

Stefan Haag

Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten

Stefan Haag

**Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten
Validierung hybrider Antriebssysteme mit
gekoppelten Antriebseinheiten**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 58**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

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

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

Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten

von
Stefan Haag

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2017
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Impressum



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

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

www.ksp.kit.edu



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



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

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-0752-9
DOI 10.5445/KSP/1000078697

Vorwort

Die Bahn hat den Ruf eines umweltfreundlichen Verkehrsmittels. Um diesen zu erhalten werden auch Alternativen für nicht elektrifizierte Nebenstrecken benötigt.

Eine umweltfreundliche Alternative für nicht elektrifizierte Strecken im Personennahverkehr stellen Triebwagen mit Hybridantrieb dar. Durch die Kombination von Verbrennungsmotor, elektrischem Antrieb und elektrischen Speicher ergeben sich große Potentiale zur Kraftstoffeinsparung und somit zur Reduktion von Emissionen.

Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit anderen alternativen Antrieben, wie beispielsweise Akkumulatortriebwagen oder Fahrzeugen mit Brennstoffzellen als Energiewandler ist es bei Diesel-Hybrid-Antrieben möglich, vorhandene Infrastruktur wie beispielsweise Tankstellen weiterzuverwenden. Dadurch wird der Übergang zu neuen Antriebstechnologien für Betreiber von Schienenfahrzeugen erleichtert.

Bei der Auslegung von Hybridantrieben ist eine Anpassung auf den späteren Anwendungsfall entscheidend. Der Verbrennungsmotor kann mit geringerer Leistung ausgeführt werden, elektrische Maschinen und Batterien bieten eine kurzzeitige Überlastfähigkeit. Die Aufteilung des angeforderten Moments auf die einzelnen Traktionsantriebe im Fahrzeug kann auf verschiedene Arten erfolgen. Zusätzlich haben das Verhalten des Fahrers und weitere Umweltbedingungen wie das Wetter einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und beeinflussen somit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Auslegung eines hybriden Antriebssystems erfolgt daher zweckmäßigerweise unter den reproduzierbaren Bedingungen in einer Simulation. Anschließend müssen die Simulationsergebnisse für den ausgewählten Antrieb auf dem Prüfstand validiert werden. Durch die größere Komplexität im Vergleich mit konventionellen Antriebssystemen steigen auch die Anforderungen an den Prüfstand. So müssen Bremsbetrieb und das Zusammenspiel von Teilsystemen vollständig berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, die diese Validierung auf vorhandenen Prüfständen ermöglicht, auch wenn das Antriebssystem nicht komplett auf dem Prüfstand aufgebaut werden kann. Das ist beispielsweise der Fall, wenn nur eine Belastungseinheit vorhanden ist. Das Antriebssystem wird hierzu in zwei Teilsysteme aufgeteilt, welche nacheinander auf dem Prüfstand vermessen werden. Der nicht auf dem Prüfstand vorhandene Teil wird in der Simulation beziehungsweise durch Messdaten nachgebildet.

In der anschließenden Datenfusion beider Prüfstandsläufe werden die Ergebnisse zusammengeführt. Damit wird die Validierung abgeschlossen.

Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten

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

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Stefan Haag

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2017
Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Kurzfassung

Diesel-hybride Antriebssysteme für Triebwagen können den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen auf nicht elektrifizierten Strecken gegenüber konventionellen Dieseltriebwagen deutlich reduzieren und so einen Beitrag zum Umweltschutz leisten. Die Auslegung solcher Antriebssysteme für Fahrzeuge mit mehreren interagierenden Antriebsanlagen bietet eine hohe Zahl an Freiheitsgraden und erfordert daher den Einsatz simulativer und experimenteller Methoden.

Diese Arbeit zeigt die Auslegung des Antriebssystems eines beispielhaften Fahrzeugs in der Simulation und die anschließende Validierung am Prüfstand. Die Auslegung erfolgt mit Hilfe von Simulationsmodellen in der Modellierungssprache Modelica.

Für die Validierung wird eine Vorgehensweise entwickelt, die es erlaubt die einzelnen Antriebseinheiten in mehreren Versuchen nacheinander auf dem Prüfstand zu validieren und anschließend die Messdaten zu einem gemeinsamen Messergebnis zusammenzufügen. Dazu wird die Versuchsdurchführung in zwei Durchläufe aufgeteilt. Im ersten Durchlauf wird ein Antriebssystem auf dem Prüfstand vermessen, das zweite wird simuliert. Im zweiten Durchlauf wird das zweite Antriebssystem auf dem Prüfstand vermessen, das andere mit den Messdaten aus dem ersten Durchlauf nachgebildet. Anschließend werden die Messdaten aus beiden Durchläufen zusammengeführt.

Durch die vorgestellte Vorgehensweise ist es möglich, das Verhalten komplexerer Antriebssysteme zu validieren, wenn es die Kapazitäten am Prüfstand es nicht zulassen, das komplette Antriebssystem in Betrieb zu nehmen.

Abstract

Diesel-hybrid propulsion systems for railcars are able to reduce fuel consumption and emissions in relation to conventional diesel railcars on non-electrified lines. Thus they can make a contribution to environmental protection. To design such a propulsion system for railcars with several interacting powertrains and many degrees of freedom requires the use of simulation and experimental methods.

The present paper shows the design process on an exemplary vehicle in simulation and the validation of the system in a test rig. The design process is supported by simulation models in the modeling language Modelica.

A validation procedure is developed, that enables to test the propulsion system in several smaller tests with single powertrains and to merge the measurements afterwards. Therefore, the test is divided into two passes. In the first pass, one powertrain is in the test rig and the second one is simulated. In the second pass, the other powertrain is in the test rig and the first tested one is emulated with the measurements from the first pass. Then the measured data from both passes are merged.

The proposed procedure allows to validate the behavior of complex propulsion systems, in case it is not possible to test the complete system at once, because of a limited test rig capacity.

Danksagung

Diese Arbeit ist am Teilinstitut Bahnsystemtechnik des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden. Für die kompetente wissenschaftliche Betreuung und die Übernahme des Hauptreferats möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld herzlich bedanken. In meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am Institut konnte ich viele neue Kenntnisse und Erfahrungen sammeln. Herrn Professor Dr.-Ing. Sven Matthiesen vom Institut für Produktentwicklung danke ich für die Übernahme des Korreferats und das eingebrachte Wissen zur Validierungsmethoden. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Robert Stieglitz vom Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik bedanken.

Bei meinen Kollegen am Institut für Fahrzeugsystemtechnik möchte ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die vielen wissenschaftlichen (und auch nicht ganz so wissenschaftlichen) Gespräche bedanken. Besonderer Dank gilt Christian Pohlandt für die gemeinsame Arbeit beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Antriebssystemprüfstands, meinem Bürokollegen Stefan Hartmann für die vielen kurzen und auch längeren Diskussionen, Markus Springmann und Rinaldo Arnold für ihre Unterstützung in elektrotechnischen Fragestellungen beim Prüfstandsbau, Franz Jost und Philip Otto für das gewissenhafte Korrekturlesen von Vortragsfolien und Ausarbeitung. Ivana Kramer möchte ich ganz herzlich für die gewissenhafte Erledigung aller formalen Dinge, Abrechnungen und Bestellungen und ihren persönlichen Einsatz für alle Mitarbeiter am Institut danken.

Meinem HiWi Jannis Daubner und den Abschlussarbeitern Birgit Jickeli und Marco Stumm gilt der Dank für die Unterstützung bei den Arbeiten zur Versuchsdurchführung am Prüfstand. Ohne euch lief die Kommunikation am Prüfstand noch heute über analoge Schnittstellen. Ebenso gilt der Dank allen Abschlussarbeitern und Hiwis, die am Aufbau und der Validierung der Modellbibliothek im Projekt mitgearbeitet haben.

Den Projektpartnern von MTU Friedrichshafen und AKASOL im Projekt PREDIKT möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die Möglichkeit, an den Messfahrten teilzunehmen, unsere Ideen frei zu entwickeln und in Friedrichshafen auf dem Prüfstand zu erproben danken.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern für ihre Unterstützung in der Zeit des Studiums und der Promotion.

Karlsruhe, im Dezember 2017

Stefan Haag

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Vorgehen	2
2	Grundlagen	5
2.1	Hybridantriebe für Schienenfahrzeuge	5
2.1.1	Topologien hybrider Antriebsstränge	7
2.1.2	Realisierte Fahrzeuge	10
2.1.3	Aktuelle Forschungsprojekte	19
2.2	Grundlagen der Simulation	22
2.2.1	Signalfussorientierte Simulation	22
2.2.2	Objektorientierte Simulation	23
2.2.3	Echtzeit-Simulation physikalischer Systeme	25
2.3	Methoden zur Auslegung und Validierung	29
2.3.1	Verifizierung und Validierung	30
2.3.2	Software-in-the-Loop	31
2.3.3	Hardware-in-the-Loop	31
2.3.4	Vorgehensmodell nach VDI 2206	32
2.3.5	X-in-the-Loop	36
2.4	Beispielsystem	38
2.4.1	Beispielhaftes Fahrzeug	39
2.4.2	Beispielhafte Strecke	40

- 3 Dimensionierung und simulative Auslegung 43**
 - 3.1 Vorauslegung 43
 - 3.1.1 Antriebsstrangtopologie 44
 - 3.1.2 Überschlägige Auslegung der Traktionsantriebe . . . 52
 - 3.1.3 Auslegung des Speichers 53
 - 3.2 Entwurf der Hybridsteuerung 53
 - 3.3 Simulationsmodell 56
 - 3.3.1 Komponentenmodelle 56
 - 3.3.2 Fahrzeugmodell 62
 - 3.4 Simulative Auslegung 63
 - 3.4.1 Variation der Komponenten 63
 - 3.4.2 Komponentenauswahl 66

- 4 Sequentieller Versuch 73**
 - 4.1 Validierungskonzept 74
 - 4.2 Erster Durchlauf 77
 - 4.2.1 Auswahl der Antriebseinheit für den Prüfstand . . . 78
 - 4.2.2 Systemgrenzen und Schnittstellen im ersten Durchlauf 79
 - 4.2.3 Aufteilung von Schnittstellen mit Fluss- und Potentialgrößen 80
 - 4.3 Zweiter Durchlauf 81
 - 4.3.1 Systemgrenzen und Schnittstellen im zweiten Durchlauf 82
 - 4.3.2 Vorgabe- und Regelgröße 83
 - 4.3.3 Leistungsvorgabe in der Simulation 87
 - 4.4 Versuchsdurchführung 88
 - 4.4.1 Simulative Erprobung 89
 - 4.4.2 Antriebssystemprüfstand 96
 - 4.4.3 Versuche auf dem Prüfstand 101

5	Auswertung	107
5.1	Betrachtung der Messabweichung	107
5.1.1	Drehzahlmessung	107
5.1.2	Drehmomentmessung	108
5.1.3	Elektrische Leistungsmessung	109
5.2	Bewertung der Ergebnisse des sequentiellen Versuchs	109
5.3	Datenfusion	114
5.3.1	Interpolation	115
5.3.2	Zuordnung	116
5.3.3	Mittelwertbildung	117
5.4	Größen zur Bewertung des Antriebssystems	118
6	Zusammenfassung	123
7	Ausblick	127
A	Anhang	131
A.1	Auslegung des Traktionsantriebs	131
A.2	Berechnung der Messabweichung der Leistungsmessung	136

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen

<i>A</i>	Fläche	m ²
<i>a</i>	Beschleunigung	m/s ²
<i>C</i>	Kapazität	Ws
<i>D</i>	Durchmesser	m
<i>E</i>	Energie	J
<i>e</i>	Eingangswert Regler	m
<i>F</i>	Flussgröße	–
<i>F</i>	Kraft	N
<i>h</i>	Schrittweite	s
<i>I</i>	Strom	A
<i>i</i>	Übersetzungsverhältnis	–
<i>M</i>	Moment	Nm
<i>m</i>	Masse	kg
<i>n</i>	Drehzahl	1/min
<i>P</i>	Leistung	W
<i>P</i>	Potentialgröße	–
<i>S</i>	Steigung	–
<i>s</i>	Weg	m
<i>U</i>	Spannung	V
<i>U</i>	Umfang	m
<i>c_r</i>	Rollwiderstandsbeiwert	–
<i>c_w</i>	Luftwiderstandsbeiwert	–
<i>i</i>	Zählvariable	–

j	Zählvariable	–
m	Zählvariable	–
n	Zählvariable	–
R	Fahrwiderstand	N
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m/s
α	Fahrhebelstellung	–
Δ	Differenz	–
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ	rotatorischer Massenzuschlag	–

Indizes

a	Beschleunigung
A_{in}	Analogeingang
A_{out}	Analogausgang
B	Bogen
$Clamp$	Messaufnehmer
el	Elektrisch
ges	gesamt
ist	Istwert
kin	Kinetisch
L	Lauf
l	Luft
max	Maximalwert
$mech$	Mechanisch
min	Minimalwert
R	Reibung
S	Steigung
$soll$	Sollwert

<i>Welle</i>	An der Welle gemessen
<i>Z</i>	Zugkraftüberschuss

Konstanten

π	Kreiszahl	–
g	Erdbeschleunigung	m/s ²

Abkürzungen

1-D	Eindimensional
A/D	Analog-Digital Wandler
AC	Wechselspannung
ASM	Asynchronmaschine
ASP	Antriebssystemprüfstand
BAT	Batterie
BR	Baureihe
C	Programmiersprache C
C&C Modell	Contact and Channel Model
CAN	Contoller Area Network
DAE	Differential-algebraisches Gleichungssystem
DC	Gleichspannung
EM	Elektrische Maschine
EPR	Equivalent Parallel Resistance
ESR	Equivalent Series Resistance
FAST	Institut für Fahrzeugsystemtechnik
Fraunhofer IVI	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
GPS	Global Positioning System
HiL	Hardware in the Loop
HSM	Hybriderregte Synchronmaschine
IPEK	Institut für Produktentwicklung
JR East	East Japan Railway Company
JR Hokkaido	Hokkaido Railway Company

JRF	Japan Freight Railway Company
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LMG	Leistungsmessgerät
M	Motor
MiL	Model in the Loop
NE-Train	New Energy Train
PHiL	Power Hardware in the Loop
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PSU	Power Supply Unit
RFM	Restfahrzeugmodell
SiL	Software in the Loop
SOC	State of Charge, Ladezustand des Speichers
TU	Technische Universität
UUT	Unit under Test
V-Modell	Vorgehens-Modell
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WüK	Wandler-Überbrückungskupplung
XiL	X in the Loop

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Bahn gilt sowohl bei der Elektromobilität als auch bei der Klimafreundlichkeit und Energieeffizienz als Vorreiter unter den Verkehrssystemen. Um dieser Rolle auch auf nicht elektrifizierten Nebenstrecken gerecht zu werden, gibt es für die Neubeschaffung oder Modernisierung von Fahrzeugen verschiedene Konzepte. Eine der vielversprechendsten und in diversen Prototypen und Serienfahrzeugen erprobte Technologie ist der Einsatz von Hybridantrieben.

Durch für den geplanten Einsatz passend ausgelegte Hybridantriebe lassen sich deutliche Einsparungen von Kraftstoff und daraus folgend auch eine Reduktion der Emissionen erreichen. Die Kapazität des Speichers wird in der Regel aus technischer Sicht durch Bauraum und zulässige Achslast und aus wirtschaftlicher Sicht durch Anschaffungskosten und Lebensdauer beschränkt.

Bei Triebwagen mit in der Regel zwei oder mehr getrennten Antriebs-einheiten ergeben sich viele weitere Freiheitsgrade bei der Systemauslegung, daher bietet sich die Verwendung simulationsgestützter Verfahren mit einer anschließenden Validierung der Ergebnisse auf dem Prüfstand an. Grundlage der Simulation sind validierte (oder, falls reale Komponenten noch nicht vorhanden sind) verifizierte Simulationsmodelle. In der Simulation kann eine große Anzahl an Varianten untersucht werden, die Eigenschaften der ausgewählten Variante können abschließend auf dem Prüfstand validiert werden. Die Prüfstandskapazitäten zum Test kompletter Hybrid-

Antriebssysteme in der erforderlichen Leistungsklasse sind in der Regel begrenzt, sowohl aus zeitlicher als auch aus räumlicher Sicht. Da Komponenten teilweise nur als Prototypen vorhanden sind, sind diese sehr teuer und es erscheint nicht wirtschaftlich, mehrere Antriebsanlagen für die Prüfstandsversuche aufzubauen. Zur Verringerung der benötigten Prüfstandskapazitäten und der Zahl der benötigten Prüflinge soll hier ein praxistaugliches Verfahren vorgestellt werden, das es erlaubt, die Versuche für die einzelnen Antriebe nacheinander zu fahren und anschließend die Messdaten zu fusionieren.

1.2 Vorgehen

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Validierung eines hybriden Antriebssystems mit mehreren Antriebsanlagen vorgeschlagen und am Beispiel der Auslegung des Antriebsstranges eines leichten Nahverkehrstriebwagens deren Anwendung gezeigt. Ein hybrides Antriebssystem kann als ein mechatronisches System angesehen werden. Es besteht sowohl aus den mechanischen und elektrischen Antriebsstrangkomponenten als auch aus einer Steuerung und Regelung. Die Steuerung und Regelung hat einen sehr großen Einfluss auf die erreichbaren Kraftstoffeinsparungen. Die prinzipielle Auslegung erfolgt daher in Anlehnung an das V-Modell nach VDI 2206, einer Auslegungsmethodik für mechatronische Systeme.

Hierzu wird im Kapitel 2 die Anwendung von hybriden Antriebssystemen mit dem Fokus auf Schienenfahrzeuge beschrieben. Die verwendeten Grundlagen zur Simulation und der methodischen Entwicklung von Antriebssystemen werden aufgezeigt. Abschließend wird das Beispielsystem definiert, anhand dessen der folgende Prozess durchgeführt wird.

In Kapitel 3 erfolgt dann die grundlegende Auslegung des hybriden Antriebssystems mit einer geeigneten Ansteuerung und dessen Verifikation in der Simulation. Dazu wird eine Bibliothek mit Simulationsmodellen erstellt.

Das Gesamtsystem Antriebsstrang wird anschließend in Kapitel 4 in mehreren Schritten mittels eines sequentiellen Versuchs validiert. Dabei werden sowohl Model-in-the-Loop als auch Hardware-in-the-Loop Versuche eingesetzt. Die in den Versuchsdurchläufen gewonnenen Messdaten werden in Kapitel 5 fusioniert und das Versuchsergebnis diskutiert und bewertet.

Abschließend wird in Kapitel 7 die weitergehende Anwendbarkeit des vorgestellten Verfahrens auf andere Systeme aufgezeigt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für Schienenfahrzeuge mit Hybridantrieb, Auslegungsmethodiken und Simulation vermittelt. Das in dieser Arbeit betrachtete Beispielsystem, bestehend aus Fahrzeug, Strecke und Randbedingungen wie dem Fahrplan, wird eingeführt.

2.1 Hybridantriebe für Schienenfahrzeuge

Der Abschnitt „Hybridantriebe für Schienenfahrzeuge“ gibt von realisierten Fahrzeugen im regulären Betrieb bis hin zu aktuellen Forschungsprojekten einen Überblick über die Vielfalt von in Schienenfahrzeugen eingesetzten Hybridantrieben, ohne jedoch einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Insbesondere auf ältere Entwicklungen mit Blei-Akkumulatoren wird nicht weiter eingegangen.

Zur Abgrenzung von Hybridantrieben in Schienenfahrzeugen von konventionellen und anderen innovativen Antrieben ist der Begriff Hybridantrieb genauer zu definieren. Für den Kraftfahrzeugbereich definiert die Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates ein Hybridkraftfahrzeug als

„ein Fahrzeug mit mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei verschiedenen Energiespeichern (im Fahrzeug) zum Zwecke des Fahrentriebs“ [5].

Eine identische Definition liefert die UN in [60]. Ein Hybridelektrofahrzeug wird darauf aufbauend durch eine genauere Definition der beiden Speicher definiert als

„ein Hybridfahrzeug, das zum Zwecke des mechanischen Antriebs aus folgenden Quellen im Fahrzeug gespeicherte Energie/Leistung bezieht:

- einem Betriebskraftstoff;
- einer Speichereinrichtung für elektrische Energie / Leistung (z.B. Batterie, Kondensator, Schwungrad/Generator usw.);“ [5].

Da keine spezifische Definition für Hybridantriebe für Schienenfahrzeuge existiert, werden die für den Kraftfahrzeugbereich gegebenen Definitionen in dieser Arbeit analog auf Schienenfahrzeuge angewendet. Der Begriff „verschieden“ bei den Energiespeichern wird im Bezug auf die physikalische Form der Energiespeicherung ausgelegt. Beispielsweise chemische, elektrische, hydraulische, mechanische Speicherung der Energie. Die Speicherung von Energie in Form von kinetischer und potentieller Energie durch das Fahrzeug an sich wird nicht als Speicher im Sinne der Definition betrachtet.

Schienenfahrzeuge, insbesondere in Triebwagen mit verteilten Antrieben, verfügen in der Regel über mehrere Antriebseinheiten. Als Antriebseinheiten werden in diesem Zusammenhang Teilsysteme des Antriebs definiert, die räumlich getrennt voneinander in einem Fahrzeug oder mehreren von einem gemeinsamen Führerstand bedienten Fahrzeugen angeordnet sind. Jede Antriebseinheit verfügt über mindestens einen Energiewandler. Der dazugehörige Speicher kann von mehreren Antriebseinheiten genutzt werden.

Durch die Verwendung von mehreren Antriebseinheiten ergeben sich weitere Freiheitsgrade für einen Hybridantrieb entsprechend der gegebenen Definition. Fasst man den Antrieb als System aus Antriebseinheiten auf, kann die Forderung nach zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei verschiedenen Energiespeichern auch dadurch erfüllt werden, dass zwei Antriebseinheiten mit jeweils nur einem Speicher und Energiewandler vorhanden sind, die aber auf verschiedenen Domänen basieren.

Unter einer Koppelung von Antriebseinheiten wird die informationstechnische bzw. logische Koppelung für die Steuerung und Regelung ebenso verstanden wie eine elektrische bzw. mechanische Koppelung zum Energieaustausch zwischen den Antriebseinheiten.

2.1.1 Topologien hybrider Antriebsstränge

Bei hybriden Antriebssträngen werden die drei grundlegenden Topologien serieller, paralleler und leistungsverzweigter Hybride unterschieden, die im Folgenden vorgestellt werden. Zur Vereinfachung werden die Antriebsstränge als hybrid-elektrische Antriebe beschrieben, das Prinzip lässt sich jedoch auch auf andere Kombinationen von Energiespeichern und -wandlern übertragen.

Serieller Hybrid

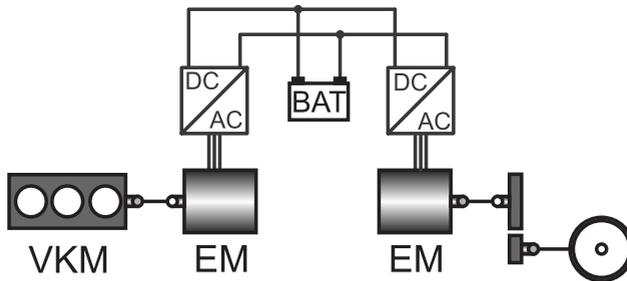


Abbildung 2.1: Schema eines seriellen Hybrid-Antriebsstrangs

Bei einem seriellen hybriden Antriebsstrang gibt es keinen direkten mechanischen Durchtrieb zwischen Verbrennungsmotor und elektrischem Fahrmotor. Der Verbrennungsmotor treibt einen Generator an, aus dem ein elektrischer Speicher und ein elektrischer Fahrmotor versorgt werden. Bei dieser Anordnung muss also die gesamte vom Verbrennungsmotor abgegebene mechanische Leistung in elektrische Leistung und wieder in mecha-

nische Leistung gewandelt werden. Eine solche Topologie lässt sich sehr einfach aus einem klassischen dieselektrischen Schienenfahrzeug ableiten, es muss lediglich ein Speicher hinzugefügt werden. Der Nachteil der für die volle Traktionsleistung zu dimensionierenden elektrischen Komponenten wird durch eine freiere Platzierung der Komponenten ausgeglichen, da auf Gelenkwellen und Schaltgetriebe vollständig verzichtet werden kann. In einem seriell-hybriden Antriebsstrang wird die gesamte Leistung durch alle Komponenten nacheinander übertragen. In Abbildung 2.1 ist ein beispielhafter serieller Hybrid-Antriebsstrang dargestellt.

Parallelhybrid

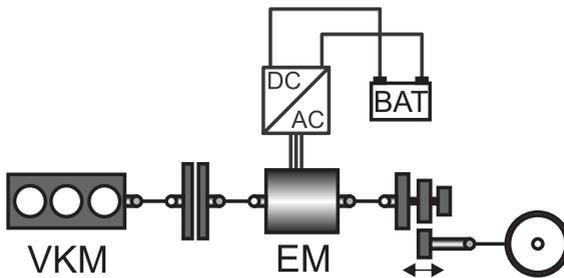


Abbildung 2.2: Schema eines parallelen Hybrid-Antriebsstrangs

Bei parallelen hybriden Antriebssträngen, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, wird eine elektrische Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe eingebracht. Im generatorischen Betrieb kann mit ihr Leistung aus dem mechanischen Antriebsstrang in den Speicher fließen, im motorischen Betrieb vom Speicher in den mechanischen Antriebsstrang. Es wird im Gegensatz zum seriellen Hybrid nur eine elektrische Maschine benötigt, die zudem je nach Anwendungsfall kleiner dimensioniert werden kann, da nicht die volle Antriebsleistung durch die elektrische Maschine erbracht werden muss. Bei einem Parallelhybrid ist keine Entkoppelung der Verbrennungsmotordreh-

zahl von der Raddrehzahl möglich, und im Regelfall kann auch nicht auf das Schaltgetriebe verzichtet werden.

Durch die geringere Anzahl an Leistungswandlungen im direkten Durchtrieb vom Verbrennungsmotor zum Rad sind je nach Betriebspunkt höhere Wirkungsgrade als bei einem seriellen Hybrid möglich. In einem parallelhybriden Antriebsstrang kann der Leistungsfluss von Verbrennungsmotor und E-Maschine gleichzeitig zum Rad geführt werden.

Leistungsverzweigter Hybrid

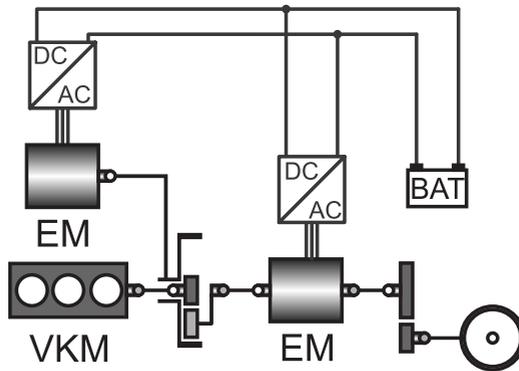


Abbildung 2.3: Schema eines leistungsverzweigten Hybrid-Antriebsstrangs

Unter dem Begriff leistungsverzweigter Hybrid werden Mischstrukturen von hybriden Antriebssträngen zusammengefasst, die sowohl über parallele als auch über serielle Leistungspfade verfügen. Dadurch lassen sich je nach Anwendungsfall die Vorteile beider Konzepte vereinen. Durch eine größere Anzahl an Komponenten ergibt sich jedoch im Allgemeinen eine höhere Komplexität des Antriebsstrangs. In Abbildung 2.3 ist ein beispielhafter leistungsverzweigter Hybrid-Antriebsstrang dargestellt. Die Leistungsverzweigung wird hier durch ein Planetengetriebe hergestellt, bei dem der Verbrennungsmotor das Sonnenrad antreibt. Der Abtrieb folgt über den Pla-

netenträger über eine elektrische Maschine und ein Getriebe zum Rad. Eine zweite elektrische Maschine greift am Hohlrad an. Das Getriebe kann in diesem Fall sogar ohne Anfahrkupplung und ohne schaltbare Gänge ausgeführt werden, diese Funktionen lassen sich über das Zusammenspiel der drei Motoren und des Planetengetriebes realisieren.

2.1.2 Realisierte Fahrzeuge

Im folgenden werden nur Fahrzeuge betrachtet, deren Primärenergiequelle ein Verbrennungsmotor ist und die zusätzlich über einen elektrischen Speicher verfügen. Nicht betrachtet werden Zweikraftloks, elektrische Fahrzeuge mit Speicher für nicht elektrifizierte Abschnitte oder Motor-Generator-Einheiten für kurze Strecken mit verringerter Leistung, Mehrmotorenlokomotiven ohne Speicher und Fahrzeuge mit Antrieben, die nicht der Definition des Hybridantriebs entsprechen.

Lokomotiven

Im Bereich von Rangierlokomotiven gibt es weltweit eine große Anzahl an Projekten, die in der Regel auf dem Umbau gebrauchter Fahrzeuge auf einen Hybridantriebsstrang basieren. Viele der Fahrzeuge standen oder stehen im regulären Einsatz. Einen Überblick liefert [28]. Im Folgenden werden nur aktuelle Entwicklungen beispielhaft vorgestellt.

Alstom: Seit 2008 baut Alstom im Werk Stendal Dieselloks der Baureihe 202 (V100 Ost) auf hybride Antriebsstränge um. Dabei wird das hydrodynamische Getriebe durch ein Stirnradgetriebe mit zwei Asynchronmaschinen mit je 213kW Nennleistung ersetzt, der Antrieb auf die Drehgestelle erfolgt weiterhin über Gelenkwellen und Radsatzgetriebe. Zur elektrischen Energieversorgung erhalten die Fahrzeuge eine Motor-Generator-Einheit mit einem 238kW Dieselmotor und einem permanentmagneterregten 200kW Synchrongenerator und eine Nickel-Cadmium Batterie mit einem Energie-

inhalt von 102kWh. Der Generator ist über einen passiven Gleichrichter mit der Batterie verbunden, die Spannungsanpassung erfolgt über eine Drehzahlanpassung des Verbrennungsmotors. Die Generatoreinheit wird abhängig vom Batterie-Ladezustand ein- und ausgeschaltet. Eine Möglichkeit zur Rekuperation ist nicht vorgesehen, um keine Änderung am Bremssystem vornehmen zu müssen. Die Topologie des Antriebssystems ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

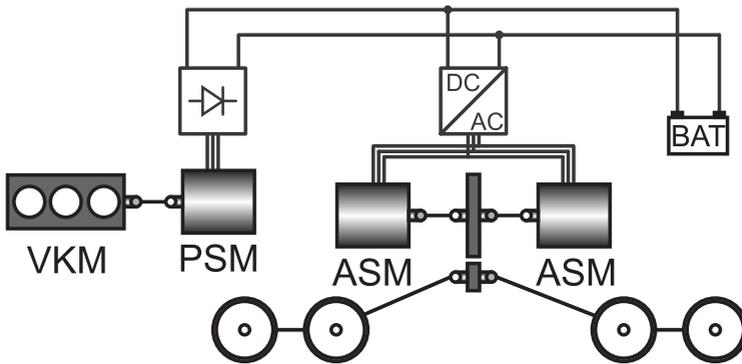


Abbildung 2.4: Antriebsstrang der Alstom Hybridlokomotiven

Mit den Fahrzeugen konnte beim Vershub von Personenwagen im Bahnhof Nürnberg mit relativ hohen Stillstandszeiten durch Downsizing des Verbrennungsmotors eine Kraftstoffeinsparung von 60% und bei Rangierfahrten mit Güterwagen in Regensburg eine Kraftstoffeinsparung von 35% gegenüber einer konventionellen Rangierlokomotive erreicht werden [43].

Mit den Erkenntnissen aus den Umbauten der BR 202 wurde eine Hybrid-Version für die Rangierlok-Plattform H3 entwickelt. Dabei handelt es sich um eine dreiachsige Lokomotive mit Antrieb durch drei Fahrmotoren auf jeweils eine Achse. Die Motoren sind, wie in Abbildung 2.5 gezeigt, ratsatznah in Fahrtrichtung längs angeordnet und über ein zweistufiges Kegelradgetriebe mit der Radsatzwelle verbunden [22].

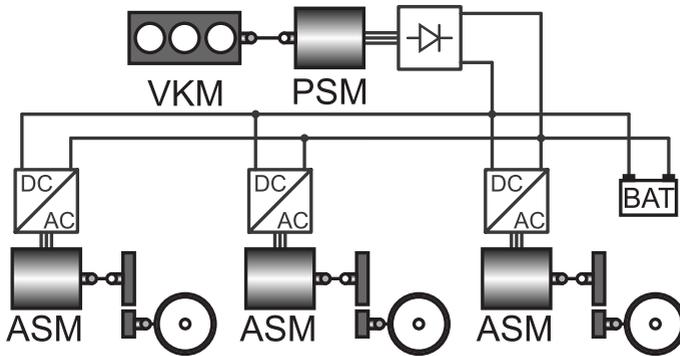


Abbildung 2.5: Antriebsstrang der Alstom H3 in Hybridausführung

Toshiba: Die japanische Firma Toshiba entwickelte für die Japan Freight Railway Company (JRF) unter der Bezeichnung HD300 eine Rangierlokomotive mit Hybridantrieb. Der Aufbau des Antriebsstrangs ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

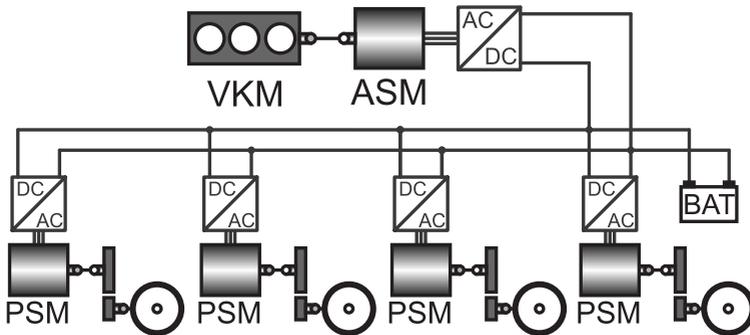


Abbildung 2.6: Antriebsstrang der Toshiba HD300

Die Lokomotive mit einer Spurweite von 1067mm ist als serieller Hybrid ausgeführt und verfügt über vier permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit einer Stundenleistung von jeweils 80kW und einer Maximalleistung von jeweils 125kW als Fahrmotoren. Ein 160kW Asynchrongenerator wird von einem 242kW Dieselmotor angetrieben. Als Speicher kommt eine 67,4kWh Lithium-Ionen Batterie zum Einsatz [42] [58]. Der erste Prototyp wurde 2010 ausgeliefert, ab 2012 folgten die Serienfahrzeuge. Stand März 2017 stehen 29 Lokomotiven des Typs im Dienst.

Mit der Deutschen Bahn arbeitet Thosiba an dem Projekt HELMS (Hybrid Electronic Mechanical Shunter). In dem Projekt sollen bis Ende 2017 zwei Lokomotiven der Baureihe 294 als Prototypen mit einem leistungsverzweigten Hybridantrieb nach Abbildung 2.7 ausgestattet werden. Die Fahrzeuge sollen mit einem 1000kW Verbrennungsmotor, einem Asynchrongenerator und zwei Asynchronmaschinen als Fahrmotoren ausgestattet werden. Als Batterie kommt eine Lithium-Titanat Batterie von Toshiba mit 92,25kWh zum Einsatz. Ab 2020 ist geplant, die Lokomotiven in Serie umzurüsten [6] [58].

