

VOLKSWAGEN AG



Dissertation

Adaptives und prädiktives
Energiemanagement zur Verbesserung
der Effizienz von Hybridfahrzeugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Prof. Dr. Bernhard Geringer
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau (E315)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Böckl
Matrikelnummer 9625535

Grillparzerstraße 26
2136 Laa an der Thaya

Wien, am 29. April 2008

Mit der nötigen Portion
Gottvertrauen, Geduld und Ruh
Kommt all das Ersehnte, all das Gute
Von ganz alleine auf dich zu.
[Franz Hübner]

Danksagung

Das Zustandekommen dieser Arbeit verdanke ich im besonderen Maße meinem Betreuer Dr. Roland Kube, der mir während der ganzen Zeit bei Volkswagen unermüdlich zur Seite stand. Ein weiterer Dank gebührt meinem Vorgesetzten während des Forschungsaufenthaltes in Wolfsburg Herrn Siegfried Köhle.

Es freut mich sehr, dass sich Herr Prof. Dr. Bernhard Geringer vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau an der TU Wien bereit erklärt hat, meine Dissertation zu betreuen. Prof. Dr. Erich Rummich danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Für die vielen wertvollen Hinweise beider Professoren bedanke ich mich sehr. Herrn Prof. Dr. Kurt Matyas danke ich für die Übernahme des Vorsitzes beim Rigorosum.

Bei Alexa Heucke und Gerlinde Hauer bedanke ich mich recht herzlich für wichtigen Hinweise und das Korrekturlesen der Arbeit.

Eine wichtige Voraussetzung für das Zustandekommen der vorliegenden Arbeit schaffte die Europäische Union, die über das Fünfte Rahmenprogramm meine Forschungstätigkeiten bei Volkswagen mit einem Marie Curie Fellowship unterstützte. In diesem Zusammenhang danke ich Herrn Jens-Peter Altendorf der dieses Programm bei Volkswagen koordiniert hatte.

Ein Teil der Dissertation entstand während der Arbeiten für das Projekt „Gesamtheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride Antriebssysteme“, welches vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Allen daran Beteiligten gilt ebenfalls mein Dank.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die durch ihre Unterstützung den Grundstein für mein Studium und die anschließende Promotion gelegt haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Veronica für ihre Geduld und die Kraft, die Sie mir immer wieder gibt, bedanken.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Algorithmen vorgestellt, die die Komponenten heutiger und zukünftiger hybrider Antriebe effektiver nützen. Für heutige Fahrzeuge wurde dazu ein adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE) entwickelt, welches in Zukunft durch die Nutzung von zuverlässigen Infrastruktur- und Verkehrsdaten zu einem prädiktiven elektrischen Energiemanagement (PEE) ausgebaut werden kann.

Das AEE wurde dabei speziell für den Einsatz im kostengünstigeren Mild Hybrid konzipiert, der mit einem Doppelschichtkondensator als Traktionsspeicher ausgestattet ist. Diese Speicher zeichnen sich durch gute Zyklfestigkeit und geringe Verluste aus. Sie weisen jedoch nur eine vergleichsweise geringe Energiedichte auf.

Um den nutzbaren Energieinhalt des Traktionsspeichers besser zu nützen, stellt das AEE die Energiebilanz am Traktionsspeicher auf, welche durch Energieeinnahmen und -ausgaben auf Grund der Hybridfunktionen Rekuperieren, elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten gegeben ist. Angepasst an die Energiebilanz wird der Lastpunkt während der verbrennungsmotorischen Fahrt verschoben.

Das AEE bewies bei der Simulation von Norm- und Kundenzyklen seine Vorteile. Dabei wurde in kundennahen Stadt- und Stau-Zyklen Kraftstoffverbrauchsvorteile von 1 – 1.5% nachgewiesen. Die Einsparungen wurden durch mehr rekuperierte Energie und durch eine bessere Verfügbarkeit von Motorstart/-stopp erzielt. Im europäischen Normzyklus NEFZ wurde ein Verbrauchspotenzial in der gleichen Größenordnung erreicht. Das Verfahren lässt sich als reine Softwarefunktion umsetzen und benötigt keine zusätzliche Hardware.

Das prädiktive elektrische Energiemanagement (PEE) ist als Erweiterung des AEE bei der Verfügbarkeit von Infrastruktur- und Verkehrsdaten im Fahrzeug zu verstehen. Das PEE ist sowohl für Mild als auch für Full Hybrid geeignet. Dabei wird das Energiemanagement mittels Rückwärtssimulation an eine Streckenvorausschau (Geschwindigkeits- und Höhenprofil der im Voraus liegenden Fahrstrecke) angepasst. In einem Stauszenario konnte mit dem PEE eine Kraftstoffeinsparung von rund 10% gegenüber einem konventionellen Energiemanagement ausgewiesen werden.

Als Basis für das AEE und das PEE dient ein konventionelles Energiemanagement, das auf analytischen, heuristischen Komponentenmodellen basiert. Bei den Modellen wird die Eingangsleistung jeder Komponente als linearisierte Funktion der Ausgangsleistung dargestellt. Dies ermöglicht ein einfaches Hintereinanderreihen der Komponenten, wie es aus der Signal- und Systemtheorie bekannt ist.

Summary

This work discusses algorithms that use the components of present and future hybrid power trains more efficiently. For today's hybrid vehicles an adaptive electrical energy management strategy (AEE) is developed which can be replaced by a predictive electrical energy management strategy (PEE) in the future, provided a reliable infrastructure for traffic data is available.

The AEE was developed specifically for a less cost intensive mild hybrid system. The mild hybrid uses double layer capacitors as energy storage which offer an excellent cyclability and a high efficiency but have a comparatively small energy density.

To make best use of the available amount of energy within the double layer capacitors, the AEE calculates the difference between input and output energy. Electrical energy is generated by regenerative braking and is used for electric driving, engine start-stop and boost. The result of the actual energy balance (integral of input minus output power) determines the amount of charge and discharge load on the capacitor.

The AEE shows improved fuel efficiency in both standard and customer cycles. Within customer-oriented city scenarios and traffic jams 1.5 percent less fuel consumption was achieved through more regenerated energy and a better availability of engine start-stop within the driving cycles. The New European Driving Cycle (NEDC) showed savings of similar magnitude. The AEE is a pure software function and doesn't require any extra hardware.

The predictive electrical energy management strategy (PEE) is meant to replace the adaptive electrical energy management strategy (AEE) when an infrastructure for reliable forecast of the upcoming speed and altitude profiles is available (e. g. using traffic simulation and car-to-car or car-to-infrastructure communication). The PEE suits both mild and full hybrids. The PEE adapts the energy management strategy to the energy balance ahead calculated by a backward-simulation using speed and altitude profile, as forecasted by the infrastructure. In a typical traffic jam about 10 percent better fuel economy was achieved by simulation.

The basis for the AEE and the PEE is a conventional energy management strategy, which uses analytic models of all components of the hybrid propulsion system. Each component is described by a system where the input power is a linearised function of the output power. This way, the components can be put in series as is common in systems theory.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	xi
Formelzeichen	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Anforderungen an zukünftige Fahrzeugantriebe	1
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 Die Entwicklung der Hybridfahrzeuge	3
1.2.2 Hybride Antriebsstränge	5
1.2.3 Konfiguration der untersuchten Hybridfahrzeuge	14
1.2.4 Energiemanagement in Hybridfahrzeugen	18
1.3 Ziel und Gliederung der Arbeit	19
2 Modellierung und Fahrzyklen	23
2.1 Fahrzeugmodellierung und Simulation	24
2.1.1 Rückwärtssimulation	24
2.1.2 Vorwärtssimulation	26
2.1.3 Aufbau des Simulationsmodells	28
2.1.4 Verbrennungskraftmaschine	29
2.1.5 Trennkupplung	30
2.1.6 Elektromotorischer Antrieb	31
2.1.7 Traktionsspeicher	31
2.1.8 Elektrische Nebenaggregate	36
2.1.9 Fahrzeug	36
2.1.10 Fahrer (inkl. Fahrzyklus)	37
2.1.11 Kopplung von Fahrzeug- und Verkehrssimulation	37
2.2 Auswahl der Fahrzyklen	38
2.2.1 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	39
2.2.2 modifizierter NEFZ (mNEFZ)	40
2.2.3 Braunschweig-Zyklus (BS-Zyklus)	40

