

# **Prädiktiver Betrieb von Multi-Hybrid-Antrieben im SPNV**

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

genehmigte  
**Dissertation**

von

**M.Sc. Marco Eller**

aus Baden-Baden

Tag der mündlichen Prüfung:	20. Dezember 2018
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer



# Kurzfassung

Wichtige Kriterien für den Personennahverkehr sind eine hohe Fahrgastkapazität und ein niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch. Daher ist die Bahn ideal, um die notwendigen Transportleistungen im täglichen Pendelverkehr zu erbringen. Die Nebenstrecken von ländlichen Gebieten in die Städte hinein sind meist nicht- oder nur teilelektrifiziert, da neben den Pendlern kaum ein zusätzliches Fahrgastaufkommen vorhanden ist und diese auch für den Güterverkehr meist keine Bedeutung haben.

Um die Vorteile von elektrischen Antrieben wie Rekuperation von Bremsenergie und leisem Betrieb auf solchen Strecken realisieren zu können, bieten sich hybride Fahrzeugkonfigurationen an. Diese versprechen großes Potenzial durch häufige Halte und kurze Haltestellenabstände.

Klassische Dieseltriebwagen setzen auf mehrere getrennte Antriebsanlagen, die sich jeweils an den Zugenden befinden. Werden sie um Elektromotoren ergänzt, ergeben sich viele zusätzliche Freiheitsgrade, deren Optimierung aber komplexere Herangehensweisen als bisher erfordern. Neben der Möglichkeit, die momentan aktiven Maschinen einzeln zu selektieren, bietet selbst ein einfaches Hybridsystem mit nur einer Antriebsanlage die Möglichkeit der dynamischen und nahezu unbeschränkten Aufteilung der Drehmomente zwischen ihnen. Erweitert man diesen Hybrid um zusätzliche Antriebsanlagen im gleichen Fahrzeug auf ein Multi-Hybrid-System oder betreibt sie in Mehrfachtraktion, wird zur Gesamtsystemoptimierung eine übergeordnete Steuereinheit erforderlich, die die Drehmomente entsprechend des Wirkungsgrades am momentanen Lastpunkt sinnvoll aufteilt.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis der Bewertungskriterien „mögliche Kraftstoffeinsparung“, „Komplexität der Implementierung“ und „Echtzeitfähigkeit“ eine Betriebsstrategie samt zugehörigem Fahrzeugenergiemanagement zu entwerfen. Dafür wurden drei verschiedene Ansätze - Fuzzylogik, Kraftstoffäquivalenzverfahren (ECMS) und dynamische Programmierung nach Bellman (DP) - ausgearbeitet, implementiert und ausgewertet.



# Abstract

High passenger capacity and low specific fuel consumption are fundamental criteria in public mass transport. From this point of view the railway is optimal to provide the daily commuter transport service. Local tracks from the countryside and suburbs into the cities are often not electrified because of the small amount of passengers besides the commuters and no for freight trains.

Hybrid vehicle configurations are suitable to use the advantages of electrical drives like recuperation of braking energy and low noise operation. These offer great potential due to frequent stops and short distances between stops. Classical diesel railcars rely on several separate drive propulsion systems, each one located at the ends of the train. If these are supplemented by electric motors, they will result in many degrees of freedom. Their optimization needs more complex approaches than previously required. In addition to the possibility of selecting the currently active machine, even a simple hybrid system with only one drive propulsion system brings the possibility of dynamic and almost free distribution of torque between the used motors. If this hybrid gets extended with additional drive propulsion systems in the same vehicle to a multi-hybrid system or operates in multiple unit, for overall system optimization, a higher-level control unit is required to divide the torques corresponding to the efficiency at the actual load point.

The aim of this thesis is to design an operating strategy and an associated vehicle energy management based on the evaluation criteria of “possible fuel economy”, “implementation complexity” and “real-time capabilities”. For this, the three different approaches: Fuzzy Logic, Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) and Bellman’s Dynamic Programming (DP) are developed, implemented and evaluated.

**Title: Predictive Control of Multi-Hybrid Drive Propulsion Systems for Commuter and Regional Trains**



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in meiner vierjährigen Beschäftigung als akademischer Mitarbeiter am Teilinstitut Bahnsystemtechnik des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Projekts PREDIKT mit den beteiligten Partnern MTU Friedrichshafen und AKASOL.

Ich möchte zuerst Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld für die Übernahme des Hauptreferats danken und die Möglichkeit diese Arbeit unter seiner Betreuung anzufertigen.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer vom Elektrotechnischen Institut (ETI) für das Korreferat und Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern der Bahnsystemtechnik für die stets gute Zusammenarbeit und nette Atmosphäre. Die vielen wissenschaftlichen Diskussionen brachten stets neue Denkanstöße, die dann zu neuen interessanten Forschungsthemen führten. Insbesondere danke ich meinen zeitweisen Bürokollegen Christoph Kühn und Arwed Schmidt sowie dem „Mittagskollegen“ Stefan Hartmann, die immer wieder neue Motivation für meine Arbeit brachten. Danke auch an Ivana Kramer, der guten Seele unseres Teilinstituts, die bei formellen Dingen immer unterstützend zur Seite stand.

Ein Dank gilt meiner Familie für die Unterstützung während des gesamten Studiums und der Promotion. Insbesondere danke ich meinen Großeltern und meiner Tante für das Lektorat der Arbeit.

Last but not least sei auch den über 30 Studenten ein Dank ausgesprochen, die mit ihren Abschlussarbeiten und als studentische Hilfskräfte beim Sammeln der notwendigen Daten geholfen haben. Persönlich danke ich Tobias Mühler für die zahlreichen Messfahrten mit GPS-Loggern und Frank Holländer, Tobias Steidle sowie Andreas Bauer für die Hilfe beim Aufbau der Dymolabibliothek und der Modellvalidierung im Rahmen des Projekts.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abkürzungen und Begriffe</b> .....	<b>x</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	2
1.2 Vorgehen .....	3
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Hardwareoptimierung .....	7
2.1.1 Motorische Maßnahmen .....	7
2.1.2 Fahrwiderstände .....	9
2.2 Energieeffizientes Fahren .....	9
2.2.1 Fahrerschulung .....	10
2.2.2 Fahrerassistenzsysteme in Bahnen .....	11
2.2.3 Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug .....	13
2.2.4 PREDIKT .....	14
2.3 Systemischer Ansatz .....	15
2.3.1 Hybridisierung .....	15
2.3.2 Energiemanagement .....	21
2.3.3 Betriebsstrategie .....	25
2.4 Optimierungsansätze .....	32
2.4.1 Zustandsautomaten .....	33
2.4.2 Kraftstoffäquivalenzprinzip (ECMS) .....	37
2.4.3 Dynamische Programmierung nach Bellman (DP) .....	39

<b>3</b>	<b>Energiemanagement für ein Multihybridfahrzeug</b>	<b>41</b>
3.1	Grundsätze einer energiesparenden Fahrweise	41
3.2	Erweiterung für ein Hybridfahrzeug	45
3.3	Reglerentwurf	47
3.4	Zustandsautomat mit Fuzzylogik	50
3.5	Erweiterung zur ECMS bei Konstantfahrt	57
3.6	Dynamische Programmierung nach Bellman	67
<b>4</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>71</b>
4.1	Grundlagen multiphysikalischer Modellierung	71
4.2	Umwelt	73
4.2.1	Fahrpläne	73
4.2.2	Trassierung	75
4.2.3	Fahrgäste	82
4.3	Fahrzeug	83
4.3.1	Aufbau	84
4.3.2	Antriebssystem	86
4.3.3	Nebenaggregate	95
4.4	Fahrer	96
4.5	Komponentenvalidierung	97
<b>5</b>	<b>Simulation</b>	<b>99</b>
5.1	Aufbau	99
5.2	Referenzfahrten	102
5.2.1	Referenz Pfälzische Maximiliansbahn (PMB-RE)	102
5.2.2	Referenz Pfälzische Maximiliansbahn (PMB-RB)	106
5.2.3	Referenz Zwönitztalbahn/Erzgebirge (ZwTB)	108
5.2.4	Sonstige Referenzen - Hybridfahrten	111
5.2.5	Sonstige Referenzen - Dieselfahrten	112
<b>6</b>	<b>Optimierungspotenzial</b>	<b>113</b>
6.1	Dynamische Programmierung nach Bellman (DP)	113
6.2	Kraftstoffäquivalenzprinzip (ECMS)	114
6.3	ECMS mit Korrekturfiltern	121
6.3.1	Nichtprädiktive Filter	121
6.3.2	Prädiktive Filter	127

6.3.3	Mehrstufige Filter.....	128
6.4	ECMS mit nur einem VKM.....	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>135</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>141</b>
9.1	Konstante Ruhespannung .....	142
9.2	Konstanter Innenwiderstand .....	144
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>152</b>

# Abkürzungen und Begriffe

Ablasten	Lastpunktverschiebung am Dieselmotor (vgl. Kap. 2.3.1)
ACC	Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat
AKM	Eigename einer Batterie von Akasol des Typs HHE auch LiANA <sup>+</sup> -Batterie genannt
ASM	Asynchronmaschine
Auflasten	Lastpunktverschiebung am Dieselmotor (vgl. Kap. 2.3.1)
Blending	auch Bremsblending, Kombination von unterschiedlichen Bremsarten wie z.B. Retarder und Scheibenbremse
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BOB	Bodensee-Oberschwaben-Bahn (Bahnstrecke)
Boosten	Lastpunktverschiebung am Dieselmotor (vgl. Kap. 2.3.1)
BST	Teilinstitut Bahnsystemtechnik
CAN	Controller Area Network, Datenbussystem
DB	Deutsche Bahn
Derating	Reduzieren von Sollwerten wegen Grenzwertverletzungen
Downsizing	Steigerung der spezifischen Leistung durch mechanische Aufladung eines Verbrennungsmotors
Downspeeding	Steigerung des mittleren Wirkungsgrads eines Verbrennungsmotors durch Verschiebung der Arbeits- punkte zu niedrigerer Drehzahl und somit höheren Lasten
DP	Dynamische Programmierung (nach Bellman)
EBu	Elektronischer Buchfahrplan
EBuLa	Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen
ECMS	Kraftstoffäquivalenzprinzip, Equivalent Consumption Minimization Strategy
EM	Elektromotor
ESF	Energiesparende Fahrweise
FAST	Institut für Fahrzeugsystemtechnik

FESM	Fremderregte Synchronmaschine
FHEV	Vollhybrid Hybridfahrzeug, das elektrisch fahren kann
Freie Kühlung	Verwendung von Außenluft zur Kühlung des Innenraums
GPO	Globale Pontrjagin Optimierung
GPS	Global Positioning System
HBU	Hilfsbetriebeumrichter, Wechselrichter oder DC/DC-Steller für Nebenaggregate
HPP	Hybrid Power Pack
HHP	Hybrid High Power, Hochleistungsbatteriezellen
HHE	Hybrid High Energy, Hochenergiebatteriezellen
Hybridstrategie	Drehmomentverteilung zwischen Motoren (vgl. Kap. 2.3.3)
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
Last-Mile	Letzter Abschnitt einer Güterzugstrecke, der meist keine Oberleitung hat
Last-Mile-Diesel	REX-System, um die Last-Mile zu überbrücken
LE	Leistungselektronik, Umrichter
LiANA <sup>+</sup>	Eigenname für Batteriesystem, abgeleitet aus Projektname
LKW	Lastkraftwagen
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung, Leitsystem für Züge
MPC	Modellprädiktive Regelung, Model Predictive Control
MTB	Maintalbahn (Bahnstrecke)
Multihybrid	Hybridfahrzeug, das aus mindestens zwei eigenständigen Kombinationen mit jeweils zwei Energiewandlern und -speichern besteht. (vgl. Kap. 2.3.1)
OEM	Eigenname einer Batterie von Akasol des Typs HHP, auch PREDIKT-Batterie genannt
PP	Power Pack, integrierte Antriebseinheit
PHEV	Plug-in-Hybrid
PHS	Paralleles Hybridsystem, Parallelhybrid
PKW	Personenkraftwagen, Automobil
PMB	Pfälzische Maximiliansbahn (Bahnstrecke)
PMP	Pontrjaginsches Maximumsprinzip
PowerPackBus	Bussystem zum Datenaustausch, vergleichbar mit CAN

PREDIKT	Akronym für „Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe“ (auch als Batteriebezeichnung)
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung, Leitsystem für Züge
RB	Regionalbahn
RE	Regionalexpress
Regio	RegioNetz Verkehrs GmbH (der DB)
REX	Range Extender, Diesel-Generator-Satz für Notbetrieb
SHS	Seriell Hybridsystem, Seriellhybrid
Spitzfahrt	Fahrt mit maximaler Beschleunigung und Bremsung
SRM	Synchrone Reluktanzmaschine
SwTB	Schwarzwassertalbahn (Bahnstrecke)
UBA	Umweltbundesamt
VKM	Verbrennungskraftmaschine, Verbrennungsmotor
VT	Verbrennungstriebwagen
VT642	Siemens Desiro Classic, Verbrennungstriebwagen der DB-Baureihe 642
VT643	Bombardier Talent, Verbrennungstriebwagen der DB-Baureihe 643
Zero Emission	Bereich, in dem keinerlei Abgasemissionen zulässig sind
ZsTB	Zschopautalbahn (Bahnstrecke)
ZwTB	Zwönitztalbahn (Bahnstrecke)

# Symbolverzeichnis

#	Anzahl	-
A	Fahrzeugstirnfläche	m <sup>2</sup>
a	Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>
Alt	Altitude, Höhe über dem Meeresspiegel (Normalhöhennull)	m
be	spezifischer Kraftstoffverbrauch	g/kWh
c <sub>w</sub>	Luft-, Strömungswiderstandskoeffizient, cw-Wert	-
F	(Widerstands-) Kraft	N
f <sub>R</sub>	Rollwiderstandskoeffizient	-
Δh	Höhendifferenz	m
i	Gang im Getriebe	-
ist	Istwert (Index)	
J	Gütefunktional	diverse
λ	Äquivalenzfaktor	-
Lat	Latitude, geographische Breite	°
Lon	Longitude, geographische Länge	°
M	Drehmoment	Nm
m	(Fahrzeug-) Masse	kg oder t
m <sub>Kr</sub>	Kraftstoffmenge	kg
m <sub>Kr</sub>	Stundenverbrauch, Kraftstoffmenge pro Betriebsstunde	kg/h
n	Drehzahl	1/min
P	Leistung	W
q	Quantisierungsschrittweite	-
s	Strecke	km
S	Steigung	%
S'	Anzahl der Steigungswechsel	-
SoC	State of Charge, Batterieladezustand	%
SoC <sub>min</sub>	Untere Grenze des Batterieladezustandes	%
SoC <sub>max</sub>	Obere Grenze des Batterieladezustandes	%
SoH	State of Health, Batterialterungszustand	%

soll	Sollwert (Index)	
start	Startwert zu Beginn eines Umlaufes (Index)	
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
t	Zeit	s oder h oder a
$t_{(SoH=0)}$	Lebensdauer der Batterie	a
$t_{\text{Verspätung}}$	momentane Verspätung gegenüber dem Fahrplan	s
v	Geschwindigkeit	km/h
$v_{\emptyset}$	Durchschnittsgeschwindigkeit	km/h
W	Widerstandskraft	N
$\vec{x}$	Zustandsvektor	diverse
Z	Zugkraft	N
ziel	Zielwert für das Ende eines Umlaufes (Index)	



# 1 Einleitung

Die Europäische Union hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, die durch Treibhausgas entstehenden Emissionen bis zum Jahr 2020 um 20 % gegenüber 1990 zu senken. Dieses soll bis auf 30 % erhöht werden, wenn andere Industrie- und Entwicklungsländer sich diesem Vorhaben anschließen. Deutschland möchte noch einen Schritt weiter gehen und hat sich bereits 2007 zu einer Reduktion um 40 % bis zum Jahre 2020 bekannt. Seit 2010 gibt es ebenfalls Werte von 55 % für das Jahr 2030 und 80 - 95 % für 2050. Mit Stand 2014 sind in Deutschland 26 % bereits erreicht worden. [UBA17]

Die mit über 84 % bedeutendste Quelle von Treibhausgasemissionen ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe [UBA17]. Dabei entfallen in Deutschland etwa 20 % der direkten Emissionen auf den Verkehrssektor [Gei12; UBA15].

Um die Ziele des Klimaschutzes zu erreichen, muss laut BMU „das gesamte Verkehrssystem ressourcenschonend und nachhaltig“ [Gei12] gestaltet sein. Somit ist es von großem Interesse, die im Kraftverkehr eingesetzten fossilen Kraftstoffe und somit Emissionen zu reduzieren. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, wie die Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen (Biotreibstoffe) [UBA18], aus Biomasseresten (Bioliquids) [KIT18] oder mit Methanisierungsverfahren aus Windwasserstoff (Power2Gas) [RPE14], um nur einige zu erwähnen. Selbst die Verfahren für Kraftstoffe aus der zweiten Generation haben den Nachteil, dass sie nur in sehr begrenztem Maße produziert werden können und somit bei weitem nicht die benötigten Mengen liefern. Außerdem sollen vorhandene Reste oder Überschüsse der Agrarproduktion umgesetzt werden, um nicht mehr als notwendig zusätzliche Anbauflächen für die Kraftstoffproduktion zu verwenden [EUR12].

Obwohl Schienenfahrzeuge in Deutschland bereits zu mehr als 90 % [DB18; Dol17] elektrisch betrieben werden, sind nach [All16; BMVBS11; Dol17] über ein Drittel der Strecken – primär Überland- und Nahverkehrsstrecken – weiterhin in Dieselbetrieb. Gründe dafür sind die hohen Kosten für die

notwendige Infrastruktur und die gleichzeitig niedrige Auslastung. Für eine möglichst effiziente Bedienung solcher Strecken rücken derzeit elektrische und hybridisierte Fahrzeuge in den Fokus der Forschung [BMVBS11; EH16; Haa16; Pas16; Wer14].

Diese Maßnahmen werden von mehreren Interessengruppen gefördert. Zum einen möchten die Betreiber Kraftstoffkosten senken und gleichzeitig das grüne Image aufbessern. Zum anderen wünschen sich Fahrgäste eine geringere Lärm- und Abgasbelastung. Der Arbeitsschutz versucht hingegen neue Ziele durchzusetzen, wie das Betriebsverbot in Tunneln und geschlossenen Bahnhöfen, um das Betriebspersonal besser zu schützen.

Auf Grund der hohen Batteriekosten und der Lebensspanne von klassischen Fahrzeugen im Regionalbetrieb von über 30 Jahren sind Batterietriebwagen aktuell noch nicht wirtschaftlich darstellbar. Eine Lösung auf diesem Weg ist die Hybridisierung und damit eine deutliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrads des dieselbasierten Antriebs. Dieser lässt sich über mehrere Stufen zum vollelektrischen Fahrzeug aufrüsten. [Beh15; Beh16; CW13; DB13; Leh12; Nic02; ORK15; TÜV18]

## 1.1 Motivation

Wichtige Kriterien für den Personennahverkehr sind eine hohe Fahrgastkapazität und ein niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch. Daher ist die Bahn ideal, um die notwendigen Transportleistungen im täglichen Pendelverkehr zu erbringen. Diese Nebenstrecken von ländlichen Gebieten in die Städte hinein sind meist nicht- oder nur teilelektrifiziert, da neben den Pendelverkehren kaum ein zusätzliches Fahrgastaufkommen vorhanden ist.

Um die Vorteile von elektrischen Antrieben wie Rekuperation von Bremsenergie und leisem Betrieb auch auf diesen Strecken realisieren zu können, bieten sich hybride Fahrzeugkonfigurationen an. Diese bieten großes Potenzial durch häufige Halte und kurze Haltestellenabstände. Klassische Dieseltriebwagen wie der VT642 von Siemens und der VT643 von Bombardier setzen auf mehrere getrennte Antriebsanlagen, die sich jeweils an den Zugenden befinden. Diese im Hochflurbereich befindlichen Antriebe nennen

sich PowerPacks. Sie bilden eine abgeschlossene Einheit aus Dieselmotor, Getriebe, Nebenaggregaten und Kühlung, die unmittelbar getauscht werden können und stellen somit eine gute Basis dar, um sowohl neue Fahrzeuge zu bauen, als auch Bestandsfahrzeuge auf eine aktuelle Technik aufzurüsten.

Konventionell setzen diese Fahrzeuge zwei Dieselmotoren mit einer Leistung von etwa 300 kW ein. Das vom Fahrer angeforderte Drehmoment wird eins zu eins zwischen diesen beiden Motoren aufgeteilt. Da die Nebenaggregate direkt an die Motoren angebaut sind, kann keine Teillast- oder Leerlaufabschaltung einzelner Motoren erfolgen.

Werden diese Komponenten elektrifiziert und der Antrieb um Elektromotoren ergänzt, ergeben sich viele Freiheitsgrade, deren Optimierung komplexere Herangehensweisen als bisher erfordern. Neben der Möglichkeit, die momentan aktiven Maschinen einzeln zu selektieren, bringt selbst ein einfaches Hybridsystem mit nur einer Antriebsanlage die Möglichkeit der dynamischen und nahezu unbeschränkten Aufteilung der Drehmomente zwischen diesen. Erweitert man diesen Hybrid um zusätzliche Antriebsanlagen im gleichen Fahrzeug auf ein Multi-Hybrid-System oder betreibt sie in Mehrfachtraktion, wird zur Gesamtsystemoptimierung eine übergeordnete Steuereinheit erforderlich, die die Drehmomente entsprechend des Wirkungsgrades am momentanen Lastpunkt sinnvoll aufteilt.

## 1.2 Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist auf Basis der Bewertungskriterien „mögliche Kraftstoffeinsparungen“, „Komplexität der Implementierung“ und „Echtzeitfähigkeit“ eine Betriebsstrategie samt zugehörigem Fahrzeugenergiemanagement zu entwerfen.

Dafür wird auf verschiedene klassische Ansätze wie Zustandsautomaten und Fuzzylogik, aber auch auf moderne aus der Automobilindustrie wie Kraftstoffäquivalenzmethoden zurückgegriffen. Zur Bewertung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs wird die Optimalsteuerungstheorie nach Bellman angesetzt. Da für die Entwürfe kein reales System zur Verfügung steht, wird ein komplexes multiphysikalisches Simulationsmodell von Fahrzeug und Antrieb in Modelica Dymola entworfen.

Kostenbewertungen eines solchen Systems sind bei Einzelanfertigungen schwer möglich, jedoch wird darauf Wert gelegt, möglichst realistische Szenarien auszuwählen.

Dazu folgt auf diese Einleitung in Kapitel 2 eine Beschreibung des Stands der Technik bei der Hybridisierung mit Fokus auf Bahnfahrzeuge und in Kapitel 3 der eigene Ansatz für verschiedene Betriebsstrategien. In den Kapiteln 4 und 5 werden die Bildung des komplexen aber erforderlichen Fahrzeugmodells und die anschließende Simulation zusammen mit den jeweiligen Betriebsstrategien erläutert. Kapitel 6 zeigt die unterschiedlichen Einsparpotenziale und deren notwendige Aufwände zur Umsetzung der untersuchten Betriebsstrategien auf. Eine Zusammenfassung über die Inhalte dieser Arbeit und ein Ausblick über weitere Energiesparansätze bilden den Abschluss.

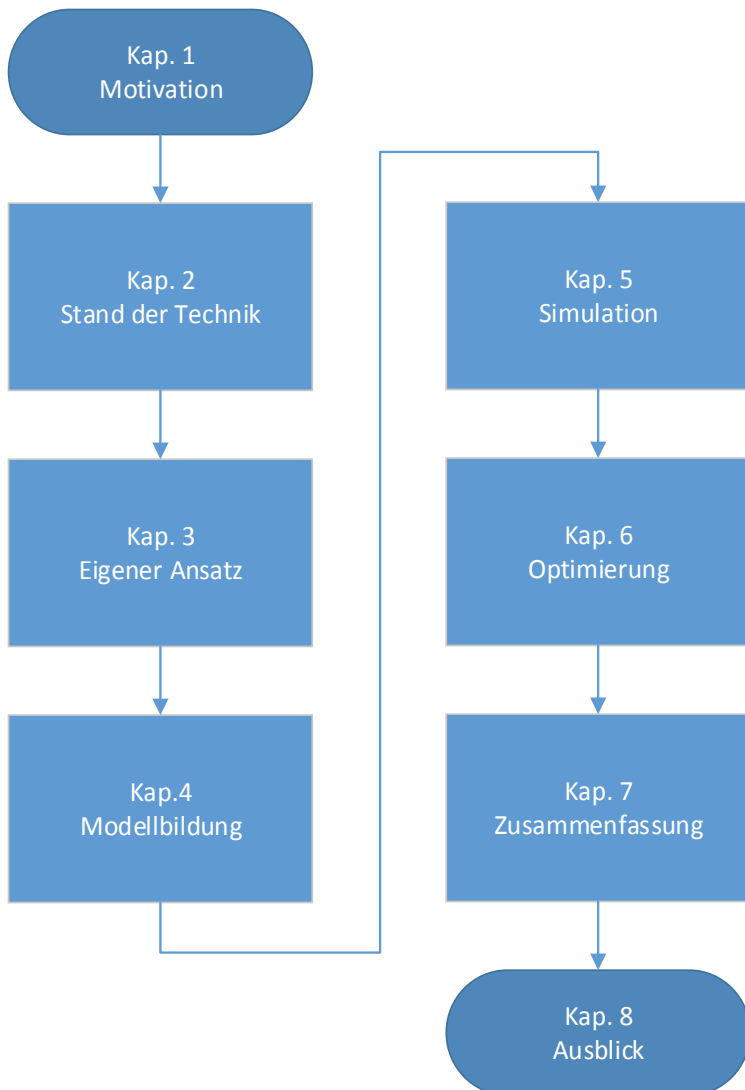


Abbildung 1-1: Struktur der vorliegenden Arbeit



## 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Grundlagen für die weitere Optimierung erläutert. Dies beginnt mit konventionellen Ansätzen an einzelnen Komponenten wie der Verbrennungsmotorverbesserung bis hin zum Gesamtfahrzeug-Energiemanagement.

### 2.1 Hardwareoptimierung

Die klassische Entwicklungsmethodik zur Einsparung von Kraftstoff arbeitet nach dem Ansatz, dass kleinste Verbesserungen in jeder einzelnen Komponente in Summe zu einer großen Ersparnis führen. Dies hat bislang gut funktioniert. Beispiele dafür sind:

- Verbesserungen in Fahrmotoren (VKM und EM)
- Einführung von umrichter gespeisten Maschinen
- Reduktion von Getriebeverlusten
- Elektrifizierung von Nebenaggregaten wie Klimaanlage
- Fahrdynamische Verbesserungen an Fahrwerk und Karosserie

Im Folgenden findet sich eine Potenzialabschätzung:

#### 2.1.1 Motorische Maßnahmen

[MST12] schätzt die verbleibenden „Wirkungsgradpotenziale [auf] bis zu annähernd 10 %“ für Dieselmotoren im Nutzfahrzeug und stationären Anwendungen; wobei die angeführten besten Motoren im stationären Betrieb maximal 50 % aufweisen (vgl. Abbildung 2-1). [BS15] sieht für den PKW-Dieselmotor große Potenziale in der Angleichung von Teillast und Vollastbereichen durch Downspeeding, wie es beim Lkw-, Bahn- und Stationärmotor

schon der Fall ist, sowie weitere durch variable Ventiltriebe für dynamische Lasten. Eine reale Verbesserung des Bestpunkts wird mit 5 % für Turbocompoundaufladung und 13 % Reibleistungsreduktion angesetzt [BS15].

Sind größere Einsparpotenziale gewünscht, muss nach zusätzlichen außermotorischen Ansätzen wie Hybridisierung gesucht werden.

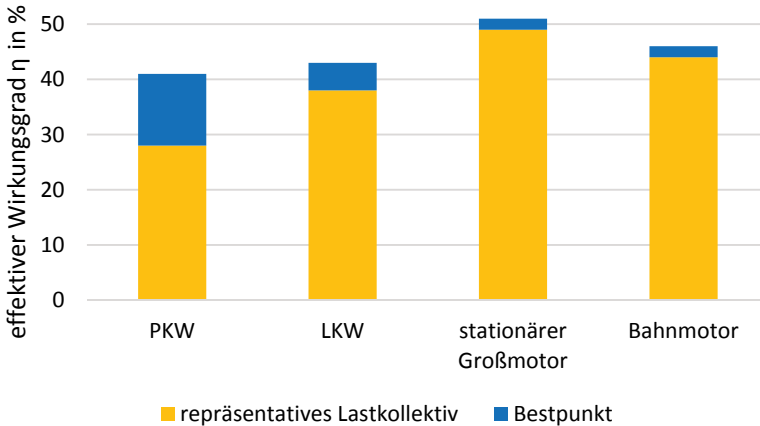


Abbildung 2-1: Wirkungsgrade ausgeführter Motoren, Daten aus [MST12] und [MAK18]

Weiterhin werden bei Dieselmotoren mit höherer Aufladung und Downsizingansätzen zur Steigerung des Wirkungsgrads immer komplexere Abgasnachbehandlungen notwendig, die die beliebige Steigerung unwirtschaftlich machen und sich gleichzeitig negativ auf die Lebensdauer auswirken.

Hinzu kommt, dass die verursachten Schallemissionen vergrößert werden, wenn keine zusätzlichen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Weiterhin fehlt die Möglichkeit des örtlich begrenzten emissionsfreien Betriebs in Tunneln und Bahnhöfen, den sogenannten *Zero Emission Zones*.



## 2.1.2 Fahrwiderstände

Die Reduktion der Fahrwiderstände bietet zusätzliche Potenziale zur Kraftstoffeinsparung. Da sich auf Neigungs- und Bogenwiderstände fahrzeugseitig kaum Einfluss nehmen lässt, verbleiben nur Roll- und Luftwiderstand.

Der Rollwiderstand ist bei Schienenfahrzeugen naturgemäß sehr gering. Er bestimmt sich aus Fahrzeugmasse  $m$  und Rollwiderstandskoeffizient  $f_R$ , der aus dem Reibkontakt Stahlrad auf Stahlschiene sowie der Lagerreibung resultiert.

$$W_R = f_R * m * g \quad (2-1)$$

Typische Werte für  $f_R$  liegen bei 1 bis 2 ‰ und bieten kein besonderes Optimierungspotenzial [JAB16; Wen03]. Ansätze wären Leichtlaufachsen mit reduzierten Lagerverlusten [Sch12].

Größere Einsparmöglichkeit bietet der Luftwiderstand, der ab ca. 80 km/h den dominanten Anteil des Gesamtfahrwiderstandes in der Ebene stellt, da er quadratisch mit der Geschwindigkeit in die Berechnung eingeht.

$$W_L = \frac{1}{2} * \rho * c_W * A * v^2 \quad (2-2)$$

Der Strömungswiderstandskoeffizient  $c_W$ , auch  $c_W$ -Wert genannt, und die Fahrzeugstirnfläche  $A$  können durch ein angepasstes aerodynamisches Fahrzeugdesign deutlich beeinflusst werden. Typische Werte liegen nach [Wen03] bei  $c_W = 0,68$  bis  $1,2$  für Triebwagen und  $0,4$  für den ICE1, während  $A = 10 \text{ m}^2$  ist. [JRR13] gibt Werte von  $0,2$  für moderne Hochgeschwindigkeitszüge an.

## 2.2 Energieeffizientes Fahren

Nahverkehrszüge im Regionalbahnverkehr benötigen im Mittel Geschwindigkeiten von nur 60 km/h, um pünktlich an der nächsten Haltestelle anzukommen. Dabei wird pünktlich nach [DB15] mit einer Verspätung von weniger als 5:59 min definiert. Auf Nebenstrecken mit Bedarfshalten sinkt die erforderli-

che Durchschnittsgeschwindigkeit noch weiter, während die zulässigen Geschwindigkeiten teilweise bei 80 bis 120 km/h liegen. Daher bieten sie großes Potenzial für Einsparungen am Luftwiderstand durch Absenkung der Reisegeschwindigkeit, wie Abbildung 2-2 zeigt. Bei einem reinen Elektrofahrzeug am Fahrdrat in Metroanwendung liefert eine Anpassung von Fahrtrajektorien laut [PK16] ein Einsparpotenzial von bis zu 17,4 %.

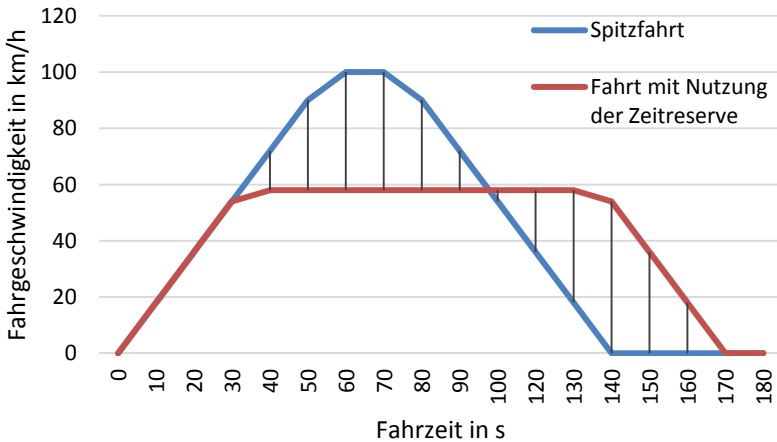


Abbildung 2-2: Fahrspiel zwischen zwei Haltestellen

Um diese Möglichkeit auszuschöpfen, sind mehrere Maßnahmen möglich, die im Folgenden erläutert werden sollen.

### 2.2.1 Fahrerschulung

Die Deutsche Bahn hat im Programm *Zukunft Bahn* die Pünktlichkeit als Punkt von zentraler Bedeutung festgelegt [DB15]. Nur die Sicherheit des Bahnverkehrs hat einen noch höheren Stellenwert [RiL 408.21-27]. Darum ist es legitim, wenn ein Fahrzeug deutlich zu früh an einer Haltestelle ankommt und bis zur Abfahrtszeit wartet. Jedoch wird eine Verspätung bei der Ankunft sowie eine verfrühte Abfahrt nicht toleriert. Um passend auf den Punkt an einem

fahrplanmäßigen Halt einzutreffen, benötigt der Triebfahrzeugführer gute Strecken- und Fahrzeugkenntnis. Diese wird bislang durch Schulungen und Berufserfahrung kontinuierlich aufgebaut. Somit ist es erst nach vielen Fahrten auf der gleichen Strecke, mit gleichem Fahrzeug, gleichem Fahrzeugführer und gleichen Fahrzeiten möglich, die Geschwindigkeit während der Fahrt so anzupassen, dass eine pünktliche Ankunft gewährleistet werden kann. Da so viele Einflussparameter konstant sein und erlernt werden müssen, wird oftmals deutlich zu schnell gefahren und somit Potenzial im Kraftstoffverbrauch verschenkt. Möglichkeiten schneller an dieses Ziel zu kommen, bieten Schulungen der Fahrer durch erfahrene Kollegen. Dies ist wiederum zeitintensiv und erzeugt zusätzliche Kosten und Personalverknappung durch Doppelbelegung des Fahrzeugs. Einfachere und adaptive Ansätze versprechen Fahrerassistenzsysteme, wie sie seit einiger Zeit primär im Fernverkehr erprobt werden. Der Fahrer hat durch seine Fahrweise, nicht nur durch das Ausfahren höherer Geschwindigkeiten einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, sondern auch durch den Bremsvorgang sowie vorheriges Fahren ohne aktive Antriebskraft, oftmals als Ausrollen oder Segeln bekannt, ergeben sich Potenziale. Da das Fahrzeug frei von Antriebskraft nur wenig Geschwindigkeit verliert, bedarf es viel Erfahrung, den richtigen Ausrollpunkt zu finden. Gleichzeitig lässt sich dadurch auch der Verschleiß an mechanischen Bremsen deutlich reduzieren, was für Elektro- und Hybridfahrzeuge zeitgleich mehr Rekuperationspotenzial bedeutet. Bereits seit 2002 schult die DB ihre Fahrer in *Energiesparender Fahrweise* durch Nutzung der fahrplanmäßigen Zeitreserven [Beh15b; JAB16; Lüb08].

## 2.2.2 Fahrerassistenzsysteme in Bahnen

### **Linienzugbeeinflussung (LZB)**

Die LZB ist ein infrastrukturseitiges System, das die zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie den nächsten Geschwindigkeitswechsel und dessen Entfernung ausgibt. Es berechnet dann im Fahrzeug die passende Geschwindigkeitstrajektorie. Dies soll dem Triebfahrzeugführer die Bedienung erleichtern oder auch eine vollautomatische Fahrt darstellen. Erfolgt kein Mischbetrieb mit PZB, können die konventionellen Signalanlagen vollständig

entfallen. Gewährleistet wird die Übertragung der LZB-Daten üblicherweise durch einen Linienleiter zwischen den Schienen, der mit einem Rechenzentrum verbunden ist und die Streckenführung entsprechend überwacht. Durch die hohen Kosten dieser Technik wird diese nicht auf den klassischen Nebenstrecken des Regionalverkehrs eingesetzt. [JRR13]

### **Elektronischer Buchfahrplan (EBu)**

Der *Elektronische Buchfahrplan und Langsamfahrstellen* (EBuLa) ist 2002 bei der DB als erstes digitales Anzeigesystem des Fahrplans eingeführt worden. Ursprünglich sollten auch temporäre Langsamfahrstellen implementiert werden, was aber bis 2009 nicht umgesetzt werden konnte und daraufhin eingestellt wurde. Somit verbleibt bis heute nur der Buchfahrplan. [DB14]

Auf dem EBuLa-Bordgerät werden Zug- und Streckeninformationen wie Zugnummer, Streckenkilometer, erlaubte Höchstgeschwindigkeit sowie kommende Halte samt planmäßiger Ankunfts- und Abfahrtszeit angezeigt [RiL 497.0001].

### **Energiesparende Fahrweise (ESF)**

Um einen Triebfahrzeugführer beim energiesparenden Fahren zu unterstützen, testete die DB verschiedene Verfahren. Dafür wurden bei der S-Bahn Berlin und der S-Bahn München eigene Steuergeräte eingesetzt, die beim Erreichen des Ausrollpunktes ein akustisches Signal sendeten. Später gab es auch Ansätze, die Berechnung in ein EBuLa-Bordgerät zu integrieren und die zusätzlichen Komponenten somit einzusparen. [Leh07]

### **Ecotrainbook**

Ecotrainbook ist in Anlehnung an EBuLa durch die DB entwickelt worden. Es implementiert zusätzlich zum Buchfahrplan eine Empfehlung der Reisegeschwindigkeit zur energiesparenden Fahrweise und eine vereinfachte Kommunikationsschnittstelle mit der Fahrdienstleitung. Optional können auch Loggingfunktionen wie beispielsweise zum Kraftstoffverbrauch appliziert werden. Auf den Strecken der Erzgebirgsbahn und der Vogtlandbahn wurden damit Einsparungen von 4 % nachgewiesen. Weiterhin kann eine Ankunftszeit am nächsten Halt präzisiert werden. Die dafür erforderlichen Daten werden auf Grundlage von GPS berechnet. [KG10]

**Locomotive Engineer Assist / Display & Event Recorder (LEADER)**

*LEADER* ist ein Fahrerassistenzsystem von New York Air Brake, einer Tochter der Knorr-Bremse. Es wurde entwickelt, um den Bremsverschleiß zu senken. Die aktuelle Version arbeitet mit den gleichen Annahmen wie ESF und gibt Empfehlungen zur Geschwindigkeit und zum Ausrollen. Im europäischen Personenfernverkehr mit Dieseltriebzügen wurden damit Einsparungen von mehr als 15 % nachgewiesen. [Klü11; Kno06]

**2.2.3 Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug**

In Kraftfahrzeugen wird zwischenzeitlich eine Vielzahl an Assistenzsystemen eingesetzt, die den Fokus auf die Entlastung des Fahrers legen. Diese stellen jedoch die Datenbasis für weitere Systeme zur Verfügung. Zu den bekanntesten gehören Navigationssysteme und *Active Cruise Control (ACC)*.

Moderne Navigationssysteme basieren auf Kartendaten und der Bestimmung der aktuellen Position auf dieser. Durch Sensorfusion von Tachosignal, Beschleunigungssensoren sowie Positionsbestimmungssystemen wie GPS, Galileo, Beidou und ähnlichen wird der Standort bestimmt. Die geodätischen Kartendaten werden dem Fahrzeug meist offline zur Verfügung gestellt, da es sich um große Datenmengen handelt und eine jährliche Aktualisierung ausreichend erscheint, um den Fahrer an das gewünschte Ziel zu bringen. Die Berechnung der Route basiert auf Graphenalgorithmen, die die Kanten entsprechend verschiedener Kriterien gewichten. Meist findet die Gewichtung über die geschätzte Fahrzeit statt, die durch Zusatzdaten wie erlaubter Höchstgeschwindigkeit, Verkehrsdichte und Höhenprofil bestimmt wird. Die dafür mitgeführten Zusatzdaten sind ebenfalls für die Fahrzeugsteuerung interessant, da sie eine solide Datenbasis zur Berechnung der Fahrwiderstände darstellen.

Im Rahmen des *Future Trucks* erprobt die Daimler AG eine Technik, mit der die Berg- und Talfahrt von LKW optimiert werden sollen. Wegen Kenntnis des Höhenprofils und der aktuellen Position kann eine Empfehlung zum Segeln über die Kuppe von Bergen gegeben werden. [Kre14]

*ACC* ist ein System, das den klassischen Tempomaten um intelligente Funktionen durch zusätzliche Abstandssensoren erweitert. So kann ein definierter Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug selbstständig eingehalten werden.

Durch Vermeidung von Bremsvorgängen kann somit Kraftstoff eingespart werden. Diese Sensoren können auch für weitere Systeme verwendet werden.

Auf der IAA16 hat die Daimler AG eine Studie namens *Future Bus* vorgestellt, die auf abgegrenzten Busspuren teilautonom fahren kann. Dabei werden Ampeln erkannt und der Fahrgastwechsel automatisiert. [Ger16]

Die heute standardmäßig vorhandenen Sensorsysteme können auch zur Wiedererkennung von Strecken dienen, von denen dadurch keine Kartendaten verfügbar sein müssen. [LS06] haben gezeigt, dass bereits die Signale von Lenkwinkelsensor, Geschwindigkeit oder Gierrate ausreichen können, um häufig gefahrene Strecken zu identifizieren.

Die obige Auflistung gibt nur einen kurzen Überblick über Assistenzsysteme im Kraftfahrzeug und soll die Parallelen zum Zugbetrieb aufzeigen. Sie ist keinesfalls als vollständig zu interpretieren.

## 2.2.4 PREDIKT

Im Projekt *Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe*, in dessen Kontext auch diese Arbeit entstanden ist, ist ein Fahrerassistenzsystem entwickelt worden. Dieses wird im Projekt *prädiktive Steuerung* genannt. Sie gibt dem Fahrer Hilfestellung zur optimalen, energiesparenden Fahrweise des Fahrzeuges durch Anzeige der Sollfahrhebelposition. Die Steuerung selbst ist offline-optimiert nach dem Prinzip von Bellman und somit auf eine bestimmte Strecke festgelegt. Um auch bei Verspätungen noch den verbleibenden Weg optimal zurücklegen zu können, wurde nicht nur die ideale Fahrtrajektorie hinterlegt, sondern die gesamte Berechnungsmatrix aller möglichen Trajektorien. Aus dieser wird dann zur Laufzeit und dem aktuellen Zeitschritt der optimale Weg bis zum Ziel festgelegt. Zur Berechnung wurden hierbei sehr detaillierte Modelle der Fahrzeugkomponenten und insbesondere des Antriebs hinterlegt. Nachteilig ist jedoch die feste Bindung an eine Strecke und deren Fahrplan. Weiterhin entsteht eine sehr große Datenmenge, die nur mit hohem Aufwand auf einem Fahrzeugsteuergerät hinterlegt werden kann. Vorteil ist, dass man nahe an das theoretische Optimum heran kommen kann, das in der Simulation mit über 40 % Einsparung gegenüber einem konventionellen Antrieb ausgemacht wurde [Haa16].

Um die notwendige Datenbasis für die Berechnung bereitzustellen, wurde parallel ein *selbstlernender Regler* entworfen, der während des regulären Fahrzeugeinsatzes Messdaten aufzeichnet und daraus die notwendigen Parameter wie beispielsweise Höhenprofil und Streckenverlauf isoliert.