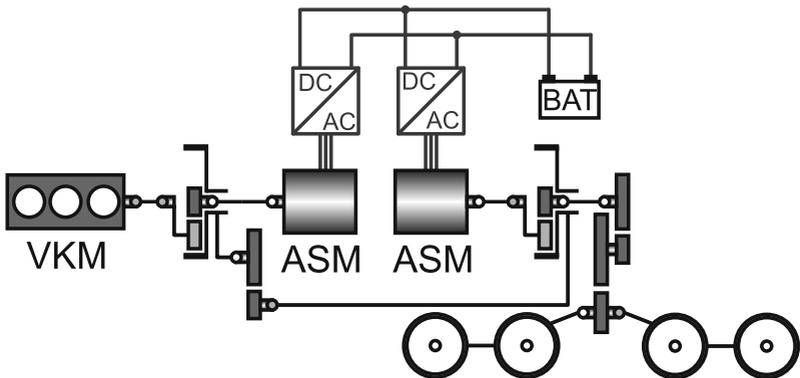


Abbildung 2.7: Geplanter Antriebsstrang im Projekt HELMS

Gmeinder: Die Firma Gmeinder Lokomotiven aus Mosbach stellte auf der InnoTrans 2016 ihre Hybrid-Rangierlokomotive DE 60 C Hybrid vor. Die Lokomotive basiert auf einer dreiachsigen dieselelektrischen Rangierlokomotive Gmeinder DE500C, die unter Verwendung der alten Asynchronmaschinen als Fahrmotoren mit einem neuen 435 kW Caterpillar Dieselmotor, der fest mit einem Generator gekuppelt ist, einem Lithium-Ionen Batteriesystem von Hoppecke und Wechselrichtern von Strukton ausgerüstet wurde [19]. Die Topologie des Antriebssystems entspricht Abbildung 2.8. Auf Basis dieser Lokomotive befindet sich mit der Bezeichnung DE 75 BB Hybrid eine 4-achsige Variante als komplettes Neufahrzeug im Bau [18]. Die Topologien der Antriebssysteme der beiden Lokomotiven unterscheiden sich nur in der Anzahl der angetriebenen Achsen.

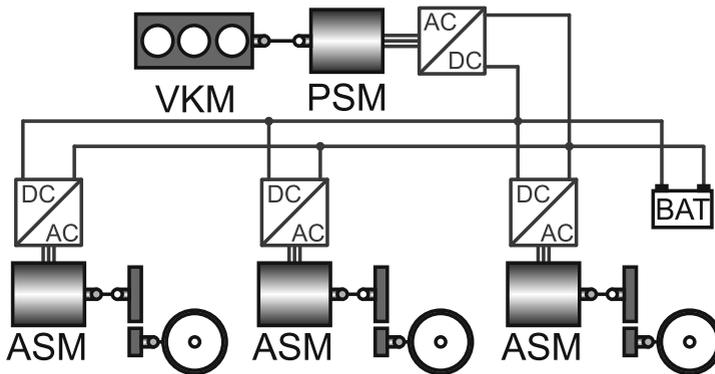


Abbildung 2.8: Antriebsstrang der Gmeinder-Hybridlokomotiven

Triebwagen

Im Bereich der Triebwagen mit Hybridantrieben sind die japanischen Eisenbahngesellschaften führend, der kommerzielle Betrieb wurde bereits 2007 aufgenommen. In Deutschland existieren bisher nur Prototypen.

Japanische Hybrid-Triebwagen: Die Japanische Eisenbahngesellschaft JR East entwickelte einen Versuchsträger für Triebwagen mit hybriden Antriebssträngen, der unter dem Namen „NE Train“ (New Energy Train) ab 2003 Testfahrten absolvierte. Das ca. 40t schwere Hochflurfahrzeug ist mit einem seriellen Hybrid-Antriebsstrang ausgerüstet. Damit soll eine Verwendbarkeit von Komponenten aus Elektrotriebwagen und eine Möglichkeit zur Umrüstung auf eine Energieversorgung durch Brennstoffzellen erreicht werden.

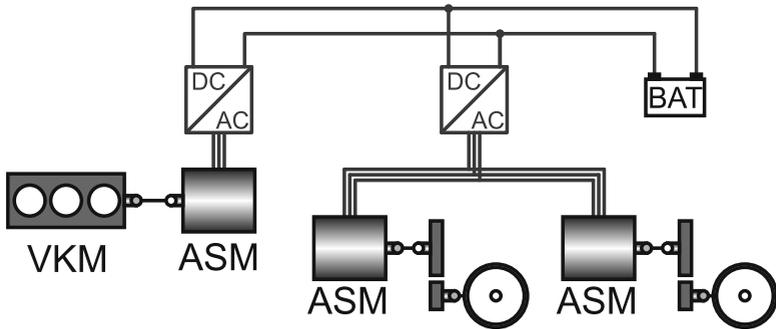


Abbildung 2.9: Antriebsstrang des NE Train

Der vierachsige Triebwagen verfügt über ein Triebdrehgestell mit zwei 95kW Asynchronmotoren und ein Laufdrehgestell. Die Verbrennungsmotor-Generator-Einheit, mit einer Dieselmotorleistung von 331kW und einem 180kW Asynchron-Generator, ist auf Dauerbetrieb der Fahrmotoren ausgelegt und ermöglicht somit einen Betrieb ohne Leistungsentnahme aus der Batterie. Das Batteriesystem ist zur Aufnahme der Bremsenergie bei einer Verzögerung von Höchstgeschwindigkeit in den Stillstand oder für eine Fahrt von 5km in der Ebene ausgelegt. Der SOC-Hub der Lithium-Ionen Batterie mit einem Energieinhalt von 10kWh liegt dabei im Bereich von

20% bis 60%. Die Antriebsstrangtopologie ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Bei den Testfahrten wurden Kraftstoffeinsparungen um 20% erreicht [16].

Bei JR Hokkaido wurde ein Triebwagen vom Typ Kiha-160 mit einem parallel-hybriden Antriebsstrang ausgerüstet, der seit 2007 erprobt wird. Er verfügt über einen 243kW Dieselmotor und einen 123kW Elektromotor, die über ein mechanisches Lastschaltgetriebe verbunden sind. Als Speicher kommt eine 7,5kWh Lithium-Ionen Batterie zum Einsatz [17]. Die Antriebsstrangtopologie ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

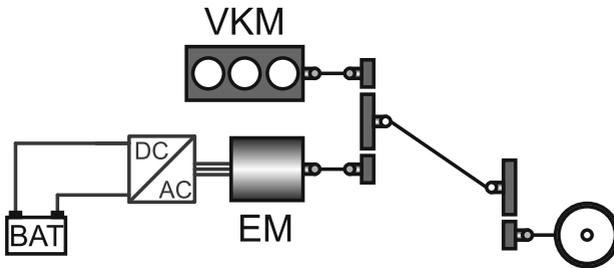


Abbildung 2.10: Antriebsstrang des Kiha-160

Im Juli 2007 wurde von JR East der kommerzielle Betrieb mit dem Hybrid-Triebwagen Typ Kiha E200 aufgenommen. Der Triebwagen verfügt bei sonst gleichen technischen Daten wie der NE Train über einen 270kW Generator und eine 15,2kWh Lithium-Ionen Batterie [53].

Mit angepassten Leistungen für höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten und längere Abstände zwischen den Halten wurden die Serienfahrzeuge Typ HB E300 (seit 2010 im Einsatz) und Typ HB E210 (seit 2015 im Einsatz) entwickelt und in Betrieb genommen [40]. Produktion und Vertrieb laufen seit 2012 unter der Bezeichnung „sustina HYBRID“ über J-TREC (Japan Transport Engineering Company), eine Tochterfirma der Japanischen Eisenbahngesellschaft JR East [56].

Prototypischer Umbau Siemens Desiro (Baureihe 642): In dem durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Projekt „Demonstration eines Hybrid-Schienenfahrzeugs und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit“ mit Laufzeit von Januar 2010 bis Dezember 2012 wurde auf Basis des vorhandenen PowerPacks von der Deutschen Bahn und MTU Friedrichshafen die erste Generation eines Hybrid-PowerPacks entwickelt und im Fahrzeug erprobt [33]. Das Hybrid-Powerpack ist mit einem Dieselmotor mit 315 kW Nennleistung und einer als „hybrid erregten Synchronmaschine“ (HSM) bezeichneten elektrischen Maschine mit 200 kW Dauerleistung und 400 kW Spitzenleistung und einem 5-Gang Lastschaltgetriebe ZF ECOMAT ausgerüstet. Die Synchronmaschine ist zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe angeordnet, es handelt sich um einen Parallelhybrid. Auf dem Dach ist das Fahrzeug mit vier (zwei je Wagen) Lithium-Ionen Batterien mit einem Speicherinhalt von jeweils 4,7 kWh ausgestattet. dort sind ebenfalls die Batterie-Klimatisierung, die Wechselrichter mit EMV-Filter und eine CO₂-Klimaanlage untergebracht. Der Antriebsstrang ist in Abbildung 2.11 abgebildet.

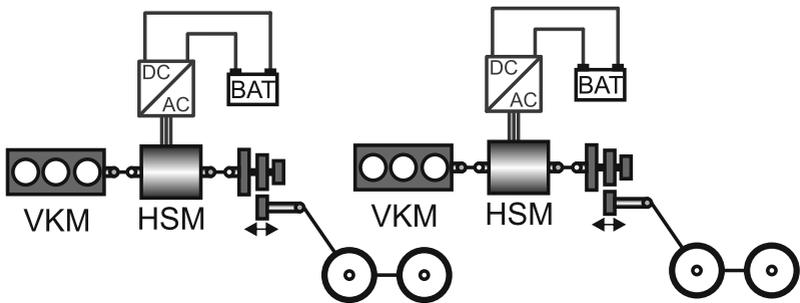


Abbildung 2.11: Antriebsstrang des umgebauten Desiro der Westfrankenbahn

Das umgerüstete Fahrzeug wurde 2012 auf der Innotrans in Berlin vorgestellt [10]. Auf dem Prüfstand wurden Kraftstoffeinsparungen von bis zu 25 % unter optimalen Bedingungen und von 10 – 15% unter realistischen Betriebsbedingungen erreicht. Bei Testfahrten auf der Staudenbahn bei Augsburg wurden 2015 Kraftstoffeinsparungen von 18% nachgewiesen [44]. Bei der Staudenbahn handelt es sich um eine eingleisige Nebenstrecke mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von 60km/h und vielen unbeschränkten Bahnübergängen und den daraus resultierenden Bremsvorgängen auf niedrige Geschwindigkeiten.



Abbildung 2.12: Der umgebaute Desiro bei den Testfahrten (Bild: Stefan Haag)

- 1: Wechselrichter-Box
- 2: Batterien

Abbildung 2.12 zeigt die Dachausrüstung des Fahrzeugs bei den Messfahrten. Bei den zwei gleichen Dachboxen (2) handelt es sich um die Batterieboxen, die schwarz abgedeckte Box (1) daneben ist die mit Messtechnik ausgerüstete Wechselrichter-Box. Die geplante Zulassung für den regulären

Einsatz auf der Westfrankenbahn wurde unter anderem wegen Überschreitung der zulässigen Achslast der Drehgestelle bei maximaler Besetzung des Fahrzeugs nicht erreicht. 2015 wurde das Fahrzeug auf einen konventionellen Antrieb zurückgebaut.

2.1.3 Aktuelle Forschungsprojekte

Im Folgenden werden die momentan laufenden Forschungsprojekte EcoTrain und PREDIKT vorgestellt. Beide Projekte bauen auf den in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Umbau des Siemens Desiro der Westfrankenbahn auf. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik entstand im Zusammenhang mit den Versuchsvorbereitungen für das Projekt PREDIKT.

EcoTrain

Im Projekt EcoTrain soll ein serieller Hybrid-Antriebsstrang aufgebaut werden. Das Projekt wird von der DB RegioNetz Verkehrs GmbH und der DB Systemtechnik mit den Projektpartnern Fraunhofer IVI Dresden, der TU Chemnitz und der TU Dresden durchgeführt. Es wird durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen der Modellregion Elektromobilität gefördert und läuft von 2013 bis 2017 [47].

Projekthalt ist der Umbau eines Siemens Desiro Classic zu einem seriellen Hybrid. Um die notwendigen zusätzlichen Komponenten im Fahrzeug einbauen zu können, werden die Drehgestelle durch teilweise Neukonstruktion für höhere Achslasten angepasst. Der Antriebsstrang wird mit zwei verschiedenen PowerPacks ausgeführt. In einem PowerPack befinden sich ein 390kW Verbrennungsmotor der fest mit einem permanentmagneterregten 388kVA Synchrongenerator gekuppelt ist und ein 300kW Asynchron-Fahrmotor mit den erforderlichen Nebenaggregaten. Im zweiten PowerPack befinden sich die Batteriecontainer mit Batterieklimatisierung und ebenfalls ein 300kW Fahrmotor. Die Zwischenkreise der beiden PowerPacks sind

miteinander verbunden. Der Antrieb erfolgt weiterhin über Gelenkwellen und Radsatzgetriebe auf beide Achsen der Triebdrehgestelle [2] [12].

An der TU Dresden wird ein Nachladekonzept entwickelt, um die Batterien unterwegs nachladen zu können. Das Konzept sieht eine Nachladung über einen Dachstromabnehmer aus einer 15 kV Oberleitung mit wahlweise 16,7 Hz oder 50 Hz vor. Damit kann sowohl an der normalen Oberleitung geladen werden als auch an kurzen aus dem Landesnetz versorgten Oberleitungsabschnitten in Bahnhöfen auf nicht elektrifizierten Strecken [3]. Der geplante Antriebsstrang ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

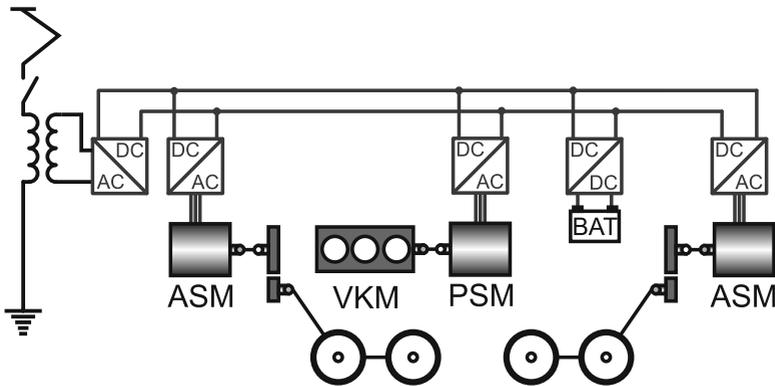


Abbildung 2.13: Der Antriebsstrang des EcoTrain

PREDIKT

Das Projekt PREDIKT „Prädiktive Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe“ läuft von Januar 2015 bis Dezember 2017 und ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Projektpartner sind MTU Friedrichshafen als Konsortialführer, die AKASOL GmbH und das Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT.

Ausgehend von den Erfahrungen aus dem Projekt „Demonstration eines Hybrid-Schienenfahrzeugs und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit“ erfolgt eine Weiterentwicklung des Hybrid-PowerPacks mit parallelem Antriebsstrang. Beispielfahrzeug für die Auslegung ist weiterhin der Desiro Classic. Ausgehend von den in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Messergebnissen sollen weitere Möglichkeiten zur Kraftstoffeinsparung untersucht werden. Dafür werden drei aufeinander aufbauende Maßnahmen in der Simulation und mittels eines Testaufbaus auf dem Prüfstand betrachtet:

- Elektrische und logische Koppelung der Traktionsantriebe
Die beiden PowerPacks werden sowohl elektrisch auf Zwischenkreisebene als auch steuerungstechnisch für die Drehmomentaufteilung zwischen den Antrieben verbunden. Bei bisherigen Projekten erfolgt diese 1 : 1 zwischen den beiden PowerPacks, was zu ungünstigen Betriebspunkten der Verbrennungsmotoren im Teillastbereich führen kann. Im Zuge der Untersuchungen werden auch die Antriebsstrang-Topologie und die Dimensionierung der Komponenten angepasst. Die elektrische Koppelung ermöglicht einen Betrieb der beiden parallel-hybriden PowerPacks als leistungsverzweigten oder seriellen Hybrid.
- Prädiktive Steuerung
Durch die Prädiktive Steuerung wird das Verhalten des Antriebsstrang vorausschauend angepasst. Damit sind zum Beispiel eine batterie-schonende Fahrweise und eine Absenkung der Maximalgeschwindigkeit durch Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Fahrzeit möglich.
- Selbstlernender Regler
Der selbstlernende Regler liefert die Datenbasis für die prädiktive Steuerung. Durch Aufzeichnung von Daten während der Fahrt werden Strecken- und Fahrplandaten sowie der aktuelle Betriebszustand des Fahrzeugs gelernt, um die vorhandenen Datensätze zu verbessern.

Begleitend zu den beschriebenen Maßnahmen wird durch AKASOL das Batteriesystem auf dem aktuellen Stand der Technik weiterentwickelt und der Speicherinhalt den ermittelten Anforderungen angepasst [59].

2.2 Grundlagen der Simulation

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Erstellung der verwendeten Simulationsmodelle dargelegt. Bei den Modellen handelt es sich um 1-D Modelle, das heißt, es werden nur skalare, sich zeitlich ändernde Größen betrachtet. Grundsätzlich wird zwischen signalflussorientierten Ansätzen und objektorientierten Ansätzen unterschieden. Eine ausführlichere Abhandlung dazu findet sich in [20].

2.2.1 Signalflussorientierte Simulation

Bei der Simulation mit Matlab und Simulink von MathWorks wird klassischer Weise der signalflussorientierte Ansatz verwendet. Er basiert auf Blöcken mit fest definierten Ein- und Ausgängen, wie in Abbildung 2.14 dargestellt.

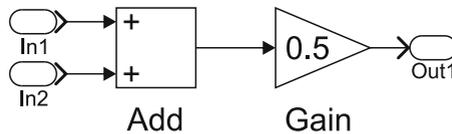


Abbildung 2.14: Signalflussorientiertes Modell

Die Ein- und Ausgänge stellen einheitenlose Zahlenwerte dar. Die Werte der Ausgänge werden durch Zuweisungen aus den Eingangswerten berechnet. Die Zuweisungen innerhalb der Blöcke werden in der gegebenen Reihenfolge abgearbeitet. Durch die algorithmische Darstellung der Anweisungen lässt sich aus den Simulationsmodellen vergleichsweise einfach C-Code für

Rapid Prototyping Systeme und Steuergeräte erstellen. Daher haben sich Matlab und Simulink in diesem Bereich zu einem Standard entwickelt.

2.2.2 Objektorientierte Simulation

Ein objektorientierter Ansatz in der Simulation wird hier am Beispiel der Sprache Modelica vorgestellt. Modelica ist eine Modellierungssprache, deren Weiterentwicklung durch die gemeinnützige Modelica Association [15] koordiniert wird. Simulationsumgebungen, die Modelica verwenden, sind beispielsweise die kommerziellen Programme Dymola, Simulation X und ANSYS Simplorer oder frei verfügbare Editoren wie Open Modelica [39].

Die Objektorientierung ist ein Prinzip, das aus der Softwareentwicklung stammt. Das betrachtete System wird in kleinere Einheiten unterteilt, die in sich gekapselt sind und über definierte Schnittstellen Daten mit anderen Einheiten austauschen. Die Objekte sind wiederverwendbar und können wiederum aus anderen Objekten aufgebaut sein.

Für den Aufbau der Objekte verwendet Modelica einen gleichungsbasierten Ansatz. Die physikalischen Zusammenhänge werden in ein differentialalgebraisches Gleichungssystem (DAE) überführt. Weitere Anpassungen oder Umformungen der Gleichungen durch den Benutzer sind nicht erforderlich. Während der Simulation wird aus den Gleichungssystemen der einzelnen Objekte ein Gesamt-Gleichungssystem erstellt und gelöst. Es gibt also keine vorgeschriebene Lösungsreihenfolge und keine Zuweisung der Größen als Ein- und Ausgangsgrößen. Dieser Zusammenhang wird Akausalität genannt. Zur Erstellung eines ausführbaren Codes muss das System im Compiler kausalisiert werden, Abhängig vom aktuellen Zustand wird dort dann die Berechnungsreihenfolge festgelegt [14].

Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Objekten werden Konnektoren genannt. Bei physikalischen Systemen werden über einen Konnektor jeweils eine Fluss- und Potentialgröße übertragen. Flussgrößen sind Größen, bei denen die Summe aller an einem Knoten angreifenden Größen null ist.

In Gleichung 2.1 ist dies für einen Knoten am Beispiel einer allgemeinen Flussgröße F mit i angreifenden Größen dargestellt.

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0 \quad (2.1)$$

Flussgrößen in physikalischen Systemen sind beispielsweise Kraft, Drehmoment, Strom, Wärmestrom, Massenstrom oder Volumenstrom. Bei Potentialgrößen sind die Werte aller an einen Knoten angreifenden Konnektoren gleich. Gleichung 2.2 zeigt dies für eine Potentialgröße P an einem Knoten mit n angreifenden Größen.

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n \quad (2.2)$$

Potentialgrößen sind beispielsweise Weg, Drehwinkel, Spannung, Temperatur oder Druck. Mit dem Konzept der Fluss- und Potentialgrößen lassen sich alle physikalische Systeme beschreiben. Daher eignet sich Modelica insbesondere für multiphysikalische Systeme, in denen die verschiedenen Disziplinen gemeinsam simuliert werden.

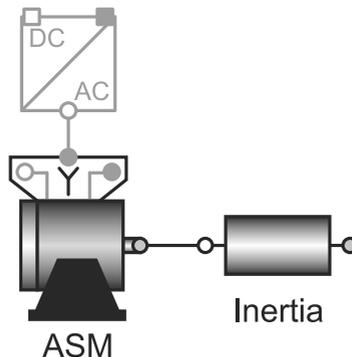


Abbildung 2.15: Visualisierung eines Modelica-Simulationsmodells

Abbildung 2.15 zeigt eine typische grafische Darstellung eines mit Modelica erstellten Modells aus Wechselrichter, Asynchronmaschine und Massenträgheit als Last.

2.2.3 Echtzeit-Simulation physikalischer Systeme

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für die Simulation physikalischer Systeme in Echtzeit erläutert. Aufbauend auf der Definition der Echtzeit werden einige gängige numerische Lösungsverfahren und deren Vor- und Nachteile vorgestellt. Abschließend werden Kriterien zur Wahl einer geeigneten Schrittweite aufgeführt. Auf dieser Basis erfolgt in Kapitel 4 die Auswahl des Solvers.

Echtzeitsysteme

Sax verwendet in seiner Dissertation eine informationstechnische Definition für den Begriff Echtzeitsystem:

„Ein Echtzeitsystem ist ein System, bei dem die Richtigkeit der Systemantwort sowohl von einer korrekt durchgeführten Transformation der Eingangsgrößen in die Ausgangsgrößen, als auch von dem Zeitpunkt, zu dem die Ausgangsgrößen zur Verfügung gestellt werden, abhängt.“ [48]

Das heißt, dass für eine korrekte Funktion des Systems das Ergebnis sowohl rechnerisch korrekt sein muss als auch zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen muss. Die in der Literatur oft herangezogene und bereits 1985 zurückgezogene DIN 44300 definierte Echtzeit anwendungsbezogen auf Rechnersysteme:

„Unter Echtzeit versteht man den Betrieb eines Rechnersystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig bereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. [...]“ [7]

Soll eine Simulation in Echtzeit laufen, müssen also nach beiden Definitionen sämtliche Iterationsschritte zur Berechnung des Ergebnisses innerhalb eines festen Zeitintervalls ablaufen, das dem simulierten Zeitintervall entspricht. Bei Echtzeitsimulationen werden Integrationsmethoden mit einem festen Zeitschritt und einer festen Anzahl an Iterationen verwendet, da nur bei diesen Aussagen zu der für die Berechnung zur Verfügung stehenden Zeit möglich sind. Nur unter dieser Randbedingung kann eine vollständige Echtzeitfähigkeit garantiert werden. Für die in [48] geforderte „korrekt durchgeführte Transformation“ ist die Wahl des Lösungsalgorithmus und der Anzahl der Iterationen entscheidend und an die jeweilige Simulation anzupassen. Häufig wird noch zwischen „harter Echtzeit“ und „weicher Echtzeit“ unterschieden. Bei harter Echtzeit muss das Berechnungsergebnis immer innerhalb des Zeitintervalls vorliegen, bei weicher Echtzeit können einzelne Rechenschritte länger dauern. Die „weiche Echtzeit“ entspricht daher nicht den aufgeführten Definitionen für Echtzeitsysteme.

Bei Echtzeitanwendungen wird also nicht wie bei gewöhnlichen Simulationen mit variabler Schrittweite die Rechendauer für die Gesamtsimulation optimiert, sondern es wird der Rechenaufwand für den einzelnen Zeitschritt optimiert. Daher kommen für Echtzeitanwendungen spezielle Integrationsverfahren zum Einsatz.

Explizite und implizite Verfahren

Zur Berechnung der Ergebnisse sind die erstellten Gleichungssysteme in der Regel mittels numerischer Integration zu lösen, da sie analytisch nicht lösbar sind. Bei den Lösungsverfahren wird zwischen expliziten und impliziten unterschieden. Bei expliziten Lösungsverfahren werden für die Berechnung des Ergebnisses des aktuellen Zeitschritts nur die Ergebnisse der vorhergehenden Zeitschritte verwendet. Das Gleichungssystem lässt sich daher vergleichsweise schnell lösen, allerdings ist eine kleine Schrittweite zu wählen, und der Fehler kann bei schnellen Zustandsänderungen groß werden. Bei

impliziten Verfahren dagegen ist die Berechnung von den Ergebnissen im aktuellen Zeitschritt abhängig, die Berechnung des Ergebnisses muss daher iterativ erfolgen [11].

Weiterhin gibt es Kombinationen aus impliziten und expliziten Verfahren, die sich besonders für Systeme eignen, die Komponenten mit sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten enthalten. Hierbei wird das System in einen „schnellen“ (Komponenten mit kleiner Zeitkonstante) und einen „langsamen“ (Komponenten mit großer Zeitkonstante) Teil aufgeteilt. Der schnelle Teil wird mit einem impliziten Lösungsverfahren berechnet, der langsame Teil mit einem expliziten. Verschiedene solcher Ansätze für Echtzeitsimulationen in Dymola werden in [49] vorgestellt.

Euler-Verfahren

Das Euler-Verfahren existiert sowohl in einer expliziten, als auch in einer impliziten Form. Die explizite Form, das Euler-Cauchy-Verfahren, ist das einfachste bekannte Lösungsverfahren. Es handelt sich um ein Einschrittverfahren, zur Berechnung der Ergebnisse sind nur die Ergebnisse aus dem vorherigen Zeitschritt erforderlich.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die berechneten Werte dem realen Wert annähern, wird bei numerischen Verfahren durch die Konvergenzordnung beschrieben [11]. Je höher die Konvergenzordnung, desto schneller konvergiert der Algorithmus. Eine Konvergenzordnung von 1 entspricht linearer Konvergenz, 2 quadratischer Konvergenz. Beim Euler-Cauchy-Verfahren ist die Konvergenzordnung 1. Um eine Konvergenz zu erreichen, ist daher eine kleine Schrittweite erforderlich. Durch die vielen Schritte wird das Verfahren allerdings anfällig für Rundungsfehler. Gleichung 2.3 zeigt die Berechnungsvorschrift für den Zustandsvektor x_{n+1} im Zeitschritt $n + 1$ mit dem Euler-Cauchy-Verfahren. Das Ergebnis wird aus dem Zustandsvektor x_n des Zeitschritts n mit der Schrittweite h und einer Funktion f berechnet:

$$x_{n+1} = x_n + hf(x_n) \quad (2.3)$$

Die implizite Form des Euler-Verfahrens unterscheidet sich vom expliziten Euler-Verfahren durch eine Abhängigkeit der Lösung vom Zustandsvektor des aktuellen Zeitschritts:

$$x_{n+1} = x_n + hf(x_{n+1}) \quad (2.4)$$

Der Rechenaufwand für den einzelnen Zeitschritt erhöht sich, dafür wird allerdings eine bessere Konvergenz erreicht und der Zeitschritt kann größer gewählt werden [11] [31].

Runge-Kutta-Verfahren

Das Runge-Kutta-Verfahren existiert in verschiedenen Ordnungen. Aus Abwägung zwischen Rechenaufwand und möglicher Schrittweite wird im Regelfall die 4. Ordnung verwendet. Die 1. Ordnung entspricht dem Euler-Cauchy-Verfahren. Bei dem Runge-Kutta-Verfahren handelt es sich ebenfalls um ein Einschrittverfahren. Bei der Durchführung sind mehr Funktionsauswertungen als beim Euler-Verfahren erforderlich, dafür bietet es eine höhere Genauigkeit, was wiederum größere Zeitschritte erlaubt [31].

Gleichung 2.5 und Gleichung 2.6 zeigen die allgemeine Iterationsvorschrift für das Runge-Kutta-Verfahren mit den Koeffizienten c_i , a_{ij} und w_i und der Ordnung v [11] [31].

$$x_{n+1} = x_n + \sum_{i=1}^v w_i k_i \quad (2.5)$$

$$k_i = hf(t_n + c_i h, x_k + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} k_j) \quad (2.6)$$

Wahl des Zeitschritts

Der Zeitschritt ist ausreichend klein zu wählen, um Signale mit allen relevanten Zeitkonstanten des Systems entsprechend dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem erfassen zu können. Der Zeitschritt muss also kleiner als die

Hälfte der minimalen Periodendauer der „schnellsten“ Signale sein. Weiterhin muss der Zeitschritt ausreichend klein sein, um eine Konvergenz des Lösungsalgorithmus zu gewährleisten. Für implizite Algorithmen können im Allgemeinen größere Zeitschritte verwendet werden als für explizite. Die in der Praxis erforderliche Schrittweite lässt sich am einfachsten experimentell ermitteln, da sie stark vom jeweiligen System und der Modellbildung abhängig ist. Ein gegenüber dem Kehrwert der höchsten Frequenz um den Faktor 10 größerer Zeitschritt ist als Richtwert gebräuchlich [21]. In [38] wird als Vorgehensweise vorgeschlagen, die Simulation zuerst mit einem variablem Zeitschritt durchzuführen und den dort verwendeten kürzesten Zeitschritt für den festen Zeitschritt zu übernehmen. In [46] erfolgt die Herleitung eines Stabilitätskriteriums, auf Basis der Eigenwerte des Differentialgleichungssystems. Zusätzlich müssen aber die geforderte Genauigkeit und die benötigte zeitliche Auflösung beachtet werden, da das Kriterium nur die numerische Stabilität berücksichtigt.

2.3 Methoden zur Auslegung und Validierung

In den Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.3 werden Begriffe der Produktentwicklung definiert. Anschließend werden verschiedene Vorgehensweisen und Methodiken in der Entwicklung mechatronischer Systeme vorgestellt, die auf hybride Antriebsstränge anwendbar sind. Beispiele für die Anwendung von Produktentwicklungsmethodiken auf die simulationsgestützte Auslegung hybrider Antriebssysteme finden sich für den PKW-Bereich in großer Zahl, beispielsweise in [4] und [62]. Im Bahnbereich finden sich Beispiele für die Auslegung eines dieselhydraulischen Hybridantriebs für einen Nahverkehrstriebwagen in [29] und eines Mehrmotorensystems für einen diesel-elektrischen Antriebsstrang mit Speicher einer Lokomotive in [50].

2.3.1 Verifizierung und Validierung

In dieser Arbeit werden die Begriffe Verifizierung und Validierung sowohl im Zusammenhang des Produktentwicklungsprozesses als auch im Hinblick auf die Überprüfung von Simulationsmodellen verwendet. Die folgenden Definitionen basieren auf der VDI 2206 [61] und der Dissertation von Düser [9]. Düser verwendet zur Definition drei Systemdefinitionen:

- **Kunde**
Der zukünftige Nutzer des zu entwickelnden Produkts
- **Zielsystem**
Die aus den vom Kunden mitgeteilten Anforderungen erstellte Definition, welche Eigenschaften das zu entwickelnde Produkt haben soll
- **Objektsystem**
Das umgesetzte Ergebnis der Produktentwicklung, also das zu verifizierende beziehungsweise das zu validierende System

Verifizierung

Verifizierung ist der formale beziehungsweise systematischen Abgleich von Eigenschaften eines Systems mit den im Zielsystem/der Spezifikation definierten Anforderungen. In der Produktentwicklung wird also überprüft, ob das entwickelte Produkt die im Lastenheft definierten technischen Eigenschaften aufweist. Es handelt sich also um einen Abgleich des Objektsystems mit dem Zielsystem.

Bei Simulationsmodellen entspricht die Verifizierung einer Prüfung der Plausibilität, das heißt, ob das Simulationsmodell die bei der Modellbildung aufgestellten Gleichungen richtig berechnet, oder ob z.B. numerische Ungenauigkeiten oder Fehler in der Implementierung zu Abweichungen im Verhalten des Modells führen.

Validierung

Validierung ist eine Überprüfung des Systems hinsichtlich der Eignung für seinen geplanten Einsatz. Am Beispiel der Produktentwicklung handelt es sich um den Abgleich des entwickelten Produkts mit den Erwartungen des Kunden, also des Objektsystems mit dem System „Kunde“. Bei Simulationsmodellen ist durch Vergleich mit Versuchsergebnissen zu prüfen, ob das Simulationsmodell das reale System mit einer für den geplanten Einsatz ausreichenden Genauigkeit nachbildet.

2.3.2 Software-in-the-Loop

Der Begriff „Software-in-the-Loop“ (SiL) beschreibt die Einbindung von (Steuergeräte-) Software in eine Systemsimulation. Dabei werden die zu testende Software und die Simulation der Umgebung auf einem Rechner ausgeführt. Die zu testende Software und die Simulation werden zeitlich gekoppelt, es ist also keine Echtzeitfähigkeit erforderlich. Durch die gemeinsame Ausführung und die Möglichkeit, die Ausführung gezielt nach einzelnen Rechenschritten zu unterbrechen, kann das Verhalten der Software sehr genau analysiert werden, was die Fehlerbehebung vereinfacht.

Ähnlich verhält es sich bei dem Ansatz „Model-in-the-Loop“ (MiL). Dort wird ein Simulationsmodell in eine simulierte Umgebung eingebracht. So können zum Beispiel Simulationsmodelle für Hardware-in-the-Loop (HiL)-Anwendungen oder HiL-Versuchsaufbauten vorab getestet werden.

2.3.3 Hardware-in-the-Loop

Der Begriff „Hardware-in-the-Loop“ (HiL) wird ursprünglich als Bezeichnung für die Untersuchung von Steuergeräten in einer simulierten Umgebung verwendet. Die Definition „die Integration von realen Komponenten (Bauteilen) und Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung“ [61] nach VDI 2206 erweitert den Begriff auch auf andere System-

bestandteile. Da reale Systeme in eine simulierte Umgebung eingebunden werden und diese in der Regel nicht verlangsamt oder beschleunigt agieren können, muss die Simulation in Echtzeit erfolgen. Zum Einsatz kommen spezielle Echtzeitrechner, die über geeignete Schnittstellen zur Einbindung des Prüflings verfügen.

Für spezielle Anwendungen haben sich noch weitere Namen etabliert, zum Beispiel „Power-Hardware-in-the-Loop“ (PHiL) für die Untersuchung von Leistungshalbleiterschaltungen mit simulierten Verbrauchern oder Verbraucher mit simulierten elektrischen Netzen [32]. Da die Schnittstelle hier beispielsweise zwischen Wechselrichter und Motor gelegt wird, benötigt man sehr schnelle und leistungsfähige elektrische Quellen und Lasten zur Anbindung des Prüflings an die Simulation.

Ein Sonderfall, der streng genommen nicht unter „Hardware-in-the-loop“ fällt, sind rein gesteuerte Testverfahren, die im „open Loop“ gefahren werden und bei denen aus der Systemsimulation lediglich Sollwerte an den Prüfling übermittelt werden. Eine Rückführung von Messwerten in die Simulation findet in diesem Fall nicht statt.

2.3.4 Vorgehensmodell nach VDI 2206

Die Richtlinie VDI 2206 [61] beschreibt ein Standardmodell zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Bei der Entwicklungsmethodik handelt es sich um ein dreiteiliges Vorgehensmodell bestehend aus Makrozyklus, Mikrozyklus und Prozessbausteinen.

Mikrozyklus

Bei dem Mikrozyklus handelt es sich um einen allgemeinen Problemlösungszyklus zur Bearbeitung von Teilaufgaben innerhalb des Makrozyklus. Der Mikrozyklus umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Situationsanalyse bzw. Zielübernahme
Selbstständige Definition des Ziels oder Übernahme von extern vorgegebenen Zielen.
- Analyse und Synthese
Erarbeiten alternativer Lösungsvarianten durch wechselnde Analyse- und Synthesephasen.
- Analyse und Bewertung
Analysieren und Bewerten der im Schritt Analyse und Synthese erarbeiteten Lösungsvarianten als Grundlage für die Auswahl einer Lösung.
- Entscheidung
Auswahl einer oder mehrerer Lösungsvarianten für die weitere Bearbeitung. Wurde keine geeignete Lösungsvariante gefunden, müssen die vorangegangenen Schritte noch einmal durchgeführt werden.
- Planen des weiteren Vorgehens bzw. Lernen
Reflektieren von Prozessablauf und Ergebnis um für zukünftige Prozesse zu lernen.