2.2.4	Hybrid-Zyklus	41
2.2.5	Stau-Zyklus	42
2.2.6	Harz-Zyklus	43
2.2.7	Vergleich der Fahrzyklen	43
3	Energiemanagement bei parallelen Hybriden	47
3.1	Betriebsmodi im Hybridfahrzeug	48
3.1.1	Rekuperieren	48
3.1.2	Elektrisch Fahren (inkl. Motorstart/-stopp)	49
3.1.3	Boosten	49
3.1.4	Verbrennungsmotorisch Fahren und Verschieben des Lastpunktes . .	50
3.2	Analytische Beschreibung der Komponenten	51
3.2.1	Verbrennungskraftmaschine	51
3.2.2	Elektromotorischer Antrieb	55
3.2.3	Traktionsspeicher	59
3.3	Verbrauch der Betriebsmodi	62
3.3.1	Verbrauch beim verbrennungsmotorischen Fahren	63
3.3.2	Verbrauch beim Lastpunkt Anheben	63
3.3.3	Verbrauch bei Lastpunkt Absenken und Boosten	64
3.3.4	Verbrauch beim elektrischen Fahren	65
3.3.5	Elektrisch Fahren mit Energie aus Lastpunktanhebung	65
3.4	Konventionelles Energiemanagement	69
3.4.1	Konventionelles Energiemanagement bei Full Hybrids	70
3.4.2	Konventionelles Energiemanagement bei Mild Hybrids	75
4	Adaptives Energiemanagement	77
4.1	Anforderungen an ein adaptives Energiemanagement	78
4.2	Adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE)	79
4.2.1	Prinzip des AEE	79
4.2.2	Adaption an die momentane Fahrsituation	81
4.2.3	Eingangsgrößen in das AEE	81
4.2.4	Ergebnis des AEE: Die adaptive Lastpunktverschiebung	89
4.3	Wahl der Bilanzzeit	90
4.4	Simulationsergebnisse	94
4.4.1	Ergebnisse im NEFZ	96
4.4.2	Ergebnisse im mNEFZ	98
4.4.3	Ergebnisse im BS-Zyklus	100
4.4.4	Ergebnisse im Hybrid-Zyklus	102
4.4.5	Ergebnisse im Stau-Zyklus	104

4.4.6	Ergebnisse im Harz-Zyklus	106
4.5	Schlussfolgerungen zum AEE	108
5	Prädiktives Energiemanagement	109
5.1	Prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE)	110
5.1.1	Nutzen des PEE	110
5.1.2	Stellhebel des PEE	111
5.1.3	Vorgehen beim prädiktiven Energiemanagement	113
5.2	Möglichkeiten und Grenzen der Verkehrssimulation	113
5.3	Simulationsergebnisse	115
5.4	Schlussfolgerungen zum PEE	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Bibliographie	123

Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AEE	Adaptives Elektrisches Energiemanagement
AG	Ausgleichsgetriebe
ASM	Asynchronmaschine
AUX	Auxiliaries, elektrische Nebenaggregate
BAT	Batterie (bezeichnet den Traktionsspeicher)
BO	Boosten
DC	Direct Current
DLC	Double Layer Capacitor
DSG	Direct Shift Gearbox
eAWD	Electric All-Wheel-Drive (elektrischer Allradantrieb)
eCVT	Electric Continuous-Variable-Transmission (elektrisches stufenloses Getriebe)
EF	Elektrisch Fahren, E-Fahren
EMA	Elektromotorischer Antrieb
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
GEN	generatorischer Betrieb des EMA
GPS	Global Positioning System
GTR	Getriebe
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV	Hochvolt
IMA	Integrated Motor Assist (Hybridsystem von Honda)
TRK	Trennkupplung (Kupplung zwischen VKM und EMA)
LAn	Lastpunkt Anheben
LAb	Lastpunkt Absenken
LPV	Lastpunkt Verschieben
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOT	motorischer Betrieb des EMA
MVEG	Motor Vehicle Emissions Group

NEDC	New European Driving Cycle (vgl. NEFZ)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus (vgl. NEDC)
PEE	Prädiktives Elektrisches Energiemanagement
PELOPS	<u>P</u> rogrammsystem zur <u>E</u> ntwicklung <u>l</u> ängsdynamischer <u>m</u> ikro <u>s</u> kopischer Verkehr <u>s</u> prozesse in <u>s</u> ystemrelevanter Umgebung
PLG	Planetengetriebe
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PWM	Pulsweitenmodulation
RNA	Relative Negative Acceleration
RPA	Relative Positive Acceleration
SOC	State Of Charge (Ladungszustand eines Traktionsspeichers)
SOE	State of Energy
SUVA	SUreplus VAalue Hybrid
TCP/IP	Transmission Control Protocol over Internet Protocol
TDI	Turbo Direct Injection
VF	verbrennungsmotorisch Fahren, VKM-Fahren
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VMU	Vehicle Management Unit
VSM	Vehicle Simulation Map-based
VTEC	<u>V</u> ariable Valve <u>T</u> iming and Lift <u>E</u> lectronic <u>C</u> ontrol

Formelzeichen

Weitere Indizes stehen im Abkürzungsverzeichnis.

Allgemeine Formelzeichen:

Größe		Einheit
t	Zeit	s
$\Delta\tau$	Zeitintervall	s
H_u	spezifischer Heizwert	J/kg
P	Leistung	W
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	m/s
m	Masse	kg
k_{BP}	Bremspedalwert [0...1]	1
v_{cyc}	Geschwindigkeitsvorgabe vom Fahrzyklus	m/s
h_{cyc}	Höhenvorgabe vom Fahrzyklus (Höhe über dem Meeresspiegel)	m
M_{Rad}	Drehmoment am Rad	Nm
F_{Rad}	Kraft am Rad	N
r_{dyn}	dynamischer Reifenradius	m

Verbrennungskraftmaschine (VKM):

Größe		Einheit
\dot{V}	(Eingangs-)Volumenstrom der VKM	l/h
P_{VKM}	mechanische Ausgangsleistung der VKM	W
n_{VKM}	Drehzahl der VKM	min ⁻¹
M_{VKM}	Drehmoment der VKM	Nm
$M_{max,VKM}$	maximales Drehmoment der VKM	Nm
\dot{V}_0	Eingangsvolumenstrom bei Ausgangsleistung gleich Null (Null-Leistungsverbrauch der VKM: $\dot{V}_0 = \dot{V}(P_{VKM} = 0)$)	l/h
$\dot{V}_{P_{VKM}}$	Eingangsvolumenstrom für effektive Ausgangsleistung der VKM: $\dot{V}_{P_{VKM}} = \dot{V} - \dot{V}_0$	l/h
$\dot{v}_{P_{VKM}}$	spezifischer Volumenstrom (Steigung des Engangsvolumenstroms: $\dot{v}_{P_{VKM}} = \frac{d\dot{V}}{dP_{VKM}}$)	l/Wh

Elektromotorischer Antrieb (EMA):

Größe		Einheit
P_{EMA}	mechanische Leistung des EMA	W
n_{EMA}	Drehzahl des EMA	min^{-1}
M_{EMA}	Drehmoment des EMA	Nm
$M_{\text{max,EMA}}$	maximales Drehmoment des EMA	Nm
P_{in}	Eingangsleistung des EMA (im generatorischen Betrieb gleich P_{EMA})	W
P_{out}	Ausgangsleistung des EMA (im motorischen Betrieb gleich P_{EMA})	W
P_0	Eingangsleistung bei Ausgangsleistung gleich Null (Null-Leistungsverluste: $P_0 = P_{\text{in}}(P_{\text{out}} = 0)$)	W
$P_{P_{\text{out}}}$	Eingangsleistung für effektive Ausgangsleistung: $P_{P_{\text{out}}} = P_{\text{in}} - P_0$	W
p_1	Ableitung der Willans-Linie des EMA: $p_1 = dP_{\text{in}}/dP_{\text{out}}$	1