Am Projekt PREDIKT beteiligt waren die MTU Friedrichshafen GmbH, die Akasol GmbH sowie das Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT. Die Laufzeit war 01.01.2015 bis 31.03.2018. [MAK18; TÜV18]

## 2.3 Systemischer Ansatz

Neben der Verbesserung einzelner Komponenten und der betrieblichen Weiterbildung der Triebfahrzeugführer gibt es innovative Möglichkeiten zur gesamtheitlichen Optimierung auf Fahrzeugsystemebene. Diese Verfahren funktionieren auch dann, wenn sich ein Fahrer nicht an seine ESF-Schulung hält oder diese noch nicht hatte. Sie kennen die optimalen Betriebspunkte des Fahrzeuges und reagieren aktiv auf die aktuelle Fahrsituation.

### 2.3.1 Hybridisierung

Die Hybridisierung von Antriebssträngen ist aus vielerlei Hinsicht erstrebenswert. Grundsätzlich versucht sie die Vorteile aus den Welten des Verbrennungsmotors, wie hohe Reichweiten und niedriges Gewicht, mit denen des Elektroantriebs, wie Geräuscharmheit und hohe Effizienz, zu verbinden.

Als „Hybridkraftfahrzeug [wird] ein Fahrzeug mit mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei verschiedenen Energiespeichersystemen (im Fahrzeug) zum Zwecke des Fahrzeugantriebs“ bezeichnet [2007/46/EG].

Wenngleich im PKW-Bereich diese Fahrzeuge zwischenzeitlich weit verbreitet sind, gibt es auf der Schiene nur sehr wenige Versuchsträger für Forschungszwecke. Aus diesem Grund soll im Folgenden auf die Besonderheiten dieser Technik für Schienenfahrzeuge eingegangen werden. Da in Schienenfahrzeugen und insbesondere in Triebwagen mehrere Antriebsanlagen untergebracht werden, wird analog zur EG-Richtlinie hier ein *Multihybridfahrzeug*

definiert, das aus mindestens zwei eigenständigen Kombinationen mit jeweils zwei Energiewandlern und -speichern besteht.

Die Basiskonfigurationen für Schienenfahrzeuge finden sich in [EH16]. Als Basis dieser Arbeit soll ein Vollhybrid (FHEV) betrachtet werden. Für diesen gibt es zwei gängige Bauformen:

### **Serieller Hybrid (SHS) und dieselektrische Antriebe**

Sie bestehen aus einem oder mehreren Motor-Generator-Sätzen zur Energieversorgung des Zwischenkreises des Fahrzeugs und meist mehreren Fahrmotoren, wie beispielsweise die Bombardier *Traxx-Multi-Engine*. Zur Deckung von Lastspitzen verwenden diese Fahrzeuge Ultrakondensatoren mit großen Kapazitäten. Sie werden meist dennoch nicht als Hybride, sondern als dieselektrischer Antrieb bezeichnet, da die gespeicherten Energiemengen gering sind. Ein Austausch oder eine Erweiterung um eine Batterie ist mit geringem Aufwand möglich.

Eine weitere Variante sind Fahrzeuge mit *Last-Mile-Diesel*, wie es optional bei der Bombardier *Traxx AC3* möglich ist. Diese ist zusätzlich zum Dieselmotor um eine Bleibatterie erweitert, um kurzzeitig Leistungen im Güterverladebetrieb ohne Oberleitung abbilden zu können. Da sie im primären Einsatzzweck eine Elektrolokomotive mit Stromabnehmer und Transformator ist, könnte sie auch als Plugin-Hybrid (PHEV) bezeichnet werden.

Im Projekt *EcoTrain* baut die DB Systemtechnik im Auftrag der DB Regio Erzgebirgsbahn [Cla14] ihre bestehenden 16 Nahverkehrstriebwagen vom Typ Siemens *Desiro Classic* VT 642 auf serielle Plugin-Hybride um.

### **Paralleler Hybrid (PHS)**

Besonders im Anwendungsbereich von schnellen Nahverkehrszügen RB und RE kommen kleine Verbrennungstriebwagen zum Einsatz. Diese sind aus Kostengründen mit LKW- und Linienbuskomponenten aufgebaut, weshalb eine Hybridisierung in paralleler Anordnung naheliegend erscheint. Dies wurde beispielsweise durch die DB Regio Westfrankenbahn erprobt [Leh12]. In einer parallelen Anordnung ist der Verbrennungsmotor über ein Schaltgetriebe direkt mit den Rädern verbunden. Eine elektrische Zwischenwandlung wie beim seriellen Hybrid erfolgt nicht und verspricht darum bessere Wirkungsgrade bei höheren Geschwindigkeiten.



Diese und weitere Beispiele finden sich detailliert im Kapitel 2.3.1.2

### **2.3.1.1 Fahrzustände / Hybridmanagement**

Durch die Hybridisierung entstehen zahlreiche zusätzliche Fahrzustände. Namentlich sind die wichtigsten Lastpunktverschiebung, Boosten und Rekuperation. Welches der momentan passende Zustand ist, sollte von einem übergeordneten Hybridmanagement nach Zielkriterien festgelegt werden, welche beispielweise verbrauchsoptimal, batterieschonend, geräuschoptimal oder auch *Zero Emission Betrieb* sein können.

#### **Lastpunktverschiebung**

Die Verschiebung des Lastpunktes kennt zwei Richtungen: Die Anhebung der Last durch Erzeugung von Bremsmoment durch die E-Maschine sorgt dafür, den Verbrennungsmotor in einen Punkt besseren spezifischen Kraftstoffverbrauchs anzuheben und zeitgleich die Batterie nachzuladen. Dieser Betrieb wird auch als *Auflasten* bezeichnet. Als *Ablasten* oder Lastpunktabsenkung ist der gegenteilige Prozess bekannt. Dabei wird durch die E-Maschine zusätzlich motorisch angetrieben, falls sich die momentane Last im Verbrauchskennfeld oberhalb des Bestpunkts befindet. Bei Dieselmotoren ist die Funktion kaum relevant, da der Verbrauchsunterschied zwischen Maximalkurve und Bestpunkt nur marginal ist.

#### **Boosten**

Der Boostbetrieb ist dem Ablasten sehr ähnlich. Er sorgt ebenfalls dafür, dass Verbrenner und E-Maschine gemeinsam Vortriebsmomente erzeugen. Der Unterschied ist, dass hierbei ein Summenmoment entsteht, das oberhalb der einzelnen Maschinen liegt. Somit kann stärker als bei konventionellen Fahrzeugen beschleunigt werden. Zusätzlich kann die Momentenschwäche von Verbrennungsmotoren bei kleinen Drehzahlen kompensiert werden und somit wäre es denkbar auf den hydrodynamischen Anfahrwandler zu verzichten. Gleichzeitig kann durch eine höhere realisierbare Beschleunigung Fahrzeit eingespart oder die notwendige Reisegeschwindigkeit gesenkt werden.

## Rekuperation

Durch generatorisches Bremsen kann die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeuges zurückgewonnen und in der Batterie gespeichert werden. Dies ist der primäre Vorteil von elektrifizierten Fahrzeugen, wohingegen bei konventionellen dieses Potenzial durch thermische Umsetzung verloren geht. Während Lastpunktverschiebungen gut gewählt werden müssen, kann eine Rekuperation, abhängig von der installierten elektrischen Leistung, meist maximal ausgeführt und im einfachsten Fall zur Versorgung der Nebenaggregate verwendet werden. In Nutzfahrzeugen und PKW wird dies durch die konventionelle Lichtmaschine und Bleibatterie schon länger versucht, auch wenn die anfallenden Energiemengen nicht signifikant sind.

### 2.3.1.2 Fahrzeugbeispiele

Es gibt bereits unzählige Hybridfahrzeuge bei Linienbussen und Trolleys. Als Beispiele seien *MAN Lion's City Hybrid* [ES14], *Volvo 7700 Hybrid* [Heu14], *Volvo 7900 ELECTRIC Hybrid* [Vol14], *Solaris Urbino 18,75* mit Brennstoffzelle [Sol14] und *Solaris Trollino 12* mit Batterie [eMo14] genannt. Über neue Fahrzeuge berichtet die einschlägige Presse wie [Omn14] fast täglich.

Währenddessen ist das Portfolio an Vollbahnschienenfahrzeugen auf einige Prototypen im Personenverkehr und wenige seriennahe Fahrzeuge im Güterverkehr beschränkt. Lange bekannt bei Lokomotiven sind dieselektrische Antriebe, die aber nur sehr kleine Pufferkondensatoren im Zwischenkreis haben. Diese Kondensatoren dienen jedoch nicht der Energiespeicherung, sondern nur zur Deckung von kurzzeitigen Lastspitzen und Schaltvorgängen.

### Zweikrafttechnik für Straßen- und Stadtbahnen

Alstom hat mit der *Regio CITADIS Hybrid* eine dieselektrische Straßenbahn mit Pantograf im Angebot. Zwei 375 kW Dieselmotoren speisen dabei per PSM-Generatoren einen gemeinsamen Zwischenkreis, an welchem vier 150 kW Asynchronfahrmotoren angeschlossen sind. Damit könnte das Fahrzeug als serieller Plugin-Hybrid in Multihybridbauweise eingestuft werden. Eine Batterie im Zwischenkreis gibt es jedoch nicht und damit ist es trotz des Vermarktungsnamens nur ein Zweikraftfahrzeug. Diese Bahnen werden beispielsweise in Kassel und Den Haag als Stadtbahnen eingesetzt, um umsteige-frei vom nichtelektrifizierten Umland in die Stadt zu fahren. [Mal12; Müll06]

In Chemnitz gibt es mit der *Citylink Chemnitz* ein ähnliches System von Vossloh Kiepe bzw. Stadler Rail. [Ber16]

### **Lokomotiven mit Mehrmotorenkonzept**

Im Portfolio von Bombardier findet sich eine dieselelektrische Mehrmotorenlokomotive: die *Traxx-Multi-Engine*. Die Idee dahinter ist, dass vier 600 kW LKW-Motoren aus der Großserie anstatt teurer Einzelanfertigungen verwendet werden können [Mal12]. Positive Nebeneffekte dabei sind die Möglichkeiten der Abschaltung einzelner Motoren nach Leistungsbedarf und die Redundanz beim Ausfall einzelner. Die Regelung der Motoren wurde in der Arbeit von [Sch12] ausgelegt, der auch Batterien statt SuperCaps im Zwischenkreis vorschlägt zur besseren Nutzung der Bremsenergie. Bereits in der Basisvariante geht man von Einsparungen von bis zu 17 % Kraftstoff aus [Gei12]. Da das Fahrzeug nicht mit Strom aus der Oberleitung betrieben werden kann, handelt es sich um einen seriellen Vollhybrid, wenn aus dem elektrischen Speicher auch gefahren werden kann. Anderenfalls handelt es sich lediglich um einen dieselelektrischen Antrieb.

Ähnliche Konzepte sind aus großen Baumaschinen, Muldenkippern im Tagebaueinsatz, Schiffen und Panzern bekannt.

### **Lokomotiven mit Last-Mile-Funktion**

2011 stellte Bombardier die *Traxx AC3* mit *Last-Mile-Erweiterung* vor. Diese ist ein Elektrofahrzeug mit Range Extender (REX). Im regulären Streckeneinsatz fährt dieses Fahrzeug mit Stromabnehmer an der Oberleitung bei 5,6 MW Antriebsleistung. Da die Güterbahnhöfe meist nicht elektrifiziert sind, um die Verladung von oben zu erleichtern und Kosten für seitliche Oberleitungen zu sparen, hat diese Lokomotive zusätzlich eine Batterie für langsamen Rangierbetrieb bis 60 kW und einen unterstützenden Dieselmotor mit 230 kW. [AK14; Koc16b; Mal12]

Weil dieses Fahrzeug nicht in allen Richtungen Energie austauschen kann, ist die Hybrideinordnung nicht eindeutig. Im Normalbetrieb ist es als ein elektrisches Fahrzeug ohne Speicher zu sehen, so lange dieser nicht genutzt werden kann. Im Rangierbetrieb ist es ein Vollhybrid, da elektrisch gefahren werden kann, aber die primäre Energie aus dem Dieselmotor kommt.

Ähnliche Fahrzeuge gibt es auch von Siemens in der *VECTRON* Baureihe und von PESA mit der *Gama ED 111* [Koc16a].

### **Siemens Desiro VT642 Hybrid**

Im Jahr 2000 wurde der Siemens Desiro Classic (VT 642) vorgestellt. Dieser dieselmechanisch angetriebene Nahverkehrszug mit 123 Sitzplätzen und einem Höchstgewicht von 88,7 t, besteht aus zwei Teilzügen, die je eine eigene Antriebseinheit und ein Triebdrehgestell enthalten. Ein Jakobslaufdrehgestell verbindet beide symmetrischen Halbzüge. Konzipiert wurde er für den Regionalverkehr auf nichtelektrifizierten Nebenstrecken mit geringem Verkehrsaufkommen. Um in diesem Umfeld flexiblen und günstigen Betrieb abbilden zu können, ist eine Mehrfachsteuerung, auch Multitraction genannt, von bis zu drei Einheiten möglich. Weiterhin werden Großserienkomponenten aus dem Busbereich verbaut, die niedrige Investitions- und Betriebskosten durch Skaleneffekte sowie eine hohe Verfügbarkeit gewährleisten. [Sie00]

2012 wurde in Berlin bei der Internationalen Fachmesse für Bahn- und Verkehrstechnik (InnoTrans) ein innerhalb eines Forschungsprojekts umgebauter Desiro Classic von der DB Regio Westfrankenbahn mit hybridisiertem Antrieb vorgestellt. Dazu kamen MTU Hybrid-PowerPacks sowie Magna automotive Batterien zum Einsatz. Somit handelt es sich um ein Multihybridfahrzeug. Dieses soll 25 % Kraftstoffersparnis sowie weitere Features wie *Zero Emission Betrieb* bieten. [Leh12; MTU16]

Dem voraus ging bereits 2002 eine Veröffentlichung, welche im Vergleich zu einem konventionellen VT mit typischen zweimal 315 kW Antriebsleistung zeigt, dass bei jährlichen 5.000 Betriebsstunden ca. 48.000 Liter Diesel durch Hybridisierung eingespart werden können. Dabei wurden 167.000 Liter pro Jahr für ein VT 643 angesetzt, der nahezu baugleich zum obigen Fahrzeug ist. [Nic02]

### **Siemens Desiro VT642 Hybrid DE - EcoTrain**

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem obigen Projekt hat die DB Regio Erzgebirgsbahn beschlossen, weitere Fahrzeuge umzubauen, jedoch mit seriellem Hybridsystem und in PHEV-Ausführung mit Pantograf. Dies wird dadurch möglich, dass ein Dieselmotor entfällt und so weiteren Bauraum freigibt. Um die bisherigen Probleme mit der zu hohen Achslast zu beheben,

werden neue Drehgestelle eingesetzt. Das bisherige PowerPack-Konzept mit Kardanwellenantrieb bleibt aber bestehen. [AS16; Cla14; CA16; CW13; Wer14]

### 2.3.2 Energiemanagement

Einen weiteren Ansatz auf Systemebene stellt ein zentrales, übergeordnetes Energiemanagement dar. Dieses steuert im einfachsten Fall das Zu- und Abschalten von Komponenten am Energiebordnetz bis hin zur Regelung der detaillierten Leistungsverteilung. Somit können Nebenaggregate beispielsweise abgeschaltet werden, wenn die Leistung aus der Batterie zum Beschleunigen benötigt wird. Primäre Aufgabe ist jedoch die Einsparung von Energie und somit von Kraftstoffkosten durch die Aufteilung der Sollmomente auf die verschiedenen Antriebsanlagen. Abbildung 2-3 visualisiert eine mögliche hierarchische Struktur eines solchen System.

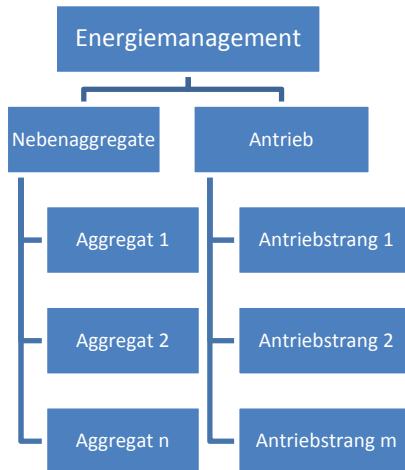


Abbildung 2-3: Energiemanagement

### **Intelligente Nebenaggregate**

Nach Messungen diverser Quellen machen die Nebenaggregate bis zu 50 % des Gesamtenergieverbrauchs eines Fahrzeugs aus, wobei bis zu 30 % davon auf die Klimatisierung des Fahrgastraumes entfallen. Neben den dadurch entstehenden hohen Kosten sind insbesondere bei Fahrzeugen mit Traktionsbatterien diese Verbräuche kritisch, da sie die zur Verfügung stehende Leistung und Energie für die Traktion einschränken. [DB16b; Köb16; Nic02; PK16; Sch12]

Einfach aber effektiv ist die Nutzung von Kapazitäten, die sich in nahezu allen Nebenaggregaten verbergen. Diese sind beispielsweise Drucklufttanks, Wärmespeicher in Klimaanlage aber auch in der Motorkühlung sowie Bordnetzbatterien. Daraus ergibt sich ein zusätzlicher Vorteil: Die Energie muss nicht in den Traktionsbatterien zwischengespeichert werden und unterliegt dort doppelten Wandlungsverlusten, sondern wird direkt dem eigentlichen Einsatzzweck zugeführt, wo sie auch später verbraucht wird. Weiterhin erhöht sich auch die Leistung der elektrischen Bremse über die Batteriegrenze hinaus, was bei kleinen Energieinhalten das Rekuperationspotenzial deutlich erhöht.

### **Bordnetzbatterien**

Ein bekannter Ansatz aus dem Automobilbereich ist die Lastpunktverschiebung der Batterieladung. Diese kann schon mit wenig Aufwand bei konventionellen Antrieben umgesetzt werden. Beim Bremsen wird die Leistung der Lichtmaschine erhöht und so die Batterie verstärkt aufgeladen. Daraus resultiert, dass die Ladeleistung im Fahrbetrieb reduziert werden kann. Es ergibt sich eine Kraftstoffersparnis von 1,6 Prozent nach [Nic02]. Nachteilig erweist sich dabei die starke Zyklisierung der Batterien, der klassische Bleisäuresysteme nicht gewachsen sind. Es sind jedoch auch zyklenfeste Batterien, wie beispielsweise Bleigel, günstig verfügbar. Dabei ist ebenfalls zu beachten, dass eine Überdimensionierung erforderlich wird, da zu jedem Zeitpunkt mindestens die ursprüngliche Reserve erhalten werden muss. Erst darüber hinaus kann der Lastpunkt verschoben werden, um Betriebseinschränkungen zu vermeiden.

### **Klimaanlage**

Während Bremsvorgängen kann auch die Klimaanlage verstärkt den Fahrgastraum kühlen und so Energie sparen. Wenn man bedenkt, dass die Klimaanlage nicht das ganze Jahr gebraucht wird, ergeben sich im Jahresmittel 1,3 % Kraftstoffersparnis laut [Nic02]. Damit das Komfortgefühl der Fahrgäste nicht negativ beeinflusst wird, kühlt man den thermischen Speicher herunter und reduziert zeitgleich die Fördermengen der Umwälzlüfter. Steht das Fahrzeug, schaltet man die Kältemittelkompressoren ab oder auf minimalen Betrieb. Ist der gespeicherte Wärmevorrat („Kältereserve“) aufgebraucht und der Zug bis dahin optimalerweise wieder auf Reisegeschwindigkeit, wird bis zur nächsten Bremsung in den Normalbetrieb zurückgeschaltet. Das Gleiche ist natürlich möglich, wenn die Klimaanlage als Wärmepumpe zur Heizung des Innenraums betrieben wird. Auch *freie Kühlung* ist eine Möglichkeit für weitere Energieeinsparungen. Dabei wird temperaturabhängig Außenluft zugemischt, um die gewünschte Temperatur zu erhalten.

### **Heizung durch Motorabwärme**

Naheliegender, aber bisher nicht umgesetzt, ist die Möglichkeit, die Abwärme von Verbrennungsmotoren im Kühlwasser zur Heizung des Fahrgastraumes zu verwenden.

Wie in 2.1.1 dargelegt, haben gute Motoren einen Wirkungsgrad um 50 %, was zeitgleich heißt, dass die Hälfte der chemischen Energie in Wärme umgesetzt wird. Diese Wärme wird etwa hälftig ins Motorkühlwasser und ins Abgas übertragen. Bei Standardmotoren von 300 kW (mechanisch) wären dies ca. 150 kW nutzbare Wärmeleistung pro PowerPack. In den Triebzügen VT 64x wird beispielsweise die Wärme im Kühlwasser in Außenkühlern mit Radiatoren an die Umwelt abgegeben. Für die Heizung des Innenraumes stehen zwei Heizölstandheizungen bereit, die mit eigenem Wasserkreislauf Konvektoren betreiben. Selbst bei kalten Wintern und nur einem Dieselmotor im Fahrzeug sollten diese Leistungen mehr als ausreichend sein, um für ein angenehmes Innenklima zu sorgen. Da die Standheizungen in jedem Falle gebraucht werden, um das Getriebe und den Motor vorzuwärmen, sind diese weiterhin erforderlich, könnten aber bei passender Temperatur abgeschaltet werden. Dies würde zusätzlich zum Heizöl auch Kraftstoff einsparen, dadurch dass die Radiatoren in der mechanischen Leistung gedrosselt werden könnten.

Weiterhin bräuchte nicht jeder Wagen eine Zusatzstandheizung samt Heizöltank. Im in 2.3.1.2 erwähnten Fahrzeugbeispiel des *EcoTrain* wird es keine heizölbasierten Zusatzheizungen mehr geben. Diese werden durch elektrische Heizelemente und die Wärmepumpenfunktion der Klimaanlage ersetzt. Eine Nutzung der Dieselmotorabwärme findet auch dort nicht statt. [CA16]

### **Druckluftbereitstellung**

Die standardmäßig eingesetzten elektropneumatischen Scheibenbremsen erfordern eine hohe Druckluftmenge im Betrieb, die durch einen Hauptluftbehälter pro PowerPack und entsprechende mechanische Motoranbau-Kompressoren bereitgestellt wird. Durch Einsatz von elektrifizierten Kompressoren könnten auch diese Lasten beim rekuperativen Bremsen direkt erzeugt werden statt beim Beschleunigen. Da es sich bei den Bremsen um sicherheitsrelevante Systeme handelt, muss durch beispielsweise größere Lufttanks gewährleistet sein, dass jederzeit ausreichend Reserven vorhanden sind.

### **Absenkung der Kühlwassertemperatur**

[Nic02] sieht Einsparpotenziale von 2 % durch die intelligente Regelung der Kühlwassertemperatur. Dabei wird die Kühlleistung des Wasserkreislaufs durch Radiatoren nicht temperaturabhängig eingestellt, sondern abhängig vom Fahrzustand des Antriebs.

Beim Beschleunigen des Fahrzeugs fällt die größte Wärme an, da der VKM immer zwischen Drehmoment- und Leistungsgrenze arbeitet. Darum wird auch in diesem Bereich am stärksten gekühlt, was aber gleichzeitig wiederum Leistung in der Größenordnung von ca. 10 % der Verbrennerleistung benötigt, die dem Vortrieb nicht zur Verfügung steht. Ein alternativer Ansatz wäre es, die Bremsphase zum Kühlen zu nutzen. Da der VKM dort keine Leistung benötigt oder sogar im Leerlauf ist, nimmt dabei die Temperatur des Kühlwassers stetig ab. Reduziert man nun die Kühlleistung bis zum Stillstand nicht, sondern stellt diese auf Maximum ein, fällt die Temperatur noch stärker. Fährt der Zug dann nach dem Aufenthalt im Bahnhof wieder an, kann durch den vergrößerten Abstand zur oberen Temperaturgrenze eine erweiterte thermische Kapazität des Kühlmediums genutzt werden. Daraus ergibt sich, dass die Kühlung erst viel später zugeschaltet werden muss.



## Fahrtrieb

Den größten Teil des Energieumsatzes eines Fahrzeugs macht dennoch der Antrieb aus, der deswegen im nächsten Abschnitt 2.3.3 genauer betrachtet wird.

### 2.3.3 Betriebsstrategie

Die Regelung des Fahrtriebs wird meist Betriebsstrategie oder Antriebsmanagement genannt. Bei Hybridfahrzeugen lautet sie auch *Hybridstrategie*. Die Aufgabe dabei ist es, als übergeordneter Kaskadenregler über den einzelnen Komponentenreglern möglichst optimale Betriebspunkte nach bestimmten Kriterien und Nebenbedingungen einzustellen. Diese Optimierungskriterien können der Kraftstoffverbrauch, die Emissionen, die Geräuschentwicklung, die Lebensdauer, die Fahrdynamik und beliebige weitere sein. Nebenbedingungen stellen die Komponentengrenzen mit beispielsweise maximalen Drehmomenten, zulässigen Drehzahlen, Batterieladezuständen, maximalen Strömen und Spannungen dar. Die Betriebsstrategie untersteht selbst dem Fahrzeugenergiemanagement und versucht dessen Sollbeschleunigung beziehungsweise Solldrehmoment möglichst effizient umzusetzen. Dabei besteht gerade bei Hybridfahrzeugen und insbesondere bei Multihybriden eine Vielzahl möglicher Freiheitsgrade, durch die getrennte Ansteuerung von Verbrennungs- und Elektromotoren sowie deren jeweiliger Getriebe. [Kut13; LS06; Rei10]

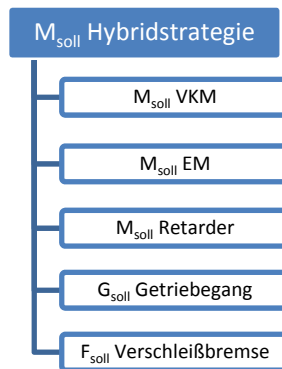


Abbildung 2-4: Hybridstrategie

Abhängig davon, ob die Betriebsstrategie auch zukünftige Betriebspunkte betrachtet, unterscheidet man zwischen prädiktiven und nicht prädiktiven Ansätzen:

### **2.3.3.1 Nicht prädiktiv**

Betriebsstrategien ohne Vorausschau stellen den einfachsten Ansatz dar. Sie treffen Entscheidungen nach den aktuellen Fahrzeugzuständen wie beispielsweise Batterieladezustand, Fahrgeschwindigkeit und Position. Auch der bisherige Verlauf (Trajektorie als Ganzes), einige Zeitschritte (Ableitung) oder nur der vorherige Zeitschritt (Änderung bzw. diskrete Ableitung) können miteinbezogen werden.

#### **Start-Stopp-System**

Ein verbreiteter Standard bei Neufahrzeugen in der Automobilindustrie sind Start-Stopp-Systeme, welche beim Anhalten den Verbrennungsmotor abschalten, um Kraftstoff einzusparen. Dabei wird betrachtet, ob ausreichend Energie zum Wiederstart in der Batterie des konventionellen Fahrzeugs vorhanden ist. Reicht diese nicht aus, bleibt der Motor an oder geht diese durch längere Wartezeit zur Neige, wird der automatische Wiederstart ausgelöst. Ein Abschalten lohnt sich nur, wenn die eingesparte Energie größer als die des Neustarts ist. Je nach Fahrzeug setzt man dafür ca. zehn Sekunden an. Die Schwierigkeit dabei ist abzuschätzen, wie lange das Fahrzeug stehen wird. Ein Ansatz zur Lösung ist es, diese Entscheidung dem Fahrer zu überlassen. Dabei geht man davon aus, dass dieser nur den Leerlauf einlegt, wenn er länger stehen wird. Bei einem Fahrzeug mit Verkehrszeichenerkennung kann auch das Verhalten der Ampel beobachtet werden und dieses gegebenenfalls mit Daten über die Ampel aus Kartendaten oder Car2x-Kommunikation abgeglichen werden. Im Bahnbetrieb lässt sich dies auch einsetzen. Verwendet man als Entscheidungsgrundlage für das Abschalten des Motors die Resthaltezeit am momentanen Bahnhof aus dem EBU, ist eine Umsetzung bereits mit geringem Aufwand möglich. [Kut13] gibt die möglichen Einsparungen für einen Pkw durch Start-Stopp mit etwa 8 % an. [Kar16] rechnet mit 5 bis 10 %. Da Bahnen nicht nur an roten Signalen, sondern primär planmäßig an Haltestellen halten, werden die Potenziale hier deutlich höher angenommen. Eigene Messungen ergaben

Standzeiten für Fahrgastwechsel von im Mittel 18 s vom Anhalten bis zur Abfahrbereitschaft. Bei Linienbussen liegen nach Messungen von [MLD97] Standzeiten von ca. 20 % der Betriebszeit vor, was sie zu 15 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs hochrechnen.

### Gesamtwirkungsgradoptimale Schaltpunkte des Getriebes

Konventionelle Getriebe versuchen möglichst hohe Gänge einzusetzen, um niedrige Drehzahlen und hohe Lasten am Verbrennungsmotor abzunehmen. Dadurch läuft der VKM nahe dem Bestpunkt. Herunter geschaltet wird nur wenn die Lastanforderung oberhalb der Drehmomentgrenze liegt oder die Mindestdrehzahl unterschritten wird. Findet sich eine angeflanschte E-Maschine am Motor, sind dies ungünstige Betriebspunkte, denn diese bevorzugt hohe Drehzahlen. Das größte Leistungspotenzial findet sich dabei in der Feldschwächung. Es entsteht also ein direkter Widerspruch für eine Optimierung. Sucht man nach der optimalen Betriebskurve für eine kombinierte Beschleunigung (boosten) hängt dies stark von der Komponentendimensionierung ab, wo die größten Verluste entstehen. Eine generelle Aussage ist nicht möglich. Wird rein elektrisch angetrieben, sollten möglichst kleine Gänge verwendet werden, um kleine Drehmomente und hohe Drehzahlen wirkungsgradoptimiert am Elektromotor zu nutzen.

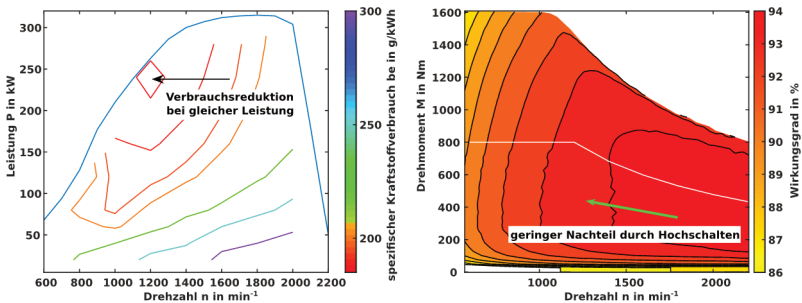


Abbildung 2-5: optimierte Gangwahl für Beschleunigung, hochschalten

Bei der Verzögerung zeigt sich ebenfalls ein invertiertes Bild zum Verbrennungsmotor. Es ist möglichst früh weit herunterzuschalten, damit an der E-

Maschine wieder eine hohe Drehzahl und durch Feldschwächung die maximale Leistung erreicht wird. Gleichzeitig erhöht sich auch noch der Wirkungsgrad. Zwar führt die VKM beim Bremsen kein aktives Drehmoment, sie hat aber mit der Drehzahl steigende Schleppverluste. Somit ist ein optimaler Betrieb nur mit einer Trennkupplung zwischen VKM und EM darzustellen.

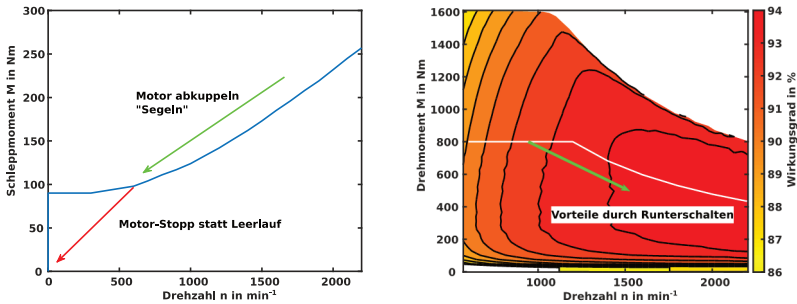


Abbildung 2-6: optimierte Gangwahl für Verzögerung, runterschalten

Alternativ sind auch heuristische Verfahren für starr gekoppelte Systeme möglich, die die Gangwahl wirkungsgradoptimal vornehmen. Ein Vergleich solcher Ansätze findet sich in [Sal13].

### Ladezustandsmanagement / SoC-Regelung

Kommen größere Batterien – wie bei Hybridfahrzeugen üblich – zum Einsatz, muss zur Auslegung dieser überlegt werden, wie viel Energie darin gespeichert werden soll. Das größte Rekuperationspotenzial hätte eine Batterie, die eine gesamte Bremsung von Höchstgeschwindigkeit bis zum Stillstand speichern kann. Sowohl im Pkw als auch bei der Bahn wären diese dann sehr bauraumintensiv und teuer, da die kinetische Energie jeweils sehr groß wird. Im ersten Fall liegt dies an der hohen möglichen Fahrgeschwindigkeit und im zweiten Fall – wie auch bei Nutzfahrzeugen allgemein – an den großen Massen. Wurde eine Batteriegröße festgelegt, die typischerweise unterhalb des maximal möglichen liegt, sollte eine Regelung des SoCs definiert werden, um dennoch daraus das optimale Potenzial zu schöpfen. Während es für Kraftfahrzeuge verschiedenste Ansätze dazu gibt [Sal13], gestaltet sich der Einsatz bei der

Bahn verhältnismäßig einfach: Beim Anfahren wird maximal geboostet, um eine Zeitersparnis zu generieren und die Höchstgeschwindigkeit senken zu können (vgl. Kap. 2.2 zu ESF). Beim Bremsvorgang wird mit maximaler Batterieladeleistung verzögert, bis diese voll ist, und dann auf konventionelle Bremsen umgeschaltet. Damit bleibt nur noch das Auf- und Ablasten während der Konstantfahrphase zu regeln. Im einfachsten Fall lastet man auf, damit der minimale SoC nicht unterschritten wird und lastet ab, um den maximalen SoC nicht zu überschreiten. Diese Verschiebungen stellen sich durch die unterschiedlichen Einsätze der Nebenaggregate wie Licht und Klimatisierung ein. Ein effizienterer Ansatz wäre es, den Dieselmotor bei Konstantfahrt auch nur konstant in einem möglichst hohen Gang zu betreiben und die notwendigen Restdrehmomente durch Kurven- und Steigungsänderungen elektromotorisch durchzuführen, so lange der SoC dies zulässt. Auch komplexere Ansätze sind denkbar, die den VKM aktiv in Richtung seines Bestpunktes verschieben, aber nur wenn dieser effizienter als die gesamte elektrische Wirkungskette wäre. Dies kann einfach durch Näherungswerte der Komponentenwirkungsgrade bestimmt werden, was jedoch so ungenau ist, dass der größere Aufwand gegenüber den vorigen Verfahren kaum gerechtfertigt ist. [Sal13] gibt für Pkw dabei Werte von etwa 1 % Einsparung an. Deutlich besser werden diese erst mit prädiktiven Anteilen.

### **2.3.3.2 Prädiktiv**

Regelungen, die zukünftige Zeithorizonte mit einbeziehen, werden prädiktiv genannt. Dazu sind im Allgemeinen aufwändige Berechnungen erforderlich, die entweder im Vorfeld offline erfolgen, wie im bekannten Verfahren nach Bellman oder online während der Fahrt entstehen. Zunächst muss dabei die Zukunft geschätzt werden, was entweder auf Grund von Erfahrungswerten in der Vergangenheit oder durch geplante Routen erfolgt. Im Automobilsektor sind diese Ansätze schon lange bekannt, werden aber bis heute selten eingesetzt, da sich primär die Frage stellt, wie man an die notwendigen Prädiktionsdaten kommen soll [Kut13; SSM16]. Selbst wenn diese vorhanden wären, ist die Erkennung, wohin ein Fahrer fahren möchte, schwierig [LS06]. Das gängige Kartenmaterial von Navigationssystemen bietet bislang nur unzureichende Informationen zum Streckenprofil, so dass man diese Daten selbst

während der Fahrt ermitteln müsste. Bis sich eine verlässliche Datenbasis ergeben hat, kennt aber auch der Fahrer die Strecke (z.B. zum Arbeitsplatz) bereits so gut, dass er diese im Normalfall ohne Zielführung durchführen würde. Daraus ergibt sich ein Widerspruch, der derzeit noch Inhalt der Forschung ist. Vielversprechend sind Ansätze nach Car2x, wobei viele Fahrzeuge im Verkehr gemeinsam die notwendigen Daten sammeln und verteilen [Kre14; SSM16]. Diese Punkte gestalten sich im Bahnsektor deutlich einfacher. Ein Bahnfahrzeug fährt nur auf einer festgelegten Strecke, nach einem vorgegebenen Fahrplan und wiederholt diese vor allem im Regionalverkehr mehrfach täglich. Weiterhin ist nicht mit Staus zu rechnen und Verzögerungen im Betriebsablauf sind ebenfalls selten. Aus diesem Grunde ist der schienengeführte Nahverkehr prädestiniert dafür, mit prädiktiven Ansätzen zu arbeiten, die zudem kontinuierlich in der Datenbasis verbessert werden können.

### **Prädiktionsgrößen**

Durch Prädiktion können zahlreiche prognostizierte Informationen für eine nicht-prädiktive Regelung bereitgestellt werden, um deren Regelgüte deutlich zu verbessern. Mögliche Werte können aus verschiedensten Datenquellen zusammengetragen werden: Fahrzeugbus / -komponenten stellen die einfachste Quelle dar, da dort Daten ohnehin anfallen und aufgezeichnet werden können. Relevante Informationen darin sind beispielsweise die notwendigen Leistungen von Nebenaggregaten wie der Klimaanlage, die zusammen mit der Außentemperatur bereits eine Prognose über den zu erwartenden Lastverlauf erlauben. Moderne Fahrzeuge verfügen darüber hinaus über ein GPS-Ortungssystem, das neben der aktuellen Position und der Geschwindigkeit auch die Raumachsen aufzeichnen kann und somit Informationen über das Streckenprofil mit Distanzen, Kurvenführung und Steigung liefern kann. Daraus lassen sich künftige Fahrwiderstände abschätzen. Dieser Abschnitt stellt nur eine Sammlung der wichtigsten, möglichen Prädiktionsgrößen dar und stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### **Regelung der Rekuperationsbremsung**

Ergänzt man die bereits in 2.3.3.1 beschriebene SoC-Regelung durch prädiktive Parameter, so kann eine rekuperative Bremsung so angesetzt werden, dass diese bis kurz vor dem Stillstand voll elektrisch durchgeführt wird. Zusätzlich

zur in 2.2.2 erwähnten Ankündigung des passenden Ausrollpunktes für ESF wird auch die Fahrhebelstellung und die Leistung an der E-Maschine überwacht, sodass eine Bremsung optimal erfolgen und ein Bremsblending mit Retarder und Scheibenbremsen verhindert werden kann.

### **Regelung der Reisegeschwindigkeit**

Die ebenfalls in 2.3.3.1 beschriebene konstante Reisegeschwindigkeit kann mit Prädiktionsdaten dadurch verbessert werden, dass eine Überwachung stattfindet, an welcher Stelle sich das Fahrzeug gerade befindet und wo es sich befinden sollte. Ist es zu früh, kann man die Geschwindigkeit absenken und anderenfalls erhöhen, um wieder pünktlich am Ziel einzutreffen. Zur weiteren Verbesserung können auch die zeitlichen Verschiebungen errechnet werden, die sich durch Änderung der zukünftigen, zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit und Steigungen ergeben werden.

### **Algorithmen für prädiktive Betriebsstrategien**

Zur Implementierung von vorausschauenden Reglern gibt es eine Vielzahl an Algorithmen. Der wohl bekannteste ist die *dynamische Programmierung nach Bellman* [Bel57; Bel67; Föl94]. Er setzt auf der *Brute-Force-Methode* auf und ist darum sehr rechenintensiv und aufwändig. Da er aber jede mögliche Kombination in Vorwärtsrechnung ausprobiert, muss auch die optimale Lösung dabei sein. Diese bzw. dessen Trajektorie wird anschließend über eine Kostenfunktion per Rückwärtsrechnung ermittelt.

Einen moderneren Ansatz stellen *Kraftstoffäquivalenzmethoden*, auch *Equivalent Consumption Minimization Strategies* (ECMS) genannt, dar [Kut13; UTL14]. Basierend auf dem *Pontrjaginschen Minimumsprinzip* (PMP) [Föl94; Tau10], finden sie zunehmend Verbreitung in der Automobilindustrie, da der Rechenaufwand hierbei durch analytische Modelle eines Antriebsstrangs deutlich reduziert werden kann. Prinzipiell ist der Detailgrad auch so hoch wählbar, dass identische Ergebnisse wie bei Bellman erreichbar sind. Dies setzt jedoch auch die detaillierte Kenntnis des Systems voraus. Die Überlegung dahinter ist, dass bei einem hybridisierten Fahrzeug die Energiebereitstellung mittelbar aus dem Kraftstofftank erfolgt. D.h. man betrachtet, wie viel Kraftstoff benötigt wird, um die aus der Batterie entnommene Energiemenge

wieder nachzuladen. Vernachlässigt man dies, würde bei der Optimierung bevorzugt immer die Batterie entladen werden, da diese keinen Kraftstoffverbrauch erzeugt. Möchte man diesen Ansatz mit zusätzlicher Prädiktion versehen, kann man weitere Informationen wie zum Höhenprofil hinzuziehen und den Soll-SoC dynamisch verschieben. Dadurch kann beispielsweise bei einer vorausliegenden Steigung verstärkt geboostet oder in einem Gefälle möglichst viel rekuperiert werden. Gleiches ist möglich, um die Batterie für bestimmte Fahrzustände wie *Zero-Emission-Betrieb* in Tunneln oder Bahnhöfen vorzubereiten. Die Strategie lässt sich auch auf extern nachladbare Fahrzeuge erweitern, indem man auf einen Ziel-SoC zu Fahrtende regelt, der unterhalb des Startwerts liegt.

Eine genauere Beschreibung der eingeführten Verfahren erfolgt im nächsten Abschnitt 2.4.

### 2.3.3.3 Bewertung

Obwohl prädiktive Ansätze die besseren Ergebnisse liefern, sind diese sehr komplex in der Berechnung und benötigen dafür hohe Rechenleistungen, die klassische Fahrzeugsteuergeräte nicht zur Verfügung stellen. Darum scheidet das Verfahren von Bellman für eine echtzeitfähige Fahrzeugsteuerung aus.

Im Verlauf dieser Arbeit werden zwei Verfahren, ein klassischer *Zustandsautomat* mit *Fuzzylogik*-Anteilen und eine innovative *Kraftstoffäquivalenzmethode* (ECMS) aus dem Automobilbereich nach [Kut13] untersucht. Diese werden gegeneinander und mit der *dynamischen Programmierung nach Bellman* verglichen.

Einen detaillierten Vergleich verschiedener, weiterer Regelverfahren zeigt [Kut13] auf.

## 2.4 Optimierungsansätze

Zur Umsetzung einer Betriebsstrategie gibt es verschiedenste Verfahren, die in [HUT15] ausführlich gegenüber gestellt werden.



	Optimierungsbasiert					Regelbasiert	
	DP		ECMS			Deterministisch	Fuzzy-Logik
	Numerisch	Analytisch	Numerisch		Analytisch		
			Nicht-prädiktiv	Prädiktiv	Prädiktiv		
Lösungsgüte	+++	+	●	+	●	---	---
Berechnungs- dauer	---	●	●	●	+	+++	+
Onlinefähigkeit	---	-	+	●	+	+++	+++
Anpassbarkeit	+	●	+	+	●	-	---
Erweiterbarkeit	+	-	+	+	-	-	---

Abbildung 2-7: wertende Gegenüberstellung ausgewählter Betriebsstrategieansätze für parallele Hybridfahrzeugarchitekturen [HUT15]

Als Fazit aus dem vorigen Kapitel sollen in dieser Arbeit die Ansätze: regelbasierte Fuzzylogik sowie (nicht) prädiktiv, numerische ECMS und numerische DP verfolgt werden. Diese bilden von den jeweiligen Kategorien die besten Ergebnisse ab. Um die teils hohen Rechenzeiten und Echtzeitfähigkeit beherrschen zu können, werden alternative Programmieretechniken vorgestellt.

Die gewählten Optimierer werden im Anschluss anhand allgemeiner Grundlagen eingeführt und im konkreten Fahrzeugbeispiel in Kapitel 3 umgesetzt.