Makrozyklus

Den Makrozyklus bildet das V-Modell, es stammt ursprünglich aus der Softwareentwicklung und wurde für die Entwicklung mechatronischer Systeme angepasst. Das V-Modell besteht aus mehreren Phasen, deren Zusammenhang in Abbildung 2.16 dargestellt ist.

Eingangsgrößen in das V-Modell sind die **Anforderungen** an das Produkt, die sich aus der Aufgabenstellung beziehungsweise dem Produktentwicklungsauftrag ergeben. Im Anhand **Systementwurf** wird anhand der Anforderungen ein Lösungskonzept erstellt, das das Problem in domänen-spezifische Teilprobleme unterteilt und dafür Lösungsprinzipien vorgibt.

Die Teilprobleme werden im **domänenspezifischen Entwurf** detailliert gelöst und anschließend in der **Systemintegration** zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Ergebnis des Makrozyklus ist das **Produkt**. Bei komplexeren Problemen wird das V-Modell mit zunehmendem Reifegrad mehrfach durchlaufen. Das Produkt der einzelnen Durchläufe sind anfangs Prototypen und Muster, am Ende steht dann das fertige, marktreife Produkt. Begleitet wird der Prozess durch eine **Eigenschaftsabsicherung**, bei der fortlaufend die Einhaltung der Anforderungen überprüft wird. Durch die kontinuierliche Verifikation und Validierung können Probleme und Fehler früher erkannt und behoben werden und treten nicht erst am Ende des Produktentwicklungsprozesses auf. Das verhindert teure Fehlentwicklungen und spart Zeit, erfordert jedoch umfangreiche Werkzeuge zur Validierung von Teilsystemen. Als Hilfsmittel stehen für die einzelnen Schritte des Makrozyklus die **Modellbildung und -analyse** zur Verfügung.

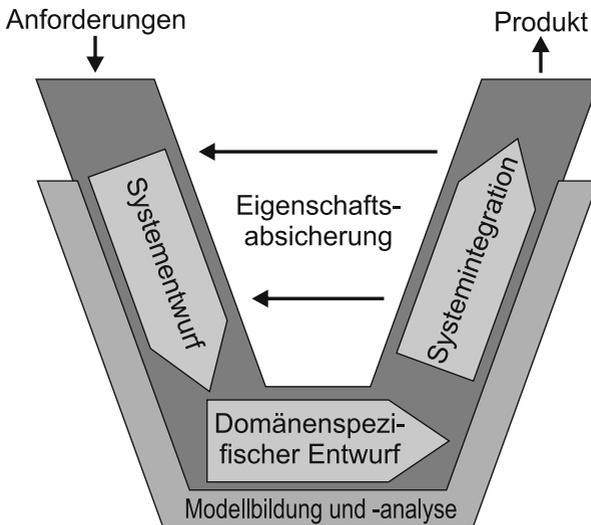


Abbildung 2.16: V-Modell nach [61]

Prozessbausteine

Prozessbausteine sind vordefinierte Handlungsweisen zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte in den Phasen des Makrozyklus. Die VDI 2206 bietet für die einzelnen Phasen des V-Modells eine große Anzahl an Prozessbausteinen. Im Rahmen der Phase Eigenschaftenabsicherung sind dies beispielsweise die in den Unterabschnitten 2.3.3 und 2.3.2 vorgestellten Hardware-in-the-Loop und Software-in-the-Loop Versuche. Dazu gehören die notwendigen Prozessbausteine zur Modellbildung und Modellvalidierung auf verschiedenen Abstraktionsebenen und in verschiedenen Domänen. Hier soll im Folgenden auf die Modellbildung näher eingegangen werden.

Vorgestellt wird eine domänenspezifische Modellbildung mit anschließender Integration der Modelle auf der Ebene mathematischer Beschreibungen. Es wird auch die in dieser Arbeit angewendete Durchgängigkeit und Weiterverwendung der Simulationsmodelle über die verschiedenen Phasen empfohlen. Der Vorgang der Modellbildung läuft nach VDI 2206 in fünf Schritten ab:

- Zielformulierung
Was soll mit den Modellen untersucht werden?
- Modellbildung
Auswählen der Abstraktionsebene und erstellen der Modelle durch theoretische oder experimentelle Modellbildung.
- Modellanalyse
Analyse des Grundsystems
- Systemsynthese
Übertragen der Ergebnisse der Modellanalyse auf das zu entwickelnde System.

- Systemanalyse
Analyse und Bewertung des entwickelten Systems

Der Ansatz zeigt ein typisches Vorgehen der Modellbildung mit einer Erstellung und Validierung des Simulationsmodells an bestehenden (Teil-) Systemen und anschließende Übertragung auf das neu zu entwickelnde System. Durch einen höheren Aufwand zu Beginn der Modellbildung bei der Zielformulierung und Auswahl der Abstraktionsebene lassen sich Modelle erstellen, die über den gesamten Entwicklungsprozess in geeigneter Weise eingesetzt werden können und es wird zusätzlicher Aufwand für die Erstellung mehrerer Modelle oder umfangreiche Anpassungen an den Modellen vermieden.

2.3.5 X-in-the-Loop

Düser [9] beschreibt in seiner Dissertation ein Handlungssystem für die Validierung im Produktentstehungsprozess am Beispiel eines Gesamtfahrzeugs auf dem Rollenprüfstand. Das Handlungssystem wird als X-in-the-Loop (XiL) Framework bezeichnet und basiert auf der Koppelung von Methoden der Simulation und des realen Tests. Das Framework muss für den jeweiligen Anwendungsfall aufgaben- und projektspezifisch konfiguriert werden. Die Beschreibung des XiL Frameworks erfolgt mittels des C&C Modells des IPEK [34] über Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen. Das C&C Modell wird dafür bei den Wirkflächenpaaren um Schnittstellen zwischen Validierungswerkzeugen erweitert. Die Leitstützstrukturen werden um Validierungsmethoden, -prozesse und -werkzeuge erweitert.

Die am X-in-the-Loop Ansatz beteiligten Akteure sind die Systeme Fahrer, Umwelt und Fahrzeug. Das System Fahrzeug wird, wie Abbildung 2.17 zeigt, in den Prüfling (UUT=Unit under Test) und das Restfahrzeugmodell (RFM) untergliedert. Die Unit under Test entspricht dem „X“ in X-in-the-Loop und kann ein Teilsystem oder das gesamte Fahrzeug sein. Die Teilsysteme werden verschiedenen „Layern“ zugeordnet, von einzelnen

Reibkontakten über Antriebsstrangkomponenten und kompletten Antriebsstrang bis hin zum Gesamtfahrzeug. Die Unit under Test kann wahlweise virtuell vorliegen (Model-in-the-Loop, MiL) oder real (Hardware-in-the-Loop, HiL). Das Restfahrzeugmodell ist immer eine virtuelle Abbildung.

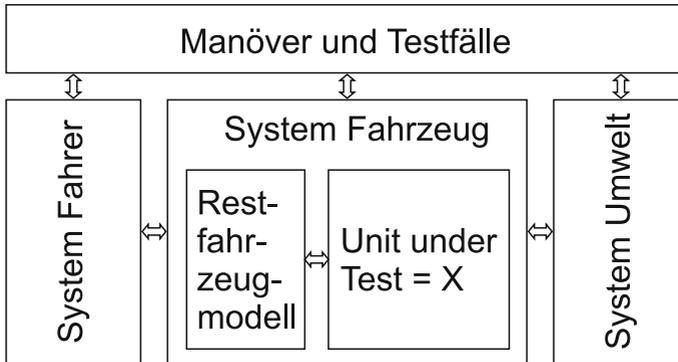


Abbildung 2.17: X-in-the-Loop Framework nach [9]

Zur Realisierung des XiL Frameworks ist eine modulare Simulations- und Prüfstandsumgebung erforderlich. Als XiL-Simulationsplattform, die sowohl für Model-in-the-Loop (MiL) Anwendungen entsprechende Softwareschnittstelle als auch für Hardware-in-the-Loop (HiL) Anwendungen Hardwareschnittstellen zur Verfügung stellen muss, wird von Düser der IPG CarMaker gewählt [26]. Als unterstützender Prozess zum effizienten Prüfstandseinsatz dient der Problemlösungsprozess SPALTEN [1] zur Konfiguration des XiL-Frameworks.

Schröter [51] erweitert den XiL-Ansatz und nennt ihn „erweitertes XiL-Framework“. Um eine detailliertere Betrachtung der Systeme Fahrer und Umwelt zu ermöglichen und zum Beispiel Einflüsse durch den Fahrer besser untersuchen zu können, werden diese Systeme analog zum System Fahrzeug erweitert. Das System Fahrer wird in die Teilsysteme UUT (virtuell oder real) und ein Restfahrermodell aufgeteilt, das Umweltmodell in eine UUT

(virtuell oder real) und ein Restumweltmodell. Im System Fahrzeug wird die gleichzeitige Untersuchung mehrerer UUTs ermöglicht. Zur durchgängigen Anwendung von Optimierungsverfahren wird das optionale System Optimierer mit verschiedenen, auf jeweilige Anwendungsfälle angepassten Optimierungsalgorithmen, eingefügt.

In [35] wird das XiL Framework für die Entwicklung handgeführter Elektrowerkzeuge verwendet. Es wird eine Methodik zur Untersuchung leistungsskalierter Prototypen vorgestellt. Leistungsskalierte Prototypen werden verwendet, wenn in einem frühen Entwicklungsstadium, zum Beispiel mit Rapid-Prototyping Verfahren hergestellte Komponenten verwendet werden, die nicht über die volle Festigkeit verfügen. Es wird der Begriff des „Koppelsystems“ für Systeme eingeführt, die die physikalischen Größen am Prüfstand erfassen und in den simulierten Anteil übergeben sowie Systeme, die die simulierten Größen als physikalische Größen am Prüfstand zur Verfügung stellen. Im Versuchsaufbau sind das beispielsweise Messeinrichtungen und Lastmaschinen. Ein Koppelsystem wird zur Untersuchung leistungsskalierter Prototypen um ein Skalierungsmodell erweitert, mit dem Messgrößen und Vorgabegrößen umgerechnet werden.

2.4 Beispielsystem

In dieser Arbeit erfolgt die Auslegung des Hybridantriebs am Beispiel eines vereinfachten Beispielsystems. Die Annahmen für das Beispielsystem werden so getroffen, dass die Validierung am Antriebssystemprüfstand des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) durchgeführt werden kann [45]. Im Folgenden werden die Fahrzeug- und Streckenparameter definiert.

2.4.1 Beispielhaftes Fahrzeug

Bei modernen vierachsigen Nahverkehrstriebwagen gibt es verschiedenste Beispiele in unterschiedlichen Leistungsklassen. Diese reichen von einer Anfahrbeschleunigung von $0,6\text{ m/s}^2$ bei den in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten japanischen Triebwagen bis zu dem Regio-Shuttle, ein vierachsiger Triebwagen mit einer ähnlichen Masse aber einer um den Faktor zwei höheren Anfahrbeschleunigung von $1,2\text{ m/s}^2$ und eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h . Dafür wird allerdings auch eine etwa doppelt so hohe Antriebsleistung von zwei Dieselmotoren mit jeweils je nach Ausführung zwischen 257 kW und 265 kW benötigt [54] [41]. Dieses Fahrzeug kann daher auch in einem S-Bahn ähnlichen Betrieb eingesetzt werden.

Als beispielhaftes Fahrzeug für den Auslegungsprozess und die Versuchsdurchführung in dieser Arbeit wird in Anlehnung an die japanischen Triebwagen ein vierachsiger Leichttriebwagen mit zwei Antriebseinheiten und einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h verwendet. Als Steigungsfähigkeit wird eine erreichbare Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h bei einer Steigung von 30‰ gefordert. Die Fahrzeugmasse bei $2/3$ Beladung wird auf 40 t festgelegt. Das entspricht einem Fahrzeug mit einer Fahrgastkapazität von 120 Personen mit 75 kg/Person und einem Leergewicht von 34 t . Bei voller Zuladung von 9 t ergibt sich somit eine Achslast von zirka 11 t . Das Fahrzeug soll bei $2/3$ Beladung eine Anfahrbeschleunigung von $0,6\text{ m/s}^2$ erreichen und Radscheiben mit einem Laufkreisdurchmesser von 710 mm bis 770 mm haben. Das Fahrzeug soll einen kostengünstigen Betrieb auf Nebenstrecken mit geringem Verkehrsaufkommen ermöglichen und daher so ausgelegt werden, dass sowohl die Beschaffungskosten als auch die Betriebskosten für Kraftstoff und Wartung klein bleiben. Denkbar ist außerdem eine zusätzliche Nutzung des entwickelten Antriebsstrangs bei der Modernisierung von Bestandsfahrzeugen. Da der spezifizierter Triebwagen in den technischen Daten weitgehende Übereinstimmungen zu den in

Abschnitt 2.1.2 vorgestellten japanischen Hybridtriebwagen aufweist, kann von plausiblen Annahmen ausgegangen werden.

Primärenergiequelle ist Dieselkraftstoff, eine Möglichkeit zum stationären Aufladen eines elektrischen Speichers über eine externe Stromversorgung ist nicht vorgesehen. Durch unterschiedliche Ausführungen der beiden Antriebseinheiten und eine freie Wahl der Aufteilung des Antriebsmoments auf die Antriebseinheiten wird ein Leistungsaustausch zwischen den beiden Antriebseinheiten während der Fahrt möglich. Eine Koppelung der Antriebseinheiten im Bezug auf die Abtriebsdrehzahl erfolgt über die Schiene, eine weitere elektrische oder mechanische Koppelung ist nicht zwingend erforderlich. Für die beispielhafte Demonstration des sequentiellen Versuchs auf dem Prüfstand wird eine Vereinfachung gegenüber einem realen Schienenfahrzeug getroffen: Die Leistungsanforderung der elektrischen und mechanischen Nebenverbraucher wie Klimatisierung, Kühlung, Druckluft-erzeugung und Beleuchtung werden zu Null gesetzt, da sie auf die prinzipielle Versuchsdurchführung keinen Einfluss haben und die Komponenten auf dem Prüfstand nicht vorhanden sind.

2.4.2 Beispielhafte Strecke

Als Referenzstrecke dient die auch im Projekt PREDIKT verwendete Staudenbahn bei Augsburg. Von der Strecke liegen bei den Versuchsfahrten im Jahr 2015 aufgezeichnete GPS-Daten vor. Befahren wird der 22,8 km lange Abschnitt der eingleisigen Nebenbahn von Magertshausen nach Oberneufnach. Die maximale Steigung beträgt 10‰, die Höhendifferenz 72 m. Streckenhöchstgeschwindigkeit ist 60 km/h. Der in der Simulation verwendete Fahrplan ist aus dem Buchfahrplan abgeleitet und in Tabelle 2.1 wiedergegeben. Die Standzeiten wurden in den Bahnhöfen auf 20 s verkürzt, da sich mit den nicht betrachteten Nebenverbrauchern durch unterschiedlich lange Standzeiten keine Änderungen ergeben. Die Abfahrtszeiten sind jeweils in Sekunden ab Simulationsbeginn gegeben. Zusammen mit der angegebenen

minimalen Haltedauer ergibt sich die späteste erlaubte Ankunftszeit. Es werden Verspätungen bis 60s toleriert. Mit der Abfahrt am letzten Bahnhof endet der Simulationsdurchlauf.

Bahnhof	Strecke / m	Abfahrtszeit / s	Haltedauer / s
Magertshausen	0	30	30
Fischnach	5000	420	20
Wollmertshofen	7400	670	20
Langenneufnach	10300	930	20
Walkertshofen	14700	1530	20
Reichertshofen	18000	1830	20
Mittelneufnach	20600	2130	20
Oberneufnach	22800	2450	30

Tabelle 2.1: Fahrplan für die Simulation

3 Dimensionierung und simulative Auslegung

Dieses Kapitel beschreibt den Weg von den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Anforderungen über das Lastenheft zur simulationsgestützten Auswahl der Antriebsstrangtopologie und der Antriebskomponenten. In dieser Arbeit beschränken sich die Betrachtungen auf den Antriebsstrang. Betrachtungen zur Ausführung des Wagenkastens, der Anordnung der Komponenten und zum Gewichtsmanagement werden nicht durchgeführt. Bei der Entwicklung eines realen Fahrzeugs sind diese Betrachtungen parallel durchzuführen. Wechselwirkungen, beispielsweise die Zunahme des Fahrzeuggewichts durch einen größeren elektrischen Speicher, können so in die Auslegung einfließen und Verletzungen von Randbedingungen wie maximaler Achslast werden rechtzeitig erkannt. Die Teilsysteme und das Gesamtsystem werden nach den einzelnen Auslegungsschritten in der Simulation verifiziert.

3.1 Vorauslegung

In diesem Abschnitt werden alle Entscheidungen und Berechnungen bezüglich des Antriebsstrangs vorgestellt, die vor der Erstellung des Simulationsmodells erfolgen. Die Vorauswahl der Antriebsstrangtopologie und eine Vordimensionierung der wesentlichen Antriebsstrangkomponenten werden durchgeführt.

3.1.1 Antriebsstrangtopologie

Die Auswahl der in der Simulation zu untersuchenden Antriebsstrangtopologien erfolgt an Hand von verschiedenen „Konzepten“. Verschiedene Konzepte können auch gleiche Topologien wie serieller-, paralleler- oder leistungsverzweigter Hybrid nach Unterabschnitt 2.1.1 beinhalten, die unterschiedlich ausgeführt werden. Zur Erstellung der Konzepte eignen sich die bekannten Kreativ-Methoden. Im vorliegenden Fall werden in einem morphologischen Kasten die Ausprägungen der Merkmale „Hybrid-Topologie“, „Anzahl der Verbrennungsmotoren“, „Anzahl elektrische Fahrmotoren“ und „Koppelung der Antriebsanlagen“ betrachtet. Der morphologische Kasten ist in Abbildung 3.1 wiedergegeben.

Hybrid-Topologie	seriell	parallel	leistungsverzweigt	
Anzahl VKM	1	2		
Anzahl el. Motoren	1	2	3	4
Kopplung der Antriebe	elektrisch, DC + Gleis	elektrisch, AC + Gleis	nur Gleis	

Abbildung 3.1: Morphologischer Kasten zur Erstellung der Konzepte

Aus den möglichen Kombinationen werden zur weiteren Betrachtung vier Konzepte ausgewählt, die in Abbildung 3.2 in den morphologischen Kasten eingetragen sind:

Konzept 1: seriell, 1 VKM, 2 EM, Koppelung elektrisch DC + Gleis

Konzept 2: parallel, 2 VKM, 2 EM, Koppelung nur Gleis

Konzept 3: leistungsverzweigt, 1 VKM, 2 EM,

Koppelung elektrisch DC + Gleis

Konzept 4: leistungsverzweigt, 1 VKM, 1 EM, Koppelung nur Gleis

Hybrid-Topologie	seriell	parallel	leistungsverzweigt	
Anzahl VKM	1	2	3	
Anzahl el. Motoren	1	2	3	4
Kopplung der Antriebe	elektrisch, DC + Gleis	elektrisch, AC + Gleis	nur Gleis	

Abbildung 3.2: Morphologischer Kasten mit den Konzepten

Zur Vermeidung von Überspannungen im Zwischenkreis bei Bremsvorgängen ist bei allen vorgestellten Varianten ein Bremschopper mit Bremswiderstand vorgesehen. Zu jedem Konzept werden im Folgenden die Vor- und Nachteile der Lösung aufgeführt. In dieser Arbeit wird nur ein Konzept weiter verfolgt, da die Beschränkungen für eine Umsetzung am Prüfstand einfließen. Bei der Entwicklung eines realen Fahrzeugs wird man mehrere Konzepte in die simulative Untersuchung einbeziehen und erst anhand von Kraftstoffverbrauchswerten, Lebensdauerabschätzungen oder der Performance des Systems die endgültige Auswahl treffen können.

Konzept 1

Bei Konzept 1, das in Abbildung 3.3 dargestellt ist, handelt es sich um einen seriellen Hybrid, wie er ähnlich auch in den in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten japanischen Triebwagen umgesetzt wurde. Eine Verbrennungsmotor-

Generator-Einheit dient der Erzeugung elektrischer Energie, die in einem elektrischen Speicher zwischengespeichert werden kann. Der Antrieb des Fahrzeugs erfolgt über Einzelachsanantriebe mit jeweils einem Fahrmotor.

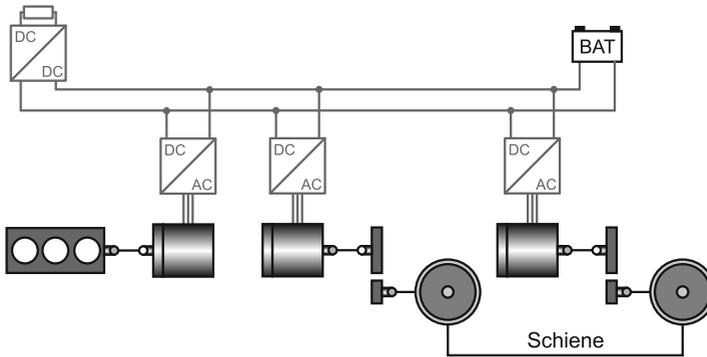


Abbildung 3.3: Schema Konzept 1

Vorteile

- Freie Anordnung der Komponenten, da nur elektrische Verbindungen notwendig sind
- Einfache Steuerung und Regelung möglich
- Auf Basis von Komponenten aus Elektrotriebwagen realisierbar

Nachteile

- Viele elektrische Maschinen notwendig, daher hohes Gewicht
- Bei voller Verbrennungsmotorleistung schlechterer Wirkungsgrad als ein parallel-Hybrid durch häufige Wandlung

Konzept 2

Konzept 2 zeichnet sich durch einen Antriebsstrang mit zwei getrennten parallelen Hybridantrieben aus. Beide Antriebe verfügen jeweils über einen Verbrennungsmotor und eine elektrische Maschine, die über ein Schaltgetriebe auf die Radsätze wirken. Für jedes Drehgestell ist eine identische Antriebsanlage vorhanden. Bei geringeren Leistungsanforderungen kann auch eine gemeinsame Antriebsanlage vorgesehen werden, deren Leistung über Gelenkwellen auf beide Drehgestelle übertragen wird. Daraus ergibt sich jedoch eine Anordnung in der Fahrzeugmitte, was bei geforderten Niederflerbereichen unter Umständen nicht realisierbar ist. Das Konzept ist schematisch in Abbildung 3.4 dargestellt.

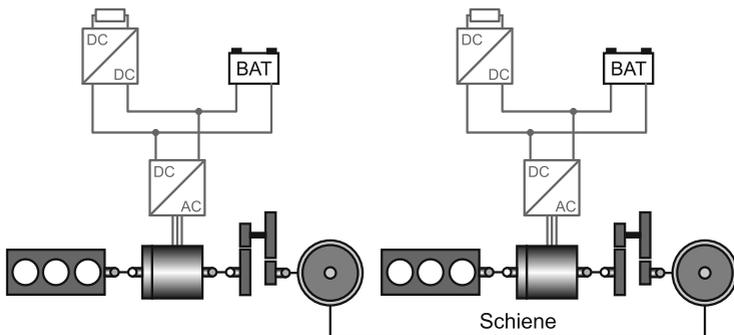


Abbildung 3.4: Schema Konzept 2

Vorteile

- Direkter Durchtrieb vom Verbrennungsmotor auf die Radsätze, daher hoher Wirkungsgrad möglich
- Kurzzeitig hohe Leistung verfügbar (Summe aus Verbrennungsmotor und Elektromotor)
- Betrieb bei Ausfall einer Antriebseinheit weiterhin möglich

Nachteile

- Verbrennungsmotor muss mitdrehen
- Mechanische Anbindung an das Drehgestell erforderlich, wenig Freiheitsgrade bei der Anordnung im Fahrzeug
- hohes Gewicht

Konzept 3

Durch Einsparung eines Verbrennungsmotors in Konzept 2 erhält man einen leistungsverzweigten Hybrid mit parallel-hybridem und elektrischem Antriebsstrang. Um den elektrischen Antriebsstrang voll nutzen zu können, müssen beide elektrisch verbunden werden. Das Konzept ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

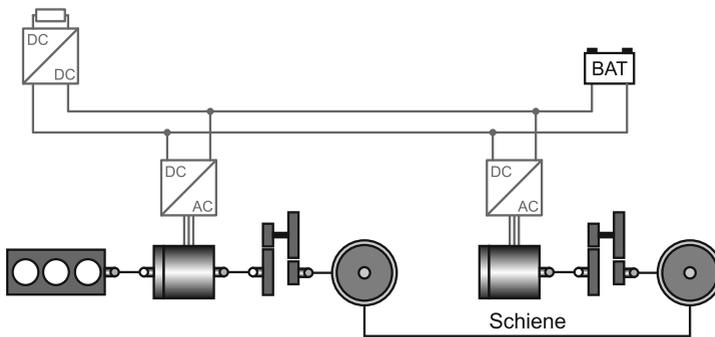


Abbildung 3.5: Schema Konzept 3

Vorteile

- Einsparung eines Verbrennungsmotors (Masse und Bauraum)
- Viele Freiheitsgrade

Nachteile

- Aufwändige Ansteuerung durch viele Freiheitsgrade
- Starke Leistungseinschränkung bei niedrigem Ladezustand des Speichers

Konzept 4

Die Hybrid-Variante mit der geringsten Anzahl an Komponenten ist der leistungsverzweigte Hybrid mit getrenntem Diesel- und Elektro-Antriebsstrang in Abbildung 3.6. Die Verbindung der beiden Antriebsstränge erfolgt nur über das Gleis.

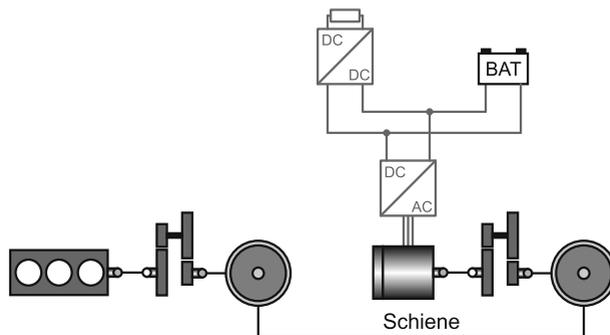


Abbildung 3.6: Schema Konzept 4

Vorteile

- Wenige Komponenten
- Geringes Gewicht

Nachteile

- Geringe Leistung

- Schlechter Wirkungsgrad beim Auflasten
- Verfügbare Leistung stark vom Ladezustand des Speichers abhängig

Konzeptauswahl

Zur Auswahl eines Konzepts wird die in Tabelle 3.1 dargestellte Bewertungsmatrix aufgestellt. Jedes Kriterium wird mit einem Faktor von 1 bis 3 gewichtet, 3 bedeutet die höchste Gewichtung. Die Bewertung erfolgt auf einer Skala von 0 bis 4, wobei 4 die für die Anwendung beste Erfüllung des Kriteriums darstellt. Es werden folgende Kriterien betrachtet:

Einfachheit: Ist eine konstruktiv und regelungstechnisch einfache Umsetzung möglich? Werden größere Schwierigkeiten erwartet?

Erwartete Effizienz: Wie hoch wird die mit der Lösung erwartete Energieeffizienz eingeschätzt? Wie sieht die Wirkungsgradkette aus?

Bauraum: Wie viel Bauraum wird benötigt?

Gewicht: Wie hoch ist das erwartete Gewicht des Konzepts?

Flexible Anordnung: Welche Freiräume bietet das Konzept hinsichtlich der Anordnung der Komponenten im Fahrzeug?

Leistungsreserven: Wie hoch ist die Dauerleistung im Vergleich zur Spitzenleistung und über welche Dauer kann sie abgerufen werden?

Kosten: Welche Kosten sind für die einzelnen Komponenten zu erwarten bzw. in welcher Anzahl werden sie verbaut?

Zusätzlich muss im Rahmen dieser Arbeit das Kriterium „Eignung für den vorhandenen Prüfstand“ erfüllt sein, das bei einer realen Entwicklung keine Bedeutung hat. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind die Kriterien Kosten und Einfachheit des Antriebssystems für einen späteren Einsatz ebenfalls entscheidend und werden daher mit drei gewichtet. Bauraum und Gewicht wirken sich auf die konstruktiven Möglichkeiten aus, die erwartete Effizienz auf die Betriebskosten. Die Kriterien werden mit dem Faktor zwei gewichtet, da sie zwar relevant für eine Umsetzung sind, aber im vorliegenden

Fall nicht die höchste Priorität besitzen. Flexible Anordnung und Leistungsreserven werden mit dem Faktor eins gewichtet, da die Randbedingungen in diesem Beispiel klar definiert sind und durch alle Konzepte erfüllt werden können. Die vorgestellte Bewertungsmatrix kann nur als Anhaltspunkt dienen, welche Kriterien betrachtet werden können, und ist hier stark auf den Versuch am Prüfstand ausgerichtet. Bei einer Anwendung auf ein reales Entwicklungsprojekt muss sie an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Die Bewertung der Konzepte in den einzelnen Kriterien erfolgt in Tabelle 3.1 mittels der in den Konzeptbeschreibungen aufgeführten Vor- und Nachteile und teilweise durch subjektive Einschätzungen beziehungsweise Erfahrungswerte. In unklaren Punkten können auch schon in diesem Stadium einfache Simulationen oder Berechnungen als Bewertungsgrundlage genutzt werden.

Kriterium	Gew.	K1	K2	K3	K4
Einfachheit	3	2	1	1	4
Erwartete Effizienz	2	3	4	4	1
Bauraum	2	2	1	2	4
Gewicht	2	2	1	2	4
Flexible Anordnung	1	4	0	0	1
Leistungsreserven	1	2	4	3	0
Kosten	3	3	0	1	4
Summe		35	19	25	43

Tabelle 3.1: Konzeptbewertung

Für die weitere Betrachtung wird nur das Konzept 4 ausgewählt, da es mit Abstand am besten bewertet wird und sich auf dem vorhandenen Prüfstand umsetzen lässt. Das Konzept bietet eine einfache Lösung, Bremsenergie zu rekuperieren. Die erwartete Effizienz ist in einigen Betriebspunkten geringer

als bei den anderen Lösungen, insbesondere wenn beim Auflasten Energie zwischen den Antriebseinheiten zwei Mal über einen Rad-Schiene-Kontakt übertragen wird. Die zusätzlich Masse ist ebenfalls deutlich geringer, was zu einer geringeren Fahrzeugmasse und somit Kraftstoffeinsparungen führt. Durch die Trennung von elektrischem und konventionellem Antrieb ist auch eine Nachrüstung für bestehende Fahrzeuge denkbar.

Je nach Anzahl der betrachteten Konzepte und bei ähnlichen Ergebnissen in der Bewertung ist es sinnvoll, mehrere Konzepte in die weitere Betrachtung einzuschließen, da in vielen Punkten nur eine grobe Abschätzung der Eigenschaften erfolgen kann und die reale Eignung deutlich von der Bewertung abweichen kann.

3.1.2 Überschlägige Auslegung der Traktionsantriebe

Zu Beginn erfolgt eine überschlägige rechnerische Auslegung des Antriebsstrangs, um die benötigten Komponenten dimensionieren zu können. Auf Basis der ermittelten Werte werden diese anschließend in der Simulation optimiert. Grundlage der rechnerischen Auslegung sind die drei Lastfälle „Anfahren mit Anfahrbeschleunigung“, „Steigungsfahrt“ und „Konstantfahrt mit Höchstgeschwindigkeit“. Für die drei Fälle werden jeweils aus den Fahrwiderständen die notwendigen Zugkräfte und Antriebsleistungen für 2/3 Beladung berechnet. Die erforderlichen Übersetzungen im Antriebsstrang ergeben sich aus der Höchstgeschwindigkeit und den maximalen Motordrehzahlen sowie dem erforderlichen Anfahrmoment bzw. sind beim Schaltgetriebe über den Getriebetyp nur eingeschränkt wählbar. Mit den Übersetzungen und der erforderlichen Zugkraft lassen sich die Momente an den Motoren berechnen.

Die in Abschnitt A.1 ausführlich beschriebene Auslegung ergibt eine Leistung von Verbrennungsmotor und Elektromotor von jeweils 130kW. Zwischen Elektromotor und Radsatz wird ein feste Übersetzung von 6,7 eingesetzt, zwischen Verbrennungsmotor und Radsatz ein Schaltgetriebe

mit zusätzlichen Achswendegetriebe mit einer Gesamtübersetzung von maximal 3,35 im höchsten und minimal 7,73 im kleinsten Gang mit Anfahrwandler.

3.1.3 Auslegung des Speichers

Der Speicher wird für einen Bremsvorgang von Höchstgeschwindigkeit auf null dimensioniert. Der erforderliche Speicherinhalt ergibt sich aus der kinetischen Energie E_{kin} des Fahrzeugs bei Höchstgeschwindigkeit, die beim Bremsen rekuperiert werden soll.

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{max}^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 40000 \text{ kg} \cdot (22,2 \text{ m/s})^2 \\ &= 9856,8 \text{ kJ} = 2,74 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Der realisierte Speicherinhalt soll, um eine ausreichende Lebensdauer des Speichers durch eine geringere Endladetiefe zu erreichen, etwa doppelt so groß sein.

$$C_{\text{Speicher}} = 2 \cdot E_{kin} = 5,48 \text{ kWh} \quad (3.2)$$

Die abschließende Dimensionierung erfolgt durch Variation der Speichergröße in der Simulation in Unterabschnitt 3.4.1. Die maximale erforderliche Leistung des Speichers entspricht für die ausgewählte Topologie der maximalen Leistung der E-Maschine, also 130kW Dauerleistung und 180kW Spitzenleistung.

3.2 Entwurf der Hybridsteuerung

Die Hybridsteuerung agiert zum einen mit der obersten Ebene im Fahrzeug, der Geschwindigkeitsregelung durch den Fahrer, zum anderen auf der unteren Ebene mit den Regelungen der einzelnen Antriebsstrangkomponen-

ten. Die Hybridsteuerung legt die Aufteilung des vom Fahrer vorgegebenen Moments auf die Motoren fest und sorgt über Schaltschwellen für eine Einhaltung der Grenzen des Ladezustands des Speichers. Sie muss für die Erprobung in der Simulation so ausgeführt werden, dass durch einfache Anpassung von Parametern verschiedenste Kombinationen von Komponenten erprobt werden können und die Ergebnisse vergleichbar sind.

