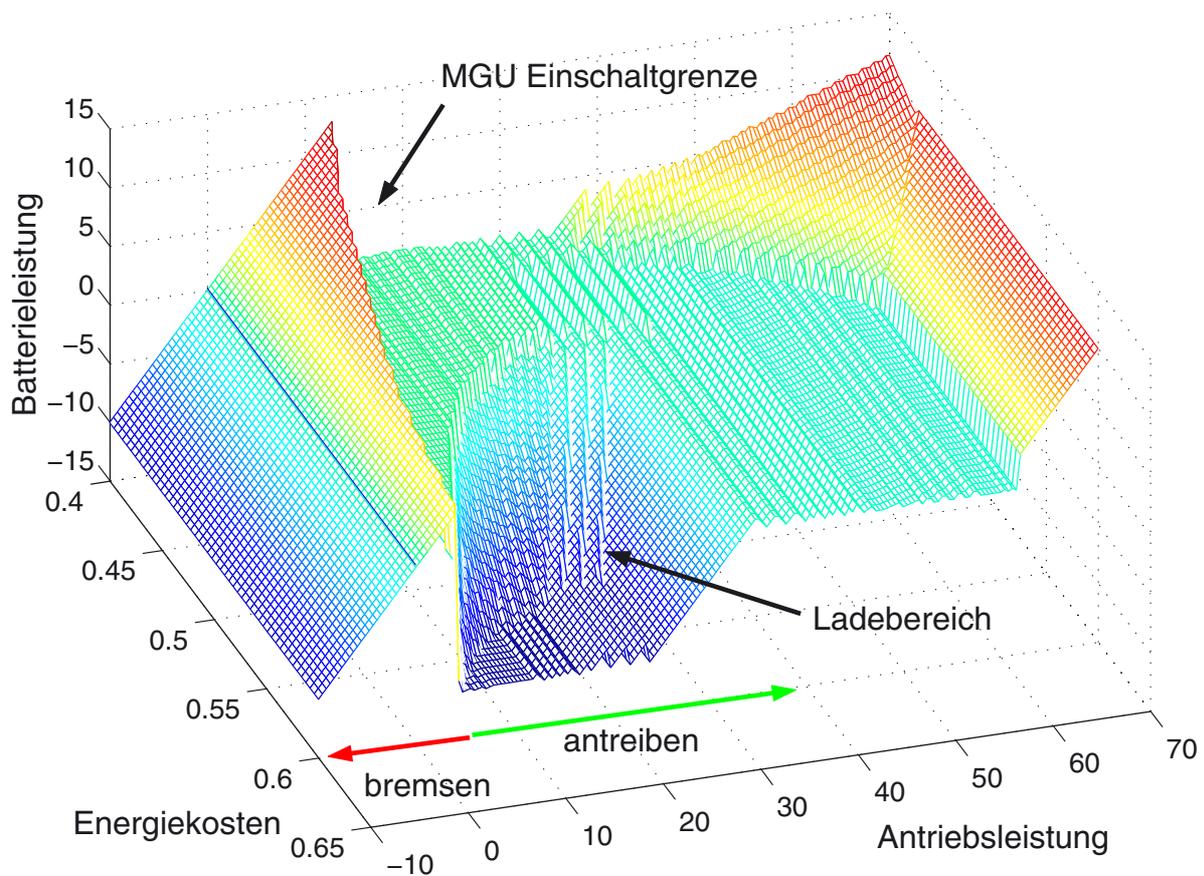
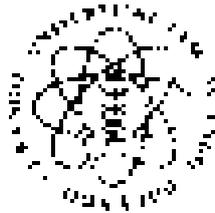


Adaptives Energiemanagement für einen hybriden Pkw-Antrieb mit dezentraler Reglerstruktur



Adaptives Energiemanagement
für einen hybriden Pkw-Antrieb mit dezentraler Reglerstruktur



Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Ulm

von

Andreas Wagener

aus Schillingsfürst

1. Gutachter: Prof. Dr. Herbert Kabza
2. Gutachter: Prof. Dr. Hans Peter Großmann
Amtierender Dekan: Prof. Dr.-Ing. Hans Jörg Pfeleiderer
Datum der Promotion: 18. Juni 2004

2004

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004

Zugl.: Ulm, Univ., Diss., 2004

ISBN 3-86537-252-X

⊕ CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2004

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-252-X

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Energiewandlung und -speicherung *EMS* der Universität Ulm.

Herrn Prof. Dr. H. Kabza, dem Leiter der Abteilung *EMS* danke ich dafür diese Arbeit ermöglicht, angeregt und begleitet zu haben.

Er hat unserer Arbeitsgruppe in der konkreten Ausgestaltung des Projekts bemerkenswerte Freiheit und Eigenverantwortlichkeit eingeräumt. Für diese Gelegenheit zur fachlichen aber auch zur persönlichen Weiterentwicklung habe ich besonders zu danken.

Herrn Prof. Dr. H.-P. Großmann danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen, Herrn Dr.-Ing. Christian Körner der den automotiven Hintergrund in unsere Arbeitsgruppe eingebracht hat und Herr Dr.-Ing. Peter Seger mit seinem kritisch realistischen Blick auf die Möglichkeiten der zu verwendenden Speicher.

Bedanken möchte ich mich hier aber auch bei den Mitarbeitern in der Werkstatt der Abteilung *EMS*, Herr Beuerle, Herr Grafe und Herr Köhler ohne deren tatkräftige Unterstützung ein so umfangreiches Projekt, wie der im Rahmen der Arbeit mit aufgebaute Antriebsprüfstand, nicht zu bewältigen gewesen wäre.

Daß die Arbeit an der Dissertation immer wieder auch zu Lasten der Familie ging läßt sich nicht leugnen. Insbesondere meiner Frau danke ich daher für ihre Geduld und Unterstützung.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt einen weitgehend strukturunabhängigen Ansatz für das Energiemanagement im hybriden Antriebsstrang. Ausgehend von Kostenfunktionen für die abgegebene Energie wird die Lastaufteilung online über einen Energiehandel vorgenommen. Über den mittleren Wert der in der Batterie gespeicherten Energie paßt sich der Algorithmus an unterschiedliche Fahrzyklen und Fahrer an. Der Ansatz wurde in der dazu entwickelten Simulation der Fahrzeuglängsdynamik implementiert und am gleichzeitig dafür aufgebauten Antriebsprüfstand validiert.

Abgerundet wird die Ausarbeitung durch eine Auseinandersetzung mit den absehbaren Grenzen der individuellen Mobilität und einer Abschätzung des Effizienzpotentials weiterentwickelter Antriebe. Den Abschluß bilden Hinweise zur Applikation des Energiemanagements zusammen mit einem emissionsorientierten Thermomanagement für den Verbrennungsmotor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung / Motivation	1
1.1	Hybride Lösungen	2
1.2	Aufbau und Zielsetzung der Arbeit	3
1.3	Methodik	5
2	Grenzen der Mobilität	6
2.1	Rohstoffbasis für die zukünftige Energieversorgung	6
2.2	Energiebedingte Emissionen	10
2.2.1	Limitierte Schadstoffe	10
2.2.2	Treibhausgas-Emissionen	11
2.2.3	Der anthropogene Treibhauseffekt	11
2.2.4	Begrenzung der anthropogenen Treibhausgas-Emissionen	12
2.3	Nachhaltige Mobilität	15
3	Optimierte Fahrzeugantriebe	17
3.1	Motoren mit innerer Verbrennung	17
3.2	Energieverbrauch von Fahrzeugen	21
3.2.1	Fahrwiderstände	21
3.2.2	Testzyklen	23
3.3	Optimierte Verbrennungsmotoren	24
3.3.1	Ottomotoren	24
3.3.2	Dieselmotoren	27
3.3.3	Motoren mit alternativen Kraftstoffen	29
3.4	Optimierte Triebstränge	33
3.5	Optimierte Elektroantriebe	35
3.6	Hybridfahrzeuge	37
3.6.1	Parallelhybride	39
3.6.2	Serienhybride	40
3.6.3	Mischhybride	41
3.6.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	41
3.7	Perspektiven	43

4	Der serielle Hybridantrieb	46
4.1	Komponenten	47
4.1.1	Zwischenkreis	48
4.1.2	Traktionsmaschine	48
4.1.3	Speicher	51
4.1.4	Motor-Generator-Einheit	53
4.1.5	Nebenaggregate	55
4.2	Antriebsmanagement	56
4.3	Zielkonfiguration	56
5	Systemstruktur und -simulation	57
5.1	Simulation in der Antriebsentwicklung	57
5.2	Zwischenkreis	62
5.3	Traktionsantrieb	63
5.3.1	Bewegungsgleichung	63
5.3.2	Antrieb	64
5.3.3	Traktionscontroller	64
5.4	Speicher	65
5.4.1	Batterie	65
5.4.2	Batteriemanagement	67
5.4.3	DC/DC-Steller	67
5.5	MGU	69
5.5.1	Generator	69
5.5.2	Dieselmotor	69
5.5.3	MGU Controller	71
5.6	Kommunikation	72
5.7	Fahrer	72
5.8	Antriebsmanagement	72
6	Der Hybridprüfstand	74
6.1	Der Prüfstand als verteiltes System	74
6.2	Simulationsbasierte Applikation	77
6.2.1	Anpassung an den RTW	79
6.2.2	Applikation am Prüfstand	82

6.3	MGU Prüfplatz	83
6.3.1	Thermoverhalten	84
6.3.2	Stationäres Abgasverhalten	85
6.3.3	Motordynamik	86
6.4	Speicher Prüfplatz	88
6.5	Traktions Prüfplatz	91
6.6	Prüfstandsbetrieb	91
7	Energiemanagement	92
7.1	Energiemanagement in Hybriden	92
7.1.1	Freiheitsgrade der Antriebe	92
7.1.2	Zielkriterien	93
7.2	Optimierungsansätze	95
7.3	Bekannte Managementansätze	96
7.3.1	Einpunktstrategie	96
7.3.2	Power-Tracking	97
7.3.3	Bewertung	99
7.4	Kostenbasierte Leistungsaufteilung	99
7.4.1	Quellenkombination	100
7.4.2	Durchschnittskosten der MGU	101
7.4.3	Durchschnittskosten der Batterie	102
7.4.4	Durchschnittskosten der Traktion	103
7.4.5	Kombinierter Betrieb	103
7.4.6	Moduswechsel	107
7.5	Integration in die Antriebssimulation	107
7.5.1	Lademanagement	107
7.5.2	Thermomanagement	108
7.5.3	MGU Ansteuerung	108
7.5.4	Preisermittlung	108
7.6	Evaluation	109
7.6.1	Dynamischer Betrieb	109
7.6.2	Kraftstoffverbrauch	110
7.6.3	Limitierte Schadstoffe	114
7.7	Bewertung	115

8 Zusammenfassung und Ausblick	117
8.1 Potential des Serienhybrids	117
8.2 Ausblick	119
Literaturverzeichnis	121
Anhang	144
A Prüfzyklen	144
B Fahrzeugdaten	145
C Modelle	147
C.1 MGU	147
C.2 Traktionsbatterie	148
C.3 Traktionsantrieb	150
D Prüfstand	152
D.1 MGU Prüfplatz	152
D.2 Speicher Prüfplatz	153
D.3 Traktions Prüfplatz	154

Abkürzungen

AC	Wechselspannung
ACEA	Europäische Verband der Automobilhersteller
AGR	Abgasrückführung
API	Application Programming Interface
APU	Auxiliary Power Unit
ASM	Asynchronmaschine
ATL	Abgasturbolader
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BLDC	Bürstenlose Gleichstrommaschine
BMS	Batterie Management System
BMWi	Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
CAN	Controller Area Network
CANopen	standardisierte Layer 7 Protokollschicht für offene CAN Kommunikation
CASE	Computer Aided Software Engineering
CH ₂	komprimierter Wasserstoff
CiA	CAN in Automation, CAN Nutzerorganisation für indust. Anwendungen
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CVS	Constant Volume Sampling
CVT	stufenloses Getriebe
DC	Gleichspannung
DI	Direkteinspritzung
DISI	Benzin-Direkteinspritzung
DOE	United States Federal Department of Energy
ECE	Europäischer Fahrzyklus (städtischer Teil)
EMK	Elektromotorische Kraft
EMVT	Elektromechanische Ventiltrieb
EUDC	Überlandanteil des NEFZ
 EWS	Abteilung Energiewandlung und -speicherung
EV	Elektrofahrzeug
ftp	Federal Test Procedure, US Testzyklus
GAPC	Global Alternative Propulsion Center
HEV	Hybridfahrzeug
HIL	Hardware in the Loop
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

JUPITER	Joint Urban Project In Transport Energy Reduction
KRK	Klimarahmenkonvention
KSG	Kurbelwellen Starter-Generator System
LH2	Verflüssigter Wasserstoff
LNG	Liquefied Natural Gas
MGU	Motor-Generator-Einheit
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NEFZ	Neuer Europäischer Fahr Zyklus
OPC	Object Linkung and Embeding (OLE) for Process Control
OPEC	Organisation Erdöl exportierender Staaten
OSEK	Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kfz
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PIK	Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung
PSM	Permanentmagnet-erregte Synchronmaschine
RCP	Rapid Controller Prototyping
SCR	Katalysatoren zur selektiven katalytischen NO_x -Reduktion
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
RTW	Real-Time-Workshop
SDL	Specification and Description Language
SIL	Software in the Loop
SGS	Starter-Generator-System (nicht notwendigerweise auf der Kurbelwelle
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SRL	Geschaltete Relkutzanzmaschine
SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
TDi	VW Audi Bezeichnung für direkteinspritzende Dieselmotoren
TLC	Target Language Compiler
UBA	Umwelt Bundes Amt
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
UML	Unified Modeling Language
USABC	United States Adwanced Battery Consortium
VES	Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
VHDL	Very high speed integrated circuit Hardware Description Language
VMU	Vehicle Management Unit
VRLA	Valve Regulated Lead Acid Batteries
VVT	Variabler Ventiltrieb (mechanisch)
WBGU	Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
ZEV	Zero Emission Vehicle

Formelzeichen

Indizierung

X	skalare Größe
\mathbf{X}	vektorielle oder komplexe Größe
X_N	Nennwert
X_{max}	Maximalwert
X^*	Sollwert für die Größe X

Kraftwerksprozesse

η_{el} Wirkungsgrad der Stromerzeugung im Kraftwerk

Verbrennungskraftmaschinen

$b_e(n, M)$	betriebspunktabhängiger spezifischer Verbrauch
c_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_V	Wärmekapazität bei konstantem Volumen
M	abgegebenes Drehmoment
n	Drehzahl
p	Gasdruck
p_ν	Gasdruck an ausgewiesenen Punkten im Kreisprozess
T	Temperatur
T_ν	Gastemperatur an ausgewiesene Punkten im Kreisprozess
V	Gasvolumen
V_ν	Arbeitsvolumen an ausgewiesenen Punkten im Kreisprozess
W_B	Energieinhalt der zugeführten Brennstoffmenge
$W_{B,u}$	Energieinhalt des unverbrannten oder nur zum Teil umgesetzten Kraftstoffs
ε	Verdichtungsverhältnis V_1/V_2
κ	Adiabatexponent = c_p/c_V
η_B	Brennstoffumsetzungsgrad
η_{gHD}	Gütegrad des Hochdruckprozesses
η_{gLW}	Ladungswechselwirkungsgrad
η_m	mechanischer Wirkungsgrad
η_{th}	theoretischer Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses
φ	Einspritzverhältnis als Volumenverhältnis des Einspritzvorgangs V_2/V_3
λ	Luftzahl

Fahrdynamik

α	Steigungswinkel
a	Längsbeschleunigung
A	wirksame Frontfläche des Fahrzeugs
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
F_a	auf die Fahrzeugmasse wirkende beschleunigende Kraft
F_{Roll}	Bremskraft der Rollreibung
F_{St}	Hangabtriebskraft
F_{Wind}	bremsende Kraft durch den Luftwiderstand
g	Erdbeschleunigung
i	Getriebeübersetzung
M_{Aux}	Lastmoment der Nebenaggregate
M_e	Nutzmoment des Antriebsmotors
m	(schwere) Masse des Fahrzeugs
m_{Θ}	(träge) Ersatzmasse rotierender Teile
μ	Rollreibungkoeffizient
r_{dyn}	dynamischer Radradius des rotierenden Reifens
ρ	Dichte der Luft
\ddot{u}	kombinierte Getriebe- und gegebenenfalls Achsübersetzung
v	Fahrzeuggeschwindigkeit

Wirtschaftlichkeit

A_H	Annuität der einmaligen Kosten für Anschaffung und Entsorgung
i	inflationbereinigter Zinssatz
k_K	Kraftstoffpreis
K_0	Kaufpreis
K_E	Entsorgungskosten
\dot{K}_f	jährlichen feste Kosten
\dot{K}_v	jährlichen variable Kosten
L	Lebensdauer
r_L	Annuitätsfaktor
S	Jahreslaufleistung
v	Kraftstoffverbrauch

Systembetrachtung

C_d	Kapazität des Zwischenkreiskondensators
η_{Getr}	Wirkungsgrad des Getriebes
η_{Tr}	betriebspunktabhängiger Antriebswirkungsgrad
I	Strom
I_B	Strom in die Speichereinheit auf Zwischenkreisseite
I'_B	Strom in die Batterie auf Batteriespannungsniveau
$i'_{B,ss}$	Spitze-Spitze Wert der Batteriestrom-Oberschwingungen
I_G	Strom des Generators in den Zwischenkreis
I_{Tr}	Strom in die Traktionsmaschine
J_{ges}	an der Motorwelle wirksames Trägheitsmoment
L	Längsinduktivität des DC/DC-Stellers
λ	Aussteuerungsgrad des DC/DC-Stellers
M_{Br}	Moment der Bremsen
M_{CE}	Moment der Verbrennungsmaschine bei Parallelhybridantrieben
M_{EM}	Moment der Elektromaschine bei Parallelhybridantrieben
M_L	dissipative Lastmomente aus der Fahrdynamik
M_{Tr}	Moment der Traktionsmaschine
n	Drehzahl
n_{max}	Maximaldrehzahl
n_N	Nenndrehzahl
n_{Tr}	Drehzahl der Traktionsmaschine
P	Leistung
P_{Aux}	an Nebenverbraucher abgegebene Leistung
P_{Batt}	Leistung der Batterie
P_{Gen}	Leistung des Generators
P_{max}	Maximalleistung (einer Antriebsmaschine)
P_{opt}	Leistung (einer Antriebsmaschine) im Punkt besten Wirkungsgrads
$P_{MGU}(n, M)$	betriebspunktabhängige Leistung der MGU
$P_{Tr}(v)$	betriebspunktabhängige Antriebsleistung
$P_{Br,Tr}$	Bremsleistung der Traktionsmaschine
$R_{i,E}$	Innenwiderstand der Batterie im entladenden Zustand
$R_{i,L}$	Innenwiderstand der Batterie im ladenden Zustand
t	Zeitvariable
T_{Tr}	Ersatzzeitkonstante für die stromgeregelte Traktionsmaschine
T_{TDi}	Ersatzzeitkonstante für den Verbrennungsmotor
T_W	Kühlwassertemperatur des Verbrennungsmotors

U	Spannung
U_B	Batterie(klemmen)spannung
U_0	Ersatzspannung der idealen Spannungsquelle im Batterieersatzschaltbild (Ruhespannung)
U_d	Zwischenkreisspannung
U_{out}	Klemmenspannung des DC/DC Stellers
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs
V_T	Thermischer Verlustfaktor der MGU

Drehfeldmaschine

i_s	komplexer Ständerstromzeiger
i_r	komplexer Läuferstromzeiger
i_d	Längsstromkomponente (feldbildend)
i_q	Querstromkomponente (momentbildend)
Ψ_s	komplexer Ständerfeldvektor
Ψ_r	komplexer Läuferfeldvektor

kostenbasiertes Energiemanagement

b_{TDi}	umgesetzte Brennstoffmenge
k	Durchschnittskosten
k_{Batt}	durchschnittliche bezogene Energiekosten der Batterie
k_{ges}	bezogener Durchschnittspreis der Energie im Zwischenkreis (Handelspreis)
k_{MGU}	durchschnittliche bezogene Energiekosten der MGU
k_0	bezogene Grundkosten der Energie (für MGU oder Batterie)
\dot{K}_{ges}	Momentankosten der Energie
K_{ges}	Gesamtkosten der Energie
\dot{m}_{be}	Brennstoffmassenstrom des Verbrennungsmotors
\dot{m}_{Gas}	Abgasmassenstrom
m_{Gas}	Abgasmasse
$m_{Gas,max}$	Grenzwert für die Abgasmasse
P_{Lade}	Ladeleistung in die Batterie
R_i	Innenwiderstand der Batterie
SOC	aktueller Ladungszustand der Batterie
U_0	Ruhe-spannung der Batterie
W	Energiemenge
W_{Acc}	an die Traktionsmaschine zum Vortrieb abgegebene Energiemenge
W_{Batt}	Energieinhalt der Batterie
W_{Ch}	an die Batterie abgegebene Energiemenge
W_{Dec}	von der Traktionsmaschine durch Nutzbrem-sung zurückgespeiste Energiemenge
W_{Dis}	dem System aus der Batterie zugeführte Energiemenge
W_{MGU}	von der MGU abgegebene Energiemenge
$W_{eingespeichert}$	in die Batterie eingespeicherte Energiemenge
$W_{ausgespeichert}$	aus der Batterie entnommene Energiemenge
W_{Klemme}	an der Batterieklemme umgesetzte Energiemenge
$\eta_{Antrieb}$	Antriebswirkungsgrad mit Nutzbrem-sung (W_{MGU}/W_{Acc})
η'_A	Antriebswirkungsgrad mit herausgerechneter Nutzbrem-sung
η_{Batt}	Zykluswirkungsgrad der Batterie
$\eta_{Batt,Ch}$	Ladewirkungsgrad der Batterie
$\eta_{Batt,Dis}$	Entladewirkungsgrad der Batterie
η_C	Coulomb Wirkungsgrad der Batterie
η_{MGU}	Wirkungsgrad der Verbrennungsmaschine

1 Einleitung / Motivation

Individuelle Mobilität, wie der Zugriff auf einen privaten Pkw, aber auch der Güterverkehr per Lkw vom Hersteller direkt zum Kunden stellen ein Charakteristikum unseres Lebens dar. Auch wenn vor allem die Dampfmaschine im Zusammenhang mit der industriellen Revolution des beginnenden 19. Jahrhunderts genannt wird, so ist es doch die durch Autos und Lkws gegebene Mobilität, die innerhalb von Flächenstaaten ein hohes Maß an Chancengleichheit für Menschen an verschiedensten Lebensstandorten gewährleistet. Tägliche Pendlerströme belegen eindrucksvoll die Trennung von Wohnort und Arbeitsplatz, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts so nicht möglich gewesen wäre. Ebenso ist für die Wahl eines Fabrikationsstandorts die Verkehrsanbindung über Autobahnen wichtiger als die Nähe zu den Abnehmern. Individuelle Mobilität ist daher nicht lediglich ein Komfortmerkmal, sondern Basis für die gegenwärtige Form des Zusammenlebens in der industrialisierten Welt.

Illustriert wird das auch durch eine von A. Heider zitierte Studie der Shell AG zum Mobilitätsgrad verschiedener Industrie- und Schwellenländer [115]. Offensichtlich besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wirtschaftskraft eines Landes und der Anzahl an Pkw je 1000 Einwohner. Die Anzahl der Fahrzeuge steigt dabei sogar überproportional zur Wirtschaftskraft.

Unterstützt wird diese Tendenz durch eine – weit über den objektiven Wert als Gebrauchsgegenstand hinausgehende – emotionale Bindung an Autos weltweit. So basteln Kinder in Afrika aus Holz- oder Blechteilen Flugzeuge, Busse, Lastwagen oder Autos; aber auch in Industrieländern wird der Pkw als Möglichkeit beworben und verstanden, die eigene Persönlichkeit zu betonen oder erst zu gestalten. Neben der gesellschaftlichen Notwendigkeit erfüllt automobiler Mobilität daher auch zu einem Gutteil Wünsche nach Selbstverwirklichung und ist wesentlicher Bestandteil der Freizeitgestaltung.

Diese Mobilität baut gegenwärtig auf zwei Stützen auf: den Verbrennungsmotoren und den Treibstoffen aus Rohölprodukten. Ausschlaggebend dafür sind nicht in erster Linie die Eigenschaften des Verbrennungsmotors, der sowohl als Otto- als auch als Dieselmotor zwar beachtliche Leistungsdaten vorweisen kann, dessen sonstiges Betriebsverhalten für den Einsatz in Straßenfahrzeugen aber nicht sehr geeignet ist, da der Betrieb von Verbrennungsmotoren komplizierte Triebstränge erfordert und eine Vielzahl von Emissionen verursacht.

Der Hauptgrund für die Verwendung von Verbrennungsmotoren liegt vielmehr in den Treibstoffen, Benzin oder Dieselmotorkraftstoff, die eine sehr hohe Energiedichte aufweisen und bei Umgebungstemperatur drucklos flüssig mitgeführt werden können. Obwohl nicht ungefährlich, wird der Umgang mit Benzin und Diesel als Kraftstoff im automobilen Umfeld sehr sicher beherrscht.

Diese Mobilität gerät allerdings sowohl vonseiten der Ressourcen, also der Treibstoffversorgung, als auch vonseiten der Schadstoff- und den Treibhausemissionen unter Druck.

Die endliche Reichweite wesentlicher Rohstoffe, darunter auch Rohöl, ist schon seit der Anfang der 70er Jahre im Auftrag des „Club of Rome“ durchgeführten Studie zu den Grenzen des Wachstums in der Diskussion. Die Autoren kamen schon damals zu dem Schluß, daß ein auf der Ausbeutung von endlichen Rohstoffen oder durch dauerhaft ungleiche Verteilung von Entwicklungschancen aufbauender Wohlstand auf Dauer nicht zu halten sein werde und die exponentiellen Wachstumsgesetze zu sehr kritischen Situationen für das weltweite Zusammenleben

führen können[1]¹. Ein zukunftsicheres Wirtschafts- und Gesellschaftsmodell dürfte demnach endliche Ressourcen immer nur in dem Maß in Anspruch nehmen, in dem auch für Ersatz gesorgt werden kann. Zu diesen nachhaltig zu bewirtschaftenden Vorräten gehört demnach auch die lebensnotwendige Umwelt als Schadstoffsene.

In den 80er Jahren setzte dann auch in Europa eine, in Kalifornien schon in der 70ern begonnene, strengere Abgasgesetzgebung für den Schadstoffausstoß von Industrieprozessen, Kraftwerken aber auch von Straßenfahrzeugen ein, die letztlich zur flächendeckenden Einführung des geregelten 3-Wege-Abgaskatalysators für Ottomotoren geführt hat. In Deutschland wurde die Diskussion vor allem durch das Phänomen des Waldsterbens angestoßen.

Anfang der 90er Jahre geriet dann auch der Kraftstoffverbrauch von Pkws über den damit verbundenen Ausstoß des als klimaschädlich identifizierten Kohlendioxids in den Blickpunkt.

Die Herausforderung für die Entwicklung von Kraftfahrzeugen besteht seitdem darin, den Kunden Fahrzeuge anzubieten, mit denen sie sich emotional identifizieren können, die aber gleichzeitig bei reduziertem Kraftstoffverbrauch die Abgasgesetzgebung einhalten.

1.1 Hybride Lösungen

Gelöst wird der Zielkonflikt durch den zunehmenden Einsatz von Elektronik im Fahrzeug, beginnend mit der elektronisch geregelten Kraftstoffeinspritzung über Motor- und Getriebemanagementsysteme und Fahrerassistenzsystemen bis hin zum weiten Bereich der Komfortausstattung im Karosseriebereich.

Nach anfänglich analogen Ansätzen werden die elektronischen Steuerungen inzwischen hauptsächlich als eingebettete Steuergeräte um einen oder mehrere μ Controller aufgebaut. In vielen früher mechanisch ausgeführten Systemen der Autos befindet sich daher inzwischen „Software-in-the-Loop“, d.h. die Systeme werden von Software gesteuert. Wurden dabei zunächst von den Steuergeräten nur Sollwerte für mechanische System vorgegeben, geht die Entwicklung, ähnlich wie im industriellen Bereich, inzwischen dahin, auch grundlegende mechanische Systemeinheiten vollelektronisch auszuführen. Beispiele sind die schon jetzt serienmäßigen elektronischen Pedalwertgeber für das Gaspedal, aber auch kommende entsprechende Systeme für Lenkung und Bremse oder sogar der Verzicht auf einen mechanischen Ventiltrieb beim Motor.

Neben den evolutionären Verbesserungen am bestehenden Antrieb existieren aber auch Vorschläge, die, sich zum Teil widersprechenden, Anforderungen an Fahrzeuge durch neue Antriebskonzepte zu erreichen. Stichworte sind hier z.B. Brennstoffzellen als Primärwandler im Fahrzeug oder hybridisierte Antriebe.

Neben den reinen Elektrofahrzeugen werden hybride Antriebe, d.h. Kombinationen aus Elektroantrieb und Verbrennungsmaschine oder Brennstoffzellen schon lange bei allen Pkw-Herstellern untersucht.

¹Die Autoren haben das Modell 20 Jahre danach nochmals verfeinert und mit aktuelleren Daten versehen. Die Ergebnisse sind dadurch nicht wesentlich verändert außer, daß der in einem stabilen Zustand weltweit erreichbare Wohlstand, aufgrund der entgegen den Empfehlungen nach der 1. Studie fortschreitenden Ausbeutung der weltweiten Ressourcen, inzwischen geringer war als während der ersten Betrachtung [2].

Während Elektrofahrzeuge dauerhaft hauptsächlich unter der gegenüber Kohlenwasserstoffen geringeren Energiedichte von Batterien leiden, bieten sich über die inzwischen zur Verfügung stehenden Komponenten attraktive technische Möglichkeiten für Hybridantriebe. Über eine optimierte Kombination von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor wird dabei versucht, sowohl die hohe Energiedichte der Kohlenwasserstoffe als auch die guten Traktionseigenschaften von Elektromaschinen zu nutzen. Die entstehenden Freiheitsgrade erlauben minimierte Emissionen bis hin zur lokalen Emissionsfreiheit, bei gleichzeitig reduziertem Verbrauch.

Allerdings ist aufgrund der vielfältigen Auslegungs- und Betriebsmöglichkeiten ein sehr sorgfältiger Systementwurf das entscheidende Kriterium für die Akzeptanz beim Kunden. Während z.B. der Audi Duo, ein in mehreren Versionen vermarkteter Parallelhybrid, kaum auf Resonanz gestoßen ist, weist Toyota darauf hin, daß der Prius in der kurzen Zeit am Markt weltweit öfter verkauft wurde als alle alternativ angetriebenen Pkw vorher zusammen.

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Die vorgelegte Arbeit beschreibt den seriellen Hybridantrieb für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, der im Rahmen eines 1997 in der Abteilung Energiewandlung und -speicherung *EMS* der Universität Ulm begonnenen Projekts sowohl als Laborprüfstand als auch als dynamische Antriebssimulation entstanden ist.

Die Herausforderung an die Fahrzeugentwicklung aufnehmend wurde dazu als Referenzsystem kein Fahrzeugtyp mit z.B. großvolumigem, nicht aufgeladenem Ottomotor gewählt, der durch eine Hybridisierung sicher besonders bemerkenswerte Verbrauchsvorteile geboten hätte, sondern ein im europäischen Markt eingeführtes Fahrzeug der Kompaktklasse mit direkteinspritzendem Dieselmotor. Technisch, also z.B. hinsichtlich des erzielbaren Kraftstoffverbrauchs, müssen sich alle Alternativen an dieser Antriebsvariante messen lassen. Solange sich die Aufwände für Kraftstoff sparende Antriebe² für die Käufer nur über niedrigere Betriebskosten amortisieren, muß jede Antriebsalternative aber auch wettbewerbsfähig sein um den Status der Liebhaberei verlassen zu können.

Ziel der Untersuchungen war daher ein Antrieb für einen PKW der den höheren technischen und damit auch wirtschaftlichen Aufwand durch entsprechend niedrigere Verbräuche rechtfertigt und außerdem das Potential bietet gültige und absehbare Abgasgrenzwerte einzuhalten.

Ein zentraler methodischer Ansatz dieser Arbeit liegt auf der Verknüpfung der Simulation des verteilten, mechatronischen Antriebssystems auf der einen Seite und des Prüfstands über einen modellbasierten Entwicklungsprozeß. Antrieb und Simulation sind dazu strukturgleich aufgebaut. Die Steuergeräte des Prüfstands werden aus der Simulation heraus appliziert und die Messungen am Prüfstand skalieren die Modelle.

Die Ergebnisse der Untersuchungen fließen dann in ein kostenbasiertes Energiemanagement ein. Über die Abstimmung des Betriebs durch diese Managementebene werden letztlich die an die Hybridisierung gestellten Ziele erreicht: Verbrauchseinsparung und Emissionsreduktion bei wechselnden Umgebungsbedingungen und Fahranforderungen.

²Zusatzaufwände gegenüber konventionellen Antrieben entstehen einerseits durch zusätzliche Komponenten, andererseits durch die bislang geringen Stückzahlen auf die die Entwicklungskosten für Antrieb, Komponenten und angepaßtes Fahrzeug umgelegt werden müssen.

Kapitel 2 bindet die Betrachtung des hybridisierten PKW Antriebsstrangs in die inhaltliche Schwerpunktsetzung der Abteilung *EMAS* in den Jahren 1997 bis 2001 ein. Die erkennbaren Grenzen der Mobilität durch endliche Ressourcen einerseits und nicht mehr tolerierbare Emissionen andererseits werden aufgezeigt. Dazu werden die Beiträge der verschiedenen Energieträger zur Energieversorgung Deutschlands insgesamt und ihr Einsatz in verschiedenen Verbrauchssektoren dargestellt. Sowohl hinsichtlich des Energieverbrauchs als auch bezüglich seines Anteils an den energienutzungsbedingten Emissionen wird der Verkehr in das gesamtwirtschaftliche Umfeld eingeordnet. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der klimawirksamen Emissionen verschiedener, für den mobilen Einsatz diskutierter Energieträger. Gerade im Umfeld der, noch bis 2001 als unmittelbar bevorstehenden angekündigten, Serienreife von Brennstoffzellen auch für mobile Anwendungen, war und wird Wasserstoff als der Energieträger zukünftiger Energiesysteme diskutiert. Auf diesem Hintergrund wird auch die gegenwärtige Bereitstellung von Wasserstoff und die damit verbundenen Emissionen mit eingebunden.

In **Kapitel 3** werden aktuelle Tendenzen der Antriebsentwicklung aufgenommen und die auf den Energieverbrauch wirkenden Einflußgrößen benannt. Beginnend mit einem Überblick über den Verbrennungsprozess und den daran ansetzenden Motorvarianten werden unterschiedliche Ansätze optimierter Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Ansatzpunkte sowie ihrer Möglichkeiten und Grenzen dargestellt. In diesem Umfeld werden auch die hybriden Antriebe eingeordnet. Berücksichtigt wird dabei sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen bzw. die Möglichkeiten der Abgasreinigung.

Betrachtet werden dabei auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, unter denen optimierte Antriebe beim Kunden akzeptiert werden können.

Voraussetzung für einen funktionsfähigen und attraktiven Antrieb ist eine geeignete Auslegung aller beteiligten Komponenten. Dies umso mehr, als die Anforderungen auch an die aus dem konventionellen Triebstrang bekannten Komponenten wie z.B. den Verbrennungsmotor im Hybridantrieb deutlich abweichen. Insbesondere kritisch sind hier bisher nur in Nischenfahrzeugen eingesetzte Komponenten wie die Traktionsbatterie für die sich in der Literatur, ebenso wie für die Dimensionierung der Maschinen unterschiedlichste, zum Teil willkürliche Kriterien finden.

Für den gewählten Pkw Antrieb und seinen Einsatz im europäischen Straßenverkehr werden daher in **Kapitel 4** die in der Abteilung *EMAS* verwendeten Kriterien und resultierenden Dimensionierungen begründet und dargestellt. Die sich daraus ergebende Komponentenauswahl für den im Kapitel 6 dargestellten Antriebsprüfstand wird benannt.

Ein großer Teil der Untersuchungen zum Energieverbrauch erfolgte anhand der dafür entwickelten parametrierbaren Simulation der Längsdynamik eines Pkw Antriebsstrangs. In **Kapitel 5** wird die Simulation als Werkzeug für den modellbasierten Entwicklungsprozeß dargestellt. Simuliert wurde das mechatronische System Triebstrang aus Maschinen, Speicher, Aktuatoren, Sensoren und Steuerung. Die Simulation ist eng verknüpft mit dem parallel entstandenen Prüfstand. Einerseits werden anhand von Testläufen am Prüfstand die Modelle der Simulation kalibriert, andererseits wird die Steuerung des Prüfstands modellbasiert aus der Simulation über eine modellbasierte Implementierung abgeleitet.

Der Prüfstand, seine Struktur und die Anbindung an die Simulation aus Kapitel 5 werden dann in **Kapitel 6** beschrieben. Wesentlich ist hier die modulare Struktur unter konsequentem Einsatz

aktueller Automatisierungstechnologie. Daneben stützt sich der Aufbau auf die Möglichkeit, die für sicherheitskritische Aufgaben parallel zu den PCs eingesetzten Steuergeräte über eine angepaßte, automatische Codeerzeugung direkt aus der Simulation, ohne manuelle Programmierung oder Fehlersuche im Code zu implementieren.

Die drei Einzelprüfstände für die Motor-Generator-Einheit MGU, den Speicherbereich und den elektrischen Traktionsantrieb werden vorgestellt, ebenso wie die für die Simulation und das Energiemanagement wesentlichen Meßergebnisse.

Auf diese Ergebnisse baut in **Kapitel 7** das Energiemanagement für den Antrieb auf. Zunächst werden bekannte Managementansätze analysiert. Bewertet werden dabei nur Verfahren, die sich für den tatsächlichen Fahrzeugeinsatz eignen. Entsprechend dem Ziel des Managements, dem kostengünstigen Betrieb, wird ein Management entwickelt, das die Leistungsaufteilung über einen die Kosten minimierenden Energiehandel vornimmt. Die dazu benötigten Kostenfunktionen für MGU und Batterien werden hergeleitet. Aus der Auswertung der Angebote der beteiligten Quellen wird dann jeweils dynamisch die günstigste Aufteilung ermittelt.

Ergänzt wird der Algorithmus um ein Thermomanagement für die MGU und ein Lademanagement für den Speicher. Das dynamische Verhalten des kostenbasierten Ansatzes, aber auch die gemessenen und simulierten Ergebnisse für Verbrauch, Energieumsätze und Emissionen werden dargestellt und verglichen.

Kapitel 8 faßt die Ergebnisse der Arbeit zusammen und bewertet sie vor dem Hintergrund der Anforderungen an die individuelle Mobilität aus Kapitel 2.

Details zur Simulation und zum Prüfstand finden sich im **Anhang** der Arbeit.

1.3 Methodik

Innerhalb des Textes werden Referenzen auf Abbildungen und Tabellen bei ihrer Hauptreferenzstelle **fett** gedruckt. *Hauptsächlich im Kapitel 3 werden die wesentlichen Aspekte jedes Optimierungsansatzes am Schluß nochmals in hervorgehobener Schrift zusammengefaßt.*³

³Die Auseinandersetzung mit der Literatur wurde zum Teil in Fußnoten verlagert, wo sie für den unmittelbaren Gedankengang nicht zwingend notwendig im Haupttext erfolgen mußte.

2 Grenzen der Mobilität

Nach dem erheblichen Wachstum in den Volkswirtschaften der westlichen Industriestaaten in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts setzte zu Beginn der 70er eine Diskussion um die möglichen Grenzen dieses Wachstums und die weltweite Verteilung des erreichbaren Wohlstands ein. Aufgenommen und zugespitzt wurden die Einschätzungen vom „Club of Rome“, in dessen Auftrag am MIT eine systematische, computergestützte Untersuchung zu den Grenzen des Wachstums durchgeführt und publiziert wurde [1]. Die vielen bekannten, oft nichtlinearen gegenseitigen Abhängigkeiten bekannter Wachstumsmechanismen wurden hier erstmals innerhalb eines dynamischen Modells simuliert. Untersucht wurde, unter welchen Bedingungen das gegenwärtige (1972) Wachstum in einen stabilen Zustand übergehen könnte, ohne daß es aufgrund der exponentiellen Zusammenhänge zu einem Zusammenbruch des Systems käme.

Ohne daß es auf Basis des verwendeten Modells möglich war detaillierte Prognosen zu erstellen, war doch die Tendenz erstaunlich deutlich: Ohne einen Paradigmenwechsel hin zu einer deutlich nachhaltigen Entwicklung würde das System Erde in erstaunlich kurzer Zeit entweder aufgrund ausgereizter Rohstoffvorräte oder wegen einer zu starken Umweltverschmutzung kollabieren.

Angefacht wurde die Diskussion durch die 1973 aufgrund eines Ölembargos der OPEC⁴-Staaten sprunghaft ansteigenden Preise für Rohöl. Die Abhängigkeit der gesamten Volkswirtschaft vom Rohstoff Öl und dessen möglicherweise nicht uneingeschränkte Verfügbarkeit wurden dadurch für weite Bevölkerungskreise erstmals konkret, am deutlichsten sichtbar an den Einschränkungen der Mobilität durch verordnete autofreie Sonntage.

2.1 Rohstoffbasis für die zukünftige Energieversorgung

Daten über die Verfügbarkeit von Energierohstoffen und deren Anwendung in verschiedenen Wirtschaftsbereichen liefern regelmäßige Veröffentlichungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [3],[4] sowie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) [5],[6].

Die Bundesrepublik Deutschland findet sich in einer Auflistung der Länder, sortiert nach deren Energiereserven⁵, an 9. Stelle [5]. Ausschlaggebend dafür sind die Vorkommen an Stein- und Braunkohle.

Dies spiegelt sich in der Aufstellung der für die Energieversorgung in Deutschland verwendeten Primärenergieträger⁶, wie sie in **Abb. (1)** dargestellt ist, wider [6]. Rund 40% der in Deutschland

⁴OPEC: Organisation Erdöl exportierender Staaten

⁵Es wird zwischen den Begriffen Reserven und Ressourcen unterschieden. **Reserven** bezeichnen die Vorräte die mit heute bekannter Technik wirtschaftlich gewonnen werden können, während **Ressourcen** den Teil der Gesamtressourcen bezeichnet, der entweder momentan nicht wirtschaftlich gewinnbar sind, oder der bisher noch nicht genau quantifiziert werden konnte.

⁶Nach M. Kaltschmitt und A. Wiese [7] werden unter **Primärenergieträgern** Energierohstoffe verstanden, die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen waren. **Sekundärenergieträger** sind Stoffe, die durch eine oder mehrere Umwandlungen aus Primär- oder anderen Sekundärenergieträgern entstanden sind. **Endenergieträger** sind die vom Verbraucher letztlich bezogenen Energieträger, und **Nutzernergie** ist die zur Bedürfnisbefriedigung benötigte Energieform.

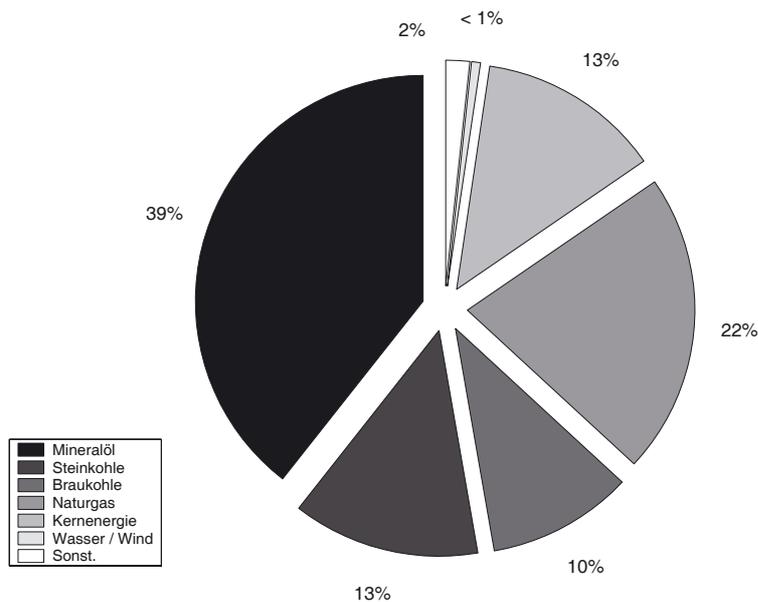


Abbildung 1:
Anteile der Primärenergieträger an der Energieversorgung in Deutschland im Jahr 1999 nach den Energiedaten 2000 des Bundeswirtschaftsministeriums [6].

im Jahr 1999 verwendeten Primärenergie wird demnach durch Rohöl abgedeckt, Kohle und Gas decken mit 23% bzw. 22% jeweils knapp 1/4 während die Kernenergie noch 13% beiträgt.

Verwendet wird die Energie, wie in **Abb. (2)** dargestellt, zu etwa 1/3 zur Deckung von Umwandlungs- und Transportverlusten im Energiesektor selbst, während sich der Rest auf die Bereiche Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe aufteilt. Der Anteil des Verkehrs am Energiebedarf liegt damit, bezogen auf die gesamte aufgewandte Primärenergie, bei 20%.

Die verschiedenen in **Abb. (1)** dargestellten Energieträger haben sehr unterschiedlichen Anteil an der Energieversorgung. Wie aus **Abb. (3)** ersichtlich, wird Kohle in Deutschland hauptsächlich in der Großindustrie und zur Verstromung eingesetzt, Naturgase finden eine weite Verwendung in der Versorgung außerhalb der Stahlindustrie und im Bereich der Privathaushalte, während ausschließlich die aus Rohöl hergestellten Sekundärenergieträger Benzin und Heizöl bzw. Diesel ohne größeren Tankaufwand für die Versorgung von mobilen, nicht leitungsgebundenen Systemen geeignet sind und vor allem dort ihre Verwendung finden.

Entscheidend für die Beurteilung der Energieversorgung unterschiedlicher Sektoren ist die Versorgungssicherheit der verwendeten Energieträger. Das Bild stellt sich dabei durchaus unterschiedlich dar. Ausgedrückt wird das im Erschöpfungsgrad der bekannten Reserven sowie in der statischen Reichweite, die angibt, wie lange der jeweilige Energierohstoff nach heutigem Kenntnisstand noch zur Verfügung stehen würde, falls er mit der gleichen Intensität weiter genutzt würde. Für Kohle lag die weltweite Reichweite auf Basis der Förderung von 1997 bei 162 Jahren (Hartkohle) bzw. 241 Jahre (Weichbraunkohle). Die Hauptvorkommen liegen in den USA, China, Australien, Indien, Südafrika und in der Bundesrepublik Deutschland. Bei Gas liegen die Hauptvorkommen in Rußland und im Iran. Aufgrund der noch vergleichsweise kurzen Nutzung von Erdgas für die Energieversorgung ist der Explorationsstand hier noch recht unvollkommen. Die statische Reichweite betrug 1993 67 Jahre. Erdgas ist im Gegensatz zu den anderen Energierohstoffen nur leitungsgebunden mit vergleichsweise geringem Aufwand transportierbar. Die weltweite statische Reichweite erlaubt daher keine Aussage über die Verfügbarkeit in einzelnen Abnehmerländern. Während z.B. in Nordamerika die Vorräte schon zu ca.

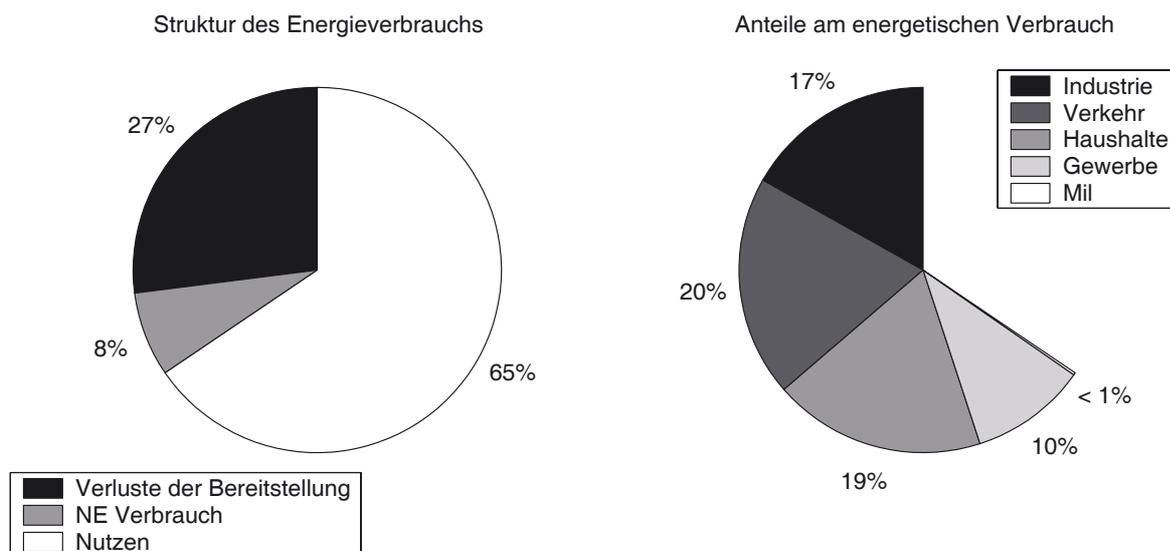


Abbildung 2: Verwendung der 1999 insgesamt in Deutschland umgesetzten Primärenergieträger [6]. Demnach deckt ein Anteil von 27% der Primärenergie den Eigenbedarf im Energiesektor zur Deckung der Transportverluste und für Umwandlungen.

75% verbraucht sind und die verbleibende Reichweite hier nur noch ca. 12 Jahre beträgt, kann in Europa aufgrund der Verfügbarkeit des Erdgases aus den GUS-Staaten bis über die Mitte des 21. Jahrhunderts die Versorgung als gesichert gelten. Im ostasiatischen Markt ist kein leitungsgebundener Transport möglich. Erdgas wird dort als LNG (Liquefied Natural Gas) transportiert und verwendet. Aufgrund des dadurch höheren Preises ist die Nachfrage geringer, die Reichweiten betragen hier sogar noch 190 Jahre. Nach dem Ende der Förderung in Nordamerika wird dort allerdings ebenfalls die Nachfrage nach LNG steigen, was die statische Reichweite der dafür eingesetzten Quellen reduzieren wird.

Die Reichweite der Kernbrennstoffe Uran und Thorium liegt bei etwa 40 Jahren, ihr Anteil an den gesamten Energiereserven sowie an den vermutlichen Ressourcen liegt bei ca. 5 %.

Während die Versorgung mit Kohle und Gas und damit der Stromversorgung und der Versorgung von Haushalten und Industrie in Deutschland auf längere Zeit als gesichert gelten darf, stellt sich die Situation beim Erdöl schwieriger dar, sowohl hinsichtlich der Versorgungssicherheit als auch der Reichweite. Die Förderung von Erdöl begann in den USA aber auch in Deutschland Mitte des 19. Jahrhunderts. Seitdem hat sich Erdöl zum wichtigsten Energieträger (siehe Abb. (1)) und bedeutendsten Rohstoff für die organisch-chemische Industrie [8],[9] entwickelt.

Nach dem Anstieg des Ölpreises 1973 konnten weitere Lagerstätten wirtschaftlich erschlossen werden, so daß heute noch eine Reihe von Staaten zur weltweiten Versorgung mit Rohöl beiträgt. Der Preis für die Förderung eines Fasses Rohöl liegt dabei zwischen 2\$ und 10\$. Aufgrund der langen Explorationsgeschichte sind die ursprünglichen Vorräte jedoch schon fast zur Hälfte verbraucht. Die statische Reichweite betrug 1993 weltweit gesehen 42 Jahre, ein Wert, der in etwa in den letzten 40 Jahren konstant geblieben war. Seit Anfang der 80er Jahre ist allerdings die jährliche Förderung größer als die jährlich neu gefundene Ölmenge; der trotzdem

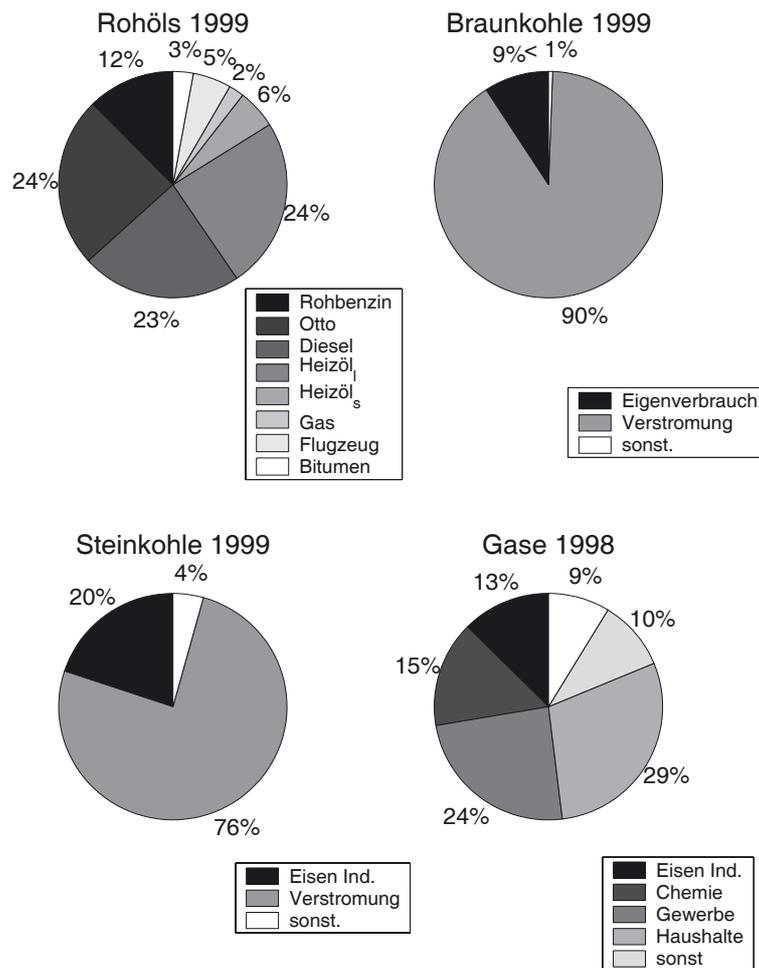


Abbildung 3: Verwendung der im Jahr 1999 in Deutschland eingesetzten Primärenergieträger nach [6].

verzeichnete Reservenzuwachs ist letztlich auf die zum Teil politisch motivierte Neubewertung bekannter Lagerstätten zurückzuführen. So zeigt z.B. C. J. Campbell in einem Vortrag im Jahr 2000 ([10]) die von den OPEC-Staaten ausgewiesenen Reserven auf. Nach einer Neubewertung Anfang der 90 Jahre - motiviert durch den Versuch, durch eine höhere Reservemenge zu höheren Förderquoten innerhalb der Organisation zu gelangen - bleiben die ausgewiesenen Reserven trotz fortschreitender Förderung konstant.

Derzeit machen die Neufunde nur noch etwa 25% der jährlichen Förderung aus, d.h. die bekannten Vorräte nehmen ab. Die Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften [5] kommt daher zu dem Schluß, daß etwa im Zeitraum zwischen 2010 und 2020 die weltweite Ölförderung ihren Maximalwert erreichen und danach langsam abfallen wird. Gleichzeitig wird sich die Förderung aufgrund der dann erschöpften Lagerstätten Nordamerikas und Europas auf die Staaten um den persischen Golf konzentrieren. Bei zunächst weiterhin hoher und steigender Nachfrage ist daher mit einem stabil hohen Preis zu rechnen - auf mittlere Sicht aber eben auch mit der Erschöpfung der konventionellen Vorräte.

2.2 Energiebedingte Emissionen

2.2.1 Limitierte Schadstoffe

Die Nutzung fossiler Energierohstoffe führt prozeßbedingt zu einer Reihe von Emissionen. Für die sogenannten Schadstoffe⁷ wie Schwefeloxide, Stickoxide oder Kohlenmonoxid existieren je nach Anwendungsbereich Grenzwerte, die im Anlagenbetrieb nicht überschritten werden dürfen. Es sind dies die TA Luft für die Großfeuerungsanlagen, die Kleinf Feuerungsanlagen-Verordnung, sowie die Heizungsanlagen-Verordnung für den Hauswärmebereich sowie die europäische Abgasgesetzgebung nach EURO I-IV für den Fahrzeugbereich. Die Angaben dazu finden sich z.B. im Kraftfahrzeugtechnischen Handbuch von Bosch [12].

Entsprechende Regelungen existieren auch in anderen Staaten wie den USA und Japan [12],[13]. Dabei werden in Europa und den USA unterschiedliche Wege in der Umsetzung gegangen. Während die europäische Gesetzgebung Grenzwerte vorgibt, die innerhalb des Anwendungsbereichs von allen Neuanlagen (PKW) zu erfüllen sind, und den Betrieb alter Anlagen gegebenenfalls steuerlich unattraktiv gestaltet, basiert die Gesetzgebung in den USA stärker auf dem Gedanken des Emissionshandels.

Dazu geht die kalifornische Abgasgesetzgebung für Pkws von der gesamten Emissionsmenge z.B. für Los Angeles aus, die dort zulässig wäre um die US-Zielwerte für bodennahes Ozon einzuhalten. Davon ausgehend wird ein Mix an Emissionsklassen für die neu verkauften Fahrzeuge abgeleitet. Der Anteil an Fahrzeugen mit niedrigeren Emissionen steigt dabei, ohne daß alle Fahrzeuge sofort den strengeren Grenzwerten genügen müßten. Es ist dabei dem Anbieter überlassen, den Absatz passend zu gestalten; staatliche Kaufanreize oder Kaufzwänge für die Verbraucher sind nicht vorgesehen.

Als Besonderheit verpflichtet die kalifornische Gesetzgebung die Anbieter ursprünglich dazu, ab 2003 mindestens 10% der Fahrzeuge als ZEV⁸ abzusetzen. Begründet wird dies mit Berechnungen, nach denen ein ZEV-Volumen von 800.000 Fahrzeugen im Jahr 2010 nötig sein wird, um dann in den Ballungszentren die Zielwerte für die Schadstoffkonzentration einhalten zu können. ZEVs werden dabei gefordert, da selbst die Emissionen von ULEV⁹ klassifizierten Fahrzeugen noch 10 mal über denen der kalifornischen Kraftwerke liegen. Der Kraftwerkspark dient dabei als Referenz für die den ZEVs anzurechnenden Emissionen, da hier von Elektrofahrzeugen ausgegangen wird.

Inzwischen ist vorgesehen, einen Teil der ZEV-Verpflichtungen durch SULEV¹⁰-klassifizierte Fahrzeuge erfüllen zu können, deren Emissionen ebenfalls auf dem Stand des kalifornischen Kraftwerks-Mix liegen ohne lokal abgasfrei sein zu müssen.

Sowohl in den USA, als auch in Europa sind die verkehrsbedingten Schadstoffemissionen nach Einführung der gesetzlichen Begrenzungen zurückgegangen. Der Rückgang ist aufgrund der relativ langen Lebensdauer der noch laufenden Altfahrzeuge verzögert [6],[14]. So kommt selbst

⁷in [11], S. 12f. finden sich Angaben über die Wirkung der verschiedenen Anteile. Beim Menschen reichen die direkten Wirkungen von Reizungen der Atemwege bei Kohlenwasserstoffen bis zur Vergiftung durch Störung der Sauerstoffzufuhr bei Kohlenmonoxid. Indirekt wirkt z.B. NO_2 als Vorstufe und Auslöser von Ozon oder SO_2 über die Versauerung von Niederschlägen als Ursache für Waldschäden

⁸Zero Emission Vehicle

⁹Ultra Low Emission Vehicle

¹⁰Super Ultra Low Emission Vehicle

Konzentration	CO_2	CH_4	N_2O	FCKW-11	FCKW-12	Halon-130
vorindustriell	280 ppmv	0,6 ppmv	265 ppbv	0 pptv	0 pptv	0 pptv
1992	355 ppmv	1,75 ppmv	310 ppbv	268 pptv	503 pptv	2 pptv
Anstieg 1992	CO_2	CH_4	N_2O	FCKW-11	FCKW-12	Halon-130
absolut	1,5 ppmv	0,005 ppmv	0,7 ppbv	2,5 pptv	13 pptv	0,15 pptv
relativ	0,4 [%]	0,4 [%]	0,26 [%]	0,9 [%]	2,6 [%]	7,5 [%]
Verweildauer	CO_2	CH_4	N_2O	FCKW-11	FCKW-12	Halon-130
[a]	50 - 200	10	120	50	103	65
Anteil am Effekt	CO_2	CH_4	N_2O	FCKW-11	FCKW-12	Halon-130
[%]	50	13	5	17 ^a		?

^aDer Anstieg von FCKW-11 und -12 ist inzwischen weitgehend gestoppt; der Beitrag bleibt aufgrund der langen Verweildauer beider Substanzen relevant

Tabelle 1: Konzentrationen und Verweildauern der anthropogenen Treibhausgase nach [17],[18]

das UBA¹¹ in einer Studie über die Perspektiven von Brennstoffzellenfahrzeugen [15],[16] zu der Einschätzung, daß über die vorhandene Gesetzgebung mit der Stufe EURO IV keine weitere Verschärfung der Grenzwerte mehr nötig sein wird, um europaweit die aus lufthygienischen Gründen angestrebten Schadstoffkonzentrationen nicht zu überschreiten.

2.2.2 Treibhausgas-Emissionen

Außer den genannten Schadstoffen, die bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen als unerwünschte Nebenprodukte auftreten, sind seit Anfang der 80er Jahre auch die unmittelbar prozeßbedingten Emissionen von CO_2 sowie Wasserdampf als Auslöser für den anthropogenen Treibhauseffekt in den Blickpunkt der Öffentlichkeit gelangt.

Der natürliche Treibhauseffekt beschreibt den für das Leben auf der Erde wesentlichen Umstand, daß die in der Atmosphäre vorkommenden Spurengase CO_2 , CH_4 und N_2O zwar die kurzwellige Strahlung im sichtbaren Bereich passieren lassen, die langwellige, von der Erde ausgehende Strahlung im infraroten Bereich aber zum Teil absorbieren und dann wieder emittieren. Ein Teil dieser nicht gerichteten Strahlung wird dadurch zur Erde reflektiert und erhöht dort die mittlere Temperatur von theoretisch $-18^\circ C$ auf ca. $15^\circ C$ [19].

2.2.3 Der anthropogene Treibhauseffekt

Durch die Industrialisierung sind weitere Treibhausgase hinzugekommen (FCKW, Halone, FKW, HFKW und SF_6) und die Konzentration der natürlich vorkommenden Gase angestiegen [20].

¹¹Umwelt Bundes Amt

Diese zusätzlichen Gase tragen zwar nur zu einem kleinen Teil zum gesamten Treibhauseffekt bei, aufgrund ihrer langen, in **Tabelle (1)** aufgeführten, Verweildauer in der Atmosphäre steigt ihr Anteil jedoch ständig an und führt zu einer weiteren Erwärmung [17]. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurde eine Erhöhung der globalen mittleren Temperatur von $13,5^{\circ}\text{C}$ auf heute $14,6^{\circ}\text{C}$ beobachtet [21]. Der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen wird zusammen mit der beobachteten Erwärmung als anthropogener Treibhauseffekt beschrieben und gilt trotz teilweise kontroverser Diskussion¹² in meteorologischen Fachkreisen inzwischen als erwiesen¹³ [23],[24].

Weltweit tragen die energiebedingten Emissionen zu etwa 50%, die chemische Industrie zu 20% und die Vernichtung der Regenwälder zu 15% zum Treibhauseffekt bei. Die Landwirtschaft und andere Bereiche sind z.B. durch Stickstoffdüngung und Spurengase ebenfalls zu 15% beteiligt [24].

2.2.4 Begrenzung der anthropogenen Treibhausgas-Emissionen

Eine erste internationale Befassung mit dem auch schon im Bericht des „Club of Rome“ angesprochenen Effektes fand 1979 während der ersten Weltklimakonferenz in Montreal statt.

Die Bundesregierung hat schon im Jahr 1990 eine Reduzierung der Kohlendioxidemissionen im Bereich der Bundesrepublik um 25% bis 2005, bezogen auf den Stand von 1987, als Ziel deutscher Politik formuliert, das Parlament hat sich dem angeschlossen.

Im Jahr 1988 wurde das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet. Ziel dieser internationalen Sachverständigenengruppe sind eine Bestandsaufnahme und Prognose über das Klimasystem sowie die zu erwartenden Änderungen. Auf Basis der vorgelegten Berichte wurde 1992 in Rio de Janeiro die Klimarahmenkonvention (KRK) unterzeichnet, deren Ziel eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration auf einem unkritischen Niveau darstellt. Die KRK trat im Jahr 1994 in Kraft, die darin eingegangenen Verpflichtungen sind daher verbindlich im Rahmen des Völkerrechts.

Um die angestrebten Ziele zu erreichen, verabschiedete die 3. Vertragsstaatenkonferenz der KRK 1997 in Kyoto ein Protokoll, das für die Vertragsstaaten entsprechend ihrem gegenwärtigen Beitrag zu den Emissionen unterschiedliche Reduktionsziele vorsieht [26].

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat anlässlich der Vertragsstaatenkonferenz 1995 in Berlin die zulässigen CO_2 -Emissionen untersucht [27] und Szenarien für deren Begrenzung entwickelt.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist der Temperaturbereich, den die globale mittlere Temperatur während der stabilen Klimaperiode der letzten 10.000 Jahre nicht verlassen hat. In dieser

¹²Das UBA hat unter [22] Gegenargumente gesammelt und bewertet.

¹³Außer dem Anstieg der mittleren Temperatur können noch weitere Anzeichen einer Klimaänderung beobachtet werden. So ist nach Untersuchungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) [25] seit 1970 die Dauer von Westwind-Wetterlagen, die seit Anfang der Beobachtungen 1881 im Mittel bei 2,5 Tagen lag, bis heute auf über 4 Tage angestiegen, verbunden mit häufiger auftretenden Extremwittersituationen. Indikator für eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit ist die Zunahme der Wellen im Atlantik. Ungereimtheiten wie der zunächst stärkere Temperaturanstieg auf der Südhalbkugel konnten mittlerweile durch die teilweise abschattende Wirkung von Aerosolen aus industriellen Verbrennungsprozessen erklärt werden.

Zeit lag die Temperatur im Mittel zwischen $10,4^{\circ}\text{C}$ und $16,1^{\circ}\text{C}$. Es wird davon ausgegangen, daß mit deutlichen Veränderungen in der Zusammensetzung der Ökosysteme zu rechnen ist, falls dieses Temperaturband global verlassen wird. Deutliche und schnelle Klimaänderungen im Zeitraum von etwa 100.000 Jahren davor hatten teilweise die Anpassungsfähigkeit der Natur überfordert [25]. Bei einer momentanen Mitteltemperatur von $14,6^{\circ}\text{C}$ bleibt damit, inklusive einer Toleranzgrenze, nur noch ein Spielraum von etwa 1,5 Kelvin.

Die Begrenzung der Emissionen wird vom WBGU definiert über die der Gesellschaft durch die Klimaänderung zumutbaren Kosten¹⁴. Etwa bei 3% - 5% des Bruttonettoprodukts wird hier die Grenze für empfindliche Störungen gesehen und eine Obergrenze für den tolerierbaren Temperaturanstieg von 0,2 Kelvin pro Dekade abgeleitet. Andernfalls wird erwartet, daß die schon damit verbundenen Klimafolgekosten die als kritisch angesehene 5%-Grenze des Bruttonettoprodukts überschreiten werden.