### 2.4.1 Zustandsautomaten

Ein Zustandsautomat, oder auch regelbasierte Ansteuerung, ist ein gängiger Ansatz der Mikrocontrollerprogrammierung bzw. der Informationstechnik allgemein, um mit möglichst geringem Aufwand deterministisch, fest definierte Zustände zu erreichen [Gru10; HMU06; VW11]. Ein Zustand im Sinne einer Betriebsstrategie könnte beispielsweise der Boost-Betrieb sein, welcher festlegt, welche Antriebsstrangkomponenten (hier: kombinierter Antrieb von EM und VKM) eingesetzt werden sollen. Auch Komponenten können selbst Zustände haben, wie Nennbetrieb und Überlastbetrieb einer E-Maschine. Die Schwierigkeit steckt darin, passende Betriebspunkte zu finden, an denen zwischen den Zuständen gewechselt werden soll. Dies wird meist empirisch bestimmt und ist daher suboptimal. Mit einiger Erfahrung und Kenntnis der Komponenten lassen sich dennoch hinreichend gute Ergebnisse erzielen.

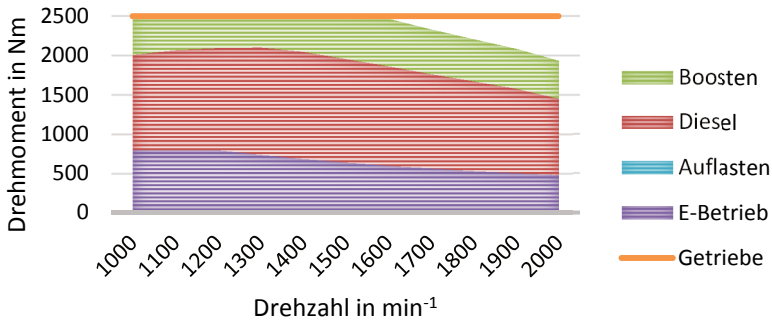


Abbildung 2-8: Drehmomentgrenzen bei unterschiedlichen Fahrmodi und hohem SoC

Ein Beispiel sei für einen hohen Speicherstand mit Abbildung 2-8 gegeben. Bei kleinen angeforderten Momenten wird auf den Dieselantrieb komplett verzichtet und dieser nach Möglichkeit abgekoppelt. Steigende Lasten werden dann durch den VKM alleine aufgebracht bis zu dem Punkt, an dem dieser nicht mehr ausreichend Drehmoment stellen kann. Bei Anforderungen darüber wie beispielsweise beim Anfahren boostet die E-Maschine bis zur zulässigen Getriebebegrenze zu.

In Abbildung 2-9 wird der Fall eines niedrigen Batteriezustands betrachtet. Hierbei sind *Boosten* und elektrisches Fahren nicht mehr darstellbar, darum ist das zum Vortrieb verfügbare Summenmoment kleiner. Bei kleinen Lasten wie einer Fahrt mit niedriger Reisegeschwindigkeit wird aufgelastet und so der Speicher nachgeladen.

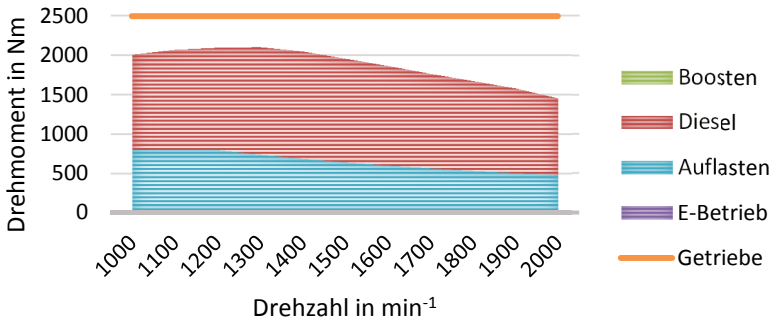


Abbildung 2-9: Drehmomentgrenzen bei unterschiedlichen Fahrmodi und niedrigem SoC

Reduziert sich der Ladezustand durch die Nebenaggregate weiterhin, kann zwangsaufgelastet werden. Dadurch steht jedoch nur reduzierte Vortriebsleistung zur Verfügung. Die Alternative wäre auch ein Lastabwurf der Nebenaggregate.

Zustände für den Betrieb nahe der Batteriegrenze  $SoC_{max}$  wären elektrisch fahren und boosten mit VKM oder Bremsen mit dem Retarder. In welchem Betriebszustand, welche Momentenverteilung vorgenommen wird, erfolgt meist noch durch empirische Prüfstandsversuche oder moderner durch Simulation wie dynamischer Programmierung.

#### 2.4.1.1 Unscharfe Fuzzylogik

Im Gegensatz zum einfachen Zustandsautomaten, der deterministisch seine Zustände mittels Boolescher Logik festlegt, bietet die Fuzzylogik die Möglichkeit, unscharfe Stufen zwischen *true* und *false* abzubilden. Im einfachsten Fall bedient man sich einem zusätzlichen Zustand *vielleicht* in der Mitte, der somit dem Zahlenwert  $\frac{1}{2}$  entspräche. Bei Bedarf lassen sich auch beliebige weitere Stufen wie *viel* oder *wenig* ergänzen. Diese Methodik orientiert sich an der menschlichen Intuition bzw. dem Gefühl. So kennt der Mensch beispielsweise bei der Temperatur viele Zustände von *eiskalt* über *kalt*, *warm*, *wärmer* und bis hin zu *heiß* Zwischenschritte, die sich nicht direkt mathematisch abbilden

lassen. Solche offen-linguistisch definierten Mengen werden auch als Fuzzy-Mengen oder unscharfe Mengen bezeichnet. [MSF09]

Dies soll als Einführung und zu den Hintergründen dieses Themenbereichs genügen. Es sei auf einschlägige Literatur wie beispielsweise [MSF09] verwiesen.

Im Folgenden wird analog zu diesem Prinzip als Beispiel eine Hysterese implementiert, um zu schnelle Wechsel zwischen ganzzahligen Zuständen zu verhindern, die zu schlechtem Fahrverhalten und übermäßigem Verschleiß führen würden.

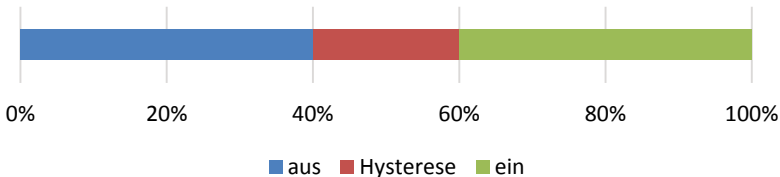


Abbildung 2-10: Schalthysterese mittels Fuzzylogik zwischen zwei Zuständen

Befindet man sich im Zustand *aus* und erhöht die Ansteuerung, so bleibt bis zu 60 % der Ausgang *aus* und aktiviert sich erst darüber. Die Aktivierung bleibt wiederum erhalten, bis der Eingangswert unter 40 % sinkt. Anwendung in einer Antriebssteuerung findet dies beispielsweise bei Konstantfahrt, wenn zwischen Antreiben und Bremsen abgewechselt werden müsste, weil sich die äußeren Fahrwiderstände ändern.

Abbildung 2-11 zeigt für diesen Anwendungsfall, wie durch die Hysterese ein kurzzeitiger Zustandswechsel in den Zeitschritten 1 bis 2 unterdrückt werden kann, der nur kurzzeitig anhält. Eine Umschaltung erfolgt erst bei sieben, wenn klar ist, dass dieser Zustand auch länger beibehalten werden muss.

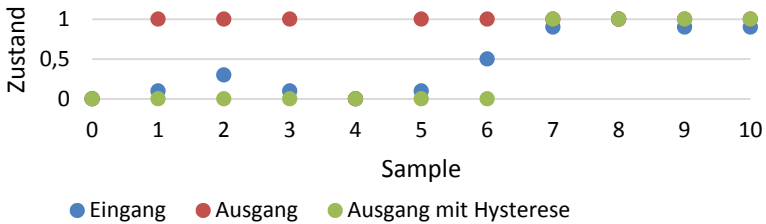


Abbildung 2-11: Schaltverhalten mit und ohne Hysterese

Hysteresen können auch durch Stufen mit Segeln und elektrischem Beschleunigen abgebildet werden.

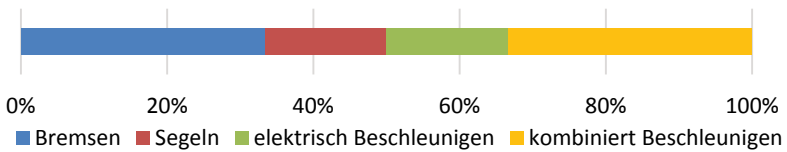


Abbildung 2-12: mehrstufige Schalthysterese mittels Fuzzylogik

Dies sei als ein einfacher Ansatz, wie eine robuste Betriebsstrategie mit „weichen“ Zustandswechseln ausgelegt werden kann, gegeben. Er lässt sich nahtlos in einen übergeordneten Zustandsautomaten einfügen. Eine detaillierte Auslegung für ein Beispielfahrzeug findet sich in Kap. 3.

## 2.4.2 Kraftstoffäquivalenzprinzip (ECMS)

Das *Kraftstoffäquivalenzprinzip* oder auch die *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS) ist ein echtzeitfähiger Ansatz zur Optimierung eines parallelhybriden Antriebsstrangs. Erstmals wird er von [DLG00] erwähnt und findet sich seitdem unter verschiedensten Namen in der Forschung zur Optimierung von Personenkraftwagen und vereinzelt auch Linienbussen wieder [Bac06; CK12; Gru10; GSG13; HUT15; Joh09; KB11; PDG02]. Mit Stand

2017 gibt es keine bekannte Anwendung im spurgeführten Personennahverkehr. Der Hintergrund der Überlegungen dabei ist immer der Gleiche: Es wird davon ausgegangen, dass bei einem Hybridfahrzeug ohne Nachlademöglichkeit jegliche Energie zum Vortrieb mittelbar aus einem chemischen Kraftstoff gewonnen wird. Somit entsteht die Optimierungsaufgabe, den Kraftstoffverbrauch global über die Zeit zu minimieren. Als Stellgröße dient dabei nur der anteilige Momentenbeitrag der E-Maschine, da das geforderte Summenmoment am Rad bzw. Getriebe gleich bleiben muss. Außerdem sind dabei Nebenbedingungen wie der gleichbleibende Ladezustand bei Beginn und Ende sowie die Leistungsfähigkeit der Batterie zu beachten.

$$\min_{M_{EM}(SoC)} J = \int_{t_0}^{t_{end}} m_{Kr} (M_{VKM}(t), n_{VKM}(t), \overline{x}(t), t) dt \quad (2-3)$$

Als Lösungsansatz wird dem Energieinhalt einer Batterie eine entsprechende Äquivalenz in Kraftstoff beigeordnet. Dazu führt man einen sogenannten Äquivalenzkostenfaktor  $\lambda$  ein, der im Vorfeld zu bestimmen ist. Die dem Optimierungsverfahren zugrunde liegende Theorie von Pontrjagin besagt dazu, dass es einen konstanten Faktor zur Minimierung geben muss, unter der Voraussetzung, dass das zu lösende Problem global unbeschränkt ist (vgl. Kap. 2.4.2.1).

$$\min_{M_{EM}} \{P_\lambda\} = \min \{P_{Kraftstoff} + \lambda * P_{Batterie}\} \quad (2-4)$$

Diese Optimierung sollte mit einem passenden globalen Verfahren wie Bellman gelöst werden. Da dies aber wiederum die Flexibilität stark einschränkt, hat es sich als ausreichend erwiesen, einen konservativen (worst case) Wert anzunehmen. Dieser kann anschließend in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess selbstlernend online nachgeführt werden. So sind bereits innerhalb weniger Lernfahrten ähnlich gute Ergebnisse wie bei einer Offline-Optimierung erreichbar. [DLG00]

Um einen Startwert für  $\lambda$  zu finden, lässt sich dieser als inverser mittlerer Wirkungsgrad zur Nachladung der Batterie aus Kraftstoff interpretieren. Anschließend kann er um die anfallende Energie durch Rekuperation adaptiert werden, die bei der ersten Lernfahrt aufgrund unbekannter Strecke ebenfalls noch unbekannt ist. Typische Werte liegen zwischen eins und vier.

Eine übersichtliche Einführung, Herleitung und Zusammenfassung auf aktuellem Stand der Technik gibt [UTL14].

#### **2.4.2.1 Pontrjaginsches Minimumsprinzip (PMP/GPO)**

Das *Pontrjaginsche Maximumsprinzip* (PMP) ist neben der bekannteren *dynamischen Programmierung nach Bellman* (siehe 2.4.3) ein Ansatz der Variationsrechnung zur globalen Lösung von Optimalsteuerungsproblemen (GPO) mit beschränkten Eingangs- sowie Zustandsgrößen und geht bereits auf die 50iger Jahre zurück [Föl94; Pon62; Rös08]. Da man in der Optimierung häufig statt der Maximierung einer Gütefunktion dessen Negatives minimieren möchte, wie beispielsweise einen Kraftstoffverbrauch, wird auch vom Minimumsprinzip gesprochen. Bei Problemen mit unbeschränkten Größen ist der Ansatz von Hamilton bereits früher angewendet worden [Föl94]. Da jedoch in technischen Problemen häufig Grenzen in Form von Ungleichungsbedingungen wie maximale Drehzahlen oder Drehmomente einzuhalten sind, musste dieser zur PMP erweitert werden [Rös08]. Sie garantiert gleichzeitig, dass das globale Optimum gefunden wird [UTL14]. Die oben eingeführte ECMS lässt sich auf die PMP zurückführen [HUT15].

#### **2.4.3 Dynamische Programmierung nach Bellman (DP)**

Die *dynamische Programmierung nach Bellman* stellt die wohl bekannteste globale Optimalsteuerungsroutine dar. Durch Ausprobieren jeder denkbaren Kombination von Eingangsparametern (*Brute-Force-Ansatz*) garantiert sie immer die beste Lösung aufzuzeigen. Bekannter Nachteil ist der bereits bei wenigen Parametern auftretende hohe Rechenaufwand, der eine grobmaschige Diskretisierung des Problems erfordert. Dabei muss der Diskretisierungsfehler immer mitbetrachtet werden. Meist dient die DP darum als Auslegungsinstrument einer echtzeitfähigen genäherten Regelung zum Beispiel in Form eines *künstlichen neuronalen Netzes* oder einer *modellprädiktiven Regelung* (MPC). Diese bilden dann aber nur noch den Lösungsraum ab und sind ohne erneute offline Berechnung nicht mehr anpassbar. [HUT15; Kut13; YTF13]  
In dieser Arbeit soll die DP als Vergleich dienen und die Abweichungen zwischen den einzelnen Verfahren (Zustandsautomat und ECMS) sowie optimaler

Lösung aufzeigen. Die *dynamische Programmierung* gliedert sich in mehrere Bestandteile:

Zuerst wird ein Fahrzeugmodell erstellt, das alle notwendigen Eingangsgrößen und Systemzustände beinhaltet. Diese können beispielweise Fahrgeschwindigkeit, Strecke, Fahrwiderstände, Batterieladezustand, Drehmomente und viele weitere sein, wie folgende einfache Formeln zeigen:

$$m * a = \frac{P_{EM} + P_{VKM}}{v} - F_L - F_S - F_R \quad (2-5)$$

$$\int_{t_0}^{t_{end}} P_{Bat} dt \stackrel{\text{def}}{=} 0 \quad (2-6)$$

Danach wird für jeden Parameter die notwendige Quantisierung  $q_x$  samt Grenzen festgelegt. Dies wird im Folgenden für die Geschwindigkeit  $v$  und die Masse  $m$  exemplarisch gezeigt:

$$0 \leq v \leq 120 \frac{\text{km}}{\text{h}} \mid q_v = 0,1 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (2-7)$$

$$60 \text{ t} \leq m \leq 85 \text{ t} \mid q_m = 1 \text{ t} \quad (2-8)$$

Durch Vorgabe der Fahrgeschwindigkeit oder Antriebsleistung können nun verschiedene Fahrten simuliert und jeder Stützstelle ein entsprechender integraler Kraftstoffverbrauch beigeordnet werden. Dabei werden Zustände, die schlechtere Werte (höhere Verbräuche) generieren, verworfen. Ist die Berechnung bis zum Ende durchgeführt, kann rückwärts die optimale Steuertrajektorie durch Verbinden der besten Stützstellen ermittelt werden. Optimierungsziele können neben dem Kraftstoffverbrauch auch weitere oder andere Kriterien wie Fahrzeit, -komfort, Verschleiß und Batterialterung sein.



# 3 Energiemanagement für ein Multihybridfahrzeug

Das folgende Kapitel zeigt auf, wie eine zeitgemäße Fahrzeugsteuerung ausgelegt werden kann, die sich am aktuellen Stand der Technik des Individualverkehrs orientiert und diesen auf den Anwendungsfall eines typischen Schienenfahrzeugs im Personennahverkehr erweitert. Dabei werden die konventionellen Antriebsanlagen hybridisiert und lastspezifisch intelligent angesteuert, um die maximal mögliche Kraftstoffersparnis zu erzielen.

## 3.1 Grundsätze einer energiesparenden Fahrweise

Die erste Besonderheit im Vergleich zum Individualverkehr stellt der gegebene Fahrplan dar. Dieser hat einkalkulierte Reserven, um Verspätungen aufholen zu können. Wie bereits in Kapitel 2.2 eingeführt, kann man durch Nutzung dieser Reserven die Reisegeschwindigkeit und damit den Luftwiderstand reduzieren. Dabei sollte der Beschleunigungsvorgang möglichst schnell abgeschlossen sein. Zusammen mit dem klassischen Ansatz des Ausrollens ergeben sich fünf Anforderungen an eine möglichst sparsame Betriebsstrategie:

- 1.) Fahrzeitreserven nutzen
- 2.) Fahrwiderstand reduzieren durch Geschwindigkeitsreduktion
- 3.) Maximal beschleunigen
- 4.) Ausrollen lassen bei höheren Geschwindigkeiten
- 5.) Maximal verzögern bei niedrigen Geschwindigkeiten

Es ergibt sich somit eine Fahrstrategie ähnlich zum bang-bang-Prinzip der Regelungstechnik. Es wird beschleunigt nahe  $1 \text{ m/s}^2$ , was allgemein als Komfortgrenze für Fahrgäste angesehen wird. Es folgen Konstantfahrt, Ausrollen und schließlich die Verzögerung bis dem Stand nahe  $-1 \text{ m/s}^2$ . Typische Beschleunigungswerte für Dieselfahrzeuge liegen im Bereich von  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Die mögliche Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeuges sind Konstruktionsparameter und werden als gegeben angenommen. Damit lässt sich nur noch die Reisegeschwindigkeit anpassen. Sie muss prädiktiv berechnet und nachgeführt werden, damit die Pünktlichkeit erhalten bleibt. Als einfaches Beispiel wird eine Fahrt in der Ebene zwischen zwei Haltepunkten gewählt. Zur Bestimmung der Fahrtrajektorie werden Beschleunigung und Verzögerung für eine kleinstmögliche Fahrzeit zu  $77 \text{ s}$  errechnet (vgl. Abbildung 3-1).

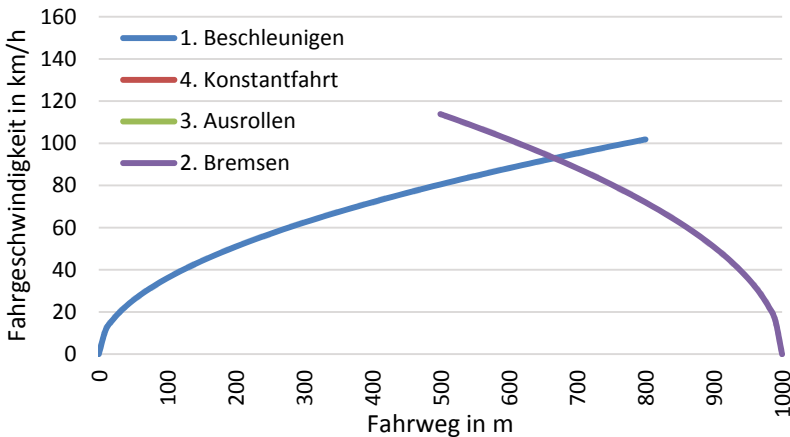


Abbildung 3-1: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 1: Spitzfahrt

Im Schnittpunkt wird von der einen Kurve auf die andere gewechselt, somit ergibt sich zunächst eine sogenannte *Spitzfahrt*. Im zweiten Schritt wird dann an Hand der Fahrplanzeit von beispielsweise  $120 \text{ s}$  die Reisegeschwindigkeit  $v_R$  errechnet, woraus sich eine mögliche Absenkung um  $37 \text{ km/h}$  ergibt.

$$v_R = \frac{-t_R + \sqrt{t_R^2 + 6*s}}{3} = 54,7 \text{ km/h} \quad (3-1)$$

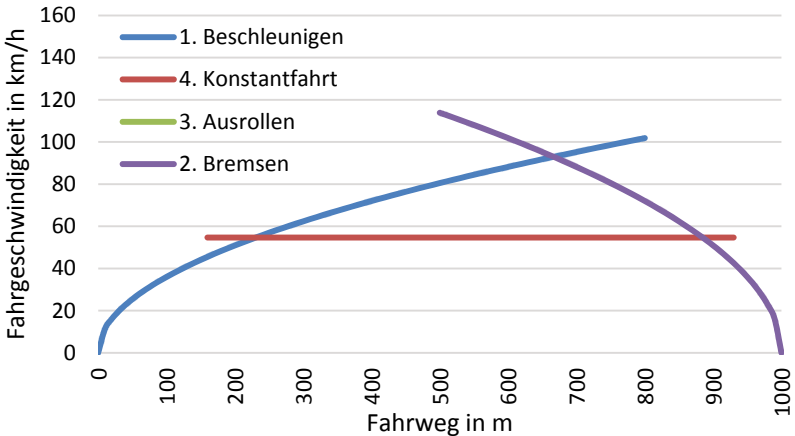


Abbildung 3-2: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 2: Reisegeschwindigkeit

Somit ist bereits in Abbildung 3-2 eine Grundtrajektorie zu erkennen. Diese kann nun durch einen Ausrollvorgang ergänzt werden. Die Auslegung eines solchen benötigt viel Erfahrung und hängt von einigen fahrzeug- und strecken-spezifischen Parametern ab. Dabei muss bekannt sein, wie stark das Fahrzeug bei Abschaltung des Antriebs verzögert. Konkret heißt es, dass Ausrollversuche benötigt werden, um entsprechende Kurven zu erhalten. Hierbei sind aber auch Steigungen und die Verbräuche der einzelnen Nebenaggregate zu beachten. Aus Komfortgründen sollte man eine Mindestgeschwindigkeit definieren, unterhalb derer aktiv gebremst wird. Ein Ausrollen bis zum Stand werden Fahrgäste wohl kaum akzeptieren und würde auch unpraktikabel genaue Messkurven erfordern. Als Wert erscheint 40 km/h, wie er oft in Weichenvorfeldern eines Bahnhofs typisch ist, sinnvoll.

Weiterhin ist zu beachten, dass um ausrollen zu können, die Geschwindigkeit zu Beginn wiederum erhöht werden muss. Andernfalls würde sich die Fahrzeit erhöhen.

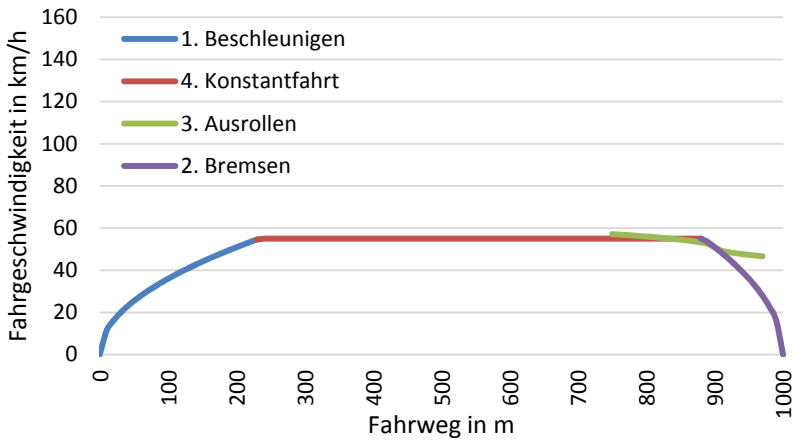


Abbildung 3-3: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 3: Ausrollen

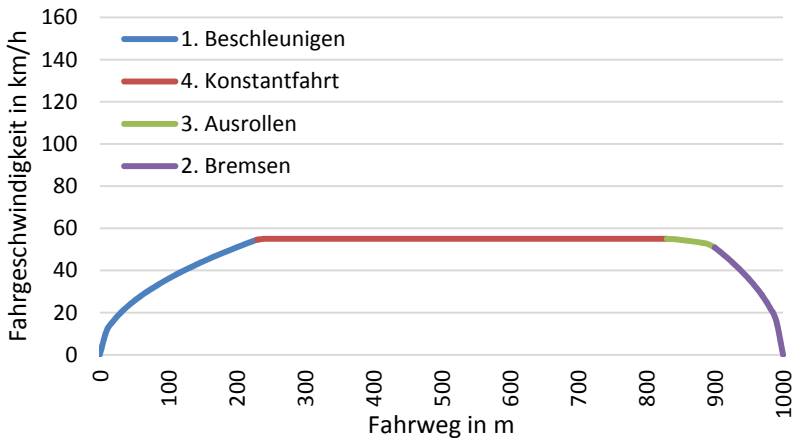


Abbildung 3-4: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 4: Fahrtrajektorie

Abhängig von den vorliegenden Fahrwiderständen können diese Kurven auch ganz anders aussehen, weil beispielsweise die installierte Motorleistung nicht ausreichend ist, um auf einem Steigungsstück die Geschwindigkeit zu halten. Zur Berechnung sollten dabei insbesondere die Steigungen vorher bekannt sein. Auch die Streckenbegrenzungen müssen natürlich beachtet werden.

## 3.2 Erweiterung für ein Hybridfahrzeug

Erweitert man die vorigen fünf Ansätze aus Kapitel 3.1 auf ein Hybridfahrzeug, ergeben sich zusätzliche Anforderungen und Freiheitsgrade. Konventionelle thermische aber auch elektrische Fahrzeuge bremsen mit konstanter Verzögerung. Dies hat zur Folge, dass die rekuperierte Bremsleistung linear mit der Geschwindigkeit abnimmt. Am „starr“ Bahnstromnetz oder für mechanische Bremsen stellt dies kein größeres Problem dar. Wenn jedoch in eine Traktionsbatterie gespeist werden soll, sollte die Leistung konstant und deutlich reduziert sein. Somit ergibt sich die erste zusätzliche Forderung:

- 6.) Bremsen mit konstanter Bremsleistung statt konstanter Bremsverzögerung zur maximalen Ausnutzung der Rekuperation

Dabei verlängert sich gleichzeitig jedoch der Bremsweg um ein Vielfaches und macht die Berechnung deutlich komplexer. Falls dadurch der bestehende Fahrplan nicht mehr eingehalten werden kann, ist eine kombinierte Bremsung mit mechanischer Unterstützung erforderlich.

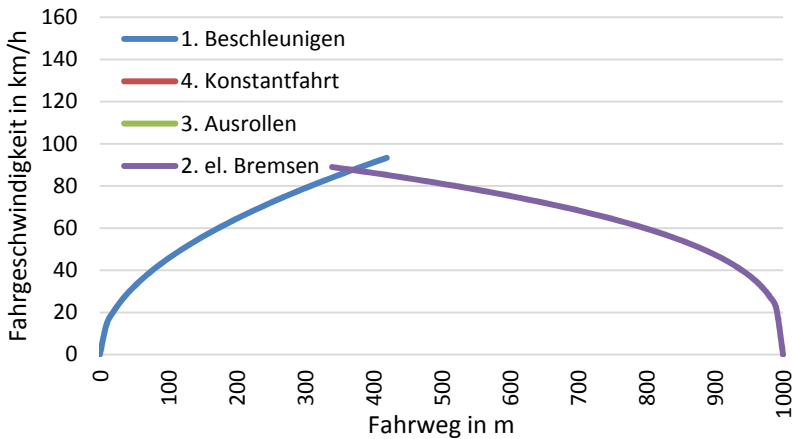


Abbildung 3-5: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF, Hybriderweiterung – Spitzfahrt

Das zweite Kriterium stellt die Drehmomentbegrenzung der E-Maschine dar, die bei parallelhybriden Konfigurationen über ein Schaltgetriebe am Rad arbeitet. Durch das additive Moment ab Drehzahl null kann deutlich stärker und schneller beschleunigt werden, als dies ein Dieselmotor alleine könnte. Aufbauend auf Forderung 3.) wird das zusätzliche Moment integriert und der Betriebsmodus Boosten bevorzugt verwendet.

- 7.) Zusätzliches, maximal mögliches Drehmoment zur Beschleunigung nutzen und somit die Reisegeschwindigkeit weiter reduzieren

Der zusätzliche Freiheitsgrad durch die Hybridisierung liefert die Möglichkeit, einen rein elektrischen Fahrbetrieb zu realisieren, der kleine und kurzzeitige Lasten während der Konstantfahrt erledigen kann. Bei solch kleinen erforderlichen Drehmomenten sind die VKMs in ungünstigen Betriebspunkten im Verbrauchskennfeld, darum werden sie abgeschaltet. Dies reduziert darüber hinaus Lärm und Emissionen, die vor allem in Bahnhofsbereichen unerwünscht sind.

- 8.) Dieselmotoren abkuppeln und abschalten, wenn nicht benötigt (Standzeit, Bremsvorgang, Konstantfahrt)

Um einerseits die Batterie vor unnötig hoher Belastung zu schützen und gleichzeitig weitere Einsparungen zu erzielen, bietet es sich an, Nebenverbraucher bedarfsgerecht einzusetzen.

- 9.) Nebenaggregate intelligent ansteuern
  - a. Reduzieren oder Abschalten falls möglich beim Beschleunigen, um maximale Antriebsleistung der E-Maschine bereitstellen zu können
  - b. Hochschalten oder Zuschalten bei Bremsvorgängen und dadurch direkte Nutzung der Rekuperationsleistung in Nebenaggregaten

Durch direkte Verwendung der anfallenden Rekuperationsleistung in Nebenverbrauchern fällt die zusätzliche Wirkungsgradkette über die Batterie weg. Gleichzeitig kann aber mehr Leistung rekuperiert werden, als die Batterie aufnehmen kann, weil sie direkt in die Wärme- und Luftspeicher eingelagert wird. Dies verlängert wiederum die Batterielebensdauer und reduziert den Einsatz von Bremswiderständen.

### **3.3 Reglerentwurf**

Nach dem Grundsatz: „so einfach wie möglich – so komplex wie nötig“ wird im Folgenden eine Fahrzeugsteuerung ausgelegt, die mehrere hybride Antriebsstränge ansteuern kann. Diese soll möglichst modular aufgebaut sein, damit eine einfache Erweiterung um zusätzliche Komponenten wie Nebenaggregate, weitere Antriebe oder Mehrfachtraktion darstellbar ist. Nach diesem Ansatz wird das Gesamtsystem analysiert und verschiedene Regler entworfen. Beginnend bei der konventionellen Fahrzeugsteuerung als Zustandsautomat, der nur die Antriebe steuert, bis hin zu einem integrierten Gesamtzugverbands-Energiemanagement werden diese entwickelt.

Anhand eines Fahrzeugs des Typs Desiro Hybrid (vgl. Kap. 2.3.1.2) sollen exemplarisch die Auslegungen erfolgen. Zu Beginn werden die sinnvollen Fahrzustände des Multihybridfahrzeugs dargestellt:

<b>Fahrzustände</b>	<b>Ansatz</b>	<b>VKM</b>	<b>EM</b>
<b>Boosten</b>	beschleunigen	✓	✓
<b>Auflasten</b>	Batterie laden	✓	✓
<b>elektrisches Fahren</b>	Zero Emission Betrieb oder kleine Lasten	✗	✓
<b>Rekuperieren</b>	bremsen	✗	✓
<b>Laden im Stand / Range Extender</b>	Batterie laden	✓	✓

Tabelle 3-1: Fahrzustände des Multihybridantriebs

Tabelle 3-2 liefert zusätzlich die weiteren möglichen Fahrzustände, die aber für eine Auslegung nicht sinnvoll erscheinen:

<b>Fahrzustände</b>	<b>Ansatz</b>	<b>VKM</b>	<b>EM</b>
<b>Ablasten</b>	VKM entlasten	✓	✓
<b>Dieselmotorbetrieb</b>	E-Antrieb defekt	✓	✗
<b>Segeln / Ausrollen</b>	Betrieb ohne Nebenaggregate	✗	✗

Tabelle 3-2: nicht sinnvolle Fahrzustände des Multihybridantriebs

Ein Ablasten des Dieselmotors ist nicht sinnvoll, da damit keine signifikant besseren Bereiche des Wirkungsgradkennfeldes erreicht werden können. Ein



reiner Dieselantrieb ist nur notwendig, um bei Ausfall des elektrischen Systems das Gleis räumen zu können. Ein reiner Ausrollbetrieb bei abgeschalteten Motoren wäre nur sinnvoll, wenn im aktuellen Betriebspunkt keinerlei Energie durch Nebenaggregate verbraucht würde. Da die Fahrzeugelektrik aber immer in Betrieb ist und meist Heizung oder Klimaanlage laufen, kommt dieser Arbeitspunkt real nur selten vor.

Weiterhin ist für jeden Fahrzustand zu entscheiden, mit wie vielen Antriebssträngen diese darzustellen sind. Auch die passenden Gänge sind zu bestimmen.

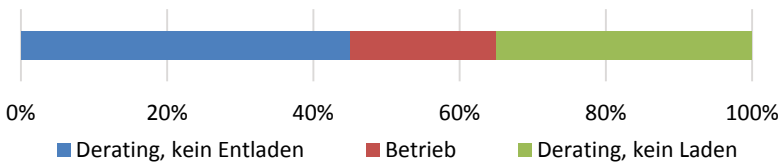


Abbildung 3-6: nutzbare Batterieinhalte und eingeschränkter Betrieb

Wie in Abbildung 3-6 erkennbar ist, muss auch der Ladezustand der Batterie (SoC) immer mitbetrachtet werden. Grundlegend unterscheidet man zwischen Netto- und Bruttobatteriekapazitäten. Brutto gibt den physikalischen Energieinhalt einer Batterie an, wie er im Datenblatt des Herstellers zu finden ist. Netto ist der sinnvolle Einsatzbereich, da es darin keine oder nur geringe Leistungseinschränkungen gibt und die notwendige Lebensdauer vermutlich erreicht wird. Im Folgenden wird nur noch von der Nettokapazität gesprochen, die sich typischerweise im Bereich von 20 – 80 % der Bruttoangabe befindet. Um größere Lebensdauern zu gewährleisten und schwerere Lasten zu bedienen, kann das SoC-Fenster zusätzlich eingeschränkt werden (hier: 45 – 65 %). Dies entspricht Zoomen in die Mitte des vorigen Schaubilds (Betrieb).

### 3.4 Zustandsautomat mit Fuzzylogik

Den einfachsten Ansatz stellt ein diskreter Zustandsautomat dar. Er wird um Fuzzylogik erweitert, um Hysteresen für weichere Übergänge zwischen den verschiedenen Zuständen zu erhalten. Die Zustände, die im Einzelnen abzubilden sind, finden sich in Tabelle 3-3:

Anfangen Zustand	Ansatz	Stellgrößen	Grenzen
Konstantfahrt	maximale Beschleunigung: Boosten mit allen Antrieben	$M_{EM,1/2}$ $M_{VKM,1/2}$ Gang <sub>1/2</sub>	$M_{Getriebe}$ $SoC_{min}$ $n_{max}$
	hohe Last: Betrieb zweier Dieselmotoren und Auflasten	$M_{EM,1/2}$ $M_{VKM,1/2}$ Gang <sub>1/2</sub>	$SoC_{min}$ $SoC_{max}$ $n_{min}$
	mittlere Last: Betrieb eines Dieselmotors und Auflasten	$M_{EM,1/2}$ $M_{VKM,1}$ Gang <sub>1/2</sub>	$SoC_{min}$ $SoC_{max}$ $n_{min}$
	geringe Last: elektrisch Fahren	$M_{EM,1}$ Gang <sub>1</sub>	$SoC_{min}$ $n_{min}$
Bremsen	rekuperative Verzögerung: Betrieb der E-Maschinen in Feldschwäche	$M_{EM,1/2}$ Gang <sub>1/2</sub>	$SoC_{max}$ $n_{max}$

Tabelle 3-3: Steuergrößen und Beschränkungen der Antriebssteuerung

Es handelt sich hierbei um einen neuen Ansatz, da bisherige Fahrzeugsteuerungen die Traktionskraft- bzw. Sollmomentvorgabe immer zu gleichen Anteilen auf alle Antriebe aufteilen und die günstigen Lastpunkte dabei außer Acht lassen. Hier wird sich die größte Einsparung durch Auflastung eines und Abschaltung des zweiten Dieselmotors ergeben.

Da manche Fahrzustände nur bei bestimmten Ladezuständen (SoC-Bereichen) zulässig sind, soll nun zunächst näher auf die Batterie eingegangen werden. Abbildung 3-7 zeigt dazu eine Schaltlogik mit weichen Übergängen zwischen verschiedenen Zuständen. Der Übersichtlichkeit halber wird im Diagramm auf Hysteresen verzichtet, welche die Übergänge zwischen jeweils zwei Zuständen zusätzlich aufweichen, damit keine Schwingungen im Schaltverhalten entstehen.

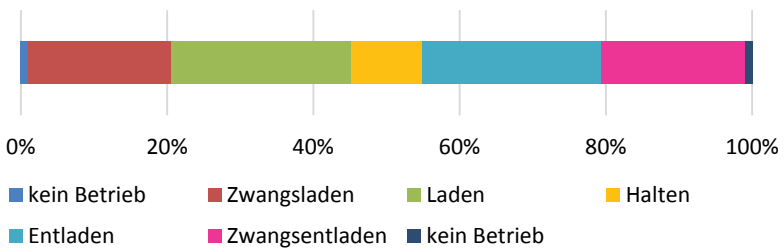


Abbildung 3-7: mehrstufige Schaltlogik mittels Fuzzyregler anhand der Batterieladung

Der gelbe Bereich des Haltens zeigt an, dass dort nach Möglichkeit eine Ladungserhaltung angestrebt wird. Je weiter der SoC sich davon entfernt, desto stärker sollte geladen oder entladen werden, um wieder in die Erhaltung zu kommen. Im Bereich des Zwangsentladens wird bevorzugt elektrisch gefahren. Dies kann sich durch eine vorausgegangene lange Bergabfahrt und geringem Nebenaggregateverbrauch ergeben. Zwangsladen entspricht dem gegenteiligen Punkt einer langen Bergauffahrt. In dieser Arbeit werden die Grenzen des SoC zur Tiefentladung und Überladung als  $SoC_{min}$  und  $SoC_{max}$  bezeichnet. Die erlaubten korrespondierenden Fahrzustände sind in der folgenden Tabelle 3-4 dargestellt:

Fahrzustand Batterie	E- Fahren	Boosten	Auflasten	E- Bremsen	REX
Zwangsladen	✗	✗	✓	✓	✓
Laden	✗	✗	✓	✓	✗
Halten	(✗)	✓	✓	✓	✗
Entladen	(✗)	✓	✗	(✓)	✗
Zwangsentladen	✓	✓	✗	✗	✗

Tabelle 3-4: erlaubte Fahrzustände des Multihybridantriebs abhängig von der Batterieladung

Werte in Klammern sollten nur im Bereich kleiner Leistungen (*Derating*) eingesetzt werden. Diese können aber beispielsweise in *Zero-Emission-Zones* erforderlich sein. Auf elektrisches Bremsen sollte nur aus Eigenschutzgründen der Batterie verzichtet werden.

Somit ergeben sich zusammenfassend folgende Beschränkungen von Steuer- und Zustandsgrößen pro Antriebsstrang:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (3-2)$$

$$0 \leq M_{VKM} \leq M_{VKM_{max}} \quad (3-3)$$

$$M_{EM_{min}} \leq M_{EM} \leq M_{EM_{max}} \quad (3-4)$$

$$M_{EM} + M_{VKM} \leq M_{Getriebe} \quad (3-5)$$

$$n_{min} \leq n_{EM} \leq n_{max} \quad (3-6)$$

$$n_{min} \leq n_{VKM} \leq n_{max} \quad (3-7)$$

$$n_{min} = \begin{cases} n_{VKM_{Leerlauf}} \quad \forall M_{VKM} \neq 0 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases} \quad (3-8)$$

$$n_{max} = \begin{cases} n_{VKM_{max}} \quad \forall M_{VKM} \neq 0 \\ n_{EM_{max}}, \text{ sonst} \end{cases} \quad (3-9)$$

$$Gang = \begin{cases} j \quad \forall M_{VKM} + M_{EM} \neq 0 \cap j \in 1 \dots j_{max} \\ 0, \text{ sonst} \end{cases} \quad (3-10)$$

Beginnen sollte man bei der Auslegung mit dem Bremsvorgang, da sich dort nichts Wesentliches gegenüber konventionellen Ansätzen ändert. Alle beteiligten PowerPacks werden, wie Abbildung 3-8 zeigt, im gleichen Verhältnis angesteuert. Dabei gilt, dass zuerst die Generatoren die größtmögliche Leistung aufnehmen sollen, bevor die thermischen Bremsen zum Blending aktiviert werden. Die größte Leistung nehmen E-Maschinen in der Feldschwächung auf, weswegen die Getriebesteuerung eine möglichst hohe Drehzahl sicherstellen muss. Dabei ist die Auslegung von einem zweifachen Hybrid auf ein n-faches Fahrzeug analog möglich.

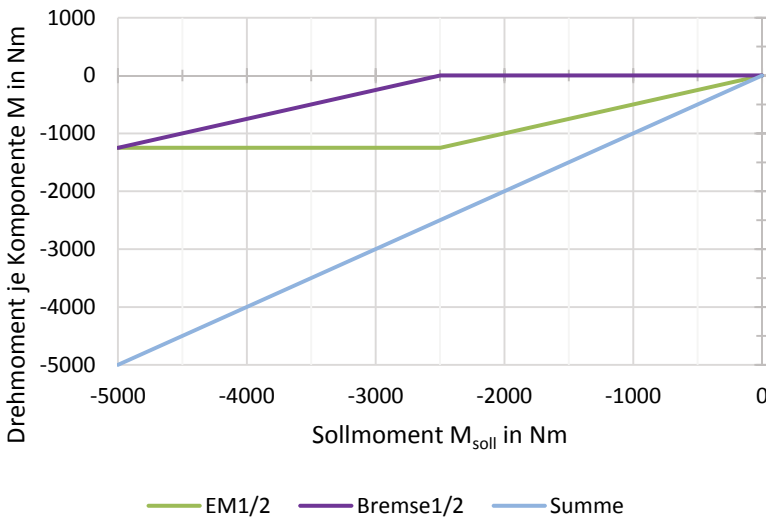


Abbildung 3-8: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid,  $a < 0$

Komplexer stellt sich die Verteilung im Beschleunigungsvorgang abhängig vom Batteriezustand dar. Abbildung 3-9 zeigt den Betriebsfall ohne Einschränkungen bei mittlerem SoC. Bei sehr kleinen Lastanforderungen unter 500 Nm, wie Konstantfahrten bei niedrigen Geschwindigkeiten oder leichtem Gefälle, wird hier elektrisch gefahren. Darüber wird mit der ersten VKM gefahren und mit der ersten EM aufgelastet. Beim Erreichen der Lastgrenze folgt die zweite

Antriebseinheit mit ihren beiden Maschinen und lastet wiederum auf. Im Bereich der höchsten Lasten wie dem Beschleunigen wird mit allen Antrieben kombiniert geboostet.