Über den Modus wird gesteuert, welche Antriebe eingesetzt werden dürfen und welche Vorschrift zur Aufteilung des Moments zwischen den Antrieben verwendet wird. Es sind folgende Modi implementiert:

- M0: Halt
Mechanische Bremse voll anlegen, kein Moment auf den Antrieb
- M1: Elektrisch bremsen
Bis zum maximalen Moment mit der E-Maschine bremsen, dann die mechanische Bremse dazu nehmen
- M2: Mechanisch bremsen
Sollmoment an die mechanische Bremse anlegen
- M3: Fahren Diesel und nachladen
Mit der E-Maschine auf das maximale Moment des Verbrennungsmotors auflasten
- M4: Fahren Diesel und elektrisch und nachladen
Bei Momentenanforderungen größer dem maximalen Moment des Verbrennungsmotors mit der E-Maschine boosten, sonst auflasten
- M5: Fahren Diesel und elektrisch
Bei Momentenanforderungen größer dem maximalen Moment des Verbrennungsmotors mit der E-Maschine boosten

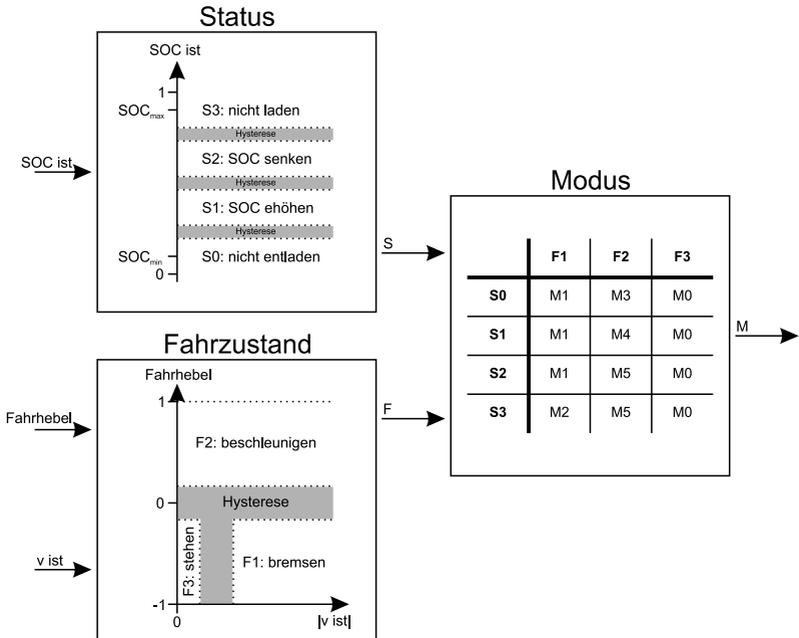


Abbildung 3.7: Bestimmung des Modus aus SOC, Fahrhebelstellung und Geschwindigkeit

Zur Bestimmung des Modus werden „Status“ und „Fahrzustand“ verwendet. Der Status beschreibt den Ladezustand des Speichers (SOC). Bei geringem SOC ist der Status „S0: nicht entladen“, es darf keine Leistung aus dem Speicher entnommen werden. Mit steigendem SOC wechselt der Status auf „S1: SOC erhöhen“ und dann „S2: SOC senken“. In diesen Status darf Leistung entnommen und eingespeist werden, im Mittel soll jedoch der SOC angehoben bzw. gesenkt werden. Im Status „S3: nicht laden“ darf nur noch Leistung aus dem Speicher entnommen werden. Ein Wechsel kann nur in die jeweiligen Nachbar-Status erfolgen. Durch die Anpassung der Grenzen zwischen den Status kann die Steuerung auf Umwelteinflüsse, wie kommende Steigungs- oder Gefällestrecken, reagieren. Der Fahrzustand charakterisiert

den Fahrerwunsch im Zusammenhang mit der aktuellen Geschwindigkeit in „F1: bremsen“, „F2: fahren“ und „F3: stehen“. Die Übergänge zwischen den Status und den Fahrzuständen sind über Hysteresen realisiert, um häufige Wechsel der Momentenaufteilung zu vermeiden. Die Abhängigkeiten und zu wählenden Modi sind in Abbildung 3.7 dargestellt.

3.3 Simulationsmodell

Nach der grundlegenden Dimensionierung und Festlegung der erforderlichen Leistungen, Getriebeübersetzungen und der erforderlichen Speicherkapazität in Abschnitt 3.1 wird hier das Simulationsmodell für die weitere Auslegung des Antriebsstrangs vorgestellt. Hierzu wurde im Projekt PREDIKT eine Simulationsbibliothek in der Modellierungssprache Modelica in der Simulationsumgebung Dymola von Frank Holländer erstellt [23] und im Laufe des Projekts umfangreich erweitert und validiert. Für den hier vorgestellten Antriebsstrang wird die Bibliothek um einige in Unterabschnitt 3.3.1 beschriebene Komponentenmodelle erweitert und in den hinterlegten Kennfeldern und Parametern angepasst.

Das in Dymola erstellte Simulationsmodell umfasst den Antriebsstrang, ein Massenmodell des Fahrzeugs und ein Umgebungsmodell mit Fahrwi-derständen. Die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Ansteuerung wird für die Dimensionierung in Dymola implementiert, um eine einfache Simulation des Gesamtsystems in einem Programm zu ermöglichen. Für die Validierung in Kapitel 4 wird die Steuerung in Matlab Simulink umgesetzt und das Fahrzeugmodell als Dymola-Block eingefügt.

3.3.1 Komponentenmodelle

In diesem Abschnitt werden die Komponentenmodelle des Antriebsstrangs vorgestellt, die angepasst oder neu erstellt wurden. Die Modelle für das Rad-

satzgetriebe, den Rad-Schiene-Kontakt und die Fahrwiderstände wurden unverändert aus der PREDIKT Bibliothek übernommen.

Verbrennungsmotor

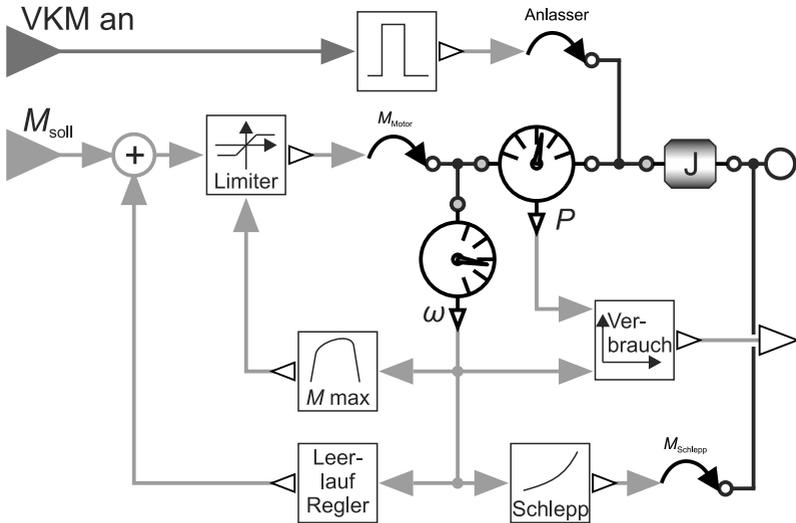


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Verbrennungsmotormodells

Bei dem Verbrennungsmotor handelt es sich um ein Kennfeldmodell. Das in Abbildung 3.8 dargestellte Modell verfügt über einen Eingang zur Vorgabe eines Drehmoments, eine Ausgabe des aktuellen Kraftstoffverbrauchs, eine rotatorische mechanische Schnittstelle („Welle“) und einen Anschluss an den Fahrzeugbus, über den aktuelle Grenzwerte ausgegeben werden. Außerdem kann über einen booleschen Eingang ein Start/Stopp-Signal gegeben werden. Folgende Kennlinien und Kennfelder sind hinterlegt:

- Kennlinie für das maximale Moment über der Drehzahl (dargestellt in Abbildung A.1)

- Wirkungsgradkennfeld mit Kraftstoffverbrauch über Drehzahl und Leistung
- Kennlinie Schleppmoment über Drehzahl

Das vorgegebene Drehmoment wird entsprechend der Kennlinie begrenzt und direkt an der Welle ausgegeben. Die Drehzahl der Welle wird abgegriffen und zusammen mit der Leistung an der Welle zur Berechnung des aktuellen Kraftstoffverbrauchs verwendet. Zum Anlassen des Verbrennungsmotors ist eine weitere Drehmomentquelle vorhanden, die beim Anlegen eines Start-Signals einen Drehmomentpuls erzeugt. Sinkt die Wellendrehzahl die Leerlaufdrehzahl ab und liegt das Start-Signal an, wird auf die Drehmomentvorgabe ein Wert dazu addiert, so dass der Motor in der Leerlaufdrehzahl verbleibt.

Die rotorische Massenträgheit der Kurbelwelle ist als physikalisches Modell ausgeführt.

Elektrische Maschine

Das in Abbildung 3.9 schematisch dargestellte Simulationsmodell der elektrischen Maschine bildet die auf dem Antriebssystemprüfstand vorhandenen Asynchronmaschinen ab. Als Schnittstellen verfügt es über eine Drehmomentenvorgabe, eine rotorische mechanische Schnittstelle und eine einphasige elektrische (Gleichspannungs-) Schnittstelle.

Das vorgegebene Sollmoment wird auf die drehzahlabhängigen Grenzen der Maschine beschränkt und über eine Drehmomentquelle an der mechanischen Schnittstelle ausgegeben. Hinterlegt ist ein auf dem Prüfstand gemessenes Wirkungsgradkennfeld. Über ein integriertes Modell eines Wechselrichters mit konstantem Wirkungsgrad wird daraus mit der anliegenden Spannung der erforderliche Strom berechnet und über eine Stromquelle bzw. Senke ausgegeben. Im Vergleich zu einem physikalischen Motormodell kann die Rechenzeit mit dem Kennfeldmodell stark verkürzt werden. Effekte wie Spannungsschwankungen im Zwischenkreis

und Wechselwirkungen der Leistungselektronik-Komponenten können allerdings nicht nachgebildet werden. Die Überwachung der Maschinentemperatur kann bei Bedarf über ein einfaches thermisches 1-Körper-Modell erfolgen.

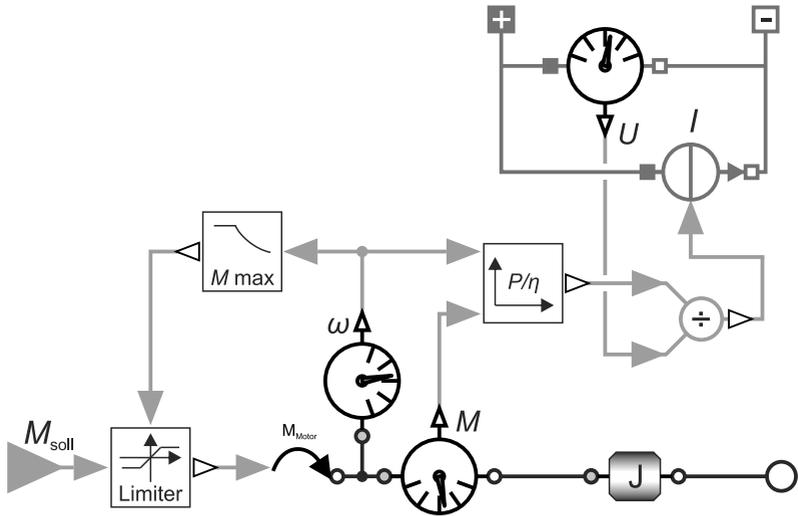


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung des Elektromotormodells

Getriebe

Um die Echtzeitfähigkeit des Simulationsmodells zu erreichen, werden die Schaltvorgänge im Getriebe gegenüber den physikalischen Getriebemodell mit modellierten Reibkontakten angepasst. Das Getriebe ist als sich während des Schaltvorgangs kontinuierlich ändernde Übersetzung ausgeführt. Dafür ist eine Kennlinie hinterlegt, die jedem Gang die entsprechende Übersetzung zuweist. Der Schaltvorgang wird über einen Anstiegsbegrenzer realisiert, der die sich sprunghaft ändernde Gangvorgabe linear innerhalb von 1,5s auf den neuen Gang ändert und somit zu einem sich linear ändernden

Übersetzungsverhältnis führt. Die Anbindung an den restlichen Antriebsstrang erfolgt über eine Trennkupplung, um den Leerlauf zu realisieren. Der Wandler mit Überbrückungskupplung (WüK) ist als Kennlinien-basiertes Modell hinterlegt. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Gangwahl erfolgt über für jeden Gang festgelegte Schaldrehzahlen für das Hoch- und Herunterschalten und über einen vorgegebenen minimalen Zeitabstand zwischen zwei Schaltvorgängen.

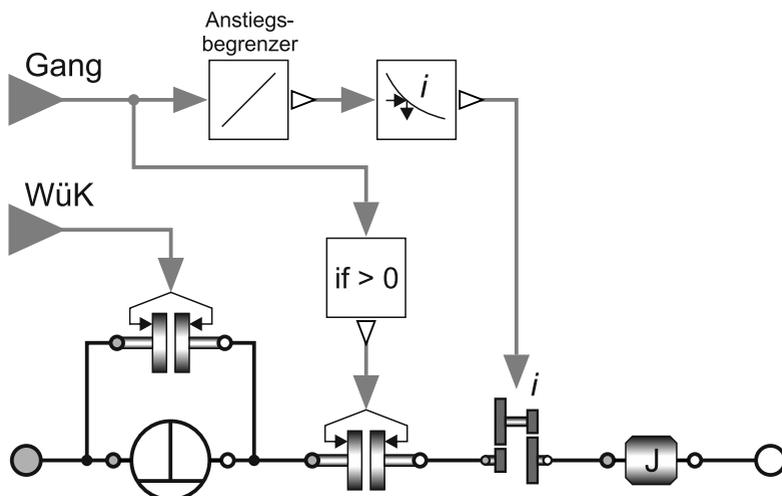


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des Getriebemodells

Die Parametrierung erfolgt am Beispiel des 5-Gang Lastschaltgetriebes des Typs Ecomat von ZF Friedrichshafen [33] mit den Übersetzungen 2,81 im ersten Gang, 1,84 im zweiten Gang, 1,36 im dritten Gang, 1,0 im vierten Gang und 0,8 im fünften Gang. Das Getriebe entspricht somit den in Abschnitt A.1 geforderten minimalen und maximalen Übersetzungen, wobei der fünfte Gang nicht benötigt wird. Die Schaldrehzahlen werden so gewählt, dass sich bei den Schaltvorgängen eine ausreichende Hysterese ergibt und der Drehzahlbereich des Verbrennungsmotors ausgenutzt wird.

Speicher

Als Speichermodell ist das in Abbildung 3.11 gezeigte Modell eines Doppelschicht-Kondensatorspeichers hinterlegt. Das Kondensatormodell berücksichtigt in Form eines physikalischen Modells den Innenwiderstand ESR , den Isolationswiderstand EPR und die Kapazität C . Die Kapazität und die Widerstände werden als konstant angenommen. Die Anzahl der Kondensatoren pro Strang und die Anzahl der Stränge können im Modell frei angepasst werden. Aus den vorgegebenen Werten werden die Parameter für einen „Ersatz-Kondensator“ berechnet. Für die Parametrierung werden Kondensatoren des Typs BCAP 3000 von Maxwell Technologies [36] mit einer Kapazität von 3000F und einer Maximalspannung von 2,7V verwendet.

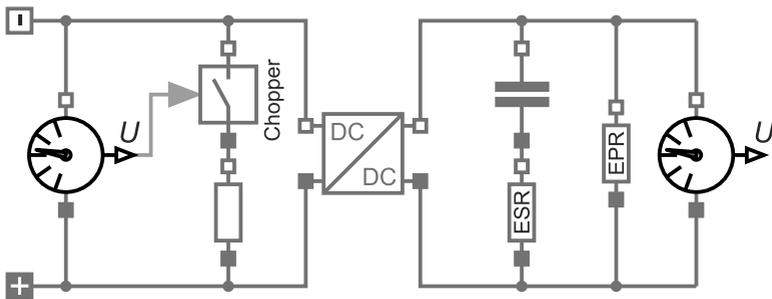


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des physikalischen Speichermodells

In das Speicher-Modell ist das Modell eines DC/DC Stellers mit konstantem Wirkungsgrad integriert. Hierbei wird die Zwischenkreisspannung konstant gehalten und über eine Stromquelle beziehungsweise Stromsenke die Spannung im Speicher verändert. Die Speicherkapazität wird durch eine untere und eine obere Spannungsgrenze beschränkt, die verfügbare Leistung durch den Maximalstrom.

Falls die maximale Spannung im Speicher erreicht ist oder der DC/DC-Steller die beim Bremsen zurückgespeiste Leistung wegen der Strombegrenzung nicht in den Speicher laden kann, verhindert ein Bremschopper mit

Bremswiderstand den unzulässigen Anstieg der Spannung im gemeinsamen Zwischenkreis des Fahrzeugs.

Für die Echtzeitsimulation kommt zur Reduktion des Rechenaufwandes ein vereinfachtes Kondensatormodell zum Einsatz. Dieses besteht lediglich aus einem Integrator, der zur Berechnung des Ladezustands das Integral über die entnommene beziehungsweise zugeführte Leistung bildet. Der Wirkungsgrad wird in diesem Fall als konstant angenommen, eine Selbstentladung wird nicht berücksichtigt. In vergleichenden Simulationen konnte keine für die Systembetrachtung relevante Abweichung zum physikalischen Kondensatormodell festgestellt werden, der durch die Vereinfachung entstandene Fehler kann daher vernachlässigt werden.

3.3.2 Fahrzeugmodell

Für die Antriebsstrangmodelle werden die Komponenten Verbrennungsmotor, Bremse und Schaltgetriebe zu der Komponente „Konventionelles PowerPack“ zusammengefasst. Aus Speicher, Elektromotor und Getriebestufe wird die Komponente „E-PowerPack“ gebildet. Die Powerpacks werden jeweils mit einem Rad-Schiene-Kontakt Modell verbunden. Die Rad-Schiene Modelle sind als rotatorisch-translatorische Wandler ausgeführt und auf der translatorischen Seite mit den Fahrwiderständen verbunden.

Für Simulationen, bei denen keine Echtzeitfähigkeit gefordert ist, beispielsweise zur Systemauslegung, wird mit einer in Dymola aufgebauten Steuerung gearbeitet. Das Fahrzeugmodell und die Steuerung bilden dann ein Simulationsmodell.

Die Echtzeitsimulation erfolgt in einer Simulink-Umgebung. Der Block aus Antriebsstrang, Rad-Schiene Kontakt und Fahrwiderständen wird dann als Fahrzeugmodell in Form eines Dymola-Blocks in das Simulink-Modell integriert. Die Schnittstellen zu Simulink müssen als gerichtete Größen ausgeführt werden. Eingangsgrößen des Dymola-Blocks sind die Momenten- bzw. Gangvorgaben für die einzelnen Komponenten. Ausgegeben werden

die aktuellen Maximalwerte der Komponenten, der Ladezustand des Speichers, aktuelle Position und Geschwindigkeit sowie der momentane Kraftstoffverbrauch.

3.4 Simulative Auslegung

In diesem Abschnitt erfolgt die konkrete Auswahl der in Abschnitt 3.1.2 dimensionierten Komponenten durch Parametervariation in der Simulation.

3.4.1 Variation der Komponenten

Da im vorliegenden Fall die Leistung von Verbrennungsmotor und E-Maschine durch die am Prüfstand vorhandenen Motoren vorgegeben sind, werden nur die Betriebsstrategie und die Speichergröße variiert.

Bei der Betriebsstrategie wird die Zuordnung der Betriebsmodi zu Status und Fahrzustand variiert. Bei der Änderung der Zuordnung der Modi ist nur der Fahrzustand „F2: Beschleunigen“ betroffen. In den Fahrzuständen „F1: Bremsen“ und „F3: Stehen“ bleibt die Zuordnung wie in Abbildung 3.7 gezeigt. Im Fahrzustand „F2“ werden drei verschiedene Varianten A , B und C aufgestellt. Die untersuchten Varianten sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst, M3 entspricht „Fahren Diesel und nachladen“, M4 „Fahren Diesel und elektrisch und nachladen“, M4a „Fahren Diesel und elektrisch und nachladen mit verringerter Leistung“ und M5 „Fahren Diesel und elektrisch“.

	A	B	C
S0	M3	M3	M3
S1	M4	M4	M4a
S2	M5	M4	M4a
S3	M5	M5	M5

Tabelle 3.2: Variation der Betriebsmodi im Fahrzustand „Beschleunigen“

Zur Festlegung der Variation der Speichergößen werden ausgehend von den in Unterabschnitt 3.3.1 gewählten Kondensatoren vom Typ BCAP 3000 mögliche Stufen für die gespeicherte Energie festgelegt. Die maximale Spannung am Kondensator beträgt 2,7 V. Mit einer maximalen Spannung $U_{max} = 800 \text{ V}$ im Speicher und einer aus Sicherheitsgründen etwas niedriger gewählten maximalen Spannung am Kondensator von $U_{maxC} = 2,5 \text{ V}$ ergibt sich für die Zahl n der in Reihe geschalteten Kondensatoren pro Strang:

$$n = \frac{U_{max}}{U_{maxC}} = \frac{800 \text{ V}}{2,5 \text{ V}} = 320 \quad (3.3)$$

Die Kapazität C_{ges} pro Strang berechnet sich mit

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3.4)$$

zu

$$C_{ges} = \frac{C}{n} = \frac{3000 \text{ F}}{320} = 9,375 \text{ F}. \quad (3.5)$$

Die nutzbare gespeicherte Energie ΔE_{Strang} pro Strang ergibt sich mit der in einem Kondensator gespeicherten Energie $E = 1/2 \cdot C U^2$ und der minimalen Spannung $U_{min} = 1/2 U_{max} = 400 \text{ V}$ zu

$$\begin{aligned} \Delta E_{Strang} &= \frac{1}{2} C \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 9,375 \text{ F} \cdot ((800 \text{ V})^2 - (400 \text{ V})^2) = 625 \text{ Wh}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Die in Unterabschnitt 3.1.3 ermittelte gespeicherte Energie von 5,48 kWh wird näherungsweise mit $m = 8$ Strängen erreicht:

$$\Delta E_{Speicher} = m \cdot \Delta E_{Strang} = 8 \cdot 625 \text{ Wh} = 5 \text{ kWh} \quad (3.7)$$

Die Anzahl der Kondensator-Stränge wird in der simulativen Auslegung ausgehend von den ermittelten 8 Strängen wie in Tabelle 3.3 dargestellt in fünf Stufen variiert.

Anzahl Stränge	nutzbarer Speicherinhalt
2	1,25 kWh
4	2,5 kWh
8	5 kWh
12	7,5 kWh
16	10 kWh

Tabelle 3.3: Variation der Speichergröße

Für eine vergleichbare Bewertung der Kombinationen muss der Ladezustand des Speichers zu Beginn der Simulation und am Ende der Simulation gleich sein. Steuerungen, die den Speicher entleeren werden sonst bei der Komponentenauswahl wegen des geringeren Kraftstoffverbrauchs bevorzugt. Da sich ein ausgeglichener Ladezustand nicht immer erreichen lässt, erfolgt ein rechnerischer Ausgleich über ein Kraftstoff-Ladezustands-Äquivalent. Dieser Wert gibt die durchschnittlich benötigte Menge Kraftstoff an, um eine bestimmte Energie bei konstanter Fahrt durch Auflasten in den Speicher zu laden. In der Simulation wird mit dem gegebenen Antriebsstrang ein Äquivalent von 0,4761/kWh ermittelt.

Die Durchführung der Simulationen erfolgt automatisiert. Zum Einsatz kommt das beschriebene Fahrzeugmodell mit der in Dymola umgesetzten Fahrzeugsteuerung. Durch den objektorientierten Aufbau des Modells können die Komponenten getauscht beziehungsweise neu parametrisiert werden. Da nur eine kleine Anzahl an Parametern in wenigen Stufen variiert wird, kann die Simulation als vollfaktorieller Versuch durchgeführt werden. Der Versuchsplan mit den Ergebnissen ist in Tabelle 3.4 wiedergegeben. Als Ergebnis erhält man für jeden Simulationsdurchlauf einen SOC-bereinigten

Kraftstoffverbrauch und die Verspätung bei der Abfahrt am letzten Bahnhof. Negative Zeiten bei der Verspätung entsprechen einer Ankunft vor Plan.

Versuch Nr.	Stränge Speicher	Steuerung Variante	Kraftstoff- verbrauch	Verspätung
1	2	A	11,531	185 s
2	2	B	11,931	-48 s
3	2	C	11,791	-69 s
4	4	A	11,641	157 s
5	4	B	12,101	-73 s
6	4	C	12,151	-92 s
7	8	A	12,351	127 s
8	8	B	11,921	-69 s
9	8	C	12,301	-92 s
10	12	A	12,881	118 s
11	12	B	11,611	-68 s
12	12	C	12,281	-92 s
13	16	A	11,941	36 s
14	16	B	11,161	-79 s
15	16	C	12,271	-92 s

Tabelle 3.4: Versuchsplan für die simulative Auslegung

3.4.2 Komponentenauswahl

Bewertungskriterien für die einzelnen Varianten ist die Erfüllung der geforderten Fahrleistungen, also die pünktliche Befahrung der Staudenbahn nach dem in Unterabschnitt 2.4.2 gegebenen Fahrplan. Unter allen Varianten, die diese Bedingung erfüllen, kann nach weiteren Kriterien bewertet

werden. Zur monetären Bewertung der Varianten eignen sich insbesondere die Lebenszykluskosten. Sie berücksichtigen neben den reinen Anschaffungskosten für das Fahrzeug auch Betrieb und Instandhaltung. Für die Lebenszykluskosten gibt es verschiedene, von den jeweiligen Betreibern bzw. Bestellern bei Ausschreibungen vorgegebene Berechnungsverfahren [52]. Weiterhin sind für die Bestimmung der Lebenszykluskosten viele Informationen zum Einsatz relevant, beispielsweise die angenommene Entwicklung der Kraftstoffkosten [37]. Da in die Lebenszykluskosten viele Faktoren einfließen, für die im Rahmen dieser Arbeit kein Kostenäquivalent ermittelt werden kann, beschränkt sich die Bewertung auf die betrieblichen Kostenfaktoren Kraftstoffverbrauch und Speicherlebensdauer. Für eine gute Abschätzung der Speicherlebensdauer ist ein Alterungsmodell des Speichers erforderlich. Da keine Daten zu den verwendeten Kondensatoren vorliegen, werden nur die Zyklen pro Umlauf und die Endladetiefe abgeschätzt.

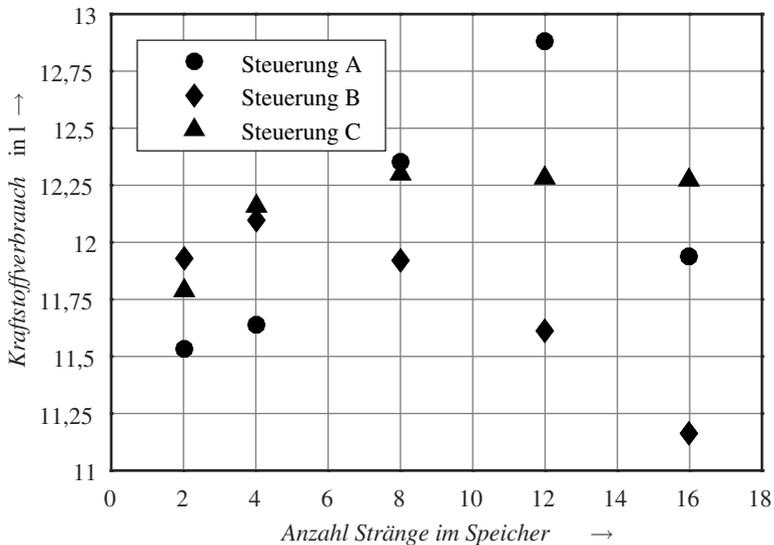


Abbildung 3.12: Kraftstoffverbrauch in der Simulation

Die Simulationsergebnisse aus Tabelle 3.4 werden in Abbildung 3.12 grafisch dargestellt. Zu erkennen ist bei kleinen Speichern ein Ansteigen des Kraftstoffverbrauchs mit zunehmender Größe des Speichers. Ab einer von dem verwendeten Steuerungsalgorithmus abhängigen Speichergöße nimmt der Kraftstoffverbrauch mit zunehmender Speichergöße wieder ab. Zu erwarten wäre eigentlich ein Verhalten, bei dem der Kraftstoffverbrauch generell mit zunehmender Speichergöße abnimmt und sich einem konstanten Wert annähert, wenn der Speicher größer als die nutzbare Größe ist. Das beobachtete Verhalten lässt sich durch eine stärkere Beschränkung der verfügbaren Traktionsleistung bei kleineren Speichern erklären: Bei leerem Speicher kann das Fahrzeug nur noch mit dem Verbrennungsmotor angetrieben werden. Die Leistungsbeschränkung führt zu einer niedrigeren Höchstgeschwindigkeit und damit zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch. Die Geschwindigkeitsprofile aus Versuch 1 und Versuch 9 sind zum Vergleich in Abbildung 3.13 aufgetragen. Zu erkennen ist die deutliche geringere Beschleunigung im oberen Geschwindigkeitsbereich und eine geringere Höchstgeschwindigkeit bei Versuch 1. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist daher nicht möglich.

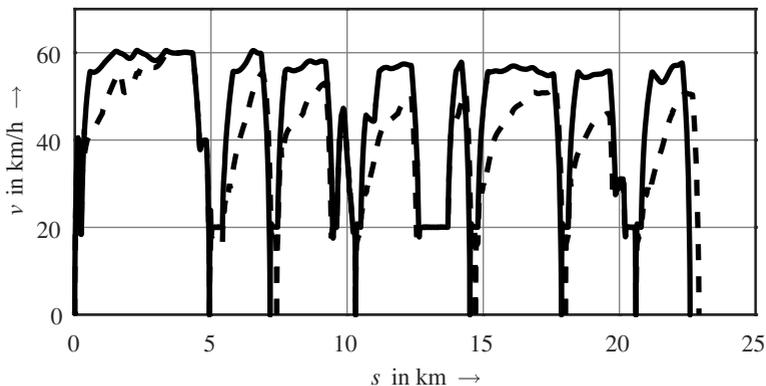


Abbildung 3.13: Geschwindigkeitsverlauf Versuch 1 (gestrichelt) und 9 (durchgezogen)

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Simulationen mit dem Geschwindigkeitsprofil aus Versuch 1 erneut durchgeführt. Dazu wird der aufgezeichnete Geschwindigkeitsverlauf als Soll-Geschwindigkeit dem Fahrermodell vorgegeben. Es ergibt sich das in Tabelle 3.5 wiedergegebene Ergebnis, das in Abbildung 3.14 grafisch dargestellt ist. Bedingt durch das vorgegebene Geschwindigkeitsprofil beträgt die Verspätung jetzt bei allen Varianten 185 s, auch die zurückgelegte Strecke und die gefahrenen Geschwindigkeiten sind nun bei allen Versuchen identisch. Die Ergebnisse für den Kraftstoffverbrauch können somit direkt verglichen werden.

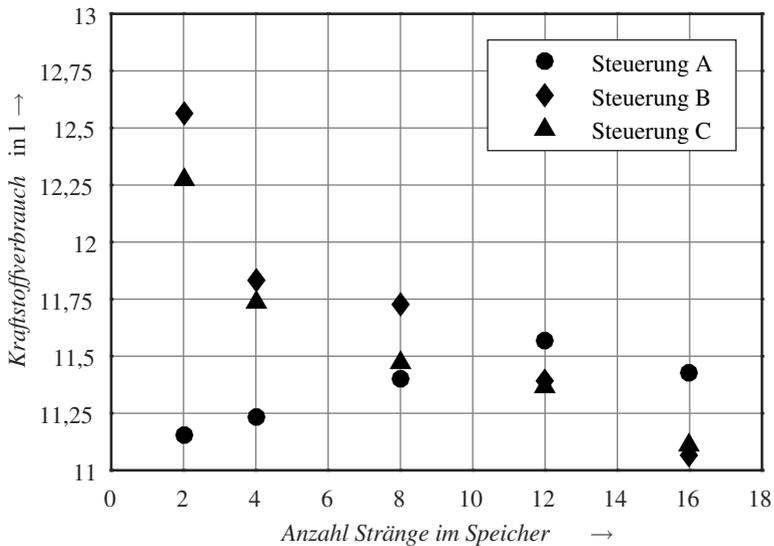


Abbildung 3.14: Kraftstoffverbrauch in der Simulation bei identischem Geschwindigkeitsprofil

Bei der Steuerung A ist bei den Versuchen 1 bis 15 keine der Varianten pünktlich, diese Varianten fallen daher heraus. Allgemein fällt auf, dass bei Steuerung A der Speicher nicht ausreichend nachgeladen werden kann und

daher unabhängig von der Speichergröße im laufenden Betrieb abhängig von der zurückgelegten Strecke seinen minimalen Ladezustand erreicht und anschließend das Fahrzeug nur noch mit eingeschränkter Leistung betrieben werden kann. Ein solches Konzept lässt sich nur sinnvoll einsetzen, wenn eine externe Nachladung vorgesehen wird. Eine weitere Vergrößerung des Speichers bewirkt nur eine Verschiebung des Zeitpunktes, ab dem keine ausreichende Leistung mehr zur Verfügung steht.

Versuch Nr.	Stränge Speicher	Steuerung Variante	Kraftstoff- verbrauch
16	2	A	11,151
17	2	B	12,561
18	2	C	12,271
19	4	A	11,231
20	4	B	11,831
21	4	C	11,741
22	8	A	11,401
23	8	B	11,731
24	8	C	11,481
25	12	A	11,571
26	12	B	11,381
27	12	C	11,371
28	16	A	11,431
29	16	B	11,071
30	16	C	11,111

Tabelle 3.5: Versuchsplan mit identischem Geschwindigkeitsverlauf

Mit den Steuerungen B und C kann das geforderte Fahrprofil mit allen untersuchten Speichergößen gefahren werden. Ab vier Strängen sind keine Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit durch die Speichergöße mehr gegeben, die Fahrzeit verkürzt sich durch eine Vergrößerung des Speichers nicht weiter. Aus konstruktiver Sicht sind leichte Speicher wünschenswert, es sollte also ein möglichst kleiner Speicher gewählt werden. Durch geringere Ladehöhe und geringere Ströme pro Strang ergibt ein größerer Speicher jedoch eine höhere Lebensdauer und liefert in der Simulation zudem einen geringeren Kraftstoffverbrauch. Als Kompromiss wird der Punkt verwendet, ab dem mit zunehmender Speichergöße die zusätzlichen Kraftstoffeinsparungen geringer werden.

Unter Beachtung des Kraftstoffverbrauchs und der zusätzlichen Masse durch den Speicher fällt die Wahl somit auf Steuerung C mit einem Speicher mit 8 Strängen (nutzbarer Speicherinhalt 5 kWh). Die Ergebnisse für den Antriebsstrang mit den ausgewählten Komponenten werden in Kapitel 4 validiert.

4 Sequentieller Versuch

In diesem Kapitel wird der Schritt zur Validierung der in Kapitel 3 durchgeführten simulativen Auslegung auf dem Prüfstand beschrieben. In dem hier vorgestellten Konzept des sequentiellen Versuchs werden die Versuche mit den beiden Antriebseinheiten nacheinander gefahren. Dadurch werden geringere Anforderungen an den Prüfstand hinsichtlich Platz, Belastungsmaschinen etc. gestellt, als bei einer Untersuchung des Gesamtsystems in einem Versuch notwendig wären. Mit diesem Ansatz kann die Leistungsfähigkeit des Antriebssystems validiert werden. Nicht möglich sind direkte Aussagen zur einwandfreien Kommunikation zwischen den Antriebseinheiten, eventuellem Schwingungsverhalten über die Koppelung durch das Fahrzeug, also alle Aspekte, die sich aus dem direkten Zusammenspiel der Antriebseinheiten insbesondere im höherfrequenten Bereich ergeben.

Der sequentielle Versuch wird in mehreren Schritten aufgebaut, die in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Zuerst erfolgen konzeptionelle Tätigkeiten, in denen Vorgehen und Schnittstellen festgelegt werden. Anschließend werden in der Simulation Parameter und Messgrößen für den Prüfstand festgelegt. mit diesen Festlegungen werden die beiden Durchläufe auf dem Prüfstand gefahren. Den Abschluss bildet die Zusammenführung der Messdaten aus beiden Durchläufen zu einem konsistenten Messergebnis.

Zu Beginn des Kapitels wird das entwickelte Validierungskonzept vorgestellt, anschließend werden die einzelnen Schritte genauer beschrieben. Zum Abschluss erfolgt die praktische Erprobung in der Simulation und auf dem Prüfstand.

