33] Giebel, Sascha; Keucher, Stephan; Schütze, Wolfgang:
Straßenbahn-Energiemonitoring
In: Der Nahverkehr, Heft 9, 2014
- [34] Godbersen, Christian; Höschler, Paul:
*Erfahrungen mit statischen Energiespeichern
in der DC-Bahnenergieversorgung*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5, 2004
- [35] Graham, Carl; Talay, Denis:
*Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods –
Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013

- [36] Grindler, Gerhard:
Leerlaufspannungen der AVG- und VBK-Unterwerke
Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, Karlsruhe, 2015
- [37] Gunselmann, Walter:
Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems
European Conference on Power Electronics and Applications,
Dresden, IEEE, 2005
- [38] Gunselmann, Walter; Höschler, Paul; Reiner, Gerhard:
Energiespeichereinsatz im Stadtbahnnetz Köln
In: Elektrische Bahnen, Heft 11-12, 2000
- [39] Habel, Dietrich; Kähler, Steffen; Lösel, Thomas:
Schwungmassen-Energiespeicher für Stadtbahnnetze
In: Elektrische Bahnen, Heft 7, 2003
- [40] Hardel, Sascha; Körner, Sven; Stephan, Arnd:
Leistung oder Spannung?
Korrekte elektrische Netzberechnung für Bahnen
In: Elektrische Bahnen, Heft 8-9, 2014
- [41] Hennig, Erik; Stephanblome, Thomas:
Speichertechnologien für die elektrische Energieversorgung
In: Elektrische Bahnen, Heft 11-12, 2000
- [42] Herbener, Frank:
Batterien und Schwungradspeicher
und deren Verwendung in USV-Anlagen
Piller Group GmbH, Homepage: www.piller.com,
Osterode, 2011
- [43] Hofmann, Gerhard; Röhlig, Steffen:
Objektorientierte Modellierung von Bahnnetzen
In: Elektrische Bahnen, Heft 3, 1995

- [44] Huber, Thomas Claudius:
*Windows Presentation Foundation –
Das umfassende Handbuch*
Galileo Press, Bonn, 2010
- [45] Hubschneider, Hans:
*Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr
und Öffentlichen Personennahverkehr*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 26,
Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1983
- [46] Janicki, Jürgen; Reinhard, Horst:
Schienefahrzeugtechnik
Bahn Fachverlag, Heidelberg Mainz, 2008
- [47] Jonassen, Ingo; Peters, Arne; Steinhorst, Frank:
*Stationärer Schwungmassen-Energiespeicher
bei der Hamburger U-Bahn*
In: Elektrische Bahnen, Heft 4, 2008
- [48] Kähler, Steffen:
Energiesparmaßnahmen im Stadtbahnnetz der üstra
In: Elektrische Bahnen, Heft 8-9, 2002
- [49] Kansy, Thorsten; Louis, Dirk; Strasser, Shinja:
*Microsoft Visual C# 2010 –
Das Entwicklerbuch*
O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG, Köln, 2010
- [50] Karlsruher Verkehrsverbund GmbH
Homepage: www.kvv.de, Karlsruhe, 2016
- [51] Kießling, Friedrich; Puschmann, Rainer; Schmieder, Axel:
Contact Lines for Electric Railways
Publicis Kommunikationsagentur GmbH, München, 2001

- [52] Klausner, Sven; Lehnert, Martin:
*Betriebsspezifische Auslegung von Energiespeichern
für Straßenbahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5, 2008
- [53] Klausner, Sven; Lehnert, Martin:
Auslegung und Steuerung mobiler Traktionsenergiespeicher
In: Elektrische Bahnen, Heft 9, 2009
- [54] Klinge, Ralf; Röhlig, Steffen:
Bewertungskriterien zur Rückspeisefähigkeit von Triebfahrzeugen
In: Elektrische Bahnen, Heft 7, 1996
- [55] Klohr, Markus; Maroschik, Andreas:
*Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen –
Das erste Serienprojekt*
In: Elektrische Bahnen, Heft 8-9, 2012
- [56] Klohr, Markus; Pagiela, Stanislaus; Steiner, Michael:
*Energy Storage System with UltraCaps
on Board of Railway Vehicles*
European Conference on Power Electronics and Applications,
Aalborg, IEEE, 2007
- [57] Köhler, Bert; Mindner, Stefan:
*Umstellung der Nennspannung auf DC 750 V
bei der Straßenbahn in Potsdam*
In: Elektrische Bahnen, Heft 1-2, 2016
- [58] Lehmann, Helmut:
Fahrdynamik der Zugfahrt
Shaker Verlag, Aachen, 2005
- [59] Leutzbach, Wilhelm:
Introduction of the Theory of Traffic Flow
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1988