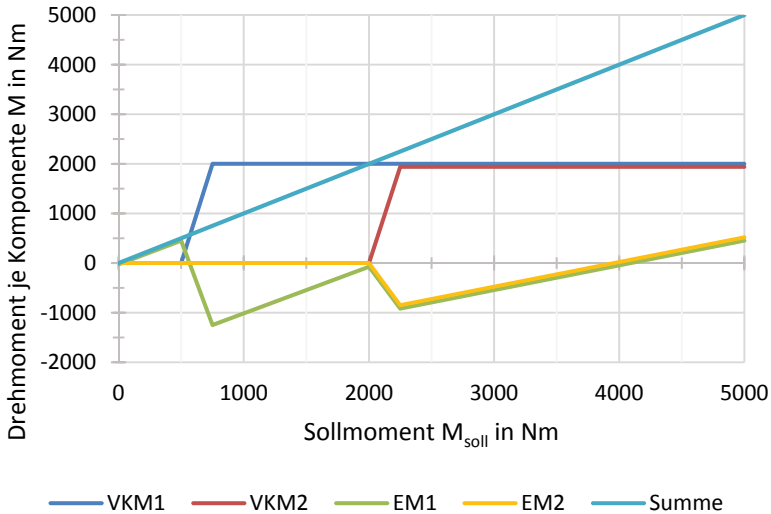


Abbildung 3-9: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid,  $a > 0$  und  $SoC \approx 0,5$

Eine Erweiterung von einer zweifachen auf eine n-fach höhere Variante gestaltet sich gleichartig: Verbrenner werden einer nach dem anderen zugeschaltet und dann unter Vollast betrieben oder wieder ausgeschaltet. Eine Auflastung erfolgt mittels der E-Maschine im jeweiligen PowerPack.

Durch längere Standzeiten mit Klimatisierung wird der SoC abnehmen. Wie Abbildung 3-10 zeigt, muss in diesem Fall mit den Verbrennungsmotoren und reduziertem Drehmoment angefahren werden. Ebenso kann durch Boosten beim Anfahren oder durch Bergfahrten bereits nach kurzer Zeit der SoC stark abgenommen haben und somit kein volles Antriebsmoment mehr erreicht werden.

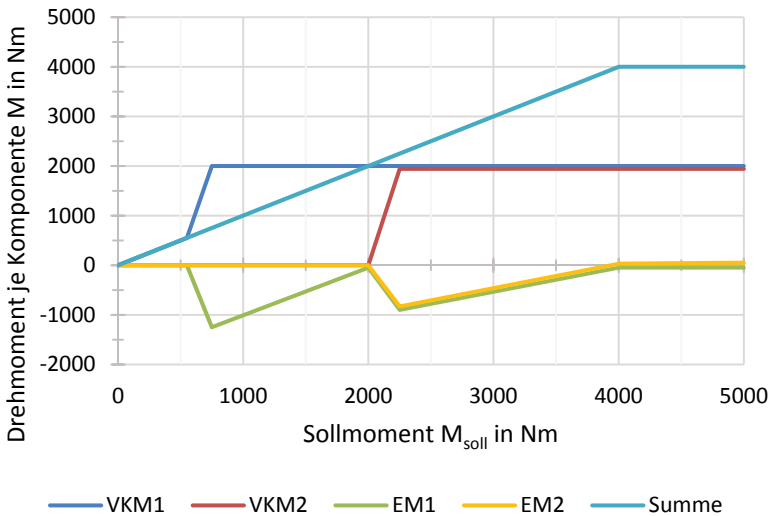


Abbildung 3-10: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid,  $a > 0$  und  $SoC \ll 0,5$

Die Adaption auf einen n-fachen *Multihybrid* gestaltet sich ebenfalls wie im vorigen Fall, so dass immer ein PowerPack nach dem anderen hinzugenommen wird.

Abbildung 3-11 illustriert einen hohen Ladezustand, wie er nach einem Bremsvorgang von höherer Geschwindigkeit und anschließender kurzer Standzeit wie an Haltesignalen oder Bedarfshalten vorkommt. Beim Anfahren unterstützen die VKMs die EMs, anstatt üblicherweise umgekehrt. Anschließend kann auch bei mittleren Lasten z.B. beim Weichenvorfeld vor Bahnhofseinfahrten elektrisch gefahren werden.

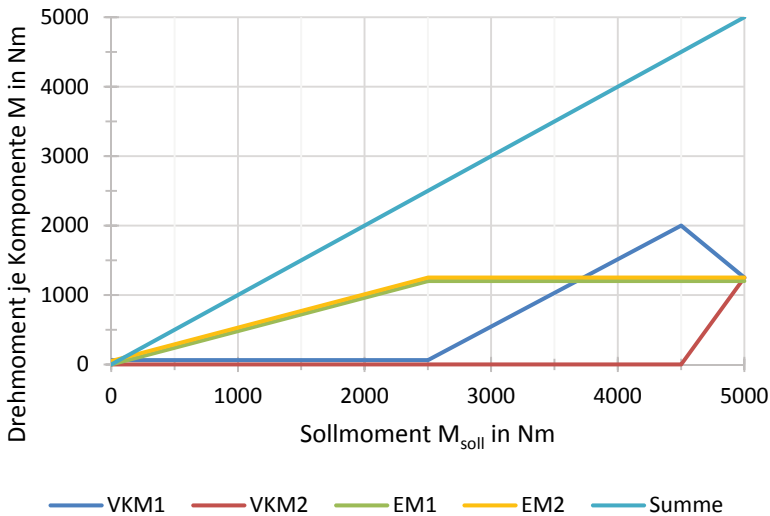


Abbildung 3-11: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid,  $a > 0$  und  $\text{SoC} \gg 0,5$

Das Prinzip zur Erweiterung auf weitere PowerPacks verteilt hier das Moment gleichmäßig auf alle verbauten E-Maschinen und nimmt dann stufenweise VKMs hinzu.

Damit ist eine einfache, aber effiziente Antriebssteuerung für ein *Multihybridfahrzeug* ausgelegt. Nicht zu verschweigen sind die Nachteile wie die einseitige Belastung bestimmter Batterien und Verbrennungsmotoren, die zum Teil dadurch reduziert werden können, dass man statistisch die Ausnutzung auf alle PowerPacks verteilt und die elektrischen Zwischenkreise verbindet. Dies heißt konkret, dass beispielsweise bei einem zweifachen Hybriden abwechselnd die eine und die andere VKM zuerst gewählt werden. Denkbar wäre auch eine VKM auf Start-Stopp auszulegen, während die andere immer zumindest im Leerlauf mit dreht. Ebenfalls könnte es bei schlechter Witterung zum Schleudern der Räder kommen und eine Anpassung der Betriebsstrategie erforderlich machen.

Was im Falle eines zweifachen Hybriden noch einfach aussieht, wird mit zunehmender Anzahl an PowerPacks komplex und aufwändig. Die ECMS



bietet hingegen durch ihren Formalismus auch bei einer höheren Anzahl an Antrieben gleichbleibenden Aufwand.

### **3.5 Erweiterung zur ECMS bei Konstantfahrt**

Aufbauend auf dem obigen Zustandsautomaten wird eine ECMS entwickelt, die den Betrieb bei Konstantfahrt optimiert. Dafür werden die gesamten Wirkungsgradpfade betrachtet, um die Gänge, die Drehmomente der E-Maschinen und der Verbrennungsmotoren optimal zu wählen. Um zu entscheiden, in welchem Lastfall wie viele Motoren und zu welcher Auslastung optimal einzusetzen sind, ist in einem Zustandsautomat gerade bei vielen Antrieben nur durch umfangreiche Messungen und Hinterlegen von Kennfeldern der kombinierten Komponenten möglich. Eine dynamische, selbstständige Optimierung erscheint darum sinnvoller, da sie adaptiv bleibt und somit Komponenten auch austauschbar wären. Weiterhin können Komfortfunktionen wie das Vorladen der Batterie zur rein elektrischen Überbrückung der Standzeit appliziert werden. Eine softwaretechnische Verbesserung von Anfahr- und Bremsvorgang scheint nicht sinnvoll, da die physikalischen Bauteilgrenzen und Auslegungskriterien wie Batteriegröße und Elektromotorleistung die Beschränkungen darstellen.

Somit verbleiben nur noch die Betriebsmodi mit kombinierten Antrieben und elektrischem Fahren, zwischen denen abhängig von Streckensteigung und Nebenaggregateverbrauch gewählt werden muss. Um jeder Zeit das volle Rekuperationspotenzial nutzen zu können, sollte dabei der SoC insbesondere bei Talfahrt nicht zu hoch werden. Gleichzeitig soll er aber auch genügend Reserven vorhalten, um weiter beschleunigen zu können. Eine Tiefentladung durch Nebenaggregate muss ebenfalls verhindert werden. Somit gilt wieder das im vorigen Kapitel eingeführte Ladezustandsfenster in der Mitte als erstrebenswert. Es wird im Folgenden nur auf den Antrieb eingegangen.

Das Ziel der Betriebsstrategie ist, den Kraftstoffverbrauch so niedrig wie möglich zu halten. Die triviale Lösung wäre bevorzugt zuerst die Batterie zu entladen, da diese keinen Kraftstoff benötigt. Unter der Annahme, dass ein externes Zuführen von Energie in die Batterie nicht möglich ist, es sich also

nicht um ein Plugin-Hybrid handelt, muss die Batterie jedoch wieder mit dem Verbrennungsmotor aufgeladen werden.

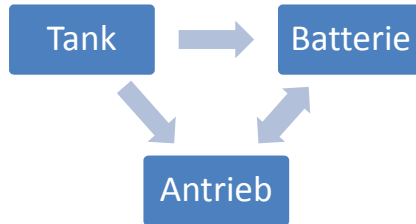


Abbildung 3-12: Energieflüsse im Fahrzeug

Nun kommt der namensgebende Anteil der ECMS zum Ausdruck: Der Energie der Batterie wird eine „Kraftstoffäquivalenz“ beigemessen. Das heißt, dass bereits bei der Entscheidung, ob nun Energie aus der Batterie zum Zwecke des Vortriebs entnommen werden soll, durch den Faktor  $\lambda$  mit berücksichtigt wird, dass diese anschließend wieder geladen werden müsste. Somit können die individuellen Kosten zum Nachladen hinterlegt werden.

$$P_{\lambda}(\vec{u}, t) = P_{Kraftstoff}(\vec{u}, t) + \lambda * P_{Batterie}(\vec{u}, t) \quad (3-11)$$

Ausgangspunkt der ECMS ist die Überlegung, welche Energieflüsse im elektrischen Zwischenkreis des Fahrzeuges und somit an der Batterie  $P_{Batterie}$  auftreten. Dazu visualisiert die folgende Abbildung 3-13 den Aufbau eines beispielhaften parallel-hybriden Antriebs:

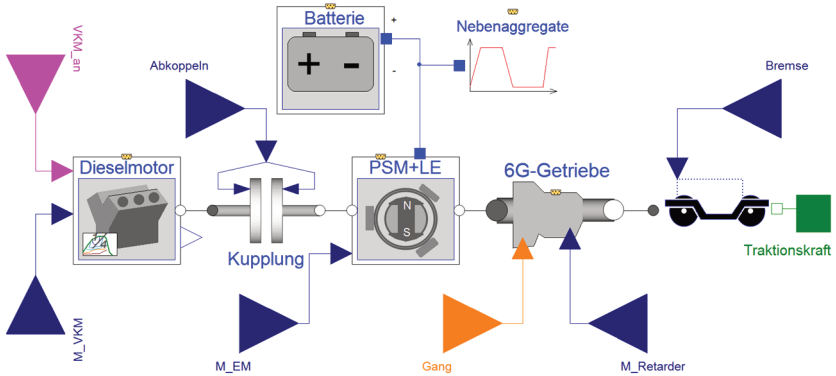


Abbildung 3-13: Aufbau eines parallel-hybriden Antriebsstrangs

Also gilt folgende Gleichung für die Leistungsbilanz im Zwischenkreis:

$$P_{Batterie} = P_{EM} + P_{Nebenaggregate} \quad (3-12)$$

In  $P_{EM}$  ist der Umrichter mit berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt der Anschaulichkeit wegen zunächst ohne Wirkungsgrade. Auf der mechanischen Seite gilt währenddessen bei geschlossener Kupplung:

$$M_{Getriebe,ein} = M_{VKM} + M_{EM} - M_{Retarder} \quad (3-13)$$

$$n_{Getriebe,ein} = n_{VKM} = n_{EM} = n_{Retarder} \quad (3-14)$$

Daraus folgt direkt:

$$P_{Getriebe,ein} = P_{VKM} + P_{EM} - P_{Retarder} \quad (3-15)$$

So lässt sich nun auch der Steuervektor pro Antriebsstrang vollständig aufschlüsseln:

$$\underline{u}_{vollständig}(t) = \begin{pmatrix} P_{VKM}(t) \\ P_{EM}(t) \\ P_{Ret}(t) \\ Gang(t) \\ VKM_{ein}(t) \\ Abkoppeln_{ein}(t) \\ Bremse_{\%}(t) \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

Da es sich bereits im Fall nur eines Antriebs um eine hohe Anzahl an Steuergrößen und somit Freiheitsgraden handelt, werden diese zunächst ausgedünnt:

Da der Retarder möglichst keinen Beitrag leisten sollte und nur für den Ausfall oder eine Überlastung der EM vorgehalten wird, wird er vernachlässigt. Die Scheibenbremsen werden nur zum Bremsen in den Stillstand und als Feststellbremse verwendet. Weiterhin wird das Abkoppeln in das VKM-Startsignal integriert, so dass der Verbrenner immer dann abgetrennt wird, wenn er ausgeschaltet wird.  $P_{\text{Getriebe,ein}}$  entsteht durch das angeforderte Sollmoment am Fahrhebel des Fahrzeugführers und ist somit als fest vorgegeben zu sehen. Da dieser wiederum direkt mit dem  $P_{\text{VKM}}$  gekoppelt ist, kann weiter reduziert werden und es bleiben nur die folgenden Stellgrößen übrig:

$$\overline{u_{\text{reduziert}}(t)} = \begin{pmatrix} P_{\text{VKM}}(t) \\ P_{\text{EM}}(t) \\ P_{\text{Ret}}(t) \\ \text{Gang}(t) \\ \text{VKM}_{\text{ein}}(t) \\ \text{Abkoppeln}_{\text{ein}}(t) \\ \text{Bremsen}_{\%}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{\text{Getriebe,ein}}(t) - P_{\text{EM}}(t) \\ P_{\text{EM}}(t) \\ 0 \\ \text{Gang}(t) \\ \text{VKM}_{\text{ein}}(t) \\ \text{VKM}_{\text{ein}}(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

Streicht man die Duplikate sowie trivialen Lösungen heraus und erweitert auf eine beliebige Anzahl an Antrieben, ergibt sich folgender Steuervektor für das Optimierungsproblem:

$$\overline{u_n(t)} = \begin{pmatrix} P_{\text{EM}_n}(t) \\ \text{Gang}_n(t) \\ \text{VKM}_{\text{ein}_n}(t) \end{pmatrix} \text{ für } n = 1..m \text{ Antriebe} \quad (3-18)$$

Es gelten hierbei weiterhin die Beschränkungen der Steuer- und Zustandsgrößen wie beim Fuzzyregler in Kap. 2.4.1.1.

Als Gütefunktion der Optimierung wird nun die äquivalente Kraftstoffleistung nach Formel 3-11 herangezogen, da diese den gesamten Energieumsatz angibt und somit zu minimieren ist. Diese besteht aus den beiden Bestandteilen direkter  $P_{\text{Kraftstoff}}$  und indirekter  $P_{\text{Batterie}}$  Kraftstoffumsatz.

$$P_{\text{Kraftstoff}}(\vec{u}, t) = m_{\text{Kr}}(\vec{u}, t) * H_u \quad (3-19)$$

Der Kraftstoff lässt sich durch den unteren Heizwert  $H_u$  von Diesel und durch den Massenfluss  $m'_{Kr}$  abbilden. Die Batterie wird durch ihre elektrischen Eigenschaften beschrieben:

$$P_{Batterie}(\vec{u}, t) = U_0 * I(\vec{u}, t) - R * I^2(\vec{u}, t) \quad (3-20)$$

Dabei sind  $U_0$  die Leerlaufspannung und  $R$  der Innenwiderstand, die im Folgenden als konstant angenommen werden. Einen Nachweis zur Rechtfertigung dieser Annahmen findet sich in den Kapiteln 9.1 und 9.2.  $P_{Batterie}$  lässt sich aber auch nach Formel 3-12 in seine Bestandteile zerlegen und somit gleichsetzen. Löst man dies nach dem Batteriestrom  $I$  auf, ergibt sich folgende Gleichung 3-21:

$$I(\vec{u}, t) = \frac{U_0}{2 * R} - \sqrt{\frac{U_0^2}{4 * R^2} - \frac{P_{EM}(t) + P_{Nebenaggregate}(t)}{R}} \quad (3-21)$$

Erweitert man nun mit der Leerlaufspannung, ergibt sich:

$$P_{Batterie}(\vec{u}, t) = \frac{U_0^2}{2 * R} - \sqrt{\frac{U_0^4}{4 * R^2} - \frac{U_0^2}{R} * [P_{EM}(t) + P_{Nebenaggregate}(t)]} \quad (3-22)$$

Daraus folgt die für die Optimierung notwendige Gesamtgleichung zu:

$$\underset{u(t)}{\operatorname{argmin}} \{ P_\lambda(\vec{u}, \lambda, t) \} = m'_{Kr}(\vec{u}, t) * H_u \quad (3-23)$$

$$+ \lambda * \left[ \frac{U_0^2}{2 * R} - \sqrt{\frac{U_0^4}{4 * R^2} - \frac{U_0^2}{R} * [P_{EM}(t) + P_{Nebenaggregate}(t)]} \right]$$

Es wird zunächst von einem konstanten Äquivalenzfaktor  $\lambda$  und einem ungeregelteten Nebenaggregateverbrauch  $P_{Nebenaggregate}(t)$  ausgegangen. Dabei fehlen nur noch das Wirkungsgradkennfeld von EM/LE und das Verbrauchskennfeld des VKM, der Äquivalenzfaktor  $\lambda$  und das Problem wäre gelöst. Zur Bestimmung von  $\lambda$  wird noch eine weitere Nebenbedingung benötigt, die der Ladungsneutralität der Batterie:

$$SoC(t = 0) \stackrel{\text{def}}{=} SoC(t = \text{end}) \quad (3-24)$$

Das heißt, dass am Ende eines Umlaufes in der Batterie wieder gleich viel Energie wie zu Beginn sein muss, damit diese Fahrweise auch beliebig oft wiederholt werden kann. So beginnt man mit einem entsprechend hohen  $\lambda$  – also

hohen Batterieentladekosten – und reduziert diese, bis die Formel 3-24 erfüllt ist. Der End-SoC kann auch höher sein, muss dann aber in die Kraftstoffberechnung miteinfließen.

Die Gleichung 3-23 gilt bisher nur für ein Fahrzeug mit einem Antriebsstrang wie einem Auto oder Bus. Eine Erweiterung auf einen n-fachen *Multi-hybrid* könnte wiederum die Ergebnisse dieser Optimierung auf alle Antriebe zu gleichen Anteilen übertragen, was aber nicht als sinnvoll erscheint. Das Problem der niedrigen Teillast, die beim Fuzzyregler durch Abschaltung eines Verbrennungsmotors gelöst wurde, würde hier wieder auftreten. Somit wäre nur ein lokales, jedoch kein globales Minimum gefunden. Es erscheint nahelegend zu sein, die Gütefunktion um einzelne Terme für jeden Antrieb zu erweitern, was zu folgender Gleichung 3-25 führt:

$$\underset{u_n(t)}{\operatorname{argmin}} \{ P_\lambda(\bar{u}_n, \lambda, t) \} = [m_{Kr_1}(\bar{u}_1, t) + \dots + m_{Kr_m}(\bar{u}_m, t)] * H_u \quad (3-25)$$

$$+ \lambda * \left[ \frac{U_0^2}{2 * R} - \sqrt{\frac{U_0^4}{4 * R^2} - \frac{U_0^2}{R} * [\{P_{EM_1}(t) + \dots + P_{EM_m}(t)\} + P_N(t)]} \right]$$

Somit ergeben sich mit jedem weiteren Antrieb drei weitere Freiheitsgrade, nämlich die gestellte Leistung der EM, der Gang und die Vorgabe, ob der VKM ebenfalls einen Beitrag leisten soll. Da die Summe über alle Antriebsleistungen in einem Rechenschritt durch die Sollleistungsanforderung  $P_{soll}$  des Triebfahrzeugführers (bzw. Traktionskraftanforderung) konstant bleiben muss und auch die Summe der jeweiligen VKM und EM pro Antrieb  $n$  beschränkt sind, ergibt sich eine zusätzliche Nebenbedingung:

$$P_{soll} = \sum_{n=1}^{n=m} \{P_{EM_n} + P_{VKM_n}\} = \operatorname{const} \quad (3-26)$$

Daraus folgt ein Optimierungsproblem der Ordnung  $k^{3*m}$  für  $k$  verschiedene Aufteilungen der Momente zwischen Diesel- und Elektromotor sowie die Wahl des Ganges bei  $m$  Antriebssträngen.

Dabei ist zu beachten, dass die Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen 3-2 bis 3-10 weiterhin pro Antriebsstrang einzuhalten sind. Insbesondere die Drehmoment- und Drehzahlgrenzen seien nochmals hervorgehoben. Unter Einbezug der elektrischen und thermischen Grenzen wie

maximale Lade- und Entladeströme der Batterie, Umrichterströme sowie Spannungsgrenzen ergeben sich zusätzlich über  $25^m$  Nebenbedingungen pro Rechenschritt.

Bereits für nur  $m = 2$  Teilantriebe ergibt sich somit ein hoher Rechenaufwand abhängig davon, wie die Quantisierungsstufen von  $k$  gewählt werden. Wählt man diese zu klein, geht die Aussagekraft verloren. Wählt man sie hingegen zu groß, ist die Echtzeitfähigkeit gefährdet. Vor dem Hintergrund, dass  $m$  typischerweise bei Triebzügen im Nahverkehr zwischen zwei und acht liegt, erscheint dieser Ansatz wenig praktikabel.

Zielführender ist hingegen eine Orientierung an der aktuellen Entwicklung von Mehrkernprozessoren für Steuergeräte, die pro Kern zwar langsamer sind, aber durch viele Kerne ebenfalls viele Rechnungen parallel durchführen und somit insgesamt Zeit einsparen können. Daraus lässt sich der Ansatz ableiten, das Gesamtproblem in kleine Teilprobleme zu zerteilen, diese gleichzeitig parallelisiert zu rechnen und anschließend das beste Ergebnis zu verwenden. Somit entsteht aus vielen lokalen Optima ein globales Gesamt optimum. Dies ist zulässig, da die Ergebnisse nicht voneinander abhängig sind, sondern verschiedene Lösungen für das gleiche Problem bei unterschiedlichen Rahmenparametern wie dem Gang bestimmen. Dafür sollen nun aus der Gesamtgütefunktion 3-25 für jeden einzelnen Anwendungsfall eigene Gütefunktionen erstellt werden, die dann eine parallele Verarbeitung ermöglichen. Abbildung 3-14 zeigt die beiden unterschiedlichen Implementierungen auf. Mit diesem Ansatz reduzieren sich die Ordnungen auf  $m * k^3$  für die Gütefunktionen selbst und auf  $m * 25$  für die Nebenbedingungen.

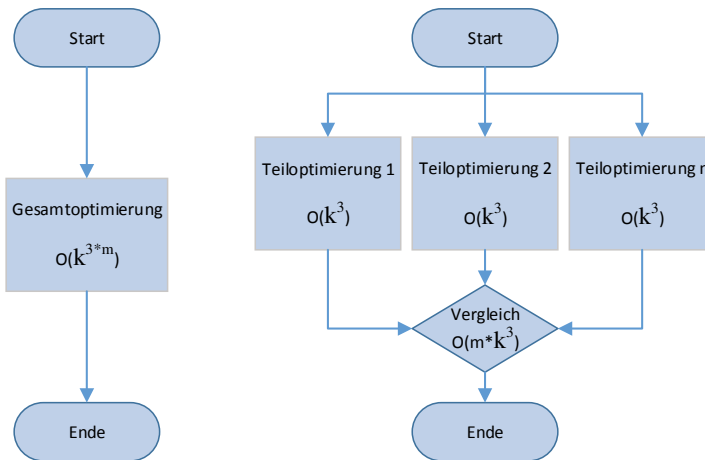


Abbildung 3-14: Abschätzung des Rechenaufwands verschiedener Implementierungen

Anschließend sind noch weitere Vereinfachungen durch Systemkenntnis möglich: Bei mehreren beteiligten Dieselmotoren sollten alle die gleiche Last sehen, um verbrauchsoptimal zu arbeiten. Diese Folgerung ergibt sich aus den typischen Kraftstoffverbrauchskennfeldern der Motoren. Die Bestpunkte liegen immer jeweils deutlich oberhalb von 50 % Auslastung. Darunter nimmt der spezifische Verbrauch überproportional zu. Dadurch reduziert sich die Ordnung auf  $m * i * k^2$  mit der Anzahl  $i$  möglicher Getriebestufen. Somit ist nun festgelegt, wie viele Optimierungsfunktionen es geben muss. Bei der Berechnung selbst müssen unter Annahme eines typischen Wandlerautomatgetriebes für den Bahneinsatz nur die Optimierungen durchgeführt werden, die einen Gang über und unter dem aktuellen Gang des jeweiligen Antriebs liegen. Ein Überspringen von Gängen ist technisch nicht möglich. Daraus folgt, dass in jedem Zeitschritt  $m * 3 * k$  Optimierungen ausgeführt werden müssen, wenn die Momentenverteilung zwischen VKM und EM als lineare Verschiebung betrachtet wird.



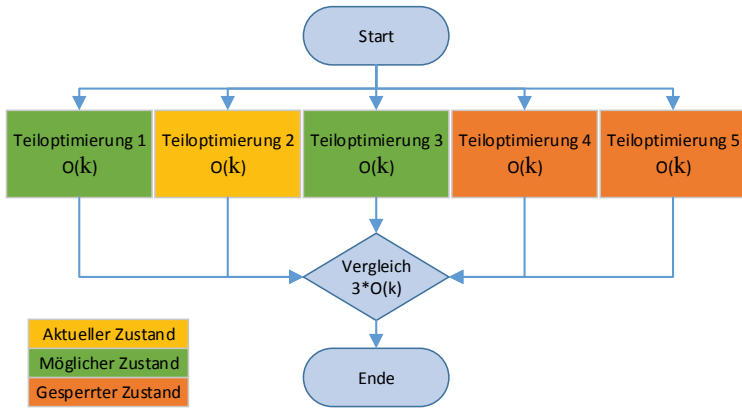


Abbildung 3-15: parallele Implementierungsvariante für einen Antrieb mit fünf Gängen

Im dargelegten Beispiel eines Antriebs aus Abbildung 3-15 ist die Gütefunktion nach Formel 3-25 drei Mal mit den folgenden Steuervektoren zum Zeitpunkt  $t_z$  zu lösen:

$$\overline{u_1(t_z, Gang_{1st})} = \begin{pmatrix} P_{EM_1}(t_z) \\ Gang_1(t_z) \\ VKM_{ein_1}(t_z) \end{pmatrix} = (P_{EM_1}(t_z), 2, 1)^T \quad (3-27)$$

$$\overline{u_1(t_z, Gang_{1st+1})} = \begin{pmatrix} P_{EM_1}(t_z) \\ Gang_1(t_z) \\ VKM_{ein_1}(t_z) \end{pmatrix} = (P_{EM_1}(t_z), 3, 1)^T \quad (3-28)$$

$$\overline{u_1(t_z, Gang_{1st-1})} = \begin{pmatrix} P_{EM_1}(t_z) \\ Gang_1(t_z) \\ VKM_{ein_1}(t_z) \end{pmatrix} = (P_{EM_1}(t_z), 1, 1)^T \quad (3-29)$$

Dabei wird ein Szenario der Konstantfahrt mit mittlerem SoC betrachtet, bei dem die Traktionsanforderung den Einsatz der VKM erfordert.

Nun wird jeweils die Optimierungsfunktion pro Gang aufgestellt: Durch die Umrechnung der Raddrehzahl und der jeweiligen Getriebeübersetzung ergeben sich die geforderten motorseitigen Drehmomente. Abbildung 3-16 zeigt die äquivalente Kraftstoffleistung  $P_\lambda$  im Gang  $i$  für ein beliebig gewähltes Beispiel auf. Es ergeben sich ein resultierendes Sollmoment von 1200 Nm und ein optimaler Betriebspunkt von 1300 Nm. Hier liefert der Elektromotor exemplarisch ein betragsmäßig maximales Drehmoment von 600 Nm, welches auf -100 Nm gesetzt wird, um den optimalen Punkt durch Auflastung zu erreichen. Damit das gewünschte Sollmoment erreicht wird, muss der VKM nun 1300 Nm bereitstellen.

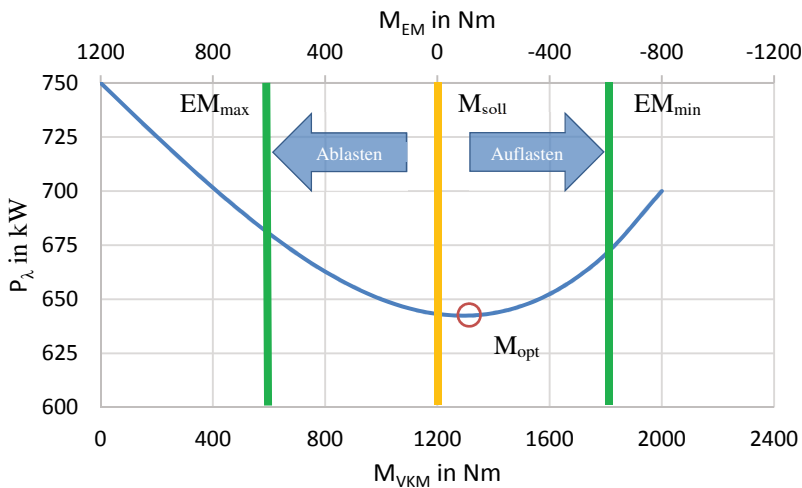


Abbildung 3-16: ECMS-Optimierung der Momentenverteilung

Bisher wurde nur eine Optimierung durchgeführt. Es wird mit den beiden anderen Gängen analog verfahren und anschließend der Gang gewählt, der im jeweiligen Bestpunkt die niedrigste äquivalente Kraftstoffleistung erzielt.

Eine Erweiterung auf  $m$  Antriebe erfolgt dadurch, dass pro Antrieb drei weitere Optimierungen parallel durchgeführt werden. Wobei zuerst anhand der

Leistungsanforderung durch den Triebfahrzeugführer und der notwendigen Adhäsionsmasse zur Umsetzung der erforderlichen Kraft auf die Schiene entschieden wird, wie viele Antriebe sich am Vortrieb beteiligen sollen.

Durch Verwendung der Gleichung 3-12 zur Herleitung der ECMS sind beim Betrieb des Elektromotors die Wirkungsgradverluste der Maschine selbst und des Umrichters vernachlässigt worden. Im Vergleich mit dem Kennfeld von EM und LE in Abbildung 2-6 macht man damit einen Fehler kleiner 20 % (90 % Wirkungsgrad pro Richtung). Um die Qualität des Ergebnisses zu steigern, sollte darum das Kennfeld in die Berechnung von  $P_\lambda$  mit einbezogen werden. Das ist einfach möglich durch Ersetzung von  $P_{EM_n}(t)$  in Gleichung 3-25 durch  $\eta_{EM}^2 * P_{EM_n}(t)$  sowie  $\eta_{EM} * P_N(t)$  für die Nebenaggregate.

Regelbasierte Ansätze wie Zustandsautomaten liefern gute Ergebnisse bei bekannten Randbedingungen, auf die im Vorfeld optimiert werden können. Ändern sich diese durch beispielsweise ein anderes Fahrprofil oder abweichende klimatische Bedingungen, kann die Güte der Lösung deutlich abnehmen. Die ECMS lässt sich in einem solchen Fall durch den Äquivalenzfaktor sehr leicht an geänderte Rahmen adaptieren. [HUT15]

## 3.6 Dynamische Programmierung nach Bellman

Im Folgenden wird eine Optimierung nach Bellman entworfen. Diese ist nicht als Regler geeignet, da es sich um ein Offline-Verfahren handelt. Es benötigt bei entsprechender Diskretisierung große Rechenzeiten und soll im Folgenden als Vergleichsbasis und zur Einstellung der ECMS dienen.

Da eine Regelung der Größen nicht notwendig ist, wird die Simulation rückwärts gerichtet ausgeführt und stellt damit nur noch eine Steuerung dar. Dies ist dadurch möglich, dass das optimale Fahrprofil  $v(t, s)$  prädiktiv gegeben ist. Somit lässt sich in jedem Zeitschritt die Beschleunigung errechnen. Daraus folgt zusammen mit den geometrischen Fahrzeugparametern über die Fahrwiderstände eine Vorausberechnung der notwendigen Antriebsleistung.

Über die zulässigen Drehzahlen am Getriebeeingang können dann die möglichen Gänge für die jeweilige Geschwindigkeit ermittelt werden. Aus diesen Gängen und der jeweils notwendigen Antriebsleistung folgen die erforderlichen Drehmomente.

Mit den Werten können anschließend alle möglichen Ansteuerungen – also Verschiebungen in der Momentenverteilung zwischen Elektromotor und Dieselmotor – berechnet werden. Das muss entsprechend mit diskreten Stufen erfolgen.

In Betriebspunkten ohne Lastpunktverschiebung, wie bei Rekuperation oder elektrischem Fahren, sind die Begrenzungen nicht notwendig. Es sind dort maximal sechs verschiedene Zustände möglich – einer pro Gang – wobei nicht alle auf Grund der Komponentengrenzen zulässig sind.

Quantisierung	Abweichung im Kraftstoffverbrauch	Rechenzeit
$qM_{EM}$	$\frac{q}{q \rightarrow 0}$	$t_R$
24 Nm	$\sim 0$	30 h
40 Nm	0,1 %	11 h
60 Nm	0,2 %	5,7 h
120 Nm	1,2 %	3,3 h
240 Nm	1,8 %	0,6 h
1200 Nm	4,3 %	0,2 h

Tabelle 3-5: Quantisierungen beim Bellman-Algorithmus, PMB-RB

Zur Bestimmung der notwendigen Quantisierung der Ansteuerung werden verschiedene Stufen untersucht und der Kraftstoffverbrauch verglichen. Abweichungen von unter zwei Prozent pro Fahrt auf der längsten Teststrecke werden als hinreichend genau angenommen (vgl. Tabelle 3-5).

Zur einfacheren Vergleichbarkeit werden die Simulationen mit fester Ortsabhängigkeit bei einer Diskretisierung von einem Meter durchgeführt. Aus

den berechneten Ansteuerungen wird dann pro Streckenmeter diejenige ausgesucht, die den geringsten Kraftstoffverbrauch ergibt. Übrige Ansteuerungen werden verworfen, was den Speicheraufwand und die Rechenzeit auf üblichen Desktop-PCs beherrschbar macht. Als sinnvoll haben sich Stufen zu 240 Nm ergeben, was im Falle des Beispielfahrzeugs etwa 20 unterschiedlichen Momentenverteilungen pro Gang entspricht.

Intuitiv wird durch diese Auswahl immer bevorzugt elektrisch gefahren. Dies geht jedoch nur, bis die Batterie leer ist. Danach müssen alternative Ansteuerungen gewählt werden. Dieses Problem lässt sich umgehen, wenn mit einer leeren Batterie gestartet wird. Das System muss also physikalisch sinnvoll und lösbar sein.

Für ein realistisches Szenario wird ermittelt, wie viel Batterieladung die letzte Bremsung des Umlaufs generiert. Dieser wird als Startwert zu Fahrtbeginn eingestellt. Damit ergibt sich ein ausgeglichener Ladezustand. Da nicht in allen Situationen ausreichend aufgelastet werden kann, um die Nebenaggregate zu versorgen, gibt es als Hilfsmittel die Möglichkeit, genügend elektrische Reserven vorzuhalten. Eine untere Batteriegrenze, die zu Traktionszwecken nicht durch den Optimierer unterschritten werden darf, realisiert einen entsprechenden Energievorrat. Wird er durch Verbräuche der Nebenaggregate unterschritten, muss er in Folgeschritten wieder ausgeglichen werden.

Die Zeit wird mit 64 bit als Gleitkommawert, Energien in der Batterie mit 1 J, der Kraftstoff mit 1 g sowie das Drehmoment mit 1 Nm und die Strecke mit 1 m quantisiert. Diese Werte liegen jeweils deutlich unterhalb der Messgenauigkeit der am Prüfstand verwendeten Messeinrichtungen und insbesondere der GPS-Daten. Somit sind die Datentypen so klein wie möglich und gleichzeitig so groß wie nötig festgelegt.

Im Folgenden sind die Schritte nochmals einzeln aufgelistet:

Schritt	Eingangsgrößen	Berechnungsgrundlage
1	$v(s)$ , $t(s)$ , $S(s)$ , $m$ , geometrische Parameter	Fahrwiderstände
2	$P(s)$ , $n_{Ab}(s)$	Getriebegrenzwerte
3	$n_{An}(s,i)$ , $M_{soll}(s,i)$	Motorenkennfelder
4	$be(s)$	Kraftstoffverbrauch
5	$M_{VKM}(s)$ , $M_{EM}(s)$	Fahrtrajektorie

Tabelle 3-6: Berechnungsschritte beim Bellman-Algorithmus

## 4 Modellbildung

Um einen Benchmark der einzelnen Reglerentwürfe durchführen zu können, wird im ersten Schritt ein Modell entwickelt, bei dem sich insbesondere der Antrieb möglichst realistisch verhält. Für diesen Zweck bieten sich eindimensionale Multi-Physik-Modelle an, da sie das Verhalten auf Grund der physikalischen Größen wie Drehzahl und Drehmoment abbilden.

Die Unterschiede zwischen multiphysikalischer Modellierung und Signalflussorientierung zeigen [Haa16] und [HEG17] auf.

### 4.1 Grundlagen multiphysikalischer Modellierung

Zur Modellierung komplexer technischer Systeme bietet die Multi-Physik-Simulation mit Softwarepaketen wie Modelica/Dymola zahlreiche Vorteile:

Man kann direkt in jede Komponente „hineinschauen“ und die inneren Zustände beobachten, was eine Fehlersuche deutlich erleichtert und auch die Abbildung der Komponentengrenzen ermöglicht. Daraus folgt direkt, dass zur Beschreibung einfache Black-Box-Modelle der Regelungstechnik nicht ausreichend sind. Es muss auf komplexere White-Box-Ansätze übergegangen werden. Durch die Darstellung als Fluss- und Potenzialgrößen kann mit intuitiven Einheiten wie Volt und Ampere anstatt nur einheitenlosen Größen bei der Signalflussorientierung gearbeitet werden. Komponenten können in Form von Differenzialgleichungen direkt interagieren, statt nur nacheinander zu reagieren. Das heißt, dass die Komponenten nicht gerichtet sind, sondern jeder Eingang ins System auch als Ausgang aus dem System dienen kann. Ein weiterer Vorteil ist die Objektorientierung. Durch sie werden Schnittstellen zwischen den Teilkomponenten fest definiert und sind modular austauschbar.

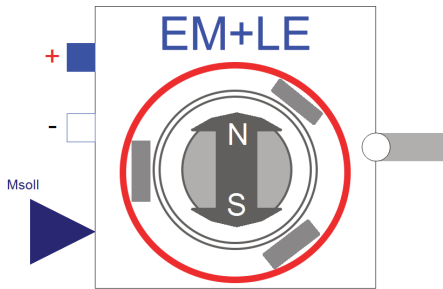


Abbildung 4-1: Modellkomponente mit Interfaces

So kann beispielsweise ein Block (vgl. Abbildung 4-1), der als Interfaces Gleichspannungsversorgung und mechanische Welle hat, also ein *Elektromotor mit Leistungselektronik* (EM mit LE) ist, durch eine ASM, PSM, FESM, SRM oder andere schnittstellenkompatible Motoren bedient werden.

Interface-Typ Größe	Eingang	Ausgang
	$M_{soll}$ in Nm	✓
$U^+$ in V $I^+$ in A	✓	✓
$U^-$ in V $I^-$ in A	✓	✓
$M$ in Nm $\omega$ in rad/s	✓	✓

Tabelle 4-1: Interfacebeschreibung einer Komponente

Tabelle 4-1 listet die entsprechenden Schnittstellen mit Einheiten auf. Dabei zeigt sich, dass auch hier gerichtete Größen in Form eines Steuersignals auf-



treten können. Weiterhin können bestimmte Ein- und Ausgänge aufgrund physikalischer Zusammenhänge direkt gekoppelt sein und dadurch bei der Modellierung auch entfallen wie beispielsweise  $I^+ \stackrel{\text{def}}{=} -I^-$  und  $U^- \stackrel{\text{def}}{=} 0$ .

Hinter den verbleibenden Schnittstellen verbirgt sich ein Satz von (Differenzial-) Gleichungen, die grafisch oder durch Quellcode abgebildet sein können.

## 4.2 Umwelt

In der Umweltdomäne werden die äußeren Einflüsse auf das Fahrzeug beschrieben. Dazu gehören die vorgegebenen Fahrpläne, die Strecken mit ihren Gleislagen, die Fahrgäste und auch das Wetter. Diese Faktoren haben wesentlichen Einfluss auf die Fahrwiderstände und die Nebenaggregate.

### 4.2.1 Fahrpläne

Fahrpläne werden in dieser Arbeit grundsätzlich als unveränderlich angenommen. Das große Einsparpotenzial, dass die Veränderung dabei ergibt, ist bekannt, wird jedoch nicht als Bestandteil dieser Arbeit gesehen.

Da sich die im Folgenden betrachteten Strecken im Regelverkehr befinden, werden ebenfalls die regulären und frei verfügbaren Fahrpläne mit Stand Sommer 2017 verwendet. Daraus extrahiert werden die Abfahrtszeiten (und falls vorhanden auch Ankunftszeiten) sowie die Bahnhofsnamen. Aus externen Kartendiensten werden die GPS-Koordinaten der einzelnen Bahnhöfe ergänzt.

<b>Halt in #</b>	<b>Bahnhof</b>	<b>Lon in °</b>	<b>Lat in °</b>	<b>Alt in m</b>	<b>An/Ab in min</b>
1	Friedrichshafen	9,4733	47,6531	404	0
2	Löwental	9,4991	47,6614	405	3
3	Flughafen	9,5237	47,6723	414	5
4	Kehlen	9,5481	47,6831	409	8
5	Meckenbeuren	9,5585	47,6998	416	10
6	Oberzell	9,5745	47,7518	422	15
7	Weißenuau	9,5944	47,7660	425	17
8	Ravensburg	9,6063	47,7844	431	20
9	Weingarten/Berg	9,6169	47,8169	438	23
10	Niederbiegen	9,6209	47,8306	444	25
11	Mochenwangen	9,6378	47,8726	458	29
12	Aulendorf	9,6438	47,9532	547	38

Tabelle 4-2: Beispiel eines Fahrplans der Bodensee-Oberschwaben-Bahn

Um das Potenzial von Höhendifferenzen zwischen Beginn und Ende von Strecken im Energiemanagement nutzen zu können, werden Hin- und Rückfahrt immer zu einem Umlauf zusammengesetzt und am Stück simuliert. Daraus lassen sich dann auch die Wendezeiten ableiten, in denen das Fahrzeug mit ausgeschaltetem Motor die Nebenaggregate weiter versorgen muss.

## 4.2.2 Trassierung

Die Auswahl verschiedener Streckentypen erfolgt möglichst umfangreich, um passende Lastkollektive zu generieren und nicht nur auf ein bestimmtes Optimum hinzuarbeiten. Deswegen werden Strecken mit unterschiedlichen Steigungen  $S$ , Steigungswechseln  $S'$ , Höhendifferenzen  $\Delta h$ , Haltestellenanzahlen  $\#$ , Durchschnittsgeschwindigkeiten  $v_0$  und zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ausgewählt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick bevor im Anschluss detaillierte Charakteristiken präsentiert werden:

<b>Streckenname</b>	<b>s</b>	<b>#</b>	<b>S</b>	<b>S'</b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>v_0</math></b>
Pfälzische Maximiliansbahn RB	58 km	20	-	o	-	+
Pfälzische Maximiliansbahn RE	58 km	6	-	o	-	++
Maintalbahn RB (Westfrankenbahn)	38 km	14	--	--	--	+
Maintalbahn RE (Westfrankenbahn)	38 km	5	--	--	--	++
Bodensee-Oberschwaben-Bahn RB	34 km	12	o	--	o	++
Zwönitztalbahn RB (Erzgebirgsbahn)	51 km	19	+	o	+	o
Zschopautalbahn RB (Erzgebirgsbahn)	64 km	21	++	++	+	+
Schwarzwassertalbahn RB (Erzgebirgsbahn)	56 km	19	++	+	++	+

Tabelle 4-3: Übersicht der Teststrecken

Legende zu Tabelle 4-3: ++ hoch, + erhöht, o durchschnittlich, - gering, -- gering

### 4.2.2.1 Streckenprofile der Maintalbahn (MTB)

Die Maintalbahn verläuft von Aschaffenburg bis nach Miltenberg. Es verkehren Regionalexpress- und Regionalbahnverkehre mit unterschiedlichen Haltanzahlen [DB17]. Auf dieser Strecke, die bis auf Anfang und Ende kaum Steigungen hat, ist somit der direkte Vergleich zwischen Fahrten bei höherer Geschwindigkeit mit wenigen Beschleunigungen (5 Halte) sowie niedriger Geschwindigkeit mit 14 Halten möglich. Mit nur knapp 75 km gehört sie zu den kürzeren Umläufen.