In seiner Stellungnahme zur dritten Vertragsstaatenkonferenz 1997 in Kyoto stellt der WBGU verschiedene Szenarien für eine Umsetzung der Einsparungsziele vor [30]. Langfristige Ziele sind dabei eine Reduktion der Treibhausgase gegenüber 1990 in allen im Annex I des Protokolls genannten Staaten um 23% bis 2010, 43% bis 2020 und 77% bis 2050.

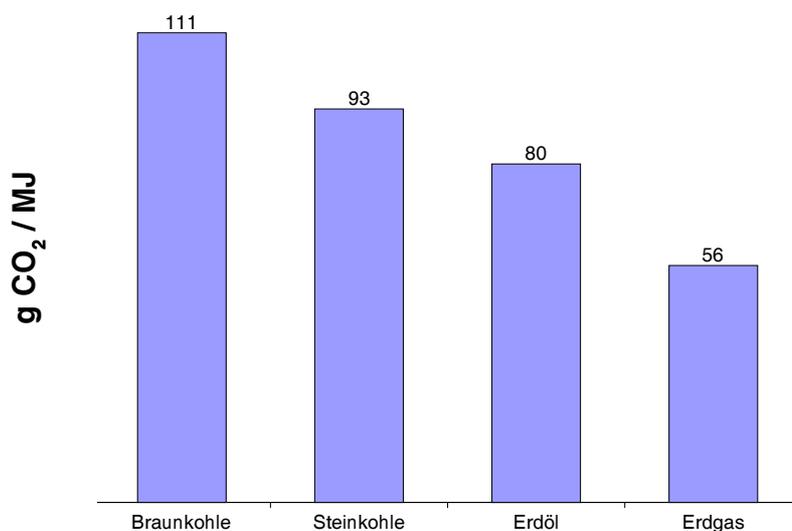


Abbildung 4: Spezifische CO_2 -Emissionen der kohlenstoffhaltigen Energieträger nach [31]

¹⁴Hinsichtlich der Höhe der zu erwartenden Schäden scheint eine belastbare Prognose bisher noch kaum möglich. P. Mayerhofer und R. Friedrich haben in [28] eine Reihe von vorliegenden Studien dazu ausgewertet. Unterschiede zeigen sich dabei insbesondere in der Bewertung nicht direkt monetarisierbarer Schäden wie z.B. der Todesopfer. In einem Beitrag in der Wochenzeitung „Die Zeit“ [29] wird Richard Klein, ein Mitarbeiter des Potsdam-Instituts, zitiert. Dort werden inzwischen weitergehende Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels angestellt. Seiner Einschätzung nach werden die Industrieländer den Klimawandel zwar zu spüren bekommen, aber vermutlich damit zurecht kommen, während es vor allem die Entwicklungsländer sein werden, die sich nicht davor schützen können.

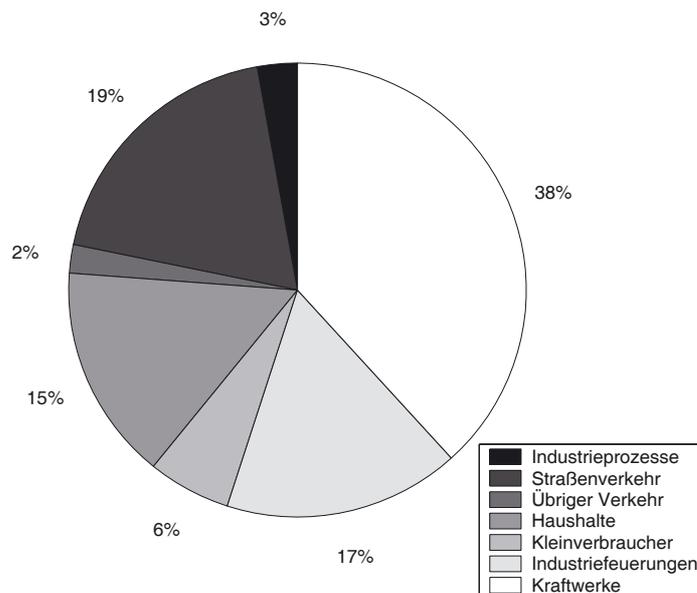


Abbildung 5: Beiträge der verschiedenen Wirtschaftsbereiche zu den CO_2 -Emissionen in Deutschland im Jahr 1999 nach [6]

Treibhausgas-Emissionen in Deutschland Die EU hat im Rahmen des Kyoto-Protokolls die Verpflichtung übernommen, die CO_2 -Emissionen bis zum Jahr 2012 um 8% gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren. Entsprechend den gegenwärtigen Beiträgen zu den Gesamtemissionen wurden die Reduktionsziele innerhalb der EU weiter aufgeschlüsselt. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich bei der folgenden Lastenverteilung innerhalb der EU verpflichtet, ihre eigenen Emissionen überdurchschnittlich um 20% zu reduzieren [24]. Unabhängig davon gilt weiterhin die Reduktion um 25% bezogen auf 1990 bis zum Jahr 2005 als Ziel.

Vertreten durch ihren Bundesverband hat sich die deutsche Industrie verpflichtet, freiwillig ihren Beitrag zu den Reduktionszielen zu leisten. Es sind dies eine Reduktion der CO_2 -Emissionen um 25% bis 2005 und der weiteren Treibhausgase um 21% bis 2012, bezogen auf das Jahr 1990 [32]¹⁵. Zusätzlich sind die deutschen Automobilhersteller die Verpflichtung eingegangen, den durchschnittlichen Verbrauch der in Deutschland abgesetzten Fahrzeuge bis 2005 um 1/4 zu reduzieren und damit durchschnittlich nur noch $140g CO_2 / km$ ¹⁶ zu emittieren. Eine entsprechende Verpflichtung ist der Europäische Verband der Automobilhersteller ACEA gegenüber der Europäischen Kommission bis zum Jahr 2008 eingegangen [33],[14].

Der Beitrag der verschiedenen Wirtschaftsbereiche zu den CO_2 -Emissionen in Deutschland im Jahr 1998 ist in **Abb. (5)** auf Basis der Daten des BMWi [6] dargestellt. Während der Bereich der Kleinverbraucher und der Industriefeuerungen sowie im Kraftwerksbereich im Zeitraum von 1990 bis 1998 die gesamte Menge des emittierten CO_2 abnimmt, steigt der Gesamtanteil

¹⁵Das UBA geht davon aus, daß von den notwendigen Einsparungen bis 2012 ein Großteil durch technische Maßnahmen erreicht werden kann [34]. Als Beispiel sind in **Abb. (4)** die spezifischen CO_2 -Emissionen für verschiedene kohlenstoffbasierte Primärenergieträger aufgetragen. Seit 1990 nimmt der Anteil der Braunkohle als Energieträger zugunsten des Erdgases ab und trägt damit auch bei unverändertem Energiebedarf zu einer Reduktion der energiebedingten Emissionen bei.

¹⁶Gemessen wird im Neuen Europäischen Fahr Zyklus

aus dem Straßenverkehr weiter an. Insgesamt liegt der Anteil des Verkehrs 1998 bei 20%. Die erheblichen Anstrengungen sparsamere Neufahrzeuge anzubieten, werden hier unterlaufen von einem nicht mehr nur durch den Nachholbedarf in den neuen Bundesländern erkläraren weiteren Anstieg des Fahrzeugbestands und einer gestiegenen Transportleistung im Straßengüterverkehr [6],[35],[36].

2.3 Nachhaltige Mobilität

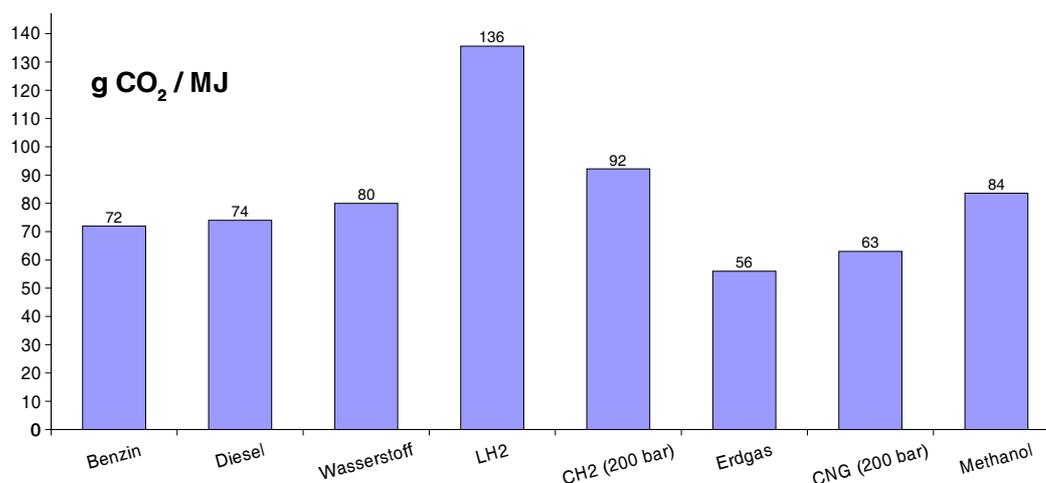


Abbildung 6: Spezifische CO_2 -Emissionen verschiedener Kraftstoffe. Betrachtet wird Wasserstoff auf Erdgasbasis (gasförmig), flüssiger Wasserstoff (LH2), komprimierter Wasserstoff (CH2), komprimiertes Erdgas (CNG) und Methanol auf Erdgasbasis nach [15],[37].

Rohöl stellt den Energierohstoff mit der geringsten statischen Reichweite dar. Wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt muß aufgrund der langen Exploration mit dem Maximum der Förderung im Bereich 2010 – 2020 gerechnet werden. Danach wird der weiterhin hohen Nachfrage nur noch ein begrenztes Angebot gegenüber stehen; mit tendenziell steigenden Rohölpreisen ist daher zu rechnen.

Diese Verknappung trafe den Verkehrssektor am härtesten, da dieser aufgrund der sehr guten Eignung von Rohölprodukten für mobile Anwendungen bisher nahezu ausschließlich auf diesem Rohstoff basiert und die anderen fossilen Rohstoffe als direkter Ersatz nicht geeignet sind. Vor diesem Hintergrund muß die Diskussion um zukünftige Fahrzeugantriebe, die künftigen Treibstoffe und die damit angeblich erreichbare Unabhängigkeit vom Rohöl gesehen werden¹⁷.

Gleichzeitig trägt der Verkehrssektor erheblich zur Verschmutzung der Luft mit verschiedenen limitierten Schadstoffen bei, was in Deutschland, ausgelöst durch das auf den sauren Regen

¹⁷Grundsätzlich kann im Raffinerieprozess aus verschiedensten kohlenstoffhaltigen Energieträgern über den Zwischenschritt Synthesegas jeder gewünschte Treibstoff erzeugt werden. Einen sehr guten Überblick über die verschiedenen Prozesse, deren Ausgangsstoffe und die Möglichkeiten regenerativer Energieträger zu integrieren bietet V. Schindler in [37].

zurückgeführte Phänomen Waldsterben, zur bekannten Abgasgesetzgebung für mobile und stationäre Anwendungen geführt hat.

Die absehbar größte Herausforderung stellt jedoch die Forderung nach weiterhin deutlich zu reduzierenden Treibhausgasemissionen dar. Denn während die Schadstoffe von Pkws, teilweise zu Lasten des Verbrauchs, durch die Einführung von Katalysatoren und anderer Abgasbehandlungsmaßnahmen sowie eine optimierte Verbrennung sehr effektiv vermindert werden, können die Treibhaus-wirksamen CO_2 -Emissionen des Fahrzeugbereichs nur sehr begrenzt reduziert werden. Dies gilt insbesondere auch für den Übergang auf andere Sekundärenergieträger. In **Abb. (6)** sind dazu die gesamten energiebezogenen CO_2 -Emissionen für verschiedene in der Erprobung befindliche Energieträger im Vergleich zu den Standardkraftstoffen aufgeführt. Berücksichtigt wurden jeweils die Raffinerieverluste. Für Wasserstoff und Methanol wurde von der gegenwärtig effizientesten Methode ausgegangen: der Darstellung von Wasserstoff über den Steam-Reforming-Prozeß aus Erdgas mit 70% Wirkungsgrad und die Erzeugung von Methanol über die Methanol-Synthese aus Synthesegas auf Erdgasbasis mit einem Wirkungsgrad von 73% [37]¹⁸.

Wenn, wie vom WBGU vorgesehen, die gesamten Treibhausgasemissionen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 77% reduziert werden müssen, heißt das, daß dies einer Rückführung auf die Menge entspricht, die jetzt alleine durch den Verkehr beigetragen wird (siehe **Abb. (5)**). Es ist daher offensichtlich, daß über die bis zum Jahr 2005 ohnehin zugesagten Einsparungen weitere deutliche Anstrengungen nötig sein werden, um die notwendige Reduktion der CO_2 -Emissionen auch im Verkehrsbereich zu erreichen [39].

Dies wird zum Teil über verbesserte Antriebe oder den Umstieg auf Sekundärenergieträger mit reduzierten Emissionen gelingen. Diese Ansätze, einerseits durch optimierte Verbrennungsmaschinen, andererseits durch optimierte Triebstränge, werden in den folgenden Kapiteln detailliert betrachtet. Es kann aber auch nötig sein, andere Einflußgrößen auf den Kraftstoffverbrauchs zu beeinflussen, um die Ziele zu erreichen¹⁹ und so die auf individuelle Mobilität aufgebaute Gesellschaft zukunftsfähig zu gestalten.

¹⁸Die für die Kompression bzw. Verflüssigung von Erdgas oder Wasserstoff notwendige elektrische Energie wurde mit einem mittleren Wirkungsgrad für die Stromerzeugung von $\eta_{el} = 33\%$ in ein Primärenergieäquivalent umgerechnet. Die zuzurechnende Emissionsmenge kann dann aus der mittleren emittierten Menge CO_2 je kWh in Deutschland erzeugten Stroms ermittelt werden. Im Jahr 2000 wurden in Deutschland 561,5 Mrd. kWh Strom erzeugt und dabei 337 Mio. t CO_2 entsprechend $166,7 gr CO_2 / MJ$ emittiert.

¹⁹In den letzten 10 Jahren sind die CO_2 -Emissionen des Verkehrssektors sowohl absolut als auch relativ zu anderen Bereichen gestiegen, obwohl die Neufahrzeuge im Testzyklus von Jahr zu Jahr sparsamer geworden sind. Dies ist einerseits auf gestiegene Fahrleistungen und die steigende Zahl der Fahrzeuge aber möglicherweise auch auf einen im realen Fahrbetrieb vom Testzyklus abweichenden Verbrauch, z.B. durch eine gestiegene Komfortausstattung, zurückzuführen.

3 Optimierte Fahrzeugantriebe

Der Bestand an Kraftfahrzeugen weist in der Bundesrepublik Deutschland einen ungebrochenen Trend nach oben aus. Trotz schwankender Neuzulassungen liegt der Gesamtbestand an Pkws, Lastkraftwagen, Zugmaschinen und Bussen in den Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes in jedem Jahr über den Vorjahreszahlen. Bei einem Bestand von knapp 43 Millionen Pkws im Jahr 2000 und 3,4 Millionen Lastkraftwagen und Zugmaschinen wurden zuletzt 3,8 Mio. Pkws bzw. 340 Tausend LKWs und Zugmaschinen jährlich neu zugelassen [35],[40],[41].

Die Motorisierung erfolgt mit Verbrennungskraftmaschinen mit innerer Verbrennung als Otto- oder Dieselmotoren. Bei den Pkw erreichten Dieselfahrzeuge im Jahr 1999 einen Anteil von 11% am Bestand, wobei der Anteil an Fahrzeugen mit Dieselmotoren je nach Anbieter deutlich schwankt [42]. Die Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, wie Elektro- oder Hybridantrieb betragen Anfang der 70er Jahre zwar noch etwa 2000 Fahrzeuge pro Jahr, sind mittlerweile aber auf 200 p.a. zurückgegangen.

Neben den Wettbewerbsmerkmalen der Fahrzeuge wie Ausstattung, Zuverlässigkeit, Wertentwicklung und Betriebskosten müssen die angebotenen Neufahrzeuge in Europa der jeweiligen Abgasgesetzgebung nach EURO I-IV genügen. Zusätzlich wird eine Absenkung der mittleren CO_2 -Emissionen von Neuwagen auf $140 \text{ g } CO_2 / \text{ km}$ bis 2005 angestrebt. Für den nordamerikanischen Markt ist die Abgasgesetzgebung in Kalifornien mit den Standards ULEV und SULEV das Ziel der Entwicklungen. Neben zunehmenden Komfort- und Sicherheitsmerkmalen sind daher die Verringerung der Schadstoffemissionen und des Energieverbrauchs im Betrieb Schwerpunkte der Fahrzeugentwicklung.

Die Grenzwerte für emittierte Schadstoffe werden dabei einerseits durch verbesserte Verbrennungsabläufe, andererseits durch zum Teil aufwendige Abgasnachbehandlung eingehalten. Für Verbrauchsverbesserungen sind effizientere Motoren und hinsichtlich des Energieverbrauchs optimierte Triebstränge und Fahrzeuge zielführend.

In diesem Kapitel wird daher zunächst ein Überblick über die in den Motoren ablaufenden thermodynamischen Kreisprozesse, die Verlustmechanismen und den Energiebedarf im Fahrbetrieb gegeben. Darauf aufbauend werden verschiedene, auf den Motor begrenzte oder auch den gesamten Triebstrang betreffende Ansätze vorgestellt um Fahrzeuge schadstoffarm und sparsam betreiben zu können. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit schließen das Kapitel ab.

3.1 Motoren mit innerer Verbrennung

In Verbrennungsmotoren wird ein thermodynamischer Kreisprozeß mit innerer Verbrennung realisiert. Die Hauptausprägungsformen sind fremdgezündete Ottomotoren und Dieselmotoren mit Selbstzündung mit ihren Varianten.

Die real während des Betriebs ablaufenden Prozesse können auf theoretische Vergleichsprozesse abgebildet werden, um einerseits das Wirkungsgradpotential abzuschätzen, andererseits aber auch das Verständnis zu vertiefen. Das Luft-Kraftstoff-Gemisch wird dabei als ideales Gas modelliert.

In **Abb. (7)** ist als Beispiel für die Abläufe ein Gleichdruckprozeß ohne Gaswechseltakt im p-V Diagramm dargestellt, wie er als Modell für Dieselmotoren verwendet wird.

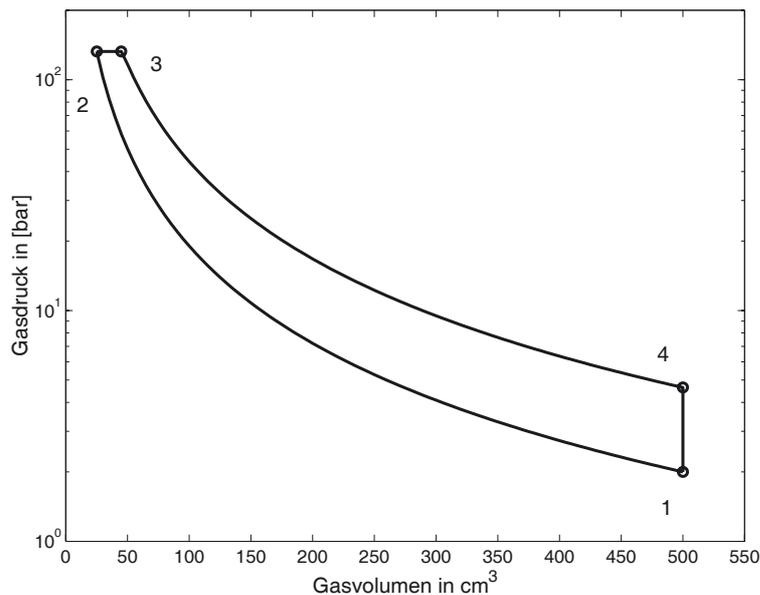


Abbildung 7: Thermodynamischer Gleichdruck-Vergleichsprozess für den Dieselmotor im p-V-Diagramm

Bei den üblichen Hubkolbenmotoren wird das im Zylinder eingeschlossene Gas zunächst durch den Kolben isentrop²⁰ komprimiert (Punkte 1 – 2). Da in der kurzen Zeit kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, erhöhen sich dabei entsprechend dem 1. Hauptsatz für ideale Gase reversibel sowohl der Gasdruck p als auch die Temperatur T . Die Verdichtung $\varepsilon = V_1/V_2$ ist konstruktiv durch den Motor vorgegeben. Ausgehend vom Punkt 1 mit den inneren Zustandsgrößen p_1 und T_1 erhält man den Gasdruck p als:

$$p(V) = p_1 \left(\frac{V}{V_1} \right)^\kappa \quad (1)$$

aus V als aktuellem Gasvolumen mit dem Adiabatenexponenten $\kappa = c_p/c_V$ [43].

Druck- und Temperaturniveaus in den Punkten 1 – 4 hängen von der Konstruktion des Motors und vom Verbrennungsprozeß ab. Beim Dieselmotor beginnt knapp vor dem oberen Totpunkt der Verdichtung die Einspritzung des Kraftstoffs, entweder direkt in eine Mulde des Zylinderkolbens oder in eine im Zylinder angeordnete Brennkammer. Nach einer kurzen, als Zündverzug bezeichneten Verdampfungsphase entzündet sich das gebildete Gemisch. Die Verbrennungsdauer (zwischen den Punkten 2 und 3) entspricht somit mindestens der Einspritzdauer. Während der Wärmezufuhr durch die Verbrennung bleibt durch die Expansion der Druck im Zylinder in etwa konstant (isobar), es schließt sich eine isentrope Entspannung bis zum Punkt 4 an. Die nachfolgende Abkühlung wird bei Motoren mit innerer Verbrennung durch einen Gaswechseltakt (4-Takt Motoren) oder einen Gaswechsel im Bereich des unteren Totpunkts (2-Takt Motoren) realisiert (**Abb. (8)**).

Um die für die Zündung des Gemischs notwendige Temperatur sicher zu erreichen, wird die Luft in Dieselmotoren relativ hoch verdichtet. Typische Werte bewegen sich zwischen $\varepsilon =$

²⁰reversibel ohne Wärmeab- oder -zufuhr

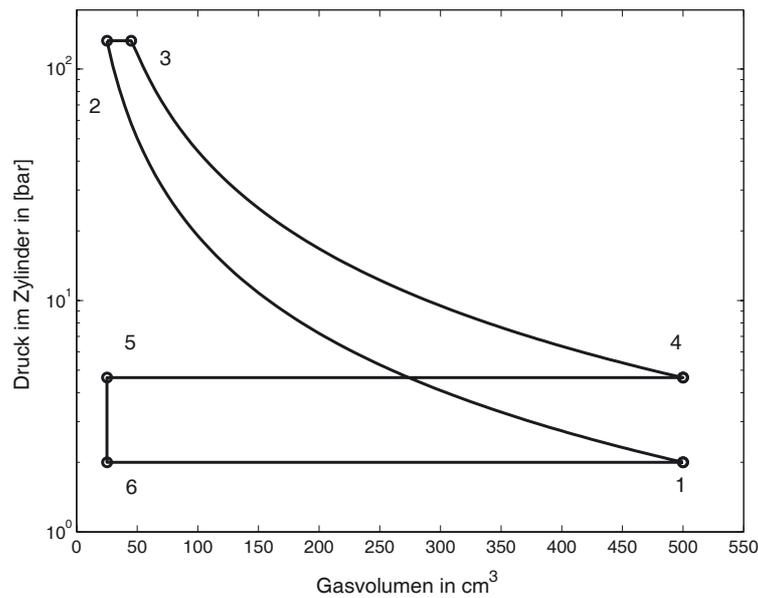


Abbildung 8: Thermodynamischer Gleichdruck-Vergleichsprozess für den Dieselmotor mit idealisiertem Ladungswechseltakt im p-V-Diagramm

17 : 1 und $\varepsilon = 30 : 1$ [44]. In Abbildung (7) wurde, in Anlehnung an die Turbodiesel-Direkteinspritzer Motoren des Volkswagen Konzerns, $\varepsilon = 19,5 : 1$ gewählt [45]. Der theoretische maximale Wirkungsgrad dieses Vergleichsprozesses ergibt sich zu:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{\varphi^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} \varphi - 1} \quad (2)$$

mit dem Einspritzverhältnis $\varphi = V_2/V_3$. Mit den am noch zu beschreibenden Prüfstand gemessenen Daten²¹ kann der theoretische Wirkungsgrad des Kreisprozesses auf $\eta_{th} = 62\%$ abgeschätzt werden.

Bei Ottomotoren dominiert noch die äußere Gemischbildung, bei der durch den Motor im Ansaugtakt ein homogenes Luft-Kraftstoff-Gemisch angesaugt und nachfolgend bis zum Punkt 2 verdichtet wird. Im Bereich der maximalen Verdichtung, in der Nähe von Punkt 2 in den Abbildungen (7) und (8), wird das Gemisch durch einen extern über eine Zündanlage erzeugten Funken gezündet und verbrennt danach sehr schnell. Um eine Selbstzündung des Gemischs sicher zu vermeiden, müssen Ottomotoren mit deutlich niedrigerer Verdichtung betrieben werden. Im Gegensatz zum Dieselmotor wird der Ottomotor durch einen Gleichraumprozess modelliert, bei dem der Punkt 3 isochor²² oberhalb des Punkts 2 liegt. Es treten dabei vergleichsweise höhere Druckspitzen auf. Bei gleicher Verbrennungshöchsttemperatur wie beim Diesel liegt die Abgastemperatur mit bis zu 1000°C deutlich über den dieseltypischen Werten von 600°C.

Den theoretischen Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses erhält man als:

²¹Verwendet wird ein 1,9 l Turbodiesel mit Direkteinspritzung. Unter Last treten hier z.B. Zustände mit $p_1 \leq 2$ bar, $T_1 \approx 333K$, $T_4 \approx 773K$ auf.

²²bei konstantem Volumen

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1}. \quad (3)$$

Für einen typischen Ottomotor mit einer Verdichtung von $\varepsilon = 11$ wäre damit ebenfalls ein theoretischer Wirkungsgrad des Hochdruckprozesses von $\eta_{th} = 62\%$ möglich.

Bei beiden Verbrennungsprozessen kann die im Abgas enthaltene Energie innerhalb einer Abgasturbine zur weiteren Expansion und Abkühlung genutzt werden. Deren mechanische Energie kann dann über eine eingangsseitige Druckerhöhung (p_1 wird gesteigert) zu einer Druckerhöhung im Ansaugtakt und damit zu einer Steigerung der Luftmenge genutzt werden. Mit sonst unveränderten Motoren wird durch die Expansion über den Punkt 4 hinaus die Effizienz gesteigert; außerdem werden höhere Verbrennungsmitteldrücke und damit bei gleicher Drehzahl höhere maximale Drehmomente bzw. Leistungen erzielt [12].

Genauere Betrachtungen und Literaturangaben zu den Vergleichsprozessen und zur Modellierung finden sich bei Ch. Körner [46].

Bei den in den Gleichungen (2) und (3) angegebenen Wirkungsgraden handelt es sich um die theoretischen Wirkungsgrade der Vergleichsprozesse, wie in Abb. (7) für den Dieselmotor gezeigt. Im realen Motor müssen diese Prozesse technisch umgesetzt werden, was zu weiteren Verlusten führt.

Der Nutzwirkungsgrad η_e , aus der Bilanzierung der über den Brennstoff zugeführten Energie W_B und der mechanisch abgegebenen Energie W_e , setzt sich dann zusammen aus der Kette von:

- Brennstoffumsetzungsgrad η_B :

$$\eta_B = \frac{W_B - W_{B,u}}{W_B} \quad \text{mit} \quad (4)$$

W_B : Energieinhalt der zugeführten Brennstoffmenge

$W_{B,u}$: Energieinhalt des unverbrannten oder nur zum Teil umgesetzten Kraftstoffs (*H_C*- sowie *CO*-Emissionen).

Der Brennstoffumsetzungsgrad ist für betriebswarme Dieselmotoren annähernd gleich 1.

- Gütegrad des Hochdruckprozesses η_{gHD} :

Hier gehen Abweichungen vom idealen Prozeß über das reale Gas und die Wandverluste ein.

- Ladungswechselwirkungsgrad η_{gLW} :

Im realen Motor wird die Wärmeabfuhr zwischen den Punkten 4 und 1 durch einen Ladungswechseltakt realisiert, indem das heiße verbrannte Gemisch zunächst durch den Kolben über die Auslaßventile gegen den Druck im Abgaskanal ausgestoßen wird und anschließend ein frisches Gemisch oder Luft über die Einlaßventile angesaugt wird. Ohne Aufladung muß aufgrund der Strömungsverluste der Druck des angesaugten Gases unter

dem Umgebungsdruck, der des ausgestoßenen Gemischs über dem Umgebungsdruck liegen. Der idealisierte Ablauf ist in **Abb. (8)** zwischen den Punkten 4 und 1 dargestellt. Dabei muß eine zur Fläche 4 – 5 – 6 – 1 äquivalente Arbeit verrichtet werden, die als Verlust im Rahmen des Ladungswechsels ebenso wie die thermische Energie des ausgestoßenen Gases zu bilanzieren ist.

- mechanische Verluste ausgedrückt über den mechanischen Wirkungsgrad η_m :
Hier werden die Verluste durch Reibung, Kühlung und den Betrieb der notwendigen Nebenaggregate wie Wasser- und Ölpumpe und bilanziert.

Der Nutzwirkungsgrad ergibt sich dann zu:

$$\eta_e = \eta_B \eta_{th} \eta_{gHD} \eta_{gLW} \eta_m. \quad (5)$$

Der resultierende Wirkungsgrad ist betriebspunktabhängig, er steigt mit der Auslastung des Motors und findet seinen Niederschlag in den Kennfeldern des spezifischen Verbrauchs $b_e(n, M)$, in denen in Form von Muschelkurven der notwendige Kraftstoffeinsatz je abgegebener Energiemenge in g/kWh angegeben ist [12],[46].

3.2 Energieverbrauch von Fahrzeugen

3.2.1 Fahrwiderstände

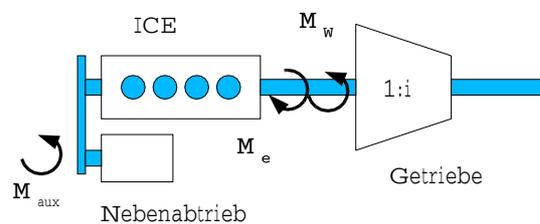


Abbildung 9: Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) mit Getriebe und Nebenabtrieb

Der Kraftstoffverbrauch und das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren ist stark von ihrem jeweiligen Betriebspunkt abhängig. Für deren Optimierung ist daher eine genaue Analyse der im Fahrbetrieb auftretenden Anforderungen an den Antrieb nötig. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei nur die Längsdynamik, d.h. eine vereinfachte, auf eine Bewegungsrichtung reduzierte Dynamik des Fahrzeugs betrachtet.

In **Abb. (9)** ist schematisch ein Verbrennungsmotor mit Getriebe und Nebenaggregatantrieb dargestellt. Aus der Summe der Momente:

$$M_e = M_{Aux} + \frac{r_{dym}}{\ddot{u}} (F_a + F_{Roll} + F_{Wind} + F_{St}). \quad (6)$$

mit den bilanzierten Anteilen:

- M_e : das vom Motor an der Kurbelwelle aufgebrauchte Nutzmoment.
- M_{Aux} : das zum Antrieb der Nebenaggregate wie Generator, Wasser- und Ölpumpe oder auch Klimaanlage und Lüfter notwendige Moment.
- F_a : die auf die Fahrzeugmasse wirkende beschleunigende Kraft:

$$F_a = (m + m_{\Theta}) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

mit den Beschleunigung $a = dv/dt$, der Fahrzeugmasse m und einer rechnerischen Zusatzmasse m_{Θ} , die die Trägheitsmomente der rotierenden Teile berücksichtigt. Die Zusatzmasse ist bei Schaltgetrieben vom gewählten Gang abhängig.

- F_{Roll} : die zur Überwindung der Rollreibung notwendige Kraft:

$$F_{Roll} = \mu m g \cos \alpha \quad (8)$$

mit dem Koeffizienten der Rollreibung μ , der Fahrzeugmasse m , der Erdbeschleunigung g und dem Steigungswinkel α .

- F_{Wind} : die bremsende Kraft durch den Luftwiderstand des Fahrzeugs:

$$F_{Wind} = \frac{\rho c_w A}{2} v^2 \quad (9)$$

in Abhängigkeit von der Dichte der Luft ρ , dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , dem Fahrzeugquerschnitt A und dem Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit v .

- F_{St} : zur Überwindung der Hangabtriebskraft an Steigungen

$$F_{St} = m g \sin \alpha . \quad (10)$$

erhält man die Differentialgleichung²³ für die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Weitere Kräfte, die z.B. in Kurvenfahrten auftreten, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Angaben dazu finden sich z.B. im Handbuch von Bosch [12].

Die auf das linear beschleunigte Fahrzeug wirkenden Kräfte werden über die Hebelwirkung der Räder mit dem dynamischen, d.h. beim bewegten Reifen relevanten Radius r_{dyn} in ein Moment an der Achse und über die kombinierte Getriebe- und gegebenenfalls Achsübersetzung \ddot{u} in ein Moment an der Kurbelwelle umgerechnet.

²³Die algebraische Momentengleichung (6) wird über das dynamische Beschleunigungsmoment F_a nach Gleichung (7) zur Differentialgleichung.

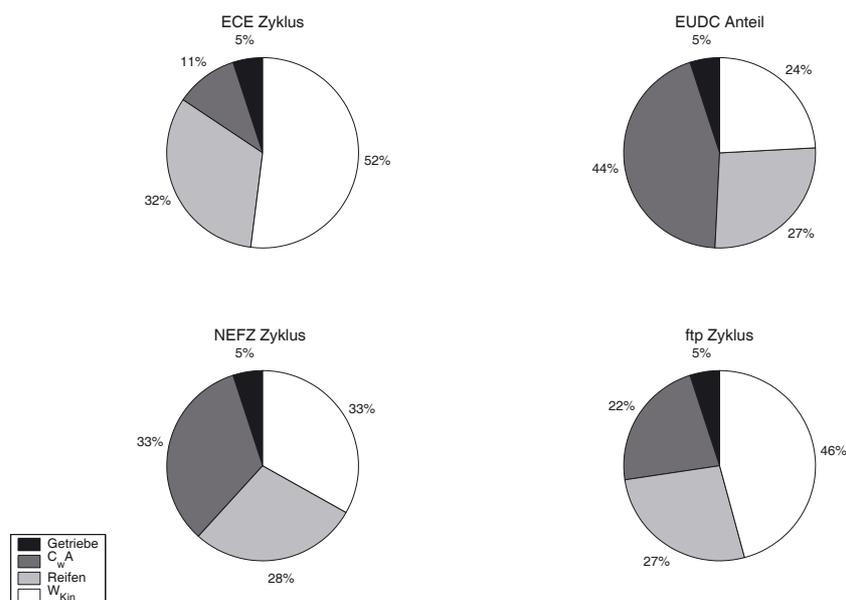


Abbildung 10: Aufteilung der in den Anteilen des NEFZ bzw. im ftp-75 Zyklus aufgewandten mechanischen Energie für ein Fahrzeug mit einem festen Getriebewirkungsgrad von 95%. Angenommen wurden der Rollreibungskoeffizient $\mu = 0,009$, eine Fahrzeugmasse $m = 1500 \text{ kg}$, $m_{\Theta} = 100 \text{ kg}$ und $c_w A = 0,66 \text{ m}^2$.

3.2.2 Testzyklen

Der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen von Fahrzeugen wird über genormte Fahrzyklen ermittelt. Der in Europa gültige Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) ist im Anhang in **Abb. (52)** dargestellt. Er besteht aus einem 780 Sekunden langen innerstädtischen (4 x ECE) und einem sich anschließenden 400 Sekunden langen außerstädtischen Teil (EUDC). Für den Fahrtst wird eine Zuladung von 100 kg gefordert. Der NEFZ stellt moderate dynamische Anforderungen an den Antrieb, die Beschleunigungen bleiben unter 1 m/s^2 , allerdings muß eine Geschwindigkeit von 120 km/h erreicht werden. Hinsichtlich der Schadstoffemissionen sind die Anforderungen dagegen relativ hoch, da der Motor im städtischen Teil kaum belastet wird und daher seine Betriebstemperatur erst spät erreicht. Die Aufteilung der Energieanteile aus Gleichung (6) in den Teilstücken des NEFZ sowie im nordamerikanischen ftp-75 Zyklus (siehe Anhang) sind beispielhaft in **Abb. (10)** für eine Parameterkombination angegeben. Im innerstädtischen Teil entfällt über die Hälfte der Arbeit auf die Beschleunigungsvorgänge. Trotz deutlich höherer mittlerer Geschwindigkeit ist auch im ftp-75-Zyklus ein Großteil der Arbeit für Beschleunigungen aufzuwenden. Die Anteile durch den geschwindigkeitsabhängigen Luftwiderstand sind innerstädtisch deutlich kleiner, im gesamten NEFZ verteilt sich die Energie dann fast gleichmäßig auf Beschleunigung, Luftwiderstand und Rollreibung.

Die insgesamt für ein Fahrzeug mit den zu **Abb. (10)** angegebenen Daten in den Zyklen mechanisch vom Motor aufzubringenden Energiemengen sind in **Tabelle (2)** zusammengestellt. Die bilanzierten Energieanteile aus Gleichung (6) sind linear in den Parametern m , m_{Θ} , μ , c_w und A so, daß aus den in der Tabelle angegebenen Beträgen und der Aufteilung der Anteile in den Zyklen nach **Abb. (10)** auf beliebige andere Fahrzeugkonfigurationen geschlossen

Zyklus		W_{Acc}^a	W_W^b	W_{Kin}^c
ECE	(780 s)	0,46 kWh	0,22 kWh	0,24 kWh
EUDC	(400 s)	0,96 kWh	0,73 kWh	0,23 kWh
NEFZ	(1180 s)	1,42 kWh	0,95 kWh	0,47 kWh
ftp-75	(1877 + 600 s)	2,59 kWh	1,60 kWh	0,99 kWh

Tabelle 2: Energieanteile für ein Testfahrzeug in verschiedenen Standardzyklen

^aMotorisch abgegebene Energie

^bEnergieanteil zur Überwindung der dissipativen Fahrwiderstände

^cZur Beschleunigung aufgewandte Energie

werden kann. Auffallend ist der Schwerpunkt des Energieaufwands für die Überwindung des Luftwiderstandes im außerstädtischen Anteil (EUDC) des NEFZ.

3.3 Optimierte Verbrennungsmotoren

Trotz ihrer langen Entwicklungsgeschichte bieten auch aktuelle Verbrennungsmotoren noch erhebliches Potential für weitere Verbesserungen. Schwerpunkte sind dabei, neben dem Emissionsverhalten und der Effizienz, die Vibrationen, das Geräusch und die Leistungsdichte. Trotz vereinzelter Ansätze, den Verbrennungsmotor z.B. als Kreiskolbenmotor auszuführen, dominiert im Fahrzeugbereich eindeutig der klassische Hubkolbenmotor in 2- und 4-Takt-Ausführung als Otto- oder Dieselmotor. Bevor die Einsparpotentiale von optimierten Antriebsstäben beleuchtet werden, soll daher zunächst ein Überblick über die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten und Potentiale von Standardmotoren geschaffen werden.

3.3.1 Ottomotoren

Stand der Technik sind Benzinmotoren mit geregelter externer Gemischbildung und Abgasbehandlung durch einen 3-Wege-Katalysator für unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x). Der Kraftstoff wird dabei zentral oder für jeden Zylinder einzeln in das Ansaugrohr eingespritzt. Vergaser zur Gemischbildung können nicht ausreichend genau geregelt werden, um die für die Abgasbehandlung notwendige Genauigkeit des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses²⁴ $\lambda = 1$ einzuhalten und spielen daher bei Neufahrzeugen keine Rolle

²⁴Im Ottomotor wird zur Verbrennung des zugeführten Kraftstoffs ein Massenverhältnis von Frischluft zu Kraftstoffmenge von 14,7:1 benötigt. Diese Mischung wird als stöchiometrisches Gemisch bezeichnet. Die Luftzahl λ kennzeichnet die Abweichung vom stöchiometrischen Gemisch [12]. Unterschieden werden drei Bereiche:

- $\lambda = 1$: Die zugeführte Luftmasse entspricht der theoretisch nötigen Menge.
- $\lambda < 1$: Es herrscht Luftmangel. Gemische mit Kraftstoffüberschuß werden als fett bezeichnet. Die maximale Leistung erreicht der Ottomotor für $\lambda = 0,85 \dots 0,95$.
- $\lambda > 1$: Gemische mit Luftüberschuß werden als mager bezeichnet. Für tatsächliche vollständige Verbrennung werden magere Gemische benötigt, der Kraftstoffverbrauch und die Leistungsdichte sinken, wenn der Motor magerer betrieben werden kann.

mehr.

Durch die Gemischaufbereitung im Saugrohr entsteht in den Zylindern ein homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch, das nach der Verdichtung durch eine oder zwei Zündkerzen entflammt wird. Die homogenen Gemische können nur in einem engen Bereich des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses zwischen $0,6 < \lambda < 1,6$ sicher gezündet werden. Im Teillastbereich muß daher die angesaugte Luftmenge an die einzuspritzende Kraftstoffmenge angepaßt werden. Dies geschieht über eine Drosselklappe im Ansaugrohr. Der Druckverlust über der Drosselklappe reduziert den Eingangsdruck für den Kreisprozeß nach Abb. (7) bzw. (8). Dadurch wächst die zur Ladungswechselarbeit proportionale Fläche 4 – 5 – 6 – 1. Die Verluste durch den Ladungswechsel können beim Ottomotor im Teillastbereich bis zu 30% erreichen, daher stellen sie eines der interessantesten Verbesserungspotentiale dar.

Magermotor Unter Ausnutzung der Abmagerungsfähigkeit können Ottomotoren im Teillastbereich auch bei homogener Gemischbildung bis zu Luftzahlen von $\lambda = 1,5$ betrieben werden. Zündfähigkeit, Laufruhe und Rohemissionen können durch eine mehrfache Ausführung der Zündkerzen deutlich verbessert werden [47]. Die aktuellen Abgasgrenzwerte werden bisher aber nur von Motoren mit 3-Wege-Abgaskatalysator sicher eingehalten. Dieser benötigt ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis, da insbesondere die Stickoxide nur konvertiert werden, wenn kein Sauerstoff mehr im Abgas enthalten ist. Die Emissionen werden dann um bis zu 98% reduziert. Obwohl im Magerbetrieb die NO_x Rohemissionen deutlich zurückgehen sind die verbleibenden Werte zu hoch [48]. Ottomotoren werden daher immer bei $\lambda = 1$ betrieben wenn der Betriebszustand es zuläßt²⁵.

Magerkonzepte verwenden Speicherkatalysatoren, die unter Luftüberschuß NO_x zunächst speichern, um es dann in nachfolgenden fetten Gemischphasen abgeben und konvertieren zu können. Die Motoren werden dazu getaktet abwechselnd fett und mager betrieben [50],[51]. Die verwendeten Speicherkatalysatoren werden durch Schwefeloxide im Abgas vergiftet, da Schwefelverbindungen bevorzugt gebunden und in den fetten Phasen nicht wieder abgegeben werden. Je nach Schwefelgehalt müssen Speicherkatalysatoren daher immer wieder durch eine Erhitzung auf ca. $650^\circ C$ ²⁶ regeneriert werden [52],[53].

Wie bei Dieselmotoren werden außerdem spezielle Katalysatoren zur selektiven katalytischen NO_x -Reduktion (SCR) durch zugesetzte Reduktionsstoffe oder die im Abgas vorhandenen Kohlenwasserstoffe untersucht.

Die Schlüsseltechnologie für alle Magerkonzepte stellt damit die Verfügbarkeit von extrem schwefelarmem Kraftstoff dar.

Magermotoren versuchen im Teillastbetrieb $\eta_{g,LW}$ zu verbessern. Das Verbrauchsreduktionspotential liegt bei homogener Gemischbildung bei 10% im Teillastbereich. Probleme bestehen noch bei der Abgasbehandlung.

²⁵Durch den Übergang zu stöchiometrischen Gemischen in allen Betriebspunkten bei Einführung des Katalysators hatte sich der Verbrauch zunächst wieder erhöht und erreicht erst jetzt wieder die vorher erreichten Werte [49]

²⁶Üblich wäre eine Betriebstemperatur von $450^\circ C$.

Abgasrückführung (AGR) Durch die teilweise Rückführung von verbranntem Abgas in den Ansaugkanal kann der Frischluftanteil im Gemisch und damit die nötige Drosselung reduziert werden. Zusätzlich wird die Bildung von Stickoxiden reduziert.

Die Abgasrückführung verbessert $\eta_{g,LW}$ ohne die Probleme bei der Abgasbehandlung, da $\lambda = 1$ gehalten werden kann.

Benzin-Direkteinspritzung (DISI) Außer der externen Gemischbildung durch Kraftstoffeinspritzung gibt es auch beim Ottomotor Varianten mit direkter Einspritzung in den Brennraum (Direct Injection Spark Ignition Engine). Je nach Einspritzzeitpunkt und Frischluftführung kann hier ein homogenes stöchiometrisches Gemisch für hohe Lasten, ein homogenes, mageres Gemisch im oberen Teillastbereich bis hin zu einem inhomogenen, lediglich im Bereich der Zündkerze entflammaren Gemisch erzeugt werden. Der Motor kann so, ähnlich wie Dieselmotoren, auch noch mit extremen Luft-Kraftstoff-Verhältnissen betrieben werden. Neben den Drosselklappenverlusten werden hier über den inhomogenen Schichtbetrieb auch die Wärmeverluste an der Zylinderwand reduziert. Die Abweichung vom stöchiometrischen Gemisch führt auch beim DISI zu Problemen mit den Stickoxiden, da auch hier der 3-Wege-Kat nicht einsetzbar ist [54]. Durch eine optimierte Führung der Verbrennung sind aber mittels NO_x -Speicherkat die Euro-IV Grenzwerte sicher einzuhalten [55].

DISI-Motoren reduzieren die Drosselklappenverluste ($\eta_{g,LW}$) und verbessern über die im Schichtbetrieb reduzierten Wandverluste dort den Hochdruckprozeß ($\eta_{g,HD}$). Mit optimierter Verbrennung sind im Teillastbereich Verbrauchsverbesserungen bis zu 20% möglich [56],[57],[58].

Downsizing Ein Konzept zur Effizienzsteigerung sowohl von Benzin- als auch von Dieselmotoren stellt das sogenannte Downsizing dar. Ausgehend von großvolumigen Saugmotoren wird trotz reduzierten Hubraums die Kennlinie für das maximale Moment durch eine Aufladung (Kompressor oder Abgasturbolader (ATL)) beibehalten. Durch die Aufladung wird die verfügbare Luftmenge gegenüber dem Saugmotor gesteigert und somit die Leistungsdichte erhöht. Die Leistung des Motors bleibt dann auch bei reduziertem Hubraum unverändert.

Abgasturbolader erlauben die Ausnutzung der im Abgas (in Abb. (8) Punkt 4) noch enthaltene Energie während der weiteren Expansion im Turbinenteil. Um ATL über weite Lastbereiche optimal nutzen zu können, sind entweder variable Geometrien oder mehrstufige Anordnungen nötig [59]. Bei leichten Einbußen in der Dynamik des Motors („Turboloch“) können, meistens bezogen auf wenig sparsame, großvolumige Saugmotoren, Verbrauchsverbesserungen bis zu 25% im Testzyklus erreicht werden [60],[61],[62].

Mit einer variablen Verdichtung, wie sie von Saab vorgestellt wurde, sind sogar Verbesserungen um 30% im Zyklus erreicht worden [63].

Downsizing reduziert die mechanischen Verluste (η_m) durch kleinere Motoren und steigert den theoretischen Wirkungsgrad (η_{th}) durch Nutzung der Restenergie des Abgases. Verbrauchsverbesserungen bis zu 25% gegenüber großvolumigen Motoren sind belegt.

Variable Verdichtung erlaubt eine im Teillastbereich höhere Verdichtung und steigert dort den theoretischen Wirkungsgrad der Verbrennung η_{th} . Verbrauchsverbesserungen bis zu 30% wurden demonstriert.

Variabler Ventiltrieb (VVT) / (EMVT) Ein besonders elegantes Konzept zur Effizienzsteigerung bei gleichzeitig optimiertem Emissionsverhalten stellen die Ansätze zur voll variablen Ventilsteuerung dar. Neben mechanischen Systemen (VVT) bietet insbesondere der Elektromechanische Ventiltrieb (EMVT) große Freiheitsgrade. Durch die individuelle Steuerung der Ventilöffnungszeiten kann dann neben der Kraftstoffmenge auch die Luftmenge für jeden Zylinder individuell geregelt werden. Auf eine Drosselung kann damit verzichtet werden, ohne daß der stöchiometrische Betrieb verlassen werden müßte. Motoren mit EMVT sind daher voll kompatibel zur Abgasbehandlung durch den 3-Wege-Katalysator. Vollvariable Ventilsteuerungen können mit ATL kombiniert werden. Im Teillastbereich können einzelne Zylinder stillgelegt und die verbleibenden dadurch höher ausgenutzt werden.

Unter Ausnutzung aller Möglichkeiten konnte von FEV eine Verbrauchsreduktion von 16% im Zyklus und ein Potential für bis zu 25% Reduktion nachgewiesen werden. Abgasgrenzwerte nach EURO-IV werden problemlos eingehalten, Grenzwerte nach SULEV sind möglich [64],[66].

Motoren mit EMVT ersetzen die Luftmassensteuerung über die Drosselklappe durch eine zylinderindividuelle Steuerung über die Ventile. Drosselklappenverluste entfallen völlig ($\eta_{g,LW}$). Zusätzlich kann die Qualität der Verbrennung verbessert werden. Das Verbrauchsreduktionspotential liegt bei bis zu 25% im Zyklus.

Abgaskonzepte Die Grenzwerte nach ULEV können mit optimierten Standardmotoren eingehalten werden. Sowohl DaimlerChrysler als auch Audi zeigen, wie durch eine optimierte Einspritzdüse und eine zylinderindividuelle Kraftstoffzumessung die in der Nachstartphase kritischen HC -Rohemissionen sicher beherrscht werden [67],[68]. Durch sorgfältige Optimierung der Nachstartphase, hauptsächlich über den Einsatz einer variablen Sekundärlufteinblasung, bei der gezielt Frischluft in die Abgaskanäle eingeblasen wird, konnten bei FEV sogar die SULEV-Grenzwerte mit einem Ottomotor sicher unterschritten werden [69].

Motoroptimierung Verbrauchs- und Emissionsverbesserungen können auch ohne Zusatzttechnologien durch sorgfältiges Motordesign realisiert werden. So wird mit dem 1,4 l-Benzinmotor für die A-Klasse von Daimler ein Verbrauch im Bestpunkt von nur 240 g Kraftstoff/kWh erzielt, ein Wert, der mit Vorkammerdieselmotoren vergleichbar ist [70].

3.3.2 Dieselmotoren

Bei Dieselmotoren wird im Ansaugtakt nur Luft angesaugt und nachfolgend verdichtet. Nahe am oberen Totpunkt wird der Kraftstoff unter hohem Druck in eine am Rande des Hauptbrennraumes liegende Vorkammer (Nebenkammermotoren) oder direkt in den Hauptbrennraum in eine Mulde im Kolben (Direkteinspritzende Motoren) eingespritzt.

Abgesehen von der Glühkerze ist für den Betrieb des Dieselmotors keine weitere elektronische oder elektrische Einrichtung nötig, da die Kraftstoffpumpen als Reihen- oder Verteilereinspritzpumpen direkt über die Kurbelwelle angetrieben werden. Aktuelle Ausführungen werden über ein Pumpensteuergerät sowohl hinsichtlich der Einspritzmenge als auch bezüglich des

Einspritzbeginns elektronisch geregelt. Neuere Einspritzsysteme wie die Pumpe-Düse-Einzel-pumpen oder das Common-Rail-Speichereinspritzsystem arbeiten mit zylinderindividuell elektronisch gesteuerter Einspritzung.

Durch eine geeignete Luftverwirbelung muß während der Verbrennung dafür gesorgt werden, daß durch eine gute Brennraumausnutzung jeweils genügend Frischluft mit dem später eingespritzten Kraftstoff vermischt wird, da sonst die Rußbildung durch unverbrannte Anteile steigt.

Dieselmotoren müssen daher mit Luftüberschuß betrieben werden, um eine zu starke Rußbildung zu vermeiden. Das minimale Luft-Kraftstoff-Verhältnis liegt bei $\lambda = 1,4$, bei modernen Common Rail Motoren auch bei bis zu $\lambda = 1,1$. Die maximale Leistungsdichte bleibt dementsprechend unter der von Ottomotoren. Der Dieselmotor kann dadurch und durch die Art der Einspritzung aber auch ohne Drosselung betrieben werden. Durch die einstellbare inhomogene Ladungsschichtung werden Wandverluste im Teillastbereich reduziert.

Die Verbrennung erfolgt in Dieselmotoren im warmen Zustand in der Regel fast vollständig, so daß kaum unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid emittiert werden. Probleme bereiten die durch die hohe Verdichtung bedingten Stickoxid-Emissionen sowie die Rußpartikel.

Entwicklungsziele bei Pkw-Dieselmotoren sind: gutes Ansprechverhalten (Elastizität), niedrigster Kraftstoffverbrauch auch im Teillastbereich sowie ausreichendes Potential zur Erfüllung auch zukünftiger Abgasgrenzwerte.

Emissionsverhalten Ebenso wie mager betriebene Ottomotoren können die sauerstoffreichen Dieselabgase nicht mit dem üblichen 3-Wege-Kat behandelt werden. Katalysatorsysteme, die unter Zusatz von Reduktionsmitteln NO_x um bis zu 80% reduzieren, befinden sich in der Entwicklung, sind jedoch noch nicht im Serieneinsatz [71]. Stattdessen wird der Einsatz von Speicherkatalysatoren in Kombination mit einer λ -Regelung für die zyklische Regeneration unter stöchiometrischen Bedingungen erwogen [72].

Um die geforderten Grenzwerte einzuhalten, verbleiben daher hauptsächlich motorische Maßnahmen über eine verbesserte Verbrennung. Trotz der hohen Drücke werden daher mit erheblichem Aufwand optische Untersuchungen des Brennverlaufs zur Verbesserung der Detailkenntnisse durchgeführt [73]. Optimiert wird die Gemischaufbereitung durch die Luftführung und die Strahlbildung der Einspritzdüse [74],[75].

Die Bildung von Stickoxiden kann im testzyklusrelevanten Teillastbereich bis zu einer Drehzahl von etwa 2500 1/min durch eine Abgasrückführung verringert werden, wobei auf ein ausreichendes Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu achten ist, da sonst die Rußbildung gefördert wird [74].

Den Möglichkeiten, den Einspritzverlauf zu gestalten, sind mit den bislang üblichen Verteiler-einspritzpumpen Grenzen gesetzt, auch wenn diese mittlerweile elektronisch geregelt sind. Der Einspritzvorgang ergibt sich hier aus der Wechselwirkung von Pumpe, Hochdruckleitung und Injektor. Eine Voreinspritzung wird durch Düsen mit zwei Federn realisiert.

In den letzten Jahren werden daher verstärkt Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzsystem angeboten. Die Hochdruckpumpe läßt hier ein für alle Zylinder gemeinsames Speicherrohr. Die davon abgehenden Injektoren sind elektronisch geregelt und erlauben einen zylinderindividuellen Spritzbeginn und ein individuell angesteuertes Einspritzende [76],[77]. Weitere Verbesserungen werden von Injektoren mit Piezo-Aktuatoren erwartet, die kleinere Einzeleinspritz-

mengen erlauben. Die Gesamtmenge kann so auf mehrere Teileinspritzungen verteilt werden [78].

Eine wesentliche Verbesserung brächte der Übergang zu schwefelarmen Kraftstoffen da hier Anzahl und Masse der Partikel deutlich reduziert werden könnten, was gleichzeitig Spielraum für reduzierte NO_x -Emissionen schafft. Ebenso wären Speicher-Katalysator Systeme besser anwendbar [79].

Common Rail Systeme sind schwierig zu applizieren, da ein Kompromiß zwischen den Einspritzmengen, dem Raildruck und der Abgasrückführung gefunden werden muß, um das Emissionsminderungspotential voll auszunutzen [80],[81]. Dies kommt umso mehr zum Tragen, als Dieselmotoren in vielen Fahrzeugen desselben Herstellers Verwendung finden können. So zeigt DaimlerChrysler, wie durch die Kombination unterschiedlicher Merkmale wie Abgasrückführung, Düsenform, Ladeluftkühlung und Katalysator ein Standardmotor mit Common-Rail-Einspritzung in unterschiedlichen Märkten und verschiedenen Fahrzeugsegmenten eingesetzt werden kann [82].

Verbrauch Die spezifischen Verbräuche moderner Dieselmotoren mit Direkteinspritzung liegen im Bestpunkt bei 200 g / kWh im Pkw [45] oder 190 g / kWh im Nkw [83] und sind damit weitestgehend ausgereizt [84]. Im Teillastbereich ist der Verbrauchsvorteil gegenüber Ottomotoren durch die entfallenden Drosselverluste und die bei inhomogener Verbrennung reduzierten Wandverluste sogar noch deutlicher [85].

Als Ansatz die Zyklusverbräuche weiter zu reduzieren, verbleibt das Downsizing. Bisher noch angebotene großvolumiger Saugmotoren werden dabei durch kleinere, aufgeladene Motoren gleicher Leistung ersetzt. Bei leicht erhöhtem spezifischen Verbrauch wird hier durch die höhere Ausnutzung eine weitere Ersparnis von bis zu 20% im NEFZ erwartet.

Hauptprobleme von Dieselmotoren sind NO_x - und Rußemissionen. Zukünftige Grenzwerte können über eine optimierte Gemischaufbereitung durch Luftführung und Hochdruckeinspritzsysteme mit Piezo-Aktuatoren eingehalten werden. Durch den Übergang zu leistungsgleichen aufgeladenen Motoren kann gegenüber Saugdieseln noch mit Verbrauchersparnissen um bis zu 20% gerechnet werden.

3.3.3 Motoren mit alternativen Kraftstoffen

Einerseits mit dem Ziel Emissionsreduktion, andererseits motiviert von der Suche nach einer Alternative zu rohölbasierten Kraftstoffen haben in der Vergangenheit die Fahrzeughersteller eine Reihe von Versuchen mit alternativen Kraftstoffen unternommen. Getestet wurden Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren, Methanol und Methanol-Benzin-Gemische, Äthanol sowie Erdgas.

Die „Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie“ (VES), eine gemeinsame Initiative von Bundesregierung und den Firmen Aral, BMW, DC, MAN, RWE, Shell und VW, versucht gegenwärtig den Kraftstoff der Zukunft für die Zeit nach dem Rohöl zu definieren. Das gemeinsame Vorgehen ist nötig, da die Kosten für die zu ändernde Infrastruktur sonst nicht zu verantworten wären. Nach einer ersten Stufe der Evaluation wurden Erdgas, Methanol und Wasserstoff als mögliche

Kraftstoffe in die engere Wahl genommen. Dabei sollen die beiden ersten nach gegenwärtigem Sachstand allerdings nur dann als „Übergangskraftstoff“ in Betracht kommen, wenn sich der direkte Übergang zu Wasserstoff als nicht darstellbar erweist [86].

Methanol Methanol wird in Motoren mit Fremdzündung verbrannt. Methanol-Gemische wurden früher bereits als Kraftstoff in Rennwagen verwendet. Methanol läßt sich als bei Raumtemperatur flüssiger Kraftstoff ebenso tanken, wie die bisherigen Kraftstoffe. Allerdings ist es aggressiver, für die Pumpen und Leitungen müssen daher widerstandsfähigere Materialien eingesetzt werden. Grundsätzlich ist es aber auch möglich, Fahrzeuge für eine gemischte Betankung mit Methanol-Gemischen oder Benzin auszuführen [87]. Aufgrund der geringeren volumetrischen Energiedichte sinkt die Reichweite bei gleichem Tankinhalt, die Leistungsdichte liegt aber aufgrund des geringeren Luftbedarfs über der auf Benzinbasis erreichbaren. Dank der höheren Klopfestigkeit²⁷ können reine Methanolmotoren höher verdichtet werden, was hinsichtlich des Wirkungsgrades Verbesserungen bringt. Im Zyklus werden mit Flexibel Fuel Konzepten gegenüber dem Benzinbetrieb etwa um 10% reduzierte CO_2 -Emissionen erreicht. Nur mit speziell auf Methanolbetrieb optimierten Motoren werden jedoch die Mehremissionen durch die Kraftstoffherstellung kompensiert [88].

Wasserstoff Grundsätzlich kann Wasserstoff unter Inkaufnahme einer reduzierten Maximalleistung in angepaßten Verbrennungsmotoren verbrannt werden. Verwendet werden Motoren mit Fremdzündung. Die Gemischbildung kann extern oder intern erfolgen. Motoren mit interner Gemischbildung stellen hohe Ansprüche an die Standfestigkeit des Injektors, können aber ohne die Gefahr der Rückzündung in den Ansaugkanal auch mit fetten Gemischen betrieben werden. Die Leistungsdichte steigt dann bis in den Bereich von Benzin-Saugmotoren.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff können keine Kohlenwasserstoffe emittiert werden, ebenso entfallen CO_2 oder Rußpartikel. Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen wird allerdings NO_x gebildet, das durch einen nach vorn, zu niedrigeren Verdichtungen verlegten, Zündzeitpunkt beherrscht werden kann [89].

Zusätzlich zur reduzierten Leistungsdichte des Motors stellt sich bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff das Problem der Speicherung. Wasserstoff kann im Fahrzeug flüssig bei $-253^\circ C$ in Kryotanks, gasförmig unter Druck oder gebunden in Metallhydridspeichern transportiert werden.

In **Tabelle (3)** sind die Gewichte und Volumina für Wasserstoff- und Erdgastanks mit dem gleichen Nutzenergieinhalt wie der angegebene Benzintank aufgeführt. Offensichtlich muß für jede Form der Speicherung gasförmiger Energieträger zum Teil deutlich mehr Raum und Gewicht aufgewandt werden als bei Energieträgern, die bei Raumtemperatur flüssig sind.

Druck- und Kryospeicher sind in der Formgebung zudem eingeschränkt und werden entweder aus mechanischen Gründen (300 bar) oder wegen der nötigen Isolierung als rotationssymmetrische Flaschen mit abgerundeten Enden ausgeführt. Bei Druckbehältern kann das Packaging durch die Verwendung mehrerer kleiner Flaschen verbessert werden, bei Kryospeichern scheidet diese Möglichkeit aufgrund der wegen der Isolierung schlechten Volumenausnutzung aus.

²⁷Neigung im Verdichtungsstakt selbst zu zünden.

Kraftstoff ^a		Speicher-		Tank-
		volumen [l]	gewicht [kg]	gewicht [kg]
Benzin	(40 l)	50	34	2
LH_2	(11,3 kg bei $-253^\circ C$)	160	155	144
CH_2	(500 l bei 300 bar)			
	Stahltank	540	511	500
	Alu-Komposit	540	345	334
	Vollverbund	540	161	150
H_2 in Mg-Hydrid	(11,3 kg zu 6%)	160	161	150
Erdgas	(112 l bei 300 bar)			
	Stahltank	120	150	120
	Alu-Komposit	120	108	78
	Vollverbund	120	66	36

Tabelle 3: Volumen und Gewichte von Speichern für Wasserstoff bzw. Erdgas bei gleichem Energieinhalt wie im angegebenen Benzintank nach [38],[90],[91],[92].

^aDie benötigte Menge hängt auch vom resultierenden Antriebswirkungsgrad ab. Für die hier betrachteten Verbrennungsmotoren wurde zunächst der gleiche Wirkungsgrad unterstellt

Hydridspeicher sind in der Formgebung weniger beschränkt und können ähnlich wie Batteriepacks im Fahrzeug verteilt werden.

Für jede Speicherung von Wasserstoff ist sowohl deutlich mehr Bauraum als auch mehr Gewicht zu veranschlagen als beim vergleichbaren Benzintank. Packagingnachteile kommen hinzu. Da der mit Wasserstoff betankte Verbrennungsmotor zudem keine Verbrauchsvorteile, statt dessen Leistungseinbußen und ein bei Stickoxiden kritisches Emissionsverhalten aufweist, ist der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren wenig wahrscheinlich, solange kohlenwasserstoff-basierte Alternativen wie z.B. Methanol auf Erdgas-Basis bereit gestellt werden können.

Erdgas Von einigen Herstellern werden inzwischen direkt ab Werk für einen erdgasbetrieb ausgerüstete Fahrzeuge angeboten. Zusätzlich besteht zum Teil die Möglichkeit der Umrüstung. Die Mehrkosten liegen bei bis zu 5000 DM.

Ebenso wie Methanolgemische kann auch Erdgas in Ottomotoren als Kraftstoff verwendet werden. Die Gemischbildung kann extern erfolgen, die Leistungsdichte ist bei bi-fuel-Konzepten, die wechselweise sowohl mit Erdgas als auch mit Ottokraftstoff betrieben werden können, vergleichbar der beim Einsatz von Benzin. Gleiches gilt für den Verbrauch. Durch die bessere Gemischbildung werden beim Betrieb mit Erdgas deutlich weniger Schadstoffe emittiert [93],[94]. Erdgas kann daher z.B. auch als Kraftstoff in der Kaltstartphase von Motoren eingesetzt werden um auch mit größeren Fahrzeugen die SULEV Werte zu erreichen [95].

Erdgasmotoren können sehr mager betrieben werden, aufgrund der geringen Schwefelanteile sollten keine Probleme bei der Verwendung von NO_x -Speicher-katalysatorsystemen auftreten

[96]. Speziell für den Einsatz mit Erdgas als Kraftstoff ausgelegte Motoren können aufgrund der hohen Klopffestigkeit höher verdichtet werden und eignen sich damit auch gut für Downsizing-Konzepte. Der Wirkungsgrad im Bestpunkt bleibt mit 40% knapp unter dem von direkteinspritzenden Dieselmotoren zurück, liegt aber oberhalb dem von Benzinmotoren.

Die CO_2 -Emissionen liegen durch den möglichen Magerbetrieb und den damit verbundenen guten Teillastwirkungsgrad aufgrund der geringen spezifischen Emissionen von Erdgas um 20% unter denen eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs. Für einen 1,0 l Magermotor wird von Opel in [97] ein Potential von unter $100 \text{ g } CO_2 / \text{ km}$ für einen Astra angegeben.

Erdgas wird in Europa in Fahrzeugen als CNG getankt. 300 bar Druck sind dabei möglich, die Daten zum Speicher finden sich ebenfalls in der Tabelle (3). Erdgastanks sind hinsichtlich der Form ebenso beschränkt wie Wasserstofftanks, das benötigte Volumen ist allerdings deutlich kleiner. Insbesondere mit Speichern aus Faserverbundwerkstoffen kann ein akzeptabler Tank erzielt werden.