Traktionsspeicher (BAT):

Größe		Einheit
P_{BAT}	Leistung an den Klemmen	W
U_{BAT}	elektr. Spannung an den Klemmen	V
$U_{\text{BAT},0}$	elektr. Leerlaufspannung	V
I_{BAT}	Batteriestromstärke	A
R_{i}	Innenwiderstand	Ω
η_{LAD}	Wirkungsgrad beim Laden	1
η_{ELA}	Wirkungsgrad beim Entladen	1
SOC_{BAT}	absoluter Ladezustand, Gl. (2.20)	1
SOC	relativer Ladezustand, Gl. (2.20)	1
SOC_{min}	minimaler (relativer) Ladezustand	1
$SOC_{\text{opt,min}}$	untere Grenze des optimalen (relativen) SOC-Bereichs	1
SOC_{opt}	optimaler (relativer) Ladezustand	1
$SOC_{\text{opt,max}}$	obere Grenze des optimalen (relativen) SOC-Bereichs	1
SOC_{max}	maximaler (relativer) Ladezustand	1

Elektrische Nebenaggregate (AUX):

Größe		Einheit
P_{AUX}	elektr. aufgenommene Leistung	W
U_{AUX}	elektr. Spannung	V
I_{AUX}	elektr. Stromstärke	A

Getriebe (GTR):

Größe		Einheit
P_{GTR}	mechan. Leistung am Getriebeeingang	W
M_{GTR}	Drehmoment am Getriebeeingang	Nm
n_{GTR}	Drehzahl am Getriebeeingang	min^{-1}
i_{GTR}	Getriebeübersetzung (inkl. Achsgetriebe)	1
$P_{\text{V,GTR}}$	Getriebeverluste (inkl. Achsgetriebe)	W

Adaptives Elektrisches Energiemanagement (AEE):

Größe		Einheit
t_{Bilanz}	Bilanzzeit	s
P_{Rek}	tatsächlich rekuperierte Leistung	W
$P_{\text{Rek,max}}$	maximal rekuperierbare Leistung	W
W_{Rek}	maximal rekuperierbare Energie	J
$W_{\text{Rek,W-begr}}$	durch den Energieinhalt des Traktionsspeichers begrenzt, rekuperierbare Energie	J
$W_{\text{Rek,P-begr}}$	durch die Maximalleistung von EMA und BAT begrenzt, rekuperierbare Energie	J
W_{BO}	vom Fahrer angeforderte Energie für das Boosten	J
W_{AUX}	Energie für die Nebenaggregate	J
W_{LPV}	Energie für Lastpunktverschiebung	J
P_{LAb}	für Lastpunktabsenkung ausgegebene elektr. Leistung	W
P_{LAn}	für Lastpunktanhebung ausgegebene elektr. Leistung	W
$\overline{P}_{\text{LPV}}$	mittlere Leistung für Lastpunktverschiebung	W

Prädiktives Elektrisches Energiemanagement (PEE):

Größe		Einheit
t'	Prognosezeit	s
$\hat{h}(t')$	Höhenprofil der prognostizierten Strecke	m
$\hat{v}(t')$	prognostizierter Geschwindigkeitsverlauf	m/s
$\hat{P}_{\text{AUX}}(t')$	prognostizierte Leistung der elektr. Nebenaggregate	W
$\widehat{SOC}(t')$	prognostizierter Ladezustand	1

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Anforderungen an zukünftige Fahrzeugantriebe

Der Personenverkehr¹ hat in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Wie **Abbildung 1.1** zeigt, geht dieser Anstieg in erster Linie auf den motorisierten Individualverkehr (MIV) zurück. Zum motorisierten Individualverkehr zählt man Motorrad-, Taxi- und PKW-Verkehr, dessen Anstieg besonders in Ballungsräumen zur Beeinträchtigung der Luftqualität beigetragen hat [2].

Dies führte weltweit zu einer Fülle unterschiedlicher Abgasgesetzgebungen. Als eine der Schärfsten gilt das ZEV-Programm² der CARB³, welches in Kalifornien und einigen weiteren Bundesstaaten der USA gilt. Die ZEV-Gesetze zwingen Automobilhersteller – neben der Erfüllung von Emissionsgrenzwerten – Technologien in Fahrzeugen einzusetzen, die die Einführung emissionsfreier Fahrzeuge beschleunigen sollen. Diese Gesetzgebung fordert dezidiert Fahrzeuge mit einer bestimmten elektrischen Antriebsleistung und einer bestimmten Systemspannung. Vor allem japanische Automobilhersteller haben diesen Trend frühzeitig erkannt und vermarkten Hybridfahrzeuge in den Vereinigten Staaten mit großem Erfolg. Dies führte dazu, dass heute nicht nur der amerikanische Gesetzgeber, sondern auch der amerikanische Kunde Fahrzeughersteller, die keine Hybridfahrzeuge anbieten, unter Druck setzt.

Auf dem europäischen Markt ist dieser Trend bisweilen nicht zu erkennen. Was hier jedoch die Einführung von Hybridfahrzeugen begünstigen könnte, ist das Bestreben der Europäischen Union den CO₂-Ausstoß entsprechend der Kyoto-Konferenz im Dezember 1997 zu minimieren.

Aus **Abbildung 1.2** ist zu erkennen, dass der Verkehr in Deutschland einen Anteil am CO₂-Ausstoß von 20% hat. Davon entfällt mehr als die Hälfte auf den PKW-Verkehr.

¹Verkehr bezeichnet die Bewegung von Personen, Gütern, Fahrzeugen und Nachrichten [1].

²ZEV: Zero Emission Vehicle

³CARB: California Air Resources Board

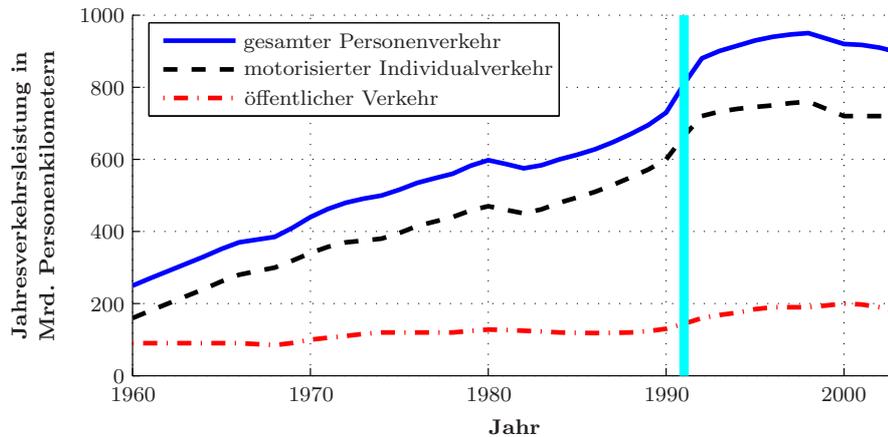


Abbildung 1.1: Personenverkehr in Deutschland. Die Abbildung zeigt bis 1991 den Personenverkehr in den alten Bundesländern und nach 1991 in den neuen und alten Bundesländern. Der Anstieg des Verkehrs ist hauptsächlich auf den motorisierten Individualverkehr zurückzuführen [3].

Die ACEA (Association des Constructeurs Europe'ens d'Automobiles, Vereinigung europäischer Automobilhersteller) hat der Europäischen Kommission gegenüber eine Selbstverpflichtung abgegeben, nach der die CO₂-Emissionen im Flottendurchschnitt der neu zugelassenen Fahrzeuge bis zum Jahr 2008 auf 140g/km reduziert werden sollen [4, 5, 6]. Die Ziele der Europäischen Kommission gehen jedoch noch darüber hinaus. So ist das erklärte Ziel, für 2012 ein Flottendurchschnitt von 120g/km [4] im NEFZ⁴ zu erreichen. Die Automobilindustrie soll dazu den Ausstoß der Fahrzeuge auf 130g/km senken, weitere 10g/km Reduktion sollen durch die Beimischung alternativer Kraftstoffe und weitere fahrzeugtechnische und verkehrsleitende Maßnahmen (Leichtlaufreifen, Grüne Welle, etc.) erreicht werden.