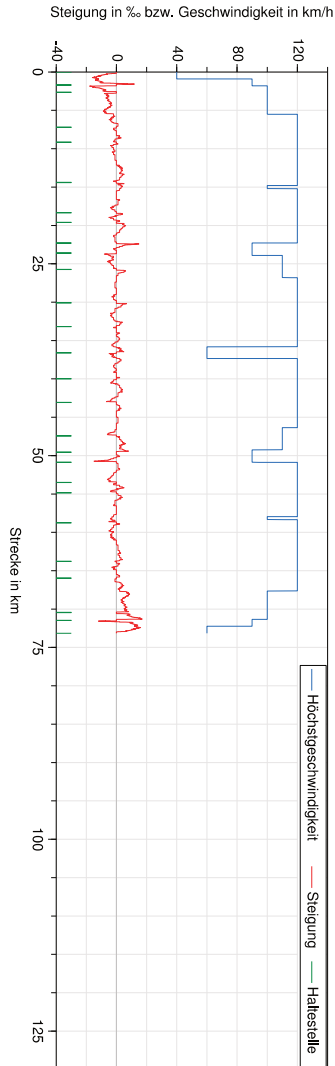


Abbildung 4-2: Streckenprofil MTB

#### 4.2.2.2 Streckenprofil der Bodensee - Oberschwaben - Bahn (BOB)

Untersucht wird die Strecke der Bodensee-Oberschwaben-Bahn von Friedrichshafen Stadt nach Aulendorf und zurück. Verwendet wird der originäre Fahrplan [BOB16] als Regionalbahn, der aber für ein leistungsstärkeres Fahrzeug vorgesehen ist. Ein Hybridfahrzeug kann hier durch die kurzzeitigen zusätzlichen Leistungen im Boostbetrieb aller Antriebe Vorteile generieren. Die Strecke verläuft vom Bodensee in Richtung Ulm und steigt dabei kontinuierlich mit etwa 10‰ an. Die Höchstgeschwindigkeit beläuft sich auf maximal 120 km/h. Es gibt auf einer Länge von 41 km 12 Haltestellen.

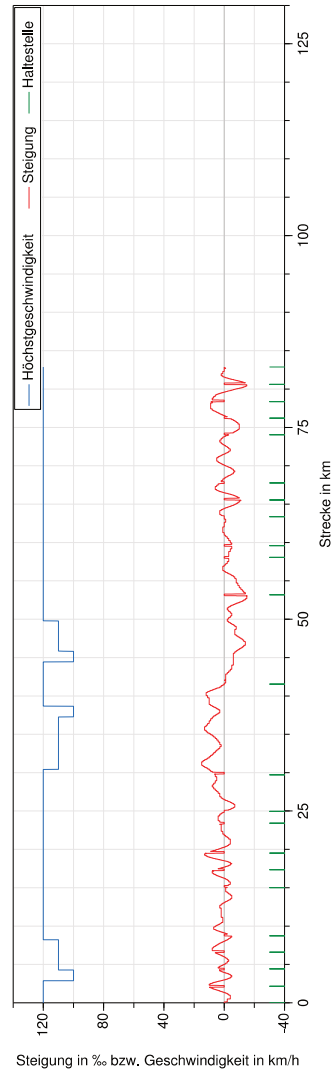


Abbildung 4-3: Streckenprofil BOB

### 4.2.2.3 Streckenprofile der Pfälzischen Maximiliansbahn (PMB)

Der untersuchte Streckenabschnitt der Maximiliansbahn verläuft von Karlsruhe durch die Pfalz nach Neustadt an der Weinstraße und zurück. Diese Strecke bietet ebenfalls Regionalbahn- sowie Regionalexpressverkehre [VRN17]. Bis auf kurze Abschnitte, zumeist über Brücken mit höheren Steigungen, gibt es auf Grund der Lage in der Oberrheinebene nur wenige Höhenmeter. Das Profil ähnelt der Maintalbahn, zeichnet sich jedoch über einen deutlich längeren Umlauf von fast 120 km aus. Abhängig von der Tageszeit verkehren VT 642 oder VT 643 in Mehrfachtraktion mit bis zu drei Fahrzeugen. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt bis zu 120 km/h, welche bei RE-Fahrten auch fast durchgehend eingehalten wird und somit hohe Anforderungen an die dauerhafte Systemleistung stellt.

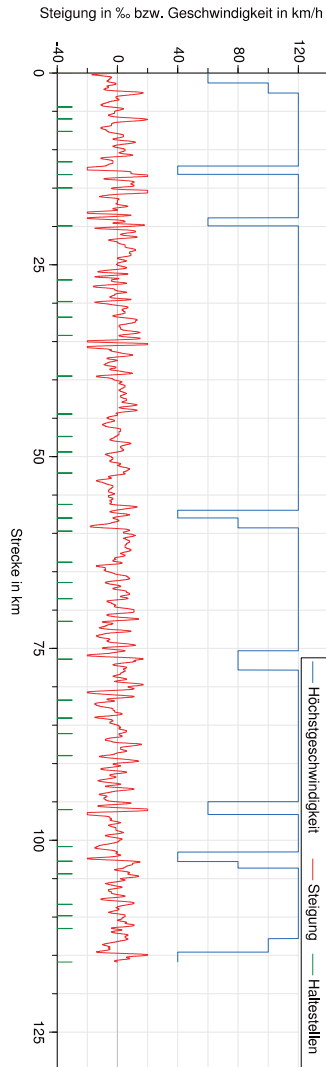


Abbildung 4-4: Streckenprofil PMB

#### 4.2.2.4 Streckenprofile der Erzgebirgsbahn

Im Erzgebirge gibt es mehrere Bahnstrecken des Regionalverkehrs, wovon hier drei verschiedene Typen aufgegriffen werden. Gemeinsam haben alle das Zurücklegen von vielen Höhenmetern während eines Umlaufes.

##### Streckenprofil der Zwönitztalbahn (ZwTB)

Betrachtet wird die reguläre Strecke von Chemnitz nach Aue und zurück. Der Fahrplan sieht tageszeitabhängig an unterschiedlichen Standorten mehrfache hohe Standzeiten von 5-10 min an Zwischenhalten vor [DB16d]. Diese sind besonders interessant für eine Vorkonditionierung der Batterie zur elektrischen Überbrückung bei abgeschalteten Motoren. Auch hier kann ein Hybridfahrzeug durch die kurzzeitigen zusätzlichen Leistungen im Boostbetrieb aller Antriebe insbesondere bei Bergfahrt Vorteile generieren. Die Streckenführung verläuft mit etwa 10 % kontinuierlich bergauf bis zum höchsten Punkt und fällt dann nach Aue mit über 30 % steil ab. Es gibt 19 Haltestellen bei einer Länge von 51 km.

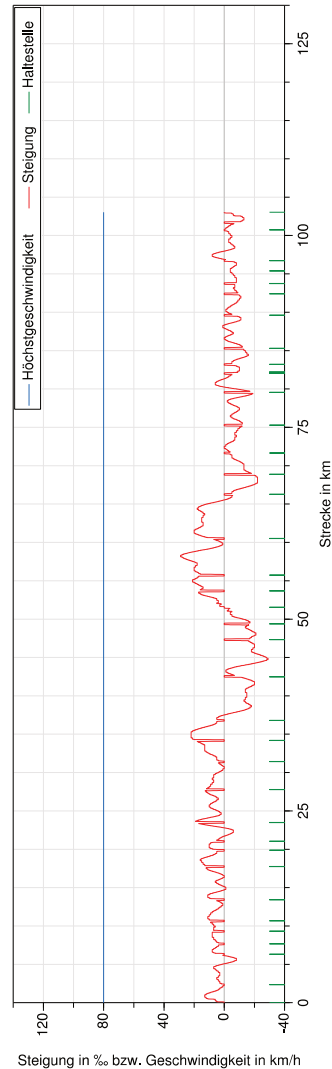


Abbildung 4-5: Streckenprofil ZwTB

### Streckenprofil der Zschopautalbahn (ZsTB)

Die Bahnstrecke zwischen Chemnitz und Cranzahl stellt eine weitere Verbindung im Erzgebirge dar. Sie zeichnet sich durch immer wieder auftretende steile Abschnitte aus und einem Bereich mit sehr hohen Geschwindigkeiten. Sie stellt somit deutliche Leistungsanforderungen und lässt gute Potenziale für elektrisch unterstützten Betrieb erwarten. Verwendet wird der reguläre Fahrplan [DB16c]. Mit 130 km pro Umlauf stellt diese die längste Strecke in der Untersuchung dar.

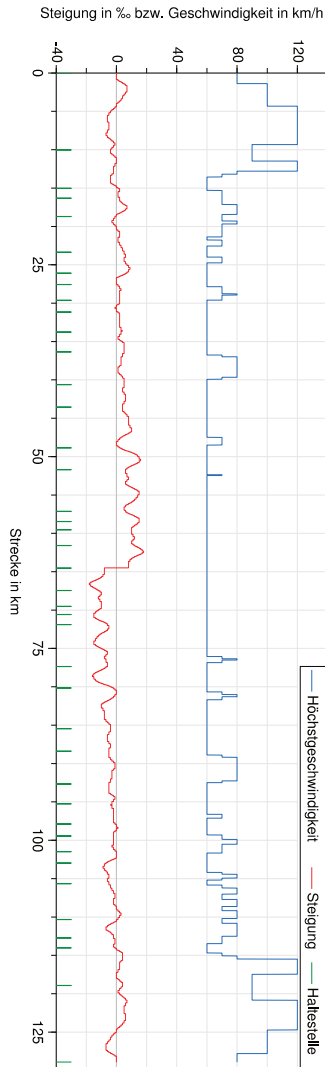


Abbildung 4-6: Streckenprofil ZsTB



### Streckenprofil der Schwarzwassertalbahn (SwTB)

Von Zwickau nach Johanngeorgenstadt an der tschechischen Grenze verläuft eine weitere Strecke der Erzgebirgsbahn. Sie gewinnt kontinuierlich an Höhenmetern während vielen zwischenzeitlichen Steigungswechseln bei Geschwindigkeiten um 70 km/h. Auch hier wird der reguläre Fahrplan angesetzt [DB16a]. Mit einer Streckenlänge von 56 km und 19 Halten entspricht sie einem typischen Regionalbahnprofil.

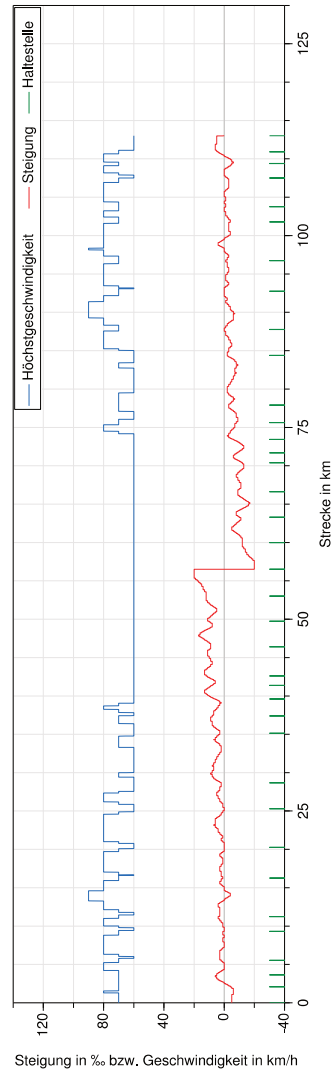


Abbildung 4-7: Streckenprofil SwTB

### 4.2.3 Fahrgäste

Die Fahrgäste nehmen auf mehrere Arten Einfluss auf das Fahrzeug: Naheliegender erscheint das Erhöhen des Transportgewichts. Weiterhin strahlen sie direkt Wärme ab und legen auch die individuellen Türöffnungszeiten fest, die das Klimatisierungssystem kompensieren muss. Diese Parameter hängen im Wesentlichen von der Tageszeit ab (Berufs- und Schülerverkehr). Eine Erhebung dieser Daten ist nur durch empirische Studien möglich. Damit nicht auf einen speziellen Punkt optimiert wird, ist es sinnvoll einen Mittelwert sowie Standardabweichungen dazu festzulegen. Am Ende jeder Fahrt muss entsprechend die Anzahl an Fahrgästen wieder null betragen.

Halt	Bahnhof	Zustieg $\bar{Q}$ in #	Zustieg $\sigma^2$ in # <sup>2</sup>	Haltdauer $\bar{Q}$ in s	Haltdauer $\sigma^2$ in s <sup>2</sup>	Türöffnung $\bar{Q}$ in s	Türöffnung $\sigma^2$ in s <sup>2</sup>
1	Karlsruhe	46	11	720	0	720	0
2	Wörth	14	152	60	0	31	2
3	Kandel	1	9	100	1600	36	75
4	Winden	-10	245	60	0	33	245
5	Landau	-1	32	100	400	57	3
6	Neustadt	-51	7	1000	48400	1000	48400

Tabelle 4-4: Beispiel einer Fahrgastauslastung

Mit diesem Prinzip können die Fahrgastzahlen als wechselnder Anteil simuliert werden. Um vergleichende Aussagen treffen zu können, bei denen die Fahrgäste nicht im Fokus stehen, werden folgende beiden Annahmen getroffen, welche als Mittelwerte aus empirischen Messungen für Regionalbahnverkehre mit Schiebetritt im Türenbereich zu sehen sind:

- Türöffnungszeit zum Fahrgastwechsel 18 s
- Abschalten der Klimatisierung im Stand nach 120 s
- Fahrgastzahl
  - o morgens 3/3 Belegung
  - o mittags 1/3 Belegung
  - o abends 2/3 Belegung

Da bei der Fahrzeugklasse VT 642 der Deutschen Bahn die Schiebetritte manuell durch den Fahrzeugführer auszufahren sind, variiert die Haltezeit zwischen 12 und 20 s allein durch diesen Umstand. Die reine Wechselzeit zum Ein- und Aussteigen befindet sich bei unter fünf Passagieren pro Tür bei ca. drei Sekunden.

## 4.3 Fahrzeug

In dieser Arbeit dient der bereits in Kapitel 2.3.1.2 vorgestellte Desiro Classic VT 642 von Siemens als Beispielfahrzeug. Zum Test der vorgestellten Regelalgorithmen mit Prädiktionsdaten wird auf den aktualisierten Baustand als *Multihybridfahrzeug* aus dem Projekt *PREDIKT* (vgl. Kapitel 2.2.4) zurückgegriffen. Im Folgenden wird detailliert auf das zu Grunde liegende Fahrzeug und dessen Modellierung eingegangen:

### 4.3.1 Aufbau

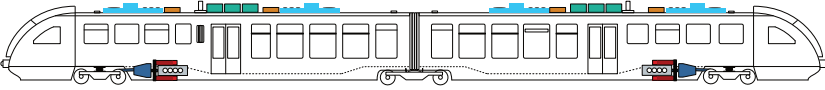


Abbildung 4-8: Siemens Desiro Classic VT642, in Hybridkonfigurationen PREDIKT

Das genannte Fahrzeug (Fahrzeugnummer 642.129/629) ist ein prototypisch umgebauter Nahverkehrstriebzug aus der Familie der Desiro Classic von Siemens Mobility [Sie00]. Dieser ist im Rahmen der früheren Projekte *Demonstration eines Hybrid-Schienenbusses und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit* [Leh13] und *LIANA<sup>+</sup> – große Li-Ionen-Akkumulatoren für Diesel-Elektro-Hybride in Non-Road-Anwendungen* [Ebe14] hybridisiert worden. Im Folgenden ist eine Übersicht gegeben [DB11; Ebe14; Leh13; Sie00]:

<b>Baureihe</b>	VT 642 H
<b>Antrieb</b>	dieselmechanisch, 5 Gänge mit Wandler
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>	120 km/h
<b>Leergewicht ohne Antrieb</b>	2* 33 t
<b>Fahrzeuglänge</b>	2* 20,5 m
<b>Stirnfläche</b>	10 m <sup>2</sup>
<b>Raddurchmesser</b>	770 mm
<b>Sitzplätze</b>	107 (16 Plätze ausgebaut)
<b>Stehplätze</b>	90
<b>Drehgestelle</b>	2* Triebdrehgestell mit Achswendegetriebe, 1* Jakobslaufdrehgestell
<b>Klimatisierung</b>	4* Klimaanlage
<b>Batterien</b>	2* zwei Akasol AKM 46Ah <i>LiANA+</i>
<b>Dieselmotoren</b>	2* MTU 315 kW
<b>Elektromotoren</b>	2* 200 kW auf Kurbelwelle
<b>Bremsen</b>	Wellenscheibenbremse hydraulischer Retarder Magnetschienenbremse

Tabelle 4-5: Fahrzeugdaten des Desiro Hybrid VT642

### 4.3.2 Antriebssystem

Im anschließenden Projekt *PREDIKT - Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe* [MAK18; TÜV18] wurde das eingesetzte *HybridPowerPack* (HPP) weiterentwickelt. Dabei kamen folgende Komponenten zum Einsatz, die auch in dieser Arbeit verwendet werden (Farben beziehen sich auf die Abbildung 4-8):

Komponente	markiert mit	Daten
MTU-Dieselmotoren	grau	2* 390 kW oder 1* 390 kW
Elektromotoren	rot	4* 100 kW dauerhaft, 200 kW für ca. 30s
Summiergetriebe mit Trennkupplung	schwarz	summiert beide EM, trennt VKM bei Bedarf ab
automatisiertes ZF 6-Gang Schaltgetriebe	blau	2* 2500 Nm 1800 Nm Anfahrwandler
Akasol Batterien	grün	AKM 46 Ah <i>LiANA+</i> oder OEM 37 Ah <i>PREDIKT</i>

Tabelle 4-6: Fahrzeugkomponentendaten des MTU-HybridPowerPack 2

Abweichend von *PREDIKT* werden in dieser Arbeit höhere Anzahlen an Batterietrögen verwendet, so dass diese etwas weniger als die Dauerleistung der Elektromotoren decken können. Dies hat den Vorteil, dass Grenzen von Batterieströmen nur geringen Einfluss auf die Betriebsstrategie haben, auch wenn diese von der erstellten Simulationsumgebung berücksichtigt würden und im Überlastbetrieb eingesetzt werden.

Der alternative Batterietyp Akasol *OEM PREDIKT* wird nicht betrachtet, da für ein validiertes Modell nicht ausreichend Messdaten zur Verfügung standen.

### 4.3.2.1 Bordnetz und Topologie

Die betrachtete Fahrzeugtopologie ist aus zwei symmetrischen Fahrzeughälften aufgebaut. Der Antrieb besteht aus zwei eigenständigen Antriebsanlagen, die jeweils als Parallelhybrid ausgeführt sind. Über ein Summiergetriebe (schwarz) werden jeweils zwei Elektromotoren (rot) und ein abkoppelbarer Dieselmotor (grau) zusammengeführt. Der gemeinsame Abtrieb erfolgt dann über ein Schaltgetriebe und eine drehgestell-integrierte Festübersetzung mit Richtungswechsel.

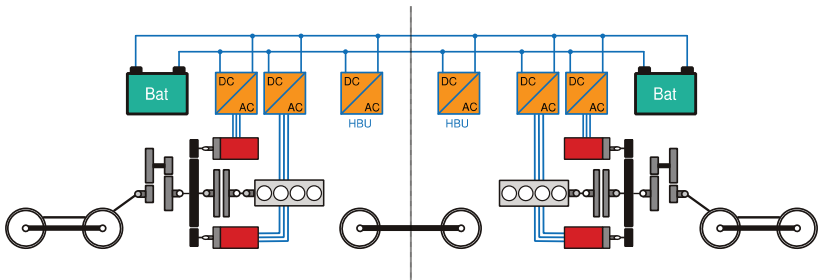


Abbildung 4-9: Fahrzeugtopologie und Bordnetz

Beide Zughälften teilen sich einen gemeinsamen Zwischenkreis mit harter Parallelschaltung der Traktionsbatterien. Neben den Antriebsstromrichtern sind weitere *Hilfsbetriebeumrichter* (HBU) zur Versorgung von Nebenaggregaten vorhanden. Durch Parallelschaltung können weitere Batterien stufenweise ergänzt werden und somit mehr Leistung und Energie bereitstellen.

Als Sonderbauform kann auch ein Dieselmotor entfallen und der freie Bauraum und die Gewichtersparnis für zusätzliche Batterien eingesetzt werden.

### 4.3.2.2 Dieselmotor

Die Verbrennungsmotorenfamilie von MTU für Dieseltriebwagen mit 275 bis 390 kW wird mit allen Leistungsstufen mit dem Modell aus Abbildung 4-10 beschrieben.

Dazu werden als Eingangsgrößen das Start-Stopp-Signal und das Sollmoment benötigt. Diese gehen dann über die Drehmomentbegrenzung als inneres Moment auf die Kurbelwelle. Durch die vorhandene Motorträgheit ergibt sich dann, nach Abzug von außen an die Welle angreifender Kräfte, eine Drehzahl. Abhängig von dieser Drehzahl können das Reibmoment und die aktuell geltende Momentenbegrenzung sowie der Kraftstoffverbrauch ermittelt werden.

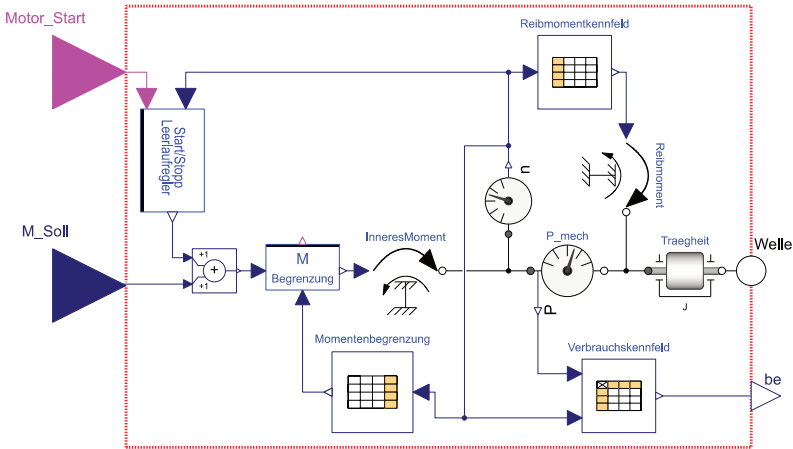


Abbildung 4-10: vereinfachtes Modell des Dieselmotors

Durch Austausch des Momentenbegrenzungskennfeldes können verschiedene Motortypen der Familie dargestellt werden. Dies entspricht dem gleichen Verfahren wie an realen Motorsteuergeräten.

### 4.3.2.3 Elektromotor

Zur Modellierung der Elektromotoren mit Umrichter und Getriebestufen wird ebenfalls ein Kennfeld herangezogen, das der Hersteller bereitgestellt hat und durch Vermessung am Prüfstand validiert ist. Zur Verfügung stehen dafür die Werte aus Drehmoment und Drehzahl mittels Messung am Abtrieb des Summationsgetriebes sowie die Leistung an der Zwischenkreisklemme des Umrichters.



Die Abbildung erfolgt durch das Sollmoment als Eingang sowie der mechanischen Welle und einem elektrischen Anschluss als bidirektionale Schnittstellen. Das eingehende Sollmoment wird auf Grund der aktuellen Temperatur der Maschine und dem Momentenkennfeld begrenzt. Die Umrichter haben ebenfalls eine softwaretechnisch hinterlegte Anstiegsbegrenzung, um die Dynamik beim Boostbetrieb zu reduzieren. Über das Anlegen des inneren Moments an der Trägheitsmasse, kann wiederum eine Drehzahl ermittelt werden, aus welcher dann der Wirkungsgrad im Betriebspunkt bestimmt wird. Aus der mechanischen kann dann die elektrische Leistung im Hintergrund berechnet werden und diese dem Zwischenkreis zugeführt oder abgezogen werden.

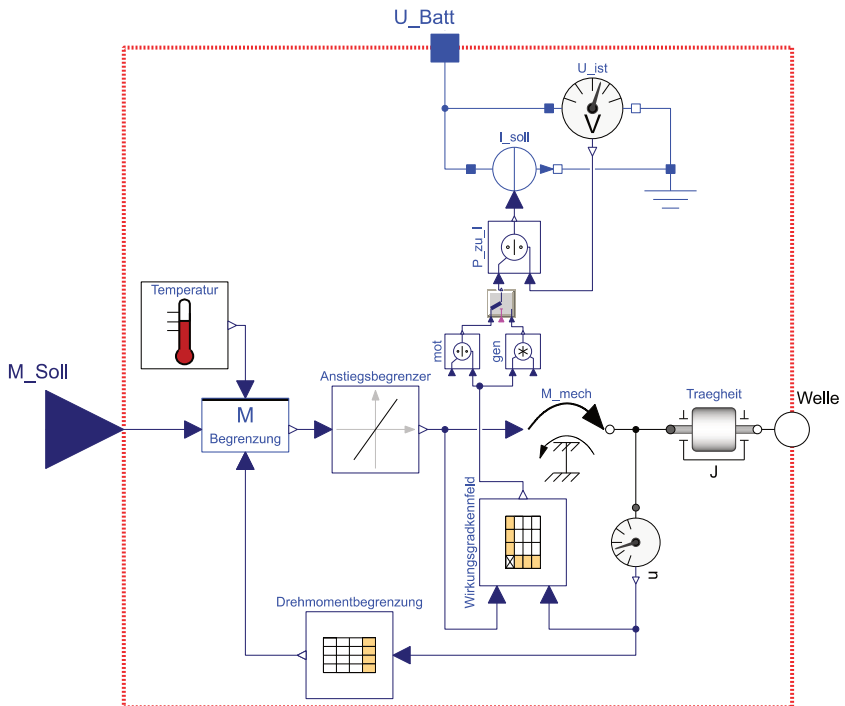


Abbildung 4-11: vereinfachtes Modell des Elektromotors mit Umrichter

#### 4.3.2.4 Batterie

Das Batteriemodell ist einstufig durch eine Leerlaufspannungsquelle und einen Innenwiderstand aufgebaut. Dabei wird der Ladezustand (SoC) durch einen klassischen Amperestundenzähler realisiert, woraus sich direkt die entsprechende innere Leerlaufspannung ergibt. Diese wird dann durch ein Temperatur- und Alterungsmodell über entsprechende Kennfelder korrigiert. Somit ist das Modell vollständig bidirektional.

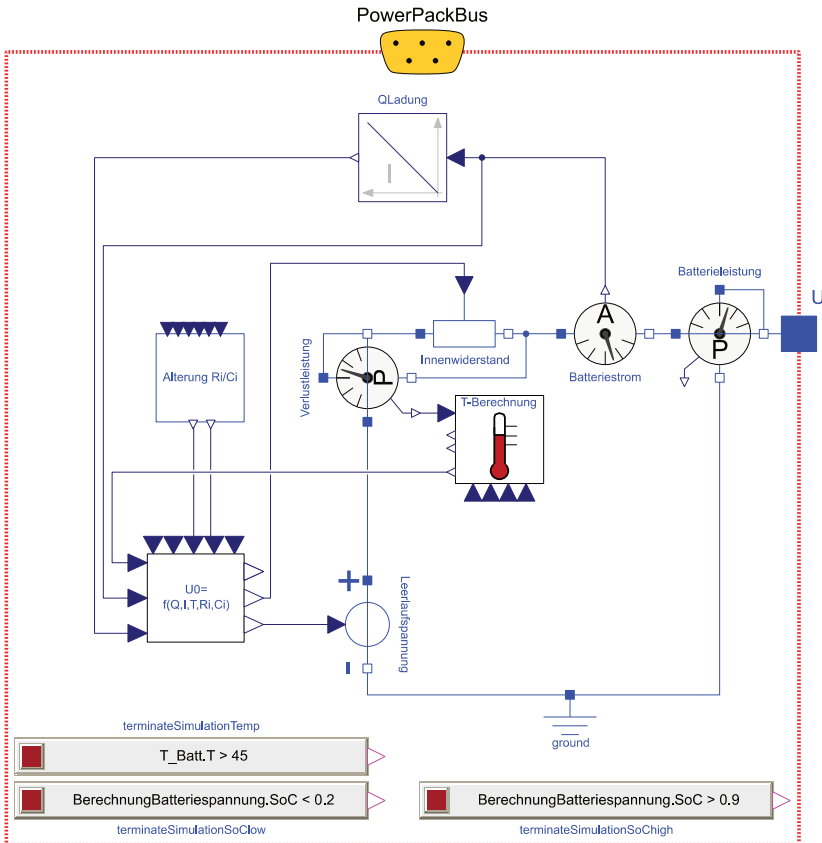


Abbildung 4-12: vereinfachtes Batteriemodell mit Alterung

Die notwendigen Daten zur Parametrierung sind im Rahmen des Projekts *PREDIKT* [MAK18] durch den Projektpartner Akasol für unterschiedliche Alterungszustände und Batteriezelltypen bereitgestellt worden.

Mittels Rainflowzählverfahren [Her10] kann die Alterung beim Durchfahren eines Zyklus ermittelt und somit die voraussichtliche Lebensdauer abgeschätzt werden. Die notwendigen Angaben dafür werden über den *PowerPackBus* ausgeschleust und getrennt ausgewertet. Diese Daten können dann für beliebige spätere Zeitpunkte (Anzahl absolvierter äquivalenter Vollzyklen und kalendarisches Alter) als Startwerte für die nächste Fahrt hinterlegt werden.

Da sich mit steigender Temperatur der Innenwiderstand bei Batterien aufgrund der verbesserten Ionenleitfähigkeit reduziert, anstatt sich wie bei ohmschen Widerständen zu erhöhen, wird der Batteriewiderstand mittels temperaturabhängiger Kennlinie hinterlegt. Das Temperaturmodell umfasst weiterhin eine Wasserkühlung, die von außen mit fester Vorlauftemperatur gegen die Erwärmung arbeitet. So ist eine Überlastfähigkeit der Batteriezellen abbildbar.

Zur Fehlererkennung werden bei bestimmten Events Meldungen ausgegeben, die zum Abbruch der Simulation führen. Insbesondere seien hier Übertemperatur sowie zu niedriger und zu hoher Ladezustand vermerkt. An den Grenzen der Zellkennlinien sind die Modelle mathematisch schlecht abbildbar und auch technisch nur sehr aufwändig zerstörungsfrei messbar, dadurch überwachen die Grenzwerte keine SoCs von 0 und 100 %, sondern Bereiche zwischen beispielsweise 20 und 90 %.

Eine reale Einsatzdauer einer aktuellen Lithiumionenbatterie in Bahnanwendungen liegt bei größer vier Jahren, unter der Voraussetzung, dass die kalendarische Lebensdauer bei ca. 15 Jahren aufwärts liegt und die zyklische mehr als 4000 Vollzyklen beträgt [MAK18].

### 4.3.2.5 Getriebe und Retarder

Die Modellierung des automatisierten 6-Gang-Getriebes besteht aus den Teilen Anfahrwandler mit Überbrückungskupplung, Retarder, Verlustmodell und sechs schaltbaren Gängen.

Der Anfahrwandler überbrückt die Drehzahllücke des Dieselmotors bei der Anfahrt im ersten und zweiten Gang. Darüber wird über die Wandlerschaltkupplung (WSK) der Wandler hart überbrückt. Dies ist notwendig, damit auch ein Drehmomentfluss in umgekehrter Richtung möglich ist und somit rekuperiert werden kann. Beim rein elektrischen Anfahren wäre auch der Entfall des Wandlers möglich, da die E-Maschine bereits ein höheres Moment liefern kann als der Wandler selbst. Somit wäre auch der Wirkungsgrad entsprechend höher und ein Rekuperieren bis kurz vor dem Stand möglich.

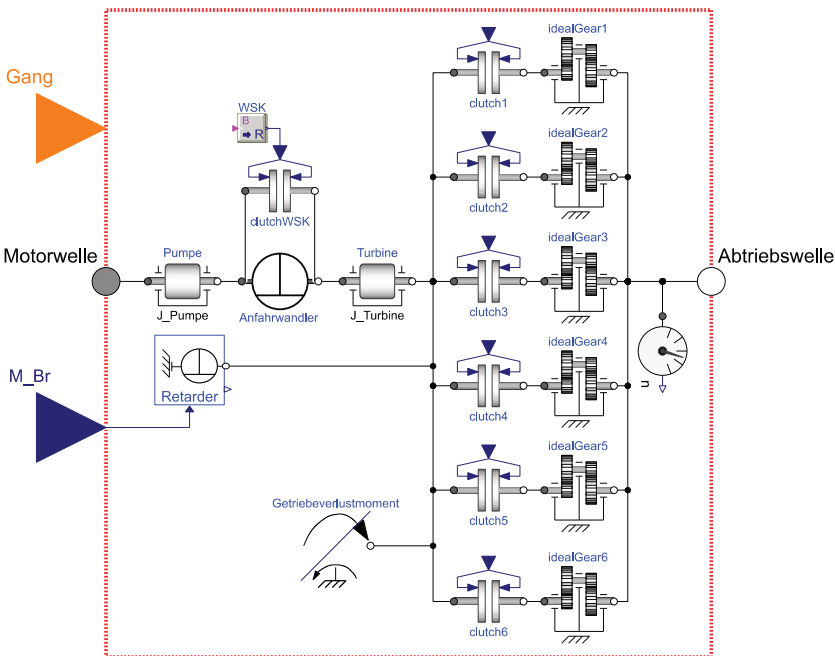


Abbildung 4-13: vereinfachtes Getriebemodell

Mit dem im Projekt eingesetzten Getriebe Ecolife Rail [ZF18] ist eine Rekuperation nur oberhalb von ca. 25 km/h möglich, weil darunter der Wandler öffnet. Das Eingangsmoment ist auf 2500 Nm begrenzt, so dass ein Boosten nur sehr begrenzt möglich ist.

Das Retardermodell nimmt mechanische Leistung aus dem System, falls die E-Maschine das angeforderte Bremsmoment nicht aufbringen kann. Dies ist bei kleinen Batteriegrößen oder kontinuierlicher Bergabfahrt notwendig.

Da das Getriebe nicht unter Last schalten kann, muss eine Rückmeldung an die Fahrzeugsteuerung und den Retarder vor der Schaltung erfolgen. Das modellierte und im Projekt applizierte Getriebe unterscheidet sich von Seriengetrieben insofern, dass es keine Schaltautomatik besitzt. Dadurch kann die Betriebsstrategie aktiv den passenden Gang wählen. Dies ist insbesondere beim Bremsen sinnvoll, da durch früheres Herunterschalten an der E-Maschine gezielt höhere Drehzahlen angelegt werden können und somit die Rekuperationsleistung erhöht wird.

### 4.3.2.6 Abtrieb und Drehgestell

Auch der Abtrieb wird pro Halbzug abgebildet. Dies bedeutet, dass es zusätzlich zu den beiden angetriebenen Achsen auch eine Laufachse des Jakobsdrehgestells in der Fahrzeugmitte gibt.

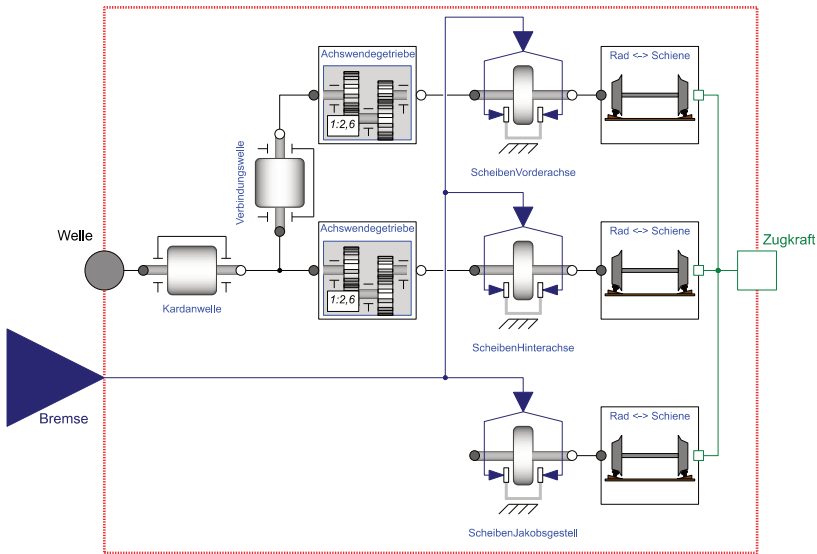


Abbildung 4-14: vereinfachtes Drehgestellmodell

Alle Achsen können mittels Scheibenbremse mechanisch verzögert werden. Jede angetriebene Achse besitzt ein eigenes Achswendegetriebe mit fester Übersetzung und schaltbarem Fahrtrichtungswechsel.

Der Rad-Schiene-Kontakt wandelt das Drehmoment der rotierenden Komponenten in translatorische Zug- und Bremskräfte, welche sich dann über das gesamte Fahrzeug addieren und mit den Fahrwiderständen wechselwirken.

### 4.3.3 Nebenaggregate

Auch die Nebenaggregate benötigen eine nicht unerhebliche Menge an Energie und können aktiv in die Betriebsstrategie miteinbezogen werden.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass alle Nebenverbraucher im Fahrzeug elektrifiziert sind. Eine Standheizung wird nicht berücksichtigt.

#### **Beleuchtung**

Abhängig von der Tageszeit sind Beleuchtungseinrichtungen in und am Fahrzeug mit zu betrachten. Wenn zusätzliche Beleuchtung erforderlich ist, fallen ca. 3 kW dauerhaft pro Halbzug an. Dazu zählen primär Halogenspots im Eingangs-, WC- und Wagenübergangsbereich sowie diverse Leuchtstoffröhren. Ebenfalls sind Zugspitzbeleuchtung, Signal- und Schlusslicht einbezogen. Die Werte sind durch Fahrzeugbegehung entstanden und werden im Modell als konstant vorhanden angenommen.

#### **Steuergeräte und Kleinverbraucher**

Weiterhin gibt es diverse kleine Komponenten für den Antrieb und den Führerstand wie Motorsteuergeräte, Fahrzielanzeiger und Anzeigedisplays. Diese summieren sich auf ca. 2 kW pro Führerstand. Ob dieser aktiv besetzt ist oder nicht, beeinflusst die Energieaufnahme dabei nur marginal. Diese werden zusätzlich pro Halbzug kontinuierlich ausgespeist.

#### **Klimatisierung**

Zur Betrachtung der Leistungsaufnahme durch das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK) sind mehrere Modelle in unterschiedlichen Detaillierungsstufen angefertigt worden. Da zur Berechnung der notwendigen elektrischen Leistung viele Parameter, wie die Außentemperatur, die Wärmeübergangswiderstände des Fahrzeugs, die Anzahl der Fahrgäste und die Sonneneinstrahlung auf die projizierte Fahrzeugaußenfläche bekannt sein müssen, ist ein umfangreiches Wettermodell mit Daten des Deutschen Wetterdienstes implementiert worden. Dieses hat jedoch den Nachteil eines hohen Umfangs an numerischen Gleichungen, die die Laufzeit der Simulation deutlich verlängern. Darum wird im Folgenden nur auf die Ergebnisse dieses Modells zurückgegriffen, welche als konstant abfließende mittlere Leistung in der Simulation

betrachtet werden. Dies wird als zulässig erachtet, da der Energieumsatz in Summe erhalten bleibt sowie Erzeugung und Verbrauch zeitlich verschiebbar sind.

Pro Halbzug sind jeweils zwei Klimaanlage auf dem Fahrzeug untergebracht. Diese haben zusammen mit den vorher genannten kleinen Verbrauchern eine elektrische Aufnahmeleistung von maximal 82 kW im Winterbetrieb und 34 kW im Sommerbetrieb. Die folgende Tabelle gibt die Auswertungen, die im Rahmen des Projekts erfolgt sind, wieder:

<b>Komponente</b>	<b>Sommer P in kW</b>	<b>Winter P in kW</b>	<b>Übergang P in kW</b>
HLK	max. 34 Ø 12	max. 82 Ø 14	max. 2,6 Ø 2,5
Beleuchtung	3	3	3
Kleinverbraucher	2	2	2
gesamt	17	19	7,5

Tabelle 4-7: Energiebedarf der Nebenaggregate pro Halbzug [MAK18]

## 4.4 Fahrer

Der Fahrer ist durch sein Fahrverhalten ein wesentlicher Einflussparameter auf den Kraftstoffverbrauch. Mehrere Abschlussarbeiten und Versuche mit Testpersonen haben gezeigt, dass es stark von Berufserfahrung, Streckenkenntnis und persönlicher Verfassung abhängt, wie energieeffizient ein Zugführer agiert. Um einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Betriebsstrategien zu ermöglichen, werden alle Simulationen mit dem gleichen Fahrermodell und mit idealer prädiktiver Geschwindigkeitskurve gefahren, d.h. dass das Fahrzeug bis auf wenige Sekunden Abweichung immer pünktlich ankommt und abfährt.



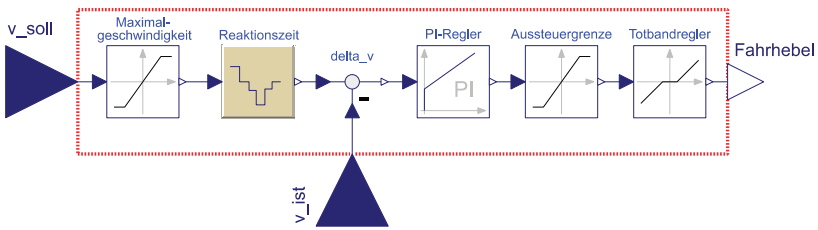


Abbildung 4-15: vereinfachtes Fahrermodell

Abbildung 4-15 zeigt den vereinfachten Aufbau des Fahrermodells. Zunächst wird die prädiktive Geschwindigkeitskurve auf  $v_{\max}$  beschränkt. Der „Fahrer“ (PI-Regler) stellt dann die Geschwindigkeit auf  $\pm 3$  km/h, mit zwei Regelvorgängen pro Sekunde (Reaktionszeit) ein. Damit soll ein möglichst realistisches Fahrerverhalten abgebildet werden. Üblicherweise wird auf knapp über die Zielgeschwindigkeit beschleunigt und dann gesegelt bis das Fahrzeug etwas unterhalb ist. Danach wird wieder nachgeregelt. Die Aussteuergrenze ( $\pm 100\%$ ) und der Totbandregler ( $-3\% \leq x \leq 3\%$ ) simulieren das Verhalten eines realen Fahrhebels, welcher um den Nullpunkt eine mechanische Verriegelung zum Segeln hat. Die Parameter sind im Rahmen des Projekts experimentell ermittelt worden (vgl. [HEG17]).

## 4.5 Komponentvalidierung

Im Rahmen des Projekts sind eine Verifikation und Validierung aller verfügbaren Komponenten gegen Prüfstandsdaten und Herstellerdatenblätter durchgeführt worden. Im Anschluss daran haben Simulations- und Komponentenauswahlstudien stattgefunden, die zum hier vorgestellten MTU-*HybridPowerPack 2* geführt haben (vgl. Tabelle 4-6).

Der Prozess wird in [HEG17], in [Eil17] und im noch ausstehenden Projektabschlussbericht *PREDIKT* [MAK18] beschrieben.

Da der Prozess der Validierung für diese Arbeit nicht relevant ist, sondern nur verlässliche Vergleichswerte benötigt werden, wird nicht weiter darauf eingegangen.



# 5 Simulation

Nachdem im vorigen Kapitel die wesentlichen Bestandteile des Modells vorgestellt wurden, werden diese nun zu einer Simulationsumgebung zusammengefasst.