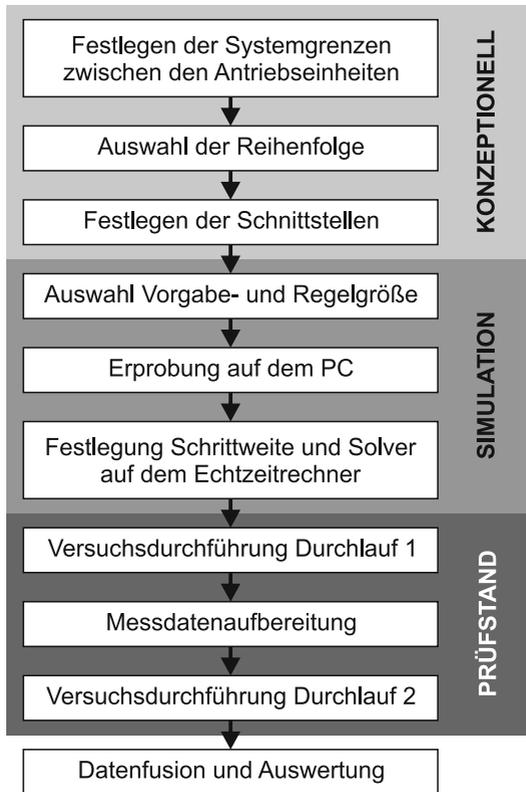


Abbildung 4.1: Ablauf des sequentiellen Versuchs

4.1 Validierungskonzept

Die einfachste Variante, ein Antriebssystem in mehreren getrennten Antriebseinheiten auf dem Prüfstand zu untersuchen ist es, den Versuch in zwei Teilversuche, hier Durchläufe genannt, zu unterteilen. In den Durchläufen wird der Versuch mit jeweils einer Antriebseinheit auf dem Prüfstand gefahren. Der nicht auf dem Prüfstand abgebildete Teil wird simuliert. Bei diesem Vorgehen erhält man jedoch keine Verzahnung der beiden Durch-

läufe. Stimmt das Verhalten der verwendeten Simulationsmodelle mit den realen Komponenten überein, lassen sich die Daten aus einem solchen Versuch anschließend mit einem akzeptablen Fehler fusionieren. Zeigen die Modelle jedoch gegenüber den realen Komponenten Abweichungen hinsichtlich der abgegebenen mechanischen Leistung, können die beim ersten Durchlauf simulierten Betriebspunkte im zweiten Durchlauf nicht erreicht werden. In Folge dessen ergeben sich abweichende Geschwindigkeitsverläufe oder Leistungsverläufe an den Antrieben, und es ist nicht möglich, die Messdaten der beiden Versuche zu fusionieren. Um auch bei Simulationsmodellen, die für die Verwendung in der Echtzeitsimulation vereinfacht wurden, verwendbare Ergebnisse zu erhalten, ist ein Konzept notwendig, bei dem der zweite Durchlauf auf den Messdaten des ersten Durchlaufs aufbaut.

Zuerst wird das Antriebssystem des Fahrzeugs in zwei Antriebseinheiten aufgeteilt. Im Fall des als Beispiel ausgewählten Konzepts 4 wird, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, der elektrische Antrieb zur „Antriebseinheit 1“ und der verbrennungsmotorische Antrieb zur „Antriebseinheit 2“.

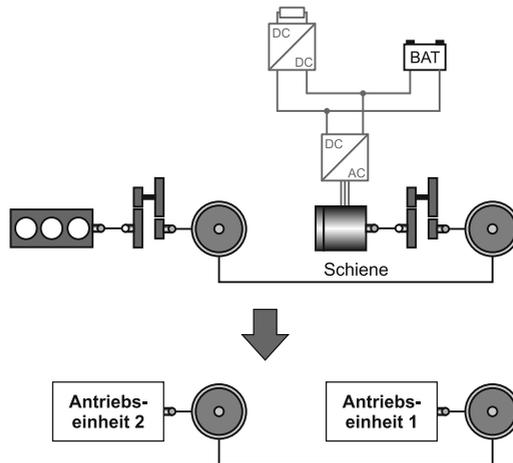


Abbildung 4.2: Aufteilung in Antriebseinheiten

Der in Abbildung 4.3 für das gewählte Beispiel dargestellte erste Durchlauf kann daher, wie schon beschrieben, als normaler Hardware-in-the-Loop Versuch gefahren werden. Als ein Fahrermodell dient als Regelung für die Vorgabe eines Soll-Moments an den Antrieb, es erhält von einem Fahrplan die Sollgeschwindigkeit. Aus dieser Vorgabe ermittelt die Hybridsteuerung die Aufteilung des Moments auf die Antriebe und leitet dieses an das simulierte (Antriebseinheit 2) und das reale Antriebssystem (Antriebseinheit 1) weiter. Im ersten Durchlauf werden Messdaten erfasst, die die Grundlage für den zweiten Durchlauf bilden. Einzelheiten dazu werden im Abschnitt 4.2 beschrieben.

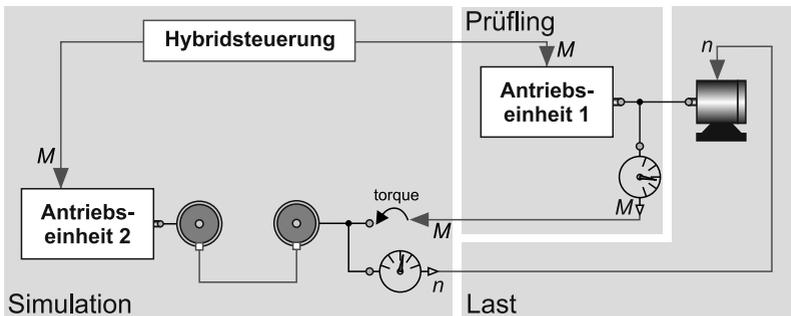


Abbildung 4.3: Durchlauf 1

Im zweiten Durchlauf müssen, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, die Vorgabewerte für Prüfstand und Simulation aus den Messwerten des ersten Durchlaufs ermittelt werden. Da die beiden Antriebseinheiten über die Räder und die Schiene miteinander verbunden sind, ergibt sich über die Randbedingung der Fahrzeuggeschwindigkeit eine identische Raddrehzahl für beide Antriebseinheiten zum gleichen Zeitpunkt. Außerdem muss die momentane Summe der Momente zu der aktuellen Geschwindigkeitsänderung und den Fahrwiderständen passen. Eine dieser Bedingungen kann als Vorgabewert direkt im zweiten Durchgang vorgegeben werden. Es ist ebenfalls möglich, die Ableitung beziehungsweise die Integration einer der Größen als Vorgabe

zu verwenden. Die Antriebseinheit 1 wird also durch einen Vorgabewert ersetzt. Die andere Bedingung ist als Regelgröße für Antriebseinheit 2 zu verwenden, um über den Freiheitsgrad des an die Antriebseinheit angeforderten Drehmoments die Randbedingungen einzuhalten. Die Auswahl von Vorgabe- und Regelgröße sowie die Auslegung des Reglers erfolgen in Unterabschnitt 4.3.2.

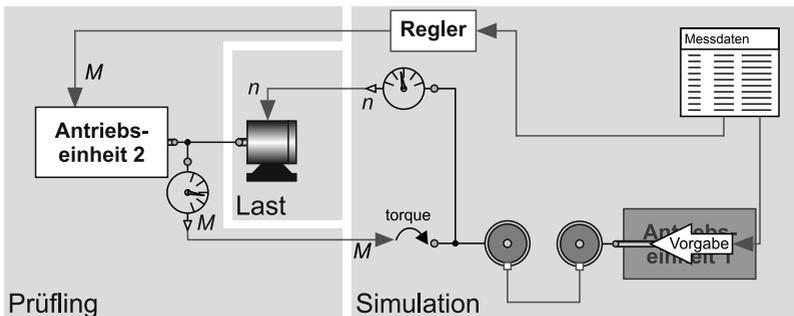


Abbildung 4.4: Durchlauf 2

4.2 Erster Durchlauf

Der erste Durchlauf wird als klassischer HiL-Versuch, wie in den Abschnitten 2.3.3 und 2.3.5 beschrieben, durchgeführt. Die Unit under Test ist eine der beiden Antriebseinheiten, der Rest des Fahrzeugs und seine Umwelt werden simuliert. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, kommt zur Ansteuerung ein Fahrermodell zum Einsatz, prinzipiell wäre es im ersten Durchlauf aber auch möglich, einen realen Fahrer einzubinden. Der Testfall sieht die Befahrung einer ausgewählten Strecke mit vorgegeben Maximalgeschwindigkeiten und einem vorgegebenen Fahrplan vor. Die Wahl der zur Einhaltung des Fahrplans erforderlichen Kombination aus Beschleunigungen und gefahrener Geschwindigkeit im Rahmen der vorgegebenen Maximalwerte obliegt dem Fahrer bzw. dem Fahrermodell.

4.2.1 Auswahl der Antriebseinheit für den Prüfstand

Es ist zweckmäßig, im ersten Durchlauf die Antriebseinheit mit der geringeren Leistungsreserve auf dem Prüfstand zu untersuchen. Durch diese Wahl ist die Wahrscheinlichkeit geringer, durch Modellfehler die geforderte Leistung, die der im ersten Durchgang simulierten Leistung entspricht, beim zweiten Durchlauf nicht erreichen zu können. Dann wäre eine weitere Iteration mit verringerter Leistungsbereitstellung der Antriebseinheit notwendig. Diese Beschränkung lässt sich eventuell speziell auf einen kritischen Betriebspunkt eingrenzen, an dem die Leistung aus dem ersten Durchlauf im zweiten Durchlauf nicht bereitgestellt werden kann.

Im Beispiel sind eine dieselmechanische Antriebseinheit und eine elektrische Antriebseinheit mit Kondensatorspeicher vorhanden. Die dieselmechanische Antriebseinheit bezieht ihre Energie aus dem Kraftstofftank, dessen Inhalt in den gefahrenen Versuchen als unbeschränkt angenommen wird. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da bei Schienenfahrzeugen der Tankinhalt in der Regel so gewählt wird, dass ein gewöhnlicher Betriebstag ohne Tanken bewältigt werden kann. Der Dieselmotor verfügt über keine nennenswerte kurzfristige Überlastbarkeit, da die Abgabeleistung durch das Steuergerät begrenzt wird. Die Kennlinie für die Begrenzung ist bekannt und in der Simulation umgesetzt.

Die elektrische Antriebseinheit bezieht ihre Energie aus einem vergleichsweise kleinen Kondensatorspeicher. Da die Leistungsabgabe durch den maximalen Strom begrenzt wird, ist die aktuell verfügbare Leistung zudem von der Spannung an den Kondensatoren und somit vom Ladezustand abhängig. Sowohl DC/DC-Steller, Wechselrichter als auch Fahrmotor bieten über ihre thermischen Zeitkonstanten eine hohe kurzzeitige Überlastbarkeit an. Das Verhalten der elektrischen Antriebseinheit ist also stark vom Ladezustand des Speichers und dem thermischen Verhalten der Komponenten abhängig. Dies kann schon bei geringen Abweichungen der Modellparameter von den realen Komponenten zu einer abweichenden Leistungsfähigkeit führen.

Aus den beschriebenen Überlegungen wird in dem hier betrachteten Beispiel die elektrische Antriebseinheit als der im ersten Durchlauf auf dem Prüfstand zu untersuchende Antrieb ausgewählt.

4.2.2 Systemgrenzen und Schnittstellen im ersten Durchlauf

Die im ersten Durchlauf auf dem Prüfstand vermessene elektrische Antriebseinheit besteht aus Kondensatorspeicher mit DC/DC Steller, Bremschopper mit Bremswiderstand, Wechselrichter, Asynchron-Fahrmotor, einem einstufigen Getriebe und dem Radsatz mit dem Rad-Schiene Kontakt und mechanischer Bremse.

Die Grenze des realen Systems auf dem Prüfstand wird an die Abtriebswelle des Fahrmotors gelegt. So kann auf eine Nachbildung des Rad-Schiene-Kontakts und der Getriebestufe auf dem Prüfstand verzichtet werden und die Schnittstelle erfordert geringere Drehmomente an dem Koppelsystem Lastmaschine. Der Speicher wird ebenfalls nicht real aufgebaut, die zweite Schnittstelle ist daher die Gleichspannungsseite des Wechselrichters. Die dritte Schnittstelle ist die informationstechnische Schnittstelle über die von der Hybridsteuerung das angeforderte Drehmoment vorgegeben wird.

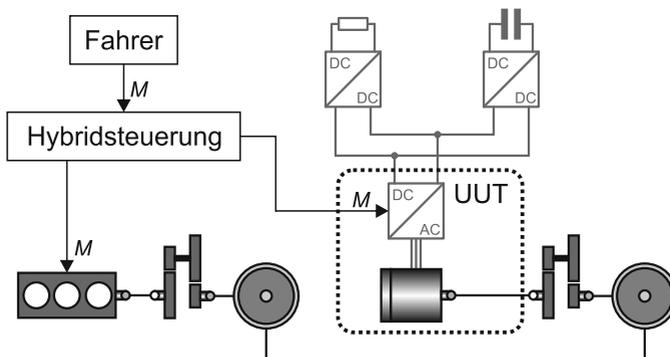


Abbildung 4.5: Systemgrenze zwischen UUT und Restfahrzeug

Abbildung 4.5 zeigt das Gesamtsystem mit der gestrichelt dargestellten Systemgrenze der Unit under Test. Alle Verbindungen, die über diese Systemgrenze laufen, müssen wie im folgenden Unterabschnitt 4.2.3 beschrieben in Signale zwischen Prüfstand und Simulation gewandelt werden.

An Messeinrichtungen stehen eine Drehmomentmesswelle und Strom- und Spannungsmessung zur Verfügung. Zur Umsetzung der Größen auf dem Prüfstand dient eine elektrische Einspeiseeinheit zur Energieversorgung und eine Lastmaschine zur mechanischen Belastung.

4.2.3 Aufteilung von Schnittstellen mit Fluss- und Potentialgrößen

Die im Modelica-Modell eingesetzten Konnektoren für mechanische Größen beinhalten jeweils eine Fluss- und eine Potentialgröße (Einzelheiten dazu in Unterabschnitt 2.2.2). Für den HiL-Versuchsaufbau gibt es sowohl bei elektrischen als auch bei mechanischen Größen Schnittstellen zwischen Simulation und Versuchsaufbau. Da die Daten zwischen Echtzeitrechner und Prüfstand nur in Form von gerichteten Signalen übertragen werden können, wird ein Konzept zur Aufteilung der Schnittstellen in gerichtete Größen benötigt.

In Abbildung 4.6 ist die gewählte Aufteilung dargestellt. Dabei wird aus einer der beiden Größen (oder einer daraus abgeleiteten Größe) der Vorgabewert, aus der anderen ein Messwert. Bei der mechanischen Schnittstelle wird das an der Welle des Prüflings anliegende Drehmoment gemessen und an eine Drehmomentquelle in der Simulation zurückgeführt. In der Simulation wird die sich ergebende Drehzahl (als abgeleitete Größe des Drehwinkels) der Welle abgegriffen und als Vorgabewert an die Lastmaschine gegeben.

An der elektrischen Schnittstelle ergibt sich analog eine Messung des Eingangsstroms des Wechselrichters und eine Spannungsvorgabe an die Versorgungseinheit des Prüfstands. Da eine solche Spannungsregelung mit der am

Prüfstand vorhandenen Versorgungseinheit nicht möglich ist, muss auf eine Leistungsmessung ausgewichen werden. In der Simulation wird dann aus der sich einstellenden Spannung der notwendige Strom berechnet. Durch eine abweichende Zwischenkreisspannung kann sich der Wechselrichter auf dem Prüfstand so in einen von der Simulation abweichenden Betriebspunkt befinden, jedoch sollten die Abweichungen, bei einem ausreichend dimensionierten DC/DC-Steller, der die Zwischenkreisspannung näherungsweise konstant halten kann, gering sein.

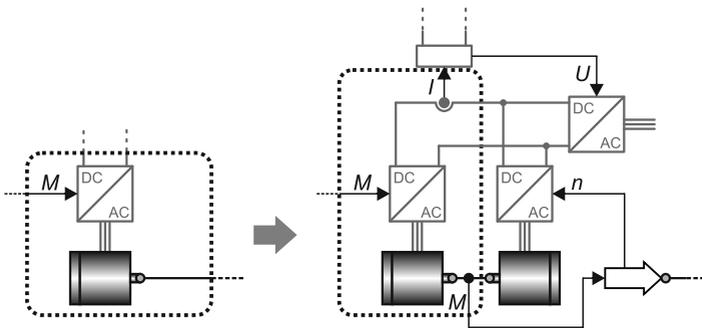


Abbildung 4.6: Aufteilung der Schnittstellen in gerichtete Größen

Schnittstellen, die aus einer Potential- und einer Flussgröße bestehen, werden also allgemein so aufgeteilt, dass eine der Größen am Prüfstand gemessen und in die Simulation zurückgeführt wird. Die zweite Größe wird in der Simulation ausgelesen und als Vorgabewert an den Prüfstand weitergeleitet.

4.3 Zweiter Durchlauf

Der zweite Durchlauf wird, um die Messdaten der beiden Durchläufe anschließend möglichst gut fusionieren zu können, nicht als klassischer HiL-Versuch durchgeführt. Stattdessen wird ein Teil des simulierten Restfahrzeugs durch die im ersten Durchlauf erfassten Messdaten ersetzt. Diese

Messdaten müssen allerdings je nach Abtastfrequenz bei der Aufzeichnung vor der weiteren Verwendung gefiltert werden, um eine übermäßige Schwingungsanregung des Systems zu vermeiden.

4.3.1 Systemgrenzen und Schnittstellen im zweiten Durchlauf

Im zweiten Durchlauf wird im gewählten Beispiel das dieselmechanische Antriebssystem auf dem Prüfstand vermessen. Auch hier werden wie im ersten Durchlauf das Getriebe und der Rad-Schiene-Kontakt nicht auf dem Prüfstand eingebunden, und die Systemgrenze wird zwischen Verbrennungsmotor und Schaltgetriebe gelegt. Die Aufteilung in Unit under Test und Restfahrzeug ist in Abbildung 4.7 abgebildet.

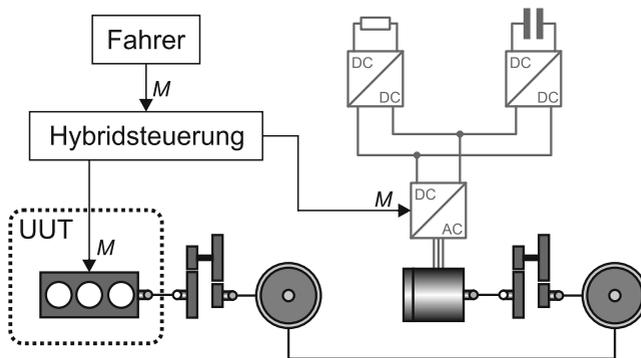


Abbildung 4.7: Systemgrenze zwischen UUT und Restfahrzeug im zweiten Durchlauf

Da auf dem Prüfstand kein Verbrennungsmotor vorhanden ist, muss er im Rahmen dieser Arbeit mit der vorhandenen Asynchronmaschine nachgebildet werden. Gemessen werden Drehzahl und Drehmoment am Abtrieb der Maschine. Aus diesen Werten wird ein theoretischer Kraftstoffverbrauch aus einem hinterlegten Wirkungsgradkennfeld berechnet. Das gemessene Drehmoment wird außerdem in die Simulation zurückgeführt.

Die schon im ersten Durchlauf auf dem Prüfstand vermessene Antriebseinheit wird durch die aufgezeichneten Messwerte nachgebildet, daher muss das Restfahrzeug für die Simulation weiter unterteilt werden. Die elektrische Antriebseinheit wird durch eine Quelle ersetzt, die die Messwerte aus dem ersten Durchlauf im Rad-Schiene-Kontakt als feste Vorgabe umsetzt. Fahrer und Hybridsteuerung werden durch einen Regler ersetzt, der über die Momentenvorgabe an den Verbrennungsmotor einen zum ersten Durchlauf möglichst konsistenten Verlauf erreichen soll. Die genaue Festlegung von Regel- und Vorgabegröße erfolgt im folgenden Unterabschnitt 4.3.2. Als simulierte Bestandteile des Restfahrzeugs verbleiben somit nur der Rad-Schiene-Kontakt und das Fahrwiderstandsmodell. Aus dem Drehmomentengleichgewicht im Antriebsstrang ergibt sich in der Simulation die Drehzahl der Welle zwischen Verbrennungsmotor und Getriebeeingang. Mit dieser Drehzahl als Vorgabewert wird die Lastmaschine des Prüfstands angesteuert.

4.3.2 Vorgabe- und Regelgröße

Die Vorgabe der Sollwerte im zweiten Durchlauf besteht aus einer Regelgröße und einer Vorgabegröße. Die Vorgabegröße ersetzt die im ersten Durchlauf vermessene Antriebseinheit und bildet deren Verhalten an der festgelegten Systemgrenze nach. Da über das Fahrzeug und die zweite Antriebseinheit weitere Freiheitsgrade bestehen, ist es nicht möglich, Fluss- und Potentialgröße der Schnittstelle gleichzeitig fest vorzugeben. Wäre dies der Fall, hätte die Antriebseinheit auf dem Prüfstand keinen Freiheitsgrad mehr. Dies führt bei einem System mit Mess- und Modellfehlern dazu, dass es nicht möglich ist, das Teilsystem auf dem Prüfstand so zu fahren, dass die Messwerte anschließend fusioniert werden können. Daher stehen für die Vorgabe nur eine der beiden Größen oder ein aus den Größen berechneter Wert zur Verfügung. Die Größen können in Abhängigkeit der zurückgeleg-

ten Strecke oder in Abhängigkeit der vergangenen Zeit aus einer Tabelle ausgegeben werden.

Mit der Regelgröße wird die Ansteuerung der Antriebseinheit auf dem Prüfstand so ausgeführt, dass im Prüfablauf möglichst geringe Unterschiede zum ersten Durchlauf auftreten, also die Geschwindigkeitsverläufe und die Energiebilanzen eine möglichst gute Übereinstimmung aufweisen. Eine völlige Übereinstimmung ist allein durch Mess- und Modellfehler nicht möglich. Die Antriebseinheit kann auf alle Größen geregelt werden, die den Gesamtzustand des Fahrzeugs beschreiben, also die Weg-Koordinate und deren Ableitungen. Höhere Ableitungen als die zweite (Beschleunigung) zeigen in der Simulation keine sinnvollen Ergebnisse. Außerdem ist die Regelung auf eine zum ersten Durchlauf identische Energiebilanz möglich.

Regelgröße	Vorgabe
Weg	Drehzahl
Geschwindigkeit	Drehmoment
Beschleunigung	Leistung
Energiebilanz	

Tabelle 4.1: Mögliche Regel- und Vorgabegrößen

Die zur Auswahl stehenden Größen für Regel- und Vorgabegröße sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Es können allerdings nicht alle Kombinationen umgesetzt werden, da Regelgröße und Vorgabewert nicht fest gekoppelt sein dürfen. Es ist daher beispielsweise nicht möglich, die Drehzahl vorzugeben und auf Weg, Geschwindigkeit oder Beschleunigung zu regeln, da diese durch die Koppelung über die Strecke direkt von der Drehzahl der anderen Antriebseinheit abhängen. Die Regelabweichung wäre somit immer null und die Traktionsleistung würde ausschließlich durch die über den Vorgabewert nachgebildete Antriebseinheit erbracht. Vorgabe- und Regelgröße müssen im zweiten Durchlauf in Abhängigkeit der Zeit ausgegeben werden,

um ein Anhalten an Unterwegsbahnhöfen zu ermöglichen. Bei einer Wegbasierten Vorgabe der Werte kommt das Fahrzeug entweder nicht zum Halten oder es kann anschließend nicht mehr anfahren, da an dem momentanen Wegpunkt Werte für den Stillstand vorgegeben werden.

Die Regelung auf den zurückgelegten Weg liefert bei direkter Regelung sehr schlechte Ergebnisse. Daher wird sie als kaskadierter Regler ausgeführt. Den inneren Regelkreis bildet ein Geschwindigkeitsregler. Dieser erhält seinen Sollwert vom langsameren äußeren Wegregler. Der Aufbau des Regelkreises ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

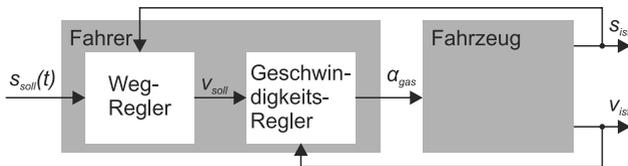


Abbildung 4.8: Ausführung des Weg-Reglers

Ziel des Reglers ist es, die Messdaten der beiden Durchläufe anschließend möglichst gut fusionieren zu können. Dafür ist in erster Linie ein möglichst identischer Geschwindigkeitsverlauf erforderlich. Allerdings führt, wie die Simulationen in Unterabschnitt 4.4.1 zeigen, eine Regelung nur auf die Geschwindigkeit zu Abweichungen in der zurückgelegten Strecke und somit in der Erfüllung der Arbeitsaufgabe. Um solche Einflüsse zu verringern, wird in [57] ein Konzept vorgestellt, um in der Simulation mobiler Arbeitsmaschinen mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit vergleichbare Zyklen zu fahren. Aus mehreren Eingangsgrößen, hier der Geschwindigkeit über der Strecke und der Strecke über der Zeit, wird über einen Bewerter ein neuer Wert generiert, auf den geregelt werden kann. Um das Verhalten eines menschlichen Fahrers nachzubilden, wird bei niedrigen Geschwindigkeiten

verstärkt auf die Strecke geregelt, bei höheren Geschwindigkeiten verstärkt auf die Geschwindigkeit. Das Reglerkonzept ist in Abbildung 4.9 skizziert.

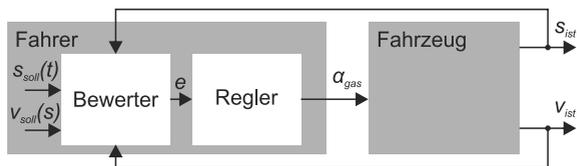


Abbildung 4.9: Bewerter-Regler System nach [57]

Da auf eine Kombination aus Geschwindigkeit und Strecke geregelt wird, ist es möglich, die Soll-Geschwindigkeit Weg-basiert auszugeben und trotzdem wieder anfahren zu können. Für den Bewerter wird in [57] folgende Funktion vorgeschlagen:

$$e = \operatorname{sgn}(v_{ist}) \cdot \left(\Delta v \cdot \frac{|v_{ist}|}{v_{max}} + \Delta s \cdot \left(1 - \frac{|v_{ist}|}{v_{max}} \right) \right) \quad (4.1)$$

Davon abweichend soll, um vorgegebene Höchstgeschwindigkeiten besser einzuhalten, die Geschwindigkeitsvorgabe auch bei mittleren Geschwindigkeiten stärker gewichtet werden. Es wird daher statt des linearen Übergangs zwischen Strecken- und Geschwindigkeitsregelung eine Wurzelfunktion verwendet.

$$e = \operatorname{sgn}(v_{ist}) \cdot \left(\Delta v \cdot \sqrt{\frac{|v_{ist}|}{v_{max}}} + \Delta s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{|v_{ist}|}{v_{max}}} \right) \right) \quad (4.2)$$

Als anschließender Regler findet ein gewöhnlicher PI-Regler Verwendung. Um bei Zwischenhalten das Fahrzeug im Stillstand zu halten und ein Nachregeln auf geringe Streckenabweichungen zu verhindern, wird die Differenz Δs aus s_{ist} und s_{soll} während der Haltezeiten zu -1 gesetzt. Dadurch wird

durch das Fahrermodell so lange gebremst, bis wieder eine Geschwindigkeitsanforderung vorliegt.

Für den Vorgabewert werden die verschiedenen Möglichkeiten aus Tabelle 4.1 in der Simulation in Unterabschnitt 4.4.1 getestet. Das beste Ergebnis zeigt eine Vorgabe der Leistung über der Zeit. Durch die Leistungsvorgabe, deren Umsetzung in Unterabschnitt 4.3.3 näher beschrieben wird, ergeben sich sehr geringe Abweichungen in der Energiebilanz, und Beschleunigungsvorgänge werden sehr gut umgesetzt. Nachteilig ist, dass sich bei abweichender Drehzahl Betriebspunkte einstellen können, die das reale Antriebssystem nicht erreichen kann. Gerade bei einem Verbrennungsmotor, bei dem das zur Verfügung stehende Drehmoment beim Anfahren stark von der Drehzahl abhängig ist, entstehen hier große Fehler. Bei einem Elektromotor mit über der Drehzahl konstantem Anfahrmoment wie im vorgestellten Beispiel sind diese Abweichungen gering.

4.3.3 Leistungsvorgabe in der Simulation

Zur Umsetzung einer Leistungsvorgabe in Modelica wird eine entsprechende Quelle benötigt, die in der Modelica Standard Library nicht enthalten ist und daher neu erstellt werden muss. Die Leistungsquelle erhält einen Leistungswert als Vorgabewert und gibt die Leistung an einem rotatorischen mechanischen Konnektor ab. Dazu wird der vorgegebene Wert durch die Winkelgeschwindigkeit geteilt und über eine Drehmomentenquelle ausgegeben. Um Probleme bei der Berechnung bei sehr niedrigen Drehzahlen und im Stillstand zu vermeiden, wird der minimale Drehzahlwert auf 1 rad/s beschränkt. Durch diese Vorgabe wird gleichzeitig eine Begrenzung des abgegebenen Drehmoments bei begrenzten Leistungsvorgaben erreicht.

Wird zusätzlich zu der dargestellten Variante noch das Ausgangsdrehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl begrenzt, zum Beispiel über eine hinterlegte Kennlinie, kann sichergestellt werden, dass der ausgegebene Drehmomentenverlauf mit der realen Antriebseinheit umsetzbar ist. Aller-

dings ergibt sich dann unter Umständen bei Abweichungen im Geschwindigkeitsprofil eine Abweichung in der Energiebilanz des Antriebssystems, in dem entweder beim Beschleunigen weniger Energie dem Fahrzeug zugeführt wird oder beim Bremsen die im ersten Durchlauf gefahrene Verzögerung nicht erreicht werden kann. Zwischen den Vor- und Nachteilen muss abgewogen werden, allerdings konnte in der simulativen Erprobung in Unterabschnitt 4.4.1 kein nennenswerter Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden; daher wurde auf die zusätzliche Drehmomentbegrenzung zur Vereinfachung des Modells verzichtet. Der schematische Aufbau des Modells ist als Blockschaltbild in Abbildung 4.10 dargestellt.

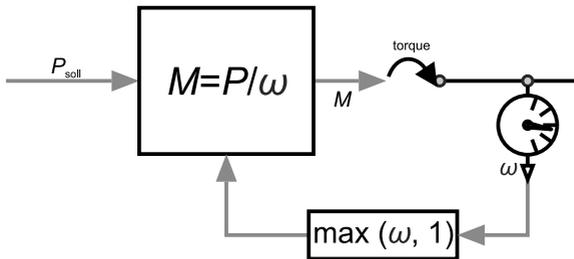


Abbildung 4.10: Modell zur Leistungsvorgabe

4.4 Versuchsdurchführung

In der Versuchsdurchführung findet zuerst eine Erprobung des Konzepts in der Simulation (MiL) statt, um verschiedene Varianten zu erproben und um Anpassungen vornehmen zu können. Die Vorgehensweise dazu wird in Unterabschnitt 4.4.1 vorgestellt. Die Simulationen laufen schneller als Echtzeit und ermöglichen so eine schnelle Anpassung und genaue Beobachtung der Abläufe, wie es später auf dem Prüfstand nicht mehr möglich ist. Anschließend wird das Modell auf den Echtzeitrechner portiert, und es werden Testläufe mit einem Fixed-Step-Solver durchgeführt. So können Abweichungen

durch die Wahl der Schrittweite untersucht werden und die Einhaltung der Echtzeit kontrolliert werden. Das so vorbereitete System wird anschließend in Unterabschnitt 4.4.3 auf dem Antriebssystemprüfstand als HiL Versuch gefahren.

4.4.1 Simulative Erprobung

Die simulative Erprobung des sequentiellen Versuchs wird in zwei Stufen durchgeführt. Zu Beginn erfolgt ein Test des Versuchsablaufs am PC in Dymola, anschließend erfolgen weitere Tests auf dem Echtzeitrechner.

Test in Dymola

Das Echtzeitmodell für das Restfahrzeug wird mit den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Komponentenmodellen in Dymola aufgebaut. Zu Beginn erfolgt eine rein simulative Erprobung des Restfahrzeugmodells in einer simulierten Prüfstands Umgebung (Model-in-the-Loop). In dem Modell werden bereits die späteren Schnittstellen zum Prüfstand als gerichtete Ein- und Ausgänge eingefügt.

Um das Verhalten des Prüfstands und der Messtechnik in der Simulation nachbilden zu können, wird ein Messfehler-Modell erstellt. Berücksichtigt werden Abweichung vom Nennwert und Abweichung von Messwert über normalverteilte Zufallswerte. Die ausgegebenen Werte werden auf den Messbereich begrenzt und über ein PT1 Glied geglättet. Zur Erzeugung der Zufallswerte werden die Modelle aus der „Noise“ Bibliothek in der Modelica Standard Library [30] verwendet. Der Aufbau des Messfehlermodells ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

Die Belastungsmaschinen werden mit dem auch in der Fahrzeugsimulation verwendeten Kennfeld-basierten Maschinenmodell nachgebildet. Modellbildungsfehler in dem Motormodell werden daher bei der simulativen Erprobung nicht erkannt beziehungsweise haben keine Auswirkung auf das Simulationsergebnis.

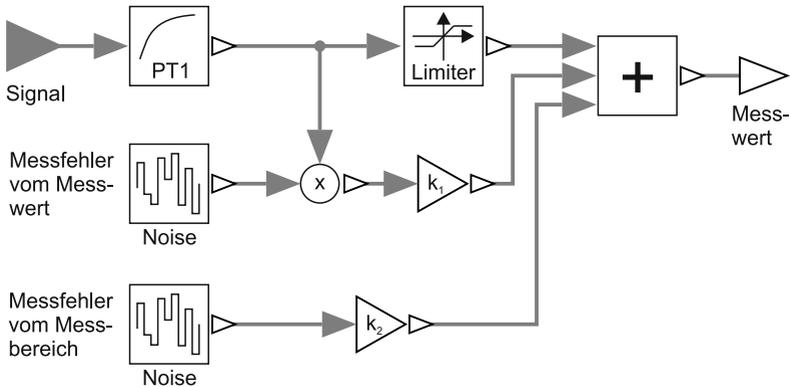


Abbildung 4.11: Modell zur Simulation der Messfehler am Prüfstand

Mit dem erstellten Modell werden Simulationen zur Auswahl der Mess- und Regelgröße durchgeführt. Die Simulation erfolgt mit einem Solver mit variabler Schrittweite. Durch die geringe Laufzeit der Simulationen können mit geringem Aufwand und Zeitbedarf viele Varianten untersucht und eine Variante für den Prüfstand ausgewählt werden.

Die in der Simulation untersuchten Kombinationen aus Regler und Vorgabewert sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Die Kombinationen aus Vorgabe und Regler in den Simulationen Nr. 6 und Nr. 8 führen zu einem sehr schlechten Fahrverhalten, die Strecke wird nicht vollständig durchfahren, und die Simulation bricht vor dem Erreichen des Zielbahnhofes ab. Durch die Verwendung des Messfehler-Modells mit Zufallswerten ergeben sich für alle Kombinationen beim mehrmaligem Durchlaufen der Simulation geringfügig abweichende Ergebnisse. Die grundsätzlichen Verhältnisse ändern sich jedoch nicht.

Abbildung 4.12 zeigt die simulierten Geschwindigkeitsverläufe des ersten Durchlaufs und der Varianten des zweiten Durchlaufs. Deutlich zu erkennen sind die teilweise großen Abweichungen im Geschwindigkeitsprofil,

insbesondere bei den Weg- und Beschleunigungsreglern. Dieser subjektive Eindruck wird durch die Werte in Tabelle 4.3 bestätigt. Dort sind die prozentualen Abweichungen bezüglich des ersten Durchlaufs für die zurückgelegte Strecke und die Energiebilanzen der beiden Antriebseinheiten zusammengestellt. Gut schneiden die Simulationen Nummer 1, 3, 5, 7 und 9 ab, also die Varianten mit Reglern auf Energiebilanz, Strecke und über den Bewerter auf eine Kombination aus Strecke und Geschwindigkeit.