- [60] Lindner, Helmut:
Physik für Ingenieure
Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006
- [61] Lösel, Thomas:
*Simulationsprogramm zur Auslegung und Nachrechnung
von Gleichstromfahrzeugen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5, 1996
- [62] Lösel, Thomas; Röhlig, Steffen:
*Stand der Entwicklung von Energiespeichern
bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 10, 2004
- [63] Lucas, Klaus:
*Thermodynamik –
Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [64] Martini, Heinrich:
Theorie der Übertragung auf elektrischen Leitungen
Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg, 1974
- [65] Matthews, Volker:
Bahnbau
Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien,
Wiesbaden, 2011
- [66] Meinert, Michael:
New mobile energy storage system for rolling stock
European Conference on Power Electronics and Applications,
Barcelona, IEEE, 2009
- [67] Menz, Uwe:
Einsatz von Schwungmassenspeichern in Straßenbahnnetzen
Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag,
Aachen, 2002

- [68] Momoh, James A.:
Electric Power System Applications of Optimization
Marcel Dekker, Inc., New York, 2001
- [69] Moninger, Friedrich:
Drehmassenspeicher in Nahverkehrssystemen
In: Elektrische Bahnen, Heft 8, 1998
- [70] Natarajan, Ramasamy:
Computer-Aided Power System Analysis
Marcel Dekker, Inc., New York Basel, 2002
- [71] Nydegger, Stefan:
*Untersuchung von Maßnahmen zur Energieersparnis
bei DC-Bahnen mittels Netzsimulation*
In: Elektrische Bahnen, Heft 8-9, 2014
- [72] Oswald, Bernd R.:
*Netzberechnung –
Berechnung stationärer und quasistationärer Betriebszustände
in Elektroenergieversorgungsnetzen*
VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1992
- [73] Oswald, Bernd R.:
*Berechnung von Drehstromnetzen –
Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge
mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern*
Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [74] Pacht, Jörn:
*Systemtechnik des Schienenverkehrs –
Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*
Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016
- [75] Paul, Reinhold:
Elektrotechnik für Informatiker
B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH,
Wiesbaden, 2004

- [76] Röhlig, Steffen:
*Beschreibung und Berechnung der Bahnbelastung
von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*
Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 1992
- [77] Röhlig, Steffen:
DC-Bahnen in Deutschland
In: Elektrische Bahnen, Heft 3, 2006
- [78] Röhlig, Steffen; Rothe, Matthias; Schmidt, Peter; Weschta, Alois:
*Höhere Leistungsfähigkeit der Bahnenergieversorgung
bei modernen Stadt- und U-Bahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 11, 1993
- [79] Sachs, Karl:
*Elektrische Triebfahrzeuge –
Erster Band: Allgemeine Grundlagen und Mechanischer Teil*
Springer Verlag, Wien, 1973
- [80] Şanal, Ziya:
Mathematik für Ingenieure
Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015
- [81] Scherrans, Thomas; Schumacher, Reinhold; Stephan, Arnd:
*Auslegung der Bahnenergieversorgung
der Mannheimer Verkehrs-AG für den Stadtbahnbetrieb*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5 und 8, 1997
- [82] Schiemann, Wolfgang:
*Schienenverkehrstechnik –
Grundlagen der Gleistrassierung*
B. G. Teubner GmbH, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2002
- [83] Schlunegger, Hans:
Wechselrichterwerke bei DC-Bahnen
In: Elektrische Bahnen, Heft 11, 2003