Zur Reduktion der CO₂-Emissionen⁵ können Hybridfahrzeuge einen großen Beitrag liefern, da durch elektrischen Fahrzeugbetrieb bei schlechtem Verbrennungsmotorwirkungsgrad und Bremsenergieerückgewinnung der Kraftstoffverbrauch eines Autos erheblich reduziert wird [8, 9, 10]. Ein Effekt auf den Flottendurchschnitt wird jedoch nur mit großen Stückzahlen erreicht, was mit den heute auf dem Markt befindlichen Hybridfahrzeugen in den nächsten Jahren aus Kostengründen kaum umsetzbar ist.

Anforderungen an Hybridfahrzeuge

Man kann festhalten, dass es auf den diversen Automobilmärkten unterschiedliche

⁴NEFZ: Neuen Europäischen Fahrzyklus (Abschnitt 2.2.1)

⁵Die CO₂-Emissionen sind bei gleichem Kraftstoff proportional zum Kraftstoffverbrauch [7].

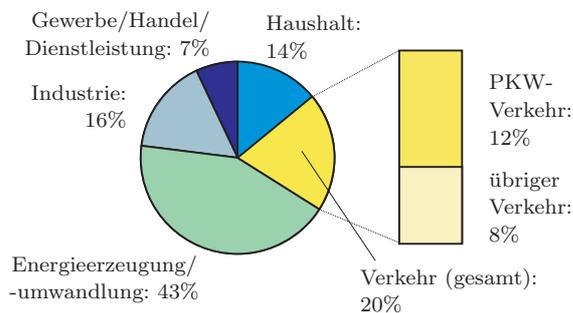
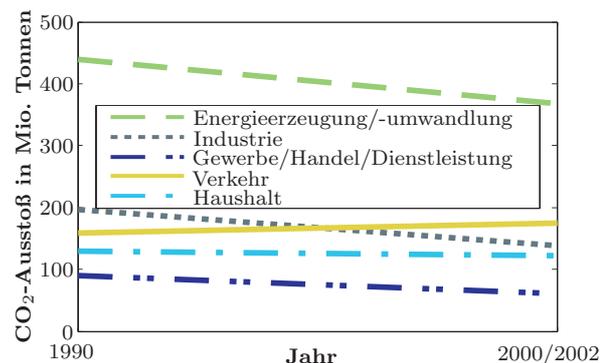
(a) Anteil der CO₂-Emissionen 2002(b) Entwicklung der CO₂-Emissionen

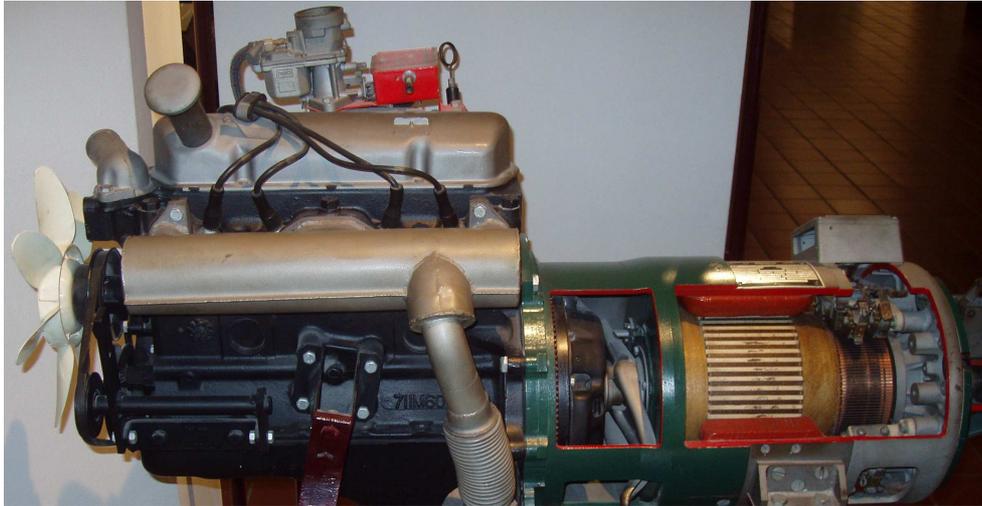
Abbildung 1.2: CO₂-Emissionen in Deutschland [11]. Der Anteil des PKW-Verkehrs an den CO₂-Emissionen betrug 2002 12%, Abbildung (a). Allein im Sektor *Verkehr* sind sie in den 90er Jahren angestiegen, Abbildung (b).

Anforderungen an Hybridfahrzeuge gibt. Der US-Markt tendiert, begünstigt durch die ZEV-Gesetzgebung, zu sogenannten Full Hybrids (Hybridfahrzeuge mit der Möglichkeit rein elektrisch zu fahren). Für den europäischen Markt sind kostenoptimierte Verbrauchsmaßnahmen relevant, die helfen, den CO₂-Ausstoß zu senken. Dabei muss sich die Hybridtechnologie mit anderen verbrauchsreduzierenden Maßnahmen messen [12]. Hier können kostengünstige Hybridsysteme (sogenannte Micro- oder Mild-Hybrids) einen Beitrag liefern. Sie bieten ein besseres Verhältnis zwischen CO₂-Einsparung und Zusatzkosten (g/km pro EUR) als Full Hybrids [13, 14, 15].

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Die Entwicklung der Hybridfahrzeuge

Wirft man einen Blick in die Geschichte der Fahrzeugentwicklung, so erkennt man, dass Hybridfahrzeuge nicht erst seit einigen Jahren existieren. Als erstes Hybridfahrzeug gilt der in Wien entwickelte Lohner-Porsche. Dieses Fahrzeug aus der k. u. k. Hof-Wagen- und Automobilfabrik Lohner wurde auf der Pariser Weltausstellung im Jahre 1900 vorgestellt. Den Antrieb bildeten zwei Radnabenmotoren mit einer Leistung von jeweils 2.5 PS. Das Auto wurde vom Elektrotechniker Ferdinand Porsche entwickelt, der heute als einer der genialsten Konstrukteure der automobilen Geschichte gilt [16]. Es wurde sowohl als batteriebetriebenes Elektroauto, als auch mit Elektro- und Verbrennungsmotor gebaut. Das Fahrzeug mit Elektro- und Verbrennungsmotor nennt man heute einen seriellen Hybriden (vgl. Abschnitt 1.2.2.1).



Dieser Hybridantrieb ist eine Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor. Zum Testen war er in einem serienmäßigen Personenwagen eingebaut.

Bei der Entwicklung des Antriebs wurde versucht, Vorteile beider Motorenarten zu vereinen:

- die große Reichweite des Verbrennungsmotors und
- den abgasfreien, fast geräuschlosen Betrieb des Elektromotors.

Bei Überlandfahrten trieb der Verbrennungsmotor das Fahrzeug und lud gleichzeitig die Batterien auf. Der Elektromotor war dabei als Generator geschaltet. War beim Beschleunigen oder Bergauffahren mehr Leistung nötig als der Verbrennungsmotor abgab, wurde der Elektromotor zum Antrieb mitverwendet. In der Stadt konnte das Fahrzeug rein elektrisch betrieben werden.

Vor allem wegen des hohen Gewichts des Hybridantriebs – allein Elektromotor, Batterien, Elektronik und Zusatzteile wiegen 400 kg – und des hohen Preises kam es zu keiner Serienproduktion.

[aus dem Deutschen Museum, München, 2006]

Abbildung 1.3: Hybridantrieb von der Robert Bosch GmbH um 1970. Obwohl seit 1970 durch neue Technologien und modernes Energiemanagement viel erreicht wurde, sind die Schwächen des Hybridantriebs nach wie vor die gleichen: Mehrgewicht und Zusatzkosten.