## 5.1 Aufbau

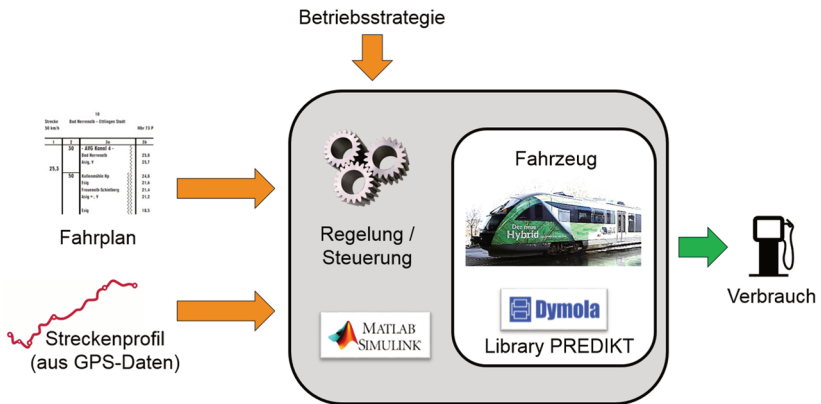


Abbildung 5-1: Aufbau der Simulation

Abbildung 5-1 zeigt die Funktionsweise der entwickelten Umgebung: Von außen können Fahrpläne und Strecken vorgegeben werden, auf denen simuliert werden soll. Dazu kann eine der implementierten Betriebsstrategien gewählt werden. Die Gesamtsimulation arbeitet in Matlab/Simulink mit einer s-Funktion bestehend aus einem kompilierten Dymolablock, der das Fahrzeugmodell beinhaltet. Dieses gibt als Ergebnis die gewünschten Variablen wie den Kraftstoffverbrauch (vgl. Tabelle 5-1) mit 1 Hz Abtastung aus.

<b>Größe</b>	<b>Kürzel mit Einheit</b>
Zeit	t in s
Streckenmeter	s in m
Geschwindigkeit	$v_{\text{ist}}$ in km/h
Sollgeschwindigkeit (auf Verspätung kompensiert)	$v_{\text{Fahrer}}$ in km/h
momentane Verspätung	$t_{\text{Verspätung}}$ in s
gefilterter Äquivalenzfaktor (nur bei ECMS)	$\lambda$
Kraftstoffverbrauch (SoC-bereinigt)	$m_{\text{Kr}}$ in kg
Batterieladezustand 1	SoC1 in %
Batterieladezustand 2	SoC2 in %
Drehmoment Elektromotor 1	$M_{\text{EM1}}$ in Nm
Drehmoment Elektromotor 2	$M_{\text{EM2}}$ in Nm
Drehmoment Verbrennungsmotor 1	$M_{\text{VKM1}}$ in Nm
Drehmoment Verbrennungsmotor 2	$M_{\text{VKM2}}$ in Nm
Innenwiderstand Batterie	$R_i$ in $m\Omega$
Leerlaufspannung der Batterie	$U_0$ in V
Temperatur der Batterie	T in $^{\circ}\text{C}$
Gang im Getriebe	i
Scheibenbremse	Scheibe in %
Drehzahl am Getriebeeingang	n in $\text{min}^{-1}$

Tabelle 5-1: Ausgabe aus der Simulation

Die Regelung innerhalb Simulinks arbeitet in mehreren Stufen:

Zuerst werden in einem Offline-Skript der Fahrplan und die Streckendaten eingelesen. Mit Angabe der aktuellen Fahrzeugmasse und der verfügbaren Antriebsleistung können daraus eine Sollgeschwindigkeitstrajektorie durch Minimierung der Standzeit und eine Maximalgeschwindigkeitstrajektorie durch Maximierung der Standzeit berechnet werden. Weiterhin werden die Prädiktionsdaten (zukünftige Haltedauern und Streckensteigungen) für die Betriebsstrategie extrahiert.

In der nächsten Stufe errechnet das Fahrermodell online das Sollmoment, welches es abhängig von der Momentangeschwindigkeit übergibt. Dabei wird eine Verspätungstoleranz von  $\pm 15s$  eingestellt.

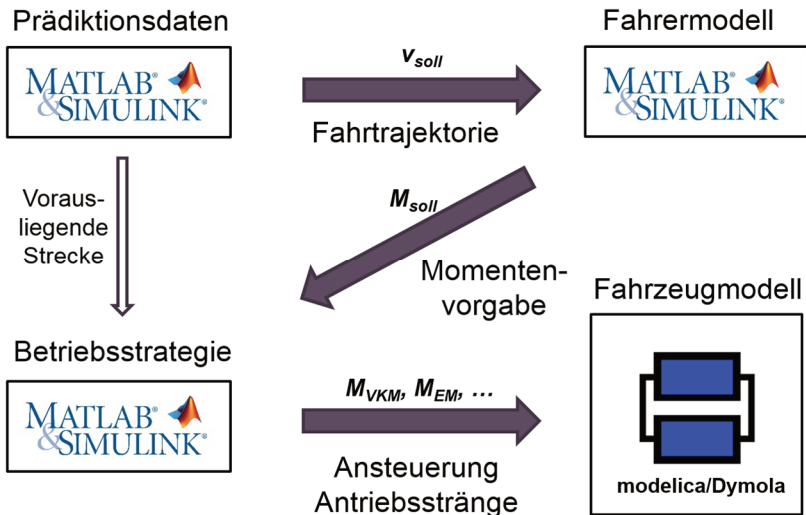


Abbildung 5-2: Reglertopologie

In der dritten Stufe entscheidet die gewählte Betriebsstrategie, wie das gesamte angeforderte Moment auf die beteiligten Antriebe aufgeteilt wird.

Das anschließende Fahrzeugmodell liefert dann die resultierende Momentangeschwindigkeit für den Fahrer zurück und schließt so den Regelkreis.

Im Fall der Betriebsstrategie nach Bellman kann nur eine Steuerung implementiert werden, da es sich um ein vorberechnetes Offlineverfahren handelt. Dabei werden die Sollmomente der Antriebe aus einer Tabelle eingelesen und weitergeleitet.

Die Optimierer (ECMS und Bellman) finden erst bei Geschwindigkeiten über 10 m/s Anwendung. Darunter arbeitet der reguläre Fuzzylogik-Regler, um Positionsgenauigkeit und Haltezeiten zu gewährleisten. Dabei wird maximal beschleunigt und möglichst elektrisch verzögert.

## 5.2 Referenzfahrten

Um die Verbesserung durch die Optimierungsansätze aufzuzeigen, werden zunächst die Fahrten mit dem Fuzzyregler als Referenz für die Hybridfahrten eingeführt. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird dann auf die konventionellen Dieselfahrten mit 1:1-Momentenverteilung eingegangen.

Im Folgenden wird als Beispiel die Strecke der Pfälzischen Maximiliansbahn (PMB) eingeführt. Diese wird als RE und RB im Fahrplan *morgens* bei voller Besetzung befahren, so dass eine Gegenüberstellung einfach erscheint. Weiterhin soll auf die wichtigsten Parameter eingegangen werden.

### 5.2.1 Referenz Pfälzische Maximiliansbahn (PMB-RE)

Wie bereits in Tabelle 4-3 vorgestellt, handelt es sich bei der Pfälzischen Maximiliansbahn um eine flache Strecke mit mittleren bis hohen Geschwindigkeiten. Mit Ausnahme von Weichenvorfeldern in Bahnhofseinfahrten und der Rheinbrücke kann auf der Strecke mit 120 km/h gefahren werden. Der Regionalexpressfahrplan setzt dabei für Pünktlichkeit Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h voraus, so dass das Fahrzeug die meiste Zeit in Arbeitspunkten mit mittlerer Antriebsleistung arbeitet.

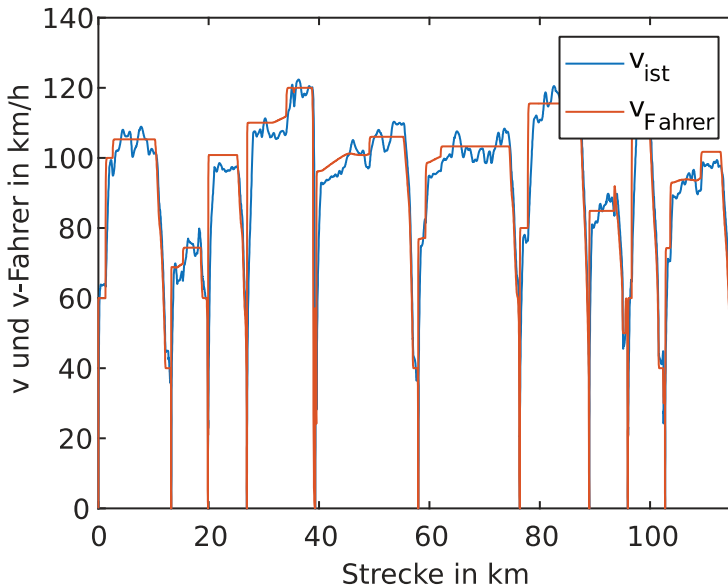


Abbildung 5-3: Fahrspiel Fuzzy PMB-RE

Abbildung 5-3 zeigt das prädiktiv optimierte Fahrspiel inklusive einer momentanen Verspätungskompensation in Rot ( $v_{\text{Fahrer}}$ ). Diese Vorgabe geht zur Einstellung als Sollgeschwindigkeit an den Fahrer. Dieser regelt dann das Fahrerwunschmoment ein, aus welchem sich die Ist-Geschwindigkeit in Blau ( $v_{\text{ist}}$ ) ergibt. Fährt der Fahrer dabei zu langsam, so dass sich eine Verspätung einstellt, wird die Sollkurve zur Vorbeugung angehoben, damit am nächsten Halt eine pünktliche Einfahrt sichergestellt wird.

Fahrplanbedingt sind Verspätungen bis zwei Minuten nicht unüblich. Es wird dennoch darauf geachtet, diese unter 30 s zu halten. Fahrplanangaben werden auch nur minutengenau erstellt. Durch Inkaufnahme größerer Verspätungen sind ebenfalls Kraftstoffeinsparungen möglich, die aber nicht auf die Effizienz der Antriebsregelung zurückzuführen sind und darum hier nicht betrachtet werden sollen.

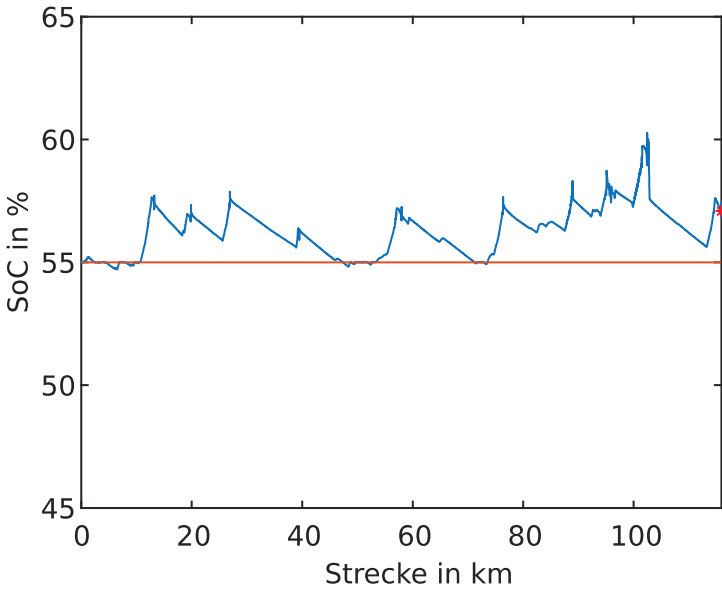


Abbildung 5-4: SoC-Verlauf Fuzzy PMB-RE

Abbildung 5-4 zeigt den Ladezustandsverlauf der Batterie während eines Umlaufes. Der Startwert von 55 % sollte nach Möglichkeit auch zu Ende der Fahrt wieder erreicht werden, um dieses Fahrschema beliebig oft wiederholen zu können. Ohne Prädiktion lässt sich jedoch nicht vorhersagen, wo der Ladezustand zum Ende hin sein wird. Um dieses auf den Wunschwert anzupassen, wären aufwändige Parameterstudien notwendig. Lässt man zu große Abweichungen vom Mittelwert zu, kommt er am Ende nicht mehr beim Startwert an. Sind die zulässigen SoC-Bereiche zu klein, nimmt der Kraftstoffverbrauch deutlich zu. Um einen besseren Vergleich zwischen Optimierern und Fuzzy-Regler zu gewährleisten, werden die Ladezustandsabweichungen in eine äquivalente Kraftstoffmasse umgerechnet und so berücksichtigt.



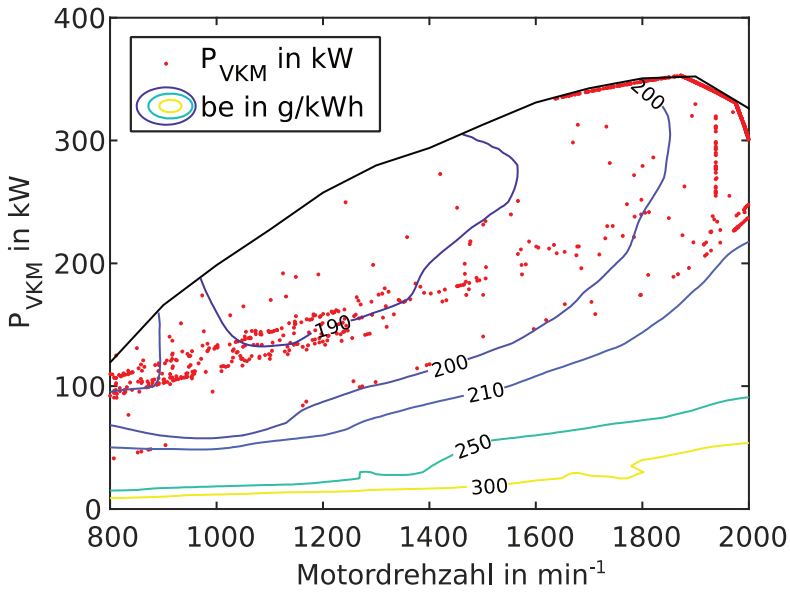


Abbildung 5-5: Arbeitspunkte VKM Fuzzy PMB-RE

Abbildung 5-5 zeigt die typischen Betriebsbereiche der Verbrennungsmotoren. Durch Auflastung, Motorabschaltung bei niedriger Teillast und frühes Hochschalten der Gänge werden die schlechten Arbeitspunkte mit mehr als 210 g/kWh an Kraftstoff bereits vermieden. Da mit voller Last beschleunigt wird, befindet sich der Anfahrbereich primär zwischen 1600 und 2000 Umdrehungen pro Minute. Ausnahmen bilden die Anfahrwandlerengriffe im ersten und zweiten Gang, bei denen das Motormoment zum Bauteilschutz beschränkt wird. Das mittlere Feld zwischen 800 und 1400 U/min zeigt Konstantfahrten bei mittleren Geschwindigkeiten, bei denen ein VKM alleine zur Bereitstellung des Fahrerwunschmomentes nicht mehr ausreicht.

## 5.2.2 Referenz Pfälzische Maximiliansbahn (PMB-RB)

Auf der gleichen Strecke verkehren auch Regionalbahnzüge, so dass sich nur die fahrplanmäßigen Vorgaben im Vergleich zur vorigen Referenz ändern.

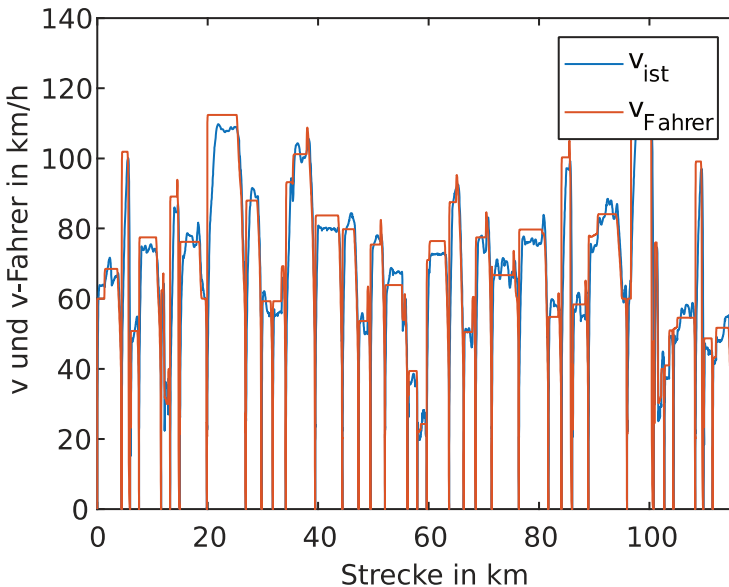


Abbildung 5-6: Fahrspiel Fuzzy PMB-RB

Bedingt durch die auf Dieseltraktion ausgelegten Fahrpläne, erreicht das Hybridfahrzeug schnell die notwendige Reisegeschwindigkeit, die dadurch auch sehr niedrig liegt. Im Bereich um Neustadt ist sie sogar unterhalb von 40 km/h.

Obwohl es wesentlich mehr Anfahrvorgänge als im vorigen Fall gibt, wird das SoC-Fenster (vgl. Abbildung 5-7) ebenfalls nur wenig ausgenutzt. Mit Ausnahme weniger Abschnitte mit Geschwindigkeiten über 100 km/h wäre diese Strecke auch mit nur einem verbauten Dieselmotor befahrbar.

Eine ebenfalls hier nicht betrachtete Variante wäre die Fahrzeiten zu verkürzen und so die Attraktivität für Fahrgäste zu erhöhen.

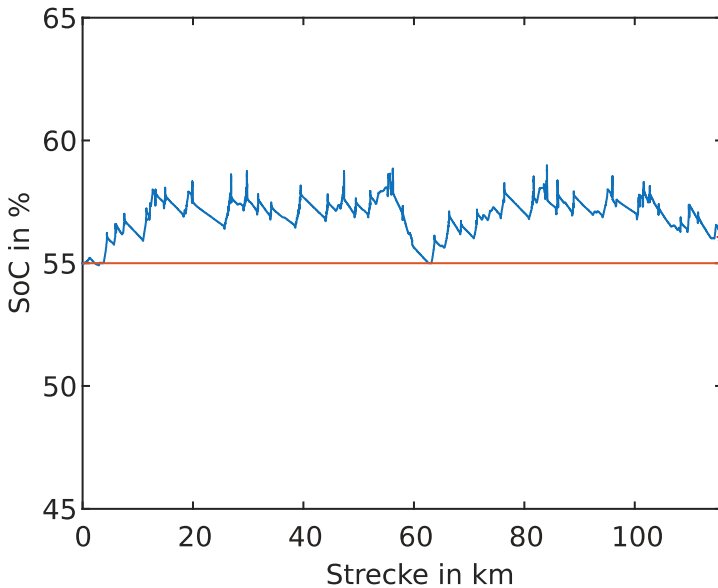


Abbildung 5-7: SoC-Verlauf Fuzzy PMB-RB

Abbildung 5-8 zeigt wiederum die Betriebspunkte der Verbrennungsmotoren. Die Charakteristika sind wie bereits in Abbildung 5-5 deutlich zu erkennen. Dadurch, dass es sich um die gleiche Strecke aber mit unterschiedlichen Fahrplänen handelt, sind auch die angeforderten Punkte ähnlich. Durch die kleineren Geschwindigkeiten bei Konstantfahrten und die vielen Haltestellen zerstreut sich das Feld stärker.

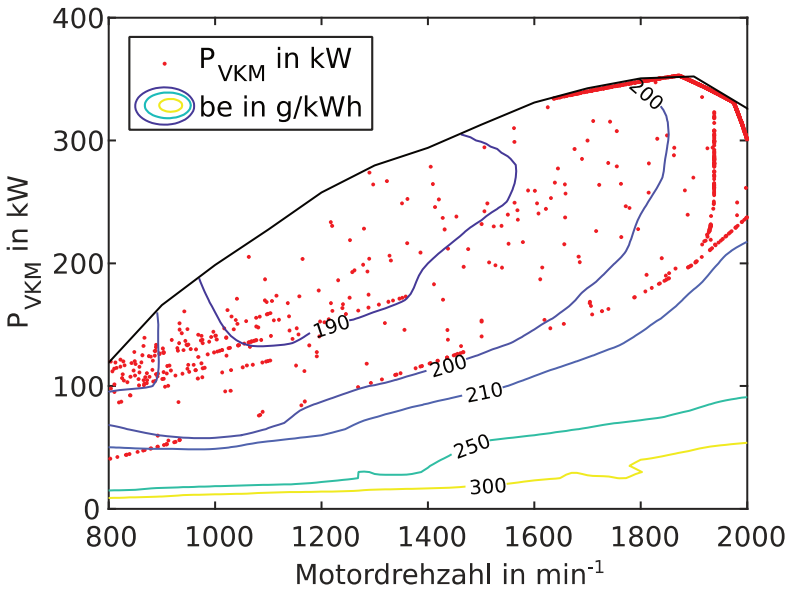


Abbildung 5-8: Arbeitspunkte VKM Fuzzy PMB-RB

Weitere Potenziale zeigen sich hier durch gezielte Lastpunktanhebung auch bei hohen Ladezuständen der Batterie und zeitliche Verschiebung des Energieabrufs. Dies ist mit einem zustandsbasierten Regler, der keine Prädiktionmöglichkeiten bietet, kaum umzusetzen.

### 5.2.3 Referenz Zwönitztalbahn/Erzgebirge (ZwTB)

Die Zwönitztalbahn ist eine der Regionalbahnstrecken im Gebiet um Chemnitz. Sie verläuft kontinuierlich bergauf bis nach Thalheim, von wo aus sie sehr steil bergab bis nach Aue geht. Die Geschwindigkeiten liegen bei maximal 80 km/h. Es gibt einige Haltestellen mit größeren Standzeiten von 3-5 min.

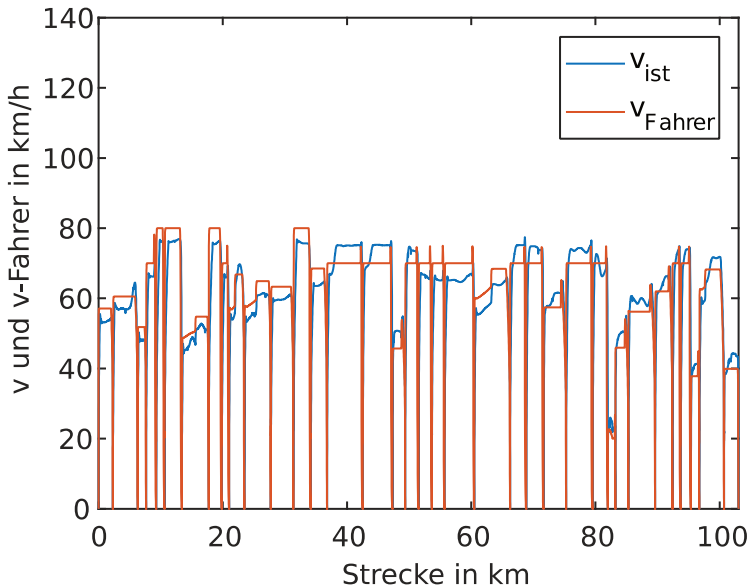


Abbildung 5-9: Fahrspiel Fuzzy ZwTB

Durch das starke Gefälle steigt auch der SoC deutlich an (vgl. Abbildung 5-10), der dann auf der Rückfahrt für die Bergfahrt genutzt werden kann. Bei passender Vorkonditionierung des Ladezustands auf die Bergfahrt, ist ebenfalls die Einsparung eines Dieselmotors möglich. Durch aktives Absenken des SoCs vor Thalheim, ließe sich weiterhin die Batterielebensdauer verlängern, da große Abweichungen vom Mittelwert überproportional starke Alterungerscheinungen hervorrufen.

Im Unterschied zu Abbildung 5-5 weißt Abbildung 5-11 einige Fahrten in Teillast bei 100 bis 120 kW auf. Diese werden bereits durch nur einen Verbrenner erbracht. Kleine Teillasten gibt es nur wenige.

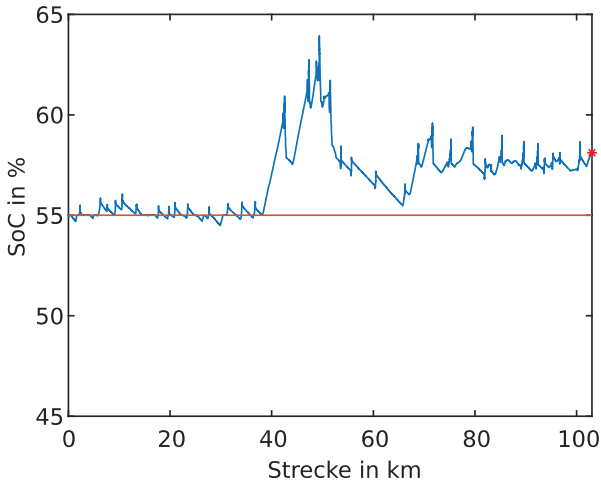


Abbildung 5-10: SoC-Verlauf Fuzzy ZWTB

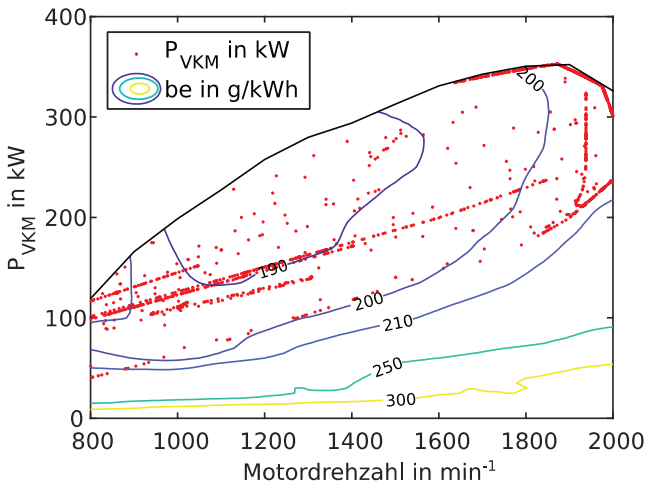


Abbildung 5-11: Arbeitspunkte VKM Fuzzy ZWTB

## 5.2.4 Sonstige Referenzen - Hybridfahrten

Die wichtigsten Vergleichsdaten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Strecke	$t_{\text{Versp., max}}$ in s	$m_{\text{KR}}$ in kg	$\dot{m}_{\text{KR}}$ in kg/h	$\text{SoC}_{\text{min}}$ in %	$\text{SoC}_{\text{max}}$ in %	$t_{(\text{SoH}=0)}$ in a
PMB-RB	14	69,7	28,4	55	59	9,9
PMB-RE	29	44,9	24,6	55	60	11,5
MTB-RB	28	43,0	23,4	55	57	12,8
MTB-RE	5	24,4	19,5	55	56	13,7
BOB	24	61,0	36,0	55	61	10,8
ZwTB	32	63,0	24,8	54	64	9,2
ZsTB	106	75,7	27,7	54	60	10,1
SwTB	105	65,7	25,9	54	61	10,1

Tabelle 5-2: Vergleichswerte der hybriden Referenzfahrten mit dem Fuzzy-Regler

$t_{\text{Verspätung, max}}$  gibt dabei die maximale Verspätung an, die während der Fahrt entstehen kann.  $m_{\text{KR}}$  gibt den absoluten, SoC-kompensierten Kraftstoffverbrauch aus.  $\dot{m}_{\text{KR}}$  gibt den Verbrauch pro Betriebsstunde aus. Dieser ermöglicht einen einfacheren Vergleich unterschiedlich langer Strecken. Das zulässige SoC-Fenster wird willkürlich zu 45 bis 65 % gewählt. In diesem Bereich gibt es keinerlei Leistungsbeschränkungen der Batterien und auf jedem Fahrzyklus werden mehr als 8 Jahre Lebensdauer  $t_{(\text{SoH}=0)}$  erwartet, was einem Hauptuntersuchungsintervall entspricht. Der Startwert wird in der Mitte platziert.

### 5.2.5 Sonstige Referenzen - Dieselfahrten

Zum Vergleich werden auch Simulationsläufe mit einem klassischen Dieselantrieb gemacht. Dabei wird das Sollmoment auf die beteiligten Verbrennungsmotoren zu gleichen Anteilen verteilt, was den konventionellen Ansatz darstellt. Somit stehen auch Referenzwerte zur Verfügung, die die Einsparungen durch die Hybridisierung selbst aufzeigen. Es wird dabei mit einem Fahrzeugmodell gefahren, das keine Hybridkomponenten hat und somit entsprechend leichter ist.

<b>Strecke</b>	<b><math>t_{\text{versp., max}}</math> in s</b>	<b><math>m_{\text{Kr}}</math> in kg</b>	<b><math>\dot{m}_{\text{Kr}}</math> in kg/h</b>
PMB-RB	19	87,9	35,9
PMB-RE	33	57,5	31,5
MTB-RB	46	56,4	30,6
MTB-RE	26	34,0	27,1
BOB	22	71,7	42,4
ZwTB	36	82,7	32,5
ZsTB	113	93,9	34,3
SwTB	116	83,3	32,8

Tabelle 5-3: Vergleichswerte der konventionellen Referenzfahrten



## 6 Optimierungspotenzial

Im folgenden Kapitel soll aufgezeigt werden, welche Verbesserungen durch ein vorausschauendes Energiemanagement im Fahrzeug möglich sind. Dafür wird zuerst mit der offline-optimierten, dynamischen Programmierung nach Bellman gezeigt, wo die theoretischen Grenzen liegen. Danach wird mit der Kraftstoffäquivalenzmethode (ECMS) ein echtzeitfähiger Ansatz mit und ohne zusätzliche Störgrößenfilter gezeigt.

### 6.1 Dynamische Programmierung nach Bellman (DP)

Die dynamische Programmierung wird in der Literatur oftmals herangezogen, um einen Vergleichswert zum entwickelten Ansatz zu haben, da diese das theoretische Optimum liefert. Dies gilt aber nur, wenn ein optimales analytisches Fahrzeugmodell zur Berechnung vorliegt. Bei der Implementierung müssen viele Vereinfachungen wie der Verzicht auf Zeitabhängigkeiten bei Hochlauf- und Schaltvorgängen in Kauf genommen werden, damit diese Methode anwendbar ist.

Erhält man daraus die optimale Steuertrajektorie und speist sie in das detaillierte Fahrzeugmodell ein, stellt man fest, dass einiges des Potenzials dabei verloren geht. Als Beispiel sei genannt, dass das Getriebe nicht mehrfach pro Sekunde den Gang wechseln kann oder durch Fehler im vereinfachten Modell der theoretische und der reale Ladezustand auseinanderdriften.

Dennoch liefert die DP deutlich geringere Verbräuche, als dies die einfache Fuzzy-Regelung tut. Tabelle 6-1 zeigt die Ergebnisse von ausgewählten Strecken. Es wird dabei solange per Parameteranpassung offline optimiert bis der SoC zu Fahrtbeginn und –ende bis auf geringe Abweichungen identisch sind.

Strecke	$t_{\text{Versp., max}}$ in s	$m_{\text{Kr}}$ in kg	$\dot{m}_{\text{Kr}}$ in kg/h	$\text{SoC}_{\text{min}}$ in %	$\text{SoC}_{\text{max}}$ in %
PMB-RB	28	55,6	22,6	53	59
PMB-RE	11	39,6	21,7	52	60
BOB	114	46,6	27,3	49	57
ZwTB	78	52,5	20,5	50	63
ZsTB	100	66,3	24,1	50	58
SwTB	117	59,9	23,4	51	60

Tabelle 6-1: Simulationen mit dynamischer Programmierung

Im Vergleich zu Tabelle 5-2 sind Verbesserungen durch Anpassung der Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs von 10 bis 25 % ersichtlich. Gegenüber einem reinen Dieselfahrzeug (Tabelle 5-3) sind dies bis zu 35 % Kraftstoffeinsparung.

Damit ist gezeigt, dass ausreichend Optimierungspotenzial auch in der Steuerung vorhanden ist und zusätzlich nochmal ähnlich viel Ersparnis bringen kann, wie die Hybridisierung selbst.

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob dies auch unter Echtzeitbedingungen und ohne komplexe Vorausberechnungen, wie die dynamische Programmierung diese erfordern, möglich ist.

## 6.2 Kraftstoffäquivalenzprinzip (ECMS)

Die Kraftstoffäquivalenzmethode stellt über einen Äquivalenzfaktor, auch  $\lambda$  - Faktor oder nur  $\lambda$  genannt, das Verhältnis zwischen elektrischer und chemischer Energiebereitstellung ein (vgl. Kapitel 3.5). Auch wenn die ECMS echtzeitfähig ist, erfolgt die Optimierung inkrementell. Das Minimumsprinzip

von Pontrjagin, auf welcher die ECMS aufbaut, sagt voraus, dass es einen konstanten Faktor  $\lambda$  geben muss, für welchen das Gesamtergebn – hier der Kraftstoffverbrauch – minimal wird (bei unbeschränkter BatteriegroÙe). Bei hohen Werten für  $\lambda$  wird die elektrische Energie für den Optimierer „teuer“ und der Einsatz wird vermieden. Umgekehrt gilt es für niedrige Werte. Da auch bei diesem Verfahren die zulässigen Batteriegrenzen eingehalten werden müssen, sorgen hardwarenahe Komponenten für die Einhaltung der Grenzen. Bei hohem SoC wird das Laden der Batterie unterbunden und nur mechanisch gebremst. Bei niedrigen Ladezuständen wird dann verbrennungsmotorisch beschleunigt.

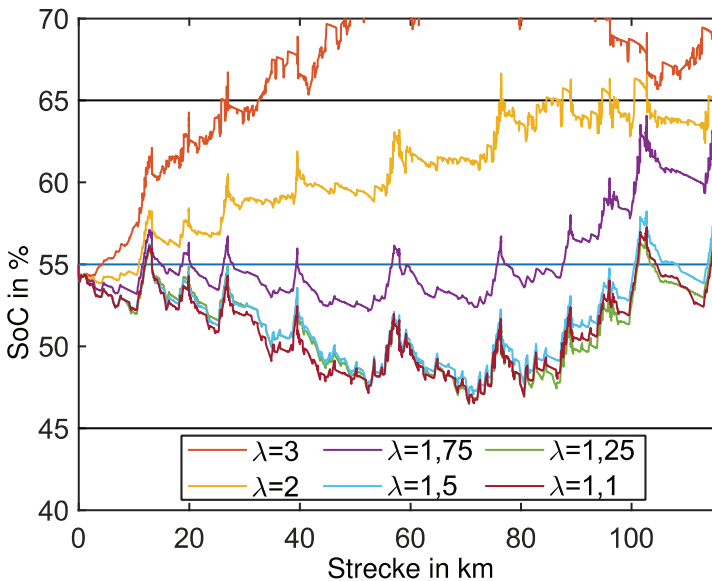


Abbildung 6-1: Vergleich der Ladezustände für verschiedene  $\lambda$  bei PMB-RE

Da hohe Ladezustände unkritischer als niedrige sind, weil sie immer ausreichend Reserven bieten um bis zum Ziel zu kommen, beginnt eine *Lernfahrt*

auf einer neuen Strecke mit einem hohen Wert für  $\lambda$ . Es hat sich drei als Startwert als zweckmäßig herausgestellt, um auch Strecken mit höheren Steigungen gut abdecken zu können. Danach kann dieser stufenweise reduziert werden, bis das Optimum bei Ladezustandsgleichheit von Fahrtbeginn und -ende erreicht ist. Im Beispiel der PMB-RE (Abbildung 6-1) liegt das Optimum in der Nähe von 1,2.

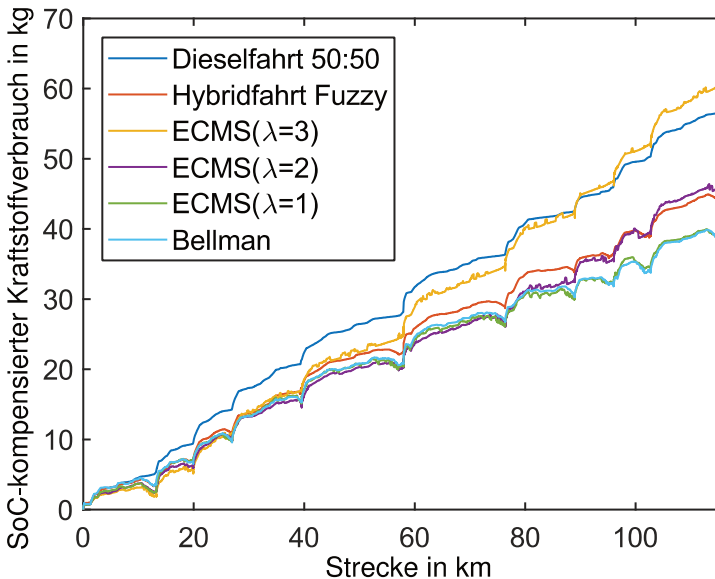


Abbildung 6-2: Vergleich der Kraftstoffverbräuche bei PMB-RE

Die Abbildung 6-2 zeigt für drei  $\lambda$ -Varianten den zugehörigen Kraftstoffverbrauch. Als Vergleich werden die konventionelle Dieselfahrt, die Hybridfahrt mit dem Fuzzy-Regler und die Fahrt mit der Bellmanoptimierung angefügt. Da die Werte SoC-kompensiert sind, können diese durch rekuperatives Bremsen auch gesenkt werden, anstatt üblicherweise monoton zu wachsen.

Bis auf kleine Abweichungen sind die Fahrten mit  $ECMS_{\lambda=1}$  und Bellman identisch, so dass das Optimum hier sehr gut getroffen wird. Auch der

Fuzzy-Regler liefert trotz seines einfachen Aufbaus gute Ergebnisse, was viel manueller Parameteranpassung zu verdanken ist. Interessant zu sehen ist, dass bei schlechter Wahl des Äquivalenzfaktors das Hybridfahrzeug mehr Kraftstoff als ein konventionelles benötigt. Dies lässt sich auf das höhere Fahrzeuggewicht durch die Hybridkomponenten zurückführen.

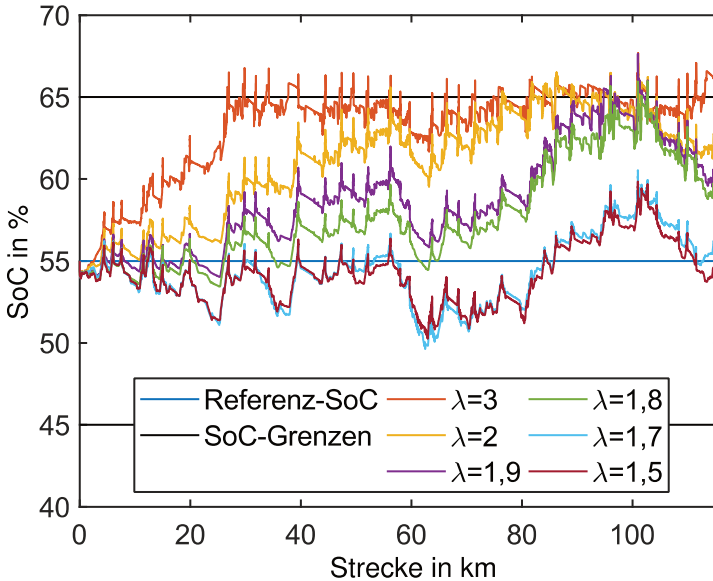


Abbildung 6-3: Vergleich der Ladezustände für verschiedene  $\lambda$  bei PMB-RB

In Abbildung 6-3 werden die Ladezustandsverläufe für sechs verschiedene  $\lambda$  – Werte gezeigt. Wie man an den Kurven für 1,7 in hellblau und 1,5 in weinrot sehen kann, kreuzen sich diese mehrfach. Ein solches Verhalten würde man so nicht erwarten, da der Äquivalenzfaktor konstant für eine andere Momentenverteilung sorgt.

Eine mögliche Erklärung liefert die nachfolgende Abbildung 6-4 zum Einfluss des Äquivalenzfaktors auf die Momentanverspätung.

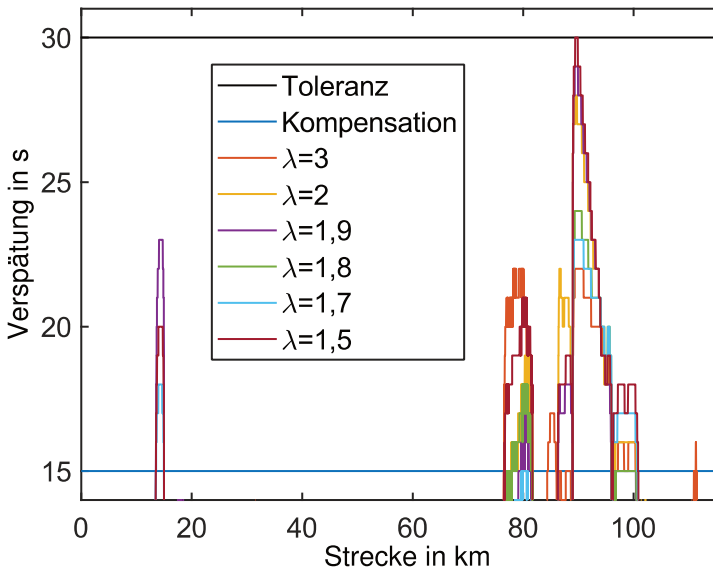


Abbildung 6-4: Vergleich der Verspätungen für verschiedene  $\lambda$  bei PMB-RB

Die Grafik zeigt, dass sich für unterschiedliche Lambda auch unterschiedliche Verspätungen einstellen. Der Hintergrund dazu ist, dass das geforderte Moment durch den elektrischen Antriebsteil deutlich schneller bereitgestellt werden kann als durch den verbrennungsmotorischen. Dadurch treten Situationen auf, bei denen eine langsamere Beschleunigung wieder durch eine höhere Endgeschwindigkeit kompensiert werden muss und somit mehr Energie benötigen. Da die Kompensation durch das Fahrermodell erst ab mehr als 15 s Verspätung greift, können sich die Trajektorien für verschiedene  $\lambda$  - Werte kreuzen. Bei zu großer Verspätung kann die Rekuperation durch Zuhilfenahme mechanischer Bremsen auch deutlich eingeschränkt werden.

Weitere Ansätze zur Erklärung des beobachtbaren Verhaltens in Abbildung 6-4 sind die thermischen Einflüsse des Systems und nicht zuletzt auch Modellfehler, da die Abweichungen hier bereits im einstelligen Prozentbereich liegen.

Bisher sind nur Strecken ohne größere Höhenmeter betrachtet worden. Die Zwönitztalbahn im Erzgebirge ist ein Vertreter einer besonders kritischen Situation:

In der folgenden Abbildung wird bei  $\lambda \leq 2,2$  zuerst die untere und anschließend die obere SoC-Grenze überschritten. Um den Zielladezustand von 55 % zu erreichen, müsste noch weiter abgesenkt werden, was aber nicht zulässig ist. Ein Lambda größer 2,2 wäre zwar zulässig, führt aber zu keinem optimalen Ergebnis, da das überschüssige Rekuperationspotenzial beim Erreichen der oberen Grenze in den mechanischen Bremsen thermisch umgesetzt wird. Somit ist das Optimierungsproblem nicht lösbar.

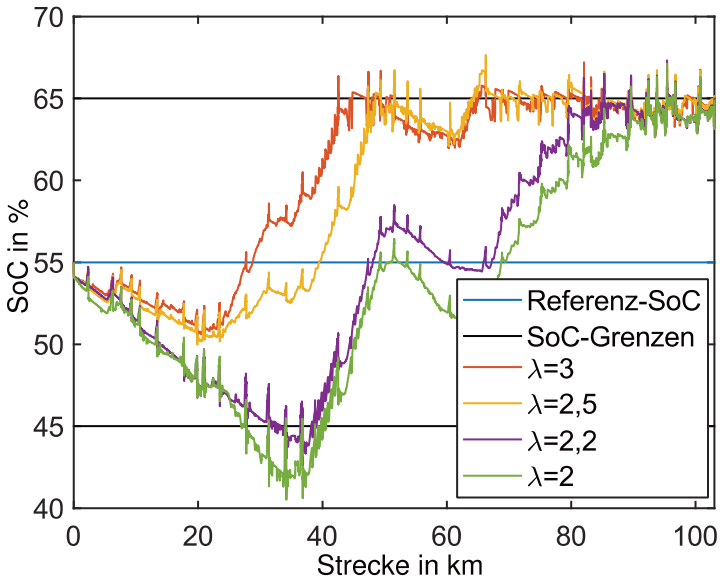


Abbildung 6-5: Vergleich der Ladezustände für verschiedene  $\lambda$  bei ZwTB

In Fällen der einseitigen Grenzverletzung sieht die Literatur vor, im nächsten Durchlauf den Ladezustand bei Beginn zu verschieben, um diese so zu vermeiden. Dies hilft beispielsweise, wenn der Startpunkt der Strecke auf einem Berg oder in einem Tal liegt.