Die Verwendung von Erdgas als Treibstoff wird gegenwärtig gefördert, indem in Deutschland bis Ende 2009 nur der EU-weite Mindeststeuersatz für Mineralölprodukte erhoben wird. Die Zulassungszahlen sind in den letzten Jahren auf jährlich über 5000 Fahrzeuge bis 1999 gestiegen, was allerdings ein verschwindender Anteil bleibt. Der Grund dürfte u.a. in der geringen Tankstellendichte zu finden sein.

Untersützt wird die Verwendung von Erdgasfahrzeugen gegenwärtig hauptsächlich von der Gaswirtschaft, die auf einen zusätzlichen Absatzmarkt hofft, um damit das geringere Aufkommen im Hauswärmebereich zu kompensieren [98]. Aus energetischer Sicht wäre es letztlich sinnvoller, den leitungsgebundenen Energieträger Erdgas zunächst zur Substitution von Rohölprodukten im stationären Bereich weiter zu verwenden, aufgrund der höheren statischen Reichweite von Erdgas und den geringen Emissionen von Erdgasfahrzeugen bleibt CNG aber ein aussichtsreicher Kandidat für den Treibstoff nach dem Öl [99].

RME Grundsätzlich können Pflanzenöle in Dieselmotoren als Treibstoff verwendet werden. Die im militärischen Bereich eingesetzten Vielstoffmotoren sind z.B. durch eine sehr hohe Verdichtung und gegebenenfalls eine zusätzliche Zündhilfe an die teilweise schlechte Entflammbarkeit angepaßt [12]. Reines Pflanzenöl ist für die Kraftstoffleitungen und gegebenenfalls die Einspritzpumpe auf Dauer unverträglich, auch der Kraftstofffilter kann insbesondere bei tieferen Temperaturen zusetzen. Kaltstartverhalten und Lebensdauer der Motoren werden verbessert, wenn stattdessen Rapsölmethylester (RME, „Biodiesel“) verwendet wird. Inzwischen sind die Motoren der meisten Hersteller für RME zugelassen, RME kann daher ohne weitere Änderungen an den Tankanlagen oder dem Fahrzeug sofort als Alternative genutzt werden und muß somit auch nicht unter den Gesichtspunkten der VES betrachtet werden. RME hat als Kraftstoff den Vorteil der guten Umweltverträglichkeit. Aufgrund der fehlenden Schwefelverbindungen werden im Betrieb weniger Rußpartikel emittiert. Über die gesamte Energiekette werden laut VW ([38]) um 35% - 40% reduzierte CO_2 -Emissionen erwartet. Die Kosten für die Produktion von RME sind abhängig von der Anlagengröße. Bei Schindler [37] wird eine Spanne von ca. 40 - 80 Euro Cent²⁸ angegeben. Selbst wenn die momentane Subvention durch den Wegfall der Mineralölsteuer entfallen würde, wäre die Produktion von RME damit schon ab Rohölpreisen,

²⁸angegeben sind 0,82 DM/l - 1,55 DM/l

die nur wenig über den Spitzenpreisen des Jahres 2000 liegen, wirtschaftlich. Die Kosten könnten weiter gesenkt werden, wenn die Pflanzenöle nicht separat, sondern integriert in den Raffinerieprozessen verarbeitet würden. Eine Beimischung bis zu 20% wird von Shell als zulässig angesehen [18]. Die Möglichkeit einer gezielten steuerlichen Förderung und der ohnehin fiktive Anspruch der CO_2 -Freiheit würden damit allerdings entfallen. Das realisierbare Potential auf stillgelegten Ackerflächen in Deutschland wird mit bis zu 10% des gegenwärtigen Verbrauchs an Dieselmotoren angegeben.

RME kann in Dieselmotoren mit nur geringen Einschränkungen des Kaltstartverhaltens im Wechsel mit Dieselöl verwendet werden. Die geringsten Kosten ergeben sich, wenn die Pflanzenöle im Raffinerieprozeß beigemischt werden. Das Substitutionspotential durch RME aus heimischer Produktion liegt bei maximal 10%.

3.4 Optimierte Triebstränge

Außer durch verbesserte Wirkungsgrade der Motoren oder durch den Übergang auf alternative Kraftstoffe werden die Energieverbräuche und damit die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen von allen Faktoren in Gleichung (6) beeinflusst. Verbesserungen werden über ein reduziertes Fahrzeuggewicht m , einen verbesserten Luftwiderstandsbeiwert $c_w A$ und hinsichtlich des Energieverbrauchs optimierte Reifen erreicht. Bei der Optimierung darf aber auch der Einfluß der Nebenverbraucher über M_{Aux} nicht außer acht bleiben. Nebenverbraucher sind einerseits die direkt am Motor fest angekoppelten, für den Fahrbetrieb benötigten Aggregate, andererseits die elektrischen Lasten im Bordnetz.

Bedarfsorientiert betriebene Nebenaggregate Außer dem Generator sind fest angekoppelt die Öl- und die Wasserpumpe, bei aktuellen Fahrzeugen zusätzlich noch die Lenkhilfepumpe und der Klimakompressor. Abgesehen vom Einfluß des bei steigenden Drehzahlen fallenden Wirkungsgrades ist die Leistungsaufnahme des Generators nur von der elektrischen Last abhängig und daher bisher meistens drehzahlunabhängig, die Leistungsaufnahme der Strömungssysteme (Pumpen und Lüfter) steigt mit der Drehzahl. Bislang müssen diese Aggregate jeweils so ausgelegt und angekuppelt werden, daß der für den Betrieb notwendige Bedarf (an Schmieröl oder an Hydraulikdruck) in allen Betriebsbereichen sichergestellt ist. Dies führt bei den meisten Anbauteilen dazu, daß diese bei höheren Drehzahlen nur zum Teil ausgenutzt sind und zusätzliche Verluste erzeugen.

Der Verbrauchsanteil durch Bordnetz ($\approx 1 kW$ el. Leistung) und Klimaanlage wird z.B. vom IKA in [100] für den NEFZ bzw. ftp-75 Zyklus mit etwa 20% bei einem serienmäßigen BMW 525iX angegeben²⁹.

Zyklusrelevante Verbraucher sind der Lüfter, die Wasser-, Öl- und Hydraulikpumpen sowie der Generator über den Wirkungsgrad. Durch bedarfsgerechte Öl- und Hydraulikpumpen kann deren Verlustleistung bei höheren Drehzahlen vermindert werden, eine bedarfsorientiert angesteuerte Wasserpumpe kann zusätzlich noch das Thermomanagement des Motors unterstützen.

²⁹Im Testzyklus sind alle nicht benötigten elektrischen Verbraucher abgestellt, ebenso die Klimaanlage. Einsparungen wirken sich hier nur im realen Kundenbetrieb aus.

Bislang standen dafür keine elektrischen Antriebe zur Verfügung, so daß lediglich eine eingeschränkte Anpassung über Stufengetriebe und Kupplungen möglich gewesen wäre. Das Einsparungspotential wird dabei für Pkw auf 2% im NEFZ angegeben [101]. B. Voß hat den Einfluß der Nebenaggregate auf den Verbrauch eines Stadtbusses untersucht und zeigt ein Potential von 5% Ersparnis im innerstädtischen Betrieb auf. Zusätzlich wird eine Hybridisierung untersucht, bei der die Nebenaggregate vor allem die in Bremsphasen zur Verfügung stehende Energie verwenden [102].

Wenn eine verlässliche Information über den Ladezustand der Batterie³⁰ vorliegt, kann auch mit Standardgeneratoren eine bedarfsabhängige Erzeugung erfolgen. In diesem ersten Schritt der Hybridisierung wird zunächst die Erzeugung elektrischer Energie in Bereiche höherer Motorauslastung verschoben und im Leerlauf die Belastung abgesenkt. Als nächster Schritt bietet es sich an, den Generatorbetrieb vor allem in Bremsphasen zu legen. Das Potential wird für Standardgeneratoren mit maximal 1% im Zyklus angegeben [103]. Um durch die sich ergebende Zyklisierung eine Schädigung der Batterie zu vermeiden, ist bereits hier ein Batterie- und Energiemanagement nötig.

Start-Stop-Betrieb Mit einer automatisierten Kupplung kann ein vollautomatischer Start-Stop-Betrieb realisiert werden. Solche Fahrzeuge wurden von Volkswagen als Golf Ecomatic und inzwischen wieder als 3L Lupo jeweils mit einem Dieselmotor angeboten. Gegenüber dem Standard Golf wurde dabei ein Verbrauchsvorteil von 25% im Stadtverkehr realisiert [104]. Außer der Kupplung sind eine elektrische Lenkhilfe und ein Druckspeicher im Bremssystem gegenüber der Standardausführung nötig, wegen der Unterbrechungen im Generatorbetrieb und der häufigeren Starts außerdem ein verstärkter Generator und eine größere Batterie.

Start-Stop-Systeme, also Triebstränge, bei denen der Motor automatisiert im Leerlauf ausgekuppelt oder abgestellt wird, können von dem sich abzeichnenden 42V Bordnetz, mit auf der Kurbelwelle angeordneter Elektromaschine profitieren [105],[106],[108],[107]. Diese Systeme werden zwar primär wegen der gestiegenen elektrischen Leistung im Fahrzeug entwickelt³¹, bieten aber als Starter einen verschleißfreien, schnellen Start bis zur Leerlaufdrehzahl, als Generator verbesserte Wirkungsgrade und die gewünschte höhere Leistung und je nach Auslegung die Möglichkeit, die verfügbare Dynamik durch Momentenaddition zu erhöhen. Durch den Einsatz von Starter-Generator-Systemen (SGS) kann der Komfort von Start-Stop-Systemen gesteigert werden und durch die verfügbare elektrische Leistung wird für einige bisher mechanisch angetriebene Komponenten der bedarfsorientierte elektrische Antrieb erst möglich. Wenn eine Kupplung zwischen E-Maschine und Motor vorgesehen ist, könnte das Fahrzeug bei ausreichendem Speicherinhalt auch rein elektrisch bewegt werden. Eine derartige Hybridisierung mit Teillastvermeidung benötigt allerdings eine zweite Elektromaschine zum Start des Motors unabhängig von der Geschwindigkeit und scheidet daher bei reinen SGS aus.

³⁰Im automobilen Sprachgebrauch wird von Starterbatterien oder Traktionsbatterien gesprochen, obwohl es sich dabei grundsätzlich um Akkumulatoren, also Aufbauten aus Sekundärzellen handelt.

³¹Der Ansatz Schwingungen zu unterdrücken findet sich ausgeführt beim Original ISAD System, wird jedoch aufgrund der hohen Leistungen und Energien inzwischen nicht mehr als Schwerpunkt gesehen. Probleme bereiten die Einführung der Kombination von 42V-System und Starter-Generator, da sich das Packaging der Motoren durch die E-Maschine auf der Kurbelwelle ändert, was sich für alle Fahrzeuge auswirkt, die mit dem Motor ausgerüstet werden, und andererseits der Übergang auf ein 42V-System aus wirtschaftlichen Gründen jeweils für ein neues Modell und nicht nur als Ausstattungsvariante erfolgen sollte [108],[109].

3.5 Optimierte Elektroantriebe

Elektromotoren sind im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren wesentlich besser als Traktionsantrieb geeignet, da sie vorwärts und rückwärts drehend bis zum Stand betrieben werden können. Moderne, elektronisch angetriebene Drehfeldmaschinen sind zudem wartungsfrei. Die Drehmomentencharakteristik läßt sich über die Regelung gut an die Erfordernisse im Traktionsbereich anpassen, so daß sowohl hohe Anfahrsteigfähigkeit als auch hohe Endgeschwindigkeiten mit einer fest übersetzten Getriebestufe erreichbar sind. Start-Stop-Betrieb ist ohne Änderungen am Antrieb enthalten.

Elektrofahrzeuge sind zudem lokal frei von gasförmigen Emissionen und zumindest im städtischen Verkehr leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dementsprechend hat es immer wieder Versuche gegeben, Elektrofahrzeugen einen Markt zu erschließen. Die Zulassungszahlen des Kraftfahrtbundesamtes belegen, daß dies bis heute nicht gelungen ist und sich Elektrofahrzeuge außer in Tests allenfalls in sehr engen Marktnischen behaupten. Gegenwärtig wird die Entwicklung von Elektrofahrzeugen in den USA und Japan vor dem Hintergrund der kalifornischen Gesetzgebung mit dem Zwang zur Vermarktung von ZEVs betrieben. In Europa wird die Entwicklung von der Europäischen Union z.B. im Rahmen der JUPITER-³² Initiative mit gefördert. Speziell in Frankreich wird die Entwicklung und die Markteinführung von Elektrofahrzeugen sowohl vom Staat als auch vom staatlichen Energieversorger EDF unterstützt. In Deutschland wurde der Einsatz von Elektrofahrzeugen zuletzt in einem Großversuch auf der Insel Rügen in den Jahren 1992 bis 1996 untersucht, gegenwärtig sind Elektrofahrzeuge hier jedoch kein Thema [110],[111],[112].

Der Grund für die geringe Akzeptanz dürfte in den gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen zurückbleibenden Fahrleistungen liegen. In der linken Hälfte von **Abb. (11)** sind die Reichweiten der verschiedenen für den kalifornischen und den europäischen Markt entwickelten Elektro-Pkw aufgetragen. Zwar werden mit den aktuellen Fahrzeugen Geschwindigkeiten bis zu 130 km/h und Reichweiten bis zu 200 km erreicht, was für einen Großteil der täglichen Fahrten ausreicht, am Ende der Reichweite müssen die Fahrzeuge aber vergleichsweise aufwendig wieder geladen werden. Für die üblichen Batteriesysteme, auch die Bleibatterien, wurden zwar inzwischen auch Schnelladeverfahren entwickelt. Die Zeit, um ca. 80% der Kapazität nachzuladen, liegt aber mit 60 min - 90 min immer noch deutlich über der Dauer eines Tankstopps [113]. Da die Schnellladung zudem hohe Anschlußleistungen benötigt, die dezentral nicht zur Verfügung stehen, wäre der Nutzer für diese Zeit an dezidierte Tankeinrichtungen gebunden. Typischerweise sollte der Ladevorgang aus Zeitgründen, aber auch aus Gründen der Netzkapazität über Nacht geschehen. Elektrofahrzeuge eignen sich damit vor allem für den Einsatz im zyklischen Betrieb, im Berufsverkehr oder in Flotten mit regional begrenztem Einsatz, die Möglichkeit zu gelegentlichen Ferneinsätzen fehlt jedoch noch³³.

³²JUPITER: Joint Urban Project In Transport Energy Reduction

³³Daß, entsprechende Infrastruktur vorausgesetzt, trotzdem erhebliche tägliche Fahrleistungen mit aktuell verfügbarer Bleitechnik möglich sind, demonstriert Panasonic. Dort werden die Batterien so getestet, daß dies einem Dauerlauf mit wiederkehrenden „Tankstops“ für je 10 Minuten nach 57 km entspricht. Im Dauertest wurden einmal 500 km/Tag bzw. 890 km/Tag mit kumuliert 15.000 km bzw. 18.800 km auf dem Prüfstand erreicht, ohne daß ein Kapazitätsverlust erkennbar gewesen wäre. Die Ergebnisse eines proprietären, ähnlich schnellen Ladeverfahrens werden in [114] vorgestellt.

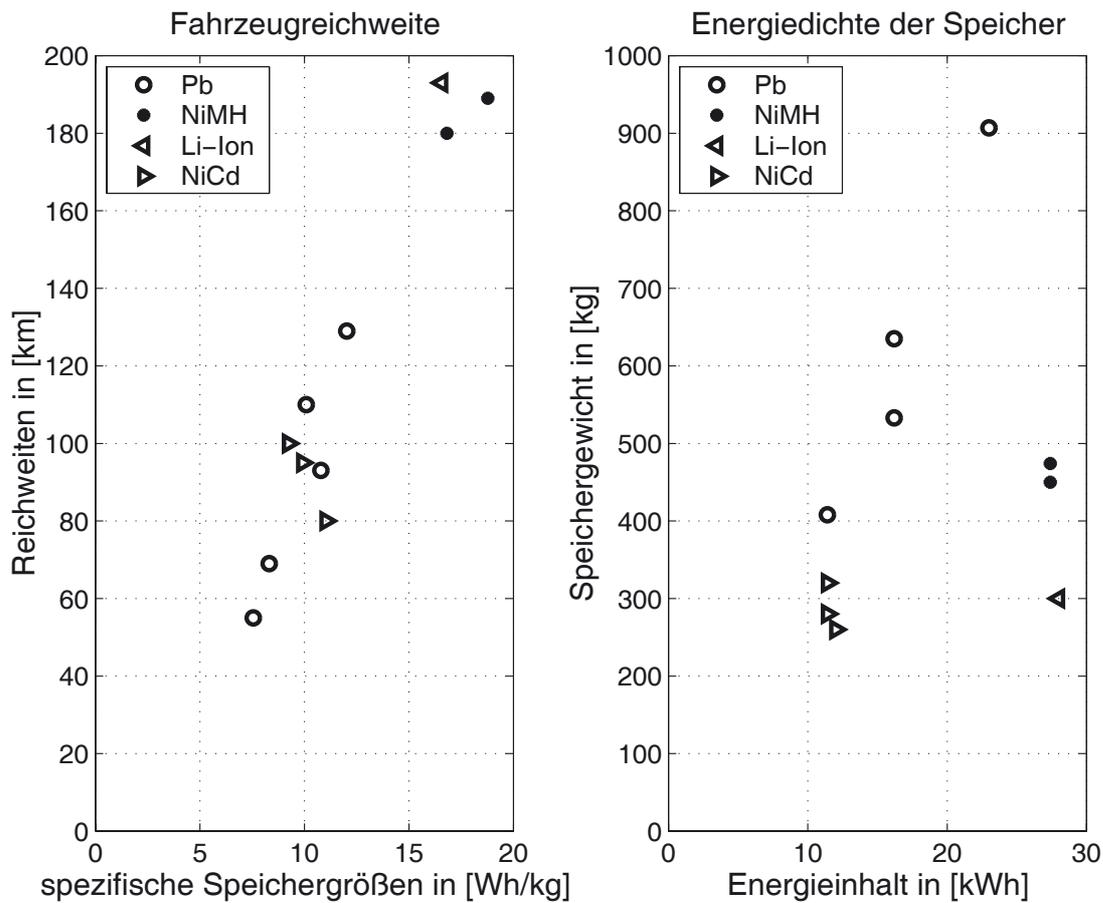


Abbildung 11: Reichweite von Elektro-Pkws über den auf die Fahrzeugmasse bezogenen Speicherinhalt sowie die Energiedichten der Speicher selbst nach [110].

Der Vorteil der lokalen Emissionsfreiheit und ein Vorteil in der Gesamtbilanz der limitierten Schadstoffe ist für die Elektrofahrzeuge unbestritten [11],[115]. Pauschale Aussagen über die Treibhausgasemissionen sind schwierig, da sie vom Kraftwerksmix abhängen. Werden die CO_2 -Emissionen aus dem bestehenden Mix in Deutschland zugerechnet, fallen bei überschlägigen 80% Batteriewirkungsgrad und 80% mittlerem Wirkungsgrad der Elektromaschine im Zyklus für ein Fahrzeug nach Abb. (10) auf Seite 23 etwa $120 \text{ g } CO_2 / \text{km}$ an. Der Wert verbessert sich durch die mögliche Rekuperation auf 100 g . Falls, wie in [115] analysiert, bei der Nachtladung vor allem verstärkt auf Gasblöcke zurückgegriffen werden würde, könnte die CO_2 -Bilanz weiter verbessert werden.

Hinsichtlich der Kosten liegen Elektrofahrzeuge nach einem Vergleich von H. Blümel und K. Wein hauptsächlich wegen der Batteriekosten in Anschaffung und Betrieb über dem vergleichbarer Kfz, [116].

Die Reichweite aktueller Elektrofahrzeuge reicht für die meisten täglichen Fahrten aus. Die vorgeschlagenen Schnelladeverfahren erlauben hohe tägliche Laufleistungen bei leicht erhöhten „Tankzeiten“, die Emissionsbilanz ist tendenziell positiv. Trotz des inzwischen erreichten Entwicklungsstands sind Elektrofahrzeuge auf dem freien Markt noch nicht attraktiv, da sie bei höheren Kosten die Funktionalität des Standardfahrzeugs nicht bieten können.

3.6 Hybridfahrzeuge

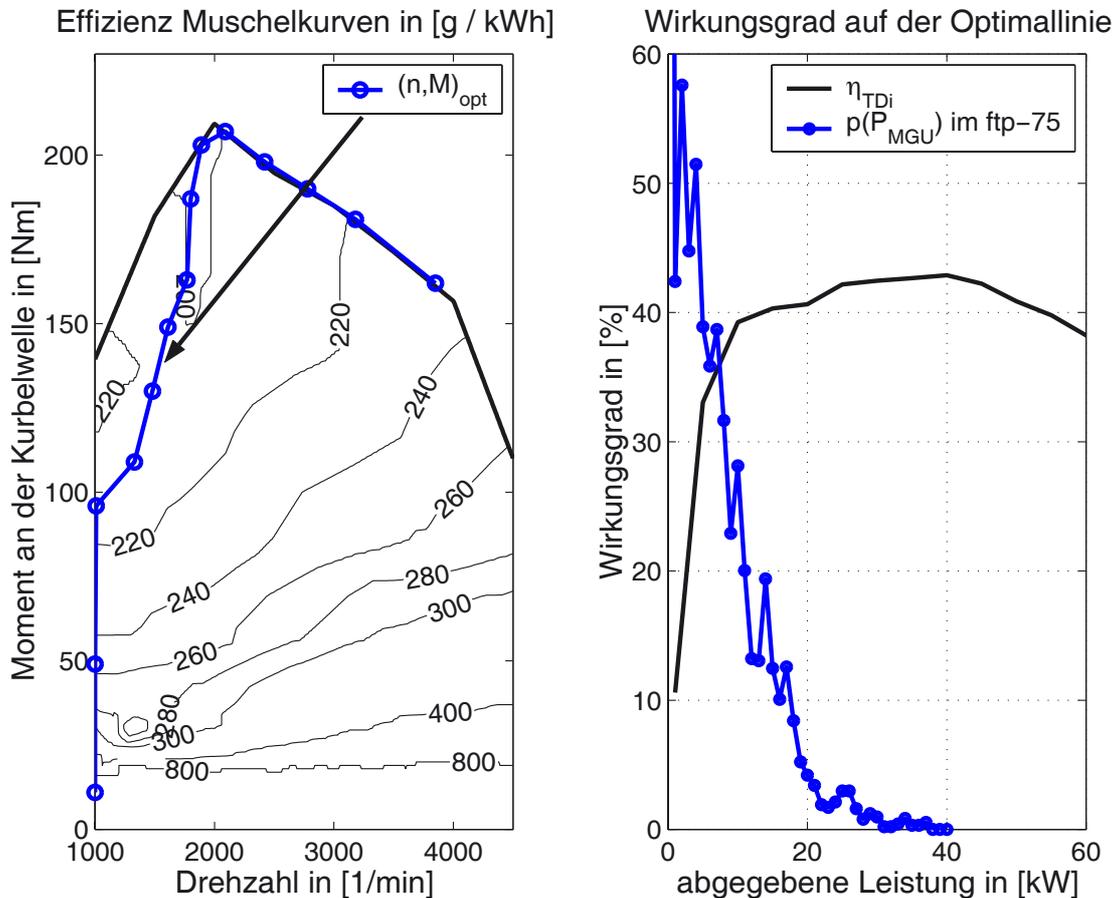


Abbildung 12: Auslegung von Hybriden anhand der Wirkungsgrade des Motors und der typischen Fahrbeanspruchung. Aufgetragen sind im linken Bild die Muschelkurven der Effizienz in [gr Diesel / kWh] und die Optimallinie auf der die jeweilige Leistung mit geringsten Verlusten erzeugt wird. Im rechten Bild sind der Motorwirkungsgrad auf dieser Optimallinie über der geforderten Leistung und im Vergleich dazu qualitativ die Häufigkeitsdichte der im ftp-75-Zyklus geforderten Leistung für das Fahrzeug nach Abb. (10) auf S. 23.

Hybridfahrzeuge versuchen die Vorteile der konventionellen Antriebsstränge mit denen der Elektrofahrzeuge zu kombinieren und durch die Kombination jeweils die Nachteile zu vermeiden. Hybridfahrzeuge nutzen daher entweder mindestens 2 verschiedene Energiewandler für den Traktionsantrieb oder mindestens 2 verschiedene mitgeführte Energiespeicher [117],[118].

Die der Hybridisierung zugrundeliegenden Ideen unterscheiden sich je nach Antriebskonzept. Range-Extender nutzen primär aus dem Netz bezogene elektrische Energie. Die Reichweitenbeschränkungen reiner Elektrofahrzeuge überwinden sie durch einen Verbrennungsmotor. Der Motor lädt die Batterie gegebenenfalls während der Fahrt nach und kann daher deutlich kleiner sein als Motoren für direkte Traktionsaufgaben³⁴.

³⁴In [119] wird ein Range-Extender vorgestellt, bei dem der Motor direkt als alternative Antriebsquelle genutzt werden kann, schwerpunktmäßig aber rein elektrisch gefahren wird.

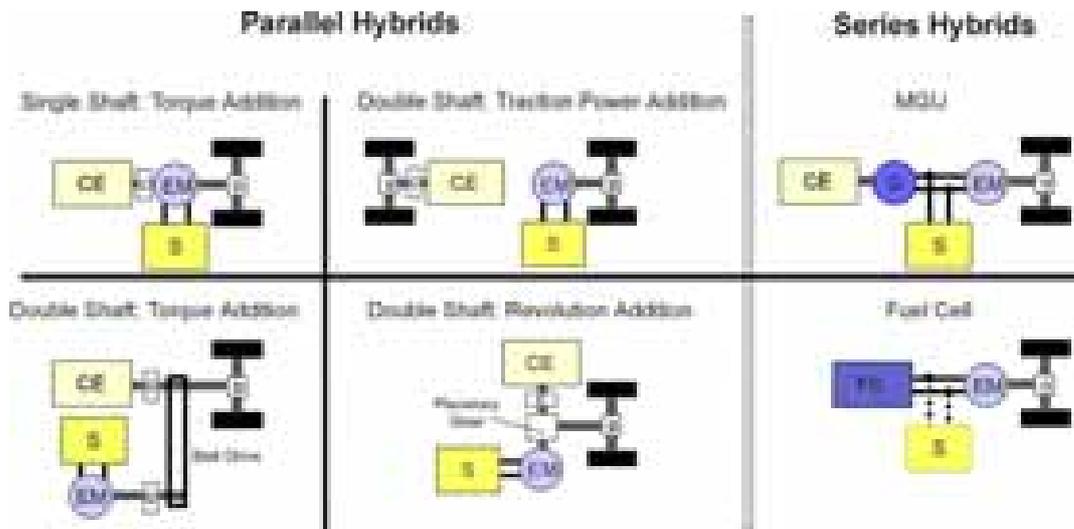


Abbildung 13: Strukturen von hybriden Fahrzeugantrieben, entnommen aus [46]

Autarke Hybride nutzen keine Netzenergie. Durch die Kombination von Verbrennungsmotor und Elektromaschine wird hier versucht, den Motor besser auszunutzen. Der Ansatz dazu findet sich in den Wirkungsgradkennfeldern des Motors, wie sie in **Abb. (12)** für einen turboaufgeladenen DI-Dieselmotor dargestellt sind. Aufgetragen sind in der linken Hälfte die Muschelkurven des Kraftstoffesinsatzes in [g Diesel / kWh] für alle Betriebspunkte. Im Bestpunkt, knapp unter 2000 1/min werden unter 200 g Diesel für die Erzeugung einer kWh mechanischer Energie an der Kurbelwelle benötigt, entsprechend über 43% Wirkungsgrad. In einem weiten Bereich des Kennfelds oberhalb 50 Nm ist der Kraftstoffesinsatz ebenfalls nicht schlechter als 300 g / kWh, darunter steigt er deutlich an. Die außerdem in der linken Hälfte eingezeichnete Linie des optimalen Kraftstoffesinsatzes (Optimallinie) verbindet die Punkte im Kennfeld, bei denen eine gewünschte Leistung jeweils optimal abgegeben werden kann.

Hybride optimieren den Motoreinsatz einerseits, indem versucht wird, die Betriebspunkte des Motors nach links oben zu kleinen Drehzahlen und hohen Momenten zu verlagern. Andererseits muß auch bei optimalem Motorbetrieb der extreme Teillastbereich gemieden werden. Dazu ist in der rechten Hälfte von **Abb. (12)** der Wirkungsgrad des Motors auf der Optimallinie als Funktion der Leistung dargestellt, sowie qualitativ die Häufigkeitsverteilung der vom Antrieb geforderten Beschleunigungsleistung im ftp-75 Testzyklus für ein Fahrzeug mit 1500 kg Testgewicht. Selbst auf der Optimallinie knickt der Wirkungsgrad etwa unterhalb 8 kW geforderter Leistung stark ab, wobei gerade Leistungen in diesem Bereich besonders häufig gefordert werden. Wenn der Verbrennungsmotor hier durch die Elektromaschine ersetzt werden kann, können diese Betriebspunkte, zeitlich versetzt durch Nutzung des Batteriespeichers, ebenfalls zu Punkten höherer Motorausnutzung verlagert werden.

Je nach Aufwand und Zielsetzung der Hybridisierung ergeben sich dann die unterschiedlichen, in **Abb. (13)** dargestellten Systemkonfigurationen [136].

3.6.1 Parallelhybride

Als Parallelhybride im engeren Sinn werden Fahrzeuge bezeichnet, die neben dem Verbrennungsmotor noch eine E-Maschine für den Traktionsantrieb nutzen. Eine Reihe von grundsätzlichen Varianten ist dabei möglich:

- Zugkraftaddition (Abb. (13), Mitte oben)

Zusätzlich zum unverändert gebliebenen Standardantriebsstrang wird die zweite Fahrzeugachse über eine Elektromaschine angetrieben. Verbrennungsmotor mit Schaltgetriebe und Elektromaschine werden hier mit der gleichen Drehzahlspitzung betrieben, die Momente können unterschiedlich sein. Wenn die Elektromaschine nur auf die Hinterachse wirkt, kann sich der Anteil der rekuperierbaren Energie verringern. Ausgeführt wurde das Konzept im Audi Duo [120],[121].

- Momentenaddition (Abb. (13), links oben/unten)

Die Elektromaschine wird so montiert, daß die Momente beider Maschinen über die gleiche Antriebswelle auf die Räder übertragen werden. Die Elektromaschine kann dabei vor, nach oder auf einer separaten Welle des Getriebes angeordnet sein. Bei auf der Getriebeingangswelle montierter E-Maschine entspricht die Drehzahlspitzung der E-Maschine der des Verbrennungsmotors, bei abtriebsseitig montierter Maschine der Geschwindigkeitsspitze. Entsprechende Fahrzeuge wurden in Deutschland häufig realisiert, z.B. schon in den 80er Jahren als KSG-System bei Volkswagen [122],[123],[124] oder bei DaimlerChrysler [125].

- Drehzahladdition (Abb. (13), Mitte unten)

Die Drehzahlen und Momente der beiden Maschinen werden über ein Planeten- oder ein Differentialgetriebe addiert. Stellgröße der E-Maschine ist hier die für die gewünschte Fahrzeuggeschwindigkeit benötigte Drehzahl, das Moment steht in einem festen Verhältnis zu den beteiligten Momenten.

Die Elektromaschine wird wechselweise als Generator und als Motor betrieben und aus einer Batterie gespeist. Wenn der Verbrennungsmotor unabhängig von der Elektrotraktionsmaschine über eine zweite Maschine, z.B. einen konventionellen Starter, gestartet werden kann, ist auch ein rein elektrischer Fahrbetrieb mit bedarfsweise automatisch zugeschaltetem Verbrennungsmotor möglich, andernfalls nur die Lastpunktverschiebung bei laufendem Motor und der Start-Stop-Betrieb.

Die Auslegung der E-Maschine muß so erfolgen, daß ein Maximum an Energie rekuperiert werden kann und der Verbrennungsmotor in Bereichen extremer Teillast, bei schlechten Wirkungsgraden stillgelegt werden kann. Würde z.B. der Motor in den Diagrammen in Abb. (12) durch eine Elektromaschine in Momentenaddition ergänzt, die für etwa 8 kW Leistung bei einer Nenndrehzahl von 500 1/min entsprechend den SGS-Systemen ausgelegt sein müßte, könnte diese Maschine den gesamten Bereich der besonders ungünstigen Kraftstoffeinsätze abdecken. Die Rekuperationsmöglichkeiten sind mit 8 kW aber noch recht begrenzt.

Außer der Teillastvermeidung durch reinen Elektrobetrieb kann versucht werden, die Betriebspunkte in Richtung der Optimalline zu verschieben. Vollständig gelingt das nur mit einem stufenlosen Getriebe wie das z.B. beim „Autarken Hybrid“ der TU München realisiert wird [126]-[130]. Auch beim Toyota Prius ist diese Zielvorgabe über ein Planetengetriebe mit Leistungsverzweigung realisiert [131],[132]. Parallelhybride mit Schaltgetriebe nähern sich dem an, indem die als Generator betriebene Elektromaschine für eine Lastpunktanhebung im Motor sorgt.

Während Hybride früher typischerweise mit Netzladung ausgeführt wurden, werden sie inzwischen in vielen Fällen autark ausgeführt [133], d.h. die Batterie wird hier im laufenden Fahrbetrieb über den Verbrennungsmotor geladen. Die Entscheidung, wann elektrisch gefahren wird, und wann zur Lastanhebung und Batteriepflege geladen wird, ist Aufgabe des Energiemanagements.

Über das Verbrauchspotential liegen keine verlässlichen Zahlen vor. Der Verbrauch des Toyota Prius wird mit 5,1 l/100 km im NEFZ angegeben, das entspricht einem Golf TDi, liegt aber um 25% unter dem Zyklusverbrauch eines Golf mit 55 kW Benzinmotor. Für einen hybridisierten Smart wird eine Verbrauchseinsparung von 13% gegenüber dem Seriidiesel angegeben [134]. Ähnliche Abschätzungen bis um die 20% finden sich in [135]-[138].

3.6.2 Serienhybride

Serienhybride (Abb. (13), rechts oben) nutzen ausschließlich eine oder mehrere Elektromaschinen als Traktionsantrieb. Die elektrische Energie wird von einer mit einem zusätzlichen Energiespeicher, z.B. einer Batterie, gekoppelten Motor-Generator-Einheit bereit gestellt. Durch die bei Serienhybriden zwangsläufig größeren Elektromaschinen stellen sowohl hinsichtlich der möglichen Nutzbremmung als auch hinsichtlich des rein elektrischen Betriebs lediglich die Leistungsfähigkeit und der Energieinhalt des Speichers die Grenzen dar.

Antriebe bei denen die Batterie nicht für Traktionszwecke eingesetzt werden, werden „dieselelektisch“³⁵ betrieben [139].

Aufgrund des rein elektrischen Antriebs eignen sich als Energiewandler auch Maschinen, die sonst aufgrund eines unangepassten Betriebsverhaltens für den Traktionseinsatz in Pkws nicht in Frage kommen. Es sind dies APUs³⁶ mit Gasturbinen, die z.B. von Volvo getestet werden [140], auch Stirlingmaschinen werden erwogen. Gegenüber Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung zeichnen sie sich durch minimale Emissionen und Vielstofffähigkeit aus, die Effizienz reicht aber noch nicht an Otto- oder Dieselmotoren heran.

Auch Serienhybride können als Range-Extender mit Netzladung oder autark ausgeführt werden. Aufgrund der völligen Entkopplung von Verbrennungsmotor und Antrieb kann der Betrieb des Motors sowohl hinsichtlich der Emissionen als auch unter dem Kriterium der Effizienz optimiert werden [141]. Genutzt wird dabei die Teillastvermeidung und, durch die inhärente stufenlose Untersetzung („elektrisches Getriebe“), der Betrieb auf der Optimallinie. Wie beim Parallelhybrid ist es die Aufgabe des Energiemanagements, die jeweilige Leistungsverteilung auf Speicher und MGU zu ermitteln.

³⁵Die Bezeichnung ist angelehnt an die dieselelektrischen Antriebe im Bahnbereich.

³⁶APU: Auxiliary Power Unit

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein kostenoptimierter Ansatz für ein Energiemanagement vorgestellt, der zwar nicht auf eine Hybridstruktur beschränkt ist, hier allerdings an einem Serienhybrid evaluiert wurde.

3.6.3 Mischhybride

Mischhybride sind strukturumschaltbar zwischen einer Serienanordnung mit MGU und Elektrotraktion bzw. einer Parallelstruktur mit direktem Durchgriff des Verbrennungsmotors auf die Räder. Wie beim Serienhybrid werden zwei Elektromaschinen, eine als Generator am Verbrennungsmotor und eine als Fahrmotor, benötigt. Aufgrund der Möglichkeit höhere Leistungen direkt mechanisch zu übertragen, können beide Maschinen allerdings deutlich kleiner ausgeführt werden. Der Betrieb gliedert sich dabei in drei Bereiche:

- Während des Anfahrvorgangs und bei schwachen Lasten wird über den Speicher rein elektrisch gefahren, der Verbrennungsmotor steht (Teillastvermeidung).
- Im oberen Teillastbereich läuft der Verbrennungsmotor, treibt aber nur den Generator an. Durch das elektrische Getriebe kann der Motor auf der Optimalline gefahren werden.
- Bei höheren Lasten wird der Verbrennungsmotor mit dem Fahrantrieb synchronisiert und verbunden. Die Elektromaschinen werden hier allenfalls zur Steigerung der Dynamik benötigt.

Bei einer geeigneten Auslegung der beteiligten Maschinen kann hier auf ein Schaltgetriebe verzichtet werden, auch aufwendige mechanische Lösungen wie das i^2 -Getriebe beim Münchner Autarken Hybrid sind nicht nötig, ein einstufiges CVT-Getriebe kann die Anpassung der Verbrennungsmaschine verbessern. Mischhybride erschließen damit das volle Verbrauchspotential der Hybridisierung, ohne die Nachteile der vorgenannten Strukturen in Kauf nehmen zu müssen [142],[143].

3.6.4 Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellen erzeugen elektrische Energie über die katalytische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasserdampf. Der Wasserstoff wird dabei an der Anode ionisiert. Während die verbleibenden Protonen über den Elektrolyten zur Kathodenseite gelangen, können die an der Reaktion beteiligten Elektronen der Wasserstoffatome über einen externen Stromkreis geführt werden. Das theoretische Potential einer Brennstoffzelle entspricht dem Potential der Sauerstoff - Elementarzelle, wird aber durch parasitäre Verluste, z.B. durch nicht ideale Reaktanden, begrenzt. Weitere Verluste entstehen bei Belastung. Brennstoffzellen sind hinsichtlich des Wirkungsgrades nicht den Beschränkungen des thermodynamischen Kreisprozesses unterworfen und erreichen als Einzelzellen selbst mit Luft betriebenen Wirkungsgrade über 60%. In ihrem Wirkungsgradverhalten ähnelt die Brennstoffzelle damit einer Batterie mit maximalem Wirkungsgrad bei Leerlauf.

Ähnlich wie Batterien müssen auch Brennstoffzellen aufgrund der geringen Spannung der Einzelzelle in Serie geschaltet werden, um sie technisch nutzen zu können. Die verschiedenen

Brennstoffzellentechnologien unterscheiden sich in der Wahl des Elektrolyten, der damit auch die Betriebsbedingungen bestimmt.

Zur Steigerung der Leistungsdichte werden Brennstoffzellen mit Überdruck betrieben. Insbesondere die Luft muß dazu extern verdichtet werden. Der Energieaufwand für die elektrisch anzutreibenden Nebenaggregate beträgt bei Systemen mit Kompressor bis zu 25% im Mittel. Im extremen Teillastbereich ergibt sich für das Brennstoffzellensystem inklusive der Nebenaggregate dadurch wieder ein starker Einbruch des Wirkungsgrades bis auf 0, da selbst ohne Energieabnahme an den Klemmen die Nebenverbraucher betrieben werden müssen. Trotzdem wird das Wirkungsgradmaximum bei deutlich kleineren Leistungen erreicht als bei Hubkolbenmotoren.

In der Raumfahrt wurde für das Gemini- und Apolloprogramm die alkalische Brennstoffzelle als Lieferant von elektrischer Energie verwendet. Diese arbeitet zwar nur mit reinem Sauerstoff, da dieser für die Raketentriebwerke aber ohnehin zur Verfügung stand, konnte damit der hohe Wirkungsgrad dieser Zellen ohne Mehraufwand genutzt werden.

Für den Straßenverkehr wurden bereits in den 60er Jahren alkaline Brennstoffzellen von K. Kordesch für ein Kleinkraftrad mit Hydrazin als Treibstoff bzw. einen Austin mit Wasserstoffdrucktanks auf dem Dach verwendet [144].

In den 90er Jahren wurden Brennstoffzellen von der Daimler Forschung wieder aufgegriffen. Zusammen mit der kanadischen Firma Ballard wurden sie mit Kunststoffmembran (PEM) als Elektrolyt für den Einsatz im Fahrzeug weiterentwickelt und in Test- und Demonstrationsfahrzeugen erprobt [145]. Der Traktionsantrieb erfolgt dabei rein elektrisch. Ford beteiligt sich mittlerweile an der Kooperation, GM entwickelt im GAPC³⁷ selbst Brennstoffzellen [146]. Außerdem haben viele Fahrzeughersteller inzwischen Testfahrzeuge auf Basis von Ballard Stacks realisiert [147].

Die PEM Zellen können mit Wasserstoff und Luft als Reaktionspartner betrieben werden. Die Dynamik der Zellen reicht für die Anforderungen des Straßenverkehrs aus. Fahrzeuge mit PEM-Brennstoffzelle und Wasserstofftank kommen daher ohne zusätzliche Energiespeicher zwischen dem Stack und dem Antrieb aus, womit allerdings auch das Verbrauchsminderungspotential durch Nutzbremmung entfällt. Für den Systemstart ist auch hier wie beim klassischen Antrieb eine Batterie nötig.

Die Attraktivität der Brennstoffzelle für Traktionsanwendungen liegt einerseits in der Emissionsfreiheit beim Betrieb mit Wasserstoff, andererseits im besser auf die Anforderungen des Straßenverkehrs angepaßten Wirkungsgradverhalten mit hohem Wirkungsgrad schon im Bereich kleiner Leistungen. Der Hauptnachteil liegt in der Begrenzung auf Wasserstoff als Energieträger bei bisherigen PEM-Zellen. Zwar kann aufgrund des gegenüber dem Motorbetrieb gestiegenen mittleren Wirkungsgrads die mitgeführte Menge Wasserstoff gegenüber den in der Tabelle (3) auf Seite 31 angegebenen Werten um ca. 30% reduziert werden, das Tankproblem und die Probleme der nötigen Infrastruktur sind damit aber noch nicht gelöst.³⁸

³⁷GAPC: Global Alternative Propulsion Center

³⁸Weitere Probleme bereitet die Kühlung der Systeme im Betrieb, da die Abwärme auf niedrigerem Temperaturniveau anfällt als bei Verbrennungsmaschinen und daher größere Kühler als bisher vorhanden vorgesehen werden müssen [148] und zudem die Kühlung über den Abgasstrom deutlich geringer ausfällt als bei Verbrennungsmaschinen.

Wie bereits bei Kordesch mit Hydrazin wird daher versucht, mit Methanol auf einen bei Raumtemperatur flüssigen, drucklos speicherbaren Treibstoff zurückzugreifen. Methanol wird dabei über einen Reformier an Bord zu Wasserstoff aufbereitet [149]. Alternativ werden Brennstoffzellen entwickelt, die Methanol direkt einsetzen können [150]. Gegenüber wasserstoffbasierten Zellen müssen hier ein Verlust im Wirkungsgrad sowie CO_2 -Emissionen hingenommen werden. Für den Traktionsbereich kommt erschwerend hinzu, daß Reformier vor dem Start im Minutenbereich vorkonditioniert werden müssen und bei dynamischer Beanspruchung deutliche Einbußen im Wirkungsgrad zur Folge haben [151],[152].

Für Brennstoffzellenfahrzeuge auf Methanolbasis bietet sich daher eine Hybridisierung entsprechend der Struktur eines Serienhybrids an. Die Teillastvermeidung kann dabei nur genutzt werden, wenn die Systeme nach dem ersten Start ähnlich schnell an- und wieder abgefahren werden können wie Verbrennungsmotoren. Die Aufgaben des Speichers liegen daher stärker in der Nutzung der bei Bremsvorgängen rekuperierten Energie und der Übernahme von dynamischen Spitzen.

Trotz der bis zum Serieneinsatz noch zu lösenden Probleme hat die Brennstoffzellentechnologie, auf Wasserstoff- oder Methanolbasis, ihre Eignung für den Traktionsbereich unter Beweis gestellt und das Forschungsstadium verlassen [153]. Entscheidend für den Einsatz und den Absatz werden ähnlich wie bei den anderen alternativen Antrieben die für den Kunden damit verbundenen Aufwendungen sein. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Betriebskosten als auch hinsichtlich der freizügigen Benutzbarkeit. In einer vergleichenden Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen kommen F. Gossen und M. Grahl auch unter Berücksichtigung der Infrastrukturkosten zu der Einschätzung, daß ein wirtschaftlicher Betrieb am ehesten für direkt mit Wasserstoff betriebenen Zellen zu erreichen sein wird [138]. Das deckt sich mit den Kraftstoffzielen der VES (siehe Seite 29).

3.7 Perspektiven

In den vorhergehenden Abschnitten dieses Kapitels wurden die vorhandenen Antriebstechnologien hinsichtlich der damit noch erreichbaren Verbrauchseinsparungen und Emissionsreduktionen untersucht.

Über jeden der Faktoren der Gleichungen für den Energiebedarf (6) oder den Motorwirkungsgrad (5) kann versucht werden, den Verbrauch von Fahrzeugen weiter zu reduzieren. Ottomotoren können dabei zum Teil im Bestpunkt, hauptsächlich aber durch reduzierte Drosselverluste im Teillastbereich deutlich verbessert werden. Insbesondere variable Ventilsteuerungen sind dabei sehr attraktiv, da die Drosselklappe entfallen kann und gleichzeitig sehr gute Emissionswerte erreicht werden, eine eindeutige Entwicklungsrichtung kann jedoch nicht abgesehen werden [154]. Bei Dieselmotoren bleibt zur Verbrauchsverbesserung nur noch der Übergang zu kleineren, hoch aufgeladenen Motoren.

Verbessert wird durch die motorischen Maßnahmen einerseits die Ausnutzung der Motoren, andererseits wird der in Abb. (12) aufgetragene Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich angehoben. Der prinzipbedingte Einbruch des Wirkungsgrads bei sehr kleinen Leistungen kann ebenso wie bei hoch ausgenutzten Brennstoffzellen nicht verhindert werden.

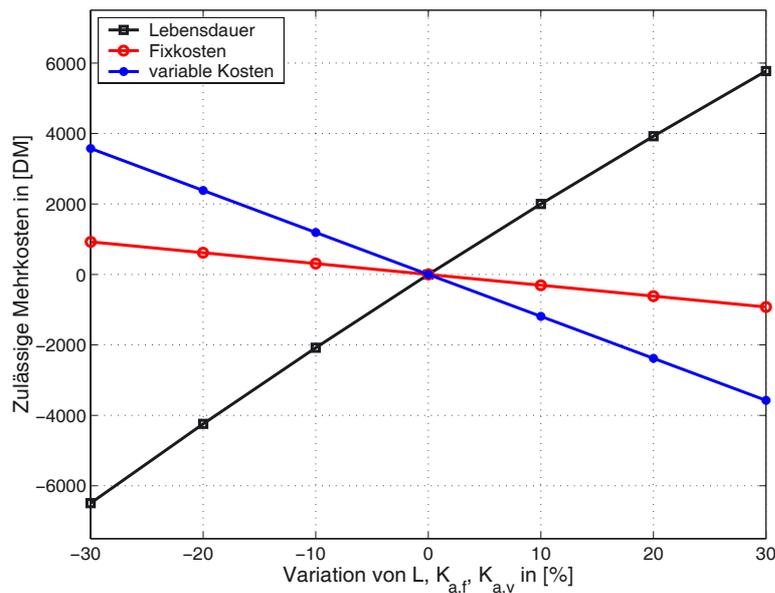


Abbildung 14: Zulässige Mehrkosten für das Fahrzeug in Abhängigkeit von der Lebensdauer (gegenüber 10 Jahren), den jährlichen Fixkosten aus Steuer, Versicherung und Wartung (gegenüber 2080 DM/a) und den variablen Kosten gegenüber 18.000 km/Jahr bei 5,1 l/100km und 1,60 DM/l.

Hier setzen optimierte Antriebsstränge über den Start-Stop-Betrieb und die Hybridisierung an. Diese können zwar nicht den schlechten Teillastwirkungsgrad der Motoren beheben, es wird aber vermieden, den Motor dort zu betreiben. Die Hybridisierung ist daher das einzige Konzept mit der Möglichkeit, den Widerspruch zwischen schlechtem Teillastverhalten des Motors und häufigen Leistungsanforderungen gerade in diesem Leistungsbereich aufzulösen. Der Grad der Hybridisierung, also der Anteil des Speichers an den Traktionsleistungen muß dabei über das Energiemanagement sorgfältig optimiert werden, da es sonst leicht zu den bei früheren Testfahrzeugen beobachteten Verschlechterungen des Verbrauchs kommen kann. Ansätze dazu werden in Kapitel 4 bei der Auslegung der Komponenten für einen Serienhybrid und in Kapitel 7 bei der Darstellung des kostenbasierten Energiemanagements dargestellt.

Entscheidend für die Akzeptanz beim Kunden jeder der betrachteten Technologien, seien es Verbesserungen an den Motoren, optimierte Antriebsstränge oder neue Antriebstechnologien, ist aber ihre Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit den anderen verfügbaren Technologien [155]. Wie am Absatz von Dieselfahrzeugen erkennbar, werden von den Kunden dabei sehr genau die gesamten Betriebskosten der Fahrzeuge unter Beachtung ihrer individuellen Einsatzbedingungen betrachtet, da Dieselfahrzeuge zwar in der Anschaffung und in Deutschland in der Besteuerung teurer sind als Fahrzeuge mit Ottomotor, aufgrund des niedrigeren Verbrauchs und der niedrigeren Kraftstoffkosten bei höheren Fahrleistungen trotzdem günstiger sein können [156]. In die Betrachtung gehen auch gesetzliche Restriktionen durch Emissionsgesetzgebung ein, die in Europa absehbar keine Verpflichtung zu emissionsfreien Fahrzeugen auferlegt, Emissionen aber steuerlich bestraft.

Die aus Sicht eines Halters zulässigen Mehrkosten können objektiv über die jährliche Kostenbelastung durch das Fahrzeug ermittelt werden. Die Kosten setzen sich zusammen aus der Annuität der einmaligen Kosten für Anschaffung und Entsorgung A_H , den jährlichen festen Kosten

\dot{K}_f für Steuer, Versicherung und Wartung sowie den variablen Kosten \dot{K}_v aus dem Betrieb des Fahrzeugs. Die Gesamtbelastung errechnet sich zu:

$$\dot{K} = r_L (K_0 + K_E) + \dot{K}_v + \dot{K}_f \quad (11)$$

mit den Anteilen

- K_0, K_E : Kaufpreis und Entsorgungskosten
- $K_f = \text{Steuer} + \text{Versicherung} + \text{Wartung}$
- $K_v = \underbrace{\text{Kraftstoffpreis}}_{k_K} * \underbrace{\text{Verbrauch}}_v * \underbrace{\text{Jahreslaufleistung}}_S$

und dem Annuitätsfaktor r_L ³⁹.

Jede Investition in aufwendigere Technik rechnet sich dann nur, wenn dadurch über die Lebensdauer in entsprechendem Umfang Betriebskosten eingespart werden können. Die z.B. im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug der Kompaktklasse zulässigen Mehrkosten sind für ein Beispiel in **Abb. (14)** aufgetragen. Wenn z.B. durch eine neue Technologie der Verbrauch um 20% reduziert werden kann, der Kraftstoffpreis und die Fahrleistung dabei aber gleich bleiben, kann ein Aufpreis von etwa 2300 DM gerechtfertigt werden.

Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt eine sehr detaillierte Untersuchung der TU München zu den Energieaufwendungen in der gesamten Lebenszeit eines Pkws [157]. Für ein Fahrzeug mit Ottomotor macht demnach bei 10 Jahren Nutzungsdauer der Energieaufwand durch den Betrieb 71%, der Aufwand für die Herstellung 13% aus, der Rest entfällt auf Wartung und Infrastruktur.

³⁹

$r_L = \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1}$ mit L = Lebensdauer in Jahren

4 Der serielle Hybridantrieb

Hybride Fahrzeugantriebe kombinieren die positiven Eigenschaften des Elektroantriebs, wie gute Regelbarkeit und vergleichsweise gute Teillasteigenschaften, mit der hohen Energiedichte kohlenwasserstoffbasierter Energieträger.

- Parallelhybride behalten den konventionellen Antriebsstrang weitestgehend bei. Mindestens eine Elektromaschine und ein Speicher für Traktionsanwendungen werden ergänzt. Im einfachsten Fall eines Konversionsfahrzeugs wirkt die zusätzliche Maschine als separate Einheit z.B. nur auf die auf die bisher nicht angetriebene Hinterachse.
- Mischhybride werden je nach Fahranforderung als Serien-, wie auch als Parallelhybride betrieben. Gegenüber Parallelhybriden können sie das volle Verbrauchs- und Emissionspotential der Hybridisierung nutzen, wie bei Parallelhybriden liegt der Schwerpunkt der Entwicklung hauptsächlich auf der Komponentenauswahl und -entwicklung sowie dem mechanischen Zusammenspiel.
- Serienhybride nutzen ebenfalls das volle Potential der Hybridisierung. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt hier einerseits auf der Komponentenentwicklung, andererseits auf dem Systemmanagement. Die Komponenten sind baulich entkoppelt und können gut variiert werden. Serienhybride bieten sich daher an für systemorientierte Betrachtungen zum Zusammenspiel der Komponenten Speicher und Antriebe. Zusätzlich können ausschließlich Serienhybride auf eine breite Palette von Primärwandlern, von den üblichen Hubkolbenmotoren bis hin zu unterschiedlichsten Formen von Brennstoffzellen, zurückgreifen.

Wie in Kapitel 2 dargestellt hat der Straßenverkehr einen deutlichen Anteil sowohl am Energieverbrauch, als auch an den energienutzungsbedingten Emissionen. Die Einflußgrößen auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen und die Ansätze den Energiebedarf und die Emissionen von Kraftfahrzeugen zu reduzieren wurden in Kapitel 3 zusammengefaßt. Für grundsätzliche Untersuchungen zum Verbrauchs- und Emissionspotential von PKW Antrieben bieten hybride Antriebe die meisten Freiheitsgrade. In der Abteilung Energiewandlung und -speicherung  der Universität Ulm wurde daher auf Basis dieser Überlegungen eine serielle Hybridstruktur als Topologie für systemorientierte Untersuchung des Systems Fahrzeugantrieb ausgewählt und sowohl als 1:1 Laborprüfstand als auch in verschiedenen skalierbaren Simulationswerkzeugen abgebildet.

Während die dazu im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Simulationswerkzeuge lediglich in der Struktur des Antriebs auf serielle Anordnungen fixiert sind, mußte für den Prüfstand eine konkrete Auswahl von Antriebskomponenten sowohl hinsichtlich der verwendeten Technologie als auch in Bezug auf die Dimensionierung gefunden werden. Die zu diesem Zeitpunkt publizierten Konzepte, aber auch die als konkrete Fahrzeuge realisierten Varianten, wie sie z.B. am Electric Vehicle Symposium gezeigt werden, waren diesbezüglich wenig geeignet. Im europäischen Raum waren hauptsächlich reine Elektrofahrzeuge oder sehr einfache Hybride vorgestellt worden. Für den nordamerikanischen Markt waren zwar auch Serienhybride entwickelt worden, typischerweise aber als Range Extender. Autarke Hybride mit allenfalls begrenzter

rein elektrischer Reichweite, wie sie für den europäischen Markt zielführend sind, waren bis dato vor allem als Parallelhybride vorgestellt worden.

Bevor in den folgenden Kapiteln die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte dynamische Simulation, das Energiemanagement und der Laborprüfstand für den Triebstrang vorgestellt werden, wird hier daher zunächst ein Überblick über die in Serienhybriden notwendigen Komponenten gegeben und, soweit hier schon möglich, Auslegungskriterien dargestellt. Das Kapitel schließt ab mit einer Beschreibung des Systems, das als Grundlage für die Untersuchungen dieser Arbeit ausgewählt wurde.

4.1 Komponenten

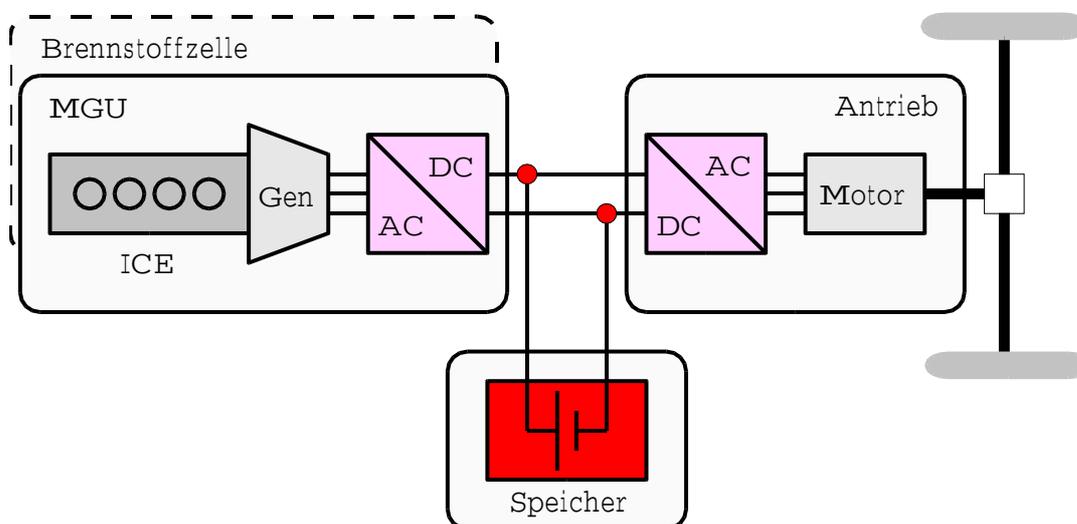


Abbildung 15: Grundstruktur eines seriellen Hybridantriebs mit Motor-Generator-Einheit – alternativ auch mit Brennstoffzelle –, Speicher und Traktionsantrieb, verbunden über einen Gleichspannungszwischenkreis.

Die Grundstruktur eines seriellen Hybridantriebs ist in **Abb. (15)** dargestellt. Der Traktionsantrieb, dargestellt mit einem Zentralmotor und Differentialgetriebe auf der rechten Seite, ist über eine oder mehrere Elektromaschinen ausgeführt. Der Antrieb kann dabei - wie gezeichnet - über einen Zentralmotor mit Differential oder getrennt für jedes angetriebene Rad erfolgen. Die Motor-Generator-Einheit auf der linken Seite liefert die benötigte elektrische Energie. Der Speicher im mittleren Bereich stützt die Systemspannung, liefert Energie im rein elektrischen Betrieb und nimmt die Energie von Nutzbremse auf. Varianten sind Antriebe mit mehreren Speichern, die mit jeweils unterschiedlicher Dynamik in den Antrieb eingebunden werden. Entsprechende Ansätze zur Hybridisierung finden sich vor allem in Elektrofahrzeugen [158],[159]. Verbunden sind die Komponenten über einen Gleichspannungszwischenkreis.

Nicht dargestellt sind weitere Komponenten, wie ein DC/DC-Steller für die Versorgung der Verbraucher im Bordnetz, die in das Antriebssystem zu integrierende Bremse und eventuell elektrisch betriebene Aggregate wie die Servolenkung. Nicht dargestellt ist auch die Regler- und Steuerungsstruktur.

4.1.1 Zwischenkreis

Alle drei in Abb. (15) dargestellten Bereiche sind über den Zwischenkreis verbunden. Die Anordnung ähnelt der von gruppierten Servoantrieben im Industriebereich. Die Definition der Zwischenkreisspannung stellt die Schnittstellendefinition für die angeschlossenen Einheiten dar. Für Testaufbauten wird die Wahl der Spannung von den verfügbaren Komponenten vorgegeben.

Die Anforderungen an die Systemspannung im Antrieb sind widersprüchlich, Kriterien sind die Klemmenspannung des verwendeten Speichers und die Spannungslage der Leistungselektronik.

Angesichts der Speicherverluste wird beim Serienhybrid der weit überwiegende Teil der Energie quasi „dieselelektrisch“ von der MGU zum Antrieb geliefert. In Abhängigkeit von den Systemleistungen reduzieren höhere Spannungen dabei tendenziell die Verluste in den Wechselrichtern. Zwar sind die Schaltverluste nur von der Schaltfrequenz und der geschalteten Leistung abhängig, die Durchlaßverluste hängen aber vom Laststrom und der Sättigungsspannung der beteiligten Halbleiter ab und sind daher proportional zu $1/U$. Angesichts der mindestens je 6 Leistungsschalter zuzüglich Freilaufdioden in den Wechselrichtern in Abb. (15) steigt die Effizienz der Wechselrichter mit der Spannung. Für die Motoren gilt ähnliches [160],[161]⁴⁰.

Beim Speicher hängt die Spannungslage von der Technologie ab. Schwungräder werden wieder über Wechselrichter angetrieben und profitieren von einer hohen Spannung. Die Spannung an Supercaps schwankt je nach Energieinhalt im Betrieb stark, zusätzlich müssen, ebenso wie bei Batterien, für hohe Spannungen viele Einzelzellen in Reihe geschaltet werden. Aufgrund von Unsymmetrien in der Ladungsakzeptanz werden Supercaps und Batterien daher bevorzugt für niedrigere Spannungsniveaus ausgelegt.

Entkoppelt werden kann die Systemspannung von der Batteriespannung über einen bidirektionalen DC/DC-Steller [162]. Supercaps können nur über einen DC-Steller eingebunden werden. Der DC-Steller verursacht als zusätzliche Komponente zwar Kosten und Verluste, ermöglicht es aber, die Systemspannung und die Batteriespannung zu entkoppeln und separat zu optimieren.

4.1.2 Traktionsmaschine

Während früher für Traktionsaufgaben in Fahrzeugen hauptsächlich Gleichstrommaschinen eingesetzt wurden, haben sich mittlerweile dank der Fortschritte der Antriebstechnik durch abschaltbare Leistungshalbleiter und μ -Controller wartungsfreie Drehfeldmaschinen durchgesetzt [163].

Eingesetzt werden Brushless-DC-Maschinen (BLDC), Permanentmagnet erregte Synchronmaschinen (PSM), Asynchronmaschinen (ASM) und geschaltete Reluktanzmaschinen (SRL). Durch optimierte Ansteuerung und Auslegung werden mit allen Maschinentypen gute Wirkungsgrade erreicht⁴¹.

⁴⁰In [161] werden Antriebe für 300V, 600V und 900V verglichen. Durch eine höhere Systemspannung kann hier im Teillastbereich der Wirkungsgrad um bis zu 10 Prozent Punkte gesteigert werden. Das Optimum für hohe Lasten lag bei 600V.

⁴¹Hodkinson stellt in [164] eine BLDC mit Wirkungsgraden bis zu 96% vor, UQM bietet BLDC-Antriebe mit bis zu 94% Systemwirkungsgrad [165], Mannesmann Sachs hat die PSM für Traktionsantriebe optimiert und bietet

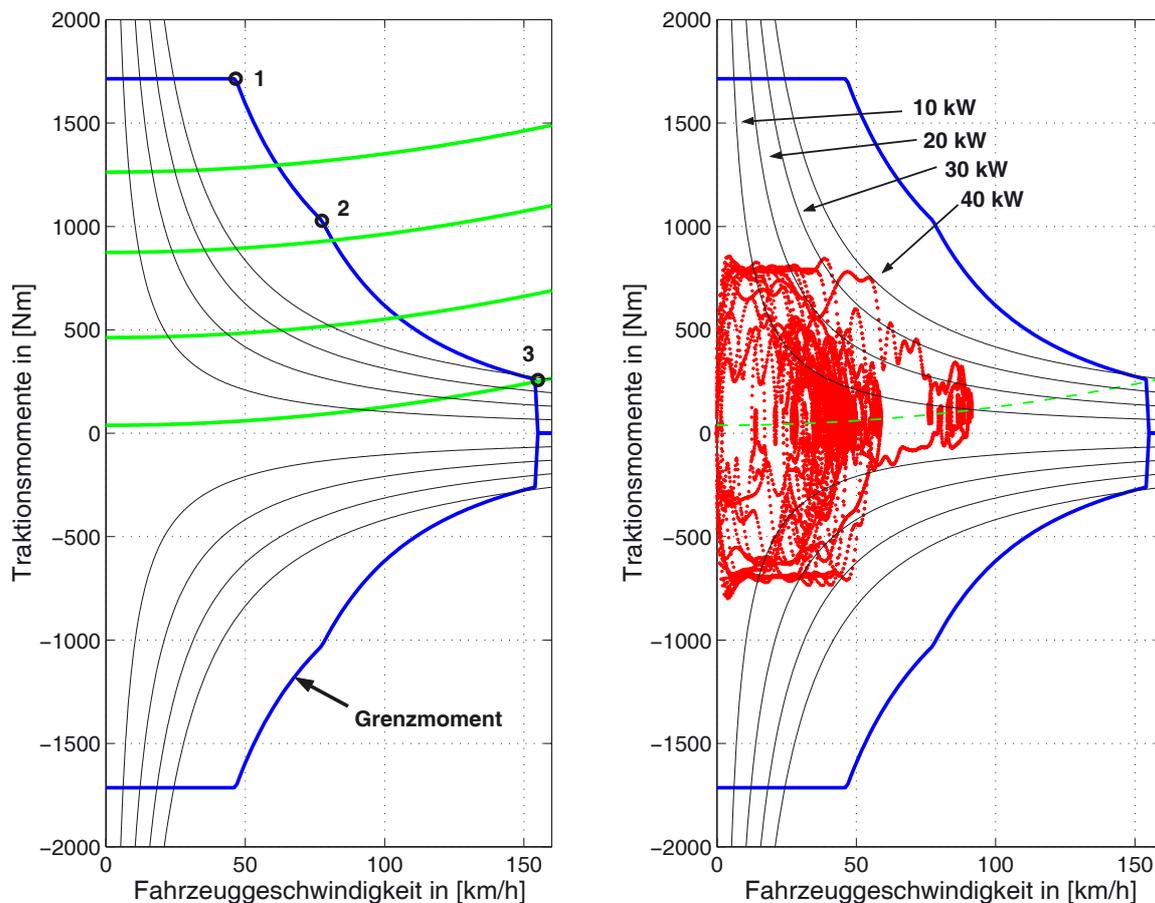


Abbildung 16: Statische und dynamische Motorauslegung. Aufgetragen ist links die Momentenkennlinie einer hoch ausgenutzten Asynchronmaschine, die Kennlinien der Fahrzeuglast bei 0%, 10%, 20% und 30% Steigung sowie die Hyperbeln konstanter Leistung bei 10 kW bis 40 kW. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit liegt bei 150 km/h. Rechts sind die Betriebspunkte für das Standardfahrzeug im ftp-75-Zyklus dargestellt. Mit 1500 kg Testgewicht werden maximal 40 kW benötigt.