In den 70er Jahren wurde bei europäischen Forschungsinstitutionen, Automobilherstellern und Zulieferern intensiv an hybriden Antriebssträngen geforscht [17, 18], es kam damals jedoch zu keiner Serienentwicklung (**Abbildung 1.3**). Als erstes Hybridfahrzeug der neuen Generation gilt der Prius, der von Toyota im Oktober 1997 in Japan und später auch in den USA und Europa auf den Markt gebracht wurde. Die erste Generation des Prius verkaufte sich weltweit etwa 120.000-mal, vorwiegend in Japan und USA [19, 20, 21]. Toyota baute nach dem Prius weitere Fahrzeuge mit Hybridtechnik [22, 23]. Diese Fahrzeuge waren vorerst nur in Japan erhältlich. Beispiele hierfür sind der Estima Hybrid 4WD, der Alphard Hybrid 4WD und der Crown Mild Hybrid. Welche vielseitigen Funktionen mit einem Hybridantrieb umsetzbar sind, zeigen der Toyota Estima Hybrid und der Lexus RX400h. Hier wird über eine elektrifizierte Achse ein Allradantrieb (eAWD, electric All-Wheel-Drive) realisiert [24, 25, 26]. Als weiterer japanischer Hersteller bietet Honda ab 1999 den Insight, den Civic und den Accord als Mild Hybrids an [27].

Als einziger europäischer Automobilhersteller startete Audi 1997 mit dem Audi Duo (als Basis diente der A4 Avant) auf dem europäischen Markt [28]. Das Fahrzeug wurde auf Leasingbasis an einige Kunden ausgeliefert, die Produktion wurde jedoch wenig später wieder eingestellt.

Der Durchbruch gelang Toyota 2003 mit dem völlig neu entwickelten Prius II. Das Fahrzeug war in den USA von Anfang an ein Verkaufsschlager. Beim Hybridantrieb von Toyota, der in weiterentwickelter Form auch in Fahrzeugen der Marke Lexus eingesetzt wird, handelt es sich um einen leistungsverzweigten Hybrid. Im nächsten Abschnitt werden die unterschiedlichen Formen hybrider Antriebsstränge genauer beschrieben und deren Unterschiede diskutiert.

1.2.2 Hybride Antriebsstränge

Als Hybridantrieb⁶ versteht man die Kombination von zwei unabhängigen Antrieben, von denen jeder einen eigenen Energiespeicher enthält. Heute bezeichnet der Hybridantrieb üblicherweise das Zusammenspiel von einem verbrennungsmotorischen und einem elektrischen Antrieb. Es sind jedoch auch andere Kombination, beispielsweise Brennstoffzelle und Elektroantrieb denkbar. In Gegensatz dazu bezeichnet man Fahrzeuge, die mit Speicher für (zwei) unterschiedliche Kraftstoffe, jedoch nur mit einem Antrieb ausgestattet sind, als *bivalent*⁷. Beispiele hierfür sind Fahrzeuge mit Benzin-Erdgas-, Benzin-Ethanol- oder Benzin-Wasserstoff-Verbrennungsmotor [30, 31].

Bei den Topologien von Hybridantrieben unterscheidet man zwischen parallelen, seriellen und leistungsverzweigten Hybriden [32]. Die drei Bauformen werden im Weiteren genauer beschrieben. Einen guten Überblick gibt Prof. Noreikat von der Daimler AG in

⁶aus *lat.* hybrida „Mischling“ [29]

⁷bivalent: zweiwertig [29]

„Antriebstechnik, die die Welt (nicht) braucht“ [10].

1.2.2.1 Serieller Hybrid

Der serielle Hybridantrieb besteht aus einer Verbrennungskraftmaschine und (mindestens) zwei elektrischen Maschinen im Antrieb, die nacheinander (*in Serie*) geschaltet sind. Wie **Abbildung 1.4** zeigt wird die mechanische Energie am Ausgang der Verbrennungskraftmaschine (VKM) über einen Generator (EMA1) zur Gänze in elektrische Energie gewandelt. Diese wird entweder vom Elektromotor (EMA2) direkt zum Antreiben verwendet oder in einen elektrochemischen Traktionsspeicher (Batterie, BAT) gespeist. Somit ist es möglich die Verbrennungskraftmaschine abzuschalten und das Fahrzeug rein elektrisch aus dem Speicher zu betreiben.

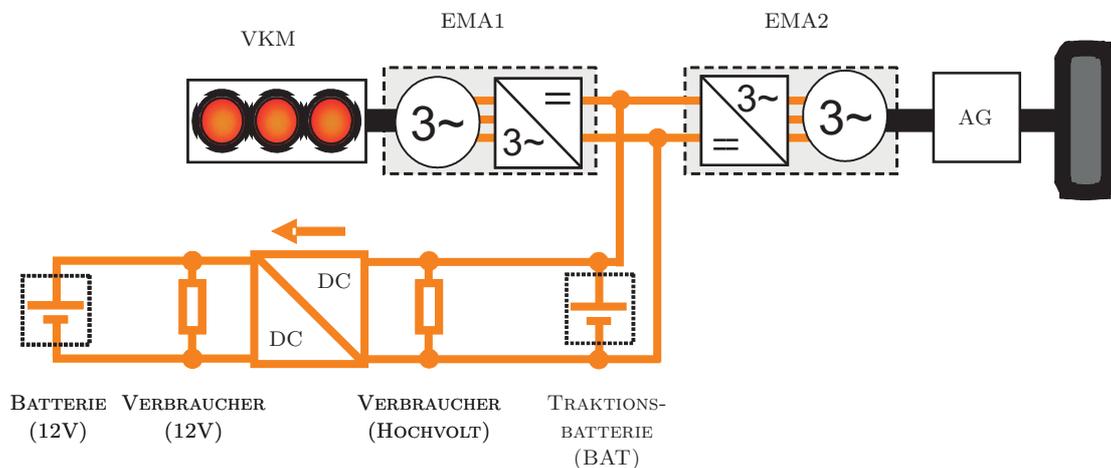


Abbildung 1.4: Antriebsstrang eines seriellen Hybrids. Es gibt mindestens zwei elektromotorische Antriebe (EMA1 und EMA2). EMA1 dient als Generator, EMA2 stellt den Antrieb dar.

Ein serieller Hybrid hat keine mechanische Verbindung vom Verbrennungsmotor zu den Rädern. Er arbeitet wie ein Elektrofahrzeug, bei dem die elektrische Energie mit einer Verbrennungskraftmaschine und einem Generator erzeugt wird.

Eine Möglichkeit, den seriellen Hybridantrieb besonders kompakt und gewichtssparend in einem Fahrzeug umzusetzen und so die Verluste bei der Energiewandlung zu reduzieren, wird in [33] aufgezeigt.

Der serielle Hybridantrieb wird heute in Stadtbussen [34], U-Booten und Eisenbahnen eingesetzt. Da Züge heute meist elektrisch angetrieben werden, bietet der serielle Hybrid die Möglichkeit auch auf nicht elektrifizierten Strecken zu fahren.