Simulation Nr.	Vorgabewert	Regler
1	Drehzahl	Energiebilanz
2	Moment	Weg
3	Moment	Geschwindigkeit
4	Moment	Beschleunigung
5	Moment	Bewerter
6	Leistung	Weg
7	Leistung	Geschwindigkeit
8	Leistung	Beschleunigung
9	Leistung	Bewerter

Tabelle 4.2: Untersuchte Kombinationen aus Vorgabewert und Regler

Zur weiteren Auswahl werden nicht nur die Leistungsbilanzen sondern auch die Verläufe der Leistungsanforderung verglichen. Dargestellt ist dies für die Simulationen 1 und 9 in Abbildung 4.13. Zu erkennen ist, dass durch die Regelung auf die Energiebilanz diese sehr gut eingehalten wird, sich aber dadurch eine hochfrequente Änderung der Betriebspunkte der elektrischen Antriebseinheit ergibt, die nur noch eine geringe Ähnlichkeit mit den auf dem Prüfstand gefahrenen Zyklen hat. Die durchfahrenen Betriebspunkte liegen außerdem weit außerhalb der durch die reale Antriebseinheit erreichbaren Betriebspunkte.

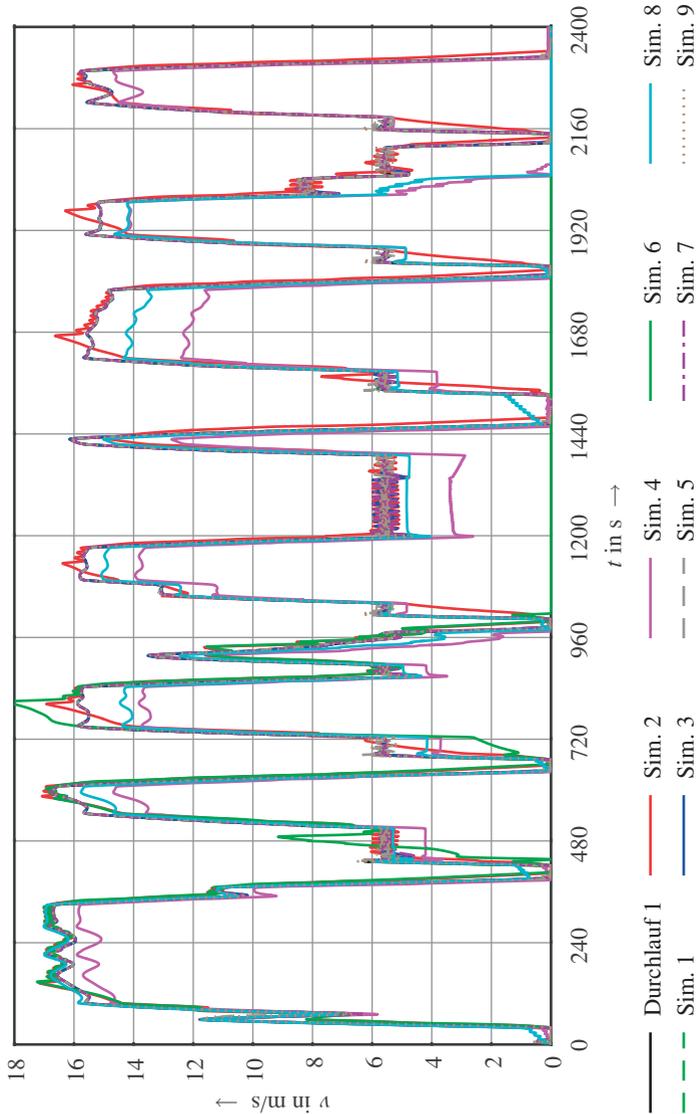


Abbildung 4.12: Geschwindigkeitsverläufe in den Simulationen zur Auswahl von Regler und Vorgabe

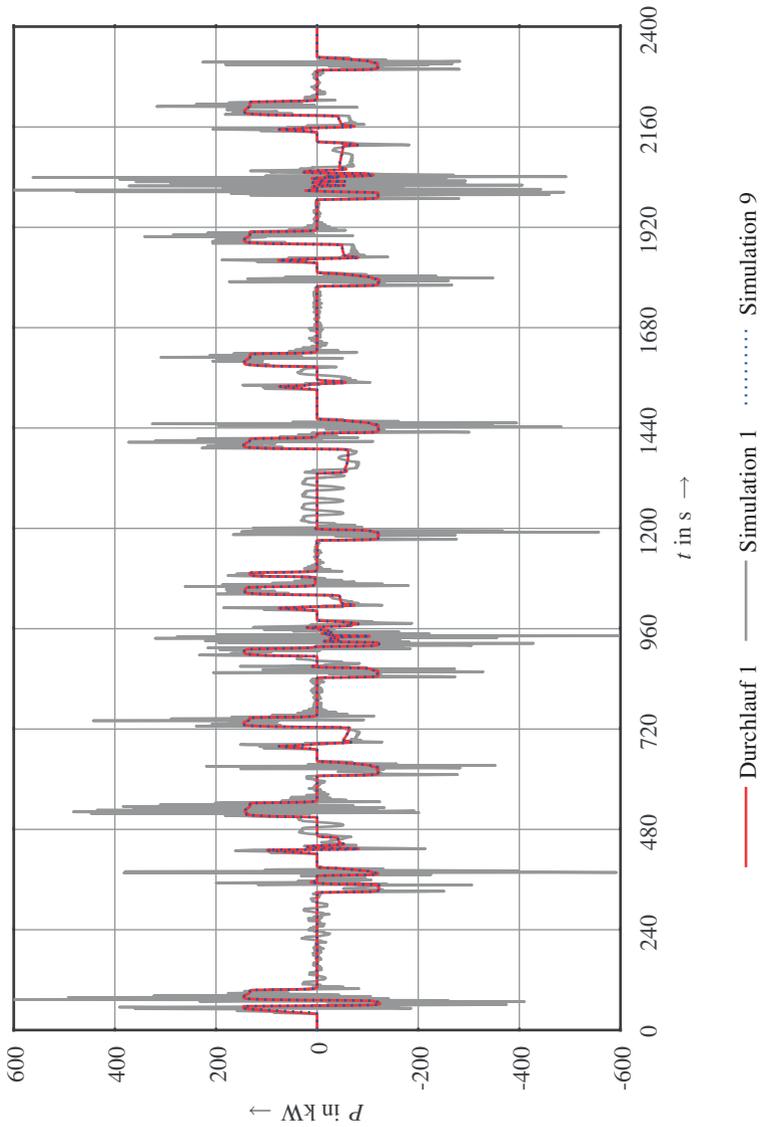


Abbildung 4.13: Leistung der elektrischen Antriebseinheit

Dagegen wird durch die Leistungsvorgabe in Kombination mit dem Bewerter das Profil gut wiedergegeben, lediglich die Integration über den Leistungsverlauf zeigt einen vergleichsweise großen Fehler, was auf die recht geringe resultierende Energiebilanz im Vergleich zu den Energien für die einzelnen Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen zurückzuführen ist.

Simulation Nr.	Abweichung Strecke	Abweichung Energiebilanz VKM	Abweichung Energiebilanz EM
1	0,0%	0,09%	0,96%
2	0,36%	17,96%	211,17%
3	-0,21%	1,76%	24,7%
4	-17,92%	-36,49%	-159,33%
5	0,0%	2,46%	18,38%
6	-53,97%	-60,98%	-67,60%
7	-0,17%	1,03%	14,97%
8	-15,99%	-24,13%	-54,73%
9	0,0%	1,29%	10,44%

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Kombinationen aus Vorgabewert und Regler

Auf Grund der besseren Nachbildung der Betriebspunkte der im ersten Durchlauf auf dem Prüfstand untersuchten Antriebseinheit und der sehr geringen Abweichung in der zurückgelegten Strecke (unter 0,2 m) wird die in Simulation 9 verwendete Kombination aus Leistungsvorgabe und Regelung auf Geschwindigkeit und Strecke mittels des Bewerter für die weiteren Versuche ausgewählt.

Test auf dem Echtzeitrechner

Als Echtzeitrechner kommt im Rahmen dieser Arbeit eine dSpace AutoBox zum Einsatz. Als Prozessorbord ist der Typ DS1005-06 mit einer Taktfrequenz des Prozessors von 480 MHz verbaut. Außerdem ist die AutoBox mit Schnittstellenkarten für analoge und digitale Ein- und Ausgänge sowie mehreren CAN-Kanälen ausgerüstet. Die Kommunikation mit dem Prüfstand erfolgt über einen CAN-Kanal. Die Messwerte von Prüfstand werden teilweise als Analogsignale und teilweise über einen separaten CAN-Kanal übertragen.

Das in Dymola getestete Modell von Antriebsstrang und Restfahrzeug wird als Dymola-Block in ein Simulink-Modell importiert und auf die als Echtzeitrechner genutzte Autobox exportiert. Die Hybridsteuerung wird direkt in Simulink umgesetzt, da die signalfussorientierte Variante einfacher aufgebaut werden kann und sehr zuverlässig läuft. Die Simulationsmodelle der Messabweichung sind auf der Autobox nicht lauffähig; daher werden für die weitere Erprobung die später an den Prüfstand übermittelten Sollwerte mit einem Zeitschritt Verzögerung als Istwerte wieder in die Simulation zurückgeführt.

In Tabelle 4.4 sind die für die Erprobung auf dem Echtzeitrechner und für die Versuche auf dem Prüfstand verwendeten Programmversionen zusammengestellt. Es gibt jeweils nur bestimmte Versionen, die zusammen beziehungsweise mit dem verwendeten Prozessorboard lauffähig sind.

Programm	Version
Dymola	2017
Matlab Simulik	2015a
D-Space Control Desk	5.5

Tabelle 4.4: Verwendete Programmversionen

Auf der Autobox werden die Auswahl Solver und Zeitschritt durchgeführt, die Echtzeitfähigkeit des Modells überprüft und die Messdatenspeicherung implementiert. Der Fokus liegt hier auf dem von der Rechenleistung her anspruchsvolleren ersten Durchlauf. Das dort verwendete Simulationsmodell ist wesentlich komplexer als das im zweiten Durchlauf verwendete.

Als Zeitschritte werden 0,01 s, 0,001 s und 0,0001 s erprobt, als Solver Euler und Ruge-Kutta. Bei einem Zeitschritt von 0,01 s ist die Simulation mit beiden Solvern nicht lauffähig. Wird der Zeitschritt auf 0,0001 s verkleinert, ist die Simulation auf dem verwendeten Prozessorboard nicht mehr in Echtzeit lauffähig. Bei einem Zeitschritt von 0,001 s wird die Simulation mit beiden Solvern in Echtzeit ausgeführt. Da keine Unterschiede bei den Ergebnissen erkennbar sind, wird der weniger rechenintensive Euler-Algorithmus als Solver verwendet. Der zweite Durchlauf wird mit identischen Einstellungen simuliert.

Die Messdatenaufzeichnung wird über die auf der Autobox vorhandene Recorder-Funktion realisiert. Es können dort alle in der Simulation bzw. auf den Ein- und Ausgangskanälen der Autobox anliegenden Signale ausgewählt werden. Es wird ein Wert pro Signal und Zeitschritt aufgezeichnet. Da als Zeitschritt nicht exakt der eingestellte Wert übernommen sondern ein ganzzahliges Vielfaches der Prozessor-Rechenschritte verwendet wird, ergibt sich eine Aufzeichnung von 943 bis 944 Messwerten pro Sekunde. Am Anfang der Aufzeichnung fehlen während des Starts der Simulation die Messwerte von ca. 3 s. Die Aufzeichnung stoppt automatisch mit dem Ende der Simulation bei 2400 Sekunden. Die Messwerte können anschließend als Matlab-File exportiert werden.

4.4.2 Antriebssystemprüfstand

Für Untersuchungen an Antriebsstrangkomponenten und kompletten Antriebssträngen verfügen das Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen und das Teilinstitut Bahnsystemtechnik am Institut für Fahrzeugsystemtechnik des

KIT über einen flexibel einsetzbaren Antriebssystemprüfstand. Mit einer Erweiterung um eine Ansteuerung durch einen Echtzeitrechner über eine CAN-Schnittstelle ist der Prüfstand seit 2016 auch für HiL-Versuche geeignet. Eine ausführliche Beschreibung des Prüfstands und seiner technischen Daten vor der Erweiterung um die CAN-Schnittstelle befindet sich in [45].

Mechanischer und elektrischer Aufbau

Der mechanische Teil des Prüfstands besteht aus einem 4 m x 5 m großen Maschinenbett, dessen Schwingungen mittels Luftfederelementen von der Versuchshalle entkoppelt sind. Auf dem Maschinenbett können 3 Asynchronmaschinen als Last- und Antriebsmaschinen frei positioniert werden. Bei den Maschinen handelt es sich um eigenventilierte Maschinen aus einer Stadtbahn mit einer Nennleistung von 130 kW. Weitere technische Daten zu den Maschinen sind in Tabelle 4.5 zu finden.

Größe	Wert
Nennleistung	130 kW
Nennmoment	697 Nm
Nenn Drehzahl	1781 min ⁻¹
Nennspannung	430 V
Nennstrom	228 A
maximales Moment	1200 Nm
maximale Drehzahl	5500 min ⁻¹
Wellenhöhe	450 mm
Gewicht (nur Maschine)	441 kg
Gewicht (inkl. Unterbau)	900 kg

Tabelle 4.5: Technische Daten der Prüfstandsmotoren

Die Anbindung der Maschinen an Prüflinge erfolgt über Gelenkwellen, um Fehler bei der Ausrichtung auf dem Maschinenbett ausgleichen zu können. Jede Maschine ist mit einem kombinierten Drehzahl-Drehmoment Messaufnehmer vom Typ HBM T40b mit einem Messbereich bis $\pm 1000\text{Nm}$ ausgerüstet, in einer Maschine sind zusätzlich Thermoelemente zur Bestimmung der Wicklungstemperatur eingebaut.

Der elektrische Aufbau des Prüfstands besteht aus drei Wechselrichtern (WR) mit jeweils 250 A Dauerstrom und einem DC/DC-Steller, die an einem gemeinsamen Gleichspannungs-Zwischenkreis betrieben werden. Die Versorgung des Zwischenkreises erfolgt über eine aktive Einspeiseeinheit mit anpassbarer Zwischenkreisspannung zwischen 560 V und 800 V. Die Einspeiseeinheit (Power Supply Unit, PSU) ist rückspisefähig, so dass die Lastmaschinen auch dauerhaft generatorisch betrieben werden können. Werden die Prüfstandsmaschinen teilweise als Antriebs- und teilweise als Belastungsmaschinen eingesetzt, muss in den gemeinsamen Zwischenkreis nur die Verlustleistung eingespeist werden, wodurch der Prüfstand mit einer vergleichsweise geringen Anschlussleistung betrieben werden kann. Die Leistungselektronik ist wassergekühlt ausgeführt. Zur Vermeidung kurzzeitiger Spannungsspitzen im Zwischenkreis ist zusätzlich zur Einspeiseeinheit ein Bremschopper mit Bremswiderstand eingebaut. Eine schematische Darstellung des Schaltplans zeigt Abbildung 4.14.

Zur Messung elektrischer Größen steht am Prüfstand ein Leistungsmessgerät vom Typ LMG 500 mit acht Kanälen von ZES Zimmer zur Verfügung. Das Messgerät ist mit einem externen Strom-Messwandler mit einem einstellbaren Messbereich von bis zu 1000 A ausgerüstet, die Spannungsmessung kann bis 1000 V direkt im Gerät erfolgen. Die Ausgabe der Messwerte ist über eine Netzwerkverbindung oder über analoge Ausgangskanäle möglich.

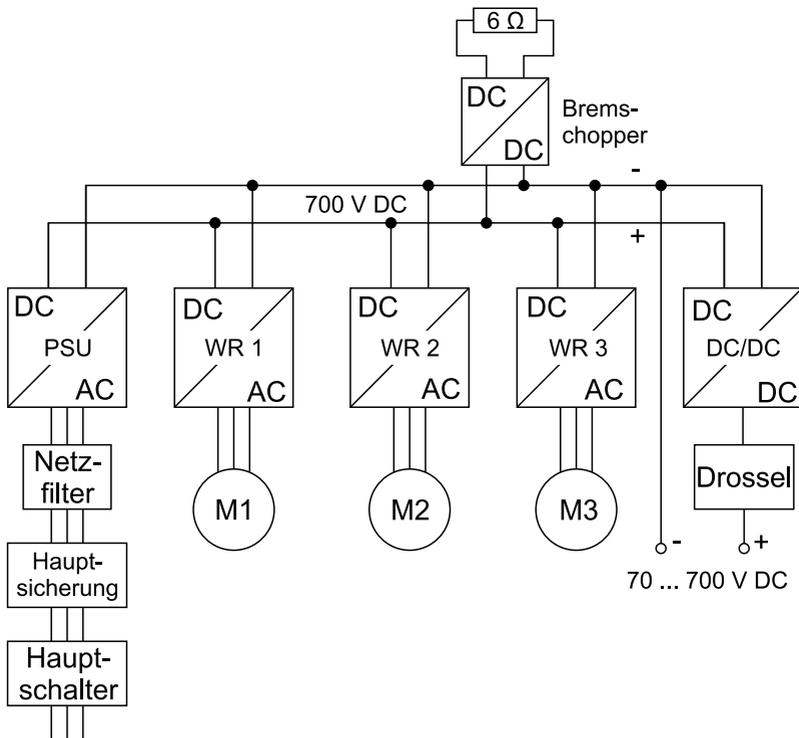


Abbildung 4.14: Schematischer Schaltplan des Prüfstands

Steuerung und Sicherheitskonzept

Die Ansteuerung des Prüfstands ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vom Typ S7 1200 von Siemens realisiert. Die Prüfstandssteuerung bietet ein Nutzerinterface zur Einstellung und Bedienung des Prüfstands. Die Sicherheitsfunktionen des Prüfstands, wie beispielsweise „Not-Aus“, sind dagegen fest verdrahtet ausgeführt. Zusätzlich ist ein auch aus Software auslösbarer Not-Halt implementiert, der den Prüfstand kontrolliert herunterfährt.

Die Bedienung des Prüfstands kann manuell oder automatisiert erfolgen. Bei der manuellen Bedienung erfolgt die Sollwertvorgabe an die Wechselrichter (Drehzahl oder Drehmoment) über Potentiometer im Bedienpult oder über einen externen analogen Sollwert über einen Spannungseingang ($-10 \dots 10 \text{ V}$). Die Sollwerte werden über Analogeingänge der SPS erfasst, geprüft und an die Wechselrichter übertragen. In der SPS lassen sich für diese Werte Vorzeichen, Offset und Grenzen einstellen. Die Freigaben zum Laden des Zwischenkreises und die Regelfreigaben für die einzelnen Wechselrichter werden manuell über das Display der SPS erteilt. Die SPS überprüft dabei, ob alle Bedingungen für eine Freigabe erfüllt sind und leitet die Freigaben dann an die Wechselrichter weiter.

Für einen Automatikbetrieb ist die Ansteuerung des Prüfstands über ein CAN-Interface möglich. Über den CAN-Bus lassen sich Vorgabewerte und Regelfreigaben übermitteln. Zusätzlich ist ein Watchdog-Signal implementiert. Das Watchdog-Signal wird von dem steuernden Rechner gesendet und besteht aus einem Zahlenwert, der mit jeder CAN-Botschaft hochgezählt wird, bis ein maximaler Wert erreicht ist. Anschließend beginnt das Signal wieder bei null. Der Wert des Watchdog-Signals wird in eine Datenbank geschrieben, die die SPS in festen Zeitabständen ausliest. Für eine ordnungsgemäße Funktion muss das Ausleseintervall kleiner sein als das Intervall, das für einen Zählvorgang von null bis zum Maximalwert des Watchdog-Signals benötigt wird. Ändert sich der in der Datenbank gespeicherte Wert zwischen zwei Auslesevorgängen nicht, zum Beispiel weil der steuernde Rechner abgestürzt ist und keine oder nur noch identische CAN-Botschaften sendet, wird der Prüfstand über die „Not-Halt“-Funktion abgeschaltet. Der Prüfstand ist über die SPS überwacht und schützt sich selbst, es sind also keine weiteren Sicherheitsfunktionen über die Simulation bereitzustellen [55], [27]. Zur Diagnose lassen sich am Display der SPS die Fehler, die zum Auslösen der Not-Halt Funktion geführt haben, anzeigen.

4.4.3 Versuche auf dem Prüfstand

Nach der Ermittlung des erforderlichen Zeitschritts in Abschnitt 4.4.1 erfolgt die Durchführung der eigentlichen Versuche auf dem Antriebssystemprüfstand. Gegliedert sind die Versuche weiterhin nach Durchlauf 1 und Durchlauf 2, dazwischen erfolgt eine Aufbereitung der Messdaten des ersten Durchlaufs für die weitere Verwendung.

Durchlauf 1

Der umgesetzte Versuchsaufbau für den ersten Durchlauf mit den benötigten Komponenten des Antriebssystemprüfstands, den auf der AutoBox simulierten Komponenten und der Kommunikation zwischen AutoBox und Prüfstand ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Es sind nur die Messstellen dargestellt, die für die Durchführung des sequentiellen Versuchs benötigt werden. Um eine Validierung der Eigenschaften des Antriebssystems durchführen zu können, werden weitere Messstellen an den Komponenten auf dem Prüfstand benötigt. Der Motor „M2“ wird als Prüfling eingesetzt und bildet den Fahrmotor nach. Der Motor „M1“ ist die Lastmaschine.

Um eine Schwingungsanregung des Systems zu vermeiden, wird das zurückgeführte Drehmomentsignal mit einem Tiefpass mit einer Grenzfrequenz von 500Hz gefiltert, so dass die Drehmomentwelligkeit über eine Umdrehung verringert wird. Die Messwerte werden in jedem Zeitschritt erfasst und erst später für die Verwendung im zweiten Durchlauf über größere Zeiträume gemittelt. Die Übertragung der Sollwerte von der Autobox an den Prüfstand erfolgt nur mit einer Frequenz von 200Hz, um eine sichere Verarbeitung in der SPS zu ermöglichen. In den Wechselrichtern werden die Werte linear interpoliert und über Rampen im Anstieg begrenzt, wodurch sich insgesamt eine Totzeit von ca. 0,01 s ergibt.

Die Prüfstandsmaschinen werden vor Versuchsbeginn auf Betriebstemperatur gebracht, um Änderungen im Verhalten der Maschinen während des Versuchs gering zu halten.

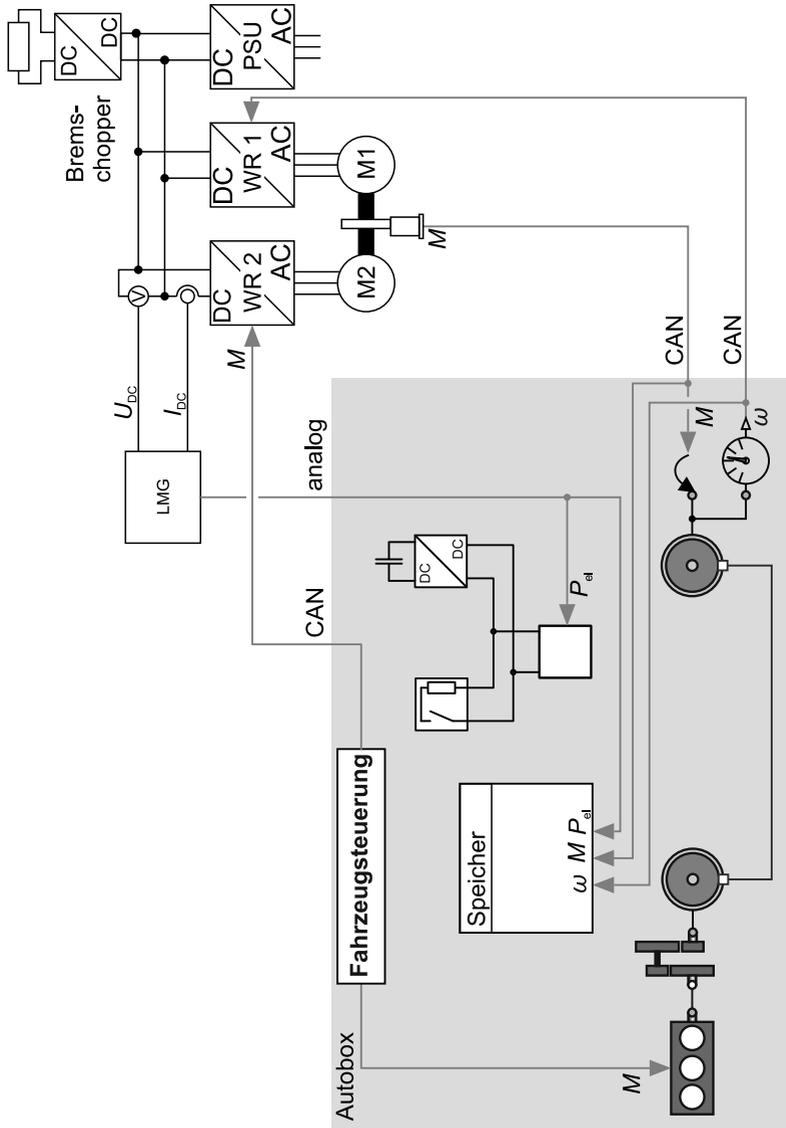


Abbildung 4.15: Durchlauf 1 auf dem Prüfstand

Problematisch ist auf dem Prüfstand der Anfahrvorgang. Bei diesem sind leichte Schwingungen festzustellen. Diese lassen sich einerseits durch ein schlechtes Regelverhalten der Drehzahlregelung der Lastmaschine bei kleinen Drehzahlen und andererseits durch die sprunghafte Änderung des geschwindigkeitsunabhängigen Anteils des Rollwiderstands in der Simulation beim Übergang zwischen Stillstand und Bewegung im Fahrwiderstandsmodell erklären. Die Schwingungen treten beim Anfahren nur kurzzeitig auf und haben keine relevanten Auswirkungen auf das Ergebnis des Versuchs.

Aufbereitung der Messdaten

Die im ersten Durchlauf aufgezeichneten Messdaten als Vorgabewerte für den zweiten Durchlauf müssen vor der Verwendung aufbereitet werden. Zum einen muss die Anzahl der Werte reduziert werden, um sie in einem Lookup-Table in die Simulation einbinden zu können, zum anderen muss für den Bewerter die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Strecke ausgegeben werden. Die Streckenwerte müssen hierfür streng monoton steigend sein, um eine Zuordnung zu ermöglichen. Im Stillstand oder wenn das Fahrzeug im ersten Durchlauf beim Anfahren leicht zurückrollt, ist dies nicht gegeben.

Zusätzlich ist es außerdem möglich, die Messdaten zu filtern, um mögliche Schwingungsanregungen zu vermindern. Nach Möglichkeit sollten die Daten aber wenig verändert werden, beziehungsweise nur so, dass sich die Abweichung der Werte zu den Messdaten im Bereich der Messunsicherheit befindet. Bei stärkeren Veränderungen wird eine spätere Fusionierung der Messdaten aus erstem und zweitem Durchlauf erschwert.

Die Aufbereitung der Messdaten erfolgt in Matlab. Im vorgestellten Beispiel wird die Abtastrate auf zirka einen Messwert pro Sekunde durch Mittelwertbildung über jeweils 1000 Messwerte verringert. Da die Anzahl der Messwerte pro Sekunde nicht konstant ist, wird jeweils die Zeit des fünfhundertsten von den tausend Messwerten verwendet, so dass sich ein Zeitschritt

zwischen den Messwerten von zirka 1,0526s ergibt. Eine Filterung der Messwerte, die über das integrierte Filter des Drehmoment-Messverstärkers hinausgeht, wird nicht durchgeführt.

Zum Erstellen des Geschwindigkeit-Signals über der Strecke wird jeweils der Geschwindigkeitswert aus dem Zeitschritt verwendet, in dem ein Streckenmeter zum ersten Mal überschritten wurde. Dazu wird die Tabelle mit den Streckenwerten über der Zeit jeweils der erste Eintrag gesucht, der größer als der gesuchte Streckenmeter ist. Der Streckenmeter mit diesem Index und die Geschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt werden in einer neuen Tabelle gespeichert. Eventuelle negative Geschwindigkeiten werden zu null gesetzt. Ein Wert pro Streckenmeter liefert eine ausreichende Auflösung. Die Werte werden für die Ausgabe zwischen den Messwerten linear interpoliert.

Durchlauf 2

Abbildung 4.16 zeigt den Versuchsaufbau für den zweiten Durchlauf. Die Messwerte des ersten Durchlaufs sind in Form von Lookup-Tables in das Simulationsmodell eingebunden und wirken so auf das Fahrzeugmodell. Die Maschine „M2“ wird wieder als Prüfling verwendet und anstelle des Verbrennungsmotors eingesetzt, der auf das simulierte Schaltgetriebe wirkt.

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs erfolgt aus Drehzahl und Drehmoment über ein Kennfeld in der Simulation. Maschine „M1“ dient als Lastmaschine. Sie wird drehzahl geregelt betrieben und über die Getriebeeingangsdrehzahl aus der Simulation angesteuert. Im zweiten Durchlauf muss für den sequentiellen Versuch lediglich das Drehmoment des Prüflings als in die Simulation zurückgeführte Größe gemessen werden. Weitere Messgrößen werden nur für die Validierung des Antriebssystems benötigt und sind daher in der Abbildung nicht dargestellt.

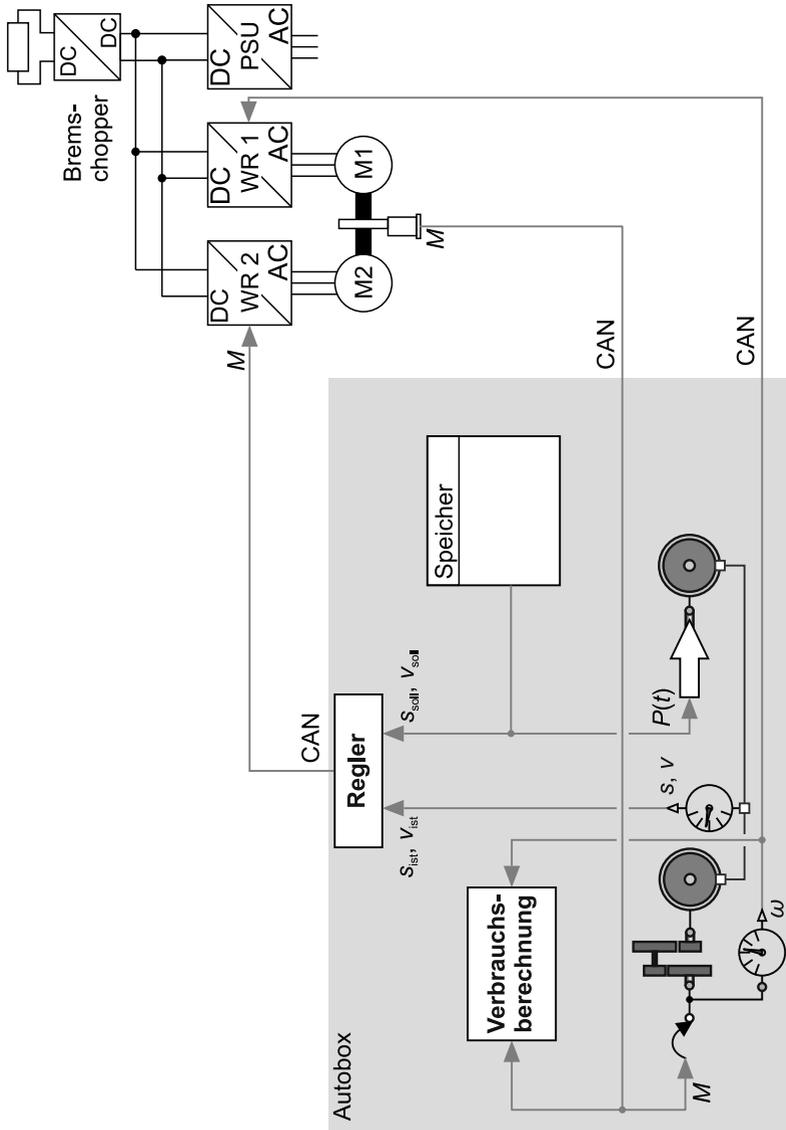


Abbildung 4.16: Durchlauf 2 auf dem Prüfstand

Um mit der Asynchronmaschine näherungsweise das Verhalten des Verbrennungsmotors nachbilden zu können, ist dessen Drehmomentgrenze über der Drehzahl hinterlegt und die Differenz der rotatorischen Massenträgheiten zwischen der Prüfstandsmaschine und dem Verbrennungsmotormodell als Element in der Simulation eingefügt. Nicht nachgebildet werden konnten das Schleppmoment des Verbrennungsmotors und die Drehmomentungleichförmigkeit über den Drehwinkel. Für letztere erlaubt die Regelung der Wechselrichter keine ausreichende Dynamik und die Totzeit in der Übertragung der Messwerte vom Echtzeitrechner zum Prüfstand ist zu groß.

In der Simulation wird weiterhin das stark vereinfachte Schaltgetriebe mit sich im Schaltvorgang über 2s kontinuierlich ändernder Übersetzung verwendet. Das in der simulativen Auslegung verwendete physikalische Getriebemodell ist auf dem verwendeten Echtzeitrechner nicht in Echtzeit lauffähig. Die im zweiten Durchlauf gefahrenen Versuche lassen daher in den Ergebnissen Abweichungen zu Versuchen mit realem Verbrennungsmotor und realem Getriebe erwarten. Auf die hier gezeigte Funktionsfähigkeit der Versuchsdurchführung im sequentiellen Versuch hat dies jedoch keinen Einfluss.

5 Auswertung

Im Kapitel Auswertung werden die Ergebnisse der beiden Durchläufe aus den Versuchen am Prüfstand in Unterabschnitt 4.4.3 zusammengeführt und unter Berücksichtigung der vorhandenen maximalen Messfehler bewertet. Ziel ist eine Aussage über die Verlässlichkeit der Messwerte und der Relevanz der ermittelten Kraftstoffeinsparung für den realen Betrieb.

5.1 Betrachtung der Messabweichung

In die Simulation werden Drehmoment und elektrische Leistung zurückgeführt. Die Messabweichungen, die hierbei entstehen, dienen als Referenz bei der Auswertung der Messdaten, um die Relevanz der Abweichungen zwischen erstem und zweiten Durchlauf einschätzen zu können. Zusätzlich werden zur Auswertung gemessene Drehzahlverläufe, aus denen Geschwindigkeiten und zurückgelegte Strecke berechnet werden, betrachtet.

5.1.1 Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung erfolgt im Versuch über in den Prüfstandsmaschinen integrierte Drehgeber mit 160 Impulsen pro Umdrehung. Die Auswertung des Messsignals erfolgt in einem HBM Frequenzmessverstärker vom Typ Quantum MX 460 [25]. Die Messabweichung des Messverstärkers beträgt 0,01% vom Messwert. Zur Auswertung der Versuche wird aus dem gemessenen Drehzahlsignal durch Integration die zurückgelegte Strecke berechnet. Die absoluten Messabweichungen werden also ebenfalls aufintegriert,

die relative Abweichung von 0,01% gilt also ebenfalls für die ermittelte Strecke.

5.1.2 Drehmomentmessung

Die Drehmomentmessung erfolgt mit einer Drehmomentmesswelle vom Typ HBM T40b mit einem Messbereich von 1000Nm [24]. Das Messsignal wird von der Messwelle als Frequenzsignal (30 bis 90kHz) ausgegeben und ebenfalls mit dem Messverstärker vom Typ MX 640 erfasst und anschließend digital per CAN auf den Echtzeitrechner übertragen.

Komponente	Messbereich	max. Abweichung vom Messwert	max. Abweichung vom Messbereich
Messwelle	1000Nm	0.03%	0,03%
Messverstärker	200kHz	0,01%	-

Tabelle 5.1: Maximale Messabweichungen Drehmomentmessung

Die maximale Messabweichung aus der Messwelle beträgt für die Messung des im Versuch maximal angeforderten Moments von 800Nm:

$$\Delta M_{Welle} = 800 \text{ Nm} \cdot 0.03\% + 1000 \text{ Nm} \cdot 0,03\% = 0,54 \text{ Nm} \quad (5.1)$$

Die maximale relative Messabweichung aus der Messwelle beträgt in diesem Betriebspunkt somit 0,07%. Die maximale Messabweichung aus dem Messverstärker beträgt 0,01% bzw. 0,08 Nm.