Bei feldorientiert betriebenen ASM wird der Wirkungsgrad im Teillastbereich deutlich gesteigert, wenn dort das Feld nicht konstant gelassen, sondern an den Betriebspunkt angepaßt wird [170],[171],[172].

Permanenterregte Synchronmaschinen (PSM) können mit der gleichen Elektronik angesteuert werden wie ASM. Tendenziell weisen sie über den im Grunddrehzahlbereich entfallenden Feldstrom dort günstigere Wirkungsgrade auf. Im Feldschwächbereich relativiert sich der Vorteil durch die dort zur Feldschwächung notwendige Stromkomponente.

SRL-Maschinen können mit großem Feldschwächbereich betrieben werden und sind daher sehr attraktiv [173]. Dies gilt ebenso aufgrund des einfachen Motoraufbaus. Für eine hohe Ausnutzung müssen die mindestens drei Feldwicklungen getrennt bestromt und angesteuert werden. Durch den gegenüber PSM hohen Blindleistungsbedarf steigt diesen gegenüber der Aufwand in

sie sowohl als SGS-System als auch für Elektrotraktionsanwendungen mit Systemwirkungsgraden bis 92% an [166],[167], [168]. Auslegungshinweise für eine PSM finden sich z.B. bei C.C.Chan in [169].

der Leistungselektronik. Wegen der nur unipolaren Ansteuerung der mit jeweils beiden Enden herausgeführten Feldwicklungen weicht der Aufbau des Leistungsteils von dem der klassischen Drehfeldmaschinen ab. Die Maschinen sind bislang für den Traktionseinsatz nicht kommerziell verfügbar. [174].

Tatsächlich verfügbar für Fahrzeuganwendungen sind nur wenige Maschinen, da diese - anders als Motoren für Industrieanwendungen - sehr hoch ausgenutzt und gleichzeitig leicht und kompakt sein müssen. Wesentliches Kriterium ist daher die von einer Motorentechnologie erreichte Leistungsdichte (kW/l) und die spezifische Leistung (kW/kg).

Ein weiteres Kriterium für die Eignung einer Maschine für Traktionsaufgaben ist, neben Masse und Bauraum, das Verhältnis von Maximalleistung P_{max} zur Leistung im Punkt des besten Wirkungsgrades P_{opt} . Je größer dieser Effizienzfaktor, desto besser der im Fahrbetrieb sehr häufige Teillastbetrieb [175]. Da die Traktionsmaschine den höchsten Energiedurchsatz in der gesamten Kette aufweist, ist hierauf besonders zu achten.

Für die Auslegung der Traktionsmaschine werden Informationen über den vorgesehenen Betrieb benötigt⁴². Grundsätzlich erfolgt die Auslegung über die Maximalgeschwindigkeit und die notwendige Anfahrsteigfähigkeit. Die nötige Maschinenleistung sinkt deutlich, wenn Feldschwächungsfaktoren⁴³ $\frac{n_{max}}{n_N} \geq 4$ erreicht werden können [177]. Der nötige Feldschwächfaktor kann aus einem Vergleich der notwendigen Kräfte bei Maximalgeschwindigkeit (v_{max}) und bei $v \approx 0$ ermittelt werden. Dazu werden für maximale Geschwindigkeit bzw. für maximale Anfahrsteigfähigkeit benötigten Kräfte in der Bewegungsgleichung (6) ins Verhältnis gesetzt:

$$\frac{n_{max}}{n_N} = \frac{F_{Roll}(m) + F_{Steig}(m, \alpha)}{F_{Roll}(m) + F_{Wind}(v_{max}^2)} \leq \frac{m g \sin(\alpha)}{\frac{\rho}{2} c_W A v_{max}^2}. \quad (12)$$

Für die Maschinenauslegung ist dann noch die nötige Übersetzung bei gegebenem Reifenradius über einen Vergleich des maximalen Motormoments und der benötigten Kraft bei maximaler Steigung zu ermitteln.

Graphisch kann die Auslegung für eine gegebene Momentenkennlinie wie in **Abb. (16)** statisch über einen Vergleich mit der Lastkennlinie erfolgen. Die in der Ebene maximal erreichbare Geschwindigkeit liegt beim Schnittpunkt der Lastkennlinie für 0% Steigung mit der Momentenkennlinie des Motors. Die maximale Steigfähigkeit erhält man aus dem Vergleich der Motor-kennlinie mit den Lastkennlinien für $\alpha > 0$, hier aufgetragen für 10%, 20% und 30% Steigung.

Aufgrund von durch Messung oder Simulation erhaltenen Lastpunkten für das Zielfahrzeug kann dann, wie in der rechten Hälfte gezeigt, geprüft werden, ob der Motor den dynamischen

⁴²Honda ermittelt mit den in Kalifornien im Kundenbetrieb eingesetzten Elektrofahrzeugen z.B. auch Daten über die typischen Belastungen je nach Umgebung [176].

⁴³In den Ankerkreis von Gleichstrommaschinen bzw. den Ständer von Drehfeldmaschinen wird im Betrieb eine zum Betrag des Felds und der Drehzahl proportionale Gegenspannung, die Elektromotorische Kraft (EMK), induziert. Im Nennpunkt der Maschine (Punkt 1 in Abb. (16)) wird die Nennspannung benötigt, um gegen die EMK den Nennstrom einzuprägen. Um die Drehzahl über die Nennzahl hinaus zu steigern, muß das Elektromagnetische Feld durch eine geeignete Ansteuerung drehzahlproportional reduziert werden. Bei konstanter Klemmenspannung kann dann auch der Strom und damit die Leistung konstant gehalten werden. Das abgegebene Moment ist proportional zum Betrag des Felds und des momentbildenden Anteils des Stroms und nimmt dann drehzahlproportional ab. Oberhalb von Punkt 2 in Abb. (16) stellt das mit $1/n^2$ abnehmende Kippmoment der Maschine den begrenzenden Faktor dar. In diesem zweiten Feldschwächbereich sinkt dann auch die Leistung mit $1/n$.

Anforderungen im Zyklus genügt. In Abb. (16) sind dazu die Lastpunkte für das schon in Kap. 3 verwendete 1500 kg Fahrzeug im ftp-75 Zyklus aufgetragen.

Hinsichtlich der Ausführung der Leistungselektronik ist zu berücksichtigen, daß für den Fahrzeugeinsatz keine Standard-Leistungshalbleiter verwendet werden können. Stattdessen sind hier Bauelemente einzusetzen, die sowohl für die klimatischen Schwankungen als auch für die Vibrationen ausgelegt wurden [178],[179]. Als Steuerverfahren kommen die üblichen hart geschalteten Pulsmuster zum Einsatz, Soft Switching wurde hinsichtlich des erzielbaren Gewinns untersucht und gegenüber dem nötigen Aufwand als unwirtschaftlich eingestuft [180].

4.1.3 Speicher

Die Auswahl und Auslegung des Speichers für einen Hybridantrieb bewegt sich im in **Abb. (17)** dargestellten Spannungsfeld zwischen Lebensdauer, Kosten, Energiedichte und spezifischer Leistung des Speichers.

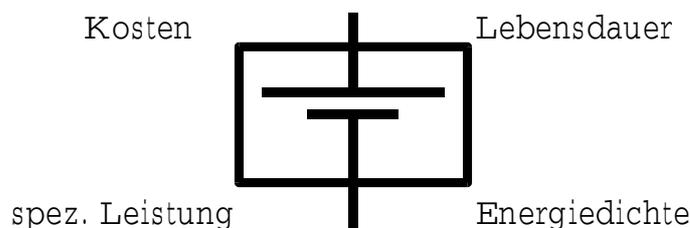


Abbildung 17: Spannungsfeld der Batterieauslegung

Die Wahl des geeigneten Speichers hängt ab vom benötigten Energieinhalt, der geforderten Maximalleistung, der Lebensdauer und vom noch vertretbaren Preis. Daten für eine Reihe von für Hybride geeigneten Batterietypen sind in **Tabelle (4)** zusammengestellt. Mit aufgeführt sind die Ziele des USABC⁴⁴ für Elektrofahrzeugbatterien, des DoE⁴⁵ für Hybridbatterien und die Daten von UltraCaps. Zu den Daten ist zu beachten, daß die bezogenen Größen z.B. für die Energiedichte und die für das Gesamtsystem angegebenen Größen für Kapazität und Spannung nicht deckungsgleich sein müssen, da z.B. für die Ermittlung der Dichten eingeschränkte Arbeitsbereiche herangezogen werden. Nicht aufgeführt sind Daten zur kalendarischen Lebensdauer, die zwar für den Pkw-Halter wesentlich, bei den meisten Batterien aber nicht angegeben ist. Die Zielgröße des DoE liegt bei 8 Jahren⁴⁶, lediglich für die ZEBRA-Batterie sind über 10 Jahre angegeben. Schwungräder für Pkws sind bisher noch Gegenstand der Forschung und daher aufgrund der unsicheren Datenlage nicht hier aufgeführt.

Der notwendige Energieinhalt und die Maximalleistung hängen vom Antriebstyp und der gewählten Betriebsstrategie ab. In Elektrofahrzeugen, Range-Extender Hybriden und Hybriden

⁴⁴USABC: United States Advanced Battery Consortium.

⁴⁵DOE: United States Federal Department of Energy.

⁴⁶Die Ziele aus dem November 2002 sehen inzwischen 15 Jahre Lebensdauer für einen Power-Assist Hybrid vor.

Typ ^a	Systemgrößen			Dichten		Lebensdauer
	[Ah]	[V]	[kg]	[Wh/kg]	[W/kg]	Zyklen @ Δ SOC
US ABC (EV)	40 kWh			150	300	> 1000 @ 80%
Zebra	32	557	195	94	169	1400 @ 100%
DoE 2002 (HEV)	k.A.	k.A.	40	27	625	>300k @ 5%
Panas. NiMH	6,5	288	44	53	500	> 5000 @ 100%
Saft NiMH	14	1,2	0,37	47	> 750	> 150k @ 5%
Varta NiMH	12	1,2	k.A.	> 40	1000	> 350k @ 5%
Saft Li-Ion	16	3,6	0,68	85	1350	> 500k @ 5%
Varta Li-Ion	60	40	k.A.	90	340	k.A.
Li-Polymer	10.4	350	k.A.	k.A.	370	50k @ 5-10%
Panas. VRLA	29	12	10,2	34	370/250	> 3k @ 40%
Optima VRLA ^b	50	12	22	27	120	100 - 700 @ 80%
EPCOS SC	0,6	56	28	1,56	1556	100%

Tabelle 4: Dichten und Lebensdauern verschiedener Speichersysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge.

^aDaten nach [181]-[198].

^bNach Messungen in der Abt. ~~EM~~ ^{FWS} [199] bzw. [196].

mit größerer rein elektrischer Reichweite kann die Batterie größeren Zyklen im Ladungshub unterworfen sein. Die Lebensdauer sowohl in absoluten Zyklen, als auch bezüglich der insgesamt in der Batterie umsetzbaren Energiemenge bricht dadurch ein.

In Hybriden sollte der Speicher wegen der Zusatzverluste nur einen geringen Anteil an der umgesetzten Energiemenge haben. Der minimale Energieinhalt ergibt sich über die in den Auslegungszyklen anfallenden Bremsenergien. Aufgrund des daraus resultierenden Hubs von ca. 200 Wh scheiden Doppelschicht- Kondensatoren damit im Vergleich mit den meisten der aufgeführten Batteriesystemen durch das wesentlich höhere Systemgewicht aus. Die Eignung der anderen aufgeführten Systeme hängt vom angestrebten Energieumsatz während der Lebensdauer ab [202].

Blei-Batterien sind vergleichsweise günstig⁴⁷. Für den Einsatz in Hybriden kommen sie allerdings nur in Frage, wenn durch ein Batteriemanagement und gegebenenfalls regelmäßige externe Ladung sichergestellt werden kann, daß die Batterien nie längere Zeit im teilentladenen Zustand belassen werden. Anderfalls verbinden sich die Sulfate auf den Platten zu festen, passiven Schichten, wodurch die verfügbare Kapazität einbricht [200],[201].

Lithium-Systeme weisen gegenüber Nickel-Systemen eine höhere Energiedichte aus, die Lebensdauer, angegeben in umsetzbarer Energiemenge, bleibt aber nach Angaben von VARTA um die Hälfte hinter der von Nickel-Systemen zurück [186]. Lithium-Systeme müssen mit einer Möglichkeit zum externen Ladungsausgleich zwischen den Einzelzellen appliziert werden,

⁴⁷Bei Lehna in [201] sind angegeben: VRLA: 200 DM/kWh, Li-Ion: 500 DM/kWh, NiMh: 700 DM/kWh.

da die Zellen Überladung nicht tolerieren [203],[204]. Entsprechende Systeme wurden auch für Bleibatterien vorgestellt [205].

Alle Batterien benötigen im Einsatz in Hybriden ein angepaßtes Batteriemanagement-System, das dem überlagerten Energiemanagement Informationen über den Zustand der Batterie zur Verfügung stellt, da sie hier, anders als bei Elektrofahrzeugen, schwebend ohne definierte Start- und Endpunkte betrieben werden [206] - [208].

Bei der Entscheidung für einen konkreten Speicher für ein Hybridsystem scheiden Schwungräder bisher aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit aus. Der Energieinhalt von Doppelschicht-Kondensatoren ist für hybride Antriebe bisher zu gering, so daß nur Batterien als Speicher in Frage kommen. Die Entscheidung für ein konkretes Batteriesystem kann dabei nur erfolgen, wenn die zu erwartende Beanspruchung durch Fahrzeug, Umgebung und Energiemanagement vorab simuliert oder geschätzt wurden.

4.1.4 Motor-Generator-Einheit

Die Motor-Generator-Einheit in Abb. (15) stellt über den Generator die im Fahrbetrieb nötige Energie bereit. Auswahl und Betrieb ihrer Komponenten sind Schlüsselfaktoren, um sowohl die Schadstoffemissionen als auch den Verbrauch des Fahrzeugs zu senken.

Wie bei den Traktionsmaschinen sind sowohl statische als auch dynamische Kriterien zu berücksichtigen, die hier von der Antriebsauslegung abhängen. Für Range-Extender kann eine MGU eingesetzt werden, die nur die mittlere im Fahrbetrieb benötigte Leistung deckt und daher bis zum Einpunktbetrieb phlegmatisiert werden kann⁴⁸. Der Speicher muß dann dementsprechend leistungsfähiger ausgeführt sein.

In autarken Hybriden deckt die MGU mindestens die Auslegungsleistung des Fahrzeugs zuzüglich der auftretenden Verluste und den Leistungen der Nebenaggregate. Für einen Traktionsantrieb nach Abb. (16) ist dann mindestens eine Spitzenleistung von:

$$P_{MGU,N} = \frac{P_{Tr}(v_{max})}{\eta_{Tr}(v_{max})} + P_{Aux} \quad (13)$$

nötig. Wenn, wie in Abb. (16) die Nennleistung des Traktionsantriebs über der Leistung bei v_{max} liegt, muß diese Mehrleistung entweder über den Speicher abgedeckt werden, oder die Auslegungsleistung der MGU muß zumindest teilweise an diese Leistung angepaßt werden.

Verbrennungsmaschine In **Tabelle (5)** sind für das Fahrzeug mit 1500 kg Testgewicht die in den Zyklen auftretenden Leistungsänderungen aufgeführt. Im NEFZ treten die maximalen Dynamikanforderungen an den Schaltflanken und beim Übergang zu Bremsvorgängen auf. Außerhalb dieser Diskontinuitäten in der $v(t)$ Zyklusdefinition sind die Leistungsänderungen moderat. Der ftp-75 Zyklus enthält keine synthetischen Kanten. Die Leistungsänderungen sind hier durch das aufgenommene Geschwindigkeitsprofil gegeben und im Mittel deutlich höher.

⁴⁸Göhring definiert als Phlegmatisierungsgrad Φ eines Hybridantriebs das Verhältnis der zur Ladung des Speichers eingesetzten Energie der MGU zur gesamten von der MGU im Zyklus abgegebenen Energie [209].

Zyklus	beschleunigend	bremsend	Schwerpunkt
NEFZ	16 kW/s	-70 kW/s	$-2 \text{ kW/s} < dP_{Trakt} < 2 \text{ kW/s}$
ftp-75	20 kW/s	-30 kW/s	$-7 \text{ kW/s} < dP_{Trakt} < 7 \text{ kW/s}$

Tabelle 5: Dynamische Anforderungen an die MGU in NEFZ und im ftp-75 Testzyklus für ein 1500 kg Fahrzeug.

Die von der MGU geforderte Dynamik hängt davon ab, wie stark diese dynamischen Spitzen bei Beschleunigungen durch den Speicher abgedeckt werden sollen. Begrenzende Komponente ist hier die Verbrennungsmaschine. Es ist daher gegebenenfalls ein Kompromiß zwischen den durch die dynamische Beanspruchung des Speichers auftretenden Zusatzverlusten einerseits und den Verlusten in der MGU bei dynamischer Beanspruchung andererseits zu finden. Optimal ist eine Verbrennungsmaschine, die die im Fahrbetrieb auftretenden dynamischen Anforderungen mit minimalen Zusatzverlusten abdecken kann. Zusätzlich zu den normalen dynamischen Anforderungen des Fahrbetriebs wird die MGU in einem hybriden Triebstrang nur außerhalb des extremen Teillastbereichs betrieben. Je nach Fahrprofil muß die Verbrennungsmaschine daher deutlich häufiger abgeschaltet und wieder gestartet werden als Verbrennungsmotoren in konventionellen Antrieben. Falls sie dafür ungeeignet sind, muß die MGU stark phlegmatisiert betrieben werden. Aufgrund der Speicherverluste muß ihr Wirkungsgrad dann deutlich besser sein als Komponenten, die einen voll dynamischen Betrieb erlauben.

Grundsätzlich kommen aufgrund der fehlenden mechanischen Verbindungen zum Rad eine ganze Reihe von Verbrennungsmaschinen in Frage. Neben den klassischen Otto- und Dieselmotoren sind dies Stirlingmaschinen und auch Gasturbinen. Diese wurden verschiedentlich vorgeschlagen [140],[210]-[214]. Gasturbinen werden auch in Testfahrzeugen eingesetzt. Beide Alternativen sind vielstofffähig und weisen sehr niedrige Schadstoffemissionen auf. Schon ihre direkte Kraftstoffeffizienz bleibt mit maximal 30% deutlich hinter den Werten von Otto- und Dieselmotoren zurück, aufgrund der Speicherverluste stellt sich das Gesamtbild noch ungünstiger dar. Aus diesem Grund werden für MGUs hauptsächlich herkömmliche Fahrzeugmotoren eingesetzt.

Ottomotoren weisen aufgrund der Drosselklappenverluste deutlich schlechtere Teillastwirkungsgrade auf als Dieselmotoren und würden daher von der Hybridisierung deutlicher profitieren. Daher setzen M. Göhring [209] und P. Wältermann [215] in ihren Untersuchungen Ottomotoren für Serienhybride ein. Bei M. Göhring finden sich allerdings auch vergleichende Messungen zum Verbrauch und den Emissionen beider Motortypen unter hybridtypischen Bedingungen mit häufigeren Starts und Stops. Dabei zeigt sich, daß beim DI Diesel mit einem geringfügigen Mehrverbrauch von ca. 5% gegenüber dem stationären Betrieb gerechnet werden muß, während die Emissionen deutlich reduziert werden können⁴⁹. Der untersuchte Ottomotor wies dagegen einen deutlichen, zyklusabhängigen Mehrverbrauch und gestiegene Emissionen auf. Da zudem mit Dieselmotoren aufgrund des höheren praktischen Wirkungsgrades absolut auch bei Hybriden weniger CO_2 emittiert wird, bieten sich DI Diesel für hybride Konzepte an. Nachteilig sind die hohen NO_x -Emissionen. Allerdings wurde sogar auf dem Hintergrund der amerikanischen Abgasgesetzgebung, ohne Unterscheidung zwischen Otto- und Dieselmotor, für einen

⁴⁹Ähnliche Untersuchungen mit teilweise sogar noch besseren Ergebnissen finden sich bei S. Mourad, TNO [216] und L. Pelkmans [217].

unphlegmatisiert betriebenen Parallelhybrid ein optimierter DI Diesel entwickelt und appliziert [218].

Generator Hinsichtlich der Generatortechnologien gelten die Ausführungen zu den Traktionsmaschinen. Zu berücksichtigen ist, daß der Generator kompakt ausgeführt werden muß und an die Verbrennungsmaschine angepaßt sein muß.

Die Motoren werden auf ein möglichst konstantes Drehmoment und folglich mit der Drehzahl steigender Leistung ausgelegt. Die Maximalleistung wird dann knapp unterhalb der Maximaldrehzahl erreicht. Eine an diese Leistungscharakteristik angepaßte Elektromaschine müßte ihren Nennpunkt bei eben dieser Maximalleistung, also nahe an der Maximaldrehzahl des Verbrennungsmotors erreichen; das wäre dann eine nur im Grunddrehzahlbereich betriebene Maschine. Einerseits aus Komfortgründen, andererseits um den Optimalpunkt der Elektromaschine besser an die häufig auftretenden Leistungen im mittleren Teillastbereich anzupassen, kann der Nennpunkt der Elektromaschine (Punkt 1 in Abb. (16) auf Seite 49) auch zu kleineren Drehzahlen hin optimiert werden, wodurch die Momentenkennlinie der Elektromaschine bis über den Nennpunkt (Punkt 1 in Abb. (16)) hinaus über der Kennlinie des Motors zu liegen kommt ($M_{Gen,max} > M_{Mot,max}$) und die maximale Leistung des Verbrennungsmotors im Feldschwäcbereich des Generators ($P_{Gen} \approx \text{konst. für } n \geq n_N$) zu liegen kommt.

Brennstoffzelle Grundsätzlich können statt einer Motor-Generator-Einheit auch Brennstoffzellen mit oder ohne Reformier verwendet werden. Falls sie z.B. durch den Einsatz von Reformieren den dynamischen Anforderungen des Fahrbetriebs nur unter Inkaufnahme von Zusatzverlusten gewachsen sind, kann der Betrieb über den Speichereinsatz phlegmatisiert werden.

4.1.5 Nebenaggregate

Auch bei Hybriden geht die Leistung der Nebenverbraucher deutlich in den Gesamtverbrauch ein. Da, wie bei Fahrzeugen mit Start-Stop-Betrieb, viele Aggregate unabhängig vom Verbrennungsmotor betrieben werden müssen, sind hier hinsichtlich des Wirkungsgrades optimierte Elektroantriebe für die Lenkhilfe, die Pumpen und die Klimatisierung unabdingbar.

Um die kinetische Energie des Fahrzeugs so weit möglich über eine Nutzbremmung zurückzugewinnen, ist ein in das Antriebssystem integrierte, nicht direkt mit dem Bremspedal verbundene Betriebsbremse nötig [219],[220]. Die technischen Voraussetzungen dafür zeichnen sich über die X-by-Wire-Technologien ab [221]⁵⁰.

⁵⁰Unter X-by-Wire werden Ansätze zusammengefaßt, die die bisher rein mechanische Steuerung des Fahrzeugs über Lenkung, Bremse und Gaszug entkoppeln. Sollwerte für den Lenkwinkel, die Bremskraft oder die Beschleunigung werden über elektrische Sollwertgeber erfaßt, die Ansteuerung der Stellglieder erfolgt dann ebenfalls elektrisch über ein Steuergerät. Für X-by-Wire Technologien werden besonders hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit und die Zuverlässigkeit gestellt.

4.2 Antriebsmanagement

Neben den Energiewandlern und -speichern ist für den Betrieb von Hybriden ein Antriebsmanagement notwendig. Dabei muß der Betrieb der Verbrennungsmaschine und des Generators in der MGU, aber auch der der MGU mit dem des Speichers abgestimmt werden. Aufgabe des Managements ist auch die Koordination von Traktionsantrieb und Bremse bzw. Fahrstabilitätsregelung. Das Antriebsmanagement stellt daher eine überlagerte Ebene zu den schon vorhandenen elektronischen Steuerungen dar. Das Energiemanagement stellt eine der Aufgaben dieser Schicht dar, ebenso ist ein sicherer Betrieb des Antriebs auch in Fehlersituationen sicherzustellen.

4.3 Zielkonfiguration

Außer über die Simulation wurde der in der Abteilung *EWS* der Universität Ulm betrachtete serielle Hybrid auch über einen Prüfstand evaluiert. Die Komponenten wurden so gewählt, daß ein in Deutschland häufig verkauftes Fahrzeug der Kompaktklasse damit betrieben werden könnte. Dessen Fahrleistungen und Verbräuche dienten als Referenz, seine Parameter als Eingangsdaten für die Lastsimulation auf dem Rechner und im Prüfstand. Die Daten des Referenzfahrzeugs motorisiert mit einem 1,9 l DI Turbodiesel finden sich im Anhang B in **Tabelle (7)**.

Als Komponenten wurden für den Prüfstand gewählt:

- eine wassergekühlte Asynchronmaschine mit 78 kW Spitzenleistung und einem Grenzmoment nach Abb. (16) als Traktionsmaschine,
- als Speicher 15 über die Leistungsanforderungen ausgelegte Optima VRLA Batterien nach Tabelle (4), die über einen DC/DC-Steller an den Zischenkreis angekoppelt ist,
- als Verbrennungsmotor der 1,9 l TDi aus dem Referenzfahrzeug mit den Daten nach Abb. (12)
- und als Generator eine wassergekühlte 60 kW Synchronmaschine von Sachs.

Die Komponenten sind über einen Zwischenkreis mit einer Nennspannung von 600V verbunden. Entsprechende Systeme finden sich auch im realen Fahrbetrieb in einem Reisebus der Fa. Neoplan mit Komponenten von Lenze und ZF sowie in einem Verteiler-Lkw von Volvo [223],[224].

Für die Simulation wurde abweichend eine 66 kW Asynchronmaschine eines Industriepartners, für die genaue Daten vorlagen, sowie das Gewicht eines auf die Anforderungen optimierten NiMH-Hybrid-Speichers von Panasonic nach Tabelle (4) verwendet.

5 Systemstruktur und -simulation

Voraussetzung für die Entwicklung eines Energiemanagements für das System Hybridantrieb ist eine problemangepaßte Beschreibung des Antriebs. Dabei ist zunächst zu klären, welcher Zeithorizont abgedeckt werden soll; so spielen sich die Schaltvorgänge der eingesetzten Leistungshalbleiter im Bereich mehrerer 100 ns ab, die Zeit für die Abarbeitung jeweils eines Rechenbefehls in den eingesetzten Controllern liegt in der gleichen Größenordnung. Die Mittelwerte der Ströme und Momente ändern sich dagegen nur innerhalb mehrerer Millisekunden, Zykluslängen liegen im 1000 Sekundenbereich und Alterungseffekte von Batterien haben einen Zeithorizont von Monaten bis Jahren. Es ist also eine Grenzfrequenz für die betrachteten Effekte zu wählen. Über das Abtasttheorem kann dann für eine numerische Simulation die notwendige Schrittweite abgeschätzt werden.

Ebenso ist vor der Modellierung zu klären, welche Eigenschaften des Gesamtsystems in die Betrachtung mit einfließen sollen und für welchen Zweck das Modell verwendet werden wird. Im Rahmen der Modellbildung erfolgt dann eine verallgemeinerte Beschreibung des Gesamtsystems. Dazu werden die Teilsysteme und ihre Schnittstellen identifiziert und typischerweise über Gleichungssysteme in ihren internen Eigenschaften beschrieben. Diese Beschreibung wird dabei bei komplexeren Systemen wie dem hier betrachteten Antrieb hierarchisch über mehrere Ebenen erfolgen. Der Entwurf kann entweder top-down, also durch schrittweise Verfeinerung eines Modells für den Gesamtantrieb oder bottom-up, durch die Kombination von Elementareffekten erfolgen. Die zugrundeliegenden Elementareffekte können dabei durch Beschreibungen im Zustandsraum, über Annäherungen ihres gemessenen Übertragungsverhaltens durch Standardblöcke wie z.B. Proportionalglieder mit Verzögerungen (PT_1 oder PT_2) oder über Kennlinien und Kennfelder erfolgen. Entscheidend ist, daß alle für die gewünschte Aussage wesentlichen Eigenschaften des Systems erfaßt und die unwesentlichen weggelassen werden [225].

Untersuchungen zur Dynamik der modellierten Systeme können dann an dynamisch äquivalenten, aber einfacher variier- und steuerbaren Systemen durchgeführt werden. Dies waren zunächst Analogrechner. Dank der mittlerweile verfügbaren leistungsfähigen PCs werden inzwischen hauptsächlich numerische Simulationen herangezogen.

5.1 Simulation in der Antriebsentwicklung

Innerhalb der Antriebsentwicklung für Fahrzeuge erfolgt gegenwärtig immer noch der Übergang weg vom klassischen, sequentiellen Entwicklungsprozeß für mechatronische Systeme hin zu einer durchgängig modellbasierten Entwicklung sowohl für die mechanischen als auch für die elektronischen Komponenten der Systeme [226]. Dabei steigt der Elektronik- und insbesondere der Softwareanteil an der Funktionalität der Systeme. Durch den zunehmenden Einsatz von elektronischen Steuerungen werden existierende mechanische Lösungen zum Teil verdrängt, wie z.B. bei den Drehzahlreglern von Dieseleinspritzpumpen. Zum Teil wird die gewünschte Funktionalität erst durch den Elektronikeinsatz ermöglicht, wie die Genauigkeit der Kraftstoffzumessung bei elektronischen Einspritzsystemen. Insgesamt verlagert sich ein immer größerer Teil des geistigen Eigentums (Intellectual Property, IP) des Geräteherstellers in die Software.

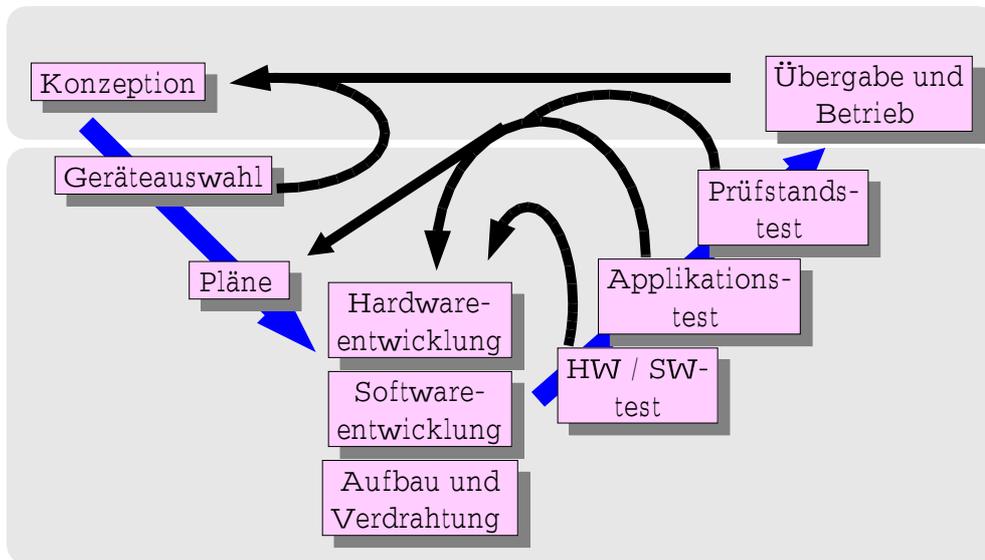


Abbildung 18: V Entwicklungsprozess für softwaregesteuerte Geräte nach [241].

Sowohl der dokumenten- als auch der modellbasierte Entwicklungsprozess können im V-Prozess für mechatronische Systeme abgebildet werden, bestehend aus zunächst schrittweiser Verfeinerung und anschließender Synthese und Test, wie er in **Bild (18)** dargestellt ist. Entscheidend für den modellbasierten Prozess ist die Anbindung an das Modell des Zielsystems mit ständigen und sehr frühen Rückkopplungsmöglichkeiten. Ein skalierbares Modell des Gesamtsystems erlaubt es, den bislang nur virtuellen Prototypen bereits während der Funktionsentwicklung eingebunden in das Gesamtsystem zu testen. Der Test erfolgt hier, indem die im Modell beschriebene Funktion mit dem Modell des Antriebs verbunden wird. Sie kann dann bereits dynamisch rückgekoppelt, aber ohne Restriktionen in der Rechenleistung und hinsichtlich der Echtzeitanforderungen in einer „Software in the loop“ (SIL) Umgebung zu untersuchen. Dabei stehen umfangreiche Diagnosemöglichkeiten zur Verfügung.

In einem nächsten Schritt kann die Funktionalität über ein RCP⁵¹ Werkzeug in Echtzeit, auf leistungsfähiger Hardware an einem Prüfstand oder bereits in einem Versuchsträger getestet werden. Der Simulationsblock mit der zu testenden Funktion wird dazu isoliert, mit den notwendigen Ein- und Ausgängen aus einer Bibliothek des Testsystems versehen und auf das RCP-System übertragen. Wesentlich sind die Interaktionsmöglichkeiten die es erlauben, die Funktion während des Tests zu beobachten und gegebenenfalls anzupassen. Voraussetzung für diesen Schritt und insbesondere für die Möglichkeit, die getestete Funktion wieder in das Gesamtmodell zurückfließen lassen zu können ist eine Toolintegration. Sowohl für die Modellierung in der Funktionsentwicklung als auch für den Test sollte das gleiche Werkzeug verwendet werden können. Idealerweise gilt das auch für die Modellierung des Testsystems die schon während des SIL-Tests verwendet wurde, da die neu entwickelte Funktion dann als Bestandteil für weitere

⁵¹RCP: **R**apid **C**ontroller **P**rototyping, angelehnt an den in der Mechanik verwendeten Begriff des Rapid Prototyping, beschreibt den Einsatz von variabel konfigurierbaren Testsystemen die es erlauben Regler in Echtzeit aber ohne wesentliche Einschränkungen in der Beschreibung am Testsystem betreiben zu können.

Entwicklungen verwendet werden kann.

Wenn während des RCP ein Prüfstand als Testsystem genutzt wird der nur Teile des realen Systems enthält, muß das Restsystem ebenfalls in Software nachgebildet werden. Eine entsprechende Werkzeugintegration vorausgesetzt, kann hier wieder auf das schon verwendete Systemmodell zurückgegriffen werden, dem die nötigen Teile in gleicher Weise entnommen und mit Schnittstellen versehen werden wie die Testfunktion. Entsprechende Testumgebungen werden dann als „Hardware in the Loop“ (HIL)-Testsysteme bezeichnet, da der Testablauf hier entweder für den Prototypen oder das Gesamtsystem zum Teil an realer Hardware, auf jeden Fall aber unter Echtzeitbedingungen stattfindet [227],[228].

Gegenüber dem RCP Gerät sind die Anforderungen an die Rechenleistung und die I/O-Performance beim HIL-Testerät nochmals größer, da es typischerweise einen größeren Teil des Gesamtsystems in Echtzeit modellieren muß. Gegebenenfalls muß dazu auf ein gegenüber der SIL-Umgebung optimiertes Modell zurückgegriffen werden. Am FKFS in Stuttgart wurde so z.B. ein Fahrsimulator für Nutzfahrzeuge mit elektropneumatischer Schaltung realisiert bei dem ein PC das Restsystem simuliert während das Getriebesteuergerät real verbaut wurde [229].

Im Seriensteuergerät stehen aus Kostengründen weniger Ressourcen zur Verfügung als während der Entwicklung mit Prototyping Systemen. Die gewünschte Steuergerätefunktionalität muß daher an die Rechenmöglichkeiten angepaßt werden, z.B. bei μ Controllern mit 16 oder 32 Bit Festkommadarstellung. Dabei muß für die Zahlendarstellung ein Kompromiß zwischen Genauigkeit und möglicher Dynamik eingegangen werden. Die Modellbasierte Entwicklung unterstützt dies, indem die entsprechenden zeit- und wertdiskreten Beschreibungen bereits in der Simulation mit der ursprünglichen Funktion verglichen werden können.

Den letzten Schritt stellt dann eine automatische Codeerzeugung für das Steuergerät direkt aus der Simulation heraus dar [230]. Die konkret nötigen Anpassungen werden in Kapitel 6.2 vorgestellt. Im Gegensatz zu dem Ansatz, aus einer verallgemeinerten Systembeschreibung über eine Partitionierung der Funktionalität in Hardware- und Softwareanteile die Steuergeräte über ein Hardware- / Software-Codesign optimiert zu implementieren⁵², wird im automobilen Umfeld bislang Hardware und Software noch getrennt entwickelt. Die Codeerzeugung implementiert dann Funktionssoftware für eine bestehende Hardware. Der Grund dürfte in den langen Lebenszyklen der Geräte und der sich in dieser Zeit weiterentwickelnden Funktionalität liegen. Angesichts der inzwischen sehr vielen vernetzten Geräte im Fahrzeug, kann hier auch eine gewisse Standardisierung in allgemeine Rechner bzw. Aktuatorknoten helfen Fertigungs- und Entwicklungskosten einzusparen [232].

Aufgrund der Einschränkung der Rechenleistung kann es durch die Implementierung im realen Steuergerät zu Abweichungen in der Funktion vom ursprünglichen Modell kommen. Da automotiv Steuergeräte in sehr hoher Stückzahl sehr lange Summenlebensdauern erreichen, muß die Funktionalität jedes neuen Systems unter Berücksichtigung möglichst aller Fehlersituationen getestet werden⁵³. Dazu bietet sich die Verwendung von HIL-Testsystemen, zusammen

⁵²Der integrierte Entwurf von Hardware / Softwaresystemen wird z.B. bei [231] vorgestellt und eignet sich insbesondere für eingebettete Steuergeräte, für die keine Erweiterungen während der Lebensdauer berücksichtigt werden müssen.

⁵³Wenn ein Steuergerät in einer Fahrzeugserie z.B. mit einer Million Stück verbaut wird und mit ca. 3000 Stunden Betriebsdauer je Fahrzeug zu rechnen ist, wirken sich durch die Summenbetriebsdauer $> 10^9$ Stunden selbst Fehler mit geringsten Wahrscheinlichkeiten deutlich aus [233].

mit bereits während der Funktionsentwicklung und im Prototyping definierten Testabläufen an. Diese Tests können dann auch automatisiert erfolgen, wobei weniger die Erzeugung von Testsequenzen als viel mehr die Auswahl der Tests und deren Interpretation die Herausforderung darstellen [241],[234],[235].

Im Vergleich zum traditionellen Entwicklungsprozeß begleitet im modellbasierten Prozeß sowohl das Fahrzeugmodell, als auch das Modell der zu entwickelnden Funktion den gesamten Entwicklungsprozeß, von der Funktionsentwicklung bis zur abschließenden Kalibrierung. Dadurch werden wesentlich kürzere Rückkopplungsschleifen erreicht und der Prozeß kann seine Ergebnisse als Modelle jeweils wieder mit aufnehmen. Das Gesamtmodell wird damit zur Wissensbasis des Prozesses. Im Bereich der Funktionsentwicklung und während des Prototypings steigt dadurch der Aufwand, da auch Systemeigenschaften mit berücksichtigt werden müssen, die sonst erst während der Implementierung mit eingeflossen sind. Über die entfallende Handarbeit im Bereich der Codierung und den entfallenden Code Test kann dies überkompensiert werden.

Für den Entwicklungsprozeß stehen verschiedene Werkzeugansätze zur Verfügung. Klassische Ansätze des CASE⁵⁴ scheiden für den modellbasierten Prozeß aus, da das physikalisch-technische System Antrieb nicht zu beschreiben ist und sie daher erst im Anschluß an die Funktionsentwicklung während der Implementierung greifen können. Vollständig objektorientierte Methoden passen ebenfalls nicht in dieses Umfeld. Beispiele sind UML⁵⁵ und SDL⁵⁶, die gut geeignet sind um den Softwareentwicklungsprozeß für eingebettete Steuergeräte zu strukturieren und insbesondere ereignisgesteuerte Systeme auch durch die Codeerzeugung unterstützen [236],[237]. Für das automotive Umfeld wurden Erweiterungen in [238] vorgestellt. Wenn aber der gesamte Prozeß von der Funktionsentwicklung bis zur Codierung und den Tests unterstützt werden soll, müssen die Simulationswerkzeuge auch in der Lage sein, das physikalisch-technische Gesamtsystem abzubilden.

Entsprechend der Bandbreite der betrachteten Effekte kommen in der Antriebstechnik sehr unterschiedliche Simulationsumgebungen zum Einsatz. Es sind dies einerseits speziell für eine Aufgabe entwickelte Pakete wie die Gesamtprozeßanalyse (GPA) der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen mit Erweiterungen für die dynamische Analyse von Antrieben [61],[239] oder DIRCOL von U. Zoelch [240] zur numerischen Lösung von Optimierungsproblemen. Andererseits werden Simulationsumgebungen auf der Basis von Standardpaketen wie SABER, SIMPLORER oder SPICE für die Schaltungssimulation und Matlab oder *MATRIX_X* für regelungstechnische Betrachtungen entwickelt. Ein Beispiel dafür ist ADVISOR, eine Matlab/Simulink-Toolbox zur Simulation von Fahrzeugen [242]-[245]. Schwerpunktmäßig in der Steuergeräteentwicklung wird auch ASCET-SD von ETAS verwendet⁵⁷. Nachteile aller dieser Systeme sind deren Herstellerabhängigkeit und der teilweise hohe Preis. Mit der ursprünglich aus der Simulation von Digitalssystemen stammenden, inzwischen durch

⁵⁴CASE: Computer Aided Software Engineering

⁵⁵UML: Unified Modeling Language, eine allgemeine, objektorientierte Beschreibung für den Entwurf von Software gesteuerten Systemen.

⁵⁶SDL: Specification and Description Language, eine Beschreibungssprache für den Systementwurf mit dem Schwerpunkt Detail-Design und Implementierung.

⁵⁷Einen Überblick über die speziellen Eigenschaften der verschiedenen Werkzeuge bieten A. Wohnhaas und U. Sailer [246] auf dem Stand von 1997; die Tendenzen sind weiterhin gültig.

die Definition von VHDL-AMS⁵⁸ auf analoge und physikalische Systeme erweiterten Hardware-Beschreibungssprache kann sich hier ein Ausweg abzeichnen. VHDL ist im Gegensatz zu den graphisch animierten Tools eine Beschreibungssprache, in der die Komponenten durch ihr Interface und ihr internes Verhalten textuell modelliert werden. Die Sprache ist damit sehr mächtig, allerdings auch bei weitem nicht so intuitiv wie regelungstechnische Blockdiagramme [247].

Der mit der Modellbildung und Simulation verfolgte Zweck innerhalb der Antriebsentwicklung entscheidet über die notwendige Modellierungstiefe und über die Eignung der zur Verfügung stehenden Programme. So muß z.B. ein Motor für den ein Regler als Teilfunktion eines Steuergeräts zu realisieren ist in der Regel wesentlich genauer nachgebildet werden als z.B. ein geregelter Motor innerhalb einer Antriebssimulation. Je nach erforderlicher Genauigkeit und Systemtyp kommen Zustandsbeschreibungen, Übertragungsfunktionen, Kennfelder oder Approximationen zum Einsatz. Für die Modellierung von zeitvarianten Systemen bieten sich Zustandsautomaten an [248].

Wenn das Modell auch während der Schrittweisen Verfeinerung innerhalb des V-Prozeß verwendet werden soll, muß es zunehmend auch konkrete physikalische oder technische Eigenschaften des betrachteten Teilsystems abbilden können. Für den hier betrachteten Entwurf einer Regler- und Managementstruktur sind das Eigenschaften der Kommunikation, der Meßwertfassung und der Datenverarbeitung der beteiligten Steuergeräte. Für den Reglerentwurf sind es Verzögerungen sowie eine zeit- und wertdiskrete Verarbeitung mit begrenztem Darstellungsbereich. Innerhalb der Mechanik wäre es der Schritt zu einem Mehrkörpermodell bis hin zur Beschreibung durch finite Elemente.

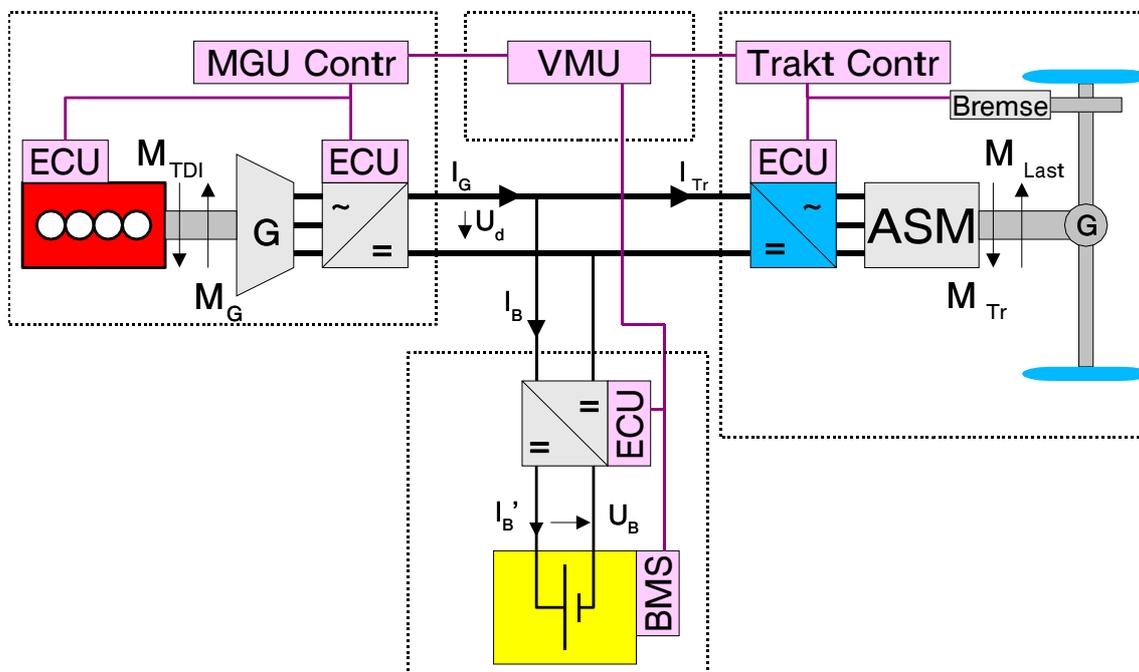


Abbildung 19: In der Simulation und im Prüfstand realisierter Antriebsstrang für einen Serienhybrid.

⁵⁸VHDL: Very high speed integrated circuit **H**ardware **D**escription **L**anguage.

Das im folgenden näher zu beschreibende Simulationsmodell für einen seriellen Hybridantrieb wurde entwickelt um bereits das Zusammenspiel der in **Bild (19)** dargestellten Komponenten untersuchen zu können, noch bevor mit dem Prüfstand das Testsystem zur Verfügung stand. Einerseits war das Zusammenwirken der dezentral über Kommunikationsbusse zu verknüpfenden Regler und Steuerungselemente zu testen, andererseits sollte die Simulation Aussagen über den zu erwartenden Verbrauch und die mögliche Dynamik der Komponenten liefern können. In einer späteren Phase wurden die den Komponenten Antrieb, Speicher und MGU zugeordneten Steuerungselemente direkt über eine modellbasierte, automatische Codeerzeugung auf ein in der Abteilung entwickeltes, μ Controller-basiertes Steuergerät implementiert. Als Simulationsumgebung wurde dazu auf Matlab/Simulink zurückgegriffen, da hier sowohl kontinuierliche als auch zeit- und wertdiskrete Systeme modelliert werden können. Die Integration von ereignisgesteuerten Systemen ist mit Stateflow über Zustandsautomaten einfach möglich. Eine, allerdings Hardware unabhängige, C-Code-Erzeugung wird über den Real-Time-Workshop unterstützt. [242],[243],[248],[249].

Je nach der gewünschten Genauigkeit, insbesondere des zu untersuchenden Zeithorizonts entstanden dabei für einzelne Komponenten wie Elektromaschinen, Verbrennungsmotor und die Batterien unterschiedlich aufwendige Modelle die von statischen Kennfeldern bis zu unterschiedlich detaillierten Mittelwertmodellen reichen. Hochauflösende, auch die Oberschwingungen der Prozesse berücksichtigende Modelle wie kurbelwellendiskrete Modelle für den Verbrennungsprozeß oder winkeldiskrete Modelle für die Vorgänge in den pulswechselrichtergeteuerten Elektromaschinen wurde dagegen nicht verwendet.

Alle Parameter des Gesamtmodells, die Änderungen unterworfen sein können sind in einer strukturierten Matlab Variable hinterlegt. Parameteränderungen erfolgen dadurch entweder interaktiv oder durch die Auswahl eines entsprechenden Initialisierungsscriptes.

5.2 Zwischenkreis

Im Gleichspannungszwischenkreis werden Kondensatoren über die Summe der Ströme geladen. Die Spannung am Kondensator wird über die Differentialgleichung:

$$\frac{dU_d}{dt} = \frac{1}{C_d} \sum_{\nu} I_{\nu}(t) = \frac{1}{C_d} (I_G - I_{Tr} - I_B) \quad (14)$$

mit den Strömen des Generators I_G , in die Batterie I_B und in den Antrieb I_{Tr} sowie über die Kapazität im Zwischenkreis C_d beschrieben.

Im Prüfstand muß der Zwischenkreis über eine Ladeschaltung auf die Batteriespannung vorge-laden werden bevor die Batterie über den DC/DC-Steller angeschlossen werden kann. In der Simulation wurde auf die Nachbildung der Ladeschaltung verzichtet, U_d wird stattdessen zu Beginn mit der Batteriespannung U_B initialisiert. Die Zeitkonstante für die Selbstentladung des Zwischenkreises beträgt mehrere Minuten. Der ohmsche Verlustanteil wird daher angesichts der erheblichen Gesamtenergieumsätze im Zwischenkreis vernachlässigt.

5.3 Traktionsantrieb

Der Traktionsbereich enthält neben der geregelten Antriebsmaschine das Getriebe, die Lastsimulation, einen „mechanischen“ Bremsengriff und einen Traktionscontroller der die Anforderungen des Fahrzeugmanagements auf die Traktionsmaschine und gegebenenfalls die Bremse verteilt.

5.3.1 Bewegungsgleichung

Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist über den dynamischen Radradius r_{dyn} und die feste Getriebeübersetzung \ddot{u} mit der Motordrehzahl n_{Tr} verknüpft. Der dissipative Anteil der Last aus Reibung und Luftwiderstand wird auf ein geschwindigkeitsabhängiges Lastmoment an der Motorwelle umgerechnet, die gesamte Trägheit des Fahrzeugs geht in das Trägheitsmoment an der Welle ein. Das auf die Räder wirkende Antriebsmoment ist im motorischen Betrieb um die Getriebeverluste reduziert, im generatorischen Betrieb müssen die Getriebeverluste vom rollenden Fahrzeug überwunden werden. Die Bewegungsdifferentialgleichung für motorischen bzw. generatorischen Betrieb lautet dann:

$$\text{motorisch } \frac{dn_{Tr}}{dt} = \frac{1}{J_{ges}} (\eta_{Getr} M_{Tr} - M_L) \quad (15)$$

$$\text{generatorisch } \frac{dn_{Tr}}{dt} = \frac{1}{J_{ges}} (M_{Tr} + \eta_{Getr} (M_{Br} - M_L)) . \quad (16)$$

Darin ist M_{Tr} das Moment des Antriebs, M_{Br} und M_L sind die mit dem Faktor $1/\ddot{u}$ auf die Motorwelle umgerechneten Momente der Bremse bzw. der statischen Lasten aus Rollreibung, Steigung und Luftwiderstand nach Gleichung (6) auf Seite 21. Das gesamte Trägheitsmoment wird aus der in Gleichung (6) angegebenen trägen Ersatzmasse $m_{ges} = (m + m_{\Theta})$ als:

$$J_{ges} = \frac{2\pi r_{dyn}}{\ddot{u}^2} m_{ges} \quad (17)$$

ermittelt.

Als träge Zusatzmassen werden die Räder, die Radaufhängungen, das Getriebe und die Antriebswellen berücksichtigt. Bei Nahmer [250] wird zusätzlich noch eine Standardkupplung aus dem Automobilbau vorgesehen. Diese ist technisch nicht notwendig. Mit den ebenfalls dort angegebenen Trägheiten für die zu berücksichtigenden Komponenten kann die Zusatzmasse $m_{\Theta} < 100 \text{ kg}$ abgeschätzt werden. Eine eigene Abschätzung auf Basis der geometrischen Formen der rotierenden Teile und ihrer Massen ergab $m_{\Theta} < 55 \text{ kg}$. Berücksichtigt wurden dabei die Antriebswellen, die Rädern und der Motor.

5.3.2 Antrieb

Momentbildung Die im Antrieb eingesetzte Asynchronmaschine wird über einen Industrieumrichter feldorientiert geregelt⁵⁹. Ein gewünschtes Moment kann dann innerhalb der Ersatzzeitkonstanten für die Stromregelschleife eingestellt werden. Innerhalb der Simulation werden der feldorientiert momentengeregelte Antrieb und die Maschine daher lediglich durch eine Verzögerungsglied 1. Ordnung für die Stromregelschleife modelliert. Parameter sind das Spitzenmoment \hat{M}_{Tr} und eine Ersatzzeitkonstante T_{Tr} . Innerhalb des Grunddrehzahlbereichs sind hier Zeitkonstanten deutlich unter 1 ms möglich, im Feldschwächbereich kann durch eine optimierte Feldwahl eine Zeitkonstante deutlich unter 10 ms eingehalten werden [255],[256],[257]. Zusätzlich muß im Feldschwächbereich das maximal abgegebene Moment über die Kennlinie nach Bild (16) begrenzt werden.

Strombildung Die Berechnung des zwischenkreisseitigen Stroms I_{Tr} erfolgt über ein Kennfeld für den Wirkungsgrad aus den Größen Sollmoment und Ist Drehzahl. Durch die Verwendung des Sollmoments wird der dynamische Verlustanteil des Verzögerungsglieds mit berücksichtigt⁶⁰.

5.3.3 Traktionscontroller

Im vorliegenden Modell wird nur die Längsdynamik des Fahrzeugs simuliert. Die Aufgaben des Traktionscontrollers beschränken sich daher auf die Anpassung der Traktionsleistung an die Leistungsfähigkeit des Zwischenkreis und auf den optimierten Bremseinsatz.

Leistungsbegrenzung Falls durch die hohe mögliche Dynamik des Antriebs der Zwischenkreis überlastet würde, also während Beschleunigungsvorgängen zu viel Strom entnommen oder während Bremsvorgängen zuviel Strom in den Zwischenkreis gespeist würde, würde dort die Spannung entsprechend Gleichung (14) absinken oder ansteigen. Der Traktionscontroller überwacht daher die Spannung und begrenzt gegebenenfalls den Momentensollwert für den Antrieb. Die Begrenzung erfolgt dabei stetig. Eine Stützung der Systemspannung durch eine langsame, regenerative Abbremsung beim möglichen Ausfall des Speicherbereichs, wie von

⁵⁹Die feldorientierte Regelung von Drehfeldmaschinen baut auf einer Beschreibung der rotierenden Felder und Strombeläge, sowie der zugeordneten Spannungen in Raumzeigernotation auf [251]. In einem mit dem Ständer- oder dem Läuferfeld rotierenden Koordinatensystem kann der stationär mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit rotierende Strombelag als vektorielle Gleichgröße beschrieben und rechnerisch in eine feldparallele (i_d) und eine senkrecht dazu stehende Komponente (i_q) zerlegt werden. Das in Drehfeldmaschinen entwickelte Moment ist proportional zum Betrag des Kreuzprodukts zwei seiner vier komplexen Zustandsgrößen $\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r, \Psi_s, \Psi_r$ [252]. Wenn es durch die externe Stromregelung gelingt, das Referenzfeld konstant zu halten, ist das resultierende Moment dadurch direkt proportional zur zum Feld senkrechten Querstromkomponente; diese Gleichgröße kann dann im Referenzkoordinatensystem geregelt werden wie der Ankerstrom bei Gleichstrommaschinen. Der rechnerische Übergang zwischen dem feststehenden Ständer und den rotierenden Koordinatensystemen erfolgt durch rotatorische Koordinatentransformationen [253],[254].

⁶⁰Beim Verzögerungsglied 1. Ordnung ist bei einer sprungförmigen Veränderung der Sollgröße der Aufwand für die Zustandsänderung proportional zur Amplitude der Änderung. Die Potentialänderung in der Zustandsgröße, hier das abgegebene Moment, enthält nur noch 50% der für die Zustandsänderung aufgewandten Energie.

Lenze für einen Hybridbus vorgeschlagen ist im Rahmen dieser Simulation nicht vorgesehen [223].

Bremsassistent Der Bremsassistent des Traktionscontrollers stimmt die Nutzbremmung und den Eingriff der mechanischen Betriebsbremse aufeinander ab. Im Rahmen der simulierten Längsdynamik und mangels realistischer Fahrzyklen mit Bremsengriffen wird hier lediglich festgelegt, daß oberhalb einer Grenzgeschwindigkeit die mechanische Unterstützung aktiviert wird. Der Bremsassistent ist über einen Zustandsautomaten realisiert. Unterhalb einer unteren Grenzgeschwindigkeit wird, wenn nicht gerade gebremst wird, die mechanische Bremsunterstützung wieder deaktiviert. Ein Panikschalter für eine erkannte Vollbremsung ist vorgesehen, kann in den vorliegenden Zyklen aber nicht genutzt werden. Ein Beispiel für ein ausgeführtes System der Fa. LucasVarity findet sich bei J.-P. Kohrt [241].

Die Nutzbremmung, in der Regel auf nur eine Achse, und die mechanische Betriebsbremse müssen im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Bremskraftverteilung aufeinander abgestimmt werden [12]. Hier wird durch den Bremsassistenten im Bereich des Stadtverkehrs nur eingegriffen wenn eine über die Nutzbremmung hinausgehende Bremskraft nötig wäre, was in den Zyklen nicht vorkommt. Oberhalb der Grenzgeschwindigkeit wird über die Bremskraftaufteilung die Leistung der Nutzbremmung $P_{Br,Tr} = m_{\Theta} a v$ begrenzt. Über den mechanischen Bremsengriff steht bei der Systemabstimmung demnach ein Freiheitsgrad zur Verfügung mit dem die maximale Ladeleistung des Speichers begrenzt werden kann.

5.4 Speicher

Der Speicherblock gliedert sich in das Batteriemodell, ein Teilmodell für das Batteriemangement, soweit das für das noch zu beschreibende Energiemanagement nötig ist, und die Blöcke für den DC/DC-Steller. Ziel der Simulation ist einerseits die energetische Bilanzierung, andererseits die dynamische Auslegung der Regler für den DC/DC-Steller bereits vor der Verfügbarkeit der Hardware. Aufgabe des Stellers ist es die Spannung im Zwischenkreis auf dem gewünschten Niveau zu halten.

5.4.1 Batterie

In der Literatur findet sich eine Reihe von Batteriemodellen die versuchen das elektro-chemische System Batterie durch ein elektrisches Ersatznetzwerk zu beschreiben. Typischerweise werden wie in **Bild (20)** verschiedene RC-Elemente in Reihe mit einer idealen, vom Ladegrad State of Charge (SOC) abhängigen Spannungsquelle für die Hauptreaktion, parallel zu einem Zeig für die Nebenreaktion angesetzt [200],[258],[259].

Die Nebenreaktion bleibt in der Simulation unberücksichtigt da sie vor allem für die Selbstentladung verantwortlich ist und während der vergleichsweise kurzen Zyklen vernachlässigt werden kann. In [258] sind Daten für ein Modell einer Bleibatterie mit drei RC-Gliedern angegeben. Die Zeitkonstanten für die RC-Glieder bewegen sich im zweistelligen Minutenbereich. Das deckt sich mit den Angaben bei G. Saupe, der für die Durchtrittsüberspannung Zeitkonstanten von 1 - 10 Sekunden, für die besonders deutliche Konzentrationsüberspannung aber Zeitkonstanten um

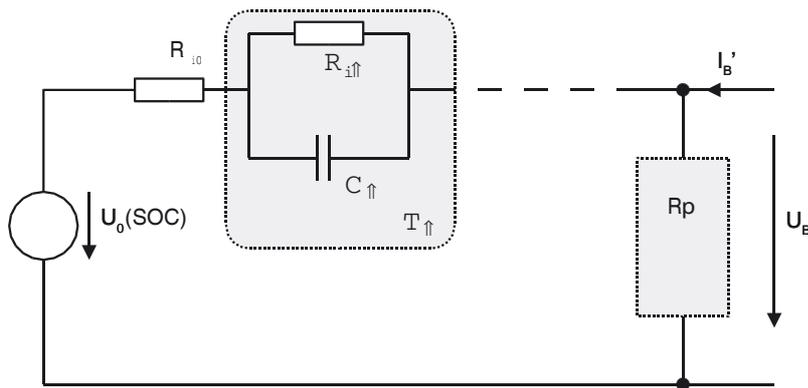


Abbildung 20: Standardmodell für Batterien mit gegebenenfalls mehreren RC-Gliedern für unterschiedliche Reaktionszeitkonstanten

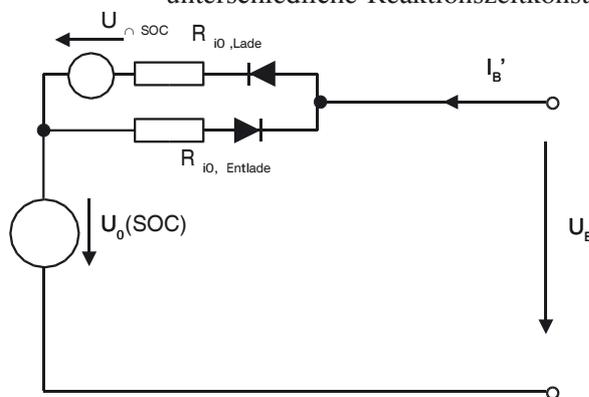


Abbildung 21: In der Simulation verwendetes Batteriemodell mit an die Hybridbelastung angepaßten, richtungsabhängigen Innenwiderständen.

die 60 Minuten angibt. Wesentlicher ist, daß alle Parameter des Ersatzschaltbildes nach Bild (20) sowohl von SOC als auch von der Stromrichtung abhängen. Die Bleibatterie ist während des Entladevorgangs wesentlich dynamischer als während Ladevorgängen.

In Hybridzyklen wird die Batterie mit deutlich kürzeren Pulsen belastet als dies bei Elektrofahrzeugen der Fall ist. Statt der allgemeinen Modellierung mit mehreren Zeitgliedern wird daher im Rahmen der Simulation ein vereinfachtes Ersatznetzwerk nach **Bild (21)** verwendet. Der für jede Stromrichtung getrennt modellierte Innenwiderstand wurde für die zu erwartenden Belastungen von P. Seger am Batterietestplatz der Abteilung *EWES* bestimmt [199]. Die Ruhespannung ist abhängig vom SOC, die zusätzliche Spannungsquelle im Ladezweig berücksichtigt einen von 1 verschiedenen Coulombwirkungsgrad. Das so erhaltene Modell ist nicht ausreichend für die Bilanzierung längerer Konstantladungen, für den ständigen Wechsel zwischen Ladung und Entladung im Hybridbetrieb aber geeignet.

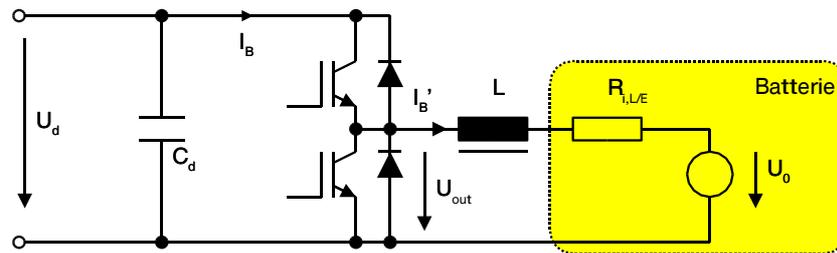


Abbildung 22: Ersatzschaltbild für eine Batterie am DC/DC-Steller.

5.4.2 Batteriemangement

Wichtigste Aufgabe des Batteriemangements (BMS) im Hybridantrieb ist eine zuverlässige Beobachtung des SOC der Batterie über die meßbaren Größen Spannung, Strom und Temperatur. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf der Entwicklung eines BMS lag, wurde hier direkt auf den im Batteriemodell ermittelten SOC zurückgegriffen. Auf Basis des Ladezustands und des Batteriezustands⁶¹ kann die aktuell zulässige Leistung ermittelt werden. Für eine mögliche Regleradaption im DC/DC-Steller und für Verlustabschätzungen im Energiemanagement wird aus den Verläufen der Klemmengrößen U_B und I_B zudem $R_{i,L}$ und $R_{i,E}$ beobachtet. Die außerdem im BMS integrierte Funktion der Grundkostenkalkulation für die Batterie werden erst im Zusammenhang mit dem kostenbasierten Ansatz für das Energiemanagement in Kapitel 7 vorgestellt.

5.4.3 DC/DC-Steller

Leistungsteil Aufgabe des DC/DC-Stellers ist es, eine Batterie mit vergleichsweise niedriger Spannung an einen Zwischenkreis höherer Spannung anzuschließen und über die in der Batterie gespeicherte Energie die Spannung im Zwischenkreis zu stabilisieren. Eine derartige Kombination aus DC/DC-Steller und Batterie ist dann für das restliche Antriebssystem transparent, d.h. es tritt außer einer stabileren, weil nicht mehr vom Innenwiderstand der Batterie abhängigen Zwischenkreisspannung keine erkennbare Änderung im Vergleich zu einer direkt angekoppelten Batterie auf [262]. Beim Start des Antriebs wird der Zwischenkreis zunächst über den DC/DC-Steller vorgeladen und nachdem der Zündschlüssel wieder abgezogen wurde, wird wieder bis zu Batteriespannung entladen und die Batterie abgetrennt.

In der Simulation wird der DC/DC-Steller als Mittelwertmodell, d.h. ohne Oberschwingungen modelliert da die zu implementierende Regelung ebenfalls nur für den gefilterten Mittelwert des Stroms erfolgen soll. Die Schaltung ist in **Bild (22)** dargestellt. Der Batteriestrom wird über das Verzögerungsglied 1. Ordnung aus Innenwiderstand der Batterie und Längsinduktivität des DC/DC-Stellers nach:

$$\frac{d I_B}{dt} + \frac{R_i}{L} I_B = \frac{1}{L} (U_{out} - U_0) \quad (18)$$

⁶¹Über den Batteriezustand, State of Health (SOH) wird ausgedrückt, wieviel der Nennkapazität und Leistungsfähigkeit die Batterie noch bietet [260],[261].