Bei Stadtbussen hat der Hybrid auf Grund des typischen Fahrprofils ein großes Kraftstoffeinsparpotenzial [34]. Darüber hinaus bietet der serielle Hybrid bei Bussen Vortei-

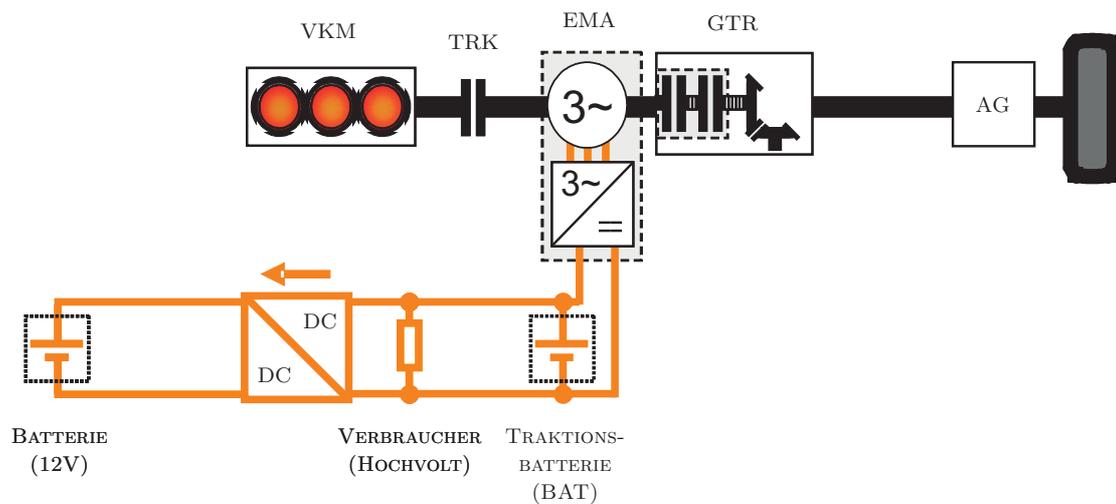


Abbildung 1.5: Antriebsstrang eines parallelen Hybrids. Am Eingang des Getriebes (GTR) addieren sich die Drehmomente der Verbrennungskraftmaschine (VKM) und der elektrischen Maschine (EMA). Beide Antriebe können daher *parallel* antreiben.

le bezüglich geometrischer Integration der Antriebskomponenten und das Fahrzeug kann beispielsweise beim Beschleunigen von der Haltestelle emissionsfrei angetrieben werden. Hybridbusse werden unter anderem in New York eingesetzt, wo mehr als 800 von der Daimler-Tochter Orion als serielle Hybride in Betrieb sind.

1.2.2.2 Paralleler Hybrid

Der Parallelhybrid ist jene Konfiguration, die mit einem konventionellen Antriebsstrang die größten Gemeinsamkeiten ausweist. Der Unterschied besteht in mindestens einer elektrischen Maschine, die in jedem Arbeitspunkt zusätzlich zum Verbrennungsmotor eingesetzt werden kann. Die Topologie ist in **Abbildung 1.5** dargestellt.

Der elektrische Antrieb kann an unterschiedlichen Stellen in einen konventionellen Antriebsstrang integriert werden [10]. So kann die elektrische Maschine über einen Riemen (Saturn VUE Green Line), an der Kurbelwelle [8, 35, 36], im Getriebe [37, 38] oder an den Achsen [24] integriert sein. Abbildung 1.5 zeigt den Antriebsstrang eines parallelen Hybriden mit der elektrischen Maschine an der Kurbelwelle. In den Prototypenfahrzeugen Volkswagen Bora Hybrid [8, 39], Golf EcoPower [35] und Touran Hybrid [36, 40] ist ebenfalls ein paralleler Hybridantrieb umgesetzt.

Weitere Parallelhybride sind beispielsweise die Fahrzeuge mit dem IMA-System⁸ von Honda, der Audi Duo und der Silverado von General Motors. Auch Toyota hat mit dem Crown Hybrid und dem Estima Hybrid Serienfahrzeuge als Parallelhybride.

⁸Integrated Motor Assist [27]

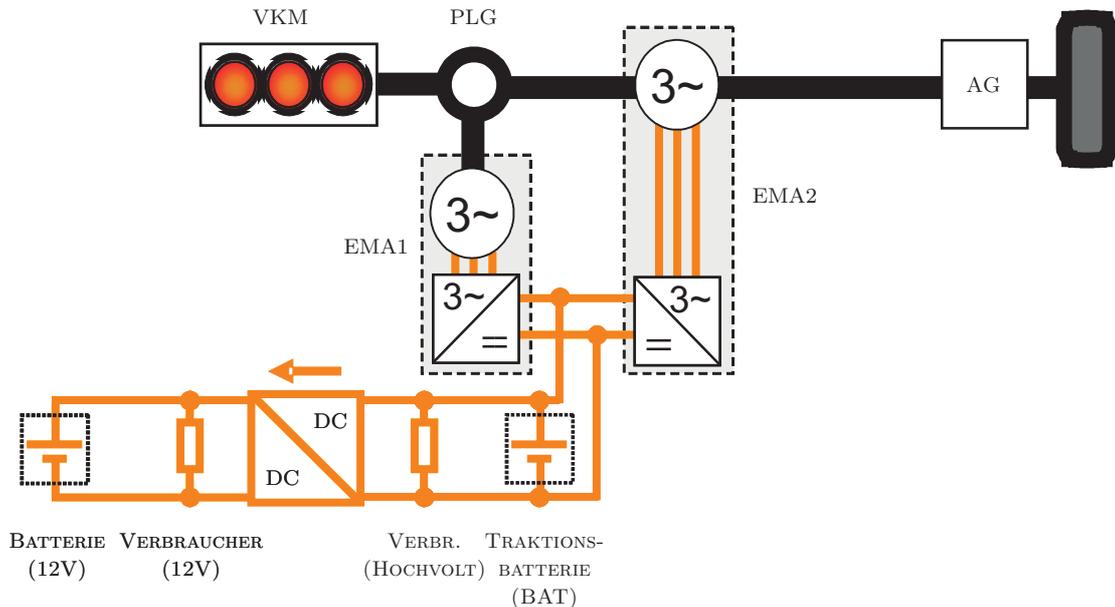


Abbildung 1.6: Antriebsstrang eines leistungsverzweigten Hybrids. Mittels Planetengetriebe (PLG) und zwei elektrischen Maschinen (EMA1 und EMA2) wird die Antriebsenergie des Verbrennungsmotors (VKM) in einen elektrischen und einen mechanischen Pfad verzweigt.

1.2.2.3 Leistungsverzweigter Hybrid bzw. Mischhybrid

Als eine Mischform aus parallelem und seriellem Hybrid gilt der leistungsverzweigte Hybrid. Dabei wird die Leistung der Verbrennungskraftmaschine über ein Planetengetriebe in einen elektrischen und einen mechanischen Zweig aufgeteilt (leistungsverzweigt). Wie auch beim seriellen Hybrid sind hierfür zwei elektrische Maschinen erforderlich (**Abbildung 1.6**), diese können jedoch erheblich kleiner dimensioniert werden.

Der leistungsverzweigte Hybridantrieb von Toyota. Die derzeit wohl bekannteste Bauform eines leistungsverzweigten Hybrids ist die von Toyota. Sie wird unter anderem im Toyota Prius eingesetzt. Das System, dargestellt in **Abbildung 1.6**, besteht aus einer Verbrennungskraftmaschine und zwei elektrischen Maschinen, die über ein Planetengetriebe mit dem Abtrieb verbunden sind. Die Verbrennungskraftmaschine ist mit dem Steg, eine der elektrischen Maschinen (EMA1) mit dem Sonnenrad und die zweite elektrische Maschine (EMA2) mit dem Hohlrad und dem Abtrieb gekoppelt. Mit dieser Anordnung wird ein elektrisches stufenloses Getriebe (eCVT, Electric Continuous Variable Transmission) realisiert.

Die Getriebeübersetzung wird mit den elektrischen Maschinen vorgenommen. So muss

ein Teil der Leistung stets mechanisch-elektrisch-mechanisch gewandelt werden, was bei hohen Lasten zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrads gegenüber einem Parallelhybriden führt.

Der Hybridantrieb in den Lexusmodellen ist vom Prinzip her ähnlich aufgebaut. Der Lexus RX400h besitzt noch eine weitere elektrische Maschine für die Hinterachse und realisiert damit einen elektrischen Allradantrieb (eAWD, Electric All-Wheel-Drive).