Sind die Batteriegrenzen so eng definiert, dass sich kein zulässiger Wert finden lässt oder es beidseitige Grenzverletzungen gibt, muss ein alternativer Ansatz gewählt werden. Hierfür kann das Gesamtproblem an den Rändern in Bereiche unterteilt werden, um für jeden Abschnitt einen eigenen Wert zu bestimmen. Je enger die Grenzen sind, beziehungsweise je kleiner die nutzbare Batteriekapazität ist, desto mehr Abschnitte ergeben sich. Dies macht die Lösung sehr komplex und umständlich zu implementieren.

Eine Alternative stellen dynamische Ansätze mit Korrekturfiltern dar, wie sie im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Diese können zu große Abweichungen online ausregeln und reduzieren somit gleichzeitig die Anzahl an notwendigen Lernfahrten.

Es folgt eine Übersicht über alle Fahrten bei konstantem  $\lambda$ :

<b>Strecke</b>	<b><math>t_{\text{versp., max}}</math> in s</b>	<b><math>\dot{m}_{\text{Kr}}</math> in kg/h</b>	<b>SoC<sub>min</sub></b> in %	<b>SoC<sub>max</sub></b> in %	<b><math>\lambda_{\text{optimal}}</math></b>
PMB-RB	24	25,3	53	66	1,8
PMB-RE	18	20,9	47	58	1,25
MTB-RB	17	22,2	53	58	2,3
MTB-RE	20	21,4	54	64	2,3
BOB	20	30,5	52	67	1,9
ZwTB	20	27,4	50	68	nicht lösbar
ZsTB	28	28,3	47	67	nicht lösbar
SwTB	23	26,9	49	67	nicht lösbar

Tabelle 6-2: Simulationen der ECMS ohne Filter



## 6.3 ECMS mit Korrekturfiltern

Im vorigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass sich nicht alle Strecken mit einem konstanten Äquivalenzfaktor optimieren lassen. Dies trifft insbesondere auf Strecken mit großen Höhenunterschieden zu. Im Folgenden werden unterschiedliche Korrekturfilter eingeführt, die bei solchen Strecken zu besseren Ergebnissen führen.

### 6.3.1 Nichtprädiktive Filter

Die Wahl eines konstanten  $\lambda$  liefert in der Theorie zwar das global optimale Ergebnis (vgl. Kapitel 2.4.2), kann im realen Einsatz jedoch mehrere Probleme nach sich ziehen:

Wie im vorigen Kapitel für die Strecken der Erzgebirgsbahn gezeigt, kann die Optimierung für ein konkretes Problem nicht konvergieren, wenn beidseitige Grenzverletzungen auftreten.

Wird ein Optimum gefunden, kann dieses von einem bestimmten Umstand abhängig sein (lokales Optimum). Ein Beispiel dafür wären wechselnde Fahrgastzahlen, Tageszeiten oder Wettereinflüsse. Es kann auch über längere Zeit hinweg auf Pendlerverkehr optimiert werden und dann folgt ein Zeitraum mit Schulferien.

Für diese und andere spontane Ereignisse muss das System robust reagieren können und trotzdem zu guten Ergebnissen führen. Es folgt daraus, dass sich der Verlauf des Ladezustandes anders verhält als bisher und Grenzwertverletzungen dennoch vermieden werden sollen. Als logische Konsequenz ergibt sich, dass bei zu hohen Abweichungen aus dem Referenzladezustand eine adaptive Anpassung notwendig ist.

Es bieten sich Korrekturfilter an, die im einfachsten Fall die zu große Auslenkung aus dem mittleren SoC zurückführen. Dafür werden im Folgenden zwei Filter eingeführt:

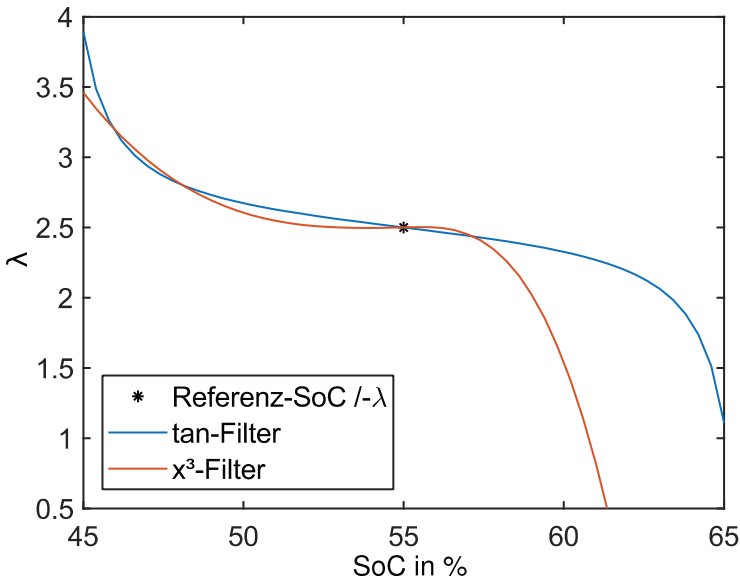


Abbildung 6-6: Filterfunktionen für ECMS ohne Prädiktion

Das Tangensfilter arbeitet punktsymmetrisch zum Referenzladezustand. Es hat bei kleinen Abweichungen einen fast linearen Zusammenhang und steigt bei größeren stark an. Ziel bei allen SoC-abhängigen Filtern ist ein asymptotisches Streben gegen die festgelegten Ladungsgrenzen.

$$\lambda = \begin{cases} \inf \forall SoC < SoC_{min} \\ \lambda_{ref} - \Delta SoC * \tan \left[ \frac{\pi}{\Delta SoC} * (SoC - SoC_{ref}) \right], \text{sonst} \\ 0 \forall SoC > SoC_{max} \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\text{mit } \Delta SoC = SoC_{max} - SoC_{min} \quad (6-2)$$

Einen ähnlichen Ansatz bietet die  $x^3$ -Funktion, die aber etwas einfacher zu parametrieren ist und auch auf Systemen funktioniert, die nicht im Bogenmaß arbeiten können.

$$\lambda = \begin{cases} \text{inf} \quad \forall \text{SoC} < \text{SoC}_{\min} \\ \lambda_{\text{ref}} + x^3, \text{sonst} \\ 0 \quad \forall \text{SoC} > \text{SoC}_{\max} \end{cases} \quad (6-3)$$

$$\text{mit } x = \frac{\text{SoC}_{\text{ref}} - \text{SoC}}{\Delta \text{SoC}} * \begin{cases} 2 \quad \forall \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{ref}} \\ 4, \text{sonst} \end{cases} \quad (6-4)$$

Im verwendeten Beispiel werden die beiden Äste der  $x^3$ -Funktion unterschiedlich steil ausgeführt. Die Idee dabei ist, bei bergigen Strecken den SoC schon frühzeitig abzusenken und dennoch wie bei der Tangensfunktion ein Tiefentladen zu verhindern. Werden beide Äste auf Faktor zwei gestellt, ist das Verhalten nahezu identisch zum Tangens.

Als erstes Untersuchungsbeispiel soll wieder die Maximiliansbahn dienen. Auf der ebenen Strecke ist nicht mit zusätzlichen Verbesserungen durch ein Filter zu rechnen. Im Gegenteil nimmt die Lösungsgüte etwas ab im Vergleich zur Fahrt mit konstantem Lambda. Aus Abbildung 6-1 ist ersichtlich, dass das Optimum bei konstantem  $\lambda = 1,2$  erreicht wird. Um zu diesem Ergebnis zu kommen, waren einige Iterationen und somit ineffiziente Lernfahrten erforderlich. Betrachtet man hingegen die Abbildung 6-8 ist bereits bei der ersten Fahrt mit  $\lambda = 3$  erkennbar, dass das Optimum um eins liegen muss, da dieser Wert häufiger gewählt wird. Der Mittelwert des gewählten Lambdas liegt bei allen drei Versuchen knapp oberhalb von eins. Das  $\lambda(\text{SoC})$ -Diagramm ist somit ein guter Anhaltspunkt, wie weit das Lösungsintervall entfernt liegt. Je kleiner die Auslenkung vom Referenz-SoC ist, desto besser.

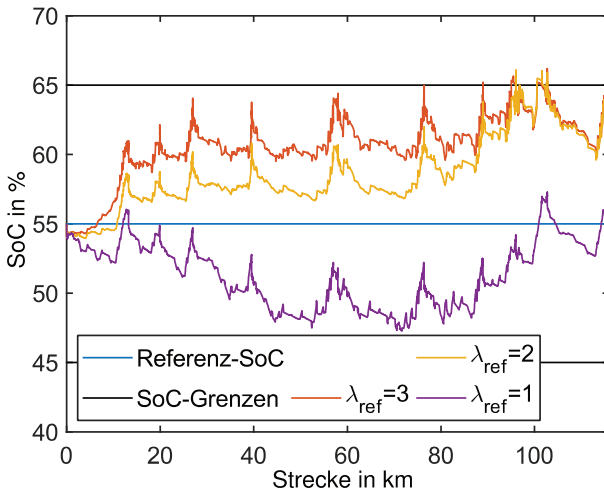


Abbildung 6-7: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $x^3$ -Filter bei PMB-RE

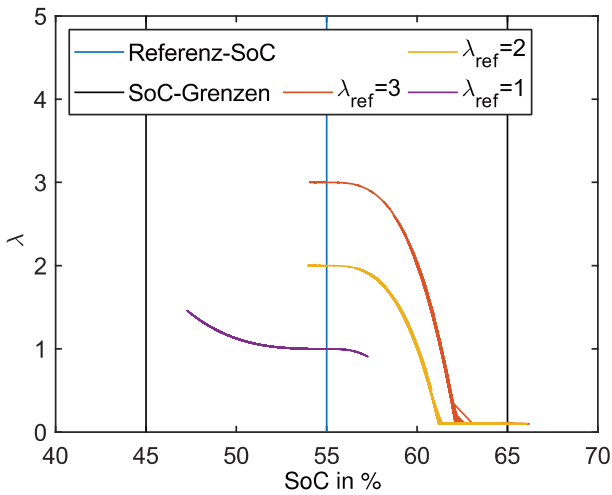


Abbildung 6-8: Äquivalenzfaktoren mit  $x^3$ -Filter für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  bei PMB-RE

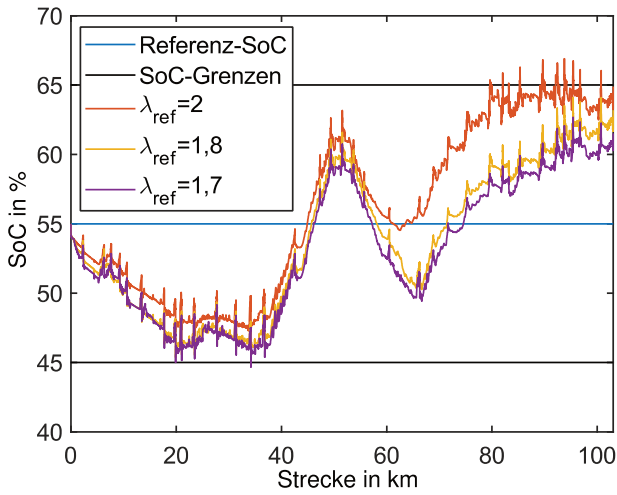


Abbildung 6-9: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $x^3$ -Filter bei ZwTB

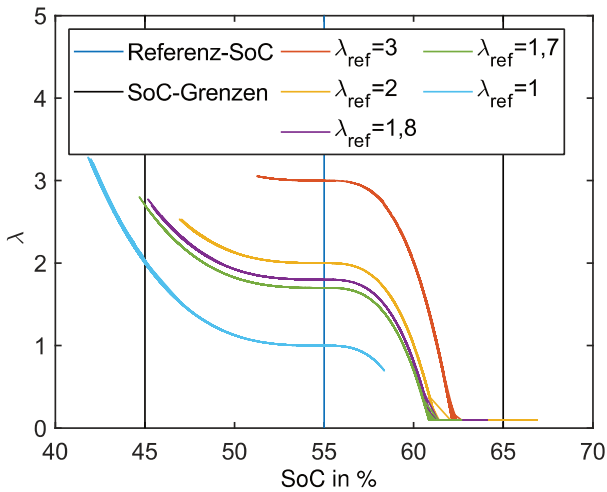


Abbildung 6-10: Äquivalenzfaktoren mit  $x^3$ -Filter für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  bei ZwTB

Abbildung 6-9 zeigt den Einsatz des  $x^3$ -Filters auf der Zwönitztalbahn im Erzgebirge. Im Gegensatz zur Verwendung eines ungefilterten Wertes (vgl. Abbildung 6-5) lässt sich dem Zielladezustand deutlich näher kommen. Auch der maximale SoC reduziert sich von 68 auf 63 % für ein  $\lambda_{\text{ref}} = 1,7$ .

Abbildung 6-10 zeigt dabei, dass auf dieser Strecke auch mit dem  $x^3$ -Filter noch kein optimales Ergebnis möglich ist, denn  $\lambda_{\text{ref}} > 1,8$  überschreitet die obere Ladungsgrenze und bei kleiner gleich 1,7 wird die untere durchquert.

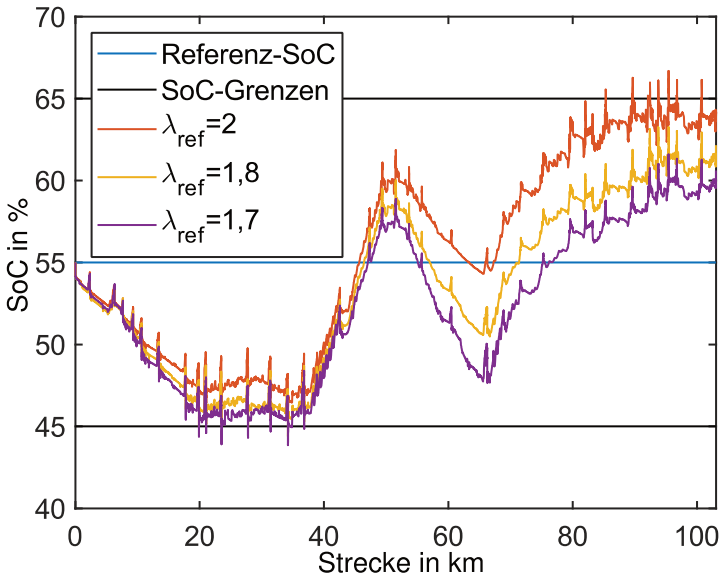


Abbildung 6-11: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{\text{ref}}$  mit tan-Filter bei ZwTB

Der Vollständigkeit halber wird auch noch das Tangensfilter für diesen Anwendungsfall in Abbildung 6-11 gezeigt, auch wenn schlechtere Ergebnisse zu erwarten sind, da symmetrisch um den Referenz-SoC ausgeregelt wird.

Dennoch bieten beide Filter deutlich bessere Kraftstoffverbräuche als die Basisvariante mit festem Äquivalenzfaktor für Strecken mit Steigungen. Als Fazit für diese Art von ladezustandsbasierten Korrekturen lässt sich also

festhalten, dass sie gegebenenfalls schneller konvergieren und bei leichten Steigungen bessere Ergebnisse erwarten lassen.

Außerdem wird ein Filter auf Basis der kinetischen Energie ( $E_{\text{kin}}$ -Filter) des Fahrzeugs untersucht. Dieses hält in der Batterie Platz frei und sorgt damit dafür, dass die nächste Bremsung vollständig rekuperiert werden kann. Dadurch wird die Batterie zwar nicht überladen, liefert aber insgesamt nur passable Ergebnisse bei der Gesamteffizienz. Ein Schutz gegen Tiefentladung ist er jedoch nicht. Dieser Ansatz liefert vermutlich bei kleineren Batteriekapazitäten im Verhältnis bessere Ergebnisse im Kraftstoffverbrauch, wenn auch auf der Sicherheitsseite Abschlüsse gemacht werden müssen.

### 6.3.2 Prädiktive Filter

Um auch bei Strecken mit größeren Höhenunterschieden im Umlauf an ein Optimum zu kommen, bieten sich prädiktive Filter an. Diese können auf Grund der zukünftigen Steigungen und Gefälle bereits im Vorfeld den Ladezustand aktiv absenken oder erhöhen (*Vorkonditionierung*). Die Idee dabei ist, soweit von den Ladezustandsgrenzen entfernt zu bleiben, dass die vorausliegenden Steigungen geboostet und die Gefälle rekuperiert werden können. Je weiter die Vorausschau dabei betrieben wird, desto kleiner wird das nutzbare SoC-Fenster. Es wird für die nächsten 10 km prädiziert, dies deckt in etwa das letzte steile Stück der ZwtB ab.

Das Filter wird hier nach dem Prinzip - hohes Lambda bei Bergfahrt und kleines bei Talfahrt - implementiert. Dies gewährleistet, dass ein Anfahren mit vollem Boost immer möglich ist. Optimal ist dieses Verhalten noch nicht. Im Gegensatz zum vorigen Beispiel in Abbildung 6-11 ist jedoch die Nutzung des SoC-Fensters nicht so stark ausgeprägt, während der Kraftstoffverbrauch kleiner ist.

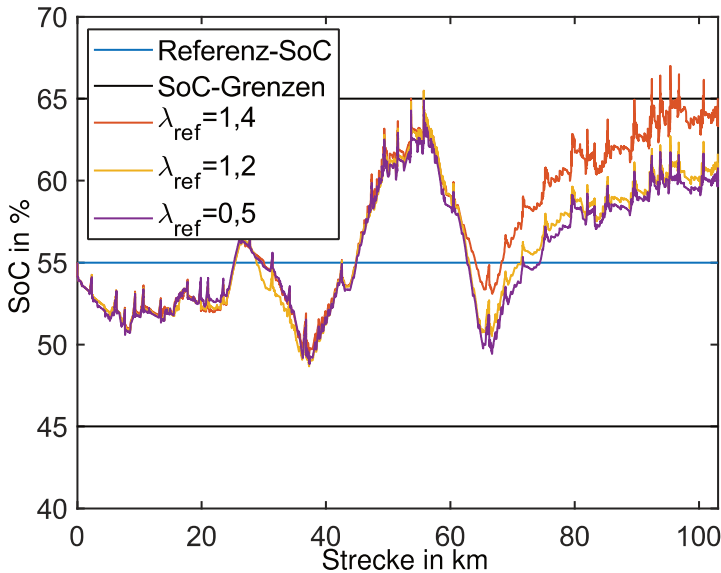


Abbildung 6-12: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $E_{pot}$ -Filter bei ZwTB

### 6.3.3 Mehrstufige Filter

Auch die Kombination mehrerer Filtertypen liegt nahe, um unterschiedliche Kriterien von Störgrößen einzubeziehen. So ließe sich ein streckenbasierter Filter mit einem fahrzeugbasierten kombinieren. Damit sollte sich getrennt auf Einflüsse eingehen lassen, die einen unterschiedlichen Zeithorizont haben. Zum einen gibt es sich nur sehr langsam ändernde Parameter wie beispielsweise die Steigung oder die Außentemperatur. Zum anderen stehen sich schnell oder augenblicklich ändernde Größen wie Fahrgastzahlen gegenüber.

Ein Beispiel dafür wäre die Kombination aus einem Steigungs- und einem Ladungsfilter wie in Abbildung 6-13 gezeigt:



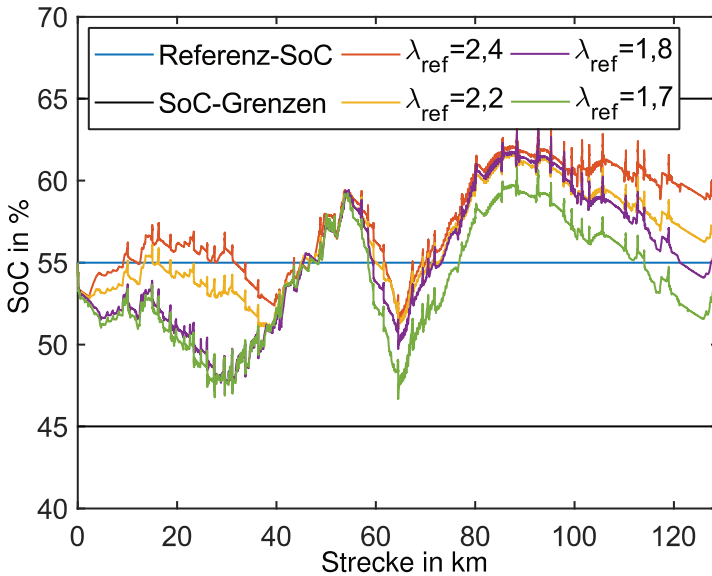


Abbildung 6-13: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $E_{pot} + \tan$ -Filter bei ZsTB

Eine weitere Möglichkeit wäre die Verbindung von einem Geschwindigkeitsfilter, das ausreichend Platz in der Batterie zur Rekuperation vorhält, und einem Ladungsfilter, der das Tiefentladen verhindert. Für ein kinetisches Filter ist die Bodensee-Oberschwaben-Bahn prädestiniert, da diese regelmäßige *Spitzfahrten* auf maximale Geschwindigkeit hat. Jedoch gibt es im letzten Abschnitt zum Wendebahnhof ein etwas steileres Stück, welches den Ladezustand stark senkt. Dort wirkt dann das Tangensfilter entgegen:

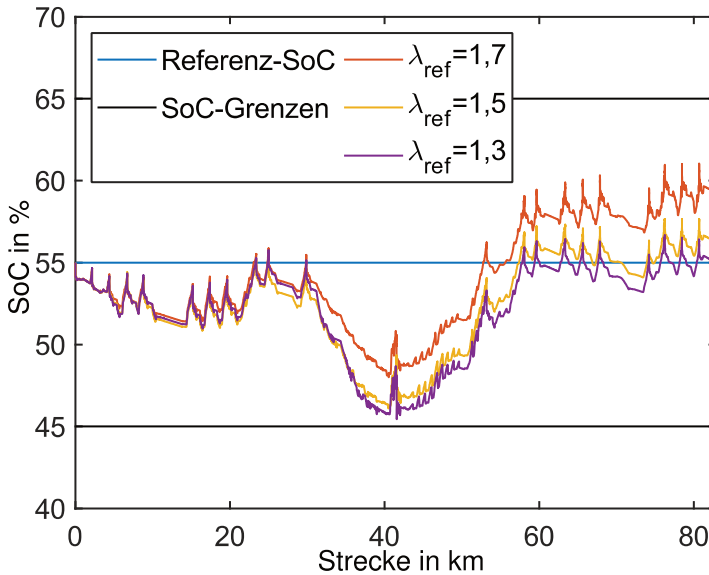


Abbildung 6-14: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{\text{ref}}$  mit  $E_{\text{kin}}$ +tan-Filter bei BOB

Zum Abschluss dieses Unterkapitels der Korrekturfilter soll mit Tabelle 6-3 eine Übersicht über die besten Filter für die jeweiligen Strecken gegeben werden, dabei sind alle Verspätungen kleiner 30 s.

Als Fazit zeigt sich, dass der Tangensfilter auf allen Strecken gute Ergebnisse liefert, so lange sie in der Ebene liegen und kleine Durchschnittsgeschwindigkeiten haben. Gibt es *Spitzfahrten* auf Geschwindigkeiten oberhalb von 100 km/h ist das kinetische Filter besser, der den Tangens dann nachgeschaltet als Entladeschutz verwendet. Ähnlich verhält es sich bei hohen Steigungen. Dort liefert die Anpassung mittels der potenziellen Energie die besten Ergebnisse, wenn der Tangens nachgeschaltet ist.

Strecke	$\dot{m}_{Kr}$ in kg/h	SoC <sub>min</sub> in %	SoC <sub>max</sub> in %	$\lambda_{optimal}$	bestes $\lambda$ -Filter	$\dot{m}_{Kr}$ o. F. in kg/h
PMB-RB	24,6	52	61	1,6	tan	25,3
PMB-RE	21,2	46	56	1	tan	20,9
MTB-RB	21,7	53	57	2,4	tan	22,2
MTB-RE	18,7	54	59	2,5	tan	21,4
BOB	30,5	46	58	1,5	$E_{kin} + \tan$	30,5
ZwTB	23,3	49	66	1,1	$E_{pot} + \tan$	27,4
ZsTB	25,1	51	64	2,5	$E_{pot} + \tan$	28,3
SwTB	24,6	49	66	2,2	$E_{pot} + \tan$	26,9

Tabelle 6-3: Simulationen der ECMS mit vs. ohne Filter

Es hat sich auch herausgestellt, dass bei mehreren Filtern eine genaue Parametrierung notwendig ist. Andernfalls kann es sein, dass ein Filter die Funktion des anderen vollständig überschreibt. Auf den drei Strecken der Erzgebirgsbahn bringt eine Reduktion des  $\lambda_{ref}$ -Wertes keine Verbesserung bei der oberen SoC-Grenze und des Kraftstoffverbrauches mehr, da das potenzielle Filter diese wieder überschreibt.

## 6.4 ECMS mit nur einem VKM

Eine weitere Möglichkeit die ECMS auf neue Gegebenheiten anzupassen, ist das Entfernen eines Motors. Im folgenden Beispiel wird ein Dieselmotor entfernt und die Gewichts- sowie Raumeinsparungen durch drei weitere Batterie-tröge kompensiert (vgl. Abbildung 6-15). Somit bleibt die Spitzenantriebsleistung etwa erhalten, aber die Dauerleistung wird deutlich

eingeschränkt. Gleichzeitig wird durch dieses *Downsizing* die verbleibende VKM deutlich gleichmäßiger ausgelastet.

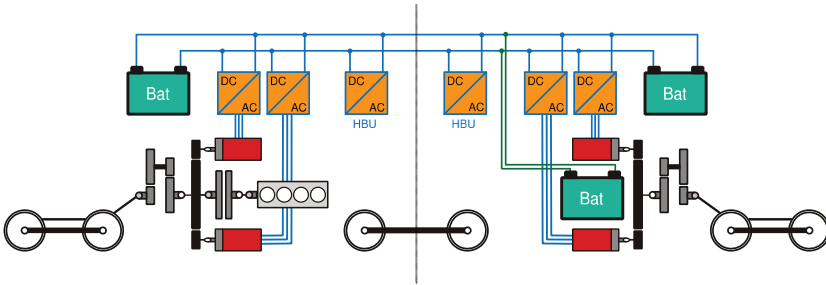


Abbildung 6-15: Fahrzeugtopologie für nur einen Dieselmotor

Tabelle 6-4 zeigt wiederum die besten Simulationsergebnisse für diese angepasste Konstellation. Durch die höheren rekuperierbaren Leistungen steigt der SoC schneller, dabei liefert das  $x^3$ -Filter teilweise bessere Ergebnisse als der Tangens. Wie in den vorigen Varianten liegen beide aber nahe beieinander. In allen Fällen waren immer noch pünktliche Fahrten möglich, auch wenn die Verspätungen um bis zu 20 s zunehmen. Im Vergleich zu Tabelle 6-3 sind Verbesserungen beim Kraftstoffverbrauch für alle Strecken möglich. Im Falle der Bodensee-Oberschwaben-Bahn sogar im Bereich um 5 kg/h. Ob diese die Mehrkosten für die zusätzlichen Batterietröge überwiegen, ist eine wirtschaftliche Entscheidung. Der Entfall eines Diesels mit Anbauteilen wird bei heutigen Batteriepreisen etwa durch einen Trog kompensiert. Ohne Erhöhung der Anzahl an Trögen ist pünktliches Fahren jedoch nicht möglich und auch die Batterielebensdauer deutlich reduziert.

<b>Strecke</b>	<b><math>\dot{m}_{Kr}</math></b> in kg/h	<b>SoC<sub>min</sub></b> in %	<b>SoC<sub>max</sub></b> in %	<b><math>\lambda_{optimal}</math></b>	<b>bestes <math>\lambda</math>-Filter</b>
PMB-RB	23,2	52	58	3	$x^3$
PMB-RE	20,0	53	59	2,7	tan
MTB-RB	19,3	51	56	3,8	tan
MTB-RE	17,1	53	57	3	tan
BOB	25,7	52	60	4	$E_{kin} + \tan$
ZwTB	20,4	51	60	2,9	$E_{pot} + \tan$
ZsTB	24,1	50	59	4,2	$E_{pot} + \tan$
SwTB	22,9	50	59	4	$x^3$

Tabelle 6-4: Simulation der ECMS mit nur einem Verbrennungsmotor



## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war, auf Basis der Bewertungskriterien „mögliche Kraftstoff einsparung“, „Komplexität der Implementierung“ und „Echtzeitfähigkeit“ eine Betriebsstrategie samt zugehörigem Fahrzeugenergiemanagement zu entwerfen. Dafür wurden die drei verschiedenen Ansätze: Fuzzylogik, Kraftstoffäquivalenzverfahren (ECMS) und dynamische Programmierung (DP) nach Bellman ausgearbeitet, implementiert und ausgewertet.

Da für die Entwürfe kein reales System zur Verfügung stand, wurde ein komplexes multiphysikalisches Simulationsmodell von Fahrzeug und Antrieb in Modelica Dymola entworfen. Weil die Kostenbewertungen eines solchen Systems bei Einzelanfertigung schwer möglich sind, wurde darauf Wert gelegt, möglichst realistische Szenarien auszuwählen. Dabei wird die dynamische Programmierung nach Bellman nur als Vergleichsmethodik herangezogen, da diese als offline-Verfahren nicht echtzeitfähig ist. Fuzzylogik und ECMS konnten beide trotz Multiphysikmodell im Hintergrund auf einem Computer in weicher Echtzeit implementiert werden. Daraus wird gefolgert, dass eine Portierung auf ein aktuelles Fahrzeugsteuergerät möglich ist. Im Rahmen des Projekts PREDIKT wurde dies für den Fuzzyregler auch auf einem solchen erfolgreich implementiert und getestet [MAK18].

In Abbildung 7-1 sollen die besten Ergebnisse der über 500 Simulationsläufe in Form der Kraftstoffverbräuche gegenüber gestellt werden. Dabei sind bereits deutliche Verbesserungen von der Dieselfahrt zum Fuzzyregler erkennbar. In einigen Fällen liefert dieser bessere Ergebnisse als die ECMS mit konstantem Äquivalenzfaktor.

Die dynamische Programmierung nach Bellman soll als Referenz für das optimale Ergebnis gelten, das meist auch gut getroffen wird. Für die Strecke PMB-RE sind die Ergebnisse durch die ECMS sogar unterboten. Dies lässt sich auf zu große Quantisierungsstufen und Modellfehler zurückführen. Für die Strecke MTB ließ sich die DP gar nicht berechnen, weil für die notwendigen Quantisierungsstufen nicht ausreichend Rechenleistung zur Verfügung

stand. Von einer abschnittswisen Berechnung nur für diese Strecke wurde abgesehen.

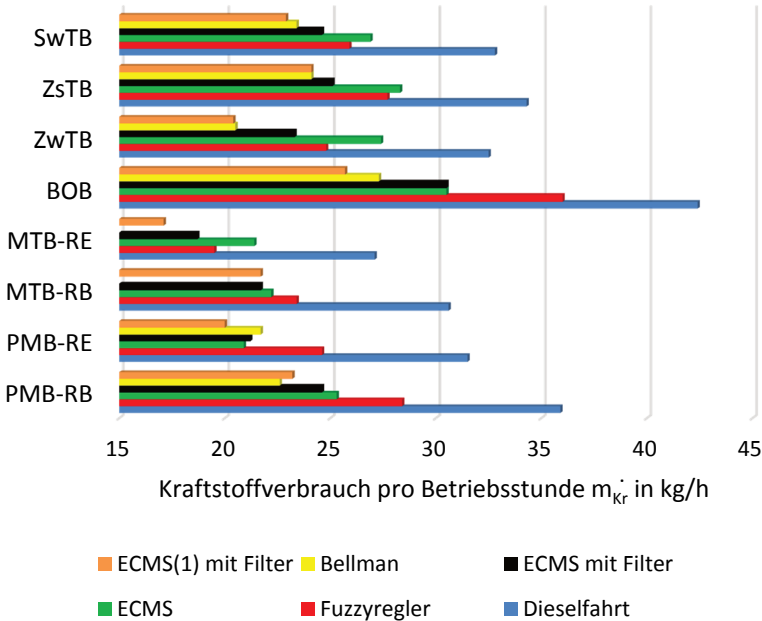


Abbildung 7-1: Gegenüberstellung der besten Ergebnisse der jeweiligen Simulationen

Der Sonderfall mit nur einer VKM – oben als ECMS(1) gekennzeichnet – war insbesondere im Projekt PREDIKT von Interesse, da untersucht werden sollte, ob durch die Installation höherer elektrischer Leistung, einer der Dieselmotoren entfallen kann. Wie Kapitel 6.4 zeigt, ist dies in allen Fällen gut möglich, jedoch erhöht sich die planmäßige Verspätung auf allen Strecken. Nach Bahnmaßstäben sind diese noch nicht relevant, aber die Tendenz weist bereits darauf hin, dass bei einem solchen Ansatz kaum noch Reserven vorhanden sind, um größere Verspätungen wieder einzuholen. Mit zunehmender Alterung der Batterien wird sich dies noch weiter verstärken, obwohl bereits 275 kWh Nennkapazität im Fahrzeugbeispiel im Einsatz sind und diese mit einem SoC-



Fenster von weniger als 20 % belastet wird. Im Rahmen des Projekts wurde das Einmotorenkonzept nur in Verbindung mit einem angepassten Fuzzyregler und weniger Batterietrögen betrachtet, mit dem die Verspätungen bis zu mehrere Minuten betragen.

Als Gesamtfazit lässt sich festhalten, dass der Einsatz der ECMS-Optimierung nur zusammen mit der Wahl eines passenden Filters und Batteriekapazität zum gewünschten Ziel führt. Das Tangensfilter ist universell auf allen Streckentypen einsetzbar und liefert schnell gute Ergebnisse. Treten durch höhere Steigungen Verletzungen des Ladezustandsfensters auf, so bringt ein vorgeschaltetes, prädiktives Filter auf Basis potenzieller Energie weitere Verbesserungen.

Abschließend sei ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, dass sich bereits im einfachsten betrachteten Fall der konventionellen Dieselfahrt deutliche Verbesserungen gegenüber regulärem Fahrbetrieb aufzeigen lassen. Diese entstehen dadurch, dass das Fahrzeug einem verspätungskompensierten, prädiktiven Fahrprofil folgt, das die pünktliche Ankunft am nächsten Halt unter Nutzung der fahrplanmäßigen Reserven darstellt. Dies entspricht einem Fahrzeugführer mit langjähriger Strecken- sowie Fahrzeugkenntnis. Dieser Ansatz wurde bewusst als Referenz für Vergleiche gewählt, damit weitere Einsparungen auf die Betriebsstrategie zurückzuführen sind und nicht auf die verbesserte Fahrweise.

Während Zustandsautomaten und Fuzzyregler für zwei beteiligte Antriebsanlagen noch sehr geringe Komplexitäten in der Implementierung aufweisen, wird dies bei Optimierern deutlich umfangreicher. Die zustandsbasierten Ansätze erfordern eine hohe Genauigkeit bei der Parametrierung und Erfahrung des Entwicklers im Gesamtsystemverhalten, aber auch auf jeder einzelnen Komponente. Sobald eine davon getauscht wird, müssen alle Parameter von vorne neu bestimmt werden. Optimierer sind hingegen deutlich flexibler. Bei Tausch einer Komponente gegen eine mit anderen Leistungsdaten werden lediglich die zugehörigen Komponentendaten wie Begrenzungskennlinien und Kennfelder getauscht. Eine Anpassung des Optimierers selbst ist nicht notwendig. Somit ist es eine Einzelfallentscheidung welches Verfahren am sinnvollsten eingesetzt wird. Bei höheren Anzahlen von beteiligten Motoren und Nebenbedingungen wird ein Zustandsautomat sehr unübersichtlich, während beim Optimierer der Umfang immer gleich groß bleibt.

Angesichts der großen zusätzlichen Einsparpotenziale und gleichzeitigen Flexibilität durch ein numerisches Verfahren wie die Kraftstoffäquivalenzmethode ist eine solche Optimierung für zukünftige Systeme keinesfalls zu vernachlässigen.

## 8 Ausblick

Trotz der umfangreichen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit stattgefunden haben, wurden einige Themen aus zeitlichen Gründen nicht detailliert betrachtet. Im Folgenden soll ein kurzer Abriss dessen gegeben werden, was als sinnvolle Erweiterung für diese Arbeit betrachtet werden kann:

### **Intelligente Nebenaggregate**

Am Rande dieser Arbeit sind bereits alle notwendigen Grundlagen für die intelligente Ansteuerung von Nebenaggregaten geschaffen worden. Jedoch ist das notwendige Klima-, Wetter-, thermische Fahrzeugmodell zur Berechnung der Klimatisierungsanlagen so komplex, dass es in akzeptabler Laufzeit nicht mit abgebildet werden kann. Soll der Fokus auf die Optimierung der Nebenaggregate gelegt werden, muss das Fahrzeugmodell deutlich vereinfacht werden. Dies hätte aber zur Folge, dass eine Antrieboptimierung nicht mehr direkt möglich wäre. Somit ist dieses Themenfeld in einer getrennten Arbeit zu betrachten. Zusätzliche Vortriebsleistung aus der Batterie wäre insbesondere bei geringer installierter Batteriekapazität und nur einem Dieselmotor zu untersuchen.

### **Abschnittsweise Oberleitung und Plugin-Hybridfahrzeuge**

Eine interessante Möglichkeit zur Weiterentwicklung sind Fahrzeuge mit externer Lademöglichkeit. Diese können entweder an elektrifizierten Endbahnhöfen stationär nachgeladen werden oder es wird eine abschnittsweise Oberleitung verwendet, wie dies die ersten 10 km der Strecken Karlsruhe – Neustadt oder auch Chemnitz – Crazzahl bieten. Dazu müssten zusätzliche Komponenten im Fahrzeugmodell wie ein Stromabnehmer, ein Transformator und ein aktiver Gleichrichter untergebracht werden. In den Streckendaten wäre dann zu hinterlegen, wo sich die Oberleitung befindet. Wird der gesamte verbrennungsmotorische Antrieb gegen Batterien getauscht, wäre ein Betrieb auch als Akkutriebwagen auf allen Strecken möglich. Problematisch sind dabei die verfügbaren Ladedauern und die Kosten der Batterien.

### **Mehrfachtraktion mit verschiedenen Fahrzeugtypen**

In Kombination mit dem vorigen Abschnitt wäre auch ein gemeinsamer Betrieb zwischen Dieseltriebwagen und Elektro- oder Hybridtriebwagen denkbar. So könnte auf Strecken mit Oberleitung elektrisch gefahren werden und sonst mit Verbrennungsmotor. Das interessante dabei ist, dass die bestehenden Fahrzeuge einfach weiter verwendet werden können, während nur ein Teil der Flotte auf Akkutriebwagen umgebaut wird.

### **Batterialterung vs. Batteriegröße**

Im Rahmen dieser Arbeit und dem zugrunde liegenden Projekt PREDIKT wurden auch umfangreiche Batterialterungsmodelle erstellt. Je kleiner die im Fahrzeug installierte Batteriekapazität, desto größer werden die Auslenkungen im SoC-Fenster und umso stärker altern die Batterien. Wie viele Jahre eine Traktionsbatterie mit welchen Einschränkungen aushalten muss, ist im Wesentlichen eine wirtschaftliche Entscheidung des Herstellers und des Betreibers. Wenn entsprechende Vorgaben dazu vorliegen, ließen sich unter diesen Bedingungen der optimale Betrieb und die Festlegung des passenden Ladezustandsfensters sicherstellen.

### **Zero-Emission-Zones**

Ebenso wie die abschnittswisen Oberleitungen lassen sich auch Streckenbereiche mit Emissionsbegrenzung hinterlegen, in welchen dann nur elektrisch gefahren werden darf. Dafür würde dann der Fuzzyregler um zwangsweises elektrisches Fahren erweitert werden. Dies würde dann erneute Auswertungen und gegebenenfalls Anpassungen der  $\lambda$ -Filter mit Prädiktion erfordern, um die Batterie ausreichend zu vorkonditionieren. Besondere wissenschaftliche Höhe ist darin aber nicht zu sehen.

### **Erweiterung des Optimierers auf Zugverbände**

Schlussendlich wurden die Voraussetzungen geschaffen, um auch einen Gesamtzugverband aus mehreren Fahrzeugen gemeinsam zu optimieren. Aus der bestehenden Bibliothek mit Fahrzeugkomponenten in Dymola wäre ein Aufbau eines solchen Verbandes einfach möglich. Der Optimierer in Simulink müsste dazu um weitere Vielfache der parallelen Gütefunktionen erweitert werden.

## **9 Anhang**

## 9.1 Konstante Ruhespannung

Die der ECMS zu Grunde liegende PMP setzt voraus, dass nur konstante Faktoren in die Berechnung der Gütefunktion eingehen. Mathematisch wäre das Problem sonst nicht lösbar. Physikalisch würde es bedeuten, dass man bei unterschiedlicher Ruhespannung Energie in die Batterie laden und entnehmen würde. Was wiederum bedeutet, dass die Ströme nicht mehr übereinstimmen und somit auch die Verluste falsch berechnet werden würden. Im Folgenden soll eine Fehlerabschätzung dazu gemacht werden:

Gegeben sei ein genutztes SoC-Fenster der Batterie zu 45 bis 65 %. Daraus folgen die Grenzen der Ruhespannung  $U_0$  von 657 und 680 V (668 V in der Mitte des Ladungsfensters). Dabei werden folgende Grenzwerte der Verbraucher angesetzt:

$$-4 * 200 \text{ kW} \leq P_{EM} \leq +4 * 200 \text{ kW}$$

$$2 * 5 \text{ kW} \leq P_{Neben} \leq 2 * (82 \text{ kW} + 5 \text{ kW})$$

Daraus folgen die Peak-Leistungsgrenzen zu:

$$-552 \text{ kW} \leq P_{ges} \leq 974 \text{ kW}$$

Dabei sind die zulässigen Batterieströme:

$$-6 * 140 \text{ A} \leq I_{Bat} \leq +6 * 400 \text{ A}$$

Der Innenwiderstand  $R$  wird zu 60 m $\Omega$  angenommen.

Diese Werte werden nun in die Gleichung (3-21) eingesetzt, um die maximale Abweichung des Batteriestroms zu ermitteln. Bei Batterieentladung würden sich im ungünstigsten Fall folgende Ströme einstellen:

$$I_{entladen}(U_{max}) = \frac{680 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(680 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{974 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = 1682 \text{ A}$$

$$I_{entladen}(\bar{U}) = \frac{668 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(668 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{974 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = 1726 \text{ A}$$

$$I_{entladen}(U_{min}) = \frac{657 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(657 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{974 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = 1768 \text{ A}$$

Beim Laden der Batterie ergeben sich folgende Ströme:

$$I_{laden}(U_{max}) = \frac{680 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(680 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{-552 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = -760 \text{ A}$$

$$I_{laden}(\bar{U}) = \frac{668 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(668 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{-552 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = -773 \text{ A}$$

$$I_{laden}(U_{min}) = \frac{657 \text{ V}}{2 * 60 \text{ m}\Omega} - \sqrt{\frac{(657 \text{ V})^2}{4 * (60 \text{ m}\Omega)^2} - \frac{-552 \text{ kW}}{60 \text{ m}\Omega}} = -784 \text{ A}$$

Somit sind die Ströme, die im ungünstigsten Fall auftreten können 5 % falsch berechnet, wenn an den Fenstergrenzen gearbeitet wird. Dieser Fall tritt also nur auf, wenn bei entleerter Batterie rekuperiert wird und bei voller Batterie wieder entladen. Im realen Einsatz liegen Rekuperation und anschließender elektrischer Betrieb nahe beieinander und damit deutlich unterhalb dieser Abschätzung. Außerdem ist für einen realen Einsatz auch zu berücksichtigen, ob Stromsensoren diese Genauigkeit überhaupt messen könnten.