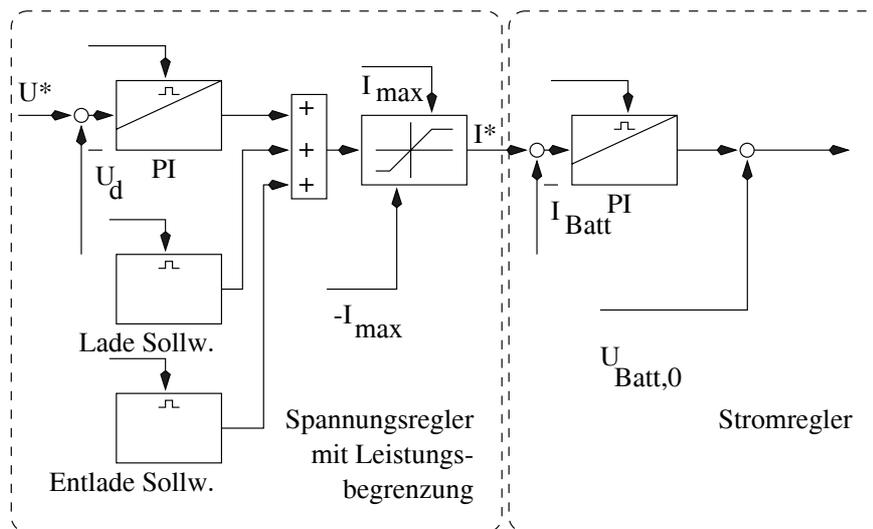


Abbildung 23: Regler Blockdiagramm des DC/DC-Stellers. Dargestellt ist der PI-Stromregler, die Strombegrenzung, die Spannungsregelung und die Festsollwerte für den Lade- und Entladevorgang des Zwischenkreis.

gebildet. Für U_{out} gilt:

$$U_{out} = \lambda U_d \quad (19)$$

mit $0 \leq \lambda \leq 1$, dem Aussteuergrad des DC/DC-Stellers.

Regelung Die Struktur der Schaltung nach Bild (22) entspricht der einer über einen DC/DC-Steller betriebenen Gleichstrommaschine. Im Unterschied zur Applikation an der Gleichstrommaschine wird hier nicht die untere Spannung (EMK der Maschine), die sich hier über die Ruhespannung der Batterie nur wenig ändert, sondern die Spannung auf der Oberseite durch den Strom $I_B = I'_B / \lambda$ in Gleichung (14) geregelt. Der zu regelnde Strom nach Gleichung (18) ist dadurch abhängig von der überlagert zu regelnden Spannung U_d , die Strecke somit nichtlinear.

Die Struktur der Regelung zeigt **Bild (23)**. Neben den Reglern für Strom und Spannung sind schaltbare Sollwerte für den Vorlade- und den Entladevorgang vorgesehen sowie eine Sollwertbegrenzung für den Strom. Die Grenzen werden vom BMS vorgegeben.

Nachdem der Regler und die Ablaufsteuerung zunächst in konventionellen Blöcken modelliert wurde, erfolgte bereits hier der Übergang auf eine zeitdiskrete Reglerstruktur und eine Zahlendarstellung mit 16 Bit Auflösung sowohl für die Meß- und Sollwerte als auch für die Parameter. Die im realen Aufbau vorhandenen Filter an den Analogeingängen sind mit ihrem Tiefpaßverhalten berücksichtigt. Durch diesen Schritt kann schon an dieser Stelle die im Prüfstand zu erwartende Dynamik abgeschätzt werden.

Verluste Die Verluste beim Betrieb des DC/DC-Stellers entstehen zum Teil proportional zum Strom über Schalt- und Durchlaßverluste und können im Innenwiderstand der Batterie mit

berücksichtigt werden. Ein weiterer Anteil entsteht durch die Oberschwingungen, die bei 10 kHz Taktfrequenz und 1,7 mH als Dreiecksstrom mit einem Spitze-Spitze Wert von $i'_{B,ss} \approx 8 A$ genähert werden können. Die Oberschwingungen führen zu Verlusten einerseits im Innenwiderstand, andererseits in den Halbleitern. In der Simulation werden die Verluste durch den Betrieb des DC/DC-Stellers für das 40kW Gerät mit konstant 500 W, resultierend in einem Wirkungsgrad von $\eta_{DC/DC} \leq 99\%$ im Nennpunkt und $\eta_{DC/DC} \rightarrow 0$ für kleine Ströme nachgebildet.

5.5 MGU

Die Motor-Generator-Einheit besteht aus einem Modell des TDi, dem Generator, dem Anlasser und einem MGU-Controller, der den Motor und die Elektromaschine mit Sollwerten versorgt und den Betrieb der MGU steuert. Die Drehzahl der Motoren ist über die Bewegungsgleichung:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{J_{TDi} + J_{Gen}} (M_{TDi} + M_{Anl} - M_{Gen}) \quad (20)$$

mit der Summe ihrer Momente und dem resultierenden Trägheitsmoment verknüpft. Im Vergleich zum mechanischen Antriebstrang wirken auf den Dieselmotor bei dieser Anordnung nur sehr kleine Trägheitsmomente. Da zusätzlich der Lastpunkt (M_{Gen}) über die Batterie von der aktuellen Antriebsleistung entkoppelt ist, wird in der MGU eine sehr hohe Dynamik für $\frac{dn}{dt}$ erreicht.

Innerhalb der Kombination wird der Dieselmotor über ein E-Gas⁶² momentengesteuert und der Generator drehzahl geregelt betrieben. Der Anlasser ermöglicht einen konventionellen Start, in der Regel wird der Dieselmotor aber vom Generator wesentlich schneller gestartet.

5.5.1 Generator

Der Generator nutzt dasselbe Modell für eine momentengeregelte Elektromaschine, das auch für den Traktionsmotor verwendet wird. Parameter sind die Wirkungsgradfläche und die Grenzmomente. Für den drehzahl geregelten Einsatz wird das Modell um einen PI-Drehzahlregler mit den Signalen für den Drehzollsoll- und Istwert und einem Freigabesignal ergänzt. Die Beschaltung entspricht der des im Prüfstand eingesetzten Sachs-Antriebs.

5.5.2 Dieselmotor

Je nach Anwendungszweck werden in Simulationen sehr unterschiedliche Modelle für Verbrennungsmotoren verwendet. Die Bandbreite reicht von zylinderindividuellen, kurbelwellendiskreten Modellen die versuchen den tatsächlichen Momentenverlauf jedes Zylinders nachzubilden,

⁶²Sowohl in Dieselantrieben als auch bei Ottomotoren wird statt eines mechanisch auf die Einspritzpumpe oder die Drosselklappe übertragenen Fahrwunsch inzwischen ein rein elektrisch vermessenenes Fahrpedal eingesetzt. Der Winkel wird dabei als Momentensollwert für das Motorsteuergerät interpretiert.

bis zu Mittelwertmodellen die lediglich das mittlere Moment an der Kurbelwelle nachbilden⁶³. Die kurbelwellendiskreten Modelle sind nötig wenn Motorsteuergeräte entwickelt oder getestet werden sollen. Beim Betrieb der MGU sind lediglich das an der Kurbelwelle abgegebene mittlere Moment, dessen Dynamik und der Verbrauch des Dieselmotors relevant. Die Momentbildung des elektronisch geregelten DI Dieselmotors wird daher hier durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten für steigendes und fallendes Moment nachgebildet. Das drehzahlabhängige Reibmoment wurde gemessen und wird von diesem inneren Moment abgezogen. Zusätzlich wird das während der Startphase unterhalb der Leerlaufdrehzahl entwickelte Moment durch einen Festwert modelliert. Im Leerlauf wird die Drehzahl geregelt. Ein Zustandsautomat, angesteuert über das Zündungssignal des Steuergeräts und die Drehzahl steuert den Ablauf von Start, Hochlauf, Leerlauf, Betrieb und Stop des Motors.

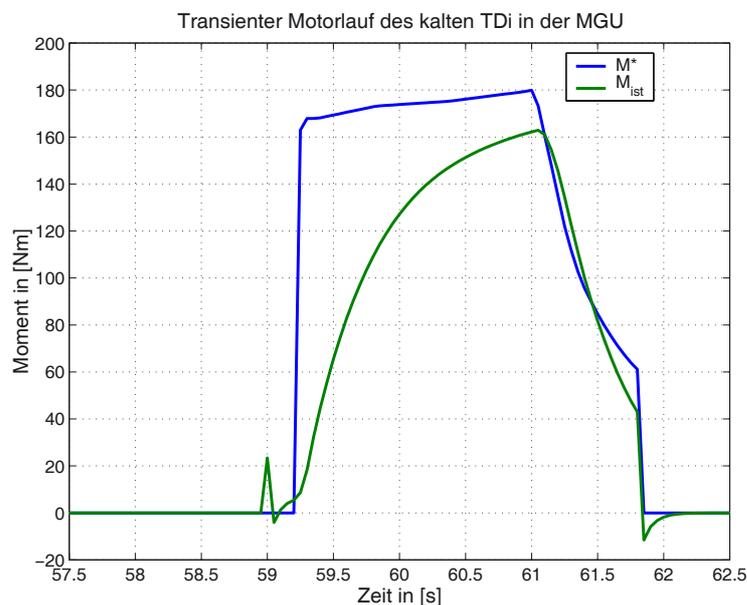


Abbildung 24: Vom TDi während eines kurzen Starts abgegebenes Moment M_{ist} und das angeforderte Sollmoment M^* .

Das vom Motor während eines Zyklusausschnitts abgegebene Moment an der Kurbelwelle zusammen mit dem Sollmoment sind in **Bild (24)** dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 59\text{ s}$ wird der Motor vom Anlasser gestartet. Das den Anlasser ablösende Hochlaufmoment ist als Spitze zu erkennen. Nach Erreichen der Leerlaufdrehzahl übernimmt der Leerlaufregler die Motorführung. Da das Reibmoment bereits intern enthalten ist, ist das abgegebene Moment zunächst gleich 0. Nachdem sich die Leerlaufdrehzahl stabilisiert hat, wird das Sollmoment

⁶³In [263] wird der Einspritzverlauf für Common-Rail Injektoren detailliert nachgebildet, bei FEV wird in [264] die Gasdynamik der Verbrennung eindimensional nachgebildet, ebenso wie die Luftführung, für den Fahrzeugsimulator CARTS der Uni Kassel werden die Kraftstoffaufbereitung und die Verbrennung über neuronale Netzwerke kurbelwellendiskret simuliert. Für die Auslegung der MGU eines dieselelektrischen Gabelstaplers wird bei Still der Verbrennungsmotor lediglich über eine Momentenkennfeld und über ein Zeitglied erster Ordnung nachgebildet [266], ein entsprechendes Modell findet sich bei Wältermann, angewandt beim Serienhybrid [215]. T. Mayer bzw. Ch. Körner verwenden ein Mittelwertmodell mit separat modellierter Gasführung durch Abgasrückführung und Abgastubolader. Bei T. Mayer wird das Modell dann aber auch auf ein einfaches Verzögerungsglied 1. Ordnung reduziert [127],[46].

abgefordert, dem der Motor mit der für Beschleunigungsvorgänge gültigen Zeitkonstante des Verzögerungsglieds 1. Ordnung von 0,5 Sekunden folgt. Am Ende der Laufzeit wird hier zunächst das Sollmoment wieder abgebaut, der Motor kann hier schneller folgen mit einer Zeitkonstanten von 100 ms. Das Moment an der Kurbelwelle wird dabei kurz negativ, da bei entfallendem motorischem Moment die Reibverluste noch bis zum Stillstand aus der Rotationsenergie gedeckt werden.

Am betriebswarmen, geregelten Motor kann das gewünschte Moment über eine kennfeldbasierte Ansteuerung des E-Gas in Abhängigkeit von n und M^* realisiert werden. Statisch wird daher im Modell eine Momentenverstärkung von 1 für das Verzögerungsglied verwendet. Beim kalten Motor wird, abhängig von der Belastung und der Temperatur, bei gleicher Einspritzmenge noch nicht das volle Moment entwickelt. Über ein den Betriebspunkt und die Umgebungstemperatur berücksichtigendes Temperaturmodell wird daher die aktuelle Kühlwassertemperatur nachgebildet und das entwickelte Moment mit einem temperatur- und leistungsabhängigen Verlustfaktor bewertet⁶⁴

Die Verbrauchsermittlung geschieht über das Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Um Thermo- und Dynamikverluste mit berücksichtigen zu können wird dazu wieder auf den Sollwert, hier für das Moment des TDi zurückgegriffen.

5.5.3 MGU Controller

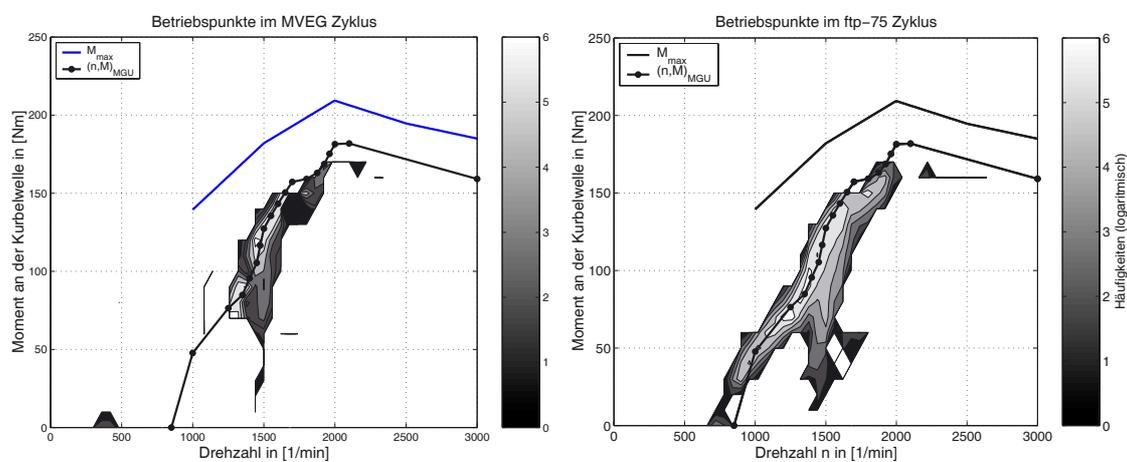


Abbildung 25: Logarithmisch skalierte Häufigkeiten für die Betriebspunkte im n-M Diagramm der MGU für einen NEFZ (links) und einen ftp-75 Zyklus (rechts). Erkennbar wird im ftp Zyklus eine höhere Bandbreite an Leistungen von der MGU gefordert, während der Schwerpunkt der Betriebspunkte sich im unteren Lastbereich befindet.

Der MGU-Controller aus Bild (19) koordiniert den Betrieb der MGU über die Freigabesignale für den Motor und den Generator sowie den Drehzahl- und Momentensollwert. Vom Antriebsmanagement wird er über einen Leistungssollwert und ein separates Start / Stop Signal angesprochen.

⁶⁴Der Verlustfaktor wird in Abschnitt 6.3 zusammen mit den Messungen des thermischen Verhaltens vorgestellt.

Die Ablaufsteuerung erfolgt wieder über einen Zustandsautomaten. Gestartet werden kann über den Anlasser oder den Generator. Der Leistungssollwert wird in einen Sollwert für die Drehzahl und den für das Moment aufgeteilt. Als Sollbetriebspunkte werden die Punkte auf der Trajektorie des optimalen Wirkungsgrades für die Kombination von TDi und Generator verwendet⁶⁵.

Die logarithmisch skalierten Häufigkeiten für die Betriebspunkte der MGU in der n-M-Ebene sind in **Bild (25)** einmal für einen NEFZ und für einen ftp-75 Zyklus aufgetragen. Eingetragen sind auch die Solltrajektorien und das Grenzmoment. Bei Leistungssprüngen und im dynamischen Betrieb ergeben sich durch die unterschiedlichen Zeitkonstanten von Motor und Generator die erkennbaren, mehr oder weniger deutlichen Abweichungen von der Ideallinie.

5.6 Kommunikation

Wie später auch im Prüfstand werden alle Steuerungssignale dezentral erfaßt und auf Kommunikationsbussen gesammelt. Dabei wird für jedes Teilsystem aus Bild (19) ein eigener Steuerungsbus verwendet. Sollen Signale auch in anderen Teilsystemen zur Verfügung stehen, wird eine Gatewayfunktion im zentralen Managementblock benötigt. Kommunikationsbedingte Totzeiten können über entsprechende Blöcke in der Simulation berücksichtigt werden.

5.7 Fahrer

Ein vollständiges Fahrermodell müßte in der Lage sein, eine gegebene Fahrtstrecke an verschiedene Charaktere anpaßbar zu befahren [269]. Solche Streckenmodelle lagen in der Abteilung ~~EMS~~ nicht vor. Stattdessen wurden in dieser Arbeit als Eingangsdaten Normzyklen als $v(t)$ Vektoren verarbeitet. Raum für individuellen Fahrercharakter bleibt dabei nicht. Der Fahrer wird daher über einen Geschwindigkeits PI-Regler nachgebildet. Ausgangsgröße ist ein Momentensollwert, der nicht in getrennte Signale für Gas- und Bremspedal zerlegt werden kann, da auch Bremsphasen enthalten sind, die beim konventionellen Pkw über einen geschleppten Motor realisiert sein können.

5.8 Antriebsmanagement

Aufgabe des Antriebsmanagement ist die Koordination der Antriebsteilsysteme. Dazu wertet die Vehicle Management Unit (VMU) den als Momentensollwert übergebenen Fahrwunsch und den Zustand der Teilsysteme aus.

Umgesetzt wird der Fahrwunsch über die dezentralen Steuergeräte in den beteiligten Einheiten die ein Netzwerk mit verteilter Steuer- und Regelungsfunktion realisieren. Im Betrieb werden dadurch die notwendigen Signale wo immer möglich lokal gehalten. Die Kommunikation mit übergeordneten Einheiten erfolgt nur da, wo verschiedene Subsysteme koordiniert werden müssen. Eine entsprechende Struktur findet sich auch im Toyota Prius [267] und wird zunehmend auch im industriellen Steuerungsbereich eingesetzt [268].

⁶⁵Die Optimallinie nur für den TDi war schon in Bild (12) dargestellt.

Vor dem Beginn der Fahrt muß zunächst der Antrieb aktiviert werden indem die Batterien zugeschaltet und das Spannungsniveau im Zwischenkreis eingeregelt wird. Diese Aufgaben übernimmt der DC/DC-Steller autonom. Zwischen dem Steuergerät und der VMU werden lediglich Freigabesignale ausgetauscht.

Der Traktionscontroller setzt den Fahrwunsch um und wird dazu mit dem Sollmoment angesteuert. Hier wird der Einsatz von Antrieb und Bremse in der beschriebenen Weise koordiniert. Die Regelung des Moments hingegen wird lokal im Antrieb selbst erledigt, der gegenüber dem Traktionscontroller als intelligenter Aktuator auftritt. Als wesentliche Zustandsrückmeldung wird die aktuelle Geschwindigkeit an die VMU zurück übertragen.

Das BMS überwacht die Batterie und liefert aktuelle Zustandsdaten wie die zulässige Leistung und den SOC.

Die MGU schließlich wird über den Leistungssollwert und das Start-/Stop-Signal angesteuert, die Betriebspunktwahl geschieht vor Ort im MGU-Controller. Die Regelung von Drehzahl und Moment erfolgt lokal in den intelligenten Aktuatoren Motor und Generator.

Als Aufgabe der Zentraleinheit des Antriebsmanagements verbleibt im Bereich des Energiemanagements letztlich die Entscheidung über den Betrieb der MGU und die angeforderte Leistung auf Basis der Informationen über die aktuelle Geschwindigkeit, den Fahrwunsch und den aktuellen Batteriezustand. Weitere Funktionen können Überwachungen und Auswertungen sowie Notfahrfunktionen sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in der VMU nur das Energiemanagement berücksichtigt. Die möglichen Varianten und der hier gewählte kostenbasierte Ansatz werden im Kapitel 7 vorgestellt.

6 Der Hybridprüfstand

Im seriellen Hybridantrieb werden Elektromaschinen als Antriebe und Generatoren, Verbrennungsmaschinen als Energiewandler in der MGU und Batterien als Speicher eingesetzt. Das sind jeweils Aufgaben, für die diese Komponenten grundsätzlich geeignet sind. Der Betrieb jeder dieser Komponenten, vor allem der Verbrennungsmaschine und der Batterien, weicht aber deutlich von dem ab, der in konventionellen Applikationen üblich wäre. So treibt der Motor keinen Antriebsstrang, bei dem der Betriebspunkt über Lastmoment also Luftwiderstand, Steigung und Beschleunigung (siehe Gleichung (6) auf Seite 21), Getriebeübersetzung und Fahrzeuggeschwindigkeit vorgegeben ist, sondern könnte in beliebigen Bereichen des Kennfelds betrieben werden. Tatsächlich wird er quasi vollständig stufenlos untersetzt in deutlich anderen Betriebsbereichen gefahren, als das beim konventionellen Antrieb der Fall ist. Der Motorbetrieb ist auch nicht mit einem Einsatz in einem stationären Stromerzeugungsaggregat zu vergleichen, da hier die Drehzahl über die Netzfrequenz fest liegt.

Für die Batterie gilt entsprechendes. Zwar speichert sie auch im Hybridantrieb Ladung, der Ladungshub ist bezogen auf die Kapazität aber vergleichsweise gering, insbesondere werden nicht notwendigerweise Skalierungspunkte wie die vollständige Entladung oder Ladung erreicht. Die Applikation von Elektromaschinen für Traktionsanwendungen hat dagegen, zumindest im Bahnbereich, lange Tradition. Für den Fahrzeugbereich gilt es hier vor allem, die Maschinen hinsichtlich Bauraum und Leistung zu optimieren und zu vertretbaren Kosten zu fertigen.

Entscheidend für das Verhalten des Antriebs, sowohl hinsichtlich der Emissionen als auch hinsichtlich des Verbrauchs ist das optimierte Zusammenspiel der Teilsysteme. In der Abteilung *EHS* der Universität Ulm wurde daher für eine in den Tabellen (7) - (9) im Anhang B beschriebenen Referenzplattform der Kompaktklasse ein Hybridantrieb im Labor aufgebaut. Soweit verfügbar wurden fahrzeuggeeignete Komponenten verwendet. Erweitert wurde der Triebstrang um die notwendige Meßtechnik, um das Verhalten der Komponenten unter den hybridtypischen Bedingungen testen zu können.

Im folgenden Abschnitt wird einführend der Grundaufbau des Prüfstands erläutert. Die Verknüpfung zwischen der Simulation aus dem vorhergehenden Kapitel und dem Prüfstand über die simulationsbasierte Applikation durch eine automatische Codeerzeugung behandelt Abschnitt 6.2. In den weiteren Abschnitten werden dann die dem Energiemanagement zugrundeliegenden wesentlichen Meßergebnisse vorgestellt.

6.1 Der Prüfstand als verteiltes System

Der Antriebsprüfstand stellt ein mechatronisches System dar, bestehend aus Maschinen, mechanischen Elementen, Antrieben und Steuerungen. Gegenüber dem Fahrzeugeinsatz steigt beim Prüfstand der Elektronikanteil durch die notwendige Meßtechnik. In erster Linie steht nicht die kostenoptimierte Umsetzung, sondern die im Betrieb erreichte größtmögliche Flexibilität im Vordergrund.

Aufbauend auf die Erfahrungen mehrerer vorher aufgebauter Maschinenprüfplätze wurde der Prüfstand für den Hybridantrieb aus den Einzelplätzen für die MGU, den Speicher und den Traktionsantrieb aufgebaut. **Abb. (26)** zeigt das Leistungsteil des Prüfstands, bestehend aus

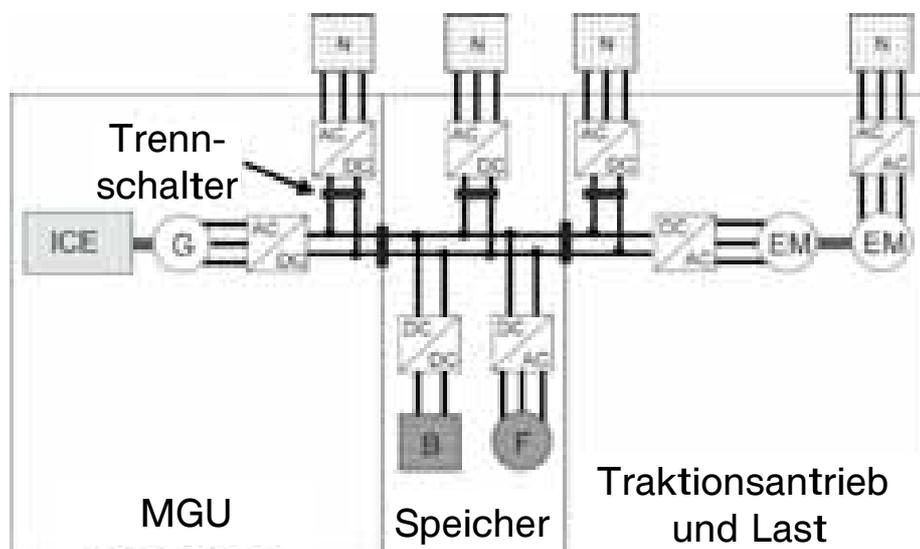


Abbildung 26: Leistungsteil des Hybridprüfstands bestehend aus den drei über den Zwischenkreis gekoppelten Teilprüfständen mit je einer zuschaltbaren Netzeinspeisung.

drei, über den Zwischenkreis gekoppelten trennbaren Einheiten. Die Traktionsmaschine steht nicht im Mittelpunkt der bisherigen Messungen, wurde aber integriert um, wie in der Simulation über Drehzahl und Moment auf dieselben Bilanzgrößen zurückgreifen zu können.

Jeder Teilprüfstand verfügt neben einem Leitreechner zur Visualisierung und Datenerfassung über ein Steuerpult mit Anzeigen und einem in der Abteilung entwickelten modularen Steuergerät auf μ Controller-Basis. Echtzeitkritische Überwachungen werden vom Steuergerät vorgenommen, während der PC lediglich Sollwerte vorgibt und die anfallenden Daten protokolliert.

Die Verbindung zwischen dem Leitreechner und dem Steuergerät wie zu den dezentralen Komponenten erfolgt über einen CAN-Bus⁶⁶. **Abb. (27)** zeigt den grundsätzlichen Aufbau aus drei vernetzten Einzelprüfplätzen, ergänzt um einen Zentralrechner und eine SPS für die Raumüberwachung. Als Protokoll wird auf allen CAN Bussen mit CANopen⁶⁷ ein industrielles Proto-

⁶⁶CAN: Controller Area Network. CAN, ein mehrmasterfähiges, serielles Bussystem, wurde 1986 von Bosch für automotiv Anwendungen vorgestellt. CAN verwendet ein zerstörungsfreies, prioritätsgesteuertes Buszugriffsverfahren. Die Definition von Bosch reicht bis zur zweiten ISO-Kommunikationsschicht, da das Nachrichtenformat und die Nachrichtenbehandlung definiert sind. Jede CAN Nachricht enthält im Standardformat 47 Bit an Verwaltungsdaten und bis zu 64 Bit an Nutzdaten. Der Zugriff auf den Bus erfolgt unsynchronisiert und wird über die am Anfang der Nachricht codierte, eindeutig zu vergebende Nachrichtennummer arbitriert [270] - [273].

⁶⁷CANopen, ein für den industriellen Einsatz definiertes Protokoll der Nutzergruppe CAN in Automation baut auf einer allgemeineren Protokollsammlung im CAN Application Layer ebenfalls von CiA auf und implementiert eine Applikationsschicht im ISO-Schichtenmodell. Im Gegensatz zur rein nachrichtenorientierten Kommunikation

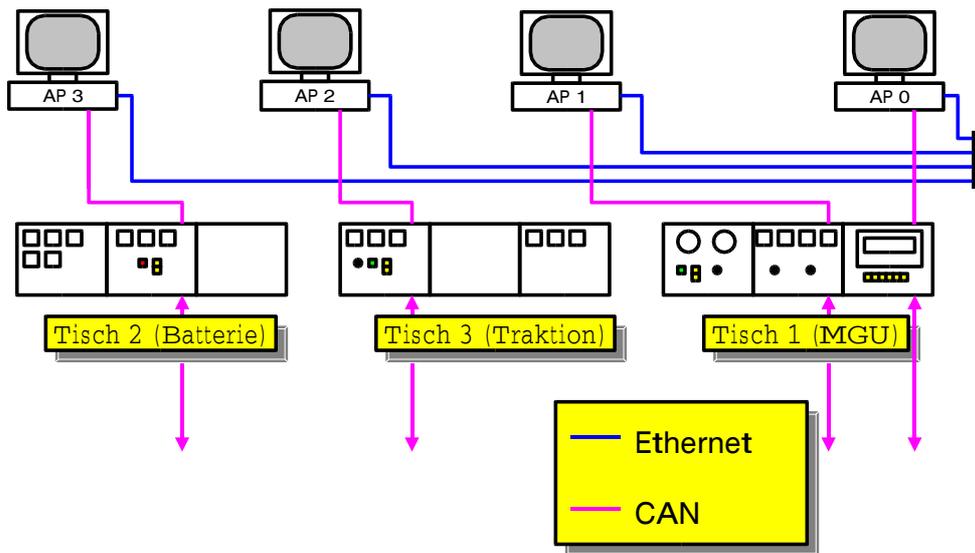


Abbildung 27: Struktur der Leitenebene des Prüfstands aus 3 Testplätzen mit zugeordneten Rechnern und dem Leitstand. Der Datenaustausch erfolgt über OPC Server für die angekoppelten Feldbusse.

koll verwendet, das gegenüber der reinen Basis CAN Implementierung auch eine Applikationsschnittstelle auf Layer 7 der ISO Protokollschicht vorsieht. Für CANopen stehen aus dem industriellen Bereich verschiedene Lösungen für dezentrale I/O Knoten oder intelligente Aktuatoren zur Verfügung. Nicht CANopen-fähige Geräte wie die aus dem automotiven Bereich entstammende Ansteuerung des Generators, können zum Teil trotzdem eingebunden werden.

Je ein PC unter Windows NT dient jeweils als Master im knotenorientierten CANopen Netzwerk. Als Applikationsschnittstelle wird zwischen den Feldbussen und den Visualisierungsumgebungen auf den verschiedenen Rechnern OPC⁶⁸ verwendet. Jedes CAN-Netzwerk wird dazu über einen CANopen-OPC-Server in das Gesamtsystem eingebunden. Wie in **Abb. (28)** angedeutet können Server von mehreren Clients angesprochen werden und Clients mehrere Server nutzen. Die Datenverarbeitung kann daher im Prüfstand auf Basis der OPC-Technologie sehr gut problemorientiert verteilt werden. Im Rahmen des Hybridprüfstands wird das in **Abb. (27)** gezeichnete Ethernet über die OPC-Mechanismen daher auch für die Gatewayfunktionen genutzt. OPC und die darauf aufbauenden Anwendungen laufen ohne eine Änderung am Kernel auf NT Systemen und sind daher nicht echtzeitfähig im Sinne garantierbarer Zeitschranken

der ursprünglichen CAN-Definition werden über das Protokoll Knoten anhand von Nummern unterschieden. Knoten gleichen Typs werden standardisiert angesprochen und die Zuordnung der CAN-Nachrichten zu Verwaltungsdiensten und zur Datenkommunikation festgelegt. In einem CANopen Netzwerk gibt es genau einen Masterknoten mit der Aufgabe der Netz- und Knotenverwaltung, wesentliche CAN Eigenschaften wie die Möglichkeit der 1 zu n Kommunikation von Daten bleiben trotzdem erhalten. Zusätzlich sind Mechanismen zum Transport längerer Datenpakete innerhalb einer 1 zu 1 Kommunikation im Protokoll enthalten [274],[275].

⁶⁸OPC: **O**LE for **P**rocess **C**ontrol: von Microsoft eingeführter Standard für die gemeinsame Nutzung von im Rechnernetz verteilten Komponenten über OLE. OPC Server bieten über eine standardisierte Schnittstelle Dienste wie z.B. Zugriffe auf Objekte an. Über OPC Master können verschiedenste Dienste gekapselt werden, typischerweise werden Feldbusse wie CANopen über einen zugeordneten OPC Master eingebunden. Clients können über den Master auf die dort bereitgestellten Objekte des zugrundeliegenden Diensts zugreifen, ohne einen speziellen Treiber für jeden der genutzten Dienste implementieren zu müssen [276],[277].

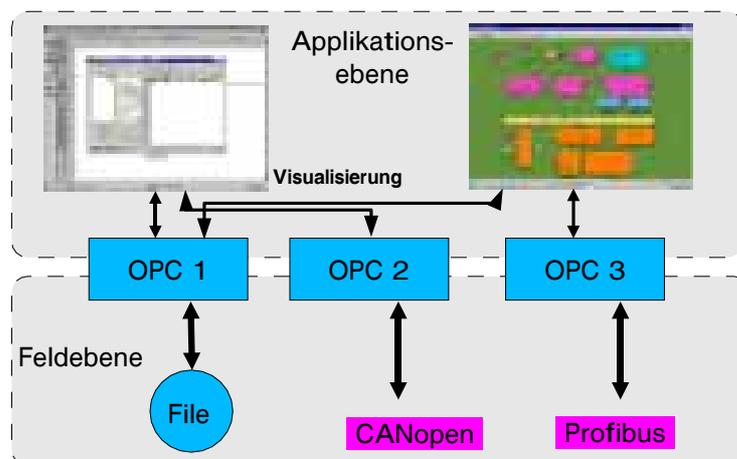


Abbildung 28: Zugriff auf unterschiedliche Dienste über zugeordnete OPC Server durch unterschiedliche, als Client auftretende Applikationen. Die Server und Clients können im Netz verteilt sein.

für eine Reaktion des Systems. Zeitkritische Aufgaben, wie die Überwachung von Systemzuständen innerhalb der drei Teilprüfstände, werden daher jeweils von dem parallel am Bus betriebenen Steuergerät auf μ Controller Basis übernommen. Die Überwachung und Steuerung der den Gesamtprüfstand betreffenden Versorgungsmedien wie Lüftung, Kühlung und Stromversorgung wird von einer SPS, ebenfalls mit dezentral geführten Ein- und Ausgängen, übernommen.

6.2 Simulationsbasierte Applikation

Die simulationsbasierte Applikation stellt einen wesentlichen Baustein in einer modellbasierten Entwicklungskette für elektronisch gesteuerte Geräte dar. Obwohl modellbasierte Systeme in der Prototyping- und Testphase schon länger eingeführt sind, stellt die modellbasierte Serienapplikation eine wesentliche Qualitätsänderung im Entwicklungsprozeß dar. Bislang wurden Steuergeräte aufgrund der speziellen Anforderungen an die Implementierung aufwendig von Hand codiert. Zusätzlich mußten Tests die Konsistenz von Implementierung und Spezifikation validieren. Abweichungen durch Restriktionen der Zielplattform konnten zu größeren Iterationen zurück in die Prototypingphase oder die Funktionsentwicklung führen.

Der Grund für die Beschränkungen liegt in der hohen Kostensensitivität des Serienprodukts angesichts der 5-6stelligen Gesamtstückzahlen und den hohen Sicherheitsanforderungen. Die mechatronischen Systeme müssen dabei bei gleichem Kosten-/Nutzen-Verhältnis mindestens die Qualität erbringen wie die gegebenenfalls abzulösenden mechanischen Varianten.

Ein weiterer Grund für die Handarbeit dürfte in der gewachsenen engen Verbindung liegen, die die Systemsoftware mit der Applikationssoftware in diesen tief eingebetteten Systemen eingeht. Wie auch im Luftfahrtbereich wurde hier bislang kaum auf die vielen Echtzeitbetriebssysteme unterschiedlichen Funktionsumfangs zurückgegriffen, sondern es wurden optimierte Laufzeitumgebungen mit wenig Standardfunktionalität verwendet [278].

Der steigende Elektronikanteil und die anstehenden Generationswechsel, weg vom bisher in Deutschland viel verwendeten Standardcontroller 80C167 von Infineon oder der 68k Plattform von Motorola, führt hier von zwei Seiten zu Veränderungen.

Einerseits unternimmt die Fahrzeugindustrie mit der Definition von OSEK⁶⁹ den Versuch, nicht nur ein einheitliches, ereignisgesteuertes und skalierbares Multitasking Betriebssystem für automotiv Anwendungen, sondern auch dessen Netzwerkschnittstelle zu definieren⁷⁰ [279],[280]. Andererseits kann die auf funktions- und signalflußorientierte Beschreibungen wie in Simulink aufsetzende Codeerzeugung nur auf Basis einer definierten Applikationsschnittstelle eine Codeerzeugung realisieren [282]. Für die Beschreibung und Implementierung der Systemsoftware sind derartige aus der Regelungstechnik stammenden Notationen ungeeignet. Eine definierte Applikationsschnittstelle kann daher die Trennung von Systementwicklung und Applikationentwicklung unterstützen und erlaubt eine, bis auf die Restriktionen der Rechenleistung hardware unabhängige Applikation mit oder ohne Codeerzeugung. Da das System und die Applikation auch getrennt getestet werden können, kann auch die Softwarequalität gesteigert werden [283].

Den Schlüssel für eine modellbasierte Implementierung mit automatischer Codeerzeugung stellt damit eben diese Applikationsschnittstelle dar; die Toolentwicklung wird weiter vereinfacht, wenn dieses API⁷¹ über ein einheitliches OS standardisiert ist [284],[285].

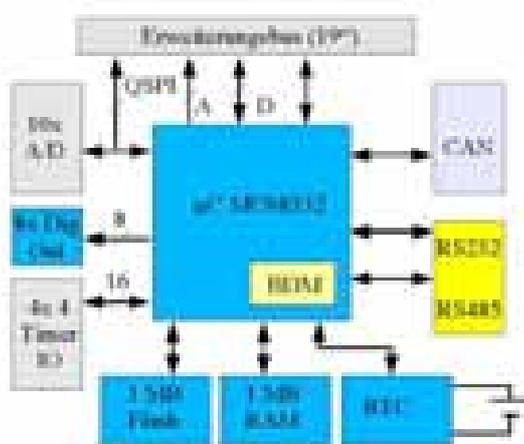


Abbildung 29:

SimControl MC68332 μ Controller Modul mit Erweiterungsbus, Speicher, Uhr, Timerbausteinen und Schnittstellen. Über den Erweiterungsbus kann das System mit IO-Karten im Europakarten-Format erweitert werden. Bislang sind Karten für digitale, potentialentkoppelte Ein- und Ausgänge sowie verschiedene Pegelwandler und Leistungstreiber für analoge Ein- und PWM Ausgänge inclusive der notwendigen Signalconditionierung und Pegelanpassung realisiert.

Der Prüfstand der Abteilung ~~ELAS~~ stellt kein Seriengerät im Sinne hoher Stückzahlen dar, sondern ist im Entwicklungs V eher als Prototyping Gerät einzustufen. Für die im Prüfstand verwendeten Steuergeräte gelten aber ähnliche Restriktionen wie für Kfz Seriensteuergeräte. Eingesetzt wird die in der Abteilung entwickelte, modular erweiterbare μ Controller Plattform

⁶⁹OSEK: Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kfz

⁷⁰Obwohl OSEK ein skalierbar echtzeitfähiges System implementiert, wird es im automobilen Bereich für sicherheitskritische Anwendungen in dieser Form nicht verwendet. Statt Echtzeitfähigkeit wird hier für verteilte X-by-Wire-Technologien vollkommene Synchronität gefordert. Für diese Anwendungen müssen daher sowohl neue synchrone Kommunikationsmechanismen als auch rein zeitgesteuerte Betriebssysteme entwickelt werden. Der Standard dafür heißt OSEKtime und stellt eine Art Zeitschleife mit zusätzlicher Laufzeitüberwachung dar. Der ereignisgesteuerte Teil von OSEK kann hier allenfalls als Hintergrundtask laufen [281].

⁷¹API: Application Programming Interface

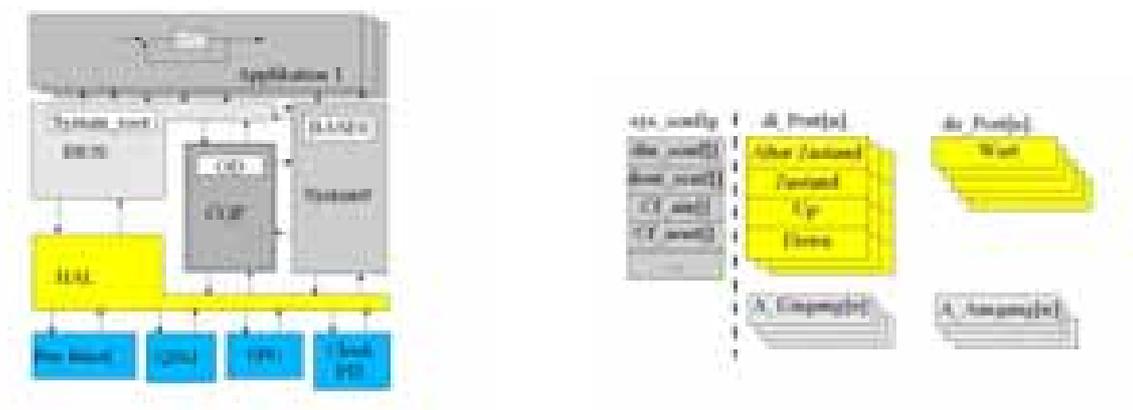


Abbildung 30: Systemaufbau des verwendeten Betriebssystems aus Hardware Abstraction Layer, BIOS, CAN Stack und Kernel Diensten. Die Applikation greift auf die konfigurierten Ein- und Ausgänge über abstrahierte Kanäle im rechts dargestellten API.

„SimControl“. Im Prüfstand werden Controllermodule auf Basis des MC68332 von Motorola mit 32 Bit Integereinheit verwendet. Die „natürliche“ Zahlendarstellung umfaßt damit 16 Bit in Festkommadarstellung. Der Speicherausbau umfaßt bis zu je 1 MB RAM und Flash ROM. Einen Überblick über das Modul gibt **Abb. (29)**.

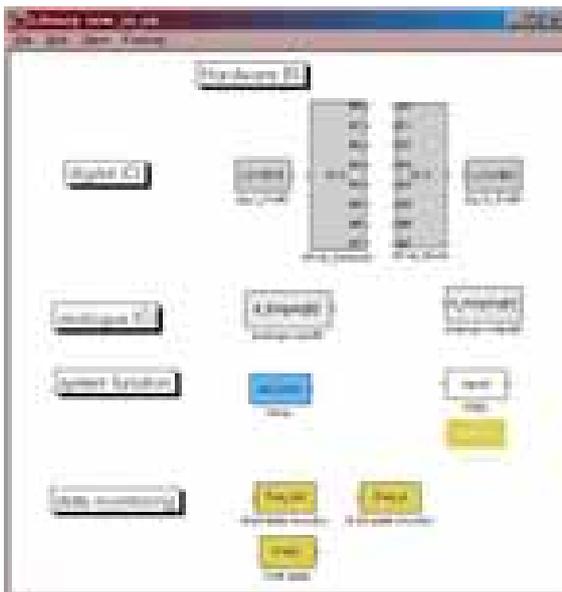
Für dieses System wurde schon in früheren, nicht modellbasierten Projekten ein ebenfalls skalierbares Echtzeitbetriebssystem entwickelt. Unterstützt werden Applikationen beginnend bei Systemen mit lediglich einer nicht zeitgetriggerten Hauptschleife bis hin zu mehreren in Tasks asynchron ablaufenden Prozessen. Als Netzwerkschnittstelle wird sowohl Layer 2 CAN als auch CANopen unterstützt. **Abb. (30)** zeigt den Aufbau des Systems mit den auf das System aufgesetzten Applikationen. Digitale oder analoge Ein- und Ausgänge sind durch eine zentrale Systemstruktur völlig abstrahiert, der Anwendungsprogrammierer muß über keine Detailkenntnisse bezüglich deren Realisierung verfügen. Dieser Systemaufbau bildet eine gute Grundlage für die Adaption der Codeerzeugung durch den Real-Time-Workshop von Simulink.

6.2.1 Anpassung an den RTW

Die Codeerzeugung des RTW ist über die Wahl einer Codeerzeugungsvariante skalierbar. Für die hier vorzustellende Anwendung wurde das sogenannte Embedded Target gewählt. Im Gegensatz zu anderen Varianten zielt das Embedded Target nicht auf Rapid Prototyping Applikationen oder eine beschleunigte Simulation, sondern auf eine möglichst effiziente Implementierung. Daher wird hier deutlich weniger Information über das System und seine Teile im Code mit hinterlegt⁷².

Eine weitere Einschränkung ist, daß beim Embedded Target keine quasikontinuierlichen Algorithmen wie z.B. „kontinuierliche“ PI-Regler unterstützt werden. Die Implementierung hat daher auch direkt auf Simulationsebene zeitdiskret zu erfolgen.

⁷²Ab der Release 12 von Matlab wird das Embedded Target vom Real-Time Workshop nicht mehr unterstützt, stattdessen ist das zusätzliche Paket Embedded Coder zu entstehen. Die zu beschreibende Anpassung arbeitet auch mit dem Embedded Coder, diese Erweiterung wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.



a) Hardware Blockset mit speziellen Blöcken für analoge und digitale IOs sowie speziellen Blöcken für systemnahe Implementierung.



b) Control Blockset mit Blöcken zur Abbildung von Meßumformern und optimierten, zeitdiskreten Festkomma Reglern.

Abbildung 31:

Während dies im Hinblick auf die nötigen Systemressourcen wünschenswert ist, muß bei der Wahl des Embedded Target zugleich für die Codeerzeugung aus selbst erstellten Simulationsblöcken ein Skript File für den Target Language Compiler (TLC) erstellt werden. In diesem File sind die während der Codeerzeugung einzufügenden Codeteile hinterlegt.

Die Integration anwenderspezifischer Blöcke in die Code Erzeugung wird durch das notwendige Script File zunächst erschwert, andererseits erweist sich die Scriptsteuerung als mächtiges Werkzeug, da sie nicht auf die Erzeugung von C-Code beschränkt ist. So wurden z.B. für Blöcke des Control Blocksets (Abb. 31,b) optimierte inline Assembler Implementierungen verwendet.

Struktur des erzeugten Codes Der aus der Simulation erzeugte, funktionsäquivalente Code des Embedded Target gliedert sich im wesentlichen in die Teile

- Initialisierung,
- Start,
- Step (Ausgabe und Update der Zustände),
- Terminate,

die jeweils in einer C-Funktion zusammengefaßt sind. Über ein an die jeweilige Systemsoftware angepaßtes Rahmenprogramm (`main()`) werden diese Teile an den passenden Stellen eingebunden.

Asynchrone z.B. an einen Interrupt anzubindende Teilsysteme und Applikationsteile mit unterschiedlichen Abtastzeiten werden durch die Codeerzeugung unterstützt.

Dazu werden die Teile mit identischen Abtastzeiten jeweils einer Task Id (`t_id`) zugeordnet. Das Kriterium für die Eingrenzung von Tasks stellt daher in erster Linie die Lokalität dar, da immer der Code für ein physikalisches System erzeugt wird und dann die gemeinsame Abtastzeit nach denen die Teile gesammelt werden⁷³. Der Übergang zwischen unterschiedlichen Abtastzeiten wird über Zwischenpuffer erzwungen. Durch die Anpassung an das System ist es daher möglich, Systemteile mit unterschiedlichem Zeithorizont in Tasks mit angepaßter Priorität ablaufen zu lassen oder spezielle Reaktionen für externe Ereignisse zu integrieren. Die Echtzeitfähigkeit bleibt daher auch mit der automatischen Codeerzeugung erhalten.

IO Bibliothek Die Kopplung zwischen dem erzeugten Code und dem System nach Abb. (30) erfolgt über die dafür entwickelten und in der I/O Bibliothek in **Abb. (31,a)** zusammengefaßten Blöcke.

Die Anpassung besteht jeweils aus einer C-Funktion, die in die Simulation integriert wird und dem restlichen Modell als Schnittstellenbeschreibung dient⁷⁴, und dem für die Code Erzeugung notwendigen Script File. So zeigt der folgende Ausschnitt beispielsweise die Einbindung eines analogen System Eingangs (`A_Eingang[Port_nr]`) an den Ausgang des dadurch realisierten Eingangsblocks `y`, den die TLC Funktion `LibBlockOutputSignal()` bereit stellt.

```
%function Outputs(block, system) Output
/* %<Type> Block: %<Name> (%<ParamSettings.FunctionName>) */
{
    %assign Port    = CAST("Unsigned", LibBlockParameterValue(P1,0))
    %assign y = LibBlockOutputSignal(0, "", "", 0)
    %%
        (System_config->cf_ain[%<Port>].Lesen) (%<Port>);
    %<y> = A_Eingang[%<Port>];
}
%endfunction %% Outputs
```

In der Bibliothek stehen auch Konverterblöcke zur Verfügung, die den hardware-orientierten Datentyp `BYTE` für digitale Ports in 8 Simulink `Boolean` Signale umsetzen, sowie Blöcke zum Zugriff auf Systemfunktionen, wie z.B. zur Kopplung ganzer Subsysteme an ein Interrupt-Signal.

Reglerbibliothek Für die Simulation von Systemen mit Festkomma Repräsentation kann für Simulink das Fixed Point Blockset als Option erworben werden. Durch die hier implementierten Blöcke wird eine skalierbare Zahlenrepräsentation unterstützt, die es ermöglicht, nichtganzzahlige Faktoren über die Wahl einer virtuellen Kommastelle zu emulieren. Dabei kann die Skalierung, ausgehend von einer Systemsimulation, automatisch optimiert werden.

⁷³Einen guten Überblick über die beim Entwurf von Echtzeitsystemen mit Nebenläufigkeiten eingesetzten Mechanismen und die Kriterien der Organisation und CASE Tools, bietet T. Hüsener [286].

⁷⁴Dieser Schnittstellenblock wird in Simulink als sogenannte S-Function integriert. Während der offline Simulation und für die Codeerzeugung beschreibt sie lediglich Anzahl und Typ der Ein- und Ausgänge

Da dabei allerdings letztendlich jeder Block mit einer anderen, für sich optimalen Zahlendarstellung betrieben werden könnte, können bei Verwendung dieser Blöcke relativ viele Skalierungen anfallen.

Hier wurde daher ein abweichender Weg über eigene Festkommaintplementierungen gegangen. Dazu wurden optimierte diskrete Filter 1. und 2. Ordnung mit normierten Koeffizienten:

$$\frac{a_2 z^2 + a_1 z + a_0}{z^2 + c_1 z + c_0} \quad \text{und} \quad \frac{a_1 z + a_0}{z + c_0} \quad (21)$$

implementiert und im Control Blockset, **Abb. (31,b)**, zusammengefaßt. Die a_ν, c_μ sind für stabile und minimalphasige Filter auf $|a_\nu, c_\mu| < 2$ begrenzt [287], S 199ff.

Dabei wird davon ausgegangen, daß alle analogen Eingangs- und Ausgangssignale linksbündig mit 16 Bit Auflösung vorliegen. Überschreitungen des Zahlenbereichs können zur Laufzeit abgefangen bzw. während der Simulation gemeldet werden, so daß hier mit geringerem Skalierungsaufwand ebenfalls eine Reglerauslegung ohne dynamische Bereichsüberschreitungen erfolgen kann.

Im Control Blockset sind zudem noch ein optimierter Akkumulator, ein Block für die Multiplikation eines Signals mit einem fraktalen Faktor ($1 > k \geq -1$) sowie Blöcke zur Abbildung von realen Signalwandlern (Transducer) innerhalb der Simulation enthalten.

Die Erzeugung des ablauffähigen Programms aus dem vom RTW erzeugten Code erfolgt über ein makefile, das einmalig an den Targetcompiler anzupassen ist. In diesem Schritt können auch weitere Code Module und Systembibliotheken hinzugebunden werden.

Vor der Codeerzeugung muß dann noch für jedes zu realisierende Gerät ein Code Generation Framework erstellt werden, das die der realen Umgebung entsprechenden Eingänge und Ausgänge durch die Blöcke des Hardware Blocksets beschreibt. In **Abb. (32)** ist beispielhaft das Framework für den Controller des DC/DC-Converters im Speicherblock des Antriebs dargestellt [162]. In dieses Framework wird dann der in der Systemsimulation entwickelte Reglerblock einkopiert, die gewünschte Variante der Codeerzeugung gewählt und der Prozeß gestartet.

6.2.2 Applikation am Prüfstand

Von den in Kapitel 5 beschriebenen Steuergeräten sollten im Prüfstand der Traktionscontroller, der MGU-Controller, der DC/DC-Steller und zusätzlich ein Koordinator für den Speicherbereich modellbasiert realisiert werden. Das BMS war bereits separat entwickelt worden.

Zunächst waren dazu deren Funktionalität und die Schnittstellen einzugrenzen. Im Gegensatz zu objektorientierten Verfahren der Taskkommunikation, wie sie bei verteilten, komponentenbasierten Systemen wie dem Prüfstand auf der Leitebene verwendet werden, aber mit dem CAN Application Layer oder Real-Time CORBA auch für verteilte Steuergeräte vorgeschlagen werden [288], erfolgt die Kommunikation zwischen den im Gesamtmodell abgebildeten Funktionsblöcken hier rein auf Basis von regelungstechnischen Signalen. Als Schnittstelle kann dafür sowohl CAN Layer 2 als auch CANopen verwendet werden. Aufgrund der Einbindung über die OPC Server wurde der CANopen Stack gewählt.

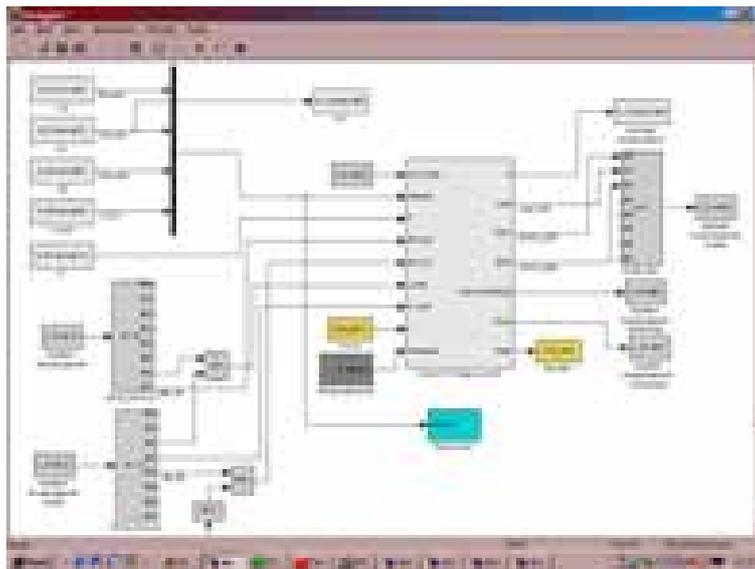


Abbildung 32: Codegeneration Framework für die ECU des DC/DC-Converters mit einkopiertem Reglerblock

Die Zuordnung der Aufgaben zu den Steuergeräten erfolgte manuell in der Systemsimulation nach dem Kriterium der Lokalität, d.h. um die Kommunikation zu entlasten, sollten die Signale jeweils möglichst vor Ort verarbeitet werden. Nur wo dies nötig war, wurden Signale auch über den Bus kommuniziert. Die so zugeordneten Funktionen wurden in der Simulation innerhalb eines Subsystems gesammelt und diese Subsysteme über je ein Code Generation Framework in lauffähigen Code umgesetzt.

Die wesentliche Änderung gegenüber der manuellen Implementierung ist die komplett entfallende Fehlersuche im Quelltext. Eingesetzt wird im Entwicklungsprozeß eine Stufe höher. Aufbauend auf eine getestete Codeerzeugung verlagert sich die Fehlersuche von der Code- auf die Funktionsebene. Statt C-Formulierungen müssen Signalverläufe evaluiert werden, was entsprechende Diagnosemöglichkeiten voraussetzt. Im Prüfstand wurden dazu freie Ein- und Ausgänge, lokal und über den CAN Bus verwendet.

Diese automatisierte Applikation wird nun auch im sensiblen Bereich der Pkw-Steuergeräte zunehmend verwendet, die Applikationsberichte stammen bisher allerdings hauptsächlich von Testfahrzeugen aus Hybridentwicklungen [289].

6.3 MGU Prüfplatz

Als Vorarbeit für das Energiemanagement war durch Messungen am MGU Prüfstand zu klären, wie schnell die MGU gestartet werden kann, mit welcher Dynamik sie auf der Trajektorie betrieben werden kann und wie das Abgasverhalten des Motors dabei aussieht.

Neben dem Motor und dem Generator enthält der Prüfplatz dazu ein Motordiagnosegerät, um interne Parameter und Meßwerte der Fahrzeugelektronik auswerten zu können, eine Kraftstoffwaage, einen Abgas-Tester und mehrere diskrete Sensoren für Strom, Spannung, Druck, Temperatur und Moment. Diagnosegerät, Kraftstoffwaage und Abgas-Tester sind mit CAN zu RS232

Protokoll- und Schnittstellenumsetzer an den CAN Bus angeschlossen, die Leistungselektronik des Generators verfügt selbst über einen CAN Anschluß und die diskreten Sensoren wurden über dezentrale Busklemmen erfaßt. Das E-Gas des Dieselmotors wird über eine analoge Ausgangsklemme angesteuert. Alle Meßwerte sind daher am CAN Bus verfügbar und können über die OPC Server im gesamten Prüfstand genutzt werden. Einen Überblick über die Struktur des MGU-Prüfplatz gibt die **Abb. (60)** im Anhang D.1.

Das Tischsteuergerät enthält neben dem Anteil für den MGU-Controller aus der Simulation auch noch Teile der Interaktion und der Visualisierung am Meßpult. Die Ansteuerung erfolgt entweder über getrennte Sollwerte für Moment und Drehzahl während der statischen Messungen oder über einen Leistungssollwert.

Die Motor-Generator-Einheit ist in einem schallgekapselten Raum mit Abgasabsaugung und Luftkühlung aufgebaut. Die Luftströmung ist so angeordnet, daß die Kühlung im Fahrzeug möglichst gut nachgebildet werden kann, und kann in mehreren Stufen variiert werden. Eine Klimatisierung der Zuluft ist nicht vorgesehen, so daß winterliche Start- und Betriebsbedingungen auch nur bei entsprechenden Umgebungsbedingungen realisiert werden können.

6.3.1 Thermoverhalten

Ein wesentlicher Einflußfaktor auf den Verbrauch und die Emissionen des Dieselmotors ist die Betriebstemperatur. Über Aufwärm- und Abkühlversuche wurde ein einfaches Temperaturmodell für den Motor entwickelt.

Der Temperaturverlauf, die Abgase, der abgegebene Strom und die Spannung wurden für verschiedene Teillastbetriebspunkte gemessen. Abgesehen vom Start sind durch den verwendeten Oxidationskatalysator beim statischen Betrieb auch während der Kaltphase alle Abgaskomponenten unkritisch und fallen bis auf die Stickoxide schnell unter die Nachweisgrenze der verwendeten Meßtechnik.

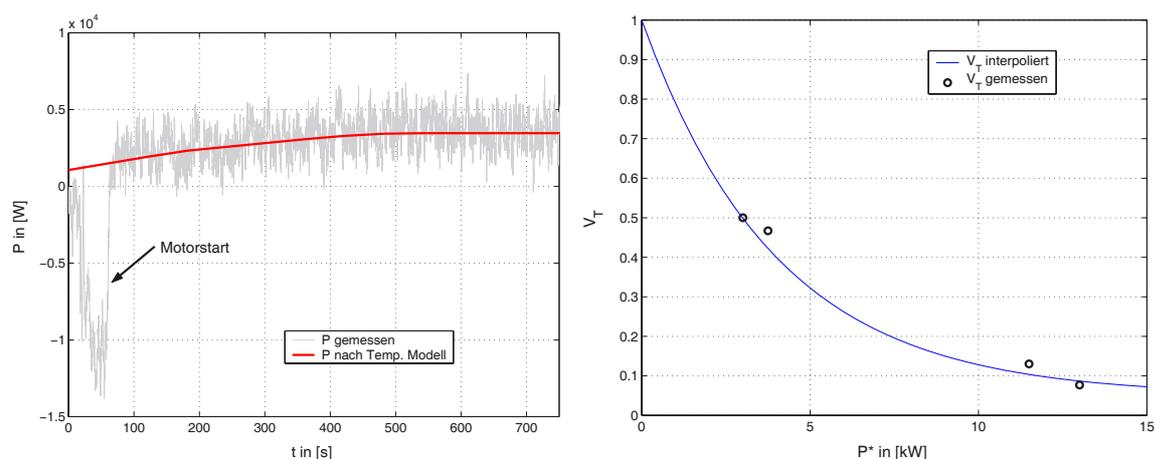
Der Motor erreicht die Kühlwasserbetriebstemperatur $T_W \geq 88^\circ C$, je nach Lastpunkt, wenn zwischen 1 kWh und 1,2 kWh elektrisch abgegeben wurden. In **Abb. (33,a)** ist für $P^* = 3 \text{ kW}$ der Verlauf von gemessener und über den Temperaturverlauf geschätzter Leistung über der Zeit aufgetragen. Erkennbar steigt bei konstanter Einspritzmenge die abgegebene Leistung mit der Zeit. Der Anstieg entspricht exakt dem Anstieg der Kühlwassertemperatur. Durch den kalten Motor treten demnach Zusatzverluste auf. Die abgegebene Leistung kann als:

$$P_{MGU}(T_W, n, M) = P_{MGU}(T_{warm}, n, M) \left(1 - V_T(n, M) \frac{T_{warm} - T_W}{T_{warm} - T_{kalt}} \right) \quad (22)$$

mit dem thermischen Verlustfaktor V_T , den Ecktemperaturen $T_{warm} = 88^\circ C$ und T_{kalt} und der Nennleistung $P_{MGU}(T_{warm}, n, M)$ des betrachteten Betriebspunkts beschrieben werden.

Die MGU wird im Serienhybrid auf einer Trajektorie mit einer eindeutigen Zuordnung von $P^* \rightarrow n, M$ betrieben, so daß die Gleichung vereinfacht werden kann. Wenn für T_W $P_{MGU} = P^*$ gilt, erhält man:

$$P_{MGU}(T_W, P^*) = P^* * \left(1 - V_T(P^*) \frac{T_{warm} - T_W}{T_{warm} - T_{kalt}} \right) \quad (23)$$



a) Verlauf der gemessenen, elektrisch abgegebenen Leistung während eines Warmlaufs bei 1750 1/min und 10 mg/Hub Einspritzmenge. Die Sollleistung P^* ist knapp 4 kW.

b) Beobachtete und interpolierte Verlustfaktoren V_T in Abhängigkeit von der angeforderten Leistung.

Abbildung 33:

Der Anfangsverlust durch den kalten Motor ist von der gewünschten Leistung (P^*) abhängig und wurde vermessen. Der Verlustfaktor des kalten Motors V_T wurde für den Teillastbereich mit $P^* < 15 \text{ kW}$ bestimmt und ist in **Abb. (33,b)** dargestellt. Während der Verlust bei $P^* = 5 \text{ kW}$ und $T_W = 20^\circ \text{C}$ noch 30% beträgt, fällt er bei Leistungen über 10 kW kaum mehr ins Gewicht.

6.3.2 Stationäres Abgasverhalten

Das im Prüfstand eingesetzte Abgastestgerät wurde von BOSCH für gesetzlich vorgeschriebenen Abgastests im Werkstattbereich entwickelt. Gemessen werden die Abgaskomponenten Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Sauerstoff in % und Kohlenwasserstoffe bzw. Stickoxide in ppm. Zusätzlich wird λ bestimmt. Das Gerät kann für Dieselabgase verwendet werden, wenn es mit einem Rußfilter versehen wird. Eingebunden ist es über einen Protokollumsetzer, der das aufwendige Klartextprotokoll in eine einfache Signalkommunikation auf dem CAN Bus übersetzt. Prinzipbedingt sind mit dem Gerät keine absoluten Messungen z.B. in g/kWh möglich. Im Gegensatz zur Messung mit einer CVS Anlage⁷⁵ können aber auch dynamische Tests mit qualitativen Aussagen gefahren werden.

Statisch sind beim verwendeten Dieselmotor lediglich die Ruß- und die Stickoxidemissionen relevant. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid treten bei Dieselmotoren aufgrund der fast vollständigen Verbrennung weniger auf und werden zusätzlich über einen Oxidationskatalysator konvertiert. Die aufgenommenen Kennfelder für die relativen Anteile der Stickoxide und des Sauerstoff sind in **Abb. (34)** im n,M Kennfeld des Motors aufgetragen. Insbesondere die Messung der Stickoxidanteile ist allerdings problematisch, da diese von der Temperatur des Motors abhängen, die wiederum von der externen Luftkühlung abhängt.

⁷⁵CVS: Constant Volume Sampling. Hier wird während der Messung ein Teil des Abgases entnommen und in einen Volumenstrom so eingeleitet, daß ein konstanter Durchsatz entsteht. Aus der Abgaskonzentration in den Sammelbeuteln kann auf die insgesamt ausgestoßene Menge geschlossen werden.

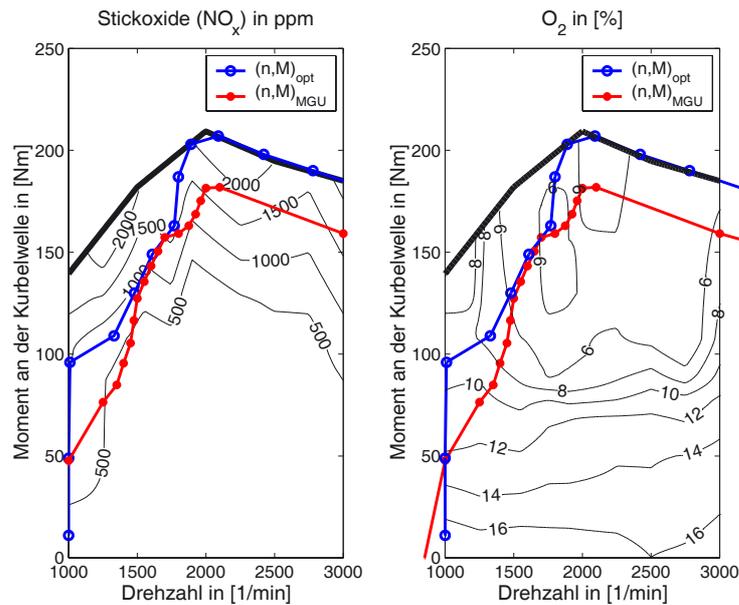


Abbildung 34: NO_x -Emissionen und O_2 Anteil im n,M Kennfeld

Der im Abgas immer vorhandene Sauerstoffanteil kennzeichnet den mit deutlichem Luftüberschuß betriebenen Dieselmotor und verhindert den Einsatz herkömmlicher 3-Wege-Katalysatoren für die Konversion der Stickoxide. Wie bereits aus der Literatur bekannt ist, weist der Dieselmotor bei hoher Belastung, nahe an der Momentengrenze, besonders hohe Anteile an Stickoxiden auf [209],[217]. Würde der Motor daher dauerhaft an der Momentengrenze betrieben, was aus Wirkungsgradgesichtspunkten sinnvoll wäre, wie die in Abb. (34) mit eingezeichnete Trajektorie des optimalen TDi-Wirkungsgrades zeigt, würden relativ hohe Werte für die Stickoxid-Emissionen erreicht. Um dies zu verhindern, wird für den dynamischen Betrieb des Motors die zweite eingezeichnete Trajektorie verwendet, die gerade außerhalb der kritischeren Bereiche verbleibt.