Für die mechanische Leistung $P = M \cdot \omega$, die aus dem Drehmoment berechnete wird, ergibt sich damit eine maximale Messabweichung ΔP_{mech} :

$$\Delta P_{mech} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta n}{n} = 0,08\% + 0,01\% = 0,09\% \quad (5.2)$$

5.1.3 Elektrische Leistungsmessung

Zur Leistungsmessung wird für die Strommessung eine Stromzange vom Typ L45-Z26 von ZES Zimmer verwendet [64]. Die Spannungsmessung erfolgt direkt über das Leistungsmessgerät [63]. In diesem wird aus den beiden Messwerten der Leistungswert berechnet und über einen Analogausgang als $-10... + 10\text{ V}$ Signal ausgegeben. Der Wert wird auf $150\text{ kW} \hat{=} 10\text{ V}$ skaliert. Das Analogsignal wird in einem A/D Board vom Typ DS 2004 in der Autobox [8] digitalisiert und in die Simulation zurückgeführt. Die Messbereiche und maximalen Messabweichungen sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

Komponente	Messbereich	max. Abweichung vom Messwert	max. Abweichung vom Messbereich
Strommesszange	500 A	1,5%	0,1%
Leistungsmessung	500kW	0,032%	0,06%
Analogausgang	10 V	0,05%	0,05%
Analogeingang	10 V	-	0,1%

Tabelle 5.2: Maximale Messabweichungen Leistungsmessung

Da die maximalen Messabweichungen vom Messwert abhängen, wird die Messabweichung in Abschnitt A.2 beispielhaft für eine gemessene Leistung von 150 kW berechnet. Es ergibt sich für den betrachteten Messwert ein maximaler absoluter Messfehler der elektrischen Leistungsmessung von $3,245\text{ kW}$ beziehungsweise ein maximaler relativer Messfehler von $2,16\%$.

5.2 Bewertung der Ergebnisse des sequentiellen Versuchs

Die Bewertung der Ergebnisse der Durchläufe und die Beurteilung, ob eine Fusion der Messdaten möglich ist, erfolgt an den drei Kriterien gleicher Ge-

schwindigkeitsverlauf, zurückgelegte Strecke und identische Energiebilanz der Antriebe. Es werden jeweils die Ergebnisse aus dem ersten und zweiten Durchlauf verglichen.

Abbildung 5.1 stellt die Geschwindigkeitsverläufe der beiden Durchgänge gegeneinander. Es ist grundsätzlich eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Allerdings zeigt der im zweiten Durchlauf verwendete Regler deutliche Überschwinger bei den Geschwindigkeitswechseln, die nur langsam abklingen.

Die vom Fahrzeug zurückgelegte Strecke der beiden Durchläufe ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die zurückgelegte Strecke beim ersten Durchlauf beträgt 23264,7 m, im zweiten Durchlauf 23199,8 m. Es ergibt sich eine Wegdifferenz von 64,9 m, was einer relativen Abweichung des zweiten Durchlaufs von $-0,28\%$ gegenüber dem ersten Durchlauf entspricht. Die Abweichung ist größer als in der simulativen Erprobung des Verfahrens in Unterabschnitt 4.4.1. Im Vergleich zu der berechneten maximalen Messabweichung ist die Abweichung ebenfalls um eine Größenordnung größer. Dies ist eine Folge der unterdrückten Nachregelung der Strecke bei kleinen Geschwindigkeiten (s. Unterabschnitt 4.3.2). Durch diese wird allerdings ein bedeutend besseres Verhalten im Fahrzeugstillstand erreicht, und insgesamt befindet sich die Abweichung noch in einem gut tolerierbaren Bereich.

Als drittes Kriterium zur Bewertung der Abweichung zwischen den zwei Durchläufen wird die Energiebilanz an der Welle der Antriebe verwendet. Dazu werden die Leistungen an den Wellen der elektrischen Maschine und des Verbrennungsmotors auf dem Prüfstand und in der Simulation über die Zeit integriert und Verlauf und der Wert am Ende verglichen. Der Verlauf der Größen ist in Abbildung 5.3 aufgetragen. Es sind nur geringfügige Abweichungen erkennbar. Bei dem Verbrennungsmotor beträgt die umgesetzte Energie in der Simulation im ersten Durchlauf 20,145 kWh, der gemessene Energieumsatz auf dem Prüfstand im zweiten Durchlauf 20,139 kWh.

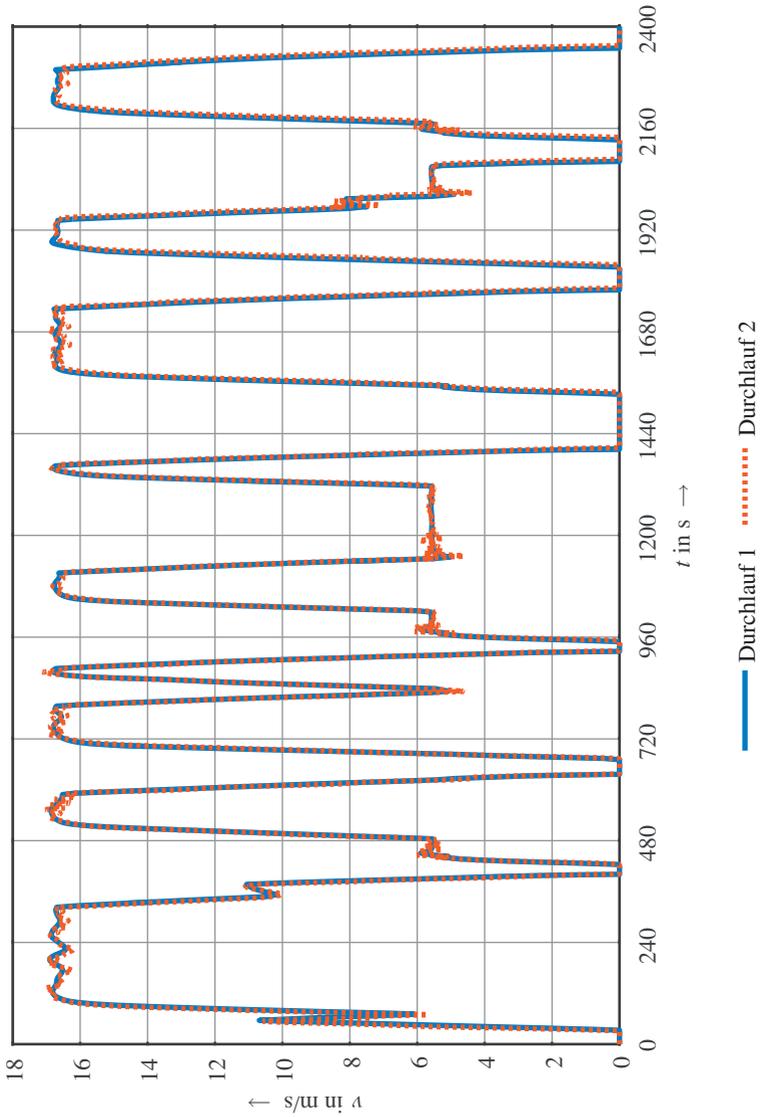


Abbildung 5.1: Geschwindigkeitsverläufe aus Durchlauf 1 und Durchlauf 2

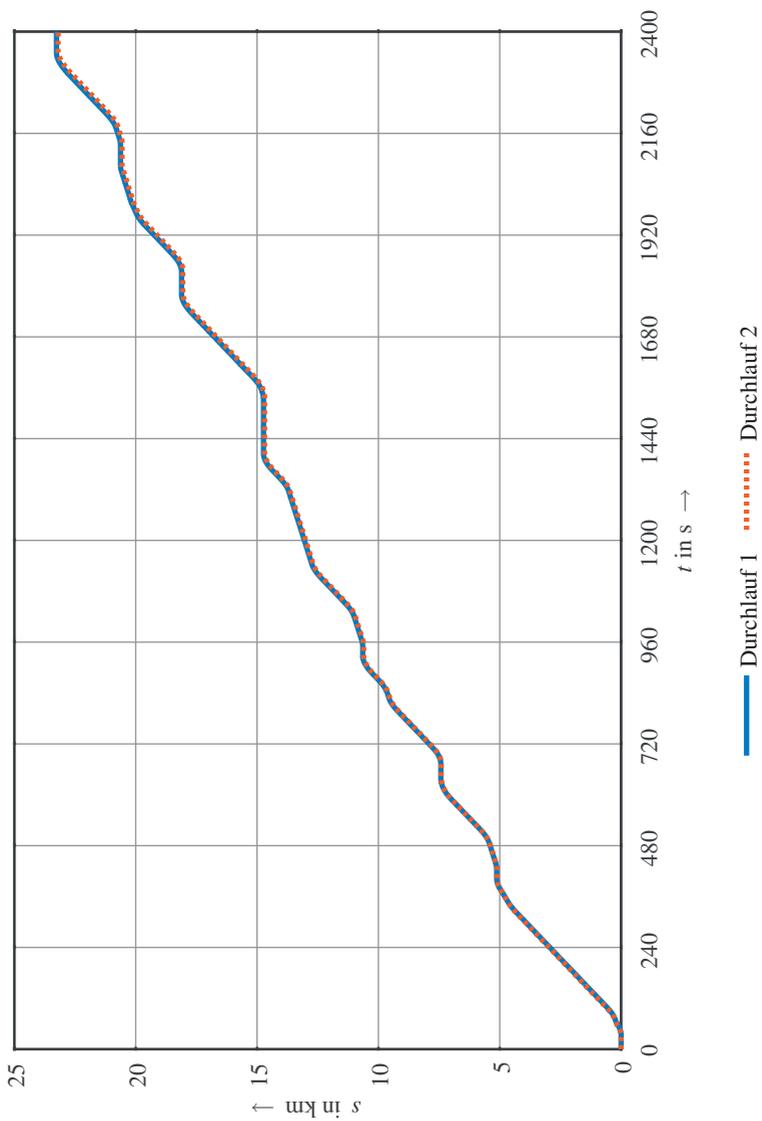


Abbildung 5.2: Zurückgelegter Weg in Durchlauf 1 und Durchlauf 2

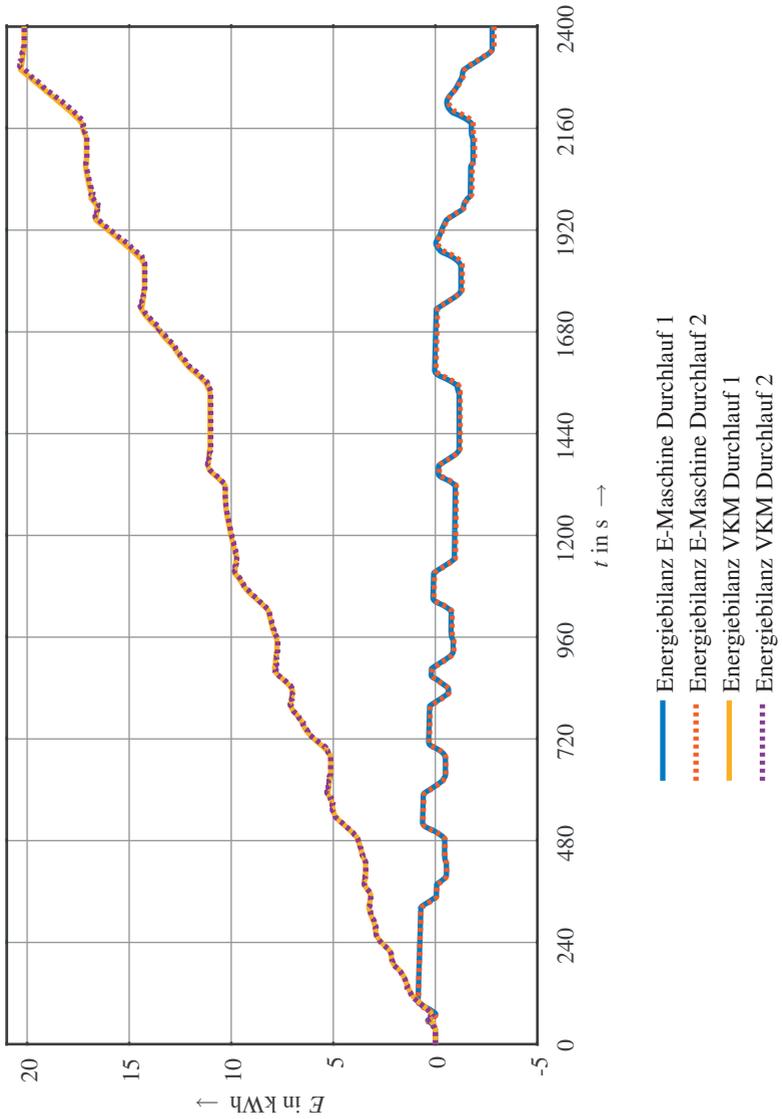


Abbildung 5.3: Energiebilanzen aus Durchlauf 1 und Durchlauf 2

Es ist erkennbar, dass in beiden Fällen der Wert nicht monoton steigend ist. Dies ist auf das Schleppmoment des Dieselmotors beim Verzögern zurückzuführen. Die Abweichung der Messung zur Simulation beträgt somit nur $-0,3\%$ und ist damit geringer als in der simulativen Erprobung, jedoch zirka dreimal so groß wie die in Abschnitt 5.1 ermittelte maximale Messabweichung für die mechanische Leistung. Allerdings ist die prozentuale Abweichung der Energiebilanz nahezu identisch mit der prozentualen Abweichung der zurückgelegten Strecke. Bei einer angenommen konstanten Energie/Strecke ist die Abweichung somit sogar geringer als die maximale Messabweichung.

Bei dem elektrischen Antrieb beträgt die gemessene Energiebilanz im ersten Durchlauf auf dem Prüfstand $-2,785\text{kWh}$, die simulierte Energiebilanz im zweiten Durchlauf beträgt $-2,874\text{kWh}$. Die Abweichung gegenüber dem ersten Durchlauf beträgt somit $-0,089\text{kWh}$ beziehungsweise $3,2\%$. Da die Energiebilanz für den elektrischen Antrieb nahezu ausgeglichen ist, ist die relative Abweichung erwartungsgemäß vergleichsweise hoch, aber deutlich geringer als die Abweichung in der simulativen Erprobung.

5.3 Datenfusion

Zur Auswertung der Ergebnisse des sequentiellen Versuchs ist es sinnvoll, die Ergebnisse der beiden Durchläufe zu fusionieren und eine gemeinsame Ergebnisdatei zu erstellen. Die Untersuchungen im vorherigen Abschnitt haben gezeigt, dass nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Durchläufen vorliegen. Daher können die Messdaten aus beiden Durchläufen mit der Zeit als Referenzgröße zusammengeführt werden. Prinzipiell sind, wenn ein zeitbasiertes Vorgehen wegen größerer Abweichungen nicht möglich ist, auch andere Referenzen möglich. Beispielsweise kann eine streckenbasierte Fusionierung durchgeführt werden. Allerdings führt dies zwangsläufig zu einer Veränderung der Energiebilanzen, da Leistungen über abweichende

Zeiträume anliegen. Somit können große Abweichungen im Ergebnis entstehen. Daher ist ein solches Vorgehen nicht zu empfehlen.

Im Folgenden werden drei Vorgehensweisen zur zeitbasierten Fusionierung vorgestellt. Zur zeitbasierten Fusionierung der Daten müssen die zeitdiskreten Aufzeichnungen aus dem ersten und zweiten Durchlauf auf eine gemeinsame Basis umgerechnet werden. In der Regel sind die Zeitpunkte, zu denen die Messwerte aufgezeichnet wurden, nicht in beiden Durchläufen identisch. Welches der folgenden Verfahren gewählt wird, hängt in erster Linie davon ab, wie die fusionierten Daten zeitliche aufgelöst werden sollen.

5.3.1 Interpolation

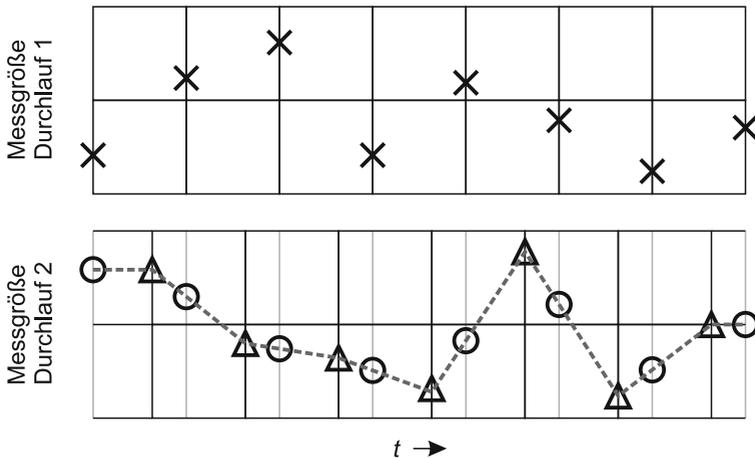


Abbildung 5.4: Fusion mittels Interpolation

Wird die volle zeitliche Auflösung der Messwerte benötigt, also ein Messwert pro Zeitschritt des Echtzeitrechners, und soll eine möglichst hohe Genauigkeit erreicht werden, müssen die Messwerte eines Durchlaufs zwischen den Datenpunkten interpoliert werden. Anschließend werden die

Messwerte zu den Messzeitpunkten des anderen Durchlaufs ausgelesen und in eine gemeinsame Tabelle eingetragen.

Bei kurzen Zeiträumen, wie den 0,001 s in diesem Fall, ist eine lineare Interpolation völlig ausreichend, da die Änderung der Messwerte pro Zeitschritt gering ist. Abbildung 5.4 zeigt das Verfahren beispielhaft. Die Messwerte aus Durchlauf 1 sind mit Kreuzen markiert, die Messwerte aus Durchlauf 2 mit abweichenden Messzeitpunkten mit Dreiecken. Die durch Interpolation berechneten Werte des zweiten Durchlaufs zu den Messzeitpunkten des ersten Durchlaufs sind mit Kreisen markiert.

5.3.2 Zuordnung

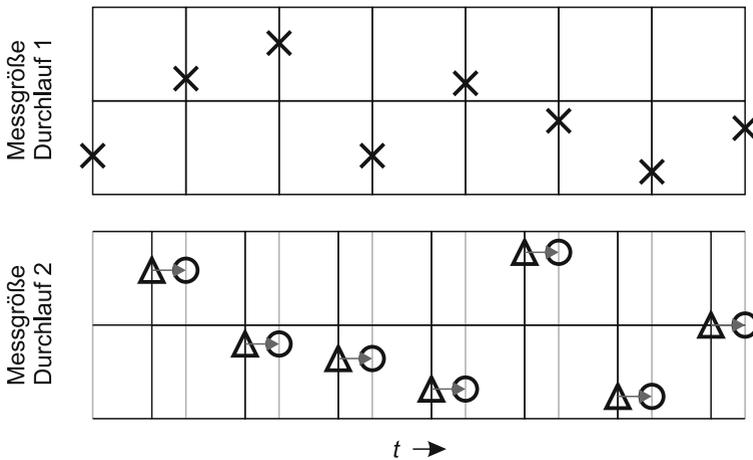


Abbildung 5.5: Fusion mittels Zuordnung

Mit deutlich geringerem Aufwand kann auch zu jedem Zeitschritt aus einem Durchlauf der nächstgelegene Zeitschritt im anderen Durchlauf gewählt werden und die Messwerte ohne Interpolation der Werte einfach zugeord-

net werden. Bei gleichem Zeitschritt entsteht so ein zeitlicher Fehler von maximal einem halben Zeitschritt. Dieser dürfte im Regelfall noch wesentlich geringer sein als der Fehler, der durch die nicht vollständig identischen Geschwindigkeitsverläufe entsteht. Das Verfahren ist in Abbildung 5.5 grafisch dargestellt. Die Messwerte aus Durchlauf 1 sind wieder mit Kreuzen, die aus Durchlauf 2 mit Dreiecken markiert. Diesmal werden die Werte aus Durchlauf 2 zeitlich so verschoben, dass sie an den Messzeitpunkten von Durchlauf 1 liegen. Diese Werte sind mit Kreisen dargestellt.

5.3.3 Mittelwertbildung

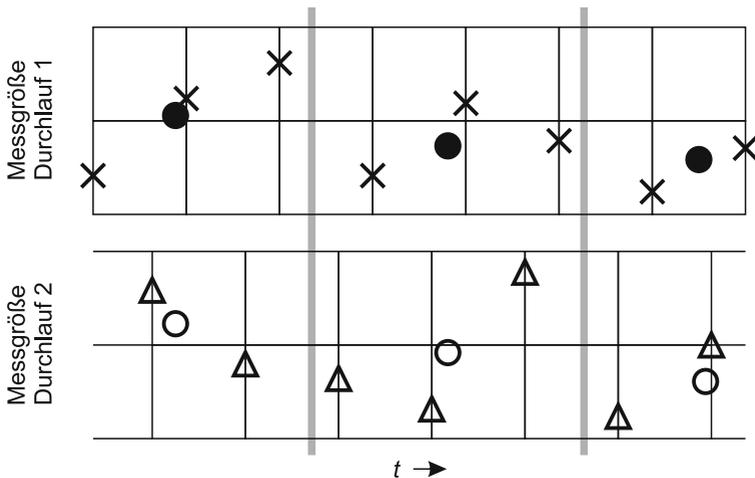


Abbildung 5.6: Fusion mittels Mittelwertbildung

Oft werden zur Auslegung des Antriebssystems nur wesentlich geringere Messraten benötigt, um das Verhalten mit einer ausreichenden Genauigkeit darzustellen. Beispielsweise für Geschwindigkeitsverläufe, Ladezustände von Speichern oder für den Kraftstoffverbrauch. Sollen die Messdaten nur

mit einem Wert pro Sekunde fusioniert werden, können Interpolationen entfallen, und es wird jeweils der Mittelwert aller Messwerte einer Größe gebildet, die innerhalb dieser Sekunde aufgezeichnet wurden. Durch den vergleichsweise großen Mittelungszeitraum werden kleinere zeitliche Abweichungen zwischen den Durchläufen ausgeglichen.

In Abbildung 5.6 ist das Verfahren beispielhaft mit einem Mittelungszeitraum von zirka drei Messperioden dargestellt. Die Grenzen der Mittelungszeiträume sind mit den grauen Linien gekennzeichnet. Es wird jeweils der Mittelwert über alle in diesem Mittelungszeitraum liegenden Werte gebildet (ausgefüllter Kreis für Durchlauf 1 und leerer Kreis für Durchlauf 2) und in der Mitte des Zeitraums aufgetragen.

Für die Auswertung der Messdaten aus dem hier beschriebenen Beispiel wird die Mittelwertbildung über jeweils eine Sekunde durchgeführt. Für den Geschwindigkeitsverlauf werden die Werte aus Durchlauf 2 verwendet, da diese mit den gemessenen Leistungen aus beiden Antriebseinheiten konsistent sind. Die anderen Werte werden jeweils dem Durchlauf entnommen, in dem sie gemessen wurden.

5.4 Größen zur Bewertung des Antriebssystems

Abschließend erfolgt nun eine Bewertung des Antriebssystems durch Vergleich der Ergebnisse des sequentiellen Versuchs mit den Ergebnissen der Simulation zur Systemauslegung.

Wie bereits in den Geschwindigkeitsverläufen zum Vergleich der Durchläufe in Abbildung 5.1 zu sehen war, kann das Fahrzeug dem vorgegeben Geschwindigkeitsprofil folgen und den Fahrplan einhalten. Die zur Verfügung gestellte Leistung des Antriebsstrangs genügt also der ausgewählten Beispielstrecke. In Abbildung 5.7 ist der Spannungsverlauf im Speicher aufgetragen. Bei dem simulierten Kondensatorspeicher ist der Ladezustand proportional zur Spannung im Speicher. Es ist zu erkennen, dass sich die

Spannung über den gesamten Zyklus im vorgegebenen Spannungsbereich zwischen 400 V und 800 V befindet. Der Abstand zu den Grenzen ist ausreichend groß, so dass keine Leistungsbeschränkungen auftreten. Der Ladezustand zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende ist nicht ausgeglichen, es findet eine Entladung des Speichers um 115 V, was bei der verwendeten Kapazität des Speichers einer Energie von 1,6 kWh entspricht, statt. Das veränderte Verhalten ist auf die von der Simulation abweichenden Wirkungsgrade der auf dem Prüfstand vorhandenen Maschinen und Wechselrichter zurückzuführen. Durch Optimierung des Energiemanagements ist es anzustreben, den Ladezustand besser auszugleichen, um mehrere Fahrten nacheinander durchführen zu können. Im gewählten Beispiel wurde die Strecke allerdings auch nur in steigender Richtung befahren, eine Absenkung des Ladezustands ist daher auch nicht als kritisch zu bewerten.

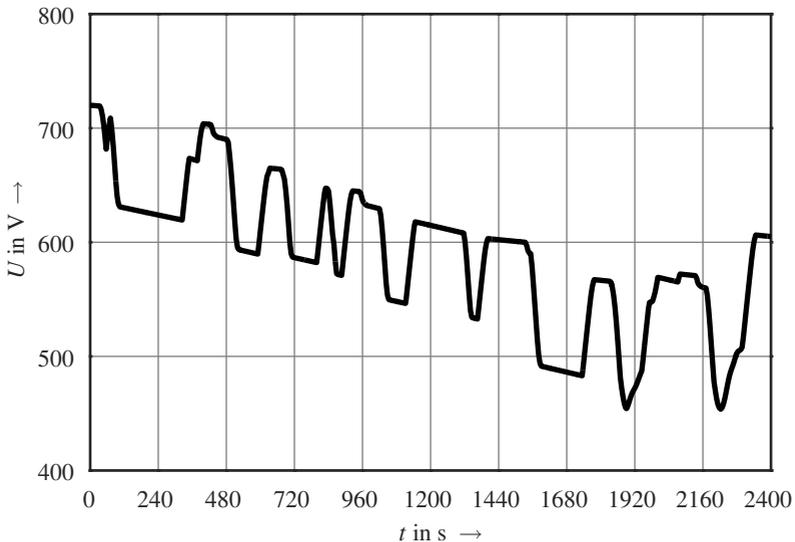


Abbildung 5.7: Spannungsverlauf im Speicher aus Durchlauf 1

Das zweite betrachtete Antriebssystem ist der Verbrennungsmotor. Die Bewertung des Gesamtsystems erfolgt wie schon in der Simulation zur Systemauswahl über den Kraftstoffverbrauch, da dem System nur über den Kraftstoff Energie zugeführt wird und somit nur dort Energiekosten im Betrieb anfallen. Da auf dem Prüfstand kein realer Verbrennungsmotor vorhanden ist, sind die Werte für den Verbrauch am Prüfstand aus dem Drehzahl- und Drehmomentverlauf der Asynchronmaschine berechnet. Sie können daher nur bedingt zur Validierung herangezogen werden. Abbildung 5.8 zeigt den verbrauchten Kraftstoff über der Zeit.

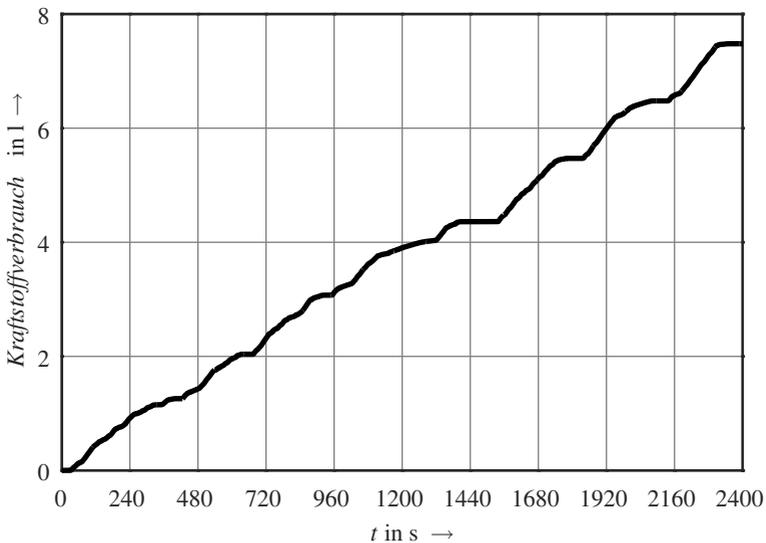


Abbildung 5.8: Kraftstoffverbrauch aus Durchlauf 2

Der berechnete Verbrauch für die gesamte Strecke beträgt 7,481. Dazu kommt noch ein Verbrauch von 0,751 zum Ausgleich des Ladezustands im elektrischen Speicher. Die Summe von 8,231 ist deutlich geringer als der simulierte Verbrauch von 12,31 für eine Fahrt ohne weitere Einschränkung der Geschwindigkeit in Versuch Nr. 9 in Tabelle 3.4. Die große Abwei-

chung lässt sich unter anderem mit dem stark vereinfachten Getriebemodell für die Echtzeitsimulation erklären, das bei beiden Durchläufen zum Einsatz kam, da kein reales Getriebe auf dem Prüfstand vorhanden ist. Bei einer Simulation des entsprechenden Szenarios aus der Systemauslegung mit dem vereinfachten Getriebemodell verringert sich der Kraftstoffverbrauch auf 9,211, die relative Abweichung somit auf 10,6%. Des Weiteren sind auch sehr große Auswirkungen durch Veränderung von Schaltpunkten des Getriebes und Veränderungen bei den Reglerparametern des Fahrermodells zu beobachten. Bei einem realen Getriebe und einem realen Verbrennungsmotor wäre eine deutlich bessere Übereinstimmung zu den Simulationen zur Systemauslegung zu erwarten, da diese im Verhalten näher an den zur Systemauslegung verwendeten Simulationsmodellen sind. Das Ergebnis zeigt aber auch deutlich den großen Einfluss von im realen Betrieb schwer beeinflussbaren Parametern wie dem Fahrerverhalten auf die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors und somit auf den Kraftstoffverbrauch, die durchaus die Verbrauchsvorteile eines Hybrid-Antriebssystems aufheben können.

Insgesamt erfüllt das in der Simulation ausgelegte und auf dem Prüfstand validierte Antriebssystem die gestellten Anforderungen. Durch teilweise nur in der Simulation vorhandene Komponenten ist es im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht möglich, validierte Werte für den Kraftstoffverbrauch zu ermitteln.

6 Zusammenfassung

Im Schienenfahrzeugbereich gibt es bisher nur wenige Anwendungen von dieselhybriden Antriebssystemen, die über eine prototypische Realisierung hinausgekommen sind. Einerseits sind dies Rangierlokomotiven, beispielsweise von Toshiba, Alstom und Gmeinder Lokomotiven, andererseits japanische Triebwagen mit Hybridantrieben.

Bei der Auslegung von Hybridantrieben für Dieseltriebwagen sind oft mehrere getrennte Antriebsanlagen in einem Fahrzeug vorhanden. Durch eine geschickte Wahl der Aufteilung der Antriebsmomente auf die Antriebseinheiten kann die Effizienz des Antriebssystems bedeutend gesteigert werden. Durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden lohnt eine Auslegung und Erprobung der Antriebssysteme in der Simulation. Bei der anschließenden Validierung werden umfangreiche Prüfstandsanlagen benötigt.

Um die Anforderungen an den Prüfstand zu reduzieren, wird eine Vorgehensweise vorgestellt. Das Antriebssystem wird dadurch validiert, dass die einzelnen Antriebseinheiten nacheinander auf dem Prüfstand gefahren werden. Das jeweils andere Antriebssystem wird durch eine Echtzeitsimulation abgebildet. Die Messdaten werden anschließend zu einer gemeinsamen Messung zusammenzufasst. Diese Vorgehensweise wird an einem einfachen Fahrzeugkonzept erprobt.

Als Referenzfahrzeug für die Erprobung wird ein leichter vierachsiger Dieseltriebwagen mit Hybridantrieb ausgewählt. Der Hybridantrieb wird als leistungsverzweigter Hybrid mit einem dieselmechanischen Antriebsstrang als eine Antriebseinheit und einer getrennten elektrischen Antriebseinheit mit Kondensatorspeicher ausgelegt. Durch rechnerische Auslegung und

Erprobung in der Simulation werden insgesamt 15 Varianten des Antriebssystems untersucht und daraus die effizienteste ausgewählt. Da keine Daten für eine Berechnung der Lebenszykluskosten vorhanden sind, erfolgt die Auswahl rein über die Energiekosten anhand des Kraftstoffverbrauchs.

Die Auslegung des Antriebssystems erfolgt in der Simulation. Dazu wird mit der Modellierungssprache Modelica in der Software Dymola eine Simulationsbibliothek erstellt. Durch deren objektorientierten Aufbau wird eine flexible Weiterverwendung von Teilmodellen und Komponentenmodellen und eine einfache Adaption der Modelle für die Echtzeitsimulation am Prüfstand erreicht.

Auf Basis der zur Auslegung erstellten Simulationsmodelle werden echtzeitfähige Simulationsmodelle für den Prüfstand abgeleitet. Mit den Modellen wird der Versuchsaufbau erst in der Simulation auf dem PC und anschließend auf dem Echtzeitrechner getestet. Die Versuchsdurchführung am Antriebssystemprüfstand des Instituts wird in zwei Durchläufe aufgeteilt. In jedem Durchlauf wird eine Antriebseinheit auf dem Prüfstand gefahren und die andere Antriebseinheit in der Simulation nachgebildet. Der erste Durchlauf wird hierbei als gewöhnlicher Hardware-in-the-Loop Versuch gefahren, wobei als „Hardware“ in diesem Fall das Antriebssystem mit den stärkeren Einschränkungen in der verfügbaren Leistung gewählt wird. Geregelt werden die Antriebsmomente durch einen Geschwindigkeitsregler, der den realen Fahrer ersetzt.

Nach dem ersten Durchlauf werden die Antriebseinheiten zwischen Simulation und Prüfstand getauscht und es erfolgt eine Aufbereitung der gespeicherten Messdaten für die Verwendung im zweiten Durchlauf.

Um die Messdaten beider Durchläufe später zu einem konsistenten Messergebnis zusammenführen zu können, wird im zweiten Durchlauf die bereits vermessene Antriebseinheit durch Vorgabe der Messdaten aus dem ersten Durchlauf in dem simulierten Teil des Antriebssystems nachgebildet. Als vorgegebene Größe wird die Leistung an der Welle des elektrischen Antriebs gewählt. Die jetzt auf dem Prüfstand gefahrene Antriebseinheit wird

auf eine Kombination aus Weg- und Geschwindigkeitsverlauf des ersten Durchgangs geregelt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass nur geringe Abweichungen zwischen den Durchläufen auftreten und insbesondere die Energiebilanz der Antriebe nur sehr geringe Abweichungen von $-0,3\%$ beim Verbrennungsmotor und $3,2\%$ bei der elektrischen Antriebseinheit aufweist. Die Messdaten der beiden Durchläufe können daher zeitbasiert zu einem Messergebnis für den Gesamtantrieb zusammengeführt werden. Da auf dem Prüfstand mangels verfügbarer Komponenten der Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor gefahren werden musste, stehen für den Kraftstoffverbrauch des betrachteten Antriebssystems keine gemessenen Werte zur Verfügung. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die vorgeschlagene Vorgehensweise eine Versuchsdurchführung in mehreren Durchgängen mit anschließender Fusionierung der Messdaten ermöglicht und Abweichungen zwischen Simulationsmodell und realen Komponenten im zweiten Durchlauf kompensiert werden können.

7 Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebene Vorgehensweise wurde für die Versuche im Projekt PREDIKT entwickelt und soll dort mit den, im Vergleich zu dem hier vorgestellten Beispielsystem deutlich komplexeren, im Projekt entwickelten Antriebssystemen zum Einsatz kommen. Diese Versuche werden weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Umsetzbarkeit und Robustheit des Ansatzes liefern, als es die Versuche mit einem sehr einfachen Antriebssystem vermögen.

Zur Weiterentwicklung des sequentiellen Versuchs haben sich mit dem momentanen Stand offene Punkte in den Bereichen Prüfstand, Datenfusion bei größeren Abweichungen, Verbesserung der Regelalgorithmen und bei der Entwicklung verbesserter echtzeitfähiger Simulationsmodelle ergeben, auf die im Folgenden detaillierter eingegangen werden soll.