Es soll nun noch ein Spannungsverlauf auf der Zwönitztalbahn herangezogen werden, da dort die Ladungsfenster am stärksten genutzt werden:

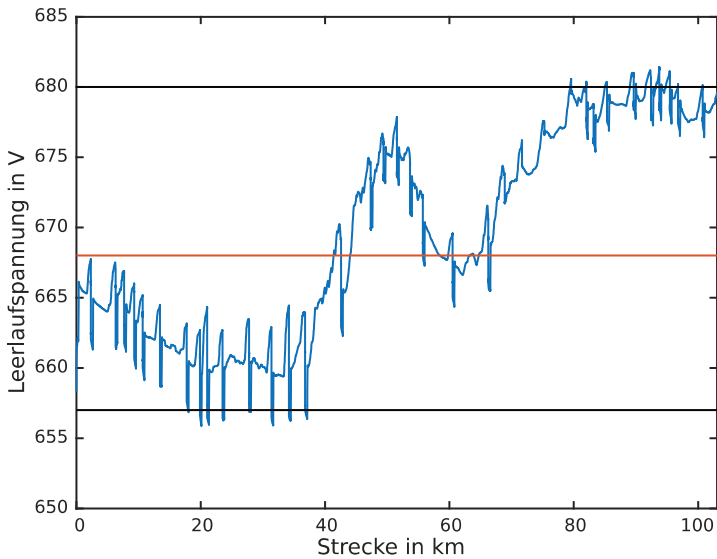


Abbildung 9-1: Leerlaufspannungsverlauf auf der ZwTB mit  $x^3$  und  $\lambda=2$

## 9.2 Konstanter Innenwiderstand

Wie auch schon im vorigen Kapitel genannt, werden konstante Faktoren für die PMP benötigt. Dies betrifft neben der Ruhespannung auch den Innenwiderstand der Batterie. Bei falscher Annahme werden die Batterieverluste wiederum falsch berechnet, darum gibt es auch dafür im Folgenden eine worst-case Abschätzung mit einem anschließenden Plot aus den Simulationsdaten:



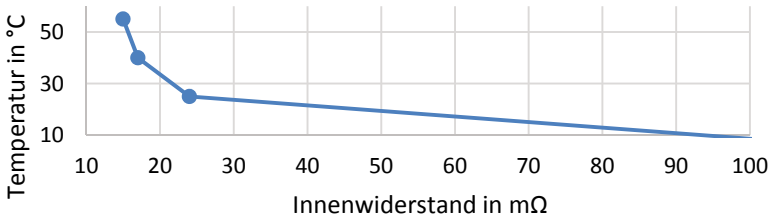


Abbildung 9-2: Widerstand eines Batteriemoduls LiANA+

Abbildung 9-2 zeigt den Innenwiderstand eines Batteriemoduls. 15 dieser Module in Serienschaltung ergeben einen Batterietrog. In der Simulation werden sechs dieser Tröge parallel betrieben. Es folgen für die typischen Betriebstemperaturen von 25 – 30 °C die Gesamtwiderstände von 60 bis 52 mΩ, die wiederum in Gleichung (3-21) eingesetzt werden:

$$I_{entladen}(R_{min}) = \frac{668 V}{2 * 52 m\Omega} - \sqrt{\frac{(668 V)^2}{4 * (52 m\Omega)^2} - \frac{974 kW}{52 m\Omega}} = 1677 A$$

$$I_{entladen}(R_{max}) = \frac{668 V}{2 * 60 m\Omega} - \sqrt{\frac{(668 V)^2}{4 * (60 m\Omega)^2} - \frac{974 kW}{60 m\Omega}} = 1726 A$$

$$I_{laden}(R_{min}) = \frac{668 V}{2 * 52 m\Omega} - \sqrt{\frac{(668 V)^2}{4 * (52 m\Omega)^2} - \frac{-552 kW}{52 m\Omega}} = -779 A$$

$$I_{laden}(R_{max}) = \frac{668 V}{2 * 60 m\Omega} - \sqrt{\frac{(668 V)^2}{4 * (60 m\Omega)^2} - \frac{-552 kW}{60 m\Omega}} = -773 A$$

Somit ergibt sich in Entladerichtung ein Fehler kleiner 3 % und in Laderichtung weniger als 1 %.

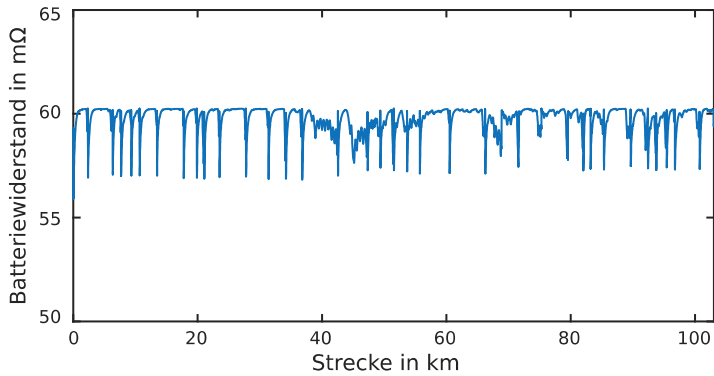


Abbildung 9-3: Batteriewiderstandsverlauf auf der ZwtTB mit  $x^3$  und  $\lambda=2$

Der Widerstandsverlauf für einen Umlauf auf der Zwönitztalbahn liefert sogar noch viel kleinere Abweichungen als erwartet.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Struktur der vorliegenden Arbeit .....	5
Abbildung 2-1: Wirkungsgrade ausgeführter Motoren, Daten aus [MST12] und [MAK18].....	8
Abbildung 2-2: Fahrspiel zwischen zwei Haltestellen .....	10
Abbildung 2-3: Energiemanagement.....	21
Abbildung 2-4: Hybridstrategie.....	25
Abbildung 2-5: optimierte Gangwahl für Beschleunigung, hochschalten.....	27
Abbildung 2-6: optimierte Gangwahl für Verzögerung, runterschalten.....	28
Abbildung 2-7: wertende Gegenüberstellung ausgewählter Betriebsstrategieansätze für parallele Hybridfahrzeugarchitekturen [HUT15].....	33
Abbildung 2-8: Drehmomentgrenzen bei unterschiedlichen Fahrmodi und hohem SoC.....	34
Abbildung 2-9: Drehmomentgrenzen bei unterschiedlichen Fahrmodi und niedrigem SoC.....	35
Abbildung 2-10: Schalthysterese mittels Fuzzylogik zwischen zwei Zuständen .....	36
Abbildung 2-11: Schaltverhalten mit und ohne Hysterese .....	37
Abbildung 2-12: mehrstufige Schalthysterese mittels Fuzzylogik .....	37
Abbildung 3-1: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 1: Spitzfahrt....	42
Abbildung 3-2: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 2: Reisegeschwindigkeit.....	43
Abbildung 3-3: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 3: Ausrollen....	44
Abbildung 3-4: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF – Teil 4: Fahrtrajektorie .....	44

---

Abbildung 3-5: Fahrstrategie auf Grundlage der ESF, Hybriderweiterung – Spitzfahrt.....	46
Abbildung 3-6: nutzbare Batterieinhalte und eingeschränkter Betrieb.....	49
Abbildung 3-7: mehrstufige Schaltlogik mittels Fuzzyregler anhand der Batterieladung .....	51
Abbildung 3-8: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid, $a < 0$ .....	53
Abbildung 3-9: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid, $a > 0$ und $SoC \approx 0,5$ .....	54
Abbildung 3-10: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid, $a > 0$ und $SoC \ll 0,5$ .....	55
Abbildung 3-11: Drehmomentaufteilung für einen 2-fachen Multihybrid, $a > 0$ und $SoC \gg 0,5$ .....	56
Abbildung 3-12: Energieflüsse im Fahrzeug.....	58
Abbildung 3-13: Aufbau eines parallel-hybriden Antriebsstrangs .....	59
Abbildung 3-14: Abschätzung des Rechenaufwands verschiedener Implementierungen .....	64
Abbildung 3-15: parallele Implementierungsvariante für einen Antrieb mit fünf Gängen.....	65
Abbildung 3-16: ECMS-Optimierung der Momentenverteilung.....	66
Abbildung 4-1: Modellkomponente mit Interfaces .....	72
Abbildung 4-2: Streckenprofil MTB .....	76
Abbildung 4-3: Streckenprofil BOB .....	77
Abbildung 4-4: Streckenprofil PMB .....	78
Abbildung 4-5: Streckenprofil ZwTB .....	79
Abbildung 4-6: Streckenprofil ZsTB.....	80
Abbildung 4-7: Streckenprofil SwTB .....	81
Abbildung 4-8: Siemens Desiro Classic VT642, in Hybridkonfigurationen PREDIKT.....	84
Abbildung 4-9: Fahrzeugtopologie und Bordnetz .....	87

---

Abbildung 4-10: vereinfachtes Modell des Dieselmotors .....	88
Abbildung 4-11: vereinfachtes Modell des Elektromotors mit Umrichter ....	89
Abbildung 4-12: vereinfachtes Batteriemodell mit Alterung .....	90
Abbildung 4-13: vereinfachtes Getriebemodell .....	92
Abbildung 4-14: vereinfachtes Drehgestellmodell.....	94
Abbildung 4-15: vereinfachtes Fahrermodell.....	97
Abbildung 5-1: Aufbau der Simulation.....	99
Abbildung 5-2: Reglertopologie.....	101
Abbildung 5-3: Fahrspiel Fuzzy PMB-RE.....	103
Abbildung 5-4: SoC-Verlauf Fuzzy PMB-RE.....	104
Abbildung 5-5: Arbeitspunkte VKM Fuzzy PMB-RE .....	105
Abbildung 5-6: Fahrspiel Fuzzy PMB-RB .....	106
Abbildung 5-7: SoC-Verlauf Fuzzy PMB-RB .....	107
Abbildung 5-8: Arbeitspunkte VKM Fuzzy PMB-RB .....	108
Abbildung 5-9: Fahrspiel Fuzzy ZwTB .....	109
Abbildung 5-10: SoC-Verlauf Fuzzy ZwTB .....	110
Abbildung 5-11: Arbeitspunkte VKM Fuzzy ZwTB.....	110
Abbildung 6-1: Vergleich der Ladezustände für verschiedene $\lambda$ bei PMB- RE .....	115
Abbildung 6-2: Vergleich der Kraftstoffverbräuche bei PMB-RE.....	116
Abbildung 6-3: Vergleich der Ladezustände für verschiedene $\lambda$ bei PMB- RB .....	117
Abbildung 6-4: Vergleich der Verspätungen für verschiedene $\lambda$ bei PMB- RB .....	118
Abbildung 6-5: Vergleich der Ladezustände für verschiedene $\lambda$ bei ZwTB	119
Abbildung 6-6: Filterfunktionen für ECMS ohne Prädiktion.....	122
Abbildung 6-7: Ladezustände für verschiedene Werte von $\lambda_{ref}$ mit $x^3$ -Filter bei PMB-RE.....	124

Abbildung 6-8: Äquivalenzfaktoren mit  $x^3$ -Filter für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  bei PMB-RE ..... 124

Abbildung 6-9: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $x^3$ -Filter bei ZwTB ..... 125

Abbildung 6-10: Äquivalenzfaktoren mit  $x^3$ -Filter für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  bei ZwTB..... 125

Abbildung 6-11: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit tan-Filter bei ZwTB ..... 126

Abbildung 6-12: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $E_{pot}$ -Filter bei ZwTB ..... 128

Abbildung 6-13: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $E_{pot}+tan$ -Filter bei ZsTB ..... 129

Abbildung 6-14: Ladezustände für verschiedene Werte von  $\lambda_{ref}$  mit  $E_{kin}+tan$ -Filter bei BOB ..... 130

Abbildung 6-15: Fahrzeugtopologie für nur einen Dieselmotor ..... 132

Abbildung 7-1: Gegenüberstellung der besten Ergebnisse der jeweiligen Simulationen ..... 136

Abbildung 9-1: Leerlaufspannungsverlauf auf der ZwTB mit  $x^3$  und  $\lambda=2$ .. 144

Abbildung 9-2: Widerstand eines Batteriemoduls LiANA+ ..... 145

Abbildung 9-3: Batteriewiderstandsverlauf auf der ZwTB mit  $x^3$  und  $\lambda=2$ . 146

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Fahrzustände des Multihybridantriebs .....	48
Tabelle 3-2: nicht sinnvolle Fahrzustände des Multihybridantriebs.....	48
Tabelle 3-3: Steuergrößen und Beschränkungen der Antriebssteuerung.....	50
Tabelle 3-4: erlaubte Fahrzustände des Multihybridantriebs abhängig von der Batterieladung .....	52
Tabelle 3-5: Quantisierungen beim Bellman-Algorithmus, PMB-RB .....	68
Tabelle 3-6: Berechnungsschritte beim Bellman-Algorithmus .....	70
Tabelle 4-1: Interfacebeschreibung einer Komponente.....	72
Tabelle 4-2: Beispiel eines Fahrplans der Bodensee-Oberschwaben-Bahn ..	74
Tabelle 4-3: Übersicht der Teststrecken .....	75
Tabelle 4-4: Beispiel einer Fahrgastauslastung .....	82
Tabelle 4-5: Fahrzeugdaten des Desiro Hybrid VT642.....	85
Tabelle 4-6: Fahrzeugkomponentendaten des MTU-HybridPowerPack 2....	86
Tabelle 4-7: Energiebedarf der Nebenaggregate pro Halbzug [MAK18] ....	96
Tabelle 5-1: Ausgabe aus der Simulation.....	100
Tabelle 5-2: Vergleichswerte der hybriden Referenzfahrten mit dem Fuzzy- Regler .....	111
Tabelle 5-3: Vergleichswerte der konventionellen Referenzfahrten .....	112
Tabelle 6-1: Simulationen mit dynamischer Programmierung.....	114
Tabelle 6-2: Simulationen der ECMS ohne Filter .....	120
Tabelle 6-3: Simulationen der ECMS mit vs. ohne Filter .....	131
Tabelle 6-4: Simulation der ECMS mit nur einem Verbrennungsmotor .....	133

# Literaturverzeichnis

AK14

Altmann, Lars; Kurz, Adrian (2014): Nahtloser Übergang - die Last Mile Lokomotive. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 9, S. 174–176

All16

Allianz pro Schiene e.V. (2016): Verkehrsminister machen Druck bei Elektrifizierung des Schienennetzes; Online unter [www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/verkehrsminister-fordern-elektrifizierung/](http://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/verkehrsminister-fordern-elektrifizierung/) (geprüft am 14.09.2018)

AS16

Angermann, Falk; Stephan, Arnd (2016): EcoTrain - Nachladung für Hybridfahrzeuge - Lösungsentwicklung und Ladekonzepte. In: VDE und IZBE - Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Hg.): Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 2016. Dresden, 08.-09.12.2016

Bac06

Back, Michael (2006): Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005, betreut durch Krebs, Volkers und Guzzella, Lino; Karlsruhe  
Karlsruhe Institut für Technologie - Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, ISBN: 3866440316



Beh15a

Behrens, Rolf (2015): Diesel unter Strom: Hybrid-Antriebe bewähren sich in Testfahrten; Online unter [www.mtu-report.com/desktopmodules/mtu\\_report\\_content/print.aspx?pid=0&tid=926&cc=de-DE&v=1&n=1](http://www.mtu-report.com/desktopmodules/mtu_report_content/print.aspx?pid=0&tid=926&cc=de-DE&v=1&n=1) (geprüft am 04.07.2018)

Beh15b

Behmann, Uwe (2015): Energiesparendes Fahren im Spannungsfeld zwischen Informatik und Realität. In: *eb - Elektrische Bahnen* 11, S. 578–583

Beh16

Behrens, Rolf (2016): Weltpremiere des MTU Hybrid-PowerPacks; Online unter [www.mtu-report.com/de-de/Bahn/Weltpremiere-des-MTU-Hybrid-PowerPacks](http://www.mtu-report.com/de-de/Bahn/Weltpremiere-des-MTU-Hybrid-PowerPacks) (geprüft am 04.07.2018)

Bel57

Bellman, Richard (1957): *Dynamic programming*, Princeton University Press; New York

Bel67

Bellman, Richard (1967): *Dynamische Programmierung und selbstanpassende Regelprozesse*, Oldenbourg; München, Wien

Ber16

Berger, Katja (2016): Informationsblatt Chemnitzer Modell Aktuell - Citylink Chemnitz; Online unter [www.chemnitzer-modell.de/uploads/media/Chemnitzer\\_Modell\\_Aktuell\\_Ausgabe\\_4\\_November\\_2016.pdf](http://www.chemnitzer-modell.de/uploads/media/Chemnitzer_Modell_Aktuell_Ausgabe_4_November_2016.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

### BMVBS11

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) - Energie auf neuen Wegen; Online unter [www.izes.de/sites/default/files/Leitstelle/mks-strategie-final-1.pdf](http://www.izes.de/sites/default/files/Leitstelle/mks-strategie-final-1.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

### BOB16

Bodensee-Oberschwaben-Bahn GmbH & Co. KG (2017): Fahrplan Bodensee-Oberschwaben-Bahn - Aulendorf-Friedrichshafen; Online unter [www.bob-fn.de/de/fahrplan/fahrplanauskunft/fahrplanauskunft.php](http://www.bob-fn.de/de/fahrplan/fahrplanauskunft/fahrplanauskunft.php) (geprüft am 27.04.2017)

### BS15

van Basshuysen, Richard; Schäfer, Fred (2015): Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven 7. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg; Wiesbaden (ATZ/MTZ-Fachbuch), DOI/ISBN: 10.1007/978-3-658-04678-1978-3-658-04677-4

### CA16

Claus, Sören; Albrecht, Andreas (2016): Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit im SPNV - Fahrzeugumbau VT642 zum EcoTrain. In: VDE und IZBE - Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Hg.): Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 2016. Dresden, 08.-09.12.2016

### CK12

Cassebaum, Oliver; Kutter, Steffen (2012): Energiemanagement - Betriebsstrategie; Online unter [tu-dresden.de/bu/verkehr/iad/fm/forschung/forschungsfelder](http://tu-dresden.de/bu/verkehr/iad/fm/forschung/forschungsfelder) (geprüft am 25.11.2015)

Cla14

Claus, Sören (2014): Von stromlos zu Strom los! – EcoTrain der Erzgebirgsbahn - Entwicklung einer innovativen Antriebsplattform; Online unter [docplayer.org/14433301-Von-stromlos-zu-strom-los-ecotrain-der-erzgebirgsbahn-entwicklung-einer-innovativen-antriebsplattform.html](http://docplayer.org/14433301-Von-stromlos-zu-strom-los-ecotrain-der-erzgebirgsbahn-entwicklung-einer-innovativen-antriebsplattform.html) (geprüft am 04.07.2018)

CW13

Claus, Sören; Werner, Claus (2013): Entwicklungsvorhaben im Land Sachsen - Ecotrain der Erzgebirgsbahn: Demonstration eines weiterentwickelten Hybridschienenfahrzeuges auf dieselektrischer Basis mit alternativen Speicherkonzepten und innovativem Energiemanagement; Online unter [www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/ecotrain.html](http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/ecotrain.html) (geprüft am 08.01.2016)

DB11

DB Mobility Networks Logistics (2011): Einsatzmerkblatt für Eisenbahnfahrzeuge - Diesel-Triebzug mit Hybridantrieb. Gilt nur Fahrzeugnummer 642 129/629; Online unter [sync.einsatzleiterwiki.de/lib/exe/fetch.php?media=allgemeine\\_hilfe:bahn:vlok:db\\_642\\_x\\_ha\\_11-2011.pdf](http://sync.einsatzleiterwiki.de/lib/exe/fetch.php?media=allgemeine_hilfe:bahn:vlok:db_642_x_ha_11-2011.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

DB13

DB RegioNetz Verkehrs GmbH Westfrankenbahn (2013): MTU und Deutsche Bahn erproben Hybridzug - VT642 Hybrid; Online unter [mtu-online-shop.com/print/3082572\\_MTU\\_Rail\\_CaseStudy\\_HybridPowerpack.pdf](http://mtu-online-shop.com/print/3082572_MTU_Rail_CaseStudy_HybridPowerpack.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

DB14

DB Netz AG (2014): Abbruch von La in EBUla und künftige La-Datenbereitstellung; Online unter [fahrweg.dbnetze.com/service/search/fahrweg-de/1419974?query=Abbruch+von+La+in+EBuLa+und+k%C3%BCnftige+La-Datenbereitstellung](http://fahrweg.dbnetze.com/service/search/fahrweg-de/1419974?query=Abbruch+von+La+in+EBuLa+und+k%C3%BCnftige+La-Datenbereitstellung) (geprüft am 04.07.2018)

DB15

Deutsche Bahn Konzernkommunikation (2015): Zukunft Bahn - Mit zufriedenen Kunden erfolgreich in die Zukunft - Pünktlichkeit und Kundeninformation werden verbessert. Fragen und Antworten zur Pünktlichkeit; Online unter [www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan\\_und\\_buchung/reiseauskunft/puenktlichkeitskommunikation/mdb\\_267782\\_faq\\_puenktlichkeit\\_personenverkehr-stand\\_13\\_2\\_2018.pdf](http://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan_und_buchung/reiseauskunft/puenktlichkeitskommunikation/mdb_267782_faq_puenktlichkeit_personenverkehr-stand_13_2_2018.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

DB16a

DB RegioNetz Verkehrs GmbH Erzgebirgsbahn (2016): Fahrplan Schwarzwassertalbahn - DB KB 5353 - RB 95 - Johanngeorgenstadt - Zwickau; Online unter [www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb\\_233602\\_rb\\_95\\_johanngeorgenstadt\\_-\\_zwickau.pdf](http://www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb_233602_rb_95_johanngeorgenstadt_-_zwickau.pdf) (geprüft am 27.04.2017)

DB16b

Deeg, Peter; Berlitz, Tim (2016): Energieverbrauchszyklus für Schienenfahrzeug-Klimaanlagen. In: VDE und IZBE - Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Hg.): Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 2016. Dresden, 08.-09.12.2016

DB16c

DB RegioNetz Verkehrs GmbH Erzgebirgsbahn (2016): Fahrplan Zschopautalbahn - DB KB 517 - RB 80 - Chemnitz - Cranzahl; Online unter [www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb\\_233596\\_rb\\_80\\_chemnitz\\_-\\_cranzahl.pdf](http://www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb_233596_rb_80_chemnitz_-_cranzahl.pdf) (geprüft am 27.04.2017)

DB16d

DB RegioNetz Verkehrs GmbH Erzgebirgsbahn (2016): Fahrplan Zwönitztalbahn - DB KB 524 - RB 89 - Chemnitz - Aue; Online unter [www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb\\_233600\\_rb\\_89\\_aue\\_-\\_chemnitz.pdf](http://www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/mdb/erzgebirgsbahn/fahrplan/mdb_233600_rb_89_aue_-_chemnitz.pdf) (geprüft am 27.04.2017)

DB17

DB RegioNetz Verkehrs GmbH Westfrankenbahn (2017): Fahrplan Maintalbahnhof - DB KB 781 - Aschaffenburg - Wertheim; Online unter [www.westfrankenbahn.de/westfrankenbahn/view/mdb/westfrankenbahn/fahrplaene/2017/mdb\\_246098\\_2017\\_fahrplan-kbs-781\\_wfb-ab-170403.pdf](http://www.westfrankenbahn.de/westfrankenbahn/view/mdb/westfrankenbahn/fahrplaene/2017/mdb_246098_2017_fahrplan-kbs-781_wfb-ab-170403.pdf) (geprüft am 27.04.2017)

DB18

Deutsche Bahn AG (2018): Klimaschutz - Für einen effektiven Klimaschutz wollen wir unsere Treibhausgase weiter reduzieren. Damit das gelingt, benötigen wir Transparenz darüber, wo die Treibhausgase entstehen. Hier finden Sie alle relevanten Daten zum Thema Energie, CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Äquivalente.; Online unter [www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/umweltvorreiter/datenfakten/klimaschutz-1183660](http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/umweltvorreiter/datenfakten/klimaschutz-1183660) (geprüft am 14.09.2018)

DLG00

Delprat, Sebastien; Lauber, Jimmy; Guerra, Thierry Marie; Rimaux, J. (2000): Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car - Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 7. DOI/ISBN 10.1243/0954407001527583, S. 705–717

Dol17

Doll, Nikolaus (2017): Mit mehr Oberleitungen hätte die Bahn weniger Probleme; Online unter [www.welt.de/wirtschaft/article169474721/Mit-mehr-Oberleitungen-haette-die-Bahn-weniger-Probleme.html](http://www.welt.de/wirtschaft/article169474721/Mit-mehr-Oberleitungen-haette-die-Bahn-weniger-Probleme.html) (geprüft am 14.09.2018)

Ebe14

Eberleh, Björn (2014): LIANA+ - große Li-Ionen-Akkumulatoren für Diesel-Elektro-Hybride in Non-Road-Anwendungen, Teilprojekt AKASOL GmbH - Entwicklung von Batteriemodul und Thermomanagement ; Abschlussbericht im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes ; Laufzeit des Vorhabens 01.05.2012 - 31.12.2013, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Hannover, DOI/ISBN: 10.2314/GBV:835035247

EH16

Eller, Marco; Haag, Stefan (2016): Hybridisierungsmöglichkeiten für Dieselelektrotriebzüge mit mehreren Antriebsanlagen. In: *Ingenieurspiegel* 2, S. 40–43

Ell17

Eller, Marco (2017): Optimierte Betriebsstrategien für Multihybridantriebe

im Schienenpersonennahverkehr. In: VDE VERLAG GMBH (Hg.): ETG-Fachbericht 154: Antriebssysteme 2017, 22. – 23.11.2017 in Karlsruhe, Bd. 154. Karlsruhe. VDE: VDE VERLAG GMBH, S. 40–45

#### eMo14

Ebner, Marco; Metzger, Robert; Treutlein, Verena; Cabello, Felix; Baentsch, Eva (2014): Solaris Trollino 12 mit Batterie. In: *eMove Magazin* 01

#### ES14

Esebeck, Götz von; Staimer, Robert (2014): Erfolge und Ausblick Hybridisierung im MAN Stadtbus - MAN Lion's City Hybrid. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.): Abschlusskonferenz zur Hybridbusförderung aus der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums. Hamburg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

#### EU2007/46/EG

Europäisches Parlament und Rat (05.09.2007): Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge

#### EUR12

Europäische Kommission (2012): Neuer Vorschlag der Kommission zur Verbesserung der Klimabilanz bei der Herstellung von Biokraftstoffen; Online unter [europa.eu/rapid/press-release\\_IP-12-1112\\_de.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-1112_de.htm) (geprüft am 04.07.2018)

Fö194

Föllinger, Otto (1994): Optimale Regelung und Steuerung - Mit 7 Tabellen und 16 Übungsaufgaben mit genauer Darstellung des Lösungsweges 3., verb. Aufl., Oldenbourg; München, Wien (Methoden der Regelungs- und Automatisierungstechnik), DOI/ISBN: 3-486-23116-2

Gei12

Geißler, Andreas (2012): Umweltschonend mobil - Bahn, Auto, Lkw, Flugzeug und Schiff im Umweltvergleich; Online unter [www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/09/umweltschonend-mobil-neuaufgabe-2012.pdf](http://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/09/umweltschonend-mobil-neuaufgabe-2012.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

Ger16

Gerster, Michael (2016): IAA Nutzfahrzeuge: Daimler hat die Stadt im Blick; Online unter [www.automobilwoche.de/article/20160921/NACHRICHTEN/160929980/iaa-nutzfahrzeuge-daimler-hat-die-stadt-im-blick](http://www.automobilwoche.de/article/20160921/NACHRICHTEN/160929980/iaa-nutzfahrzeuge-daimler-hat-die-stadt-im-blick) (geprüft am 04.07.2018)

Gru10

Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus, Johannes von (2010): Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung. Dissertation, betreut durch Wachtmeister, Georg; Höhn, Bernd-Robert und Heißing, Bernd; München  
Technische Universität München - Fakultät für Maschinenwesen

GSG13

Guzzella, Lino; Sciarretta, Antonio; Guzzella, L. (2013): Vehicle propulsion



systems - Introduction to modeling and optimization 3. ed. // 3rd ed., Springer; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, DOI/ISBN: 3-642-35912-4

Haa16

Haag, Stefan (2016): Methodische Auslegung eines Hybridantriebs für Nahverkehrstriebwagen mittels multiphysikalischer Simulationsmodelle. In: VDE und IZBE - Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Hg.): Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 2016. Dresden, 08.-09.12.2016, S. 1–21

HEG17

Haag, Stefan; Eller, Marco; Gratzfeld, Peter (2017): Methodische Auslegung eines Hybridantriebs für Nahverkehrstriebwagen. In: *eb - Elektrische Bahnen* 05, S. 230–237

Her10

Herb, Frieder (2010): Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Dissertation; Ulm  
Universität Ulm - Fakultät für Naturwissenschaften

Heu14

Heuke, Andreas (2014): Der Weg zur Elektromobilität - Erfahrungen, Strategie, Fahrzeuge. In: VDV Akademie (Hg.): Elektrobusse - Markt der Zukunft !? Tagung 2014. Berlin, 17.02.2014. 5 Bände

HMU06

Hopcroft, John E.; Motwani, Rajeev; Ullman, Jeffrey D. (2006): Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie

[Nachdr.] 2., überarb. Aufl., Pearson Studium; München (Informatik),  
DOI/ISBN: 3827370205

HUT15

Helbing, Maximilian; Uebel, Stephan; Tempelhahn, Conny; Bäker, Bernard  
(2015): Bewertender Überblick von Methoden zur Antriebsstrangsteuerung  
in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: *ATZ Elektronik* 10, S. 66–71

JAB16

Jänsch, Eberhard; Asmussen, Bernd; Birn, Kristina; Degen, Karl Georg;  
Feldwisch, Wolfgang; Fengler, Wolfgang et al. (2016): Das System Bahn -  
Handbuch 2. Auflage, Eurailpress; Hamburg, DOI/ISBN: 9783871545115

Joh09

Johannesson, Lars (2009): Predictive control of hybrid electric vehicles on  
prescribed routes. Dissertation, betreut durch Guzzella, Lino; Göteborg  
Chalmers University of Technology - Department of Signals and Systems

JRR13

Janicki, Jürgen; Reinhard, Horst; Rüffer, Michael (2013): Schienenfahrzeug-  
technik 3. Aufl., Bahn-Fachverlag; Berlin (DB-Fachbuch),  
DOI/ISBN: 9783943214079

Kar16

Karle, Anton (2016): Elektromobilität - Grundlagen und Praxis 2. aktuali-  
sierte Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag; München,  
DOI/ISBN: 978-3-446-45099-8

KB11

Kutter, Steffen; Bäker, Bernard (2011): Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen durch prädiktive Bestimmung des Energieäquivalents. In: Torsten Bertram, Burkhard Corves und Klaus Janschek (Hg.): Fachtagung Mechatronik 2011. Dresden (31.03 - 01.04.2011); [Tagungsband]. Fachtagung Mechatronik. <2011, Dresden>. Dresden: Technische Universität Dresden, S. 145–150

KG10

Kusche, Manuela; Geipert, Steffen (2010): Ecotrainbook - Driver assistance system - Application for the UIC Sustainability Awards 2010; Online unter [www.uic-environment.org/2010/IMG/pdf/dbag\\_ecotrainbook\\_ostermayer\\_100430.pdf](http://www.uic-environment.org/2010/IMG/pdf/dbag_ecotrainbook_ostermayer_100430.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

KIT18

KIT - bioliq (2018): Webseite; Online unter [www.bioliq.de/](http://www.bioliq.de/) (geprüft am 04.07.2018)

Klü11

Klügl, Stefan (2011): LEADER – Wirtschaftliches Fahren bei verbesserter Pünktlichkeit; Online unter [docplayer.org/2237887-Leader-wirtschaftliches-fahren-bei-verbesserter-puenktlichkeit-di-stefan-kluegl-klagenfurt-04-05-11-knorr-bremse-group.html](http://docplayer.org/2237887-Leader-wirtschaftliches-fahren-bei-verbesserter-puenktlichkeit-di-stefan-kluegl-klagenfurt-04-05-11-knorr-bremse-group.html) (geprüft am 04.07.2018)

Kno06

Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH (2006): LEADER Driver Assistant; Online unter [www.knorr-bremse.com/media/documents/railvehicles/en/p\\_1220\\_en\\_01\\_leader.pdf](http://www.knorr-bremse.com/media/documents/railvehicles/en/p_1220_en_01_leader.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

Köb16

Köbel, Christian (2016): Die Zukunft der Elektromobilität im ÖPNV. In: VDV Akademie (Hg.): Elektrobusse - Markt der Zukunft !? Tagung 2016. Berlin

Koc16a

Kocholl, Thomas (2016): Einsatzmöglichkeiten von Zweikraftlokomotiven im Schienengüterverkehr. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 5, S. 53–56

Koc16b

Koch, Imke (2016): TRAXX AC3 Last Mile-Lokomotive; Online unter [de.bombardier.com/de/media/newsList/details.bt20160201-bombardier-traxx-ac3-last-mile-locomotive-receives-of.germany.html](http://de.bombardier.com/de/media/newsList/details.bt20160201-bombardier-traxx-ac3-last-mile-locomotive-receives-of.germany.html)? (geprüft am 04.07.2018)

Kre14

Krehl, Detlef (2014): Datenaustausch in voller Fahrt - Predictive Powertrain Control. In: *MTZ* 12

Kut13

Kutter, Steffen (2013): Eine prädiktive und optimierungsbasierte Betriebsstrategie für autarke und extern nachladbare Hybridfahrzeuge. Dissertation, betreut durch Bäker, Bernard; Beitelschmidt, Michael und Löffler, Günter; Dresden  
TU Dresden - Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List"

Leh07

Lehmann, Helmut (2007): Energiesparende Fahrweise bei der Deutschen Bahn. In: *eb - Elektrische Bahnen* 7, S. 397–402

Leh12

Lehmann, Ingo (2012): Ein Hybrid auf Schienen. In: *Mobility 2.0* 4, S. 50–53

Leh13

Lehmann, Ingo (2013): „Demonstration eines Hybrid-Schienenbusses und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit“ - Förderkennzeichen: 03EM0013A; MTU HPP - Abschlussbericht. DOI/ISBN 10.2314/GBV:777643014; Online unter [www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A777643014/Hybridantrieb-auf-Basis-des-MTU-Hybrid-PowerPacks/?tx\\_tibsearch\\_search%5Bsearchspace%5D=tn](http://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A777643014/Hybridantrieb-auf-Basis-des-MTU-Hybrid-PowerPacks/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn) (geprüft am 11.07.2018)

LS06

Lange, Stephan; Schimanski, Michell (2006): Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Dissertation, betreut durch Varchmin, Jörn-Uwe; Bäker, Bernard und Canders, Wolf-Rüdiger; Braunschweig Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig - Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik

Lüb08

Lübke, Dietmar (2008): Das System Bahn - Handbuch 1. Aufl., Eurailpress; Hamburg, DOI/ISBN: 978-3-7771-0374-7

MAK18

MTU Friedrichshafen GmbH; Akasol GmbH; Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik (2018): Gemeinsamer Schlussbericht des Projektes PREDIKT - Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe in Schienenfahrzeugen - im Rahmen des Fachprogramms "Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien" (3. Verkehrsforschungsprogramm "Mobilität und Verkehrstechnologien"); Online unter [www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1032354615/Gemeinsamer-Schlussbericht-des-Projektes-PREDIKT/](http://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1032354615/Gemeinsamer-Schlussbericht-des-Projektes-PREDIKT/) (geprüft am 15.10.2018)

Mal12

Mallikat, Jürgen (2012): Antriebs-Workshop „Schienenverkehr“ - Fachdialog zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie; Online unter [www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/MKS/mks-referentenmaterialien-veranstaltung5-schienenverkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/MKS/mks-referentenmaterialien-veranstaltung5-schienenverkehr.pdf?__blob=publicationFile) (geprüft am 04.07.2018)

MLD97

Müller, Robert; Lange, Andreas; Dietzel, Bernd): Verfahren zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches in einem Antriebssystem für Fahrzeuge und Hybridantriebssystem. Angemeldet durch Voith Turbo GmbH & Co. KG 1997. Veröffentlichungsnr: EP000000878339

MSF09

Mann, Heinz; Schiffelgen, Horst; Froriep, Rainer (2009): Einführung in die Regelungstechnik - Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software 11., neu bearb. Aufl., Hanser; München, DOI/ISBN: 978-3-446-41765-6

#### MST12

Merker, Günter P.; Schwarz, Christian; Teichmann, Rüdiger (2012): Grundlagen Verbrennungsmotoren - Funktionsweise Simulation Messtechnik 5., vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag; Wiesbaden (SpringerLink : Bücher), DOI/ISBN: 10.1007/978-3-8348-8306-3

#### MTU16

MTU Friedrichshafen GmbH Rail (2016): Diesel oder elektrisch? - Mit Hybrid geht beides! Das MTU Hybrid PowerPack; Online unter [www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/images/3\\_applications/2\\_rail/3083042\\_Flyer\\_HybridPowerPack\\_D\\_1\\_18.pdf](http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/images/3_applications/2_rail/3083042_Flyer_HybridPowerPack_D_1_18.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

#### Mül06

Müller-Bonder, Guido (2006): Die RegioTram Kassel - Ein Fahrzeug für die RegioStadtBahn; Online unter [www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag\\_Alstom\\_060202.pdf](http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Alstom_060202.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

#### Nic02

Nick, Manfred (2002): Hybridantrieb mit Nutzung der Bremsenergie bei Dieseltriebwagen. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* C2566, S. 76–87

#### Omn14

Omnibusspiegel (2014): Breiter Strom - Neuigkeiten in Sachen Elektrobusse. In: Omnibusspiegel. Omnibusbau und Omnibusverkehr, 2014-01 (2014-01)

#### ORK15

Oszfolk, Benjamin; Radke, Matthias; Kasch, Matthias; Ibele, Yvonne (2015): Hybridantrieb stellt Marktreife unter Beweis. In: *ETR*, S. 44–48

Pas16

Paschek, Laurin (2016): Auf der Nebenstrecke - Energieeffizienz erleben! - Innovationsprojekt EcoTrain; Online unter [www.energieeffizienz-erleben.de/stories/auf-der-nebenstrecke-innovationsprojekt-ecotrain/](http://www.energieeffizienz-erleben.de/stories/auf-der-nebenstrecke-innovationsprojekt-ecotrain/) (geprüft am 04.07.2018)

PDG02

Paganelli, G.; Delprat, S.; Guerra, T. M.; Rimaux, J.; Santin, J. J. (2002): Equivalent Consumption Minimization Strategy - For Parallel Hybrid Powertrains. Paper. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hg.): Vehicular Technology Conference. May 6-9, 2002, Birmingham-Jefferson Civic Center, Birmingham, Alabama (USA) : IEEE 55th Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2002 : Connecting the mobile world. Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 2076–2081

PK16

Posenau, Christoph; Körner, Sven (2016): Energiesparpotentiale bei Metrofahrzeuge. In: VDE und IZBE - Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Hg.): Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 2016. Dresden, 08.-09.12.2016

Pon62

Pontrjagin, Lev S. (1962): The mathematical theory of optimal processes, Interscience Publ; New York (Interscience publishers)

Rei10

Reif, Konrad (2010): Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe,



Vieweg+Teubner; Wiesbaden (SpringerLink : Bücher),  
DOI/ISBN: 10.1007/978-3-8348-9711-4978-3-8348-9711-4

RiL408.21

DB Netz AG (13.12.2015): Fahrdienstvorschrift

RiL497.0001

DB Netz AG (11.12.2011): Elektronischer Buchfahrplan und La

Rös08

Rösch, Arnd (2008): Was man simulieren kann, das kann man auch optimieren... - Zur mathematischen Optimierung komplexer technologischer Prozesse; Online unter [www.uni-due.de/~bys007/ressourcen/pdf\\_dokumente/33/EU\\_33\\_02.pdf](http://www.uni-due.de/~bys007/ressourcen/pdf_dokumente/33/EU_33_02.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

RPE14

Regett, Anika; Pellingner, Christoph; Eller, Sebastian (2014): Power2Gas – Hype oder Schlüssel zur Energiewende? - Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 10, S. 79–84

Sal13

Salcher, Thomas (2013): Optimierte Betriebsstrategie hybrider Antriebssysteme für den Serieneinsatz. Dissertation, betreut durch Herzog, Hans-Georg; Lohmann, Boris und Jossen, Andreas; München  
Technische Universität München - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Sch12

Schimke, Robert (2012): Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselektrischen Lokomotiven. Dissertation, betreut durch Beitelschmidt, Michael; Gratzfeld, Peter und Fricke, Hartmut; Dresden Technische Universität Dresden - Professur für Fahrzeugmodellierung und – Simulation

Sie00

Siemens AG (2000): Dieselmehchanischer Triebzug DESIRO VT 642 für die Deutsche Bahn AG; Online unter [www.hoellennetz.de/download/141D6180\\_d.pdf](http://www.hoellennetz.de/download/141D6180_d.pdf) (geprüft am 04.07.2018)

Sol14

Solaris (2014): Solaris Urbino 18,75 mit Brennstoffzelle. In: *Solaris Kundenmagazin* 01, S. 20–22

SSM16

Schmiedler, Stefan; Strenkert, Jochen; Maisch, Matthias; Nietfeld, Franz; Schildhauer, Christoph; Indlekofer, Günther et al. (2016): Der neue Plug-In Hybridantrieb - Daimler E-Klasse. In: *ATZ Extra* Mai, S. 132–135

Tau10

Tauchnitz, Nico (2010): Das Pontrjaginsche Maximumprinzip für eine Klasse hybrider Steuerungsprobleme mit Zustandsbeschränkung und seine Anwendung. Dissertation, betreut durch Pickenhain, Sabine; Alt, Walter und Veliov, Vladimir; Cottbus Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik

### TÜV18

TÜV Rheinland Consulting (2018): PREDIKT - Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe - Projektträger Mobilität und Verkehrstechnologien des BMWi; Online unter [www.tuvpt.de/index.php?id=foerderung0001000000113](http://www.tuvpt.de/index.php?id=foerderung0001000000113) (geprüft am 04.07.2018)

### UBA15

UBA - Umweltbundesamt (2015): Energieverbrauch nach Verkehrsträgern; Online unter [www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/energieverbrauch-nach-verkehrstraegern](http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/energieverbrauch-nach-verkehrstraegern) (geprüft am 23.11.2016)

### UBA17

UBA - Umweltbundesamt (2017): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland; Online unter [www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland](http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland) (geprüft am 04.07.2018)

### UBA18

UBA - Umweltbundesamt (2018): Kraftstoffverbrauch nach Energieträgern; Online unter [www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs](http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs) (geprüft am 04.07.2018)

### UTL14

Uebel, Stephan; Tempelhahn, Conny; Liebers, Mike; Kutter, Steffen; Bäker, Bernard (2014): Anwendung der Variationsrechnung für Steuerungsaufgaben im Kraftfahrzeug. In: *at – Automatisierungstechnik* 4. DOI/ISBN 10.1515/auto-2013-1055

Voll4

Volvo Buses (2014): Volvo 7900 Electric Hybrid - Euro-6-Ausführung, schnellladefähiger Elektro-Hybridbus. In: Elektro-Hybridbus in Hamburg vorgestellt. Unter Mitarbeit von Christoph Kreienbaum. Hamburger Hochbahn AG

VRN17

Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH (2017): Fahrplan Pfälzische Maximiliansbahn - DB KB676 - R51, R53, RE6 - Karlsruhe - Neustadt; Online unter [www.vrn.de/mng/](http://www.vrn.de/mng/) (geprüft am 27.04.2017)

VW11

Vossen, Gottfried; Witt, Kurt-Ulrich (2011): Grundkurs theoretische Informatik - Eine anwendungsbezogene Einführung - für Studierende in allen Informatik-Studiengängen 5., durchges. Aufl., Vieweg + Teubner; Wiesbaden (Studium), DOI/ISBN: 978-3-8348-1537-8

Wen03

Wende, Dietrich (2003): Fahrdynamik des Schienenverkehrs - Mit 83 Tabellen und 83 Berechnungsbeispielen 1. Aufl., Teubner; Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, DOI/ISBN: 3-519-00419-4

Wer14

Werner, Claus (2014): Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit im SPNV - Entwicklung einer innovativen Hybridantriebsplattform EcoTrain der Erzgebirgsbahn; Online unter [www.elektromobilitaet-verbundet.de/download/09\\_Leibiger.pdf](http://www.elektromobilitaet-verbundet.de/download/09_Leibiger.pdf) (geprüft am 19.01.2016)

YTF13

Yuan, Zou; Teng, Liu; Fengchun, Sun; Peng, Hwei (2013): Comparative Study of Dynamic Programming and Pontryagin's Minimum Principle on Energy Management for a Parallel Hybrid Electric Vehicle. Paper; Beijing Beijing Institute of Technology - Beijing Institute of Technology - School of Mechanical Engineering - Department of Vehicular Engineering - National Engineering Lab for Electric Vehicles

ZF18

ZF Friedrichshafen AG - Industrietechnik, Marine und Sonder-Antriebstechnik (2018): Automatgetriebe ZF-Ecolife Rail; Online unter [www.zf.com/corporate/de\\_de/products/further\\_product\\_ranges/rail\\_vehicles/rail\\_driveline\\_ecolife\\_rail.shtml](http://www.zf.com/corporate/de_de/products/further_product_ranges/rail_vehicles/rail_driveline_ecolife_rail.shtml) (geprüft am 04.07.2018)