6.3.3 Motordynamik

Die Dynamik der MGU ist entscheidend für die Auslegung der Speicher und im verwendeten Modell hauptsächlich über die Zeitkonstanten des TDi für steigendes bzw. fallendes Moment modelliert. Diese beiden Zeitkonstanten können betriebspunktabhängig sein, da die Momentbildung des Dieselmotors vom Ansprechen des Turboladers und den Verzögerungen in der Luftzuführung abhängt. Diese versorgungsbedingten Verzögerungen werden bei allgemeineren Modellen für den Dieselmotor wie bei Ch. Körner explizit berücksichtigt [46]. Im hier verwendeten Modell wird nur je eine feste Zeitkonstante für jedes Vorzeichen von dM vorgesehen, die am Prüfstand über eine Sprunganregung identifiziert wurde. In Abb. (35) sind der gemessene Strom und der simulierte Strom für einen Ausschnitt des Versuchs aufgetragen. Der TDi wurde abwechselnd mit einem Sollwert von 0 mg/Hub Einspritzmenge, entsprechend einem Schubetrieb, und 20 mg/Hub von maximal möglichen 37 mg/Hub angesteuert. In der linken Hälfte ist die Drehzahl dabei konstant mit $n_1 = 2000$ 1/min. Zum Zeitpunkt $t = t_1$ wird der Drehzahlsollwert bei konstanter Einspritzmenge je Hub auf $n_1 = 2500$ 1/min erhöht. Die simulierte

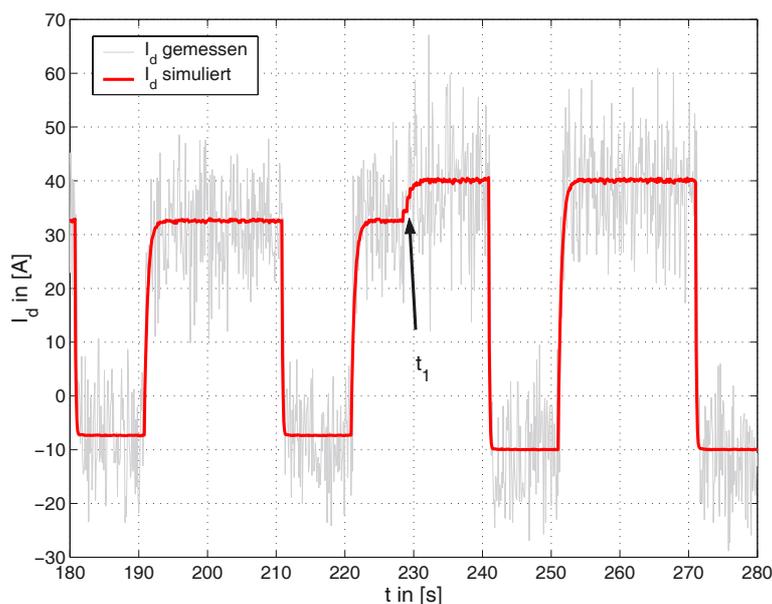


Abbildung 35: Simulierte und gemessene Dynamik der MGU beim Sprung aus dem Schubetrieb auf 20 kW bzw. 25 kW.

und die gemessene Leistung folgen dem ohne Einbruch, die sehr hohe Übereinstimmung der modellierten mit der beobachteten Zeitkonstante ist gut erkennbar. Gewählt wurden:

- für $dM > 0$: $T_{TDi} = 0,5 \text{ s}$,
- für $dM < 0$: $T_{TDi} = 0,1 \text{ s}$.

Dieses Verhalten ist beim Dieselmotor plausibel, da er insbesondere im Teillastbereich mit deutlichem Luftüberschuß betrieben wird und so auch bei Drehzahlsprüngen noch nicht in den Bereich fetter Gemische gelangen muß.

Zusätzlich kann die bis auf das, durch die Leistungselektronik im Prüfstand verursachte, starke Rauschen im gemessenen Signal gute Übereinstimmung zwischen erwartetem und gemessenem Strombetrag verifiziert werden.

Der Start der MGU ist während des Zyklus gemessen bzw. simuliert in **Abb. (36)** dargestellt. Im Prüfstand fällt hier die deutliche Verzögerung gegenüber der simulierten Startzeit auf. Diese ist bedingt durch die unvollkommene Emulation des Pedalwertgebers, durch die deutlich über eine Sekunde benötigt werden, um durch einen kurzen Spannungspike das E-Gas zu aktivieren. Das erklärt zum Teil auch den hier zu beobachtenden zweiten Leistungseinbruch bei der spontanen Beschleunigung von der Leerlaufdrehzahl $n_0 = 800 \text{ 1/min}$ auf die Betriebsdrehzahl bei $n_1 = 1750 \text{ 1/min}$, da der Motor durch das Steuergerät offensichtlich noch nicht angesteuert worden war. Der Übergang in **Abb. (35)** war sanfter, außerdem war hier der Motor schon gestartet, weshalb bei diesem Versuch kein Einbruch zu beobachten war. Für Motoren mit besser angepaßtem E-Gas sollte die Abweichung zum simulierten Startverhalten wesentlich geringer ausfallen.

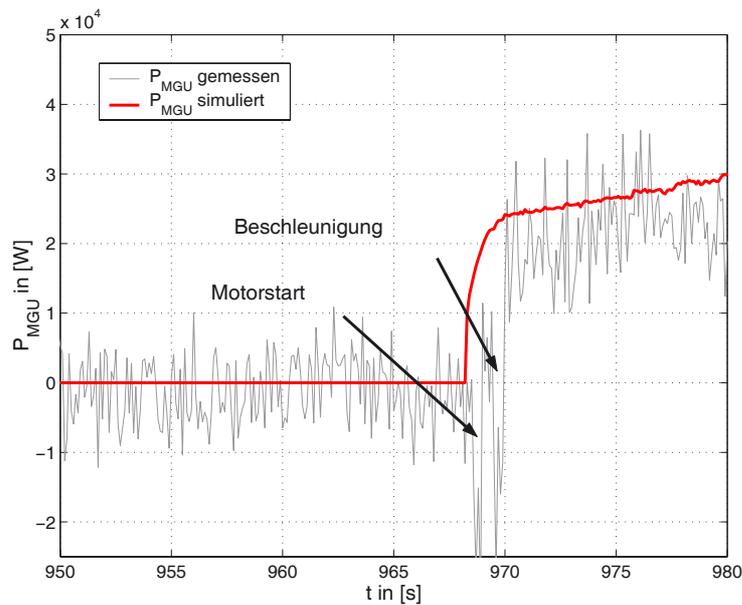


Abbildung 36: Start der MGU über den Generator im Zyklus.

6.4 Speicher Prüfplatz

Neben dem Leitrechner und dem Tischsteuergerät enthält der Speicherbereich gegenwärtig den DC/DC-Steller und ein BMS aus einem Master- und drei Slave-Knoten entsprechend den Abbildungen (19) und (27).

DC/DC-Steller Der DC/DC-Steller koppelt die Batterie an den Zwischenkreis hoher Spannung. Der zulässige Batteriestrom muß unter die Sättigungsgrenze der Längsinduktivität des Stellers (siehe Abb. (22) auf Seite 67) auf 150 A begrenzt werden. Die Nennleistung des Traktionsspeichers beträgt damit bei der verwendeten Batterie mit $U_{B,0} = 15 * 12,4V = 186 V$: 28 kW.

Der Spannungsbereich für die Batterie ergibt sich nach oben neben der Bedingung $U_d > U_B$ aus wirtschaftlichen Überlegungen. Nach oben ist U_B über die Kostenabwägung zwischen den Mehrkosten für die Batterie bzw. denen des Stellers begrenzt, da bei hohen Spannungen U_B auf den Steller ganz verzichtet werden kann. Nach unten ist er über die notwendige Stellreserve begrenzt, da der DC/DC-Steller bei großem $\Delta I'_B < 0$ die Klemmenspannung ausreichend absenken können muß, dabei aber auf $U_{out} > 0$ begrenzt ist.

Hauptbestandteile sind neben der Induktivität ein IGBT Leistungsmodul, ein Trennschütz, um die Batterie im Ruhezustand vom Zwischenkreis abzukoppeln, und die Steuerelektronik auf Basis von SimControl.

Die Induktivität begrenzt die Oberschwingungen aber auch die Dynamik, sie ist daher entsprechend der gewünschten Grenzfrequenz in Abhängigkeit vom Innenwiderstand der Batterie auszulegen. Die maximale Leistungsänderung an der Batterie liegt über die Zeitkonstante $T = L/R_i$ des Verzögerungsglieds 1. Ordnung aus Batterieinnenwiderstand und der Spannungsreserve fest bei:

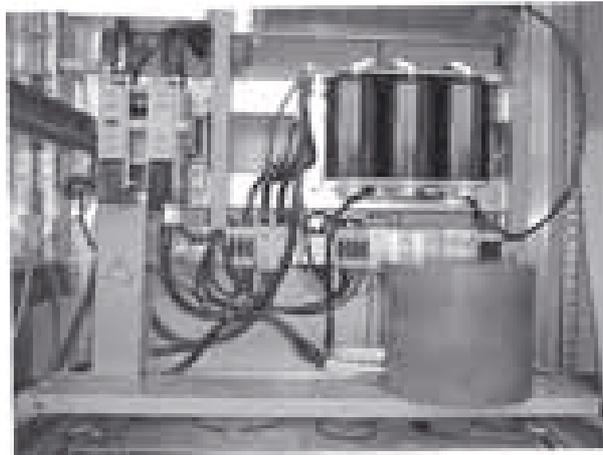


Abbildung 37: Aufbau des 30 kW DC/DC Stellers im Schaltschrank ohne Verkleidung.

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} \leq \frac{\Delta I U_0}{\Delta t} \leq \frac{\frac{\Delta U \Delta t}{L} U_0}{\Delta t} = \frac{U_{out,max} - U_B}{L} U_0 \quad (24)$$

bzw. nach Stromrichtungen getrennt:

$$\Delta P > 0 \quad \frac{\Delta P}{\Delta t} \leq \frac{U_{out,max} - U_B}{L} U_0 = \frac{414 \text{ V}}{1,7 \cdot 10^{-3} \text{ H}} 186 \text{ V} = 45 \text{ kW/ms} \quad (25)$$

$$\Delta P < 0 \quad \frac{\Delta P}{\Delta t} \leq \frac{U_B}{L} U_0 = \frac{186 \text{ V}}{1,7 \cdot 10^{-3} \text{ H}} 186 \text{ V} = 20 \text{ kW/ms} \quad (26)$$

Die Regelung des DC/DC-Stellers wurde modellbasiert appliziert, das Codegeneration Framework ist in Abb. (32) dargestellt. Der zentrale Reglerblock ist identisch in der Antriebssimulation enthalten [290]. Der nach dem symmetrischen Optimum ausgelegte Spannungsregler erweist sich als sehr sensibel bezüglich des Parameters C_d , eine Identifikation steht noch aus⁷⁶.

Die Taktfrequenz des DC/DC-Stellers beträgt 10 kHz. Sein Wirkungsgrad wurde vermessen. Bei Nennlast liegt er bei 97%, für Leerlauf geht er gegen 0, bei 10 kW werden noch 95% erreicht [162].

Für die Integration in einen automobilen Antriebsstrang müsste der in **Abb. (37)** abgebildete DC/DC-Steller hinsichtlich der Nennleistung sowie bezüglich des Bauraums und des Gewichts optimiert werden.

Im Prüfstand kann der DC/DC-Steller entweder alleine stromgeregelt oder im Antriebsverbund spannungsstabilisierend betrieben werden. Im stromgeregelten Betrieb stabilisiert eine der Netzeinspeiseeinheiten die Zwischenkreisspannung auf 640 V. Im zusammenhängenden Antriebsbetrieb sind die Verbindungen zwischen Netz und Antriebszwischenkreis offen und der DC/DC-Steller regelt U_d .

Die gegenwärtig noch laufenden Zyklentests für die Gesamtbatterie erfolgen stromgeregelt. Das Gerät erweist sich dabei bislang als störsicher und unauffällig.

⁷⁶Einstellregeln für Regelkreise mit unterschiedlichem Streckentyp finden sich in [291].

BMS Das BMS ist in Master-Slave Architektur aus drei Slave Knoten und dem Master, angeschlossen an den CAN Bus, aufgebaut. Alternative Architekturen mit einem lokalen BMS Bus, bei der nur der Master an den Speicherbus angeschlossen ist, scheitern am bisher nicht vorhandenen 2ten CAN Anschluß des Masters [292].

Die Slave Knoten erfassen über je 4 galvanisch getrennte Eingangskarten bis zu 32 Zellenspannungen $U_i \leq 5 V$. Der Gesamtspannungsbereich je Eingangskarte ist auf 25 V begrenzt. Bei der verwendeten Bleibatterie können damit je Karte 2 Blöcke erfaßt werden, Zellenspannungen stehen hier nicht zur Verfügung. Zusätzlich werden je Slave bis zu 8 Temperaturen erfaßt. Die Abtastzeit für alle Spannungen eines Knotens beträgt im BMS 10 ms.

Bereits in den Slaves werden die Einzelspannungen und die Temperaturen auf Minima und Maxima sowie auf Grenzwerte ausgewertet. Der Masterknoten faßt diese Informationen der Slaves zusammen. Über die zusätzlich gemessene Gesamtspannung und den Gesamtstrom werden die umgesetzten Ladungs- und Energiemengen bilanziert und an den Leitstand kommuniziert. Die Auswertung erfolgt dort innerhalb der Visualisierungsumgebung und als Anzeige am Tisch.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden für das Energiemanagement die von P. Seger ermittelten, SOC-abhängigen Innenwiderstände für die verwendeten Optima VRLA 40 Ah Batterien nach [199] verwendet.



Abbildung 38: Sternpunkt der faseroptischen CAN Anbindung der BMS Knoten.

Im Betrieb wurde die CAN Anbindung des BMS über die getaktete Ansteuerung der Batterie durch den DC/DC-Steller stark gestört. Statt des genormten elektrischen CAN-physical-Layer wurde im Speicherbereich ein optischer CAN mit polymeroptischen Fasern und Treibern aus der Audiotechnik entwickelt. Realisiert wurde so eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit gemeinsamen Sternpunkt für alle 4 BMS Knoten.

Der Sternpunkt ist beispielhaft in **Abb. (38)** abgebildet. Für jede Datenrichtung wird eine eigene Faser verwendet; über die Treiberbausteine mit TTL Interface gelingt die Integration mit sehr wenigen zusätzlichen Bausteinen.

Die Gesamtstruktur des Speicherbereichs findet sich in **Abb. (61)** im Anhang D.2.

6.5 Traktions Prüfplatz

Am Traktionsprüfplatz sind die in Frage kommenden Antriebsmaschinen hauptsächlich hinsichtlich des Wirkungsgrades, aber auch bezüglich der Dynamik zu untersuchen.

Gegenwärtig werden zwei baugleiche Setec Asynchronmaschinen mit Grenzmomenten nach Abb. (16) als Traktions- bzw. als Lastmaschine eingesetzt. Angesteuert werden sie über je einen Industrieumrichter mit feldorientierter Regelung.

Die Umrichter werden vom Tischsteuergerät über den CAN mit Freigabesignalen und den Momenten- und Drehzollsollwerten angesteuert.

Für die Lastsimulation mittels der zweiten Maschine wurde die Systemsimulation in Anlehnung an eine Beschreibung von Z.H. Akpolat, G.M. Asher und J.C. Clare um das Modell für die zweite, jetzt drehzahlgeregelte Maschine erweitert und das notwendige Ersatzmodell für die nichtlineare Last abgeleitet [293],[294]. Die Umsetzung im Prüfstand erfolgte im Rahmen dieser Arbeit noch nicht.

Zusätzlich zu den in den Umrichtern gebildeten Istwerten für die Drehzahl und das Moment stehen je ein diskreter Sensor für den Zwischenkreisstrom des Traktionsumrichters und für das Moment zur Verfügung.

Auf Basis der Daten dieser beiden Sensoren wurde der Antrieb aus Umrichter und Maschine im Grunddrehzahlbereich vermessen. Die dabei aufgenommenen Wirkungsgradflächen für generatorischen und motorischen Betrieb finden sich bei Ch. Körner [46]. Maximal werden Systemwirkungsgrade von 88% erreicht, ein im Teillastbereich durch reduziertes Feld optimierter Betrieb wurde ebenfalls noch nicht implementiert.

Aufgrund dieser Einschränkung wird in der Antriebssimulation die Wirkungsgradfläche einer optimierten 66 kW ASM eines Industriepartners verwendet.

6.6 Prüfstandsbetrieb

Die beschriebenen Teilprüfstände für die MGU, den Speicher und den Traktionsantrieb des seriellen Hybrids sind so ausgelegt, daß sie separat, aber auch kombiniert als Gesamtantrieb betrieben werden können. Die Koordination kann dann über den Leitstand erfolgen.

Bislang wurden die Teile nur isoliert betrieben, da zunächst die statischen und dynamischen Eigenschaften der Komponenten in der beschriebenen Weise zu ermitteln waren. Dadurch konnten zunächst alle unsicheren Parameter der Systemsimulation bestimmt werden.

Den letzten Schritt stellt, aufbauend auf eine plausible Simulation, die Entwicklung des im folgenden Kapitel dargestellten Energiemanagements dar. In diesem Schritt werden die Teilsysteme des Antriebs kombiniert und der Betrieb auf Basis der am Prüfstand ermittelten Eigenschaften optimiert.

7 Energiemanagement

Der Begriff Energiemanagement erweitert den nur bei Hybriden sinnvollen Begriff der Betriebsstrategie. Statt das Gewicht auf die reine Traktionsaufgabe zu legen, umfaßt das Energiemanagement alle Energieumsätze für die Traktion, aber auch für die Nebenverbraucher. Ein Management setzt dabei vorhandene Freiheitsgrade in der Bereitstellung oder der Nutzung der Energie voraus. Es müssen demnach entweder mehrere Quellen alternativ zur Verfügung stehen, oder der Bedarf von Senken gestaltet werden können. Die Aufgabe ist daher durchaus vergleichbar mit dem des Netzmanagements in den elektrischen Verbundnetzen.

Beispiele für Systeme mit mehreren Quellen sind neben den hybriden Antrieben mit der Senke Traktion auch konventionelle Antriebe, bei denen die elektrischen Nebenverbraucher entweder über den Generator oder über die Batterie gespeist werden können. Freiheitsgrade im Betrieb der Primärwandler, also des Motors oder einer Brennstoffzelle entstehen dabei sowohl in Hybriden als auch in konventionellen Antrieben durch den Einsatz von Speichern. Durch ein Management zu bindende Freiheitsgrade können auch in Elektrofahrzeugen entstehen, wenn dort mehrere Speichersysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften aufeinander abgestimmt werden sollen [159],[295]-[297].

Weitere Freiheitsgrade können entstehen, wenn die Lastanforderungen beeinflußt werden können, z.B. indem in Phasen, in denen der Motor nicht läuft, manche Verbraucher wie z.B. Scheiben- oder Sitzheizungen oder die Klimatisierung nur eingeschränkt betrieben werden.

7.1 Energiemanagement in Hybriden

Hybride sind Fahrzeuge mit mehreren Energiequellen und eventuell auch mehreren, parallel im Eingriff befindlichen Wandlern.

7.1.1 Freiheitsgrade der Antriebe

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen wird der Speicher auch für aktive Traktionsaufgaben verwendet statt nur als alternative Quelle für Nebenverbraucher. Der durch das Management zu bindende Freiheitsgrad ist bei den Parallelhybriden mit Momentenaddition der Anteil der Elektromaschine M_{EM} in der Summengleichung:

$$M_{CE} + M_{EM} = \frac{1}{\ddot{u}} M_L \quad (27)$$

gegenüber dem Moment des Verbrennungsmotors M_{CE} und dem Lastmoment M_L . Bei Fahrzeugen mit automatischem Getriebe oder stufenlosem mechanischen Getriebe (CVT) kann zusätzlich noch die Drehzahl der Maschinen über das Übersetzungsverhältnis des Getriebes gewählt werden⁷⁷. Bei Parallelhybriden mit automatisiertem Schalteingriff umfaßt das Energie-

⁷⁷Der sich durch automatische Getriebe ergebende Freiheitsgrad ist unabhängig vom Hybridantrieb. Auch in konventionellen Antrieben ist hier eine Schaltstrategie vorzugeben. Unterschieden wird zwischen ökonomischem Schaltverhalten, bei dem der Motor möglichst niedertourig, aber hoch ausgenutzt betrieben wird, und einer sport-

management daher neben der Ansteuerung der Elektromaschine und des Verbrennungsmotors auch die Schaltstrategie in einem kombinierten Motor-Getriebe-Management.

Bei Serienanordnungen sind die Freiheitsgrade stärker entkoppelt. Die Traktionsleistung P_{Tr} kann gedeckt werden über eine Kombination von MGU-Leistung P_{MGU} und Batterieleistung P_{Batt} . Die elektrischen Anforderungen der Nebenverbraucher P_{Aux} können hier direkt mit berücksichtigt werden:

$$P_{MGU} + P_{Batt} = P_{Tr} + P_{Aux} . \quad (28)$$

Der Betriebspunkt der Verbrennungsmaschine kann auf der Leistungshyperbel für $P_{MGU} = \text{konst.}$ beliebig gewählt werden und ist vom aktuellen Antriebsmoment über die Traktionsbatterie vollständig entkoppelt. Anders als bei mechanischen stufenlosen Getrieben beschränkt die Betriebspunktwahl daher nicht das verfügbare Beschleunigungsmoment. Einschränkungen würden sich allenfalls ergeben, wenn MGU und Speicher auf Leistungssprünge an der Achse nicht ausreichend schnell reagieren können.

Aufgabe des Energiemanagements in hybriden Antrieben ist es, die Freiheitsgrade der Gleichungen (27) bzw. (28) zu binden. Dazu müssen die Fahranforderung, der Energiebedarf der Nebenverbraucher und der Zustand der Batterie ausgewertet werden. Entsprechend der sich daraus ergebenden Gesamtmomenten- oder Gesamtleistungsanforderung ist die jeweilige Aufteilung zu bestimmen.

7.1.2 Zielkriterien

Für diese Entscheidung sind Kriterien anzugeben, die zum Teil verbal, zum Teil als Grenzbedingungen, zum Teil aber auch als zu minimierende Zielgröße, typischerweise der Verbrauch, angegeben werden können. Basierend auf solchen Kriterien ist die Aufgabe im Serienhybrid zu der im Parallelhybrid weitgehend dual: Während beim letzteren in einer momentenbasierten Struktur die Anteile und die Drehzahlen zu bestimmen sind, ist es beim Serienhybrid die Leistungsaufteilung und die Drehzahl der MGU. Im Folgenden wird nur noch auf den für den Aufbau nach Kapiteln 4 - 6 relevanten Teil der Serienhybrids eingegangen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte über einen hybriden Fahrzeugantrieb der Kraftstoffverbrauch eines Referenzfahrzeugs reduziert werden. Die Auswertung erfolgt anhand der Standard-Testzyklen NEFZ und ftp-75. Eine Reduktion des Verbrauchs darf aber nicht auf diese Zyklen beschränkt sein. Gleichzeitig war auf niedrige Schadstoffemissionen zu achten. Verbrauch und Emissionen sollten am Prüfstand evaluiert werden, wobei die Emissionen, wie schon ausgeführt, nur qualitativ und nicht absolut ausgewertet werden konnten. Als Nebenbedingung ist die Fahr- bzw. Wiederstartfähigkeit und die Versorgung der Nebenverbraucher über ein Lademanagement für den Speicher sicherzustellen.

lichen Abstimmung. Hier werden die Gänge lang ausgefahren, um jeweils ein möglichst hohes Beschleunigungsmoment zur Verfügung stellen zu können. Da bei mechanischen automatischen Getrieben die Betriebspunktwahl des Motors somit direkt in das Fahrverhalten eingeht, muß dieser Betriebspunkt abhängig vom Fahrwunsch gewählt werden und kann nicht allein nach energetischen Gesichtspunkten gewählt werden. Außer über die genannten festen Abstimmungen wird auch versucht, den Fahrwunsch im Fahrzeug zu interpretieren und die Schaltstrategie automatisch anzupassen [299]-[301].

Die zu minimierende Zielgröße stellt damit das Integral über den Brennstoffmassenstrom:

$$b_{TDi} = \int_{t_A}^{t_E} \dot{m}_{be}(t) dt = \min \quad (29)$$

des Verbrennungsmotors dar. Zusätzlich ist für limitierte Abgaskomponenten die Grenzbedingung:

$$m_{Gas} = \int_{t_A}^{t_E} \dot{m}_{Gas}(t) dt \leq m_{Gas,max} \quad (30)$$

einzuhalten.

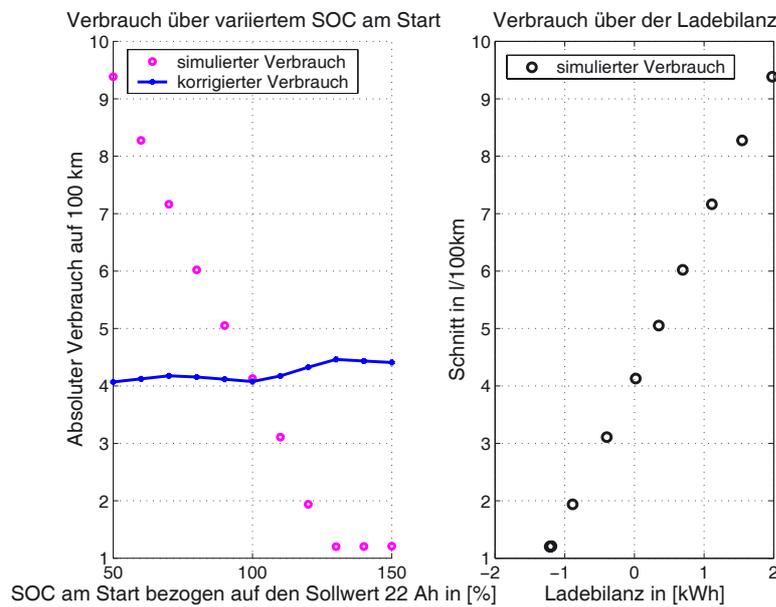


Abbildung 39: Veränderung des Durchschnittsverbrauchs in Abhängigkeit vom Anfangsladezustand (SOC) der Traktionsbatterie bei sonst unveränderten Bedingungen.

Als weitere Bedingung könnte ein vor und nach dem Testzyklus identischer Speicherinhalt gefordert werden. Dies ist unrealistisch, da diese Identität nur rechnerisch, für bekannte Testzyklen, erreicht werden könnte. Statt dessen wird gefordert, daß der Ladezustand um einen anzugebenden Sollwert stabilisiert werden muß, d.h.:

$$\text{für } SOC(t_A) < SOC^* : SOC(t_E) > SOC(t_A) \text{ und} \quad (31)$$

$$\text{für } SOC(t_A) > SOC^* : SOC(t_E) < SOC(t_A) . \quad (32)$$

Die Abweichung $dW_{Batt} = W_{Batt}(t_E) - W_{Batt}(t_A)$ ist zu bilanzieren und muß im Ergebnis der Gleichung (29) berücksichtigt werden. Das Vorgehen ist in **Abb. (39)** gezeigt. Simuliert werden Zyklen mit verschiedenen Anfangszuständen für den SOC der Batterie. In der rechten Bildhälfte sind die Durchschnittsverbräuche über der Ladebilanz dW_{Batt} aufgetragen. In

der linken Bildhälfte sind über dem Anfangsladezustand einerseits die tatsächlich simulierten Durchschnittswerte und als durchgezogene Kurve die daraus korrigiert ermittelten Verbräuche. Erkennbar steigt der Verbrauch sowohl wenn die Batterie stärker geladen werden muß, als auch, wenn sie deutlich entladen wird. Die Gründe sind die Speicherverluste im ersten Fall und die im Schnitt niedrigere Ausnutzung des Motors im zweiten Fall. Die Korrekturfaktoren hängen vom Zyklus ab und müssen jeweils neu bestimmt werden.

Weitere Nebenbedingungen können sich aus den physikalischen oder technischen Begrenzungen für einzelne der betrachteten Größen wie die Quellenleistungen in Gleichung (28) ergeben.

7.2 Optimierungsansätze

Für das Optimierungsproblem können verschiedene Lösungsansätze gewählt werden die bei Ch. Körner weiter ausgeführt werden [46]. Optimale Lösungen für das Steuerungsproblem aus den Gleichungen (28) - (32) können für vorab bekannte Testzyklen numerisch ermittelt werden. Die Optimierung kann allerdings nur offline erfolgen, da die Werte der Steuergrößen $P_{MGU}(t)$ und $P_{Batt}(t)$ von allen Werten der Fahrleistung $P_{Tr}(t)$ abhängen⁷⁸. Der Wert der Offline-Verfahren liegt daher vor allem in der Abschätzung der maximal realisierbaren Einsparung. Falls aus dem optimierten Steuervektor $u(t) = \begin{pmatrix} P_{MGU}(t) \\ P_{Batt}(t) \end{pmatrix}$ Aussagen über grundsätzlich vorteilhafte Leistungsaufteilungen abgeleitet werden können, kann versucht werden, diese zu abstrahieren⁷⁹[302]-[304].

Für den Fahrzeugeinsatz geeignete Verfahren müssen die Grenzbedingungen für Zustandsgrößen und Randbedingungen wie die Stabilität des SOC berücksichtigen, können darüberhinaus aber nur aufgrund der aktuell verfügbaren Daten über die Leistungsanforderung entscheiden. Solange nicht über Umfeldsensoren oder ein Navigationssystem Daten über die zukünftige Fahrtstrecke bekannt sind⁸⁰, kann letztlich nur in Kenntnis des aktuellen Systemzustands $x(t) = \begin{pmatrix} SOC(t) \\ \dot{m}_{TD_i}(t) \end{pmatrix}$ über die Leistungsaufteilung entschieden werden.

Alternativ kann über Verfahren der Mustererkennung versucht werden, typische Fahrzeugeinsatzprofile zu erkennen und so z.B. das Energiemanagement für Pendlerfahrzeuge zu optimieren [306]. Außer den typischen Strecken muß dann auch der Einsatzplan beobachtet werden, um die Adaption nicht nach jedem Wochenendausflug neu beginnen zu müssen.

Sowohl die Streckenschätzung durch Mustererkennung als auch Daten des Navigationssystems setzen innerhalb des Energiemanagements oberhalb der operativen Ebene an, indem ein grundsätzlich funktionstüchtiger Algorithmus bezüglich der typischen oder in nächster Zeit zu er-

⁷⁸Die aktuelle Entscheidung in Gleichung (28) hängt für den Optimalfall auch von zukünftigen, im allgemeinen nicht bekannten Werten von P_{Tr} ab. Algorithmen, die dafür ein globales Optimum ermitteln, sind daher nicht kausal und können im Fahrzeug nicht realisiert werden.

⁷⁹Hier ist Vorsicht geboten, da z.B. für eine Folge von gleichartigen Zyklen ein reproduzierbareres Ergebnis erwartet werden dürfte. Beim NEFZ hingegen, aus zunächst 4 ECE Zyklen, gefolgt vom Überlandanteil EUDC, wird am Ende des EUDC stark von 120 km/h auf 0 abgebremst. Um den Ladezustand der Batterie zu halten, wird der numerisch optimierte Steuervektor bereits beim letzten ECE Zyklus zu einer Absenkung des Ladezustands führen. Das Resultat ist dann mit einem reinen ECE Betrieb bereits nicht mehr zu vergleichen.

⁸⁰Eine Abschätzung der möglichen Verbrauchseinsparungen durch optimale Streckenwahl und eine Anpassung der Fahrleistung an das Streckenprofil finden sich in [305]. Insbesondere über eine verbrauchsoptimierte Fahrweise wird gegenüber heutigen Standardfahrzeugen ein Potential bis zu 45% abgeschätzt.

wartenden Anforderungen optimiert wird. Dafür steht ein Eingriff z.B. über die Wahl des Sollzustands SOC^* zur Verfügung. Die hier vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die operative Schicht des Managements, der Schwerpunkt liegt auf der Verwendung von Standardzyklen und der Verknüpfung von Antriebssimulation und Prüfstandstests. Darüberhinausgehende Ansätze benötigen zusätzliche Umfelddaten.

7.3 Bekannte Managementansätze

Für Serienhybride unterschiedlichster Ausprägung, als Range-Extender, mit und ohne Netzladung oder als autarke Hybride in Vollauslegung, sind eine Reihe von Verfahren für das Steuerungsproblem aus Gleichung (28) vorgeschlagen worden.

7.3.1 Einpunktstrategie

Die einfachsten Verfahren entkoppeln die Fahrleistung P_{Tr} völlig von der MGU, indem diese ausschließlich über den Ladezustand des Speichers angesteuert wird. Die MGU wird dann typischerweise in ihrem Bestpunkt betrieben [307][308].

Einpunktstrategien erfordern einen sehr leistungsfähigen Speicher, da ohne zusätzliche Maßnahmen die MGU auch während Bremsphasen betrieben werden könnte und dadurch sehr hohe Leistungsanforderungen auftreten können. Modifizierte Einpunktstrategien berücksichtigen daher auch die Traktionsanforderung bei der Entscheidung über den MGU Betrieb (z.B. [209]).

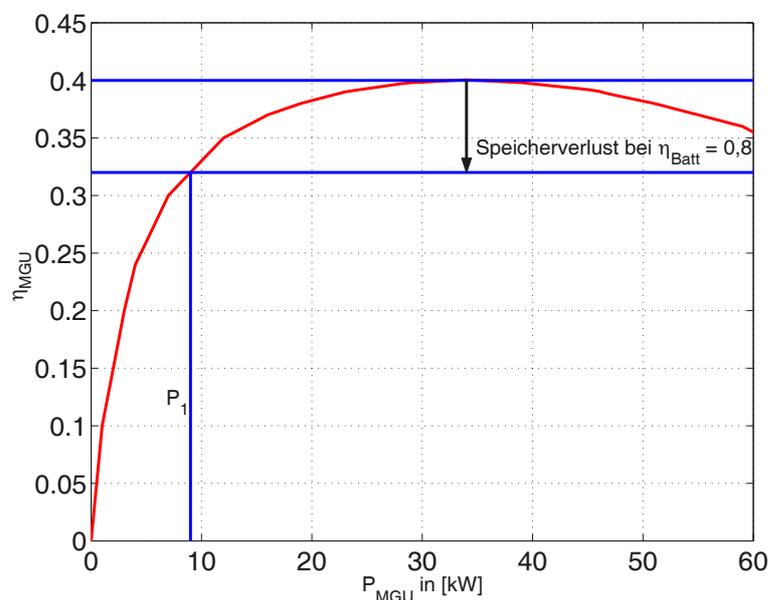


Abbildung 40: Wirkungsgrad der MGU bei Betrieb auf der Linie des optimalen Kraftstoffeinsatzes und Betriebstemperatur und Vergleichswirkungsgrad zwischengespeicherter Energie im Einpunktbetrieb.

Einpunktstrategien sind leicht zu applizieren und stabilisieren den Ladezustand, solange nicht die Traktionsleistung dauerhaft über der Leistung der MGU im Bestpunkt liegt. Allerdings wird

bei diesem Ansatz ein großer Teil der Energie über den Speicher geführt, was bei Batterien die Lebensdauer senkt und den Wirkungsgrad des Antriebs unnötig verschlechtert.

Der Grund ist an dem in **Abb. (40)** dargestellten Wirkungsgradverlauf der MGU auf der Optimaltrajektorie zu erkennen. Bei einem maximalen Wirkungsgrad der MGU von 40% und einem typischen Zykluswirkungsgrad der Batterie von $\eta_{Batt} \approx 80\%$ kann die zwischengespeicherte Energie maximal mit einem Wirkungsgrad von 32% abgegeben werden. Alle Leistungsanforderungen, für die die MGU direkt einen höheren Wirkungsgrad als diese 32% aufweist, sollten daher auf jeden Fall direkt und ohne Zwischenspeicherung abgedeckt werden. Wie in **Abb. (40)** erkennbar, gilt das für alle Leistungen $P^* > 9 \text{ kW}$.

7.3.2 Power-Tracking

Die Speicherverluste können reduziert werden, wenn die MGU nicht nur im Bestpunkt betrieben wird, sondern der jeweils geforderten Leistung:

$$P^* = P_{Tr} + P_{Aux} \quad (33)$$

nachgefahren wird. Dieser Ansatz geht im Grenzfall, ohne Speichereinsatz, in einen diesel-elektrischen Betrieb über. Nutzbremssungen sind dann nicht mehr möglich. In Hybriden werden Power-Tracking Strategien typischerweise über eine Mindestleistung modifiziert, unterhalb derer rein elektrisch gefahren wird. Die Mindestleistung wird abhängig vom Ladezustand der Batterie verschoben; das Verfahren kann sich damit bereits an unterschiedliche Strecken und Fahrertypen anpassen und ist ebenfalls leicht zu applizieren. Eine sicher ausgeglichene Ladebilanz kann über eine zusätzliche Ladeleistung in Gleichung (33) erreicht werden:

$$P^* = P_{Tr} + P_{Aux} + P_{Lade} \quad (34)$$

Die publizierten Power-Tracking-Verfahren unterschieden sich vor allem in der Art der Leistungsermittlung für die MGU. So wird z.B. von Volvo oder von M. Göhring vorgeschlagen, die Traktionsleistung über einen Tiefpaß zu filtern [224],[209]. Die MGU folgt der Traktionsleistung damit nur noch in etwa und um die Filterzeitkonstante verzögert, sie wird phlegmatisiert betrieben.

Der Ansatz ist problematisch, da bei abrupten Leistungsänderungen, vor allem beim Übergang zu Bremsvorgängen, erhebliche Leistungsspitzen im Zwischenkreis und damit im Speicher auftreten können. Nach M. Göhring werden durch die Phlegmatisierung beim Ottomotor Emissionsvorteile erzielt, der Dieselmotor weist dagegen dadurch weder nennenswert verbesserte Verbräuche noch reduzierte Emissionen auf.

Zusätzlich zur Vermeidung der extremen Teillast wird von T. Mayer für den Parallelhybrid und von Ch. Körner für den Serienhybrid eine Lastanhebung auf ein Mindestmoment bzw. eine Mindestleistung - wieder in Abhängigkeit vom SOC der Batterie - vorgeschlagen. Die resultierende Leistungsanforderung an die MGU gegenüber dem rein diesel-elektrischen Betrieb für diese Variante ist in der linken Hälfte von **Abb. (41)** dargestellt. Die dabei gewählte Abhängigkeit von Ladezustand und Mindestleistung ist erfahrungsbasiert und letztlich willkürlich gewählt.

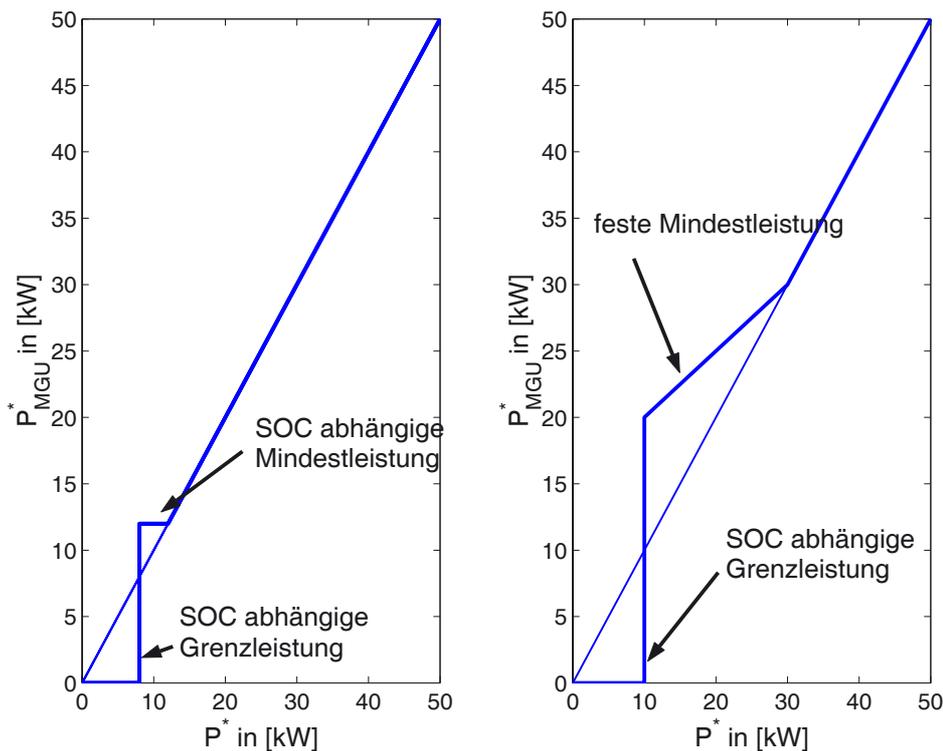


Abbildung 41: MGU Leistungen nach Ch. Körner (links) bzw. P. Wältermann (rechts). Außer der Grenzleistung wird entweder eine SOC abhängige Mindestleistung oder eine statisch optimierte Ladeleistung als MGU Leistungssollwert verwendet.

Bei einer geeigneten Auslegung kann für Testzyklen auf eine explizite Berücksichtigung der Ladeleistung verzichtet werden. Für den Grenzfall der längeren Autobahnfahrt ist dies nicht mehr möglich, da dann der mittlere Teillastbereich, in dem die Batterie geladen würde, nicht erreicht wird [46],[127].

P. Wältermann setzt ähnlich an, ermittelt aber über Wirkungsgradabschätzungen für den Gesamtantrieb, unter Berücksichtigung der Batterieverluste, eine optimale Sollleistung für die MGU aus Antriebsleistung und optimaler Ladeleistung, die in weiten Bereichen über der reinen Antriebsleistung liegt. Der Verlauf der resultierenden Leistungsanforderung ist in der rechten Hälfte von Abb. (41) über P^* aus Gleichung (33) dargestellt. Die Leistungsanhebung ist hier fest und hängt nicht vom SOC ab, so daß sich - aufgrund des Energieüberschusses - stationär ein Taktbetrieb vergleichbar dem Einpunktbetrieb ergeben würde. Praktisch wird auch hier eine ladezustandsabhängige Grenzleistung mit Ein- und Ausschalthysterese verwendet [215].

Zusätzlich zu diesen beiden Hauptstrategien wurden an der Universität Brüssel eine Reihe von Kombinationen aus Einpunkt- und Power-Tracking-Strategien untersucht. Dabei wurden jeweils willkürliche Annahmen über eine feste Batterie- oder MGU-Leistung gemacht, wobei jeweils reine Elektrofahrzeuge als die unter Verbrauchs- und Emissionsgesichtspunkten attraktivere Alternative ermittelt wurden⁸¹ [309],[310].

⁸¹Hersteller und Kunden teilen diese Einschätzung bisher offensichtlich nicht, wie an den Verkaufszahlen von verfügbaren Elektrofahrzeugen erkennbar ist.

Ein weiterer Mischansatz findet sich für einen mit einer Gasturbine betriebenen Hybridbus [311]. Die Solleistung P_{MGU}^* wird hier aus einer Kombination von Ladeleistung, gefilterter Antriebsleistung und einer geschwindigkeitsabhängigen Kennfeldleistung ermittelt. Ziel ist es hier, den Energieumsatz in der Batterie zu reduzieren ohne die Gasturbine zu stark dynamisieren zu müssen.

7.3.3 Bewertung

Die für Serienhybride vorgeschlagenen Betriebsstrategien zur Leistungsaufteilung reichen vom Betrieb der MGU als on board Lader über willkürliche, feste Leistungsaufteilungen bis zu den modifizierten Power-Tracking Algorithmen. Die Einpunktstrategien sind dabei schon statisch in weiten Bereichen der Traktionsleistung schlechter als der diesel-elektrische Antrieb, erschwerend kommt hinzu, daß auch die verwendeten Batterien dynamische Zusatzverluste aufweisen, da der Nutzenergieumsatz proportional zum Mittelwert der Leistung ist, die Verluste aber proportional zum Effektivwert sind. Das Verhältnis von Nutzen zu Kosten verändert sich daher mit dem Formfaktor⁸² des Batteriestroms. Das Verhältnis von Nutzen zu Kosten ist daher auch bei der Batterie für gleichmäßige Belastung am besten⁸³. Einpunktstrategien benötigen außerdem Speicher mit hohen Spitzenleistungen und führen über die hohen Energieumsätze im Speicher zu dessen früherer Alterung.

7.4 Kostenbasierte Leistungsaufteilung

Ziel der Hybridisierung von bislang ausschließlich mit Verbrennungsmotoren betriebenen Fahrzeugen ist es, deren Kraftstoffverbrauch und damit letztlich deren Betriebskosten zu senken. Als Quellen für die Antriebsenergie steht dabei in der Regel ein Verbrennungsmotor und ein oder mehrere Speicher zur Verfügung, deren Einsatz über ein Energiemanagement aufeinander abgestimmt werden muß.

Die Kombination erfolgt beim hier betrachteten Serienhybrid über die Leistungsaddition nach Gleichung (28). Bei den oben dargestellten Ansätzen wird, anhand von Expertenwissen und gebunden an eine gegebene Antriebstopologie, eine erfahrungsgemäß günstige Aufteilung zwischen den beteiligten Wandlern und Speichern Energiemanagement realisiert. Dabei werden statische aber auch adaptive Algorithmen verwendet die in der Abbildung (41) nur hinsichtlich ihres charakteristischen Verhaltens zusammengefaßt sind.

Die günstigste Kombination aus Batterie- und Motorleistung kann stattdessen auch ohne Beschränkung auf eine feste Topologie gewählt werden, wenn die zum Antrieb nötige Energie als Leistungsnachfrage interpretiert wird. Die im System vorhandenen Speicher und die MGU

82

$$F = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} i_B'^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} i_B'(t) dt}$$

⁸³Hier ist nicht berücksichtigt, daß eine ausschließlich konstant belastete Batterie eine geringere effektive Kapazität aufweist, als dynamisch belastete Batterien.

können dann als Quellen mit von der Nachfrage abhängigen Energiepreisen berücksichtigt werden. Als günstigste Lösung wird die Leistungsaufteilung gewählt die die aktuelle Nachfrage zum niedrigsten Gesamtpreis befriedigen kann.

Dazu werden den Wandlern und den Speichern Kostenfunktionen für ihre mittleren bezogenen Energiepreise zugeordnet. Die Leistungsaufteilung erfolgt, indem durch einen Kostencontroller auf Basis dieser Kostenfunktionen der niedrigste Durchschnittspreis ermittelt wird bei dem entweder die Nachfrage vollständig befriedigt werden kann, oder die bei Bremsvorgängen verfügbare Energie abgenommen werden kann.

Bewertungsgrundlage für die Leistungsaufteilung sind damit die Kostenfunktionen der beteiligten Komponenten. Darin können alle umsatzabhängigen Kosten wie die Betriebskosten durch den Kraftstoffverbrauch und gegebenenfalls durch die Emissionen direkt eingehen. Weitere Beiträge können über die Alterung der Komponenten entstehen. Aus diesen Anteilen kann die Kostenfunktion für die betrachteten Komponenten entwickelt werden. Da in der Abt. ~~EWS~~ während dieser Arbeit keine Möglichkeit zur quantitativen Erfassung der Abgasemissionen zur Verfügung stand und dazu auch keine Daten für den Motor zur Verfügung standen wurde im Rahmen dieser Arbeit nur der Kraftstoffverbrauch berücksichtigt.

Bei Wandlern wie der MGU kann der Preis so direkt aus dem Einkaufspreis für den Kraftstoff und dem betriebspunktabhängigen (n, M, T) Wirkungsgrad errechnet werden. Bei Speichern errechnet sich der Abgabepreis aus dem Wert der während des Betriebs eingespeicherten Energie und dem Ausspeicherwirkungsgrad.

Eine Adaption an unterschiedliche Einsatzprofile erfolgt implizit über den Grundpreis der in der Batterie gespeicherten Energie, da dieser sich je nach Fahrer- und Streckentyp ändert und damit die Einsatzhäufigkeit der Batterie verschiebt. Auf willkürliche Parameter oder für feste Annahmen offline optimierte Schwellen kann dabei verzichtet werden.

7.4.1 Quellenkombination

Über die zu beschreibenden Kostenfunktionen werden den Wandlern und Speichern Preise für ihre mittleren bezogenen Energiepreise zugeordnet. Die Verkaufspreise für die abzugebende Leistung (in DM/kW) ergeben sich aus dem Grundpreis für den Kraftstoff bzw. die in der Batterie gespeicherte Energie in DM/kWh und dem Wirkungsgrad der jeweiligen Wandlung.

Die ermittelten Kostenfunktionen können beliebige Parameterabhängigkeiten aufweisen, die Preisermittlung selbst erfolgt allerdings jeweils nur eindimensional über die Variation der Leistungsaufteilung beim Serienhybrid. Die Parameter wie der SOC der Batterie oder die Motortemperatur werden dabei festgehalten.

Je nach betrachtetem System können die Durchschnittskosten $k = \frac{K_{ges}}{W_{ges}}$ für die abzugebende Energie konstant sein, mit der Leistung steigen oder fallen. So fällt der Preis für von der MGU gelieferte Energie wenn die Ausnutzung steigt zunächst, um dann für Leistungen oberhalb des Optimalpunkts wieder zu steigen⁸⁴. Der Preis für von der Batterie gelieferte Energie steigt dagegen beim gewählten Ersatzschaltbild monoton mit der Leistung.

⁸⁴Im Rahmen der Arbeit nicht betrachtete Brennstoffzellen zeigen einen vergleichbaren Kostenverlauf, allerdings mit einem deutlich zu kleineren Leistungen verschobenen Optimalpunkt.

Das globale Optimum für die Leistungsaufteilung wäre dann zu ermitteln, indem die Gesamtkosten

$$K_{ges} = \int_{t_A}^{t_E} \left(\sum_{\nu} k_{\nu} P_{\nu}(t) \right) dt = \int_{t_A}^{t_E} \dot{K}_{ges} dt \quad (35)$$

über den Zyklus minimiert werden. Dazu müßte der gesamte Zyklus bekannt sein. In Echtzeit kann daher lediglich versucht werden, die aktuelle Entscheidung durch Minimierung der Funktion:

$$\dot{K}_{ges} = \sum_{\nu} k_{\nu} P_{\nu} \quad (36)$$

unter Beachtung der Randbedingung aus Gleichung (28) zu treffen [312]. Für den hier betrachteten Antrieb mit MGU und einer Batterie als Speicher ist damit die Gleichung:

$$\dot{K}_{ges} = k_{MGU}(P_{MGU}) P_{MGU} + k_{Batt}(P_{Batt}) P_{Batt} \quad (37)$$

zu minimieren unter Beachtung von:

$$P_{ges} = P^* = P_{MGU} + P_{Batt} \quad (38)$$

und den Anforderungen an den SOC.

7.4.2 Durchschnittskosten der MGU

Die Durchschnittskosten der MGU k_{MGU} können für jeden Betriebspunkt (n,M) aus dem Kraftstoffpreis $k_{0,MGU}$ und dem Wirkungsgrad η_{MGU} zu:

$$k_{MGU} = \frac{k_{0,MGU}}{\eta_{MGU}(n, M)} \quad (39)$$

ermittelt werden. Über den in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Kaltstartverlust ist der Wirkungsgrad zusätzlich temperaturabhängig. Da über die Gleichung (37) lediglich das Kostenoptimum für den stationären Fall in Abhängigkeit vom Sollwert der zu liefernden Leistung ermittelt wird, ist es ausreichend, die Betriebspunkte auf der gewählten Trajektorie ($n_{opt}(P)$, $M_{opt}(P)$) für die MGU zu betrachten. Der grundsätzlich für die MGU vorhandene Freiheitsgrad in der Betriebspunktwahl wird über die gewählte Trajektorie gebunden. Die Gleichung (39) vereinfacht sich dann zu:

$$k_{MGU} = \frac{k_{0,MGU}}{\eta_{MGU}(P^*, T)} \cdot \quad (40)$$

Der Wert des Parameters T für die aktuelle Kühlwassertemperatur kann gemessen werden.

7.4.3 Durchschnittskosten der Batterie

Die Kosten für die von der Batterie gelieferte Energie kann analog zu Gleichung (40) über den Durchschnittspreis des gespeicherten Energieinhalts und den Wirkungsgrad erfolgen. Dazu sind eine Wirkungsgradabschätzung und der Wert der gespeicherten Energie zu bestimmen.

Batteriewirkungsgrad Der Wirkungsgrad für ein Batteriemodell nach Abb. (21) auf Seite 66 ist abhängig von der Energierichtung:

$$\text{Laden} \quad \eta_{Batt,Ch} = \frac{W_{\text{eingespeichert}}}{W_{\text{Klemme}}} = \frac{U_0}{U_{Batt}} \quad (41)$$

$$\text{Entladen} \quad \eta_{Batt,Dis} = \frac{W_{\text{Klemme}}}{W_{\text{ausgespeichert}}} = \frac{U_{Batt}}{U_0} \quad (42)$$

Die Verluste entstehen einerseits durch die dissipativen Umsätze an den Innenwiderständen der Ersatzschaltung, andererseits durch einen nicht vollständigen Umsatz des Ladestroms in gespeicherte Ladung. Dieses Phänomen wird über den Coulombwirkungsgrad η_C beschrieben.

Sowohl die Innenwiderstände als auch η_C sind abhängig vom Ladezustand, so daß der Wirkungsgrad von der Energierichtung und vom SOC abhängt. Für eine gegebene Batterie kann der Wirkungsgrad dann in Abhängigkeit von der Klemmenleistung P_{Batt} , dem Innenwiderstand R_i und der Leerlaufspannung U_0 zu:

$$P_{Batt} > 0 : \eta_{Batt,Ch} = \eta_C \frac{U_0}{\frac{U_0}{2} + \sqrt{\frac{U_0^2}{4} + R_i P_{Batt}}} \quad (43)$$

$$P_{Batt} < 0 : \eta_{Batt,Dis} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{R_i P_{Batt}}{U_0^2}} \quad (44)$$

angegeben werden.

Grundkosten Die Traktionsbatterie kann im Fahrbetrieb sowohl über die Nutzbremmung als auch über die MGU geladen werden, also Energie aufnehmen. Beim betrachteten autarken Hybrid ist die ständige Pflege des Ladezustands eine wesentliche Betriebsvoraussetzung.

Der Wert der eingespeicherten Energiemenge ergibt sich dann grundsätzlich aus den dafür aufgewandten Beträgen. Da die gespeicherten Energiemengen nicht abzählbar sind, daher auch nicht den Beträgen eindeutig zugeordnet werden können, kann für die gespeicherte Energiemenge nur ein Durchschnittspreis angegeben werden. Dieser Preis kann dann entweder über eine Mittelung der Einkaufskosten oder aus der Differenz der aufgewandten und der erlösten Beträge ermittelt werden.

Der erste Ansatz bewertet die in der Batterie gespeicherte Energie ausschließlich über die mittleren Einkaufskosten, der zweite Ansatz berücksichtigt dagegen auch die Verkaufserlöse. Wenn es dabei z.B. gelingt, Energie hauptsächlich über Nutzbremmungen kostenneutral einzuspeichern

aber im Schachlastbereich günstig zu verkaufen, paßt sich der Grundpreis hier schneller an die Betriebssituation an. Aus diesem Grund wurde hier der zweite Ansatz gewählt.

Der Gesamtwert $K_{0,Batt}$ kann aus der Differenz der aufgewandten und erlösten Beträge ermittelt werden zu:

$$K_{0,Batt} = \int P_{Batt} k_{ges} dt \quad (45)$$

mit k_{ges} als den aktuellen Durchschnittspreis, der sich aus der Kostenmittelung für die Beiträge von MGU, Speicher und Traktion ergibt.

Die gesuchten mittleren Grundkosten erhält man dann aus:

$$k_{0,Batt} = \frac{\int P_{Batt} k_{ges} dt}{\int P_{Batt} dt} . \quad (46)$$

Für die Berechnung der Grundkosten wird daher neben der Bilanzleistung auch der aktuelle Handelspreis auf Systemebene benötigt. Die Berechnung des Batteriegrundpreises kann zusätzlich zu den anderen Aufgaben im BMS erfolgen, wenn der aktuelle Handelspreis, der im Energiemanagement bei der Auswertung der „Angebote“ ermittelt wird, dem BMS wieder übermittelt wird.

7.4.4 Durchschnittskosten der Traktion

Der Traktionsantrieb tritt während Nutzbremungen als Quelle für elektrische Energie auf. Diese müßte bewertet werden, um in die Kalkulation des Handelspreises k_{ges} einbezogen werden zu können. Dazu müßte, ähnlich der Batterie, der Wert der aktuell verfügbaren Energie berechnet werden. Darauf wird hier verzichtet, die Energie aus Nutzbremungen wird als kostenneutral angesehen.

7.4.5 Kombierter Betrieb

Das kostenbasierte Energiemanagement ist, analog zu den anderen Power-Tracking-Algorithmen in mehreren Schichten aufgebaut. Eine untere Controlling-Schicht ermittelt anhand der vom System angeforderten Leistung die statisch günstigste Aufteilung, eine überlagerte Management-schicht berücksichtigt weitere Randbedingungen, wie betriebsabhängige MGU- oder Batterie Mindest- oder Maximalleistungen.

Aufbauend auf die in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Kostenfunktionen kann durch die Controlling-Schicht ein Energiehandel, vergleichbar einer Energiebörse realisiert werden [313],[314]. Der Controller ermittelt dazu, welche Leistung die am Handel beteiligten Einheiten zu einem gegebenen Preis abzugeben oder aufzunehmen in der Lage sind.

Bedingt durch den Verlauf der Kostenfunktionen ergeben sich dabei keine eindeutigen Zuordnungen. So kann die MGU bei einem Kraftstoffpreis von 1,60 DM/l im Bestpunkt 40 kW zu einem Durchschnittspreis von 0,42 DM/kWh abgeben, bei einem Preis von 0,48 DM/kWh kann

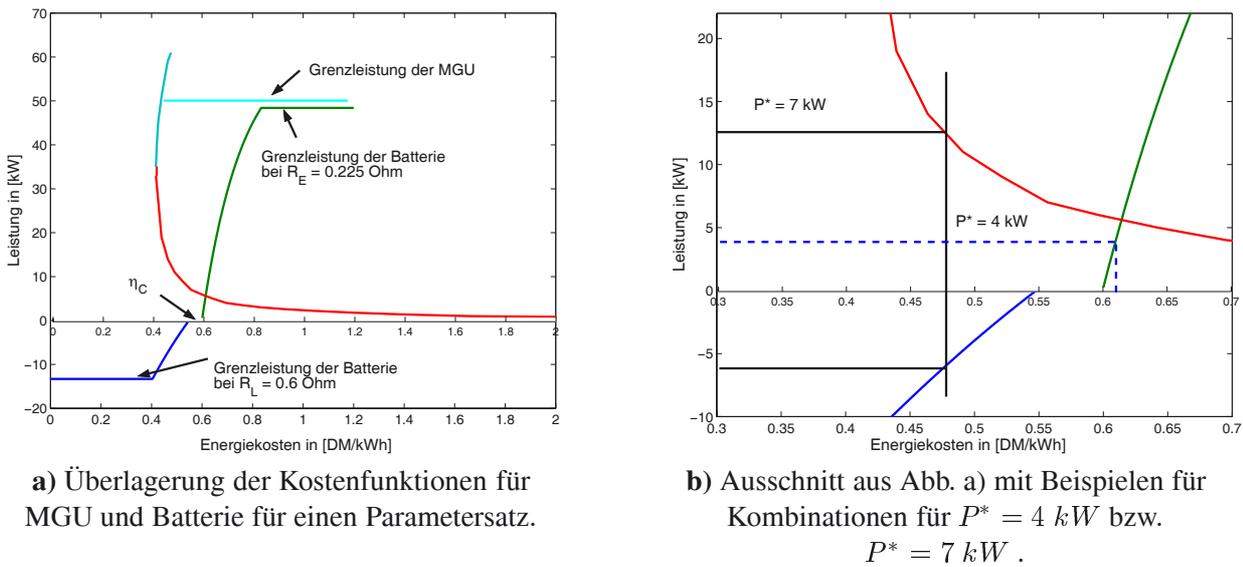


Abbildung 42:

aber eine Leistung in einem Bereich von $13 \text{ kW} < P_{MGU} < 60 \text{ kW}$ wirtschaftlich abgegeben werden.

Ebenso die Batterie: Bei einem Handelspreis unterhalb ihres Grundpreises kann sie wirtschaftlich nur Leistung bis zu einer über den Handelspreis und den Ladewirkungsgrad gegebenen Grenzeleistung aufnehmen, oberhalb des Grundpreises kann bis zu dieser Grenzeleistung Energie abgegeben werden.

Den Ablauf der Kalkulation zeigen die beiden Darstellungen in **Abb. (42)**. In der linken Hälfte ist die Überlagerung der Grenzeleistungskurven $P_{MGU}(k)$ und $P_{Batt}(k)$ dargestellt, in der rechten Hälfte ein vergrößerter Ausschnitt. Diese Kurven entstehen als Umkehrfunktionen aus den Kostenfunktionen $k_v(P)$ und können, wie beispielsweise die Grenzeleistungskurve für die MGU, Mehrdeutigkeiten aufweisen.

Erkennbar wird der minimale Preis für von der MGU gelieferte Energie im Optimalpunkt bei einer Generatorklemmenleistung von ca. 37 kW erreicht. Der Preis für davon abweichende Leistungen ist höher und steigt durch den zu 0 gehenden Wirkungsgrad der MGU für kleine Leistungen sehr stark an.

Die Traktionsbatterie wird im autarken Hybrid ausschließlich über die MGU geladen. Energie aus Nutzbremungen muß vorher ebenfalls in der MGU gewandelt worden sein. Der Grundpreis der Batterie kommt daher oberhalb des MGU Minimalpreis zu liegen. Für steigende Abgabeleistungen steigt der Abgabepreis der Batterie da dann auch die Verluste gedeckt werden müssen.

Um die gegenwärtig optimale Leistungsaufteilung zu ermitteln wird, beginnend bei einem Preis unterhalb des MGU Mindestpreises, vom Controller das Angebot solange erhöht, bis sich aus den Grenzeleistungen von Batterie und MGU eine zulässige Lösung für die Gleichung (38) ergibt. Für sehr kleine Nachfrageleistungen wird wegen der dort sehr hohen Kosten der MGU die Batterie eingesetzt. Dies ist in Abb. (42,b) für eine Nachfrageleistung von $P^* = 4 \text{ kW}$ gestrichelt dargestellt.

Bei steigendem Bedarf bestehen dann mehrere Möglichkeiten:

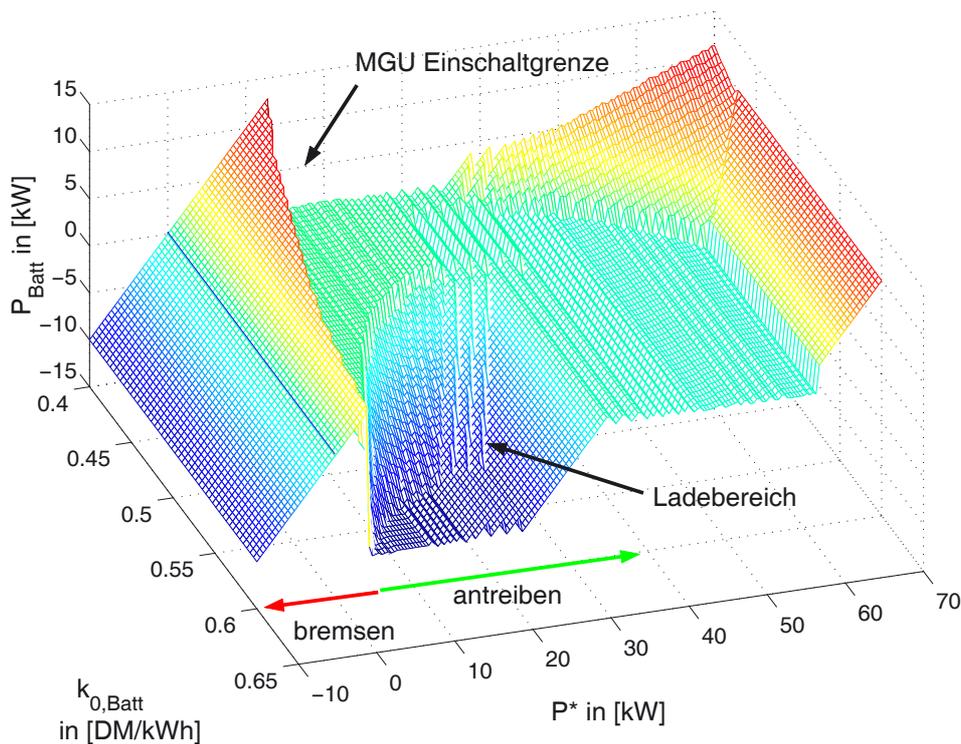


Abbildung 43: Anteil der Batterie an der angeforderten Leistung in Abhängigkeit von der Leistung und den Energiekosten der Batterie, ausgewertet für einen festen SOC und Motor-Betriebstemperatur. Negative Anteile der Solleistung ($P^* < 0$) treten bei der Nutzbremmung auf.

1. Die Batterie deckt die Nachfrage am günstigsten alleine.
2. Die Leistung liegt in einem Bereich indem, z.B. aufgrund der begrenzten Ladeleistung für die Batterie, noch keine Kombination aus MGU als Quelle und Batterie und Traktion als Senke möglich ist. Für Leistungen oberhalb des Schnittpunkts der Grenzleistungskurven von Batterie und MGU deckt die MGU die Nachfrage dann alleine. Die Lage dieses Schnittpunkts hängt von der aktuellen Motortemperatur, dem Batteriezustand und vom Grundpreis der in der Batterie gespeicherten Energie ab.
3. Die Lage der Kostenfunktionen erlaubt für die gegebene Nachfrage eine Kombination mit dem Speicher als Senke. Dieser Fall ist in Abb. (42,b) für eine Nachfrageleistung $P^* = 7 \text{ kW}$ mit der durchgezogenen Linie dargestellt. In diesem Fall wird die Batterie geladen und die MGU über die Traktionsleistung hinaus zu günstigeren Betriebspunkten ausgenutzt.
4. Für Nachfrageleistungen oberhalb der Leistung der MGU im Optimalpunkt wird zunächst nur noch die MGU zur Deckung herangezogen. Eine Kombination mit der Batterie wird erst wieder attraktiv wenn der Preis durch die steigenden Verluste den Grundpreis der Batterie wieder übersteigt und durch die Kombination beider Quellen dadurch der Gesamtpreisanstieg gedämpft werden kann.

7.4.6 Moduswechsel

Würde die MGU mit leicht schwankendem Sollwert im Bereich der Einschaltgrenze betrieben, wären ohne weitere Vorkehrungen häufige Motorstarts die Folge. Über eine Hysterese zwischen der Ein- und der Ausschaltgrenze kann diese Unruhe reduziert werden.

Im kostenbasierten Ansatz wird diese Hysterese für den Betriebsartwechsel über eine Preisschwelle realisiert, um die der mit der jeweils alternativen Konfiguration erzielbare Preis den andernfalls erzielbaren Durchschnittspreis unterbieten muß. Bei einer großen Preisschwelle werden dann zwar Motorstarts vermieden, es besteht aber auch das Risiko, die Leistung längere Zeit suboptimal zu erzeugen. Dies wird verhindert, indem die Schwellen nach jedem Moduswechsel schrittweise immer dann wieder reduziert werden, wenn durch sie ein nicht optimaler Betriebspunkt gehalten wird. Kurz nach einem Moduswechsel werden dadurch auch ungünstigere Betriebspunkte noch akzeptiert als nach längeren nicht optimalen Betriebsphasen. Über die Geschwindigkeit dieses Schwellenabbaus und die ursprüngliche Schwellenhöhe besteht dann ein Eingriff, um das kostenbasierte Management an unterschiedlich agierende, sportlichere oder ruhigere Fahrertypen anzupassen.