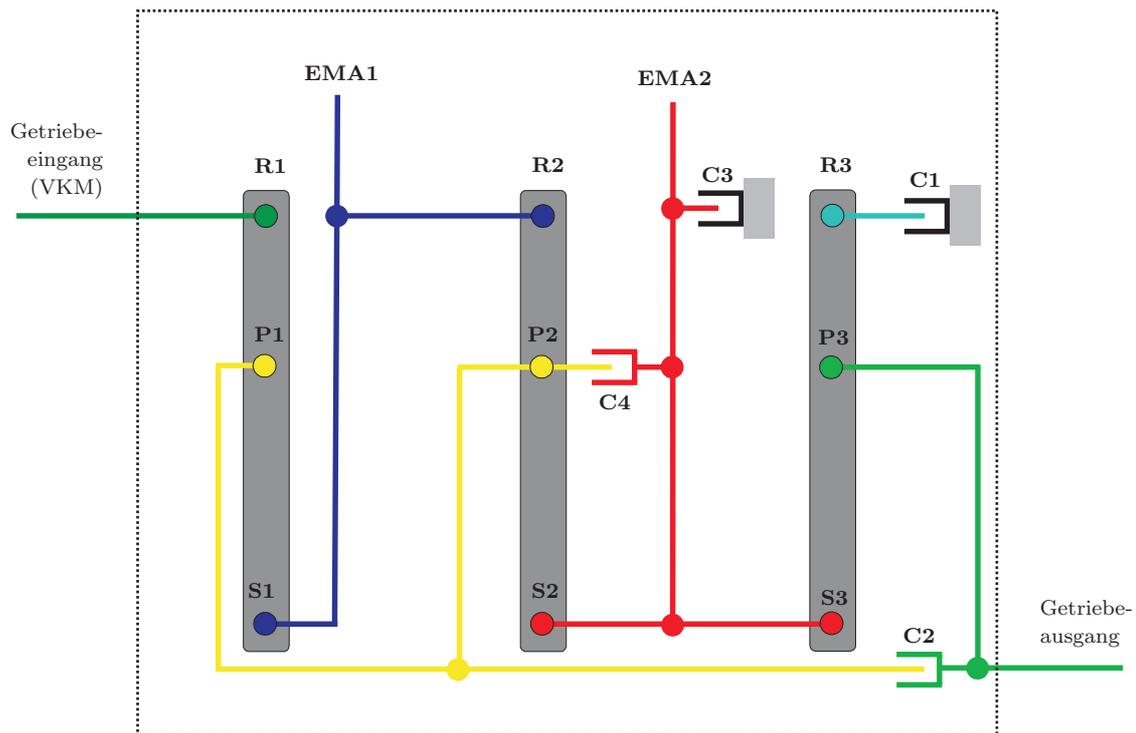


Abbildung 1.7: Prinzipdarstellung des Mehrstufenhybriden von Allison [41]. Das Getriebe des leistungsverzweigten Hybriden besteht aus zwei elektrischen Maschinen (EMA1, EMA2), vier Kupplungen (C1, C2, C3 und C4) und drei Planetengetrieben [42], von denen jedes über eine Sonne (S1, S2 und S3), einen Planetenträger (P1, P2 und P3) und ein Hohlrads (R1, R2 und R3) verfügt.

Der Mehrstufenhybrid von Allison⁹. Unter dem Namen AHS (Advanced Hybrid System) entwickeln General Motors, Daimler und BMW einen Hybridantrieb [43], dessen Konzept ursprünglich von Allison Transmission¹⁰ stammt. Der Aufbau des Getriebes ist in **Abbildung 1.7** dargestellt. Es besteht aus drei Planetensätzen und vier Kupplungen [44, 41].

Der komplexe Aufbau bietet gegenüber dem leistungsverzweigten Hybridantrieb von Toyota den Vorteil, zwischen zwei eCVT-Gängen und vier festen Gangstufen zu wählen.

⁹ *Mehrstufen* korrespondiert mit der Anzahl der möglichen CVT-Modi.

¹⁰ Allison Transmission war von 1929 bis 2007 Teil der General Motors Corporation.

In den beiden eCVT-Gängen kann der elektrische Pfad der Leistungsverzweigung geringer ausfallen als beim System von Toyota. Dies bietet Vorteile für den Getriebewirkungsgrad und die Dimensionierung der elektrischen Antriebe. Des Weiteren arbeitet das System in den vier festen Gangstufen wie ein Parallelhybrid, was den Wirkungsgrad weiter verbessert.

1.2.2.4 Unterschiede der einzelnen Bauformen

Die drei vorgestellten Konfigurationen hybrider Antriebsstränge sollen nun anhand der Gesamtfahrzeugparameter Kraftstoffverbrauchspotenzial, Fahrleistung und Komfort bewertet werden. Ein sehr wichtiger Punkt fehlt dabei: die Kosten. Grund dafür ist, dass dies objektiv nur sehr schwer möglich ist und auch stark von zukünftigen Entwicklungen abhängt. So bietet der Parallelhybrid viele Synergiepunkte zu heutigen Fahrzeugen. Der leistungsverzweigte Hybrid ist heute am meisten verbreitet, wodurch Kooperationen mehrerer Hersteller Einsparpotenziale bieten. Der serielle Hybrid wiederum kann als Vorentwicklung für zukünftige Technologien (brennstoffzellen- oder batteriebetriebene Fahrzeuge) gesehen werden. All das sind Faktoren, die nur schwer zu bewerten sind und auch von der strategischen Ausrichtung des jeweiligen Automobilherstellers abhängen.

Kraftstoffverbrauchspotenzial: Wie Abbildung 1.4 zeigt, muss beim seriellen Hybriden die gesamte Antriebsenergie stets mechanisch-elektrisch und anschließend wieder elektrisch-mechanisch gewandelt werden. Bei höheren Lasten ergibt sich durch die mehrmaligen Energiewandlung zwischen Verbrennungskraftmaschine und Rad ein schlechterer Wirkungsgrad als bei mechanischen Getrieben.

Der parallele Hybrid hat den Vorteil, dass im Antriebsstrang weiterhin ein konventionelles Getriebe vorhanden ist. Bei üblichen Kundenzyklen hat daher der parallele Hybrid Wirkungsgradvorteile gegenüber dem seriellen Hybriden [9].

Der leistungsverzweigte Hybrid liegt in dieser Betrachtung zwischen dem seriellen und dem parallelen Hybriden. Ein Teil der Leistung des Verbrennungsmotors muss aufgrund der Leistungsverzweigung stets über den elektrischen Zweig gewandelt werden und der andere Teil kann vom Verbrennungsmotor direkt mechanisch an den Abtrieb geführt werden.

Daher ergibt sich für die drei Topologien folgende Reihenfolge bezüglich ihres Verbrauchspotenzials [45, 46, 47, 10, 9]:

1. parallel
2. leistungsverzweigt
3. seriell

Fahrleistung: Bei der Fahrleistung hat der parallele Hybrid den Vorteil, dass er als einziger in jedem Arbeitspunkt das Drehmoment von Verbrennungsmotor und elektrischem Antrieb addieren kann. Beim leistungsverzweigten Hybriden ist dies nicht möglich,

da die elektrischen Maschinen auch Drehmoment und Drehzahl wandeln müssen. Als schlechtestes System erweist sich bei der Fahrleistung der serielle Hybrid, da nur die Leistung einer elektrischen Maschine (EMA2) als Antrieb genutzt werden kann [48]. Damit ergibt sich das Ranking für Fahrleistung:

1. parallel
2. leistungsverzweigt
3. seriell

Komfort: Beim Komfort ist das Zuschalten des Verbrennungsmotors ein entscheidender Faktor. Dabei haben der serielle und der leistungsverzweigte Hybrid den Vorteil, dass zwei elektrische Maschinen im Antriebsstrang verbaut sind. Eine kann zum elektrischen Fahren genutzt werden, während die zweite komfortabel den Verbrennungsmotor startet. Beim parallelen Hybriden mit nur einer elektrischen Maschine an der Kurbelwelle geschieht der Verbrennungsmotorzustart über die Kupplung zwischen elektrischer Maschine und Verbrennungskraftmaschine [49]. Auch dieser Start kann komfortabel dargestellt werden. Die elektrische Maschine muss dafür jedoch kurzzeitig sehr große Drehmomente aufbringen. Daher weisen beim Komfort serieller und leistungsverzweigter Hybrid Vorteile auf [48]:

1. leistungsverzweigt, seriell
2. parallel

Zusammenfassung: Vor allem wegen der Vorteile bezüglich Verbrauch und Fahrleistung wurde bei Volkswagen schon frühzeitig auf das Konzept des Parallelhybriden gesetzt [47, 50, 8]. Er hat eine weitere Eigenschaft, die im Folgenden erläutert wird.