- [84] Scholten, Johannes; Steiner, Michael:
Energy Storage on board of DC fed railway vehicles
35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference,
Aachen, IEEE, 2004
- [85] Scholz, Gero:
*IT-Systeme für Verkehrsunternehmen –
Informationstechnik im öffentlichen Personenverkehr*
dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg, 2012
- [86] Schwab, Adolf J.:
*Elektroenergiesysteme –
Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*
Springer-Berlin Verlag, Heidelberg, 2015
- [87] Smith, Josh:
WPF Apps with the Model-View-ViewModel Design Pattern
Homepage: www.msdn.microsoft.com, 2009
- [88] Söffker, Carsten; Tutzauer, René:
*Bahn-Antriebstechnik für sensible Streckenabschnitte
und zur Energierückgewinnung*
In: Elektrische Bahnen, Heft 7, 2007
- [89] Springmann, Markus:
*Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors
mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb*
Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015
- [90] Steimel, Andreas:
Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung
Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2006
- [91] Täubner, Frank:
Reduzierung des Energiebedarfs durch Schwungradspeicher
Rosseta Technik GmbH, Homepage: www.rosseta.de,
Roßlau, 2009

- [92] Thiede, Jens:
*Strombelastbarkeit von Oberleitungen
bei Straßen- und Stadtbahnen*
In: Elektrische Bahnen, Heft 5, 1997
- [93] Union Internationale des Transports Publics:
World Report on Metro Automation
Homepage: www.uitp.org, Brüssel, 2016
- [94] Weindel, Frank:
Bestandslagepläne der AVG
Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, Karlsruhe, 2011
- [95] Wende, Dietrich:
Fahrdynamik des Schienenverkehrs
B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH,
Wiesbaden, 2003
- [96] Werfel, Frank N.:
Magnetgelagerte Schwungmassenspeicher
In: Elektrische Energiespeicher – VDI Berichte 2058,
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2009
- [97] Wiedemann, Rainer:
Simulation des Straßenverkehrsflusses
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8,
Universität Karlsruhe (TH), 1974
- [98] Wiedemann, Rainer; Schwerdtfeger, Thomas:
Simulation des Verkehrsflusses in Netzen
Forschungsauftrag Nr. 3.126 G 80 K
des Bundesministers für Verkehr, Institut für Verkehrswesen,
Universität Karlsruhe (TH), 1983

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. Noch nicht erschienen
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 31** Michael Eckert
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung
mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines
dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven
Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit
sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in
mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung
von Nutzfahrzeugen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch
Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose
Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 59** Dirk Hülsebusch
Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit. 2018
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt
Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier
Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder. 2018
ISBN 978-3-7315-0778-9
- Band 62** Stephan Rhode
Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation. 2018
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63** Péter Megyesi
Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten. 2018
ISBN 978-3-7315-0808-3
- Band 64** Benedikt Reick
Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen. 2018
ISBN 978-3-7315-0815-1
- Band 65** Matthias Graf
Entwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Charakterisierung des Scherverhaltens von Carbonfasergewebe mit Binderauftrag unter Normkraft und viskoser Reibung bei hohen Prozesstemperaturen. 2018
ISBN 978-3-7315-0838-0

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Band 66 Christoph Kühn
**Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen
in Nahverkehrssystemen. 2018**
ISBN 978-3-7315-0740-6

Straßen-, Stadt-, U- und S-Bahnen sind schienengebundene und gleichstromgepeiste Nahverkehrssysteme, die in den wachsenden Metropolregionen einen wichtigen Grundpfeiler der modernen Verkehrsinfrastruktur darstellen. Die Energieeffizienz solcher Systeme rückt aus ökologischen und ökonomischen Gründen weiter in den Fokus. Eine wichtige Fragestellung ist daher die quantitative Untersuchung des Systemenergieverbrauchs. Dazu müssen alle relevanten infrastruktur-, fahrzeug- und betriebsbezogenen Systemzusammenhänge berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird ein Analysewerkzeug entwickelt, das die Komplexität beliebiger Nahverkehrssysteme gesamtheitlich abbilden und die relevanten energetischen Größen untersuchen kann. Dazu werden die Fahrspiele der einzelnen Fahrzeuge simuliert und die Energieflüsse im elektrischen Netz berechnet. Hiermit wird aufgezeigt, welches Potenzial besteht, die Energiebilanz im städtischen Bahnverkehr zu optimieren.