7.5 Integration in die Antriebssimulation

Die dem Powersplit Controller überlagerte Managementschicht trifft auf Basis der vorgeschlagenen Leistungsaufteilung die Entscheidung über die von der MGU anzufordernde Leistung. Bereits im Controller wurde der temperaturabhängige Wirkungsgrad der MGU und der Einfluß des SOC auf den Batteriewirkungsgrad berücksichtigt. Innerhalb des Managements müssen jetzt noch eventuelle Begrenzungen der MGU- oder der Batterieleistung, z.B. während des Kaltstarts, berücksichtigt werden. Daraus muß die Solleistung P^* ermittelt und für einen ausgeglichenen Ladezustand gesorgt werden. Dazu wird die vom Controller ermittelte MGU-Leistung während des Kaltstarts temperaturabhängig begrenzt, ebenso wird die resultierende Ladeleistung bereits im Sollwert auf den vom BMS übermittelten zulässigen Wert begrenzt.

7.5.1 Lademanagement

Das Lademanagement muß, ausgehend vom geschätzten Ladezustand der Batterien, über das Energiemanagement für einen im Mittel ausgeglichenen Ladezustand im Sinne der Gleichungen (31) und (32) sorgen.

Innerhalb des kostenbasierten Leistungssplit stehen dazu zwei Eingriffe zur Verfügung. Einerseits kann, wie in Gleichung (34) vorgesehen, direkt eine Ladeleistung P_{Lade} in der Ermittlung der Solleistung berücksichtigt werden. Der in Abb. (44) dargestellte Leistungsverlauf wird dabei parallel nach oben verschoben. Der zweite Eingriff manipuliert die Batteriegrundkosten $k_{0,Batt}$ in Abhängigkeit vom SOC. So wird bei Ladungsüberangebot der Grundpreis gesenkt und bei niedrigem Ladestand der Preis angehoben. Diese Vertriebsstufe ist systemkonform zum Energiebörsenansatz.

Für das Lademanagement, entweder über eine Lastanhebung oder über die Vertriebsstufe, ist ein einziger, die Stabilität des Systems beeinflussender Regelparameter für den SOC zu bestimmen.

K_{Lade} ist dabei so zu wählen, daß entweder bei maximal tolerierter Abweichung für den SOC die maximal gewünschte Ladeleistung angefordert wird, oder der Preis dann auf jeden Fall stabilisierend wirkt.

Innerhalb der Systemsimulation wurden beide Eingriffe evaluiert; die Ergebnisse für die Vertriebsstufe sind tendenziell etwas besser, im realen Betrieb dürfte der Unterschied ($\approx 1\%$ geringerer Verbrauch im Zylus) nicht mehr erkennbar sein.

7.5.2 Thermomanagement

Wie in Kapitel 6.3.1 aufgezeigt kann der Zusatzverlust durch den Kaltstart weitgehend vermieden werden, wenn der Motor ausreichend hoch ausgenutzt wird. Zudem wird dadurch die Betriebstemperatur schneller erreicht und die Abgasanteile HC und CO werden reduziert.

Innerhalb des Managements hebt daher ein Thermomanagement, abhängig von der Motortemperatur und dem SOC, die angeforderte Leistung über die benötigte Solleistung hinaus an. Der Effekt könnte weiter verbessert werden, wenn bei voller Batterie eine Möglichkeit zur elektrischen Zusatzheizung im Kühlwasserkreislauf vorhanden wäre, um damit das Thermomanagement des Motors zu unterstützen [316].

Maximal wird hier eine Mindestleistung von $P_{min}^* = 12,5 \text{ kW}$ entsprechend einem maximalen Kaltstartzusatzverlust von 10% angefordert. Die Mindestleistung wurde so gewählt, daß der kalte Motor zwar nicht zu hoch belastet wird, andererseits aber auch der Kaltstartverlust möglichst gering wird.

7.5.3 MGU Ansteuerung

Die Adaption an verschiedene Fahrstile ist bereits innerhalb des Powersplit Controllers über die Preisschwellen möglich; das Thermo- und das Lademanagent wirken ebenfalls direkt auf die Eingänge des Powersplit Controllers. Innerhalb der VMU muß daher nur noch über den Start bzw. den Stop der MGU entschieden werden. Dazu wird die MGU über einen Zustandsautomaten gestartet, sobald eine Traktionsleistung $P_{Tr}^* > 0$ gefordert wird und der Powersplit eine MGU Leistung $P_{MGU}^* > 0$ ermittelt. Für negative MGU Leistungen wird wieder gestoppt. Dabei wird insbesondere keine Mindestlaufzeit vorgegeben, die die Starthäufigkeit zwar reduzieren kann, aber auch den Leerlaufanteil wieder deutlich anheben würde. Bei Verwendung eines betriebswarmen Dieselmotors würde dies nach den Ergebnissen von M. Göhring [209] bzw. S. Mourad [141] eher zu einer Verschlechterung des Emissions- und Abgasverhaltens führen. Der warme Dieselmotor wird dadurch im städtischen Bereich vor allem in Beschleunigungsphasen zugeschaltet. Dieses Verhalten ist für den Fahrer letztlich sehr gut nachvollziehbar und sollte gegenüber aktuellen Serienfahrzeugen mit Schwungnutzung zu keinem Komfortnachteil führen.

7.5.4 Preisermittlung

Der aktuelle Handelspreis wird auf der Systemebene anhand der tatsächlichen Energiekosten der MGU, der Batterie und der Traktionsmaschine gebildet. Dazu berechnet jedes der Teilsy-

steme über eine Zusatzfunktion im Bereichscontroller den eigenen Lieferpreis. Der so ermittelte Preis k_{ges} dient zugleich als Einkaufspreis für die Batterie.

7.6 Evaluation

Das beschriebene Energiemanagement mit Thermo-, Lademanagement und Vertriebsstufe wurde in der VMU der in Kapitel 5 beschriebenen Antriebssimulation zusammen mit den in den Prüfstandsmessungen ermittelten Modellparametern implementiert und für den ECE, den NEFZ und den ftp-75 Testzyklus evaluiert.

Untersucht wurde dabei das grundsätzliche Zusammenspiel der Komponenten, der Energieumsatz in den Antriebskomponenten, der Kraftstoffverbrauch und dessen Abhängigkeit von Fahrzeugparametern. Für die MGU wurden die in der Simulation ermittelten Zyklen zusätzlich wieder am Prüfstand nachgefahren und die Ergebnisse mit der Simulation verglichen.

7.6.1 Dynamischer Betrieb

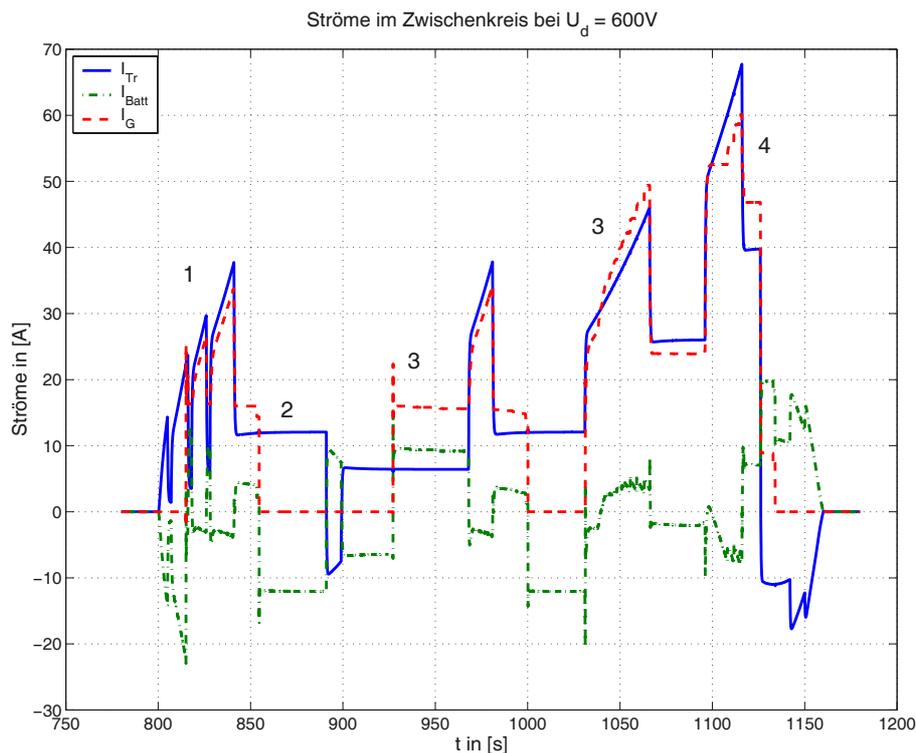


Abbildung 45: Zeitverläufe des Traktionsstroms I_{Tr} , des Generatorstroms I_G und des Batteriestroms I_B im Zwischenkreis während eines EUDC Zyklus..

Den dynamischen Betrieb des Powersplit während des EUDC-Anteils zeigt **Abb. (45)**. Alle Beschleunigungsphasen werden ab etwa 10 kW bis auf Restanteile durch den noch nicht ganz warmen Motor von der MGU gedeckt (1). Im stationären Bereich mit $v = 50 \text{ km/h}$ wird rein elektrisch gefahren (2) bis durch den sinkenden Ladezustand die MGU an der Stelle (3) wieder

zugeschaltet wird. Bei mittleren Leistungen wird die Batterie über eine Lastanhebung geladen (3) und oberhalb der Optimalleistung wird die MGU durch die Batterie unterstützt (4).

7.6.2 Kraftstoffverbrauch

Den Verlauf der simulierten Energieumsätze für das Fahrzeug nach Anhang B zeigt **Abb. (46)** links für den NEFZ und rechts für den ftp-75 Zyklus. Aufgetragen sind die von der MGU abgegebene Energie $W_{MGU}(t)$, die an den Traktionsmotor beschleunigend abgegebene und die durch Nutzbremmung zurückgewonnene Energie $W_{Acc}(t)$ und $W_{Dec}(t)$ sowie die in die Batterie eingespeiste bzw. die entnommene Menge $W_{Ch}(t)$ und $W_{Dis}(t)$.

Die von der MGU abgegebene Energiemenge W_{MGU} liegt in beiden Fällen unter der an den Traktionsmotor abgegebenen Energie W_{Acc} , aber über der Differenz zwischen W_{Acc} und W_{Dec} . Ein Teil der zurückgewonnenen Energie kann demnach die MGU auch in der Traktion entlasten, der Rest deckt Verluste und einen Teil der elektrischen Nebenverbraucher.

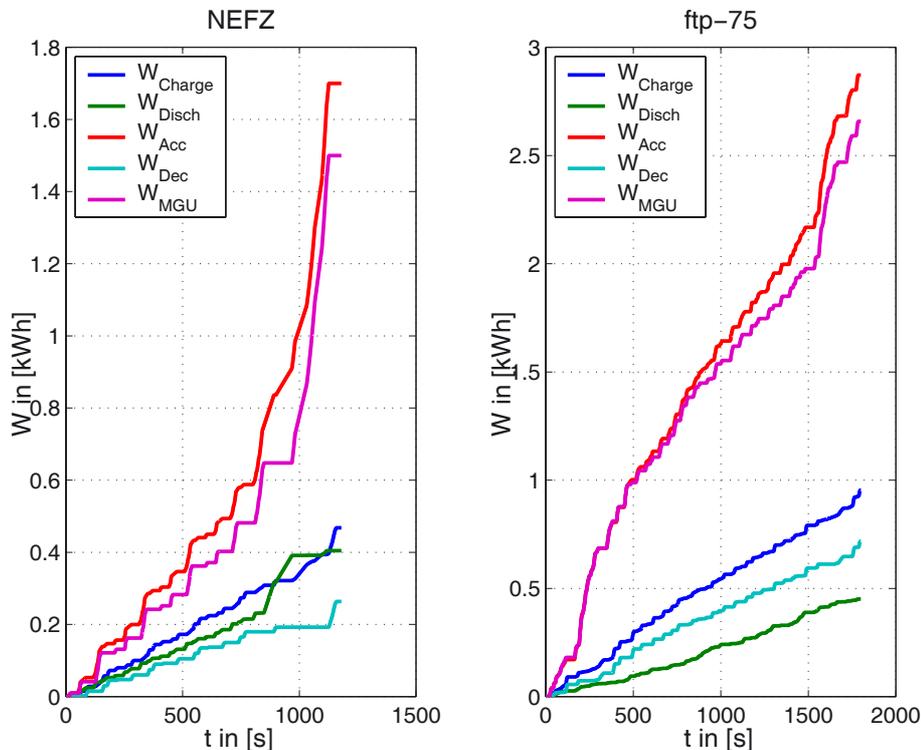


Abbildung 46: Zeitverläufe der Energieanteile über den ganzen Zyklus betrachtet.

Die absoluten Zahlen, sowohl für die Energienanteile, als auch für die erreichten Wirkungsgrade gibt **Tabelle (6)** wieder. Bilanziert sind die von der MGU abgegebene elektrische Energie W_{MGU} , die an den Traktionsantrieb abgegebene elektrische Energie $W_{Acc,el}$, die am Rad abgegebene Beschleunigungs- und Fahrenergie $W_{Acc,mech}$, die vom Antrieb elektrisch zurückgespeiste Energie $W_{Dec,el}$, die am Rad wirkende Bremsenergie aus Motor und Bremse $W_{Dec,mech}$, sowie die Energien in die Batterie W_{Ch} und aus der Batterie W_{Dis} . Über die ermittelten Verbräuche im Zyklus wurden die angegebenen Durchschnittsverbräuche und der Wirkungsgrad der MGU errechnet. Bemerkenswert sind die Wirkungsgrade.

	ECE (780 s)	NEFZ (1180 s)	ftp-75 (1877 s)
MGU:			
W_{MGU}	482 Wh	1.56 kWh	2,29 kWh
Traktion:			
$W_{Acc,el}$	553 Wh	1.63 kWh	2,83 kWh
$W_{Acc,mech}$	414 Wh	1,30 kWh	2,20 kWh
$W_{Dec,el}$	162 Wh	0.24 kWh	0,68 kWh
$W_{Dec,mech}$	216 Wh	0,31 kWh	0,90 kWh
Speicher:			
W_{Ch}	328 Wh	0.58 kWh	0,94 kWh
W_{Dis}	289 Wh	0.48 kWh	0,78 kWh
η_{MGU}	33 %	35 %	34 %
η_{Ges}^a	28 %	29 %	32 %
$\eta_{Antrieb}^b$	86 %	83 %	94 %
$\eta_A'^c$	41 %	64 %	53 %
Verbrauch:	3.70 l/100 km	4,07 l/100 km	4.12 l/100 km

$$a: \frac{W_{Acc,mech}}{W_{Diesel}}$$

$$b: \frac{\eta_{Ges}}{\eta_{MGU}}$$

$$c: \frac{W_{Acc,mech} - W_{Dec,mech}}{W_{MGU}}$$

Tabelle 6: Mechanische und elektrische Energieanteile in den Testzyklen.

- Für die MGU liegen diese (η_{MGU}) in allen Zyklen recht hoch, aber für einen hybridisierten Dieselmotor plausibel⁸⁵.
- Der resultierende Gesamtwirkungsgrad η_{Ges} , ausgedrückt als Verhältnis von insgesamt für den Vortrieb benötigter Energie zu der im Kraftstoff enthaltenen Energie, ermöglicht den Vergleich mit einem konventionellen Fahrzeugantrieb und berücksichtigt sowohl den Motorbetrieb als auch die Bremsenergienutzung.
- Wenn als Wirkungsgrad, quasi im Vergleich zum mechanischen Triebstrang aus Getriebe und Achsuntersetzung nur die an das Rad abgegebene Energie auf die von der MGU abgegebene Energie bezogen wird, werden die relativ hohen Wirkungsgrade der Zeile für $\eta_{Antrieb}$ erreicht. Die Energie aus Nutzbremssungen reduziert zwar den Primärbedarf, kann aber im konventionellen Antrieb nicht genutzt werden und wird daher in dieser ersten Bilanz nicht berücksichtigt.
- Wird dagegen nur die Differenz von abgegebener und zurückgewonnener mechanischer

⁸⁵Die hohen Wirkungsgrade ergeben sich, da die MGU nicht im unteren Teillastbereich mit $P_{MGU} < 8kW$ betrieben wird und η_{MGU} damit immer über 30% liegt.

Energie auf die von der MGU elektrisch abgegebene Energie bezogen, fällt der Wirkungsgrad (η'_A) deutlich geringer aus, da hier sowohl Energieverluste durch die Bremse als auch die verschiedenen Wandlungsvorgänge im Antrieb und in der Batterie deutlicher berücksichtigt werden. Über η'_A wird demnach angegeben, wieviel von der an der MGU abgegebenen Energie in diesem Antrieb tatsächlich für den Vortrieb genutzt werden konnte. Dieser Wirkungsgrad dient daher als Vergleich zu anderen Kombinationen aus Speicher und Antriebsmaschine. Vergleichbare Werte werden auch von M. Göhring für einen Kleinspeicherhybrid bzw. etwas besser für einen Mischhybrid angegeben.

Gegenüber dem konventionellen Antrieb, der die gesamte Beschleunigungs- und Fahrenergie und zusätzlich die Nebenverbraucher allein über den Motor abdecken muß, wird demnach durch die Nutzbremmung die von der MGU geforderte Energiemenge reduziert und damit im Vergleich zum konventionellen Antrieb ein hoher Antriebswirkungsgrad erreicht. Über den Betrieb der MGU mit dem modifizierten Powertracking Verfahren wird diese Energie dann außerdem effizienter bereitgestellt als im konventionellen Antrieb, was sich in den hohen MGU-Wirkungsgraden niederschlägt.

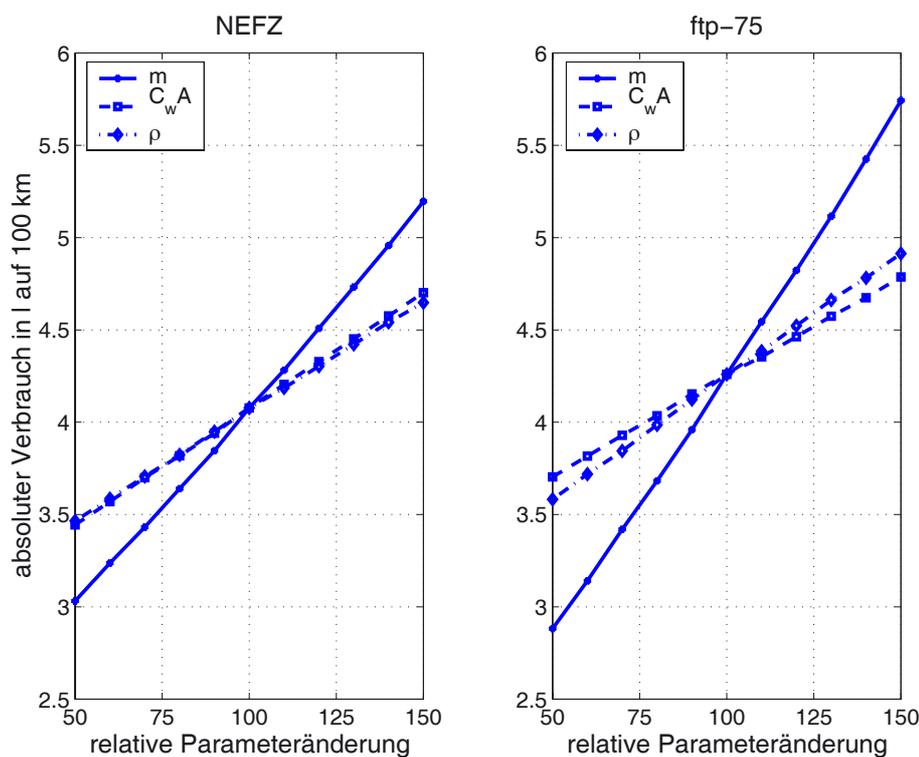


Abbildung 47: Variation des Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit von den Parametern m , $C_w A$ und ρ mit korrigierter Ladebilanz.

Beide Faktoren zusammen können zu einem gegenüber dem Referenzfahrzeug reduzierten Kraftstoffverbrauch führen, wenn auch das Gesamtfahrzeug optimiert wurde. Die resultierenden Verbräuche und deren Parameterabhängigkeit zeigt **Abb. (47)**.

Wie zu erwarten war, geht vor allem die Fahrzeugmasse deutlich in den Verbrauch ein, da sie sowohl die nötige Beschleunigungsenergie erhöht, als auch die Reibung.

Absolut wird im NEFZ mit 4,1 l/100 km eine Verbrauchseinsparung von 20% gegenüber dem Referenzfahrzeug (5,1 l/100 km) erreicht. Der in den Simulationen bei Ch. Körner höhere Verbrauch erklärt sich durch das dort höhere angenommene Gewicht und die schlechtere Elektrotaktionsmaschine, eventuell auch durch die über die Mindestlaufzeiten schlechtere Motorausnutzung in der MGU.

Abschließend zeigt **Abb. (48)** für beide Zyklen, gefahren mit ausgeglichenem Ladezustand, die Histogramme der Batterieleistung. Deutlich erkennbar sind die Stromspitzen für die elektrisch gedeckten Konstantfahrabschnitte im ECE Teil im linken Bild. Ebenso deutlich erkennbar die Spitze bei 250 W, die durch die elektrischen Verbraucherlasten während des Motorstillstands entsteht⁸⁶.

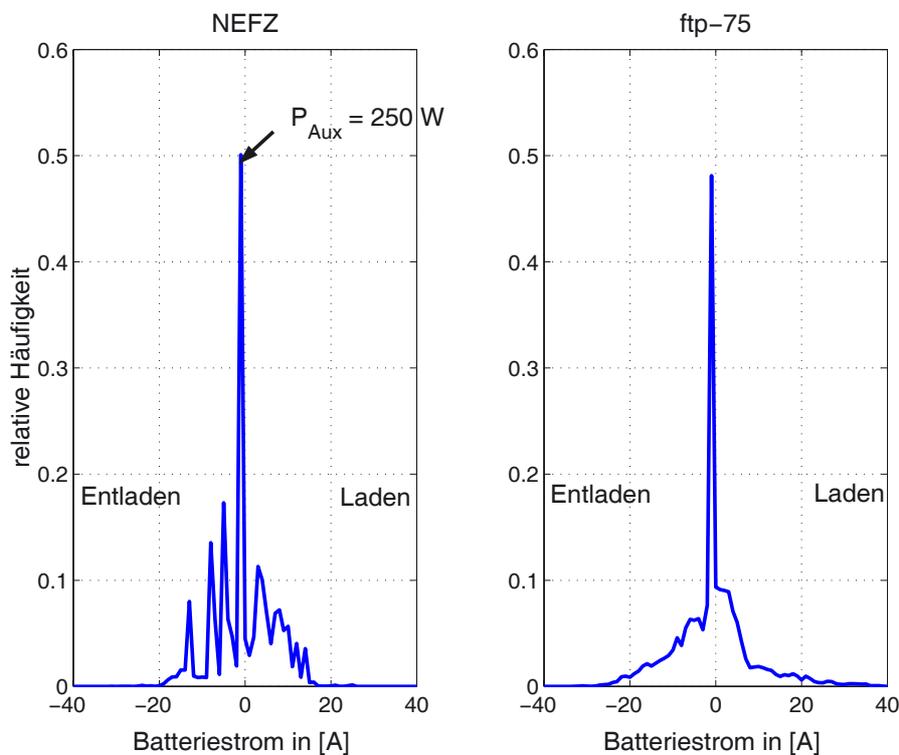


Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung des Batteriestroms auf der Zwischenkreisseite für das Fahrzeug nach Anhang B im NEFZ und ftp-75 Zyklus. 20 A entsprechen 12 kW.

Einen Vergleich zwischen Simulation und Prüfstandsmessung zeigt **Abb. (49)**. Hier wurde das in der Simulation für 5 aufeinanderfolgende NEFZ ermittelte Sollwertsignal für die MGU am Prüfstand, beginnend mit kaltem Motor, nachgefahren. Der Sollwertzyklus war noch ohne Thermomanagement, d.h. ohne explizite Lastpunktanhebung während des Kaltstarts erzeugt worden. Nach einer stärkeren Abweichung von bis zu 10% zum simulierten Signal näherte sich die gemessene Effizienz bei warmen Motor bis auf ca. 3 % an das aus der Simulation erwartete Ergebnis an.

⁸⁶Der elektrische Verbrauch in der MGU und im Traktionsteil wurde dort bereits in die Ströme einbezogen.

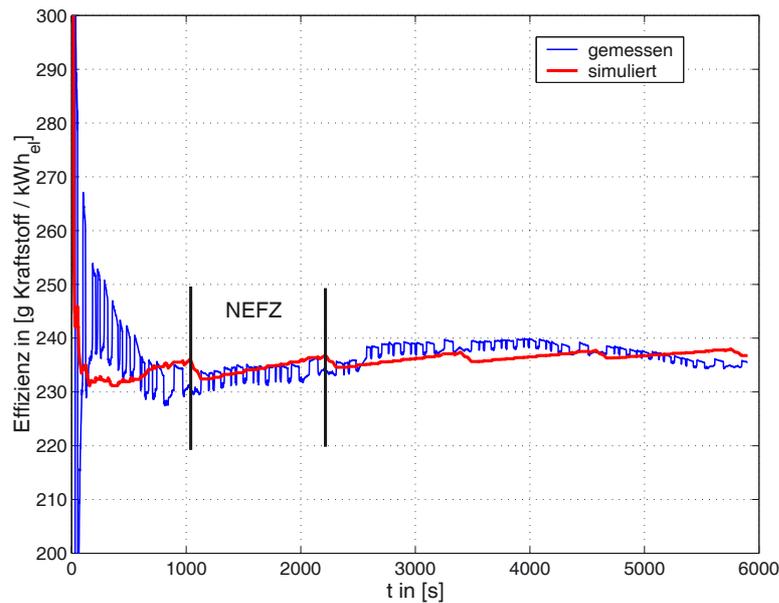


Abbildung 49: Vergleich der simulierten und der gemessenen MGU Effizienz für 5 aufeinanderfolgende NEFZ. Begonnen wurde mit kaltem Motor und ohne Thermomanagement.

7.6.3 Limitierte Schadstoffe

Außer auf den Kaltstartverbrauch wirkt sich das Thermomanagement auch sehr positiv auf das Emissionsverhalten des Antriebs aus. Das zeigen beispielhaft die **Bilder (50) und (51)**. Dargestellt sind für je zwei nacheinander durchlaufene NEFZ in der oberen Hälfte die Geschwindigkeit in km/h, die MGU Leistung in kW und der Verlauf der Kühlwassertemperatur in °C. Der Wiederkehrende Einbruch in der Temperatur entsteht durch den gelegentlichen Kommunikationsabbruch zum Motorsteuergerät während der Motorabschaltung (ca. 2s). In den Pausen können keine Daten übermittelt werden, da das Motorsteuergerät abgeschaltet ist.

Deutlich erkennbar ist die Leistungsanhebung nach dem Start und der dadurch schnellere Temperaturanstieg in Abb. (51) gegenüber dem Temperaturverlauf in Abb. (50).

In den unteren Bildhälften sind die Abgasanteile CO in % / 100 sowie NO_x in ppm⁸⁷ aufgetragen. Während die Stickoxide hauptsächlich vom Betriebspunkt abhängen zeigt sich beim schneller aufgeheizten Motor ein deutlich verringerter CO -Ausstoß, da Kohlenmonoxid hauptsächlich bei transienten Vorgängen im kalten Motor emittiert wird. Der Serienhybrid eignet sich insbesondere deswegen auch als Antrieb für minimale Emissionen.

⁸⁷Die aufgetragenen Werte sind hier vor allem in ihrem qualitativen Verlauf zu beurteilen. Für absolute Messungen sind aufwändigere Geräte heranzuziehen. Die Reproduzierbarkeit der Messung hängt z.B. vom Zustand des verwendeten Ruß-Vorfilters ab. Beide aufgetragenen Messungen wurden direkt aufeinander folgend und damit mit etwa gleich beladenem Ruß-Vorfilter durchgeführt.

7.7 Bewertung

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 7.3 vorgestellten Energiemanagement-Ansätzen ist der in Abschnitt (7.4) vorgestellte Management Ansatz nicht auf Expertenwissen über eine möglichst günstige Leistungsaufteilung im Antrieb angewiesen. Die verwendeten Funktionen für die mittleren bezogenen Energiepreise der beteiligten Wandler und Speicher können jeweils isoliert ermittelt werden. Berücksichtigt werden können alle umsatzabhängigen Kostenanteile. Außer der Abhängigkeit der Energiepreise von der nachgefragten Leistung können für jede beteiligte Komponente beliebig viele weitere Parameterabhängigkeiten berücksichtigt werden die eine Adaption der Grundfunktion an den jeweiligen Betrieb erlauben. Beispiele sind die temperaturabhängigen Kosten der Motor-Generator-Einheit und die vom Innenwiderstand abhängigen Kosten der Batterie in der betrachteten Topologie des in Kapitel 6 vorgestellten Hybridantriebs. Für die konkrete Aufteilung wird dann allerdings von einem festen Parametersatz ausgegangen und lediglich die Leistungsverteilung über die Kosten variiert.

Hauptvorteile des Ansatzes sind neben den entkoppelten Kostenfunktionen die Strukturunabhängigkeit und die implizite Adaption an die Fahranforderungen. So kann der Ansatz einerseits letztlich auf beliebige Kombinationen aus Speichern und Wandlern erweitert werden und kann statt zur Leistungsaufteilung auch zur Momentenaufteilung im Parallelhybrid verwendet werden, andererseits paßt sich der Algorithmus an die jeweiligen Fahranforderungen über die Grundpreise der gespeicherten Energie an.

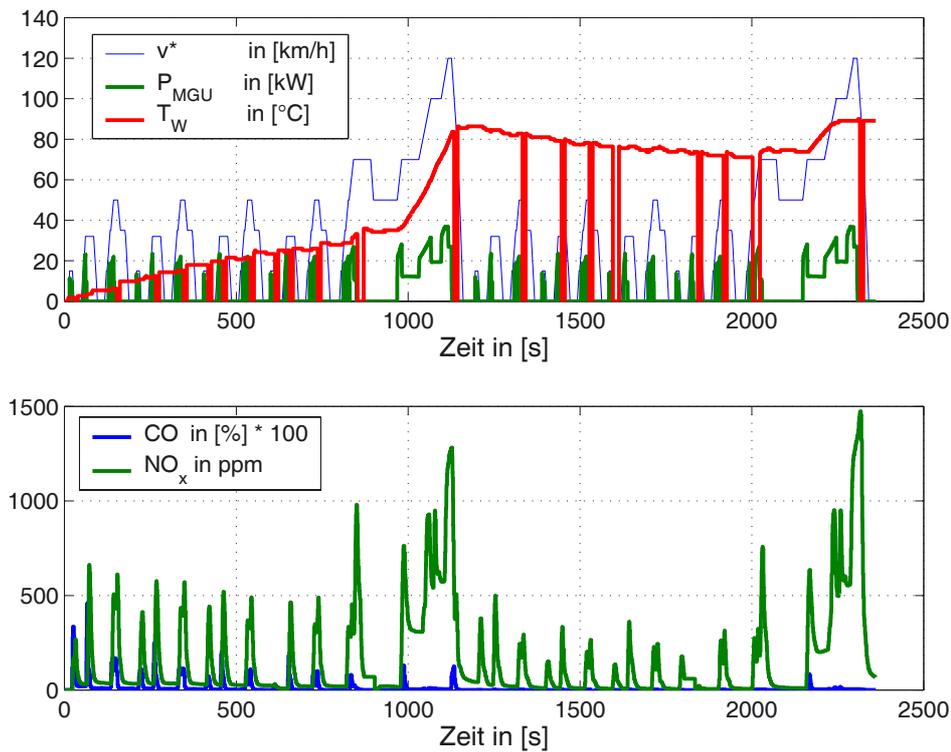


Abbildung 50: NEFZ Zyklustest für Emissionen und Temperaturverhalten ohne Thermomanagement.

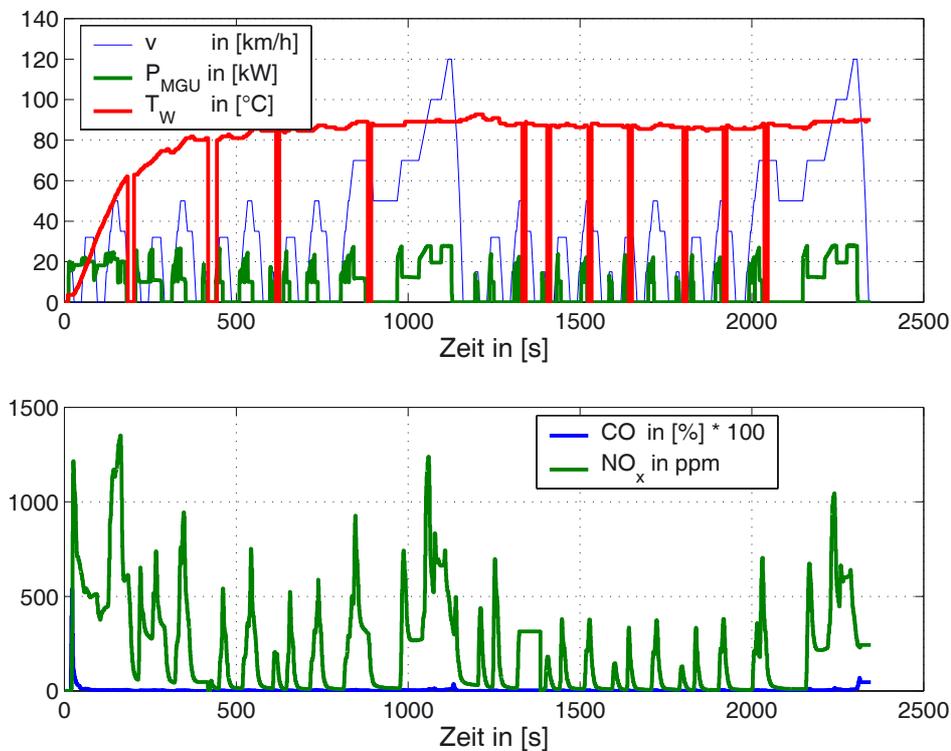


Abbildung 51: NEFZ Zyklustest für Emissionen und Temperaturverhalten mit Thermomanagement.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Beispiel eines seriellen Hybridantriebs untersucht, durch welche Maßnahmen Fahrzeugantriebe den Herausforderungen durch Abgasgesetzgebung und Klimakonvention genügen können.

Dazu wurden zunächst die Anforderungen an Pkws sowohl hinsichtlich der Klimagase, als auch bezüglich Schadstoffemissionen zusammengefaßt.

Während durch die fortschreitende Abgasgesetzgebung in den Industrieländern das Problem der bodennahen Luftverschmutzung - zumindest mittelfristig - beherrschbar scheint, ist bislang nicht geklärt, wie auch der Verkehr in Zukunft einen absoluten Beitrag zur Verminderung der Treibhausgasemissionen leisten können. Zwar wurde von den europäischen Fahrzeugherstellern eine Verbrauchseinsparung von 25% bis 2005 gegenüber dem Stand von 1999 zugesagt, sowohl der Anstieg des Verkehrs, aber auch der Verbrauchsanstieg im realen Fahrbetrieb durch die wachsende Komfortausstattung haben bislang aber den Anteil des Straßenverkehrs an den Emissionen weiter steigen lassen.

Die technischen Möglichkeiten, um den Verbrauch und die Schadstoffemissionen von konventionellen Fahrzeugen zu senken, wurden zusammengefaßt. Während beim Ottomotor, durch Steuerverfahren mit reduzierten Drosselklappenverlusten, noch ein erhebliches Verbesserungspotential im Teillastbereich besteht, sind direkteinspritzende Dieselmotoren hinsichtlich des spezifischen Verbrauchs weitgehend ausgereizt. Verbesserungen werden bei beiden Motorarten vor allem durch kleinere, höher ausgenutzte und turboaufgeladene Motoren erzielt. Das Potential für die Kraftstoffeinsparung liegt insgesamt bei bis zu 20% gegenüber aktuellen Standardmotorisierungen. Die dabei entstehenden Motoren sind mit den mechanisch gesteuerten Motoren des 20. Jahrhunderts allerdings nicht mehr vergleichbar.

Verbrauchseinsparungen im gleichen Umfang werden auch durch alternative, hybridisierte Antriebsstrukturen ermöglicht. Die Bandbreite der technischen Ansätze reicht von elektrisch angetriebenen Nebenaggregaten wie Öl- oder Wasserpumpen, bei denen die elektrische Energie bevorzugt nutzbremsend in Rekuperationsphasen genutzt werden, über Kurbelwellen-Starter-Generatoren für Antriebe mit Start-Stop-Betrieb und Schwungnutzung, bis hin zu Brennstoffzellenfahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb.

Während die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit von wettbewerbsfähigen Brennstoffzellenfahrzeugen gegenwärtig noch nicht absehbar ist, können auf eine Kombination von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor aufbauende Hybride bereits heute erfolgreich vermarktet werden. Reine Elektrofahrzeuge sind durch die Reichweitenbegrenzungen im Einsatz begrenzt, bedingen eine neue Infrastruktur und sind offensichtlich auch noch zu teuer.

8.1 Potential des Serienhybrids

Um das Potential einer konkreten Hybridstruktur, eines Serienhybrids, sowohl hinsichtlich des Verbrauchs als auch bezüglich der Emissionen untersuchen zu können, wurde 1997 in der Abteilung *EWS* der Universität Ulm mit der Auslegung und dem Aufbau eines seriellen Hybridantriebs für ein Fahrzeug der Kompaktklasse begonnen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der

Antrieb sowohl in einer dynamischen Simulation, als auch als Prüfstand mit realen Komponenten aufgebaut und ein Power-Tracking-Verfahren für das Energiemanagement entwickelt.

Gewählt wurde eine Struktur mit hoher Zwischenkreisspannung, die den Einsatz industrieller Antriebskomponenten erleichtert und den Wirkungsgrad der Antriebe verbessert. Die Traktionsbatterie wird über einen bidirektionalen DC/DC-Steller eingebunden, der für den benötigten Spannungs- und Leistungsbereich im Rahmen des Projekts neu entwickelt wurde. Als Verbrennungsmaschine wird ein hybridisiert gut zu betreibender, direkteinspritzender Dieselmotor verwendet.

Der modular aufgebaute Prüfstand erlaubt separate Untersuchungen in den drei Hauptbereichen MGU, Speicher und Traktion. Obwohl der kombinierte Betrieb noch aussteht, konnten so die Modelle für die Teilsysteme unter hybridtypischen Bedingungen, sowohl statisch als auch dynamisch, validiert werden. Die Auswertung des Gesamtantriebs geschieht bislang ausschließlich in der strukturgleich realisierten Antriebssimulation. Die Verknüpfung zwischen Prüfstand und Simulation wird über eine modellbasierte Applikation der Steuergeräte direkt aus der Simulation heraus ermöglicht. Dazu wurde die Codeerzeugung an die Entwicklungsumgebung und Systemsoftware der Zielgeräte angepaßt.

Entscheidend für den optimierten Betrieb ist neben der Auswahl der Komponenten deren optimal aufeinander abgestimmter Betrieb. Dies ist, nicht nur in Hybriden, die Aufgabe des Energiemanagements im Fahrzeug. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein auf den Stromgestehungskosten der beteiligten Einheiten MGU und Batterie aufbauender, börsenartiger Energiehandel als Managementansatz entwickelt. Entgegen anderen diskutierten Ansätzen ist der vorgestellte Controller über die Bilanzierung der Energiekosten im Speicher adaptiv und nicht auf eine offline optimierte Aufteilung zwischen Batterie und MGU angewiesen. Je nach Fahranforderung ändert sich der Batterieeinsatz über den Preis der dort gespeicherten Energie. Der am Beispiel des Serienhybrids mit einem Speicher vorgestellte Ansatz für die Leistungsaufteilung kann über die Kostenfunktionen auf andere Topologien mit mehreren Speichern erweitert oder auch auf andere ähnliche Problemstellungen, wie z.B. die Momentenaufteilung im Parallelhybrid, übertragen werden.

Das Verfahren wurde in der Simulation implementiert und für verschiedene Testzyklen in der Simulation und am Prüfstand evaluiert. Bei gegenüber dem Referenzfahrzeug unveränderten Rahmenbedingungen konnte so ein Verbrauchsvorteil von 20% im NEFZ abgeschätzt werden.

Angesteuert vom Energiemanagement folgt die MGU der aktuellen Leistungsnachfrage unphlegmatisiert. Die Einsparungen gegenüber dem konventionellen Antrieb werden einerseits durch den optimierten Betrieb des Motors in seinen Punkten optimalen Wirkungsgrads, andererseits durch die Nutzung der Bremsenergie erzielt. Während die erste Maßnahme den durchschnittlichen Motorwirkungsgrad deutlich anhebt, führt die Bremsenergienutzung unabhängig davon zu einem weiter gesteigerten Antriebswirkungsgrad.

Ein in das Energiemanagement integriertes Thermomanagement sowie das Lademanagement sorgen sowohl für eine sichere Wiederstartfähigkeit als auch für reduzierte Kaltstartverluste bei gleichzeitig reduzierten HC - und CO -Emissionen. NO_x -Emissionen können durch die Wahl der Motorbetriebspunkte in Grenzen gehalten werden.

Falls das hier vorgestellte Energiemanagement um ein Nebenverbrauchermanagement erweitert werden sollte, könnte dieses anhand des ermittelten Durchschnittspreises für die Energie

seinerseits über die dann tatsächlich abzunehmende Leistung entscheiden. So wird der von Komfortfunktionen akzeptierte Preis typischerweise unter dem Grenzpreis von Sicherheits- und Überwachungsfunktionen zu liegen kommen.

8.2 Ausblick

Für weitere Einsparungen in gleicher Höhe müßte entweder, wie aus den Sensitivitätsuntersuchungen für den Verbrauch ersichtlich, die Fahrzeugmasse deutlich reduziert werden oder, auf Daten von Umfellsensoren oder des Navigationssystems aufbauend, über ein prädiktives Energiemanagement realisiert werden [317],[318]. Einflußgrößen sind dann sowohl die Routenauswahl als auch der Fahrstil, da ein das Potential der Hybridisierung überschreitender Verbrauchseinfluß durch den Fahrer besteht [319].

Zusammenfassend kann das noch realisierbare Verbrauchsminderungspotential von derart optimierten Pkw Antrieben auf weitere 20% im realen Fahrbetrieb abgeschätzt werden, wobei neben den motorischen Maßnahmen auch optimierte Antriebsstrukturen einen Beitrag leisten müssen. Der notwendige Aufwand kann allerdings sehr unterschiedlich sein, wie ein Vergleich drei unterschiedlicher, zum Teil kommerziell erhältlicher Fahrzeugkonzepte zeigt.

So wird beim 3L Lupo von Volkswagen der niedrige Verbrauch durch ein optimiertes Fahrzeug mit reduzierter Masse und reduzierten Widerständen aber mit 12V Starter und automatisierter Kupplung erreicht. Eingesetzt wird ein Start-Stop-Betrieb und eine automatische Schwungnutzung.

Der Toyota Prius setzt auf eine optimierte Verbrennungsmaschine mit stufenlosem, leistungsverzweigendem Getriebe und zwei Elektromaschinen. Damit kann im Prius das gesamte Verbrauchsminderungspotential der Hybridisierung genutzt werden.

Den größten Aufwand betreiben noch im Forschungsstadium befindliche Fahrzeuge, in denen eine PEM Brennstoffzelle über einen Reformier aus Benzin oder Methanol mit Wasserstoff versorgt wird.

Solange die Abgasgrenzwerte, wie das für die EURO IV Stufe und mit Einschränkungen auch für die nach SULEV zu klassifizierenden Fahrzeuge absehbar ist, mit konventionellen Antrieben eingehalten werden können, müssen sich diese technischen Konzepte beim Kunden durch einen realen wirtschaftlichen Vorteil durchsetzen. Gegenüber der in Bild (14) auf Seite 44 aufgetragenen zulässigen Mehrbelastung beim Fahrzeugkauf sind allerdings alle diese Technologien bisher unwirtschaftlich.

Als Perspektive für eine vom Kunden akzeptierte nachhaltige Mobilität verbleiben damit zunächst hauptsächlich sorgfältig optimierte Fahrzeuge, bei denen der Verbrauch neben dem optimierten Antrieb auch über ein reduziertes Gewicht und reduzierte Fahrwiderstände erreicht wird. Die Motorisierung wird auf mittlere Sicht weiterhin über Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung, gegebenenfalls eingebunden in mehr oder weniger hybridisierte Antriebe erfolgen. Selbst damit wird aber weder die Abhängigkeit vom Rohöl als Energieträger gelöst, noch scheint es möglich, auch im Straßenverkehr die vom WBGU für den Zeitraum bis 2050 empfohlenen weiteren Verbrauchseinsparungen zu realisieren. Solange Wasserstoff wie bisher aus Erdgas erzeugt wird, bietet auch die sogenannte Wasserstoffwirtschaft keine Entlastung. Lediglich der direkte Einsatz von Erdgas als Treibstoff könnte die Bilanz im Verkehr entlasten.

Sinnvoller wäre der Einsatz dieses leitungsgebundenen Energieträgers aber zunächst zur Substitution von Rohölprodukten im stationären Bereich.

Literatur

zu Kapitel 1 (Einführung)

- [1] Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J.,
Die Grenzen des Wachstums - Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Deutsche
Verlagsanstalt Stuttgart, 2000.
- [2] Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J.,
Die neuen Grenzen des Wachstums, ISBN 3-499-19510-0, Rowohlt, Reinbek 1993.

zu Kapitel 2 (Grenzen des Wachstums)

- [3] Hiller K.,
Globale Vorräte, Ressourcen und Verfügbarkeiten, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv,
Essen 45. Jg. (1995) Heft 11, S. 699 - 708,
- [4] Eickhoff G., Rempel H.,
Weltreserven und Ressourcen beim Energierohstoff Erdgas, in Energiewirtschaftliche
Tagesfragen, etv, Essen 45. Jg. (1995) Heft 11, S. 709 - 716.
- [5] N.N., Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1998, Bundesministerium
für Wirtschaft und Technologie, Berlin 1999.
- [6] N.N., Energie Daten 2000, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin 2000.
- [7] Kaltschmitt M., Wiese A.,
Erneuerbare Energien, ISBN 3-540-63219-0, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
- [8] Schiffer, H.-W.,
Deutscher Energiemarkt '95, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv, Essen 46. Jg (1996)
Heft 3, S. 150 - 163.
- [9] Schiffer, H.-W.
Deutscher Energiemarkt 2000, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv, Essen , 51. Jg (2001)
Heft 3, S. 106 - 120.
- [10] C.J. Campbell,
Die Erschöpfung der Welterdölreserven, Vortrag im Dezember 2000,
<http://www.geologie.tu-clausthal.de/Campbell/vortrag.html>
- [11] Naunin D.,
Elektrische Straßenfahrzeuge, ISBN 3-8169-1075-0, 2. Auflage, Renningen-Malmsheim,
expert Verlag 1994
- [12] Bauer H.,
Kraftfahrzeugtechnisches Handbuch, ISBN 3-18-419122-2, VDI-Verlag, Düsseldorf 1995
- [13] Dunlap J. D.,
Air Quality And Advanced Transportation Technologies, A California Perspective, 15th Electric
Vehicle Symposium, EVS-15, Brüssel 1998
- [14] N.N., Verband der Automobilindustrie, Abteilung Technik, <http://www.vda.de/de>, 1999

- [15] Kolke R.,
Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen, Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, Umweltbundesamt, Berlin 1999.
- [16] Kolke R.,
Environmental Policy Targets in the Traffic Sector Applied to the Example of Fuel Cell Propulsion, The 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 20. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [17] N.N., Klimagase,
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/klimagase.htm>, Berlin 1998.
- [18] Reglitzky A. A., Schnieder H., Krumm H.,
Chancen zur Emissionsminderung durch konventionelle und alternative Kraftstoffe, in VDI Berichte Nr. 1020 1992, Aspekte Alternativer Energieträger für Kraftfahrzeuge, VDI Verlag, Düsseldorf 1992
- [19] N.N., Treibhauseffekt,
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/treibhauseffekt.htm>, Berlin 1998.
- [20] N.N., Konzentration von Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre 1958 bis 1992,
<http://www.umweltbundesamt.org/>
- [21] Gerstengarbe F.-W., Werner P. C.,
Posteraustellung im Landtag Brandenburg, First Sustainability Days, Potsdam, Germany, 28 September 5 October 2001.
- [22] N.N., Klimaänderungen weltweit
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/klimaaenderungen-weltweit.htm>, Berlin 2001
- [23] Hasselmann K.,
Klimaänderung mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit von 95% nachgewiesen,
<http://www.dkrz.de/neuigkeiten/hasselmann.html>, Hamburg 1995
- [24] Rentz H., Schiffer H.-W.,
Entwicklung und Umsetzung des Weltklimaprogramms, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 50 (2000) Heft 8, S. 591 - 596.
- [25] Stock M.,
Klimawandel: Normalfall für die Erde - Störfall für die Menschheit?, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 51 (2001) Heft 3, S. 129 - 135.
- [26] N.N., Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Sekretariat der Klimarahmenkonvention, Bonn 1997.
- [27] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU),
Szenario zur Ableitung globaler CO_2 -Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien, am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1995
- [28] Mayerhofer P., Friedrich R.,
Die Schadkosten der Klimaänderung, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv, Essen , Jg. 46 (1996) Heft 1/2 S. 58 - 64.
- [29] Schnabel U.,
Klima für Angepaßte, in „Die Zeit“, Hamburg am 5. April 2001, Nr. 15, S. 40.

- [30] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Ziele für den Klimaschutz 1997, am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1997
- [31] N.N., Kohlendioxidemissionen,
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/kohlendioxidemissionen.htm>, Berlin 2000.
- [32] N.N., Selbstverpflichtungserklärung der Deutschen Wirtschaft,
<http://www.bmu.de/sachthemen/energie/selbstverpflichtungs.htm>, Berlin, 2000
- [33] N.N., Klimaschutz im Verkehrsbereich,
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/klimaver.htm>, Berlin 1999
- [34] N.N. Umwelt, Sonderteil Nationales Klimaschutzprogramm, Nr. 11 / 2000, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [35] N.N., Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern in Deutschland 1965 bis 2000, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [36] N.N., Güterkraftverkehr deutscher Lastkraftwagen ab 1991, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [37] Schindler V.,
Kraftstoffe für Morgen, ISBN 3-540-62049-4, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1997
- [38] Heinrich H., Decker G., Wegener R.,
Alternative Kraftstoffe – Chancen und Risiken aus Sicht von Volkswagen, in VDI Berichte Nr. 1020 1992, Aspekte Alternativer Energieträger für Kraftfahrzeuge, VDI Verlag, Düsseldorf 1992
- [39] N.N., Kohlendioxidreduzierung,
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/kohlendioxidreduzierung.htm>, Berlin 1998.

Literatur zu Kapitel 3 (Optimierte Fahrzeugantriebe)

- [40] N.N., Zulassungen von fabrikneuen Lastkraftwagen nach Nutzklassen von 1950 bis 1999, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [41] N.N., Zulassungen von fabrikneuen Zugmaschinen nach kW-Klassen von 1950 bis 1999, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [42] N.N., Neuzulassungen von Personenkraftwagen mit Diesel-Antrieb nach Herstellern und Typgruppen in Deutschland Mai 2001, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [43] Grigull U.,
Technische Thermodynamik, ISBN 3-11-006405-7, 3. erw. Auflage, Berlin, New York, de Gruyter, 1977.
- [44] Kasendorf J., Woisetschläger E.,
Diseleinspritztechnik, ISBN 3-8023-0463-1, 5. aktualisierte und erweiterte Auflage, Würzburg, Vogel Verlag, 1997.

- [45] Bauder R., Bach M., Mikulic L., Plözl H.-W., Reuss T.,
Das Potential des neuen Vierventil- V6 TDI Motors von Audi, 6. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik '97.
- [46] Körner Ch.,
Wirkungsgradoptimiertes Offline- und Online-Energiemanagement bei einem seriellen
Hybridantrieb, Dissertation in der Abteilung Energiewandlung und -speicherung der Universität
Ulm, Cuvillier Verlag, Göttingen 2002
- [47] Bargende M., Weining H.-K., Lautenschütz P., Altenschmidt F.,
Thermodynamik der neuen Mercedes-Benz 3 Ventil-Doppelzündler V-Motoren, 2. Stuttgarter
Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 252 - 267, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [48] Philips P., Grieser K., Mayer T., Dickers G., Wallbrück B.,
Fiesta Magerkonzept für Stufe III Emissionen, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und
Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [49] N.N., Kraftstoffverbrauch der von Volkswagen in Deutschland ausgelieferten Pkw, Volkswagen
Umweltbericht 1999/2000,
<http://www.volkswagen.de/umwelt/deutsch/umwelt99/forschen/kraft.htm>.
- [50] Brogan M. S., Twigg M. V., Wilkins A. J. J., Jordan K., Brisley R. J.,
Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Denox Katalyse Technologie für Diesel- und
Magermotoren, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997,
Aachen.
- [51] Müller W., Strehlau W., Leyer J., Lox E., Kreuzer, T. Ostgathe K.,
Neu entwickelte Lean- NO_x -Katalysatoren für magerbetriebene Ottomotoren, 2. Stuttgarter
Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 149 - 170, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [52] Brandt S., Dahle U., Hochmuth J. K., Deeba M.,
Entwicklungsfortschritte für magerbetriebene Ottomotoren, 3. Stuttgarter Symposium
Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 83 - 99, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [53] Weisweiler W., Schneider M.,
 NO_x -Speicher-Reduktions-Katalysatoren zur NO_x -Minderung in sauerstoffreichen Abgasen,
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 100 - 121, 23. - 25. 2.
1999, Stuttgart.
- [54] Euchlseder H., Baumann E., Flick W., Müller P.,
Benzin Direkteinspritzung - Chancen und Risiken im Hinblick auf zukünftige
Emissionsszenarien, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999,
Aachen.
- [55] Wolters P., Baumgarten H., Geiger J., Bozelie P.,
Luftgeführtes Otto-DI-Brennverfahren für EU IV Gesetzgebung, 9. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [56] Wolters P., Grigo M., Walzer P.,
Betriebsverhalten eines direkteinspritzenden Ottomotors mit luftgeführter Gemischbildung,
6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [57] Niefer H., Fray J., Krämer S, Karl G.,
Der Direkteinspritz-Ottomotor im Spannungsfeld zwischen Euphorie und Wirklichkeit, 3.
Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 202 - 234 , 23. - 25. 2.
1999, Stuttgart.

- [58] Stutzenberger H., Kampmann S.,
Benzin-Direkteinspritzung - Systemaufbau, Gemischbildung und Motorverhalten, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 2 - 16, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [59] Pflüger F.,
Die zweistufige geregelte Aufladung - ein neues Aufladessystem für Nutzfahrzeugmotoren, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 268 - 285, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [60] Kemmler R., Krämer M., Abthoff J., Kühn M., Lehmann H.,
Chancen und Risiken der Hochaufladung am Ottomotor, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [61] Fröhlich K., Meyer R., Miersch J., Reulein C., Schwarz Ch., Witt A.,
Downsizing: CO_2 Potentiale - Technische Realisierbarkeit, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [62] Miersch J., Reulein C., Schwarz Ch.,
Rechnerischer Vergleich unterschiedlicher Motorenkonzepte zur Verbrauchsreduzierung und Dynamiksteigerung, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 165 - 181, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [63] Drangel H., Bergsten L.,
Der neue Saab SVC Motor - Ein Zusammenspiel zur Verbrauchsreduzierung von variabler Verdichtung, Hochaufladung und Downsizing, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [64] Pischinger M., Salber W., Kemper H., Baumgarten G., van der Staay F.,
Darstellung der Potentiale des elektromagnetischen Ventiltriebs im Fahrzeugbetrieb, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [65] Schwaderlapp M., Schebitz M., Koch F.W., Salber W.,
Die elektromagnetische Ventilsteuerung - Mehr als ein Verbrauchskonzept, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [66] Salber W., Kemper H., van der Staay F., Esch T.,
Der elektromechanische Ventiltrieb - Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte, in MTZ Motortechnische Zeitschrift 62 (2001) Heft 1.
- [67] Samenfink W., Schlerfer J., Joos K., Weining H. K., Holder E., Heel B.,
Unterschreitung der ULEV-Grenzwerte an einem DC-Versuchsmotor - Beitrag einer Sart- und Nachstartoptimierung, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [68] Fitzen M., Endres H., Königstedt J., Maly Ch.,
Der 1,8l-5V-Turbomotor von Audi - die konsequente Weiterentwicklung zum ULEV-Konzept, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [69] Baumgarten H., Goertz W., Rodeland J., Weinowski R.,
SULEV - Emissionskonzept mit konventionellen Maßnahmen, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [70] Frey J. Ottenbacher H., Michel H., Werner P.,
Eine neuartige Herausforderung für die Motorenentwicklung - Der Lösungsweg für die Motorisierung der neuer A-Klasse von Mercedes-Benz, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.

- [71] Marquardt K.-J., Braun T., Binder K.,
Ein Abgasbehandlungssystem für Dieselmotoren auf Basis der SCR-Technologie, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 122 - 138 , 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [72] Gerwing W., Boehner W.,
Lambda-Regelung bei Pkw-Dieselmotoren, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 36 - 51, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [73] Taschek M., Fettes C., Leipertz A.,
Analysis of the Combustion Process in an Heavy-Duty Transparent Diesel Engine Equipped with 4-Valve Cylinder Head and Common Rail Injection System, SAE Paper 2001-01-3181 in ATTCE 2001 Proceedings Vol. 2, 1. - 3. 10. 2001, Barcelona, Spain.
- [74] Steiger W., Zima P.,
Die neuen Direkteinspritzer Dieselmotoren, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 94 - 108, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [75] Bauder R., Dorsch W., Plözl H.-W., Reuss T.,
Die Möglichkeiten zur Emissionsreduzierung am Audi V6 TDI, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 41 - 58 , 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [76] Peters A., Pütz W.,
Die Entwicklung des Common-Rail-Einspritzsystems und dessen Potential für den Direkteinspritzer-Dieselmotor, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [77] Peters A.,
Das Common-Rail-Einspritzsystem - Ein Potential für den Direkteinspritz-Dieselmotor, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 17 - 39 , 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [78] Tanaka H., Sato Y.,
Development of a Common-Rail Proportional Injector Controlled by a Tandem Arrayed Giant-Magnetostrictive-Actuator, SAE Paper 2001-01-3182 in ATTCE 2001 Proceedings Vol. 2, 1. - 3. 10. 2001, Barcelona, Spain.
- [79] Lenz H. P., Klawatsch D., Gruber M.,
Dieselpartikel: Einfluß der Kraftstoffqualität bei verschiedenen Motorkonzepten, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [80] Krüger M., Herrmann H.-O., Laumeen H.-J.,
Verbrennungs- und Motorbetriebsverhalten von Pkw-DI-Dieselmotoren mit Common-Rail- bzw. nockengesteuertem Einspritzsystem, 20. Internationales Wiener Motorensymposium, 6. - 7. 5. 1999, Wien.
- [81] Krämer M., Duvinage F., Stotz M., Peters A., Ellwanger S., Koyanagi K.,
Potential der Common-Rail Einspritztechnologie beim DE Dieselmotor, 20. Internationales Wiener Motorensymposium, 6. - 7. 5. 1999, Wien.
- [82] Naver D.,
Anpassung eines Motorkonzepts an unterschiedliche Fahrzeuge, Emissionsbestimmungen und Einsatzgebiete am Beispiel des Mercedes-Benz 2,7 l CDI-Motors, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 19 - 35, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.

- [83] Schittler M., Kerschbaum W.,
Baureihe 500 - Die Motoren für die neue Generation schwerer Lastkraftwagen von Mercedes-Benz, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 79 - 93, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [84] Teetz Ch., Freitag M.,
Potentiale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei kompakten Hochleistungsdieselmotoren, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 286 - 297, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [85] Dürnholz M., Krüger M.,
Hat der Dieselmotor im Pkw eine Zukunft?, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [86] Giere H.-H., Nierhauve B.,
Kraftstoffe aus Sicht eines Mineralölunternehmens, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 119 - 132, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [87] Hüttebräucker D., Stotz M., Weymann P., Scherenberg D.,
Das Flexible-Fuel-Konzept von Mercedes-Benz, in VDI Berichte Nr. 1020 1992, Aspekte Alternativer Energieträger für Kraftfahrzeuge, VDI Verlag, Düsseldorf 1992
- [88] Richter H., Huynh N.H., Krickelberg E., Schulz H.,
Erfahrungen im Hause Posche mit Methanolkraftstoffen, in VDI Berichte Nr. 1020 1992, Aspekte Alternativer Energieträger für Kraftfahrzeuge, VDI Verlag, Düsseldorf 1992
- [89] Digeser S., Jorach R., Willand J., Mahr B.,
Der Wasserstoff-Nutzfahrzeugmotor mit früher innerer Gemischbildung auf Basis der neuen Mercedes-Benz-Motorengeneration BR900, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 135 - 148, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [90] Zittel W., Wurster E., Weindorf W.,
Wasserstoff in der Energiewirtschaft,
<http://www.hydrogen.org/Wissen/w-i-energiw.html>, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH 1996
- [91] Ijaz M. I.,
Hydrogen Energy Systems in Future Fuel Cell Electric Vehicles, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [92] Oelerich W., Klassen T., Eigen N., Bormann R.,
Nanocrystalline Metal Hydrides for Hydrogen Storage in Functional Materials, Wiley-VCH, Weinheim 2000.
- [93] Seisler J.,
Natural Gas Vehicles - A Review, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [94] Sridhara K., Gopalakrishnan A.,
Emission of an Automotive Engine with LPG & CNG, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [95] Brünemann R., Holder E., Kemmler R., Koehlen Ch., Matt M.,
Einfluß von leichtflüchtigem Startkraftstoff auf die Abgasemissionen von Pkw-Ottomotoren, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 85 - 100, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.

- [96] Knott H., Hoerner R.v., Steinert R.,
Entwicklung eines Erdgas-Magermotors mit elektronischem Gaseinblssystem für
Nutzfahrzeuge, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997,
Aachen.
- [97] Friedrich C., Quarg J., Brenner H.-J., Bargende M.,
Leistungs- und Emissionspotenzial eines aufgeladenen 1-Liter -Erdgas-Motors, 4. Stuttgarter
Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 101 - 118, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [98] Theisen T.,
Das Erdgasfahrzeug - Antriebskonzept mit Zukunft?, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv,
Essen , Jg. 49 (1999), Heft 12 S. 841 - 843.
- [99] Niehörster K.,
Markteinführung für Erdgasfahrzeuge auf dem Sprung, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen,
etv, Essen , Jg. 48 (1998), Heft 6, S. 408 - 409.
- [100] Wallentowitz H., Crampen M.,
Einfluß von Nebenaggregaten auf den Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Fahrzyklen, in
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 96 (1994) Heft 11 S. 643 - 644.
- [101] Esch T., Saupe T., Fahl E., Koch F.,
Verbrauchseinsparung durch bedarfsgerechten Antrieb der Nebeaggregate, MTZ
Motortechnische Zeitschrift 55 (1994) Heft 7/8 S. 416-431.
- [102] Voß B.,
Wirkungsgradverbesserungen von Fahrzeugantrieben durch eine bedarfsorientierte Auslegung
der Nebenaggregate und ihrer Antriebe, Fortschrittberichte VDI, Reihe 12 Verkehrstechnik /
Fahrzeugtechnik Nr. 159, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.
- [103] Michels K., Schmedes H- G.,
Einfluß des Generators auf den Kraftstoffverbrauch, MTZ Motortechnische Zeitschrift 56 (1995)
Heft 12, S. 728- 733.
- [104] Westendorf H., Zahn U., Greve P.,
Elektronisch geregelte Kupplung für Energiesparkonzete, 4. Aachener Kolloquium Fahrzeug-
und Motorentechnik, 1993 Aachen
- [105] Zeyen K.-P., Pels T.,
ISAD - Ein computergestütztes Integriertes Starter-Alternator-Dämpfer-System für
Verbrennungsmotoren, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10.
1997, Aachen.
- [106] Sattler M.,
Die elektrische Maschine im Antriebsstrang - Aktueller Entwicklungsstand, 4. Stuttgarter
Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 182 - 191, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [107] Kramer M., Denner A., Schmidt-Brücken H.-J.,
Kurbelwellen-Starter-Generatoren für die nächste Automobilgeneration - Erfahrungen und
Ausblicke, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [108] Mies M., Landsmann G., Quarg J.,
Schwungrad-Generator-Starter im Systemvergleich, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und
Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.

- [109] Dümeland M., Bischof H., Bork N., Schenk R.,
Vergleich unterschiedlicher Konzepte für Startergeneratoren, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [110] Bady R., Renner C., Biermann J.-W.,
Elektrofahrzeugentwicklungen in Japan / USA / Europa, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [111] Lewis C.A., Blackledge D.A.,
Electric Vehicles Within the JUPITER-2 THERMIE Demonstration Project, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [112] Naunin D.,
EV Market in Germany; Activities in the Industrie and their Political Support, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [113] Buonarota A., Bocchi M. Bortoli M.,
An Original Procedure for VRLA Batteries Fast Charging, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [114] Pinsky N., James W., Argueta J., Cabrera A., Knipe T., Wehrey M., Swaroop R.,
Fast Charge Power Optmization for Lead-Acid Batteries, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [115] Heider A.,
Technikfolgenbewertung des Elektro-Pkw bei geschlossener Betrachtung von Verkehr und Energieversorgung, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 45, ISBN 3-86073-610-8, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997 Aachen.
- [116] Blümel H., Wein K.,
Kosteneffizienz alternativer Pkw-Antriebe, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, etv, Essen Jg. 46 (1996) Heft 3, S. 164 - 170.
- [117] Beretta J.,
New Classification On Electric-Thermal Hybrid Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [118] Beretta J.,
New Classification Approach On Electric-Thermal Hybrid Systems, EAC 1999, Barcelona.
- [119] Toussaint Y., Naniot N.,
Reaching $60 \text{ g / km } CO_2$ with an Optimized Parallel Hybrid Drivetrain, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [120] Lehna M.,
Audi Duo - Ein Hybridfahrzeug geht in Serie, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [121] Lehna M., Heidl R.,
Hybridfahrzeug Audi Duo, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 312 - 321, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [122] Kalberlah A.
Entwicklungsstand von Hybridfahrzeugen, in ÖZE Jg. 42 Heft 8 (August 1989), S. 345 - 353.
- [123] Buchheim R., Driehorst F.,

- Zukünftige Entwicklungsschwerpunkte bei Elektro- und Hybridfahrzeugen, in ETG-Fachberichte, Band 42 S. 11 - 36, VDE-Verlag, 1993, Offenbach.
- [124] Josefowitz W.,
Hybridfahrzeuge, Stand der Technik und Erfahrungen, Volkswagen AG, Wolfsburg, März 1993.
- [125] N.N.
2 in 1, Hybrid Powertrains, Energies in Synergy, DaimlerChrysler AG, Stuttgart.
- [126] Vollmer T., Höhn B.-R.,
Operational Strategy and Control of the Autark Hybrid of the TU München, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [127] Mayer T.,
Modellierung und Regelung des Autarken Hybridfahrzeugs, Dissertation an der Techn. Univ. München 1998, Herbert Utz Verlag GmbH, München 1999.
- [128] Höhn B.-R., Plaum H., Guttenberg P.,
Investigating a Parallel Hybrid on a Testrig, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [129] Höhn B.-R., Plaum H., Guttenberg P.,
Testing of the Autark Hybrid in Test Rig, SAE Paper 2001-01-3419 in ATTCE 2001 Proceedings Vol. 2, 1. - 3. 10. 2001, Barcelona, Spain.
- [130] Müller C., Schröder D.,
CVT Shift Control for a Hybrid Vehicle, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [131] Takaoka T., Kobayasashi Y., Nishigaki T.,
Ein hocheffizientes emissionsarmes Hybridfahrzeug, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [132] Shingo K., Kubo K., Katsu T., Hata Y.,
Development of Electric Motors for the TOYOTA Hybrid Vehicle „PRIUS“, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [133] Buschhaus W., Brandenburg L. R., Stuntz R. M.,
Hybrid Electric Vehicle Development at Ford, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [134] N.N., Spar-Motor von Smart,
<http://www.Autouniversum.de>, 22.8.2001
- [135] Ch. Körner, P. Seger, A. Wagener, H. Kabza,
Hybrid System Architectures as a Promising Approach to Emission Reduction, ISATA 1999, Vienna
- [136] Ch. Körner, P. Seger, A. Wagener, H. Kabza,
System Alternatives for Efficient Vehicle Drives, EAEC 1999, Barcelona
- [137] Ch. Körner, P. Seger, A. Wagener, H. Kabza,
Alternatives for Efficient Vehicle Drives, GPC 1999, Stuttgart
- [138] Gossen F., Grahl M.,
Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.