Prüfstand

Auf dem verwendeten Prüfstand zeigen sich Effekte, die sich durch ein unzureichendes Regelverhalten des Drehzahlreglers der Lastmaschine bei sehr geringer Drehzahl erklären lassen. Durch Drehgeber mit einer höheren Auflösung lässt sich die Drehzahl, bei der solche Effekte auftreten, weiter reduzieren.

Auf dem Prüfstand läuft die Datenübertragung von der Steuerung zu den Wechselrichtern momentan über analoge Signale. Durch eine vollständige Digitalisierung der Datenübertragung vom Echtzeitrechner bis zu den Wechselrichtern lassen sich die Abweichungen durch die mehrfache Wandlung zwischen analogen und digitalen Signalen vermeiden und somit insgesamt

eine Signalübertragung mit geringeren Abweichungen und kürzeren Übertragungszeiten gewährleisten. Da in diesem Fall auch eine Filterung der Eingangssignale der Wechselrichter entfallen kann, können die Totzeiten zwischen Echtzeitrechner und Prüfstand verringert werden.

Datenfusion

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur sehr einfache Methoden zur Fusion der Messdaten vorgestellt. Durch neu zu entwickelnde Verfahren können eventuell die Ergebnisse, insbesondere bei größeren Abweichungen in den Messdaten, verbessert werden, beziehungsweise wird es erst ermöglichen, die Daten überhaupt fusionieren zu können.

Regelalgorithmen

Der Fahrer im ersten Durchlauf wurde als einfacher PI-Regler ausgeführt. Da das Verhalten des Fahrers einen sehr großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat, kann ein Fahrermodell, das das menschliche Verhalten besser beschreibt, Ergebnisse für den Kraftstoffverbrauch liefern, die näher an dem zu erwartenden Kraftstoffverbrauch im realen Betrieb sind. Alternativ kann der erste Durchlauf auch mit einem realen Fahrer gefahren werden. Dafür ist allerdings eine möglichst realistische Visualisierung der befahrenen Strecke notwendig, um ein realistisches Verhalten zu erreichen.

Der verwendete kombinierte Weg- und Geschwindigkeitsregler des zweiten Durchlaufs lieferte bei den Tests in der Simulation das beste Ergebnis für die Einhaltung der zurückgelegten Strecke und beim Folgen des Geschwindigkeitsverlaufs. Allerdings zeigt er bei den Versuchen auf dem Prüfstand Schwingungen bei Geschwindigkeitswechseln und eine Neigung dazu, bei geringen Abweichungen des Halteplatzes die Wegdifferenz nach dem Anhalten auszuregeln. Auf dem Prüfstand wurde dies dadurch unterdrückt, dass für die Haltedauer die Wegdifferenz zu null gesetzt wurde. Hier gibt

es noch großes Potential, das Verhalten des Gesamtsystems durch eine bessere Reglerauslegung zu verbessern.

Simulationsmodelle

Da bei Echtzeitrechnern mit neuen Gerätegenerationen die Leistungsfähigkeit wesentlich zunimmt und auch zu erwarten ist, dass der Export von Modelica-Modellen aus Dymola für leistungsfähigere Prozessorboards von dSpace möglich sein wird, können realitätsnähere Modelle, beispielsweise für das Getriebe, entwickelt und im Versuch eingesetzt werden. Durch geringere Modellabweichungen ist mit einer weiteren Verbesserung der Versuchsergebnisse zu rechnen, da die Abweichungen zwischen Simulation und Prüfstand geringer werden und somit auch die Datenfusion weiter vereinfacht wird.

Anwendbarkeit auf komplexere Systeme

Die vorgestellte Versuchsdurchführung beschränkt sich auf zwei Antriebseinheiten und somit zwei Durchläufe. Für Systeme mit mehr Antriebseinheiten ist die Versuchsdurchführung anzupassen und festzulegen, welche Teile des Antriebssystems wann auf dem Prüfstand gefahren, in der Simulation oder durch Messdaten abgebildet werden. Auch die Umsetzung mit Vorgabewert und Regelwert ist anzupassen. Durch eine Erweiterung auf beliebige Anzahlen an Antrieben erschließen sich eventuell auch weitere Einsatzbereiche abseits der Schiene.

A Anhang

A.1 Auslegung des Traktionsantriebs

Die Auslegung des Antriebs erfolgt nach der erforderlichen Zugkraft. Die benötigte Zugkraft F entspricht dem Fahrwiderstand R , der überwunden werden muss.

$$F = R \quad (\text{A.1})$$

Der Fahrwiderstand R setzt sich nach [13] aus dem Beschleunigungswiderstand R_a , den Streckenwiderständen aus Neigung R_S und Bögen R_B und dem Laufwiderstand R_L zusammen.

$$R = R_a + R_S + R_B + R_L \quad (\text{A.2})$$

Der Bogenwiderstand wird für die Auslegung des Antriebs vernachlässigt, da die Auslegungsfälle im geraden Gleis spezifiziert sind. Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich mit der Fahrzeugmasse m , dem rotatorischen Massenzuschlag ρ und der Beschleunigung a zu

$$R_a = m(1 + \rho) \cdot a. \quad (\text{A.3})$$

Der Neigungswiderstand berechnet sich mit der Steigung S und der Erdbeschleunigung g zu

$$R_S = m \cdot g \cdot S. \quad (\text{A.4})$$

Der Laufwiderstand setzt sich aus dem von der Geschwindigkeit unabhängigen Rollwiderstand R_R mit dem Reibungsbeiwert c_r

$$R_R = c_r \cdot m \cdot g \quad (\text{A.5})$$

und dem Luftwiderstand R_l mit dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , der Querschnittsfläche des Fahrzeugs A , der Dichte der Luft ρ_l und der Fahrzeuggeschwindigkeit v zusammen:

$$R_l = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_l \cdot v^2 \quad (\text{A.6})$$

Für die verwendeten Konstanten werden folgende Annahmen getroffen:

$$m = 40000 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$c_w = 0,8$$

$$A = 10 \text{ m}^2$$

$$\rho_l = 1,2041 \text{ kg/m}^3$$

$$c_r = 0,001$$

$$\rho = 0,1$$

Im Folgenden werden für die in Unterabschnitt 2.4.1 definierten Anforderungen in drei Fällen die Fahrwiderstände berechnet und damit die Komponenten dimensioniert.

Fall 1: Anfahren

Gefordert wird eine Anfahrbeschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ in der Ebene. Mit $v = 0$ ergibt sich die benötigte Zugkraft aus Beschleunigungswiderstand und Rollwiderstand. Neigungswiderstand und Luftwiderstand sind 0.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= R_a + R_R \\
 &= 40\,000\text{ kg} \cdot 1,1 \cdot 0,6\text{ m/s}^2 + 0,001 \cdot 40\,000\text{ kg} \cdot 9,81\text{ m/s}^2 \quad (\text{A.7}) \\
 &= 26,8\text{ kN}
 \end{aligned}$$

Fall 2: Steigungsfahrt

Gefordert ist, eine Steigung von 30‰ mit 60 km/h mit konstanter Geschwindigkeit (Beschleunigungswiderstand $R_a = 0$) zu bewältigen. Die benötigte Zugkraft ergibt sich aus der Summe von Steigungswiderstand, Rollwiderstand und Luftwiderstand.

$$\begin{aligned}
 F_2 &= R_S + R_R + R_l \\
 &= 40\,000\text{ kg} \cdot 9,81\text{ m/s}^2 \cdot 0,03 + 0,001 \cdot 40\,000\text{ kg} \cdot 9,81\text{ m/s}^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 10\text{ m}^2 \cdot 1,2041\text{ kg/m}^3 \cdot (16,7\text{ m/s})^2 \quad (\text{A.8}) \\
 &= 13,5\text{ kN}
 \end{aligned}$$

Fall 3: Konstantfahrt mit Höchstgeschwindigkeit

Fall 3 fordert eine konstante Fahrt in der Ebene mit 80 km/h. Die erforderliche Zugkraft ergibt sich aus Rollwiderstand und Luftwiderstand sowie einem Zugkraftüberschuss R_Z zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit. Der Zugkraftüberschuss wird für eine Beschleunigung von $0,2\text{ m/s}^2$ beim Erreichen der Höchstgeschwindigkeit ausgelegt und beträgt 8,8 kN.

$$\begin{aligned}
 F_3 &= R_R + R_l + R_Z \\
 &= 0,001 \cdot 40\,000\text{ kg} \cdot 9,81\text{ m/s}^2 + \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 10\text{ m}^2 \cdot 1,2041\text{ kg/m}^3 \\
 &\quad \cdot (22,2\text{ m/s}^2)^2 + 8,8\text{ kN} \quad (\text{A.9}) \\
 &= 11,6\text{ kN}
 \end{aligned}$$

Auslegung Motoren und Getriebe

Aus Fall 2 ergibt sich eine maximale benötigte Antriebsleistung von

$$P_{max2} = F \cdot v = 13,5 \text{ kN} \cdot 16,7 \text{ m/s} = 225,5 \text{ kW}. \quad (\text{A.10})$$

Aus Fall 3 ergibt sich eine maximale benötigte Antriebsleistung von

$$P_{max3} = F \cdot v = 11,6 \text{ kN} \cdot 22,2 \text{ m/s} = 257,52 \text{ kW}. \quad (\text{A.11})$$

Vorgesehen wird daher ein Antrieb mit einer Nennleistung von elektrischer Maschine und Verbrennungsmotor von jeweils 130 kW.

Aus Fall 3 ergibt sich bei einer maximalen Drehzahl der E-Maschine von $4000 \frac{1}{\text{min}}$ die Getriebeübersetzung zwischen elektrischer Maschine und Rad. Bei minimalem Raddurchmesser von 710 mm beträgt bei Maximalgeschwindigkeit die Raddrehzahl n_{Rad}

$$n_{Rad} = \frac{v}{U_{Rad}} = \frac{22,2 \text{ m/s}}{\pi \cdot 0,71 \text{ m}} = 9,95 \frac{1}{\text{s}} = 597 \frac{1}{\text{min}}. \quad (\text{A.12})$$

Die Übersetzung des Getriebes i beträgt somit

$$i = \frac{n_{Motor}}{n_{Rad}} = \frac{4000 \frac{1}{\text{min}}}{597 \frac{1}{\text{min}}} = 6,7. \quad (\text{A.13})$$

Soll durch Verbrennungsmotor und E-Maschine jeweils die Hälfte des Anfahrmoments aufgebracht werden, so ergibt sich für die E-Maschine das maximale Anfahrmoment M_{an} mit dem maximalen Raddurchmesser D_{max} .

$$M_{an} = \frac{F_1}{2} \cdot \frac{D_{max}}{2} = \frac{26,8 \text{ kN}}{2} \cdot \frac{0,77 \text{ m}}{2} = 770 \text{ Nm} \quad (\text{A.14})$$

Für den Verbrennungsmotor mit einer maximalen Leistung von 130 kW wird eine synthetisch erzeugte Kennlinie für das Maximaldrehmoment, die in

Abbildung A.1 dargestellt ist, angenommen. Diese ist so skaliert, dass sich das Verhalten des Verbrennungsmotors am Antriebssystemprüfstand durch die Belastungsmaschinen nachbilden lässt.

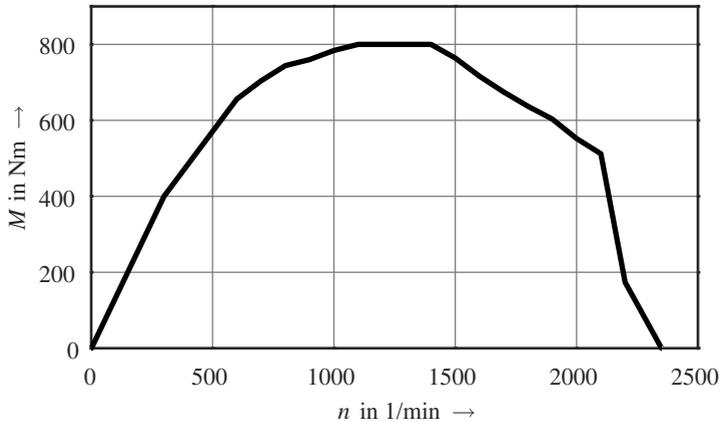


Abbildung A.1: Kennlinie für das maximale Drehmoment des Dieselmotors

Mit der maximal nutzbaren Drehzahl von $n_{max} = 2000 \frac{1}{min}$ ergibt sich bei $v_{max} = 80 \text{ km/h}$ mit der Raddrehzahl aus Gleichung A.12 eine maximale Übersetzung von

$$i_{VKMRad} = \frac{n_{Motor}}{n_{Rad}} = \frac{2000 \frac{1}{min}}{597 \frac{1}{min}} = 3,35 \quad (\text{A.15})$$

zwischen Verbrennungsmotor und Rad. Mit der Übersetzung $i_{RG} = 2,59$ im Radsatzgetriebe, verbleibt mit

$$i_{VKMRad} = i_{RG} \cdot i_{SG} \quad (\text{A.16})$$

eine Übersetzung von maximal $i_{max} = 3,35/2,59 = 1,29$ im höchsten Gang des Schaltgetriebes. Um die Anfahrzugkraft von $26,8/2 \text{ kNm}$ bei einer

Motordrehzahl von $n_{Anf} = 750 \frac{1}{\text{min}}$ (Leerlaufdrehzahl $n_0 = 600 \frac{1}{\text{min}}$) zu erreichen, wird im ersten Gang mit Wandler und Radsatzgetriebe eine Übersetzung von mindestens

$$i_{VKMRad} = \frac{M_{Rad}}{M_{Motor}} = \frac{13,4 \text{ kN} \cdot 0,385 \text{ m}}{700 \text{ Nm}} = 7,37 \quad (\text{A.17})$$

benötigt. Bei einem maximalen Drehmomentenverhältnis des Wandlers von $i_{WA} = 1,5$ bleibt eine minimale Übersetzung von

$$i_{min} = \frac{i_{VKMRad}}{i_{WA} \cdot i_{RG}} = \frac{7,37}{2,59 \cdot 1,5} = 1,9 \quad (\text{A.18})$$

im ersten Gang des Schaltgetriebes.

A.2 Berechnung der Messabweichung der Leistungsmessung

Die maximale Messabweichung für die elektrische Leistungsmessung in Unterabschnitt 5.1.3 wird für einen Messwert von 150kW und 700V Zwischenkreisspannung berechnet.

Im Gleichspannungsbereich gilt für die Wirkleistung

$$P = U \cdot I. \quad (\text{A.19})$$

Für die Strommesszange ergibt sich damit:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Clamp} &= \left| \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \Delta U \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I} \cdot \Delta I \right| \\ &= |I \cdot \Delta U| + |U \cdot \Delta I| \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Da in der Strommesszange keine Spannung gemessen wird, gilt $\Delta U = 0$. Die Spannung U im Zwischenkreis beträgt 700 V, der Strom bei 150 kW somit 214 A. Die Messabweichung für den Strom berechnet sich zu

$$\Delta I = 214 \text{ A} \cdot 1,5\% + 500 \text{ A} \cdot 0,1\% = 3,71 \text{ A.} \quad (\text{A.21})$$

Für ΔP gilt damit:

$$\Delta P_{Clamp} = 700 \text{ V} \cdot 3,71 \text{ A} = 2,597 \text{ kW} \quad (\text{A.22})$$

Für das Leistungsmessgerät ergibt sich die maximale Messabweichung zu:

$$\Delta P_{LMG} = 150 \text{ kW} \cdot 0,032\% + 500 \text{ kW} \cdot 0,06\% = 0,348 \text{ kW} \quad (\text{A.23})$$

Für den Analogausgang des Leistungsmessgeräts:

$$\Delta P_{Aout} = 150 \text{ kW} \cdot 0,05\% + 150 \text{ kW} \cdot 0,05\% = 0,15 \text{ kW} \quad (\text{A.24})$$

Für den Analogeingang der Autobox:

$$\Delta P_{Ain} = 150 \text{ kW} \cdot 0,1\% = 0,15 \text{ kW} \quad (\text{A.25})$$

Der gesamte maximale Messfehler der Leistungsmessung berechnet sich zu:

$$\Delta P_{ges} = \Delta P_{Clamp} + \Delta P_{LMG} + \Delta P_{Aout} + \Delta P_{Ain} = 3,245 \text{ kW} \quad (\text{A.26})$$

Damit ergibt sich für diesen Betriebspunkt ein maximaler relativer Messfehler von 2,16%.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema eines seriellen Hybrid-Antriebsstrangs	7
2.2	Schema eines parallelen Hybrid-Antriebsstrangs	8
2.3	Schema eines leistungsverzweigten Hybrid-Antriebsstrangs . .	9
2.4	Antriebsstrang der Alstom Hybridlokomotiven	11
2.5	Antriebsstrang der Alstom H3 in Hybridausführung	12
2.6	Antriebsstrang der Toshiba HD300	12
2.7	Geplanter Antriebsstrang im Projekt HELMS	13
2.8	Antriebsstrang der Gmeinder-Hybridlokomotiven	14
2.9	Antriebsstrang des NE Train	15
2.10	Antriebsstrang des Kiha-160	16
2.11	Antriebsstrang des umgebauten Desiro der Westfrankenbahn .	17
2.12	Der umgebaute Desiro bei den Testfahrten	18
2.13	Der Antriebsstrang des EcoTrain	20
2.14	Signalfflussorientiertes Modell	22
2.15	Visualisierung eines Modelica-Simulationsmodells	24
2.16	V-Modell	34
2.17	X-in-the-Loop Framework	37
3.1	Morphologischer Kasten zur Erstellung der Konzepte	44
3.2	Morphologischer Kasten mit den Konzepten	45
3.3	Schema Konzept 1	46
3.4	Schema Konzept 2	47
3.5	Schema Konzept 3	48
3.6	Schema Konzept 4	49

3.7	Bestimmung des Modus aus SOC, Fahrhebelstellung und Geschwindigkeit	55
3.8	Schematische Darstellung des Verbrennungsmotormodells . . .	57
3.9	Schematische Darstellung des Elektromotormodells	59
3.10	Schematische Darstellung des Getriebemodells	60
3.11	Schematische Darstellung des physikalischen Speichermodells	61
3.12	Kraftstoffverbrauch in der Simulation	67
3.13	Geschwindigkeitsverlauf Versuch 1 und 9	68
3.14	Kraftstoffverbrauch in der Simulation bei identischem Geschwindigkeitsprofil	69
4.1	Ablauf des sequentiellen Versuchs	74
4.2	Aufteilung in Antriebseinheiten	75
4.3	Durchlauf 1	76
4.4	Durchlauf 2	77
4.5	Systemgrenze zwischen UUT und Restfahrzeug	79
4.6	Aufteilung der Schnittstellen in gerichtete Größen	81
4.7	Systemgrenze zwischen UUT und Restfahrzeug im zweiten Durchlauf	82
4.8	Ausführung des Weg-Reglers	85
4.9	Bewerter-Regler System	86
4.10	Modell zur Leistungsvorgabe	88
4.11	Modell zur Simulation der Messfehler am Prüfstand	90
4.12	Geschwindigkeitsverläufe in den Simulationen zur Auswahl von Regler und Vorgabe	92
4.13	Leistung der elektrischen Antriebseinheit	93
4.14	Schematischer Schaltplan des Prüfstands	99
4.15	Durchlauf 1 auf dem Prüfstand	102
4.16	Durchlauf 2 auf dem Prüfstand	105

5.1	Geschwindigkeitsverläufe aus Durchlauf 1 und Durchlauf 2 . .	111
5.2	Zurückgelegter Weg in Durchlauf 1 und Durchlauf 2	112
5.3	Energiebilanzen aus Durchlauf 1 und Durchlauf 2	113
5.4	Fusion mittels Interpolation	115
5.5	Fusion mittels Zuordnung	116
5.6	Fusion mittels Mittelwertbildung	117
5.7	Spannungsverlauf im Speicher aus Durchlauf 1	119
5.8	Kraftstoffverbrauch aus Durchlauf 2	120
A.1	Kennlinie für das maximale Drehmoment des Dieselmotors . .	135

Tabellenverzeichnis

2.1	Fahrplan für die Simulation	41
3.1	Konzeptbewertung	51
3.2	Variation der Betriebsmodi im Fahrzustand „Beschleunigen“ . . .	63
3.3	Variation der Speichergröße	65
3.4	Versuchsplan für die simulative Auslegung	66
3.5	Versuchsplan mit identischem Geschwindigkeitsverlauf	70
4.1	Mögliche Regel- und Vorgabegrößen	84
4.2	Untersuchte Kombinationen aus Vorgabewert und Regler	91
4.3	Ergebnisse der Kombinationen aus Vorgabewert und Regler	94
4.4	Verwendete Programmversionen	95
4.5	Technische Daten der Prüfstandsmotoren	97
5.1	Maximale Messabweichungen Drehmomentmessung	108
5.2	Maximale Messabweichungen Leistungsmessung	109

Literaturverzeichnis

- [1] ALBERS, Albert ; BURKHARDT, Norbert ; MEBOLDT, MIRKO, SAAK, MARCUS: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: SAMUEL, Andrew E. (Hrsg.): *Engineering design and the global economy*. Melbourne : The Design Society, 2005. – ISBN 978–085825788–7
- [2] ALBRECHT, Andreas: Eco Train - Umbau eines Triebzuges BR 642 zum Hybridtriebzug. In: *Elektrische Bahnen : EB; Elektrotechnik im Verkehrswesen* (2017), Nr. 1, S. 24–29
- [3] ANGERMANN, Falk: Diesel-Hybrid Eco-Train mit Nachladung aus der Wechsellspannungs-Oberleitung. In: *Elektrische Bahnen : EB; Elektrotechnik im Verkehrswesen* (2017), Nr. 1, S. 30–36
- [4] BACK, Michael: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Karlsruhe, Universitätsverlag, Diss., 2006
- [5] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge*. 05.10.2007
- [6] DB FAHRZEUGINSTANDHALTUNG: *Neuartiges Hybridkonzept: Das Projekt HELMS (Hybrid Electronic Mechanical Shunter)*

- steht für eine innovative und energieeffiziente Modernisierung.*
<http://www.db-fzi.com/fahrzeuginstandhaltung-de/leistungsportfolio/produkte-und-innovationen/helms.html>. –
Zuletzt abgerufen am 08.08.2017
- [7] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Informationsverarbeitung; Begriffe*. Berlin, 03.1982
- [8] DSPACE GMBH: *PHS Bus System Hardware Reference*. 2015
- [9] DÜSER, Tobias: *X-in-the-Loop - ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000020671>
- [10] Hybrid-Regionalverkehrstriebzug. In: *Elektrische Bahnen : EB; Elektrotechnik im Verkehrswesen* (2012), Nr. 10, S. 571
- [11] ENGELN-MÜLLGES, Gisela ; NIEDERDRENK, Klaus ; WODICKA, Reinhard: *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. 10., überarb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2011 (Xpert.press). – ISBN 978-3-642-13472-2
- [12] FICHTL, Holger ; BEIMS, Martin ; CLAUS, Sören ; WERNER, Claus: Eco Train - der neue Hybridtriebwagen der Erzgebirgsbahn. In: *ZEV-rail Tagungsband SFT Graz 2016* 140 (2016), S. 73–79
- [13] FILIPOVIĆ, Žarko: *Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 5., überarbeitete Auflage. Berlin and Heidelberg : Springer Vieweg, 2015 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-45227-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-45227-7>. – ISBN 978-3-642-45227-7
- [14] FRENKEL, Jens: *Entwicklung eines Modelica Compiler BackEnds für große Modelle*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertati-

- on, 2014. http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13203/diss_frenkel_final.pdf
- [15] FRITZSON, Peter: *Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica*. Online-Ausg. Hoboken, N.J and s.l. : Wiley, 2011. – ISBN 978–1–283–39780–3
- [16] FUJII, Taketo ; TERAYA, Nobutsugu ; OSAWA, Mitsuyuki: Development of an NE Train. In: *JR EAST Technical Review* (2004), Nr. 4, 62–70. https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_4/Tech-no.4-62-70.pdf. – Zuletzt abgerufen am 05.04.2017
- [17] FURUTA, Ryosuke ; KAWASAKI, Junji ; KONDO, Keiichiro: Hybrid Traction Technologies with Energy Storage Devices for Nonelectrified Railway Lines. In: *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* (2010), Nr. 5, S. 291–297
- [18] *DE75 BB: Rangierlokomotive mit elektrischer Leistungsübertragung und flexibler Energieversorgung Dual Engine - Hybrid - Batterie - Stromschiene*. http://www.gmeinder-lokomotiven.de/fileadmin/file-mounts/gmeinder/download/Prospekte/DE/DE75_BB.pdf. Version: 2015. – Zuletzt abgerufen am 05.04.2017
- [19] *DE60 C Hybrid: Modernisiert aus Gmeinder DE500 C*. http://www.gmeinder-lokomotiven.de/fileadmin/file-mounts/gmeinder/bilder/modernisierung/Kurzbeschreibung_Hybrid_DE60_C.PDF. Version: 2016. – Zuletzt abgerufen am 05.04.2017
- [20] HAAG, Stefan ; ELLER, Marco ; GRATZFELD, Peter: Methodische Auslegung eines Hybridantriebs für Nahverkehrstriebwagen. In: *Elektrische Bahnen : EB; Elektrotechnik im Verkehrswesen* 115 (2017), Nr. 5, S. 230–237

- [21] HARTMANN, Nico: *Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik*, Universität Karlsruhe, Diss., 2001
- [22] HILLER, Klaus: Hybridlokomotiven für den Verschiebeinsatz. In: *ZEV Rail Sonderheft Tagungsband Moderne Schienenfahrzeuge* 137 (2013), S. 68–71
- [23] HOLLÄNDER, Frank: *Simulation und Betriebsstrategie eines Diesel-Hybrid-Triebzuges: Masterarbeit*. Karlsruhe, 2015
- [24] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH: *Datenblatt MX460B Impuls- und Frequenzmessmodul*. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3892.pdf>. – Zuletzt abgerufen am 07.08.2017
- [25] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH: *Datenblatt T40B Drehmomentmessflansch*. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3405.pdf>. – Zuletzt abgerufen am 07.08.2017
- [26] *CarMaker: Virtual Testing of Automobiles and Light-Duty Vehicles*. <https://ipg-automotive.com/products-services/simulation-software/carmaker/>. – Zuletzt abgerufen am 28.04.2017
- [27] JICKELI, Birgit: *Aufbau einer Echtzeitsimulation zur Prüfstandseinbindung: Bachelorarbeit*. Karlsruhe, 2016
- [28] KACHE, Martin: Hybridlokomotive - Ein globaler Überblick. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* (2014), Nr. 10, S. 32–36
- [29] KACHE, Martin: *Modellierung, Simulation und Bewertung parallel-hybrider Antriebskonfigurationen für dieselhydraulische Triebwagen im Nah- und Regionalverkehr*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2014. http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/14990/Dissertation_Kache_PDFa.pdf

- [30] KLÖCKNER, Andreas ; VAN DER LINDEN, Franciscus ; ZIMMER, Dirk: Noise Generation for Continuous System Simulation. In: *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, Linköping University Electronic Press, 2014 (Linköping Electronic Conference Proceedings), 837–846
- [31] KÖLLNER, Christian: *Transformation von Multiphysics-Modellen in einen FPGA-Entwurf für den echtzeitfähigen HiL-Test eingebetteter Systeme*. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, Diss., 2013
- [32] LAUSS, Gf ; FARUQUE, Mo ; SCHODER, K. ; DUFOUR, C. ; VIEHWEIDER, A. ; LANGSTON, J.: Characteristics and Design of Power Hardware-in-the-Loop Simulations for Electrical Power Systems. In: *IEEE Transactions On Industrial Electronics* (2016), Nr. Vol.63(1), S. 406–417
- [33] LEHMANN, Ingo: *Hybridantrieb auf Basis des MTU Hybrid PowerPacks : Demonstration eines Hybrid-Schienebusse und Nachweis der technischen Alltagstauglichkeit ; Abschlussbericht*. https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A777643014/Hybridantrieb-auf-Basis-des-MTU-Hybrid-PowerPacks/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn. Version: 2013. – Zuletzt abgerufen am 03.04.2017
- [34] MATTHIESEN, Sven: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2002
- [35] MATTHIESEN, Sven ; GWOSCH, Thomas ; MANGOLD, Sebastian ; GRAUBERGER, Patric ; STECK, Michael ; CERSOWSKY, Stefan: Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP 2017)*, 2017

- [36] *K2 Ultracapacitors - 2,7V Series*. http://www.maxwell.com/images/documents/K2Series_DS_1015370_5_20141104.pdf. – Zuletzt abgerufen am 13.04.2017
- [37] MEINERT, M. ; MELZER, M. ; KAMBUROW, C. ; PALACIN, R. ; LESKA, M. ; ASCHEMANN, H.: Benefits of hybridisation of diesel driven rail vehicles: Energy Management strategies and life-cycle costs appraisal. In: *Applied Energy* 157 (2015), S. 897–904
- [38] MILLER, Steve ; WENDLANDT, Jeff: *Echtzeitsimulation physikalischer Systeme mit Simscape*. <https://de.mathworks.com/company/newsletters/articles/real-time-simulation-of-physical-systems-using-simscape.html>. Version: 2011. – Zuletzt abgerufen am 07.08.2017
- [39] *Modelica Tools*. <https://www.modelica.org/tools>. – Zuletzt abgerufen am 07.04.2017
- [40] NAGAURA, Yasuhiro ; OISHI, Ryoichi ; SHIMADA, Motomi ; KANEKO, Takashi: Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook. In: *Hitachi Review* 66 (2017), Nr. 2, S. 138–144
- [41] OBST, Steffen ; LÖBE, Martina: Der Regio-Shuttle RS1: Das bewährte, flexibel und wirtschaftlich einsetzbare Schienenfahrzeug für den Regionalverkehr. In: *ZEV Rail* (2012), Nr. 136, S. 288–295
- [42] OGAWA, Tomoyuki ; KANNO, Hiroshi ; SOEDA, Tadashi ; SUGIYAMA, Yoshikazu: Environmental evaluation of a diesel hybrid shunting locomotive. In: *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, IEEE, 2012. – ISBN 978–1–4673–1372–8, S. 1–6
- [43] OOSTRA, Jolt ; DUNGER, Werner: Hybrid-Rangierlokomotive: Technik und Anwendungen. In: *ZEV Rail* 133 (2009), Nr. 9, S. 365–369
- [44] OSZFOLK, Benjamin ; RADKE, Matthias ; KASCH, Matthias ; IBELLE, Yvonne: Hybridantrieb stellt Marktreife unter Beweis. In: *ETR-Eisenbahntechnische Rundschau* (2015), Nr. 9, S. 44–48

- [45] POHLANDT, Christian ; GEIMER, Marcus ; HAAG, Stefan ; GRATZFELD, Peter: Dynamischer Prüfstand für elektrische Antriebssysteme. In: *ATZ offhighway* (2014), Nr. 2, S. 70–80
- [46] RATHJEN, Olaf: *Fortschritte in der Simulationstechnik, im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM)*. Bd. 5: *Digitale Echtzeitsimulation: Simulation einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung*. Wiesbaden and s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 1993. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-14172-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-14172-3>. – ISBN 3–528–06517–6
- [47] *EcoTrain der Erzgebirgsbahn: Elektrofahrzeuge*. http://www.saena.de/download/Elektromobilitaet/Projektplakate_Seite_27.pdf. – Zuletzt abgerufen am 04.04.2017
- [48] SAX, Eric: *Beitrag zur entwurfsbegleitenden Validierung und Verifikation elektronischer Mixed-Signal-Systeme*. Karlsruhe, Forschungszentrum Informatik an der Universität Karlsruhe, Diss., 2000
- [49] SCHIELA, Anton ; OLSSON, Hans: Mixed-mode Integration for Real-time Simulation. In: FRITZSON, Peter (Hrsg.) ; OTTER, Martin (Hrsg.) ; ELMQVIST, Hilding (Hrsg.) ; TUMMESCHEIT, Hubertus (Hrsg.): *Modelica Workshop 2000 Proceedings*, 2000, S. 69–75
- [50] SCHIMKE, Robert: *Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselektrischen Lokomotiven*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2013. http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/11495/Diss_Schimke_Druckversion_final.pdf
- [51] SCHRÖTER, Jens: *Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2013. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000036780>

- [52] SEIFERT, Georg ; TRESCHER, Christian ; BLEIKER, Andreas: *LCC-Treiber "Energieverbrauch" als Bestandteil der Fahrzeugbeschaffung - Erfahrungen aus dem Projekt S-Bahn Rhein-Ruhr*. Dresden, 8.12.2016 (IZBE / VDE-Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen)
- [53] SHIRAKI, N. ; SATOU, H. ; ARAI, S.: A Hybrid System for Diesel Railcar Series Ki-Ha E200. In: *The 2010 International Power Electronics Conference* (2010), S. 2853–2858
- [54] STADLER PANKOW GMBH: *Regionaltriebwagen Regio-Shuttle RS1 für die Ruhrtalbahn GmbH*. https://www.stadlerrail.com/live-01e96f7.s3-eu-central-1.amazonaws.com/filer_public/6b/83/6b83fb30-ac58-46df-bd4e-b738e135c200/sta-1223-042_rs1-rurtalbahnhof_d_web.pdf. Version: 2012. – Zuletzt abgerufen am 06.08.2017
- [55] STUMM, Marco: *Entwicklung eines Hardware in the Loop Prüfstandes zur Validierung eines neuartigen Antriebstrangs: Masterarbeit*. Karlsruhe, 2016
- [56] *sustina Hybrid: A Pioneer in Hybrid Trains*. September 2016
- [57] THIEBES, Phillip ; VOLLMER, Thees: Modellierung des Fahrers zur Untersuchung von Antriebssträngen in der 1D-Simulation am Beispiel eines Radladers mit Hybridantrieb. In: GAUTERIN, Frank (Hrsg.) ; GEIMER, Marcus (Hrsg.) ; GRATZFELD, Peter (Hrsg.) ; HENNING, Frank (Hrsg.): *3. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2011 (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik), S. 47–59
- [58] TOSHIBA INFRASTRUCTURE SYSTEMS & SOLUTIONS CORPORATION: *Toshiba Hybrid System*. <http://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/products/catalog/pdf/c3ToshibaHybridSystem.pdf>. Version: 2016. – Zuletzt abgerufen am 06.08.2017

-
- [59] PROJEKTTRÄGER TÜV RHEINLAND (Hrsg.): *PREDIKT - Prädikative Regelung von Diesel-Hybrid-Antrieben und elektrische Koppelung der Traktionsantriebe*. <http://www.tuvpt.de/index.php?id=forderung0001000000113>. – Zuletzt abgerufen am 04.04.2017
- [60] UNITED NATIONS: *Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions: Addendum 100: Regulation No. 101 Rev. 3*. 2013
- [61] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 1. Düsseldorf, 01.06.2004
- [62] WÄLTERMANN, Peter: *Der serielle Hybridantrieb: Vom rechnergestützten Entwurf zur Hardware-in-the-Loop-Realisierung*. Düsseldorf, VDI-Verl, Diss., 2000
- [63] ZES ZIMMER: *Mehrkanal Leistungsmessgerät LMG 500 Benutzerhandbuch*. 2011
- [64] ZES ZIMMER: *ZES Sensors and Accessories*. https://www.zes.com/de/content/download/493/4881/file/ZES_SENSORS.pdf. Version: 2014. – Zuletzt abgerufen am 07.08.2017

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrantriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrhahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radföhrung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsföhrung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 31** Michael Eckert
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung
mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines
dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven
Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit
sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in
mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung
von Nutzfahrzeugen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahntrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch
Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose
Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9

Diesel-hybride Antriebssysteme für Triebwagen können den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen auf nicht elektrifizierten Strecken gegenüber konventionellen Dieseltriebwagen deutlich reduzieren und so einen Beitrag zum Umweltschutz leisten. Die Auslegung solcher Antriebssysteme erfordert den Einsatz von Simulation und experimentellen Methoden. Für die Validierung wird eine Vorgehensweise entwickelt, die es erlaubt, einzelne Antriebseinheiten nacheinander auf dem Prüfstand zu validieren und anschließend die Messdaten zu einem gemeinsamen Ergebnis zusammenzufügen. Dadurch kann das Verhalten komplexerer Antriebssysteme validiert werden, auch wenn es nicht möglich ist, das komplette Antriebssystem am Prüfstand zu testen.