- [139] Wulff G., Reusing G., Schiebold S., Bauch D.,
Integration von elektrischen und mechanischen Antriebskomponenten, 4. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik, 1993, Aachen.
- [140] Björler P.,
VOLVO Gas Turbine Hybrid City Bus, Experience and Results from an Ongoing Field Test,
17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [141] Mourad S., van de Weijer C.,
Dedicated Auxiliary Power Units for Hybrid Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium
EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [142] Kitada S., Aoyama S., Hattori N., Maeda H., Matsuo I.,
Development of a Parallel HEV System Incorporating a CVT, 15th Electric Vehicle Symposium
EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [143] Inada E., Matsuo I., Tahara M. Abe T.,
Development of a High-Performace Hybrid Electric Vehicle "Tino Hybrid", 17th Electric
Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [144] Kordesch K., Simader G.,
Fuel Cells and their Application, Wiley / VCH, Weinheim 1996
- [145] Noreikat K. E., Panik F., Franck M.,
Brennstoffzellenfahrzeuge: NEBUS, NECAR I, NECAR II, . . . , 6. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [146] Schmitz P., Bates B., Sims R.,
Brennstoffzellenforschung und -entwicklung bei Ford, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und
Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [147] Dircks K.,
Recent Advances in Fuel Cells for Transportation Applications, 15th Electric Vehicle
Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [148] Ap N. S., Guyonvarch G., Cloarcec M., Rouveyre L.,
Cooling System and Climate Control of Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), 17th Electric Vehicle
Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [149] Panik F.,
Brennstoffzellen als Lösung für saubere Automobilantriebe, 3. Stuttgarter Symposium
Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 898 - 912 , 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [150] Kordesch K., Hacker V.,
Fuel Cells with Circulating Electrolytes and their Advantages for DMFCs, 17th Electric Vehicle
Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [151] Kiryu K., Tsunouchi O., Takumi A.,
Advanced Methanol Reformer for Fuel Cell powered EV, 15th Electric Vehicle Symposium
EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [152] Eggert A. R., Friedman D. J., Cunningham J. M., Ramaswamy S.,
Simulation and Performace of an Indirect Methanol PEM Fuel Cell System,
15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [153] Martin A.,

Progress of Fuel Cell Technologie Allows for Different Fuel Options, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.

- [154] Walzer P.,
Future Power Plants for Cars, SAE Paper 2001-01-3192 in ATTCE 2001 Proceedings Vol. 2, 1. - 3. 10. 2001, Barcelona, Spain.
- [155] Köhle S., Lück P.,
Development Framework of the Zero emission Vehicle successor to Volkswagen Golf CitySTROMer, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [156] Borgmann K., Steinparzer F.,
Einsatzfelder moderner Pkw-Dieselmotoren für zukünftige Fahrzeuganforderungen, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [157] Ebersperger R., Mauch W., Rasmussen C., Wagner U.,
Wieviel Energie braucht ein PkW?, in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 48 (1998) Heft 5, S. 323 - 329.

Literatur zu Kapitel 4 (Der serielle Hybridantrieb)

- [158] Selzer H., Ament C., Sorg M.,
Electric Storage System for Great Mileage and High Accerleration, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin.
- [159] Heinemann D., Naunin D., Petsch G.,
Ultracaps in power-assist applications in Battery Powered Electric Vehicles - Implications on Energy Management System, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [160] Budig P.-K.,
Design of the Propulsion System of a Hybrid Car under Consideration of the Optimum Voltage, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [161] Jonokuchi H. und 8 weitere
EV Drive System with Voltage Booster, 13th Electric Vehicle Sysposium EVS-13, Oktober 1996, Osaka, Japan.
- [162] Wagener A., Körner Ch., Seger P., Kabza H.,
DC/DC Converter Controlled by an Intelligent Battery Management System Decoupling a Variable Voltage Battery from the DC Link in Hybrid Electric Vehicles, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [163] Valentine R., Pinewski P., Huetti T.,
Electronics for Electric Vehicle Motor Systems, SAE Paper No. 951888, Electric and Hybrid Vehicles - Implementation of Technologies, SAE Future Transportation Technologie Conference, 1995, Costa Mesa.
- [164] R. L. Hodkinson,
Operating Chracteristics of a 45 kW Brushless DC Machine, 12th Electric Vehicle Symposium EVS-12, Vol. 2, 1994, Anaheim, USA.
- [165] N.N.,
UQM Traction Drive System PowerPhase System, <http://www.uqm.com>, 2001.

- [166] Rütthlein A., Schiebold S., Bauch D.,
Automotive Drive Train Products for Electric and Hybrid Vehicles, 12th Electric Vehicle Symposium EVS-12, Vol. 2, 1994, Anaheim, USA.
- [167] Weimer J.,
A New Integrated High-Power Transaxle Drive Based on a Permanently Excited Synchronous Machine, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [168] N.N.,
Elektrische Antriebe von Sachs, Mannesmann Sachs AG, Schweinfurt.
- [169] Chan C. C., Chau K. T., Jiang J. Z., Xia W., Zuh M., Zhang R.,
Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 43, No. 2, April 1996.
- [170] Nagayama K. sowie 5 weitere,
Comparison Study between Induction Motor and Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Application, 13th Electric Vehicle Symposium EVS-13, Oktober 1996, Osaka, Japan.
- [171] Consoli A., Cardaci W., Scarcelle G., Testa A.,
Efficiency Optimization Techniques in Induction Motor Drives for Electric Vehicle Application, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [172] Fetz J.,
Fehlertolerante Regelung eines Asynchron-Doppelantriebes für ein Elektrospeicherfahrzeug, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Verlag der Augustinus-Buchhandlung, 1993, Aachen.
- [173] Rahman K. M. Fahimi B., Suresh G., Rajarathnam A. V., Ehsani M.,
Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues, in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 36, No. 1 Jan./Feb. 2000.
- [174] Winter U.,
Comparison of Different Drive Systems Technologies for Electric Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [175] Menne M., Reinert J., De Doncker R.W.,
Energy-Efficiency Evaluation of Traction Drives for Electric Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [176] Osawa S., Kosaka H.,
Honda EV PLUS - Technical Feedback from First-Year Marketing Experience, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [177] Ehsani M., Rahman K. M., Toliyat H. A.,
Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 44, No. 1, Feb. 1997.
- [178] Haradea T., Baba Y.,
Development of IGBT Module for the TOYOTA Hybrid System, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [179] Chan C.C., Chau K.T.,
An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No 1, Feb. 1997, S. 3-13.

- [180] Ehsani M., Rahman K. M., Bellar M. D., Severinsky A.,
Evaluation of Soft Switching for EV and HEV Motor Drives, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 48. No. 1, Feb. 2001.
- [181] Bull R.N., Budgen W.G., Brooker S.D., Galloway R.C., Holmes W.A.
Sodium/Nickel Chloride ZEBRA Batteries: Lifetime and Performance Characteristics, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [182] Dustmann C. J.,
The Swiss ZEBRA Battery System, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [183] Sutula R.A. und 5 weitere,
Electric and Hybrid Vehicle Energy Storage R&D Programms of the U.S. Department of Energy, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [184] Kimura T., Ikoma M., Kanamru K.,
Nickel Metal-Hydride Batteries for Hybrid Electric Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [185] N.N.,
High Power Nickel-Metal Hydride cell for the automotive industry, Saft, Bagnolet Frankreich.
- [186] Köhler U., Kümpers J.,
Hochleistungsbatterien für neue Fahrzeuganwendungen, VARTA Aktiengesellschaft, Hannover.
- [187] Köhler U., Niggermann E.,
High Performace Nickel-Metal Hydride Batteries for Electric ans Hybrid Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [188] N.N.,
High-Power Lithium-ion cells for automotive industry, Saft, Bagnolet Frankreich.
- [189] N.N.,
Medium Range Lithium-ion cells for automotive industry, Saft, Bagnolet Frankreich.
- [190] Blanchard Ph., Cesbron D., Rigobert G., Sarre G.,
Performance of Saft Li-Ion Batteries for Electric Vehicles, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [191] Brohm T., Maul M., Meisser E.,
Advanced Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [192] Letourneau C., Geoffroy D., St-Germain P.,
Progress in Lithium Polymer Battery System for Electric Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [193] Rouillard R., Richard M., Pomerleau D., St-Germain P., St-Pierre C.,
Development of the Lithium Polymer Battery for the GM Precept, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [194] Yoshihara Y., Ando K., Hirao A., Hiramatsu A., Hoshirara N.,
Development of Long Live VRLA Battery for EVs and HEVs, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.

- [195] Hattori T., Ando K., Imai H., Hoshihara N.,
Extension of the Driving Range Regarding the High Power and Long Cycle Live VRLA Battery
by Using the Fast Charging Method, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [196] Keyser M.A., Pesaran A., Mihalic M.M.,
Charging Algorithms for Increasing Lead Acid Battery Cycle Life for Electric Vehicles,
EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [197] Kopecky Ch.,
Power für den Bus, in EPCOS Components 1/01.
- [198] N.N.,
EPCOS UltraCap Double Layer Capacitors Product Profile 2001, EPCOS AG, Deutschland.
- [199] Seger P., Körner Ch., Wagener A., Kabza H.,
BATTSIM - An Adaptive Simulation Tool for Traction Batteries Based on Battery
Characteristics, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [200] Saupe G.,
Photovoltaische Stromversorgungen mit Bleibatteriespeichern, Dissertation an der Fakultät für
Elektrotechnik der Universität Stuttgart, Institut für Theorie der Elektrotechnik, 1993, Stuttgart.
- [201] Lehna M.
Hybrid Powertrain Development, ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation
Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [202] Kok D., Spijker E., Seibertz A., Buller S.,
42V Energy Storage System for Stop-Start Application in Hybrid Vehicles, 18th Electric Vehicle
Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [203] Moore S.W., MacLean G.,
Control and Management Strategies for the Delphi High Power Litium Battery, 18th Electric
Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [204] Origuchi M. und 6 weitere,
Lithium-ion Battery Application to the Tino Hybrid, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [205] Hornung M., Braun M.,
A Charging and Charge Equalization System For Series Connected Batteries, 15th Electric
Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [206] Heinemann D., Naunin D.,
Realization of a Battery Management System for x-EVs, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000,
Montreal.
- [207] Beya K.B., Maggetto G.,
Impedance-Based State of Charge Indicator for EV & HEV Batteries, EVS-17, 15. - 18. Oktober
2000, Montreal.
- [208] Körner Ch., Seger P., Kabza H., Wagener A.,
A Modular Battery Management System for Various Types of Batteries in a Series Hybrid
Drivetrain, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [209] Göhring M.,
Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1997.

- [210] Clucas D.M., Raine J.K.,
The Design of a Stirling Engine Battery Charger for Yachts, 6th International Stirling Engine Conference ISEC 93, 26. - 28. Mai 1993, Eindhoven, S. 87 - 92.
- [211] Schmidt T.,
Hybrid Vehicles for Stirling Engines, 6th International Stirling Engine Conference ISEC 93, 26. - 28. Mai 1995, Surrey, UK, UK & International Press.
- [212] Mackay R.,
Gas Turbine Generator Sets for Hybrid Vehicles, SAE Paper No. 920441 in Electric and Hybrid Vehicle Technology (SP-915), International Congress & Exposition, in Detroit, 24. - 28. Feb. 1992.
- [213] Mackay R.,
Development of a 24 kW Gas Turbine-Driven Generator Set for Hybrid Vehicles, SAE Paper No. 940510 in Electric and Hybrid Vehicle Technology (SP-1023), International Congress & Exposition, in Detroit, 1994.
- [214] Randle J.N.,
Gas Turbine: a possible Hybrid Solution, in Electric & Hybrid Vehicle Technology '95, Surrey, UK: UK & International Press, 1995.
- [215] Wältermann P.,
Der serielle Hybrid, Vom rechnergestützten Entwurf bis zur Hardware-in-the-Loop-Realisierung, in Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 447, VDI Verlag 2000, Düsseldorf.
- [216] S. Mourad,
Dedicated Auxiliary Power Units for Hybrid Vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [217] Pelkmans L., Coenen P., Vermeulen F.,
Estimation of the Real World Emissions of a Series Hybrid Vehicle, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [218] Jaura A. K., Breida M. T., Gomes E. D.,
Interfacing a CIDI Engine in a Hybrid Vehicle, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [219] Ando M., Enomoto N., Otori H.,
Advanced Braking System for Electric Vehicles, 14th Electric Vehicle Symposium, EVS-14, Orlando, Florida, Dezember 1997.
- [220] Ozaki M., Shinpo T., Furukawa N.,
A Combined Brake System for Energy Regeneration, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [221] Heitzer H.-D., Seewald A.,
Technische Lösungen für Steer-By-Wire Lenksysteme, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [222] Gottwick U., Booz O., Willmann K.-H.,
Sicherheitskonzept der elektrohydraulischen Bremse, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 668 - 682, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [223] Itten A., Leuenberger W.,
Driven Development, The latest developments in modular drive concepts, in Electric & Hybrid Vehicle Technology 2000.

- [224] Lasson A., Berg N., Jansson B.,
New Hybrid Electric Distribution Truck, in Volvo Technology Report No. 2, 1997.

Literatur zu Kapitel 5 (Antriebssimulation)

- [225] Schlitt H.,
Regelungstechnik : physikalisch orientierte Darstellung fachübergreifender Prinzipien, 1993,
Vogel Verlag, Würzburg.
- [226] Runge W.,
Mechanik/Elektronik Co-Design am Beispiel von Automatgetrieben, 6. Aachener Kolloquium
Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [227] Schwarz J., Krimmel H.,
Vom virtuellen Prototypen zur Seriensteuerung: Einsatz moderner Entwurfs- und
Simulationshilfsmittel bei Getriebesteuerungen, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und
Verbrennungsmotoren, S. 867 - 880, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [228] Hanselmann H.,
Hardware-in-the-Loop Simulation Testing and its Integration into a CACSD Toolset, The IEEE
International Symposium on Computer-Aided Control System Design, 15.-18. September 1996,
Dearborn, Michigan USA.
- [229] Baumann G., Wiedemann J.,
Ein Fahrsimulator für elektronisch gesteuerte Nutzfahrzeuggetriebe, 3. Stuttgarter Symposium
Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 83 - 99, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [230] Hanselmann H.,
Development Speed-Up for Electronic Control Systems, Convergence 98, 19. - 21. Oktober
1998, Dearborn, USA.
- [231] Teich J.,
Digitale Hardware/Software-Systeme, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1997.
- [232] Fennel H., Judaschke U.,
Strukturen für den Fahrzeug-Regelsystemverbund der Zukunft, ATZ/MTZ Sonderausgabe
Automotive Electronics, Januar 2000, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2000,
Wiesbaden.
- [233] Tracey N.,
Comparing OSEK and OSEKtime, Embedded Systems Conference Europe 2001, Stuttgart.
- [234] Grund C.,
Hardware-in-the-Loop Simulation als systematische Testmöglichkeit für ESP-Steuergeräte, 3.
Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 685 - 698, 23. - 25. 2.
1999, Stuttgart.
- [235] Liebl J., Munk F., Schneider J., Kämmer A., Reuss H.-Ch., Zäper A.,
Automatisierter, modellbasierter Test von Motormanagement Systemen, 4. Stuttgarter
Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 746 - 758, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [236] Pansa U.,
SDL & UML, eine vollständige Lösung für die Entwicklung von Embedded Realtime Systems,
Embedded Intelligence 99, 2. - 4- März 1999, S. 721 - 735, Nürnberg.

- [237] Otto Ch.,
Einsatz der UML zur objektorientierten Modellierung von eingebetteten Echtzeitsystemen, Embedded Intelligence 99, 2. - 4. März 1999, S. 760 - 767, Nürnberg.
- [238] Hofmann P., Fasolt J., Geretschläger P., Sakretz R., Wohlgemuth F.,
Automotive UML - eine neue objektorientierte Entwicklungstechnik, Elektronik Automotive, Juni 2000, S. 88 - 95, WEKA Fachzeitschriften-Verlag GmbH, Poing.
- [239] Reulein C., Woschni G.,
GPA - Gesamtprozeßanalyse - Ein Programm zur Simulation dynamischer Vorgänge in komplexen Systemen, 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [240] Zoelch U.,
Ein Beitrag zu optimaler Auslegung und Betrieb von Hybridfahrzeugen, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik der TU München, Shaker Verlag, 1998, München.
- [241] Kohrt J.P., Keller M., Schütte H., Richert J.,
Automatisierter Test und Evaluierung von Steuergeräte mit Hilfe von Hardware-in-the-Loop-Simulation, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [242] Using Matlab, Version 5.3, The Mathworks 1999
- [243] Using Simulink, Version 3.0, The Mathworks 1999
- [244] Johnson V.H., Zolot M.D., Pesaran A.A.,
Development and Validation of a Temperature-Dependent Resistance/Capacitance Battery Model for ADVISOR, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [245] Wipke K., Markel T., Nelson D.,
Optimizing Energy Management Strategy and Degree of Hybridization for a Hydrogen Fuel Cell SUV, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [246] Wohnhaas A., Sailer U.,
Effizienzsteigerung in der Steuergeräte-Softwareentwicklung durch den Einsatz von Simulations- und Softwareerkzeugen, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 543 - 557, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [247] Schlegel M., Irmisch F.,
Standard mit Zukunft: VHDL-AMS, Elektronik Automotive, September 2001, S. 88 - 95, WEKA Fachzeitschriften-Verlag, Poing.
- [248] Stateflow for use with Simulink, Version 3.0, The Mathworks 1999
- [249] Realtime Workshop User Guide, Version 3.0, The Mathworks 1999
- [250] Nahmer S.,
Antriebssystem für Elektrofahrzeuge, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1996 Braunschweig.
- [251] Kleinrath H.,
Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen, Springer Verlag, 1980, Wien.
- [252] Holtz J.,
The Representation of AC Machine Dynamics by Complex Signal Flow Graphs, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, Juni 1995, S. 263 - 271.

- [253] D. Schröder,
Elektrische Antriebe 1, Springer, 1994 ,Berlin.
- [254] E. Seefried,
Frequenzgesteuerte Drehstrom-Asynchronantriebe, Verlag Technik, 1992, München.
- [255] Wieser R.S.,
Optimal Rotor Flux Regulation for Fast-Acceleration Induction Machines in the
Field-Weakening Region, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, Sept.
1998, S. 1081 - 1087.
- [256] Wieser R.S., Lechner A.,
Dynamik Brake Test Stands, IEEE Industry Applications Magazine, November/Dezember 1998,
S. 35 - 40.
- [257] Seok J.-K., Sul S.-K.,
Optimal Flux Selection of a Induction Machine for Maximum Torque Operation in
Flux-Weakening Region, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 4, Juli 1999, S.
700 - 708.
- [258] Pasquali M., Ceraolo M., Sglavo V.,
Modeling and Test on E.V. Lead-Acid Batteries, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. -
24. Oktober 2001, Berlin.
- [259] Van Mierlo J., Maggetto G.,
Models of Energy Sources for EV and HEV: Fuel Cells, Batteries, Ultra-Capacitors, Flywheels
and Engine-Generators, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001,
Berlin.
- [260] Singh P., Fennie C., Reisner D.E., Salkind A.J.,
A Fuzzy Approach to State-of-Charge Determination in High Performance Batteries with
Applications to Electric Vehicle, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998,
Brüssel.
- [261] De Andreis L., Cervati L., Conte M.,
Experimental method for State of Health (SOH) and State of Charge (SOC) assessment on lead
acid batteriens, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [262] A. Wagener, Ch. Körner, P.Seger, H. Kabza,
DC/DC Converter Controlled by an Intelligent Battery Management System, EVS-17, 15. - 18.
Oktober 2000, Montreal.
- [263] Chiavola O., Giulianelli P.,
Modelling and Simulation of Common-Rail Systems, SAE Paper No. 2001-01-3183, in ATTCE
2001 Proceedings Vol. 2, 1. - 3. 10. 2001, Barcelona, Spain.
- [264] Fieweger K., Lang O., Rauscher M., Schernus Ch.,
Overall System Simulation - a tool for virtual ECU development, International Automotive
Conference, 11. - 12. Mai 2000, Stuttgart.
- [265] Lichtenthäler D., Ayebe M., Dufils O., Theuerkauf H.J., Winsel T.,
Neuronal Modeling of Automotive Components and HIL-Simulation, International Automotive
Conference, 11. - 12. Mai 2000, Stuttgart.
- [266] Leifert T.,
Modelling the traction drive of a fork lift, International Automotive Conference, 11. - 12. Mai
2000, Stuttgart.

- [267] Hiramatsu A., Nakayama Y., Kikuchi Y.,
Development of the Battery ECU for the Toyota Hybrid System, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [268] Buchwitz M.,
Die verteilte Intelligenz, in Computer & Automation, 6 / 2001, S. 34 - 39, WEKA Fachzeitschriften Verlag, München 2001.
- [269] Riedel A.,
Glatteis im Labor, Testen von Kfz-Steuergeräten mit HIL, in Systeme 10/2000. S. 87 - 89.

Literatur zu Kapitel 6 (Der Prüfstand)

- [270] Zeltwanger H.,
Wir hatten andere Märkte im Visier, Elektronik, Heft 3/2001 S. 58 - 64.
- [271] Dais S., Unrih J.,
Technisches Konzept des seriellen Bussystems CAN, Automobiltechnische Zeitschrift 94 (1992), Heft 2 und Heft 4, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart.
- [272] Kaiser K-H., Schröder W.,
Maßnahmen zur Sicherung der Daten beim CAN-Bus und deren Beiträge zur Datensicherheit, Automobiltechnische Zeitschrift 96 (1994), Heft 9, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart.
- [273] Lawrenz W.,
CAN Controller Area Network, Grundlagen und Praxis, 3. Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg 1999.
- [274] N.N., Application Layer and Communication Profile, CiA Draft Standard 301 Version 4.0, CAN in Automation (CiA), 1999 Erlangen.
- [275] N.N., Device Profile for I/O Modules, CiA Draft Standard Proposal 401 Version 1.4, CAN in Automation (CiA), 1996, Erlangen.
- [276] Iwanitz F., Lange F.,
OLE for Process Control, Hüthig Verlag, Heidelberg 2001.
- [277] Böttcher J.,
Prüfstands-Kommunikation zwischen PC und SPS über Bussysteme, etz, Heft 23-24/1998, S. 6 - 9, VDi Verlag, Düsseldorf.
- [278] Tindell K.,
Embedded Systems in the automotive Industry, Embedded Intelligence 99, 2. - 4- März 1999, S. 90 - 101, Nürnberg.
- [279] Amsel C., Renner C., Wittek K., Brock H.,
Anwendung des OSEK-Betriebssystems am Beispiel eines Hybridfahrzeugs, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [280] <http://www.osek-vdx.org>
- [281] Schoof J.,
OSEKtime-Standard für zeitgesteuerte Betriebssysteme, Embedded Intelligence 2001, 14.- 16. Februar 2001, S. 53 - 60, Nürnberg.

- [282] Köster L., Thomsen T., Stracke R.,
Von Simulink nach OSEK: Automatische Codegenerierung für Echtzeitbetriebssysteme mit Targetlink, Embedded Intelligence 2001, 14.- 16. Februar 2001, S. 61 - 72, Nürnberg.
- [283] Wagener A., Körner Ch., Seger P., Kabza H.,
Anpassung eines Embedded Target für verteilte Steuer- und Regelungsaufgaben an den Real-Time-Workshop von Matlab/Simulink, Embedded Intelligence 2001, 14.- 16. Februar 2001, S. 459 - 468, Nürnberg.
- [284] Lefarth U., Beck T.,
Qualitäts- und Effizienzsteigerung bei der Entwicklung von Steuergeräte-Software, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 815 - 822, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [285] Schilling R., Gebhardt M., Mews M., Stier G., Beck T., Lefarth U.,
Revolution der automatischen Seriene-codegenerierung, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 1999, Aachen.
- [286] Hüsener T.,
Entwurf komplexer Echtzeitsysteme, Wissenschaftsverlag, 1994, Mannheim Leipzig Wien Zürich.
- [287] H. W. Schüssler,
Digitale Signalverarbeitung, Band I, 3. Auflage , 1992, Springer Verlag Berlin
- [288] Barheine O., Müller-Glaser K.D.,
Concepts for the Usage of Real-Time CORBA in Time-Triggered Architectures, IFAC 2001, Baden-Baden.
- [289] Friedmann S., Götz G., Preis M., Brinz K., Schumacherr B.,
Entwicklung und Applikation eines kennfeld-gesteuerten Antriebsmanagements für ein BMW Parallel-Hybridfahrzeug, 6.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 21. - 22. 10. 1997, Aachen.
- [290] Wagener A., Körner Ch., Seger P., Kabza H.,
Simulation-Based Automatic Code Generation for ECUs in Distributed Control Systems Applied in a Testbed for a Hybrid Vehicle Drivetrain, Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 4.-8. Dezember 2000, Puebla Mexiko.
- [291] Lutz H., Wendt W.,
Taschenbuch der Regelungstechnik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 1998.
- [292] Wittecek N., Dreher U.,
Fuel Cell voltage monitoring systems CVMS with CAN, PCIM Europe //2000 S. 42 - 44.
- [293] Akpolat Z.H., Asher G.M., Clare J.C.,
Experimental Dynamometer Emulation of Nonlinear Mechanical Loads, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 35 (1999), No 6, S. 1367 - 1373.
- [294] Akpolat Z.H., Asher G.M., Clare J.C.,
Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46 (1999), No. 2, S. 370 - 379.

Literatur zu Kapitel 7 (Energiemanagement)

- [295] Mellor P.H., Schofield N., Brown A.J.,

- Assesment of Supercapacitor/Flywheel and Battery EV Traction System, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [296] Selzer H., Ament C., Sorg M.,
Electric Storage System for Great Mileage and High Acceleration, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [297] Wight G., Garabedian H., Arnet B., Morneau J.-F.,
Integration and Testing of a DC/DC Controlled Supercapacitor into an Electric Vehicle, 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18, 21. - 24. Oktober 2001, Berlin.
- [298] Hötzer D., Essers U.,
Entwicklung einer verbrauchsoptimierten Schaltstrategie für ein automatisiertes Schaltgetriebe, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 756 - 770, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [299] Esser J., Heim U., Seidel W., Stelter N.,
Leistungs- und Momentenregelung für Tiptronic- und CVTip-Getriebe - Potentiale und Zielkonflikte, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 771 - 785, 18. - 20. 2. 1997, Stuttgart.
- [300] Hülser H., Löffler J., Mies M.,
Koordinierte Antriebsstrangsteuerung für automatische Getriebe - ein Beitrag zur Entlastung von Fahrer und Umwelt, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 732 - 745, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [301] Predelli O., Schmidt S.,
Kombiniertes Motor-Getriebe-Management am Beispiel eines Fahrzeugs mit Dieselmotor und CVT-Getriebe, Bagnolet Frankreich.
- [302] Delprat S., Guerra T.M., Lauber J., Rimaux S., Combes E.,
Optimal Control Theory Applied to a Parallel Hybrid Powertrain, in Proceedings ISATA 2000, ISATA 2000 Automotive & Transportation Technologie, 25. - 27. September 2000, Dublin
- [303] Guzella L.,
Modelbased Optimization of Hybrid Powertrains, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 566 - 580, 20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [304] Pfiffner R., Guzella L., Onder C. H.,
Fuel-Optimal Control of CVT Powertrains, IFAC 2001, Baden-Baden.
- [305] Rieker H., Dorrer C., Grein F.G., Wiedemann J.,
Informationen über die vorausliegende Strecke als Basis für verbrauchsoptimierte Fahrstrategien, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 716 - 731, 23. - 25. 2. 1999, Stuttgart.
- [306] Drozd P., Fitzpatrick N., Zettel A., Bouchon N., Strange M.,
Adaptive Energy Flow Management in Hybrid Systems, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [307] Mazzuchelli M. und 5 weitere,
Hybrid Bus Power Flow Control System, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [308] Ceraolo M., Pede G., Rossi E.,
Control of Series Hybrid Electric Vehicles: algorithms and experimental tests, 17th Electric Vehicle Symposium, EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.

- [309] Van Mierlo J., Beya Kamba Bimbi, Maggetto G.,
Comparison of power control algorithms in hybrid vehicles, 15th Electric Vehicle Symposium
EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [310] Van Mierlo J., Maggetto G.,
Views on hybrid drivetrain power management strategies, 17th Electric Vehicle Symposium,
EVS-17, 15. - 18. Oktober 2000, Montreal.
- [311] Malmquist A., Rosendahl L., Berg N., Aglén O.,
2nd Generation Gas Turbine Driven Hybrid City Bus, 15th Electric Vehicle Symposium
EVS-15, 29. 9. - 3. 10. 1998, Brüssel.
- [312] Brahma A., Guezennec Y. G., Paganelli G., Rizzoni G., Yurkovich S.,
A Hardware- and Architecture-Independent Supervisory Control Strategy for Hybrid-Electric
Drivetrains, 4. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 581 - 595,
20. - 22. 2. 2001, Stuttgart.
- [313] Kraus M.,
Marktmodell von Strombörsen, in *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, etv, Essen , Jg. 50 (2000),
Heft 7, S. 507 - 513.
- [314] Mohnhaupt M., Scholtissek S.,
Notwendige Neuausrichtung im Energiegroßhandelsmarkt, in *Energiewirtschaftliche
Tagesfragen*, etv, Essen , Jg. 50 (2000), Heft 11, S. 812 - 815.
- [315] Seiler J., Schröder D.,
Hybrid Vehicle Operating Strategies, 15th Electric Vehicle Symposium EVS-15, 29. 9. - 3. 10.
1998, Brüssel.
- [316] Tomaselli L., Le Lièvre A., Alexandre A.,
Innovation in Thermomanagement Systemen von Motoren, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug-
und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.

Literatur zu Kapitel 8 (Zusammenfassung)

- [317] Ehmman D., Wallentowitz H.,
Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung, 9.
Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [318] Uhler W., Weilkes M.,
Stop&Go: Systemkonzept und Gesamtfunktionalität eines erweiterten ACC, 9. Aachener
Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4. - 6. 10. 2000, Aachen.
- [319] Kraxner D., Brüstle C., Striebich H.,
Einfluß von Fahrzeug, Antrieb und Fahrer auf den Kraftstoffverbrauch - eine methodische
Analyse, 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 742 - 755, 18.
- 20. 2. 1997, Stuttgart.

A Prüfzyklen

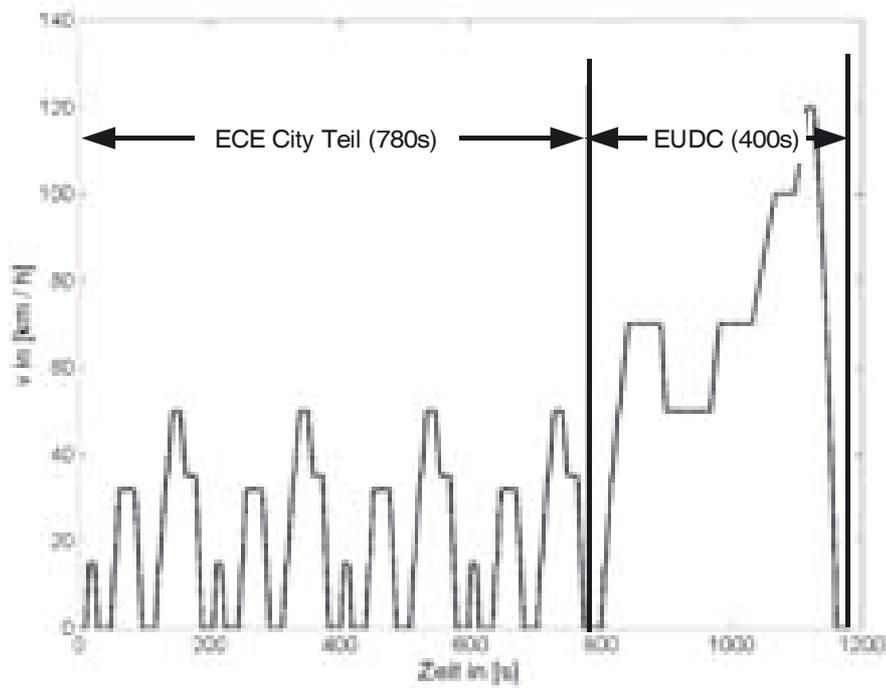


Abbildung 52: Neuer Europäischer Fahrzyklus, 93/116/EWG

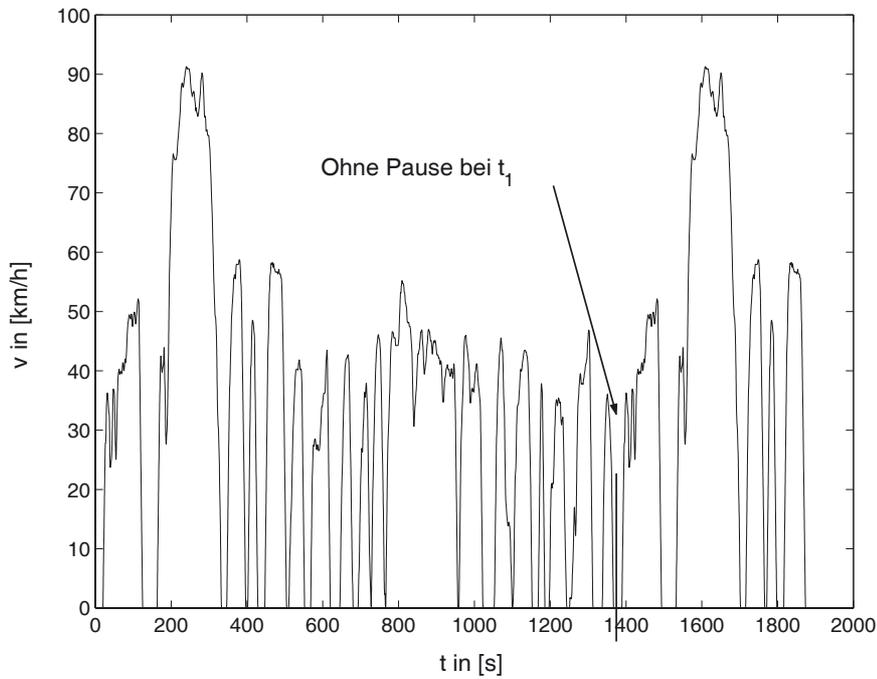


Abbildung 53: Federal Test Procedure ftp-75 ohne 600s Pause bei $t_1 = 1365$ s.

B Fahrzeugdaten

Referenzfahrzeug	
Leergewicht	1205 kg
dynamischer Radradius	0,29 m bei 14"
Luftwiderstand $c_w A$	0,66 m^2
Motorisierung	TDi 1,9 l
max. Leistung	66 kW bei 4500 1/min
max. Moment	210 Nm bei 1950 1/min
Fahrleistung und Verbrauch	
Höchstgeschwindigkeit v_{max}	180 km/h
Beschleunigung 0 - 100 km/h	13,1 s
Kraftstoffverbrauch (Diesel)	
ECE	6,5 l/100 km
EUDC	4,2 l/100 km
ECE	4,9 l/100 km

Tabelle 7: Daten des Referenzfahrzeugs nach [46].

Antriebskomponenten SHEV	
Zwischenkreis	600 V
Traktionsmotor Simulation	66 kW ASM
Traktionsmotor Prüfstand	78 kW ASM
Speicher	Optima VRLA 7 kWh
Verbrennungsmotor	TDi 1,9 l
Generator	PSM mit 55 kW _{S1}

Tabelle 8: Antriebskomponenten des Hybridantriebs in Simulation und Prüfstand.

Leergewicht des Referenzfahrzeugs	1205 kg
abzüglich Schaltgetriebe	- 50 kg
zuzüglich Generator + Umrichter	+ 70 kg
zuzüglich Speicher	+ 65 kg
zuzüglich Traktionsmotor	+ 90 kg
zuzüglich Verkabelung, Elektronik	+ 20 kg
Leergewicht SHEV	1400 kg
Träge Zusatzmasse	100 kg

Tabelle 9: Berechnung des simulierten Leergewichts des Hybridfahrzeugs.

C Modelle

C.1 MGU

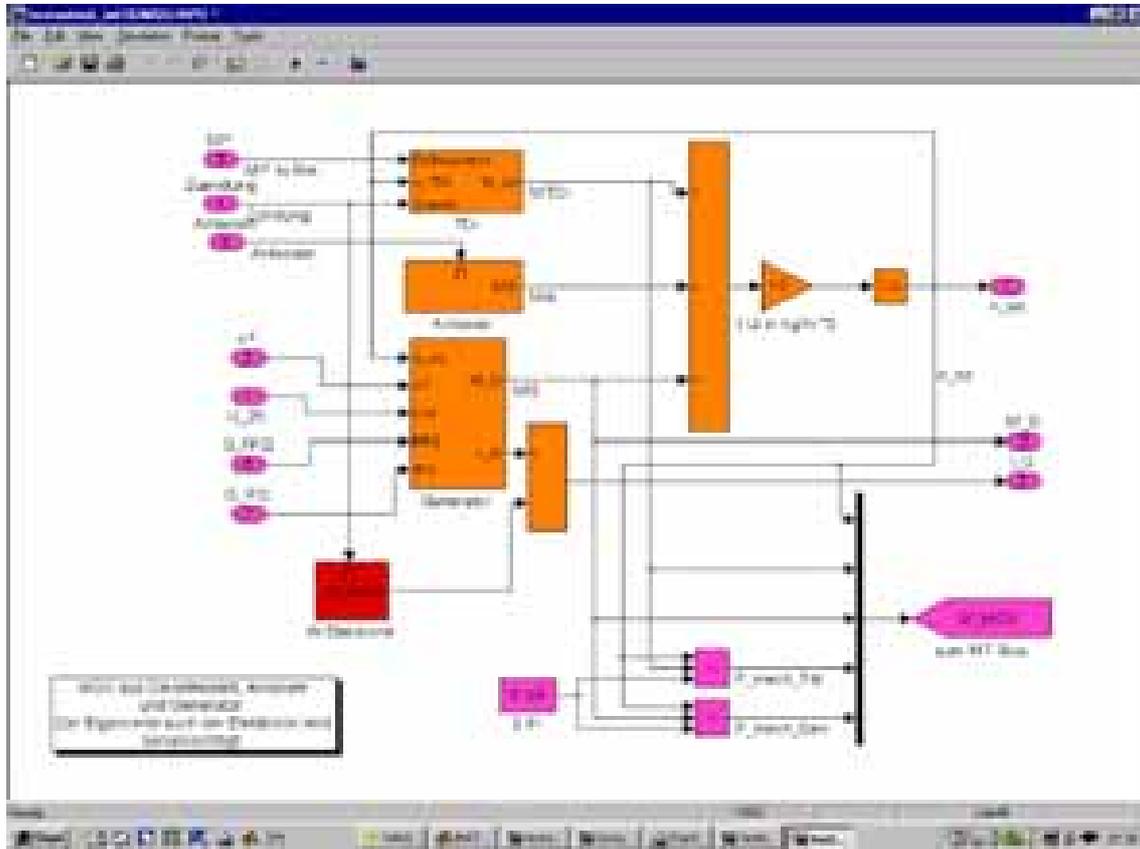


Abbildung 54: Modell der MGU Komponenten aus Dieselmotor, Anlasser und Generator.

C.2 Traktionsbatterie

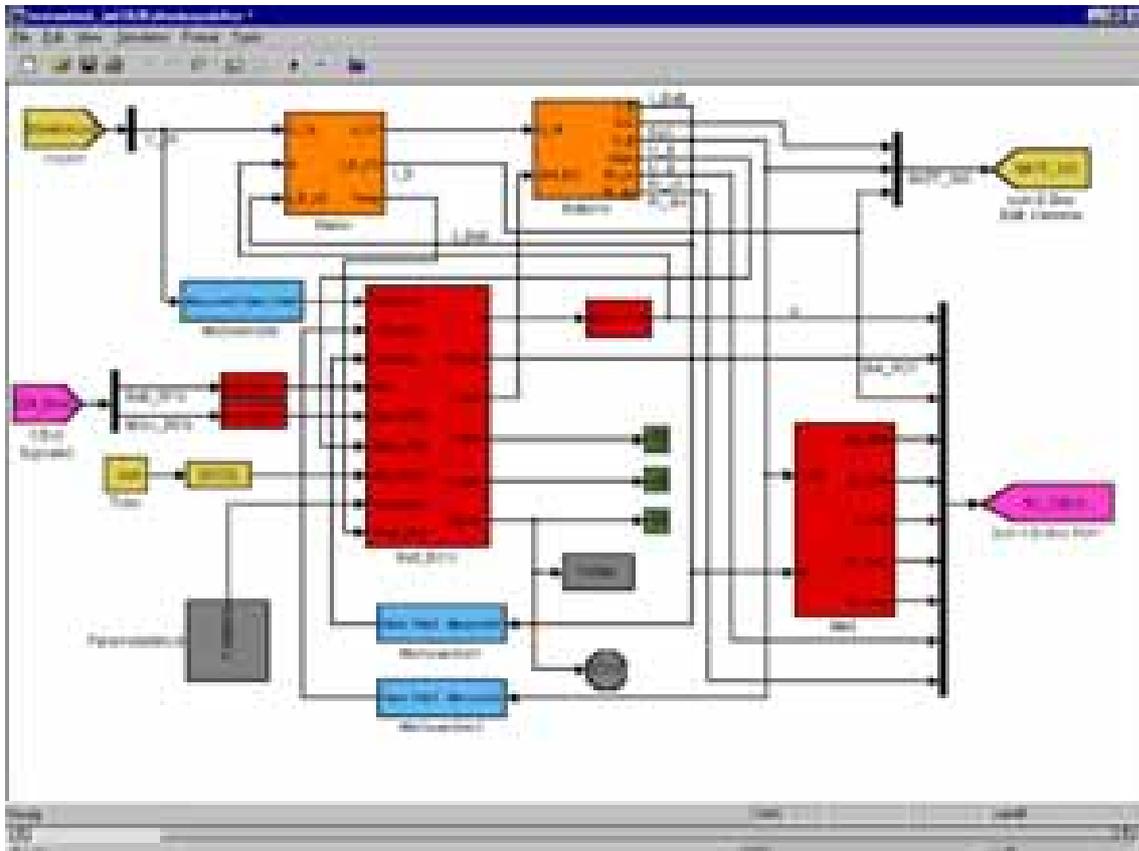


Abbildung 55: Modell des Traktionsspeichers mit Batterie, DC/DC-Steller, Controller Block, BMS und Messwertaufnehmern.

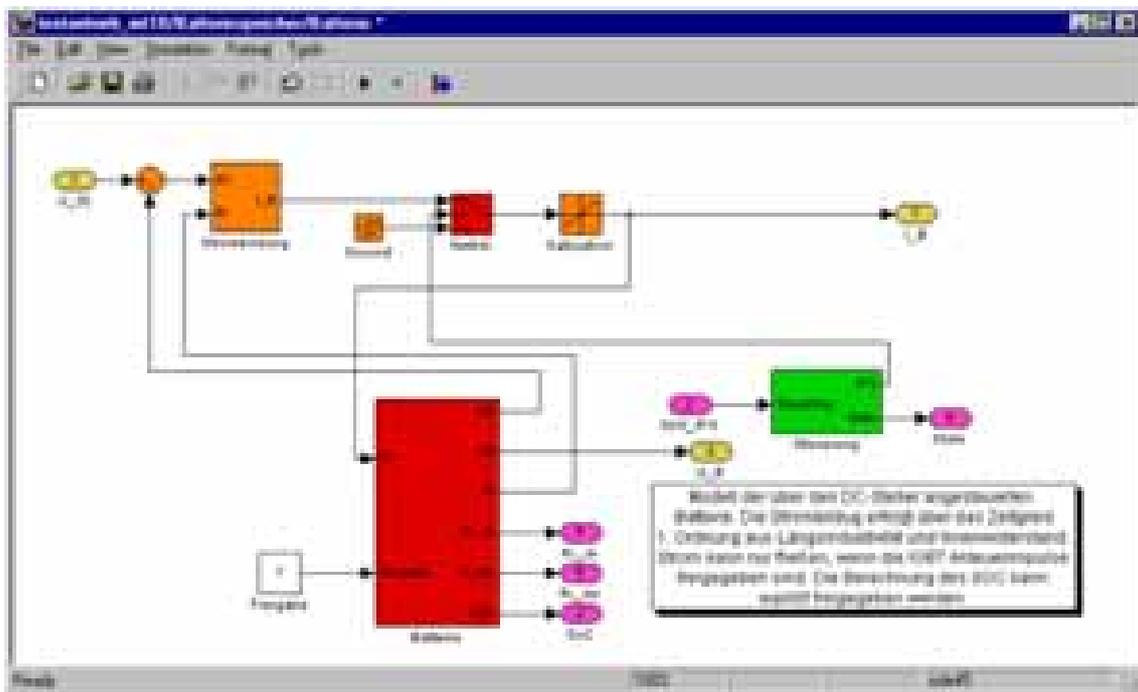


Abbildung 56: Modell der durch den DC/DC-Steller angesteuerten Traktionsbatterie. Die Batteriezustände und Parameter werden im Block mit dem Modell der elektrochemischen Zelle ermittelt, die Strombildung erfolgt, wenn die IGBTs freigegeben sind über das Zeitglied 1. Ordnung aus Längsinduktivität und Innenwiderstand.

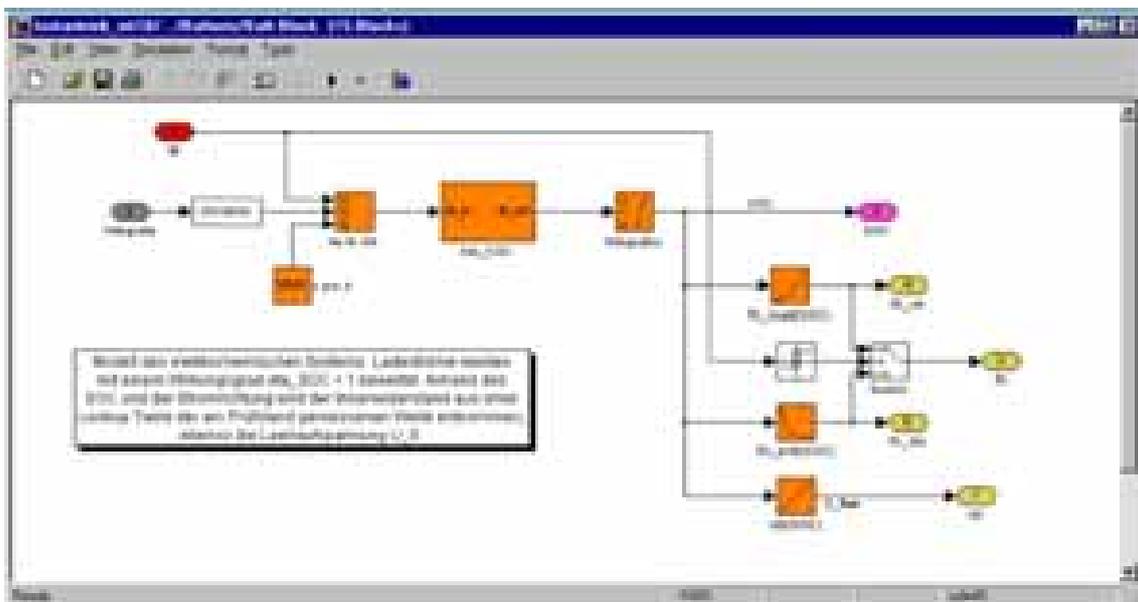


Abbildung 57: Modell der Batteriezellen mit Ladewirkungsgrad, Ladungsintegration und Tabellen für die Innenwiderstände und Ruhespannung.

C.3 Traktionsantrieb

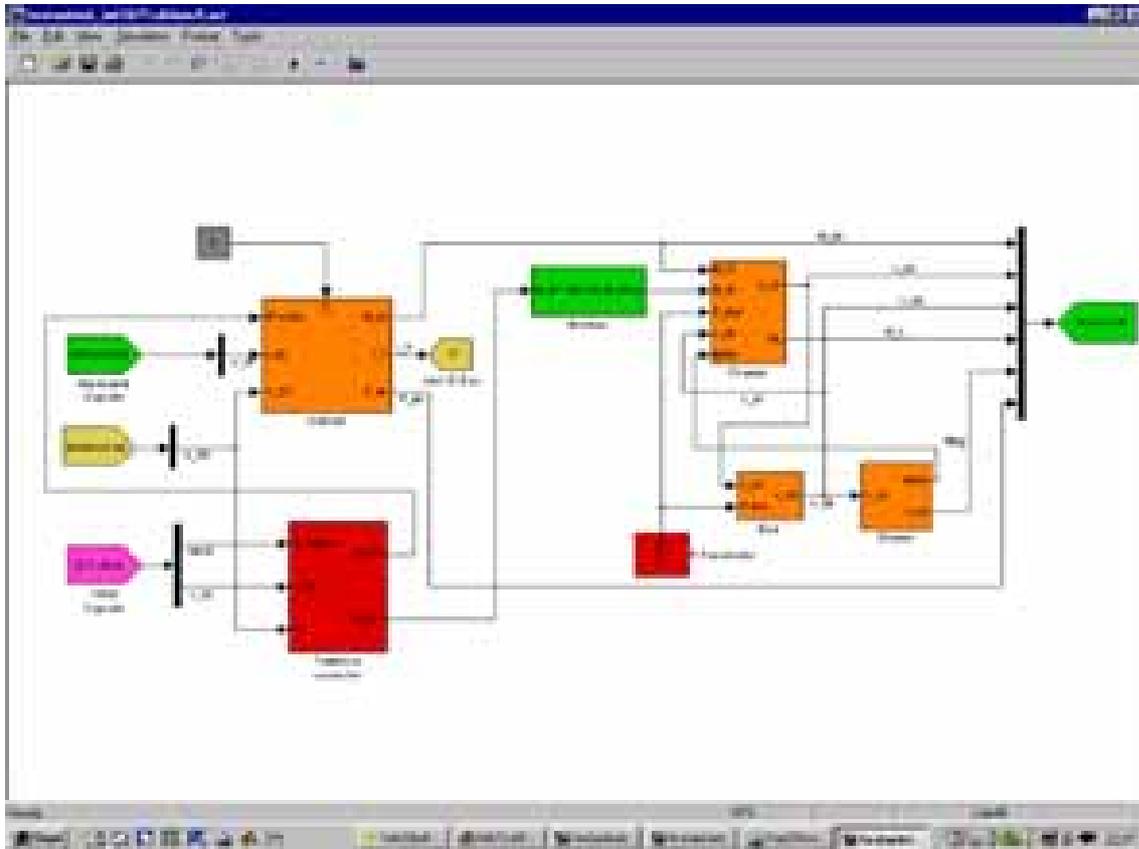


Abbildung 58: Modell des Traktionsbereich mit parametrierbarer Last, Elektrotraktionsmotor, mechanischer Bremse und Traktionscontroller.

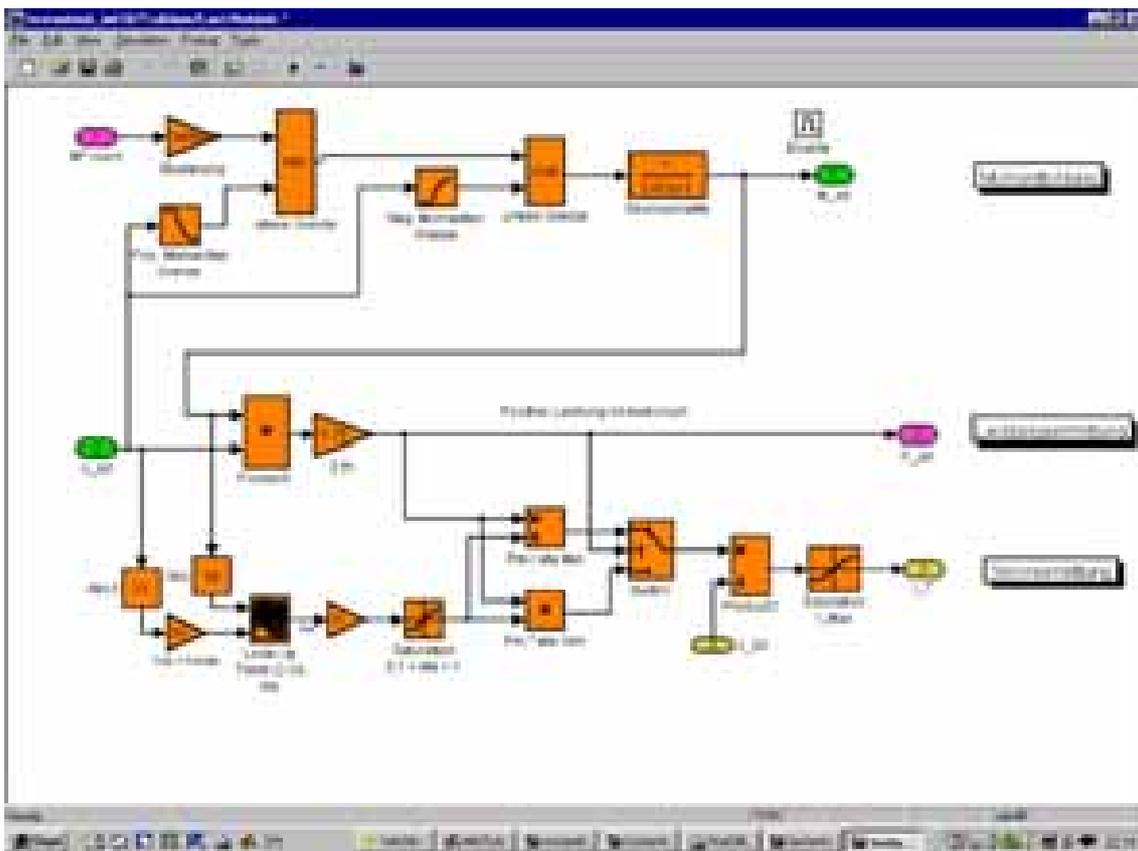


Abbildung 59: Modell der Elektromaschine aus Momentbildung über ein Verzögerungsglied 1. Ordnung, Leistungsermittlung und Wirkungsgradberechnung.

D Prüfstand

D.1 MGU Prüfplatz

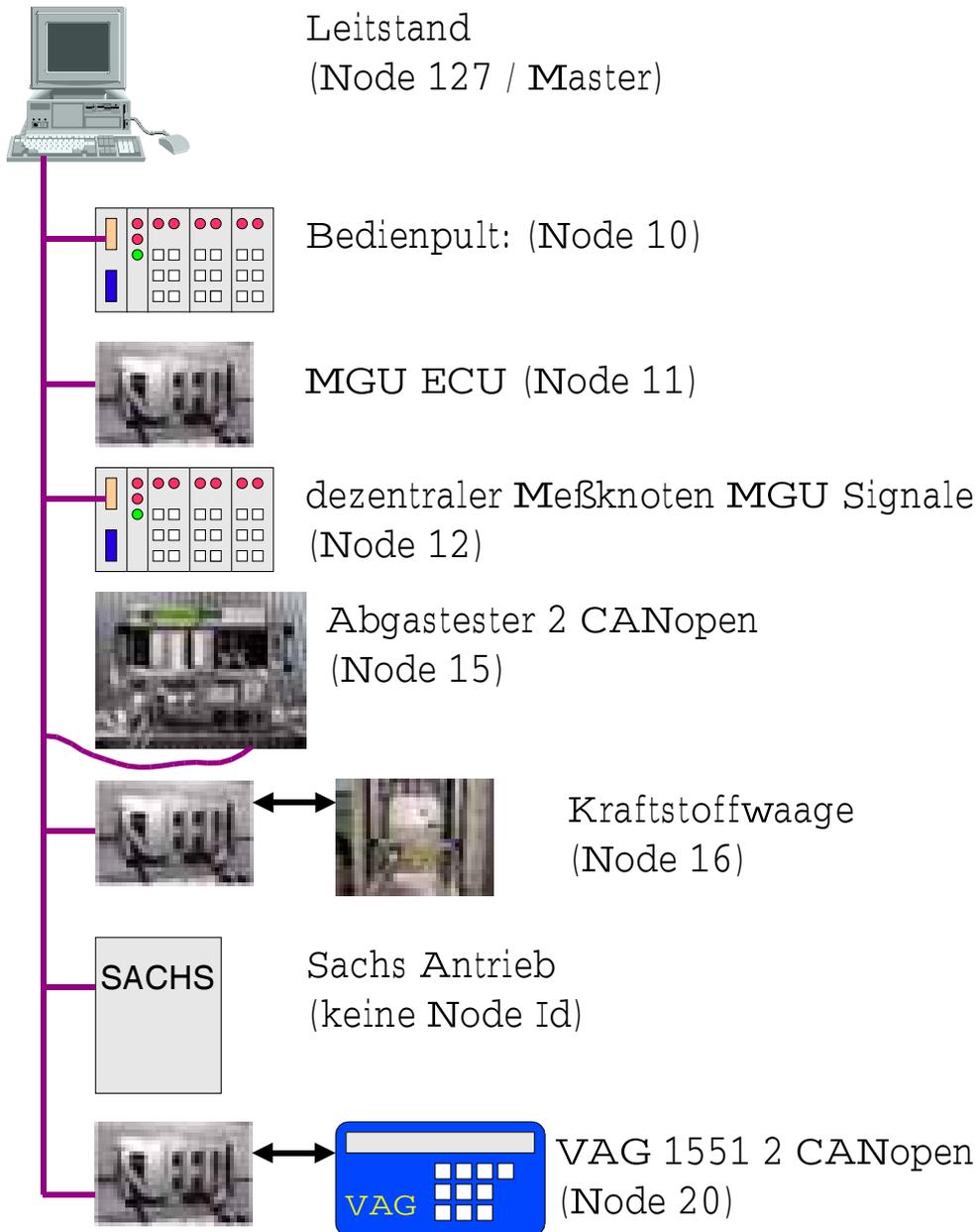


Abbildung 60: Struktur des MGU Meß- und Steuerbusses mit allen angeschlossenen Einheiten.

D.2 Speicher Prüfplatz

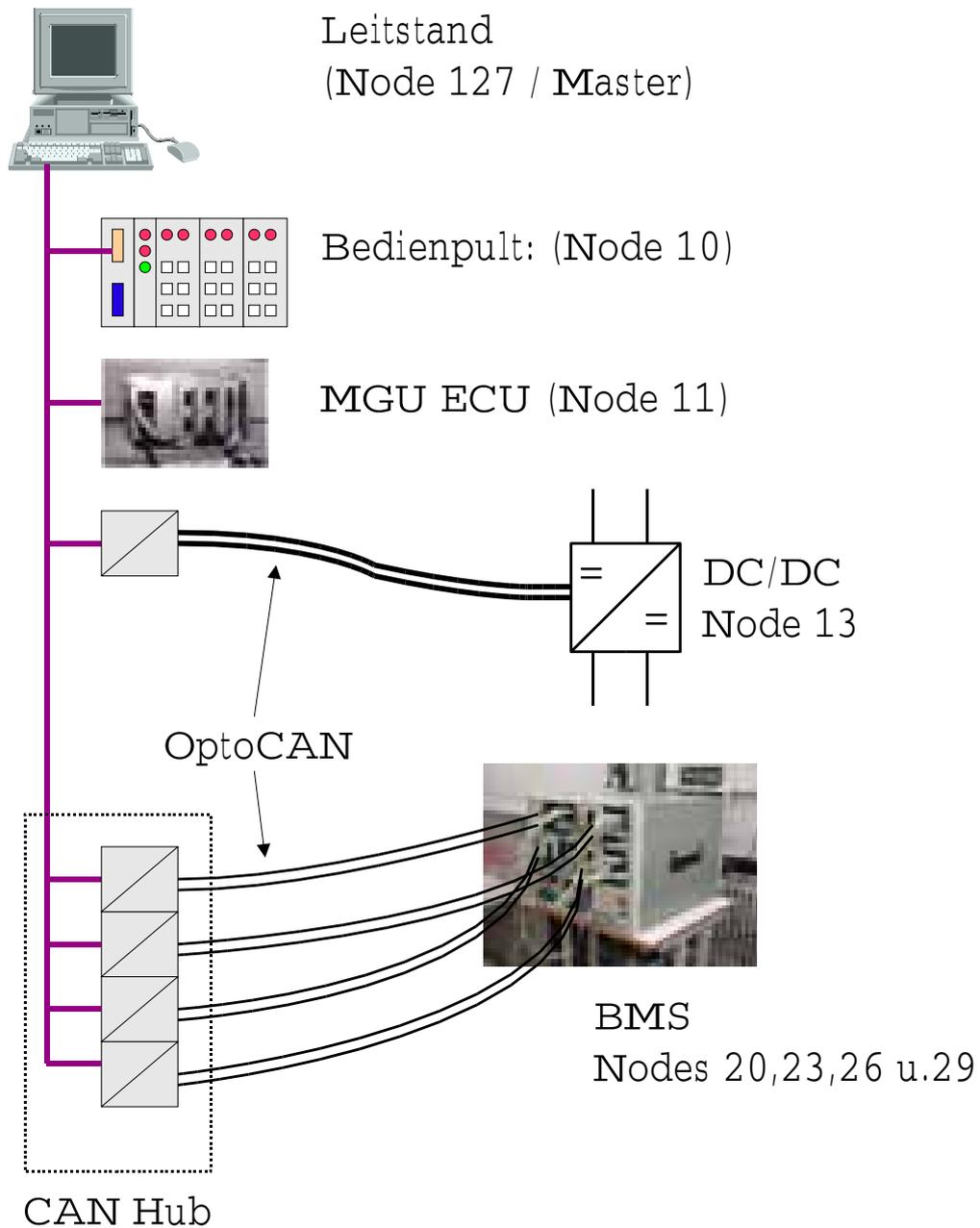


Abbildung 61: Struktur des Speicher Meßbusses mit allen angeschlossenen Einheiten.

D.3 Traktions Prüfplatz

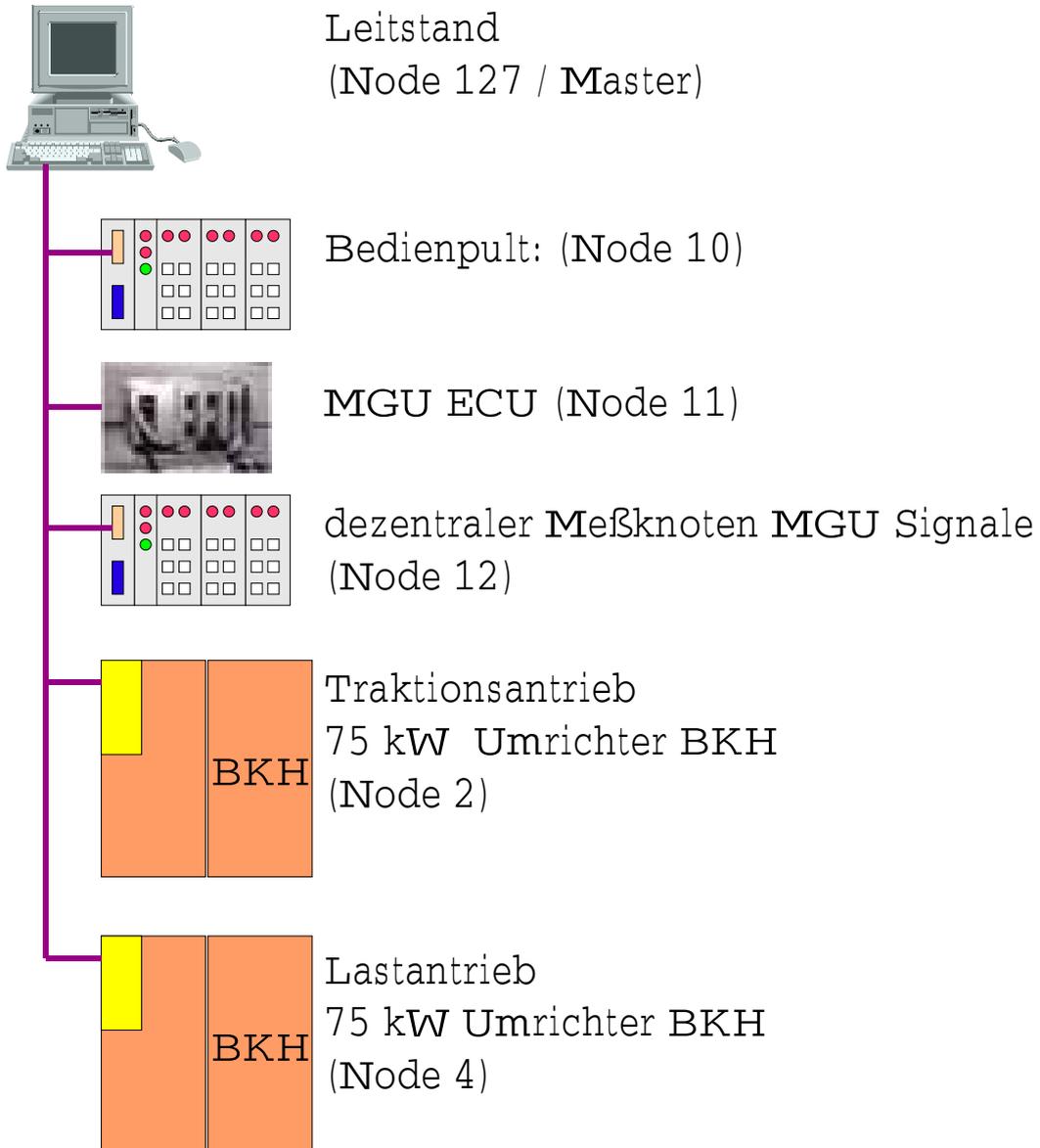


Abbildung 62: Struktur des Meßbusses im Traktions Prüfplatz mit allen angeschlossenen Einheiten.

Lebenslauf

Name Andreas Wagener
Geburtsdatum 16. August 1967
Geburtsort Schillingsfürst
Staatsangehörigkeit deutsch

Bildungsgang

1973 – 1977 Grundschule in Leutershausen
1977 – 1986 Friedrich Alexander Gymnasium
in Neustadt a. d. Aisch
Allgemeine Hochschulreife
1986 – 1989 Firma Weiler in Herzogenaurach und Maudorf
Ausbildung zum Informationselektroniker
1990 – 1996 Friedrich Alexander Universität Erlangen
Studium der Elektrotechnik
Dipl. – Ing. (Univ)

Berufstätigkeit

1996 – 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Energie-
wandlung und -speicherung der Universität Ulm
seit 2002 Applikationsingenieur bei der Firma dSPACE
in Holzgerlingen