1.2.2.5 Modularität und Skalierbarkeit des parallelen Hybriden

Nach [51] werden Systeme in modulare und integrale Systeme eingeteilt. Bei einem modularen System lassen sich die einzelnen Funktionen gewissen Komponenten zuordnen. Bei einem integralen System decken Komponenten mehrere Funktionen ab.

Ein Beispiel für ein integrales System ist das Getriebe des Toyota Prius. Bei der Topologie laut Abbildung 1.6 werden sowohl die klassischen Funktionen eines Triebstrangs [42], wie *Anfahren, Drehmoment und Drehzahl wandeln, Fahrbetrieb vorwärts und rückwärts ermöglichen* und *Betrieb der Antriebsmaschine im Verbrauchs- und Abgasoptimum des Kennfeldes zu ermöglichen*, als auch die hybridspezifischen Funktionen *Rekuperieren, elektrisch Fahren* und *Unterstützen des Verbrennungsmotors*¹¹ integral mit zwei elektrischen Maschinen und einem Planetengetriebe dargestellt. Dadurch kann das Getriebe vom Prius sehr kompakt gebaut werden und es können Elemente des konventionellen Antriebsstrangs

¹¹ *Unterstützen des Verbrennungsmotors* wird auch als *Boosten* bezeichnet.

(Drehmomentwandler, Kupplungen, Gangstufen, . . .) entfallen.

Zusätzlich wird das Hybridsystem zum Starten des Verbrennungsmotors und zum Generieren der elektrischen Energie für das Bordnetz und die elektrischen Nebenaggregate verwendet, wodurch auf weitere Komponenten (Starter, Generator) verzichtet werden kann. In diesem Prozess der *Entfeinerung*¹² des konventionellen Antriebs bieten Hybridkonzepte sehr große Möglichkeiten. Ein besonders integrales System stellt das Mega-Getriebe dar [33, 52].

Aus Kostengründen ist jedoch in den nächsten Jahren nicht mit einer Hybridisierung über ganze Fahrzeugplattformen hinweg zu rechnen [15]. Integriert man den Hybridantrieb in bestehende Fahrzeugplattformen, so bietet ein modulares Hybridsystem, bei dem die Hybridfunktionen auf einzelne Komponenten verteilt sind, die Möglichkeit, ein breites Spektrum vom konventionellen Fahrzeug über Micro- und Mild Hybrid bis hin zum Full Hybrid auf einer Fahrzeugplattform darzustellen. Ein solches modulares System stellt der parallele Hybrid nach Abbildung 1.5 dar.

Beim parallelen Hybridkonzept werden die klassischen Funktionen eines Triebstrangs [42], wie *Anfahren, Drehmoment und Drehzahl wandeln, Fahrbetrieb vorwärts und rückwärts ermöglichen* wie bei heutigen Fahrzeugen weiterhin von einem Getriebe dargestellt, während die hybridspezifischen Funktionen *Rekuperieren, elektrisch Fahren* und *Unterstützen des Verbrennungsmotors* von zusätzlichen Komponenten (elektrischer Antrieb, Trennkupplung, Hochvoltspeicher) übernommen werden.

Die Hybridkomponenten im Parallelhybrid können in ihrer Leistung variiert (skaliert) werden. Die Skalierung der elektrischen Leistung geht Hand in Hand mit der Skalierung der entsprechenden Funktionen [47, 50]. In diversen Publikationen [53, 14, 54, 55, 26] haben sich für die Stufen der Hybridisierung die – aus dem Englischen stammenden – Bezeichnungen Micro Hybrid (ca. <10kW elektromotorische Leistung), Mild Hybrid (ca. 10-30kW elektromotorische Leistung) und Full Hybrid (ca. >30kW elektromotorische Leistung) etabliert. Automobilzulieferer entwickeln skalierbare Baukästen, um dieses Spektrum an Leistungsklassen abzudecken [55, 14, 26]. Für eine solche Standardisierung eignet sich am besten eine modulare Architektur [51, 56].

Micro Hybrid: Dieses Parallelhybridkonzept stellt die evolutionäre Weiterentwicklung heutiger Antriebe dar. Durch Integration der Funktionen *Motorstart/-stopp bei Fahrzeugstillstand* und *leichte Rekuperation* [57, 58, 59] kann der Kraftstoffverbrauch bei einem Micro Hybrid um etwa 4-8% gesenkt werden [55]. Die Fahrleistung kann durch so genannten *passiven Boost* verbessert werden. Dabei wird die Last von Nebenaggregaten bei großen Fahrleistungsanforderungen reduziert, um mehr verbrennungsmotorische Leistung für den Antrieb des Fahrzeugs zur Verfügung zu haben.

¹²Mit Entfeinerung ist der Entfall von Komponenten gemeint, dessen Funktion durch das hybride Antriebssystem abgedeckt werden kann.

Die Funktion Motorstart/-stopp wird bei diesen Systemen mit lebensdaueroptimierten Ritzelstartern oder mit Starter-Generatoren im Riementrieb realisiert [14]. Als elektrische Maschine wird dabei in der Regel eine Klauenpolmaschine verwendet, da sich diese durch einen robusten und kostengünstigen Aufbau auszeichnet [42, 57]. Der Micro Hybrid bietet ein gutes Verhältnis von Kraftstoffeinsparpotenzial zu Kosten [13, 60, 61].

Mild Hybrid: Der Mild Hybrid deckt den Bereich um etwa 8-20kW elektromotorischer Leistung ab und bietet dabei ein Verbrauchspotenzial von 10-20% [55]. Zu dieser Kategorie zählt man das IMA-System von Honda, das im aktuellen Honda Civic Hybrid auch elektrisches Fahren bei Konstantfahrt erlaubt.

Honda nutzt beim elektrischen Fahren seine VTEC-Technologie¹³ zur Schleppmomentenreduzierung. Beim Honda Civic wird durch Schließen der Einlass- und der Auslassventile der Ladungswechsel unterbunden [62, 27]. Honda gibt an, dass man durch diese *Zylinderabschaltung* das Schleppmoment auf ein Drittel reduzieren kann [62].

Abbildung 1.8 zeigt, dass mit einem Mild Hybrid bereits ein Großteil des Rekupe-
rationspotenzials genutzt werden kann. So reicht im europäischen Normzyklus (NEFZ) bei einem Fahrzeug der Mittelklasse eine Leistung von 10kW am Rad aus, um 75% der gesamten Bremsenergie zurück zu gewinnen. Will man dagegen 90% des Potenzials erreichen, ist dafür die 1.5-fache Leistung (15kW) notwendig. Ein kundennah gefahrener Stadtzyklus in Braunschweig (BS-Zyklus) zeigt ähnliche Ergebnisse.

Full Hybrid: Diese Variante bietet den vollen Funktionsumfang eines Hybriden, inklusive elektrisches Fahren. Für elektrische Beschleunigung und den Zustart des Verbrennungsmotors müssen die Hybridkomponenten (elektrische Maschine und Speicher) sehr groß dimensioniert werden. Der Full Hybrid bietet von allen Varianten mit etwa 15-45% [55] das größtmögliche Verbrauchseinsparpotenzial gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb.

Um während einer elektrischen Fahrt den Betrieb des Fahrzeugs aufrecht zu erhalten, müssen die Nebenaggregate (wie Klimatisierung, Lenk- und Bremsunterstützung) elektrifiziert sein [63, 64]. Gerade in der Elektrifizierung von Nebenaggregaten und der damit verbundenen bedarfsgerechten Auslegung und Ansteuerung steckt ein weiteres Verbrauchspotenzial [65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73] des Full Hybrid.

Abbildung 1.9 zeigt die Kosten und Potenzial von Micro, Mild und Full Hybrid. Wegen ihres größeren CO₂-Potenzials konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf Full und Mild Hybrids. Im nächsten Abschnitt wird die Auslegung der betrachteten Hybridantriebe vorgestellt.

¹³VTEC, Variable Valve Timing and Lift Electronic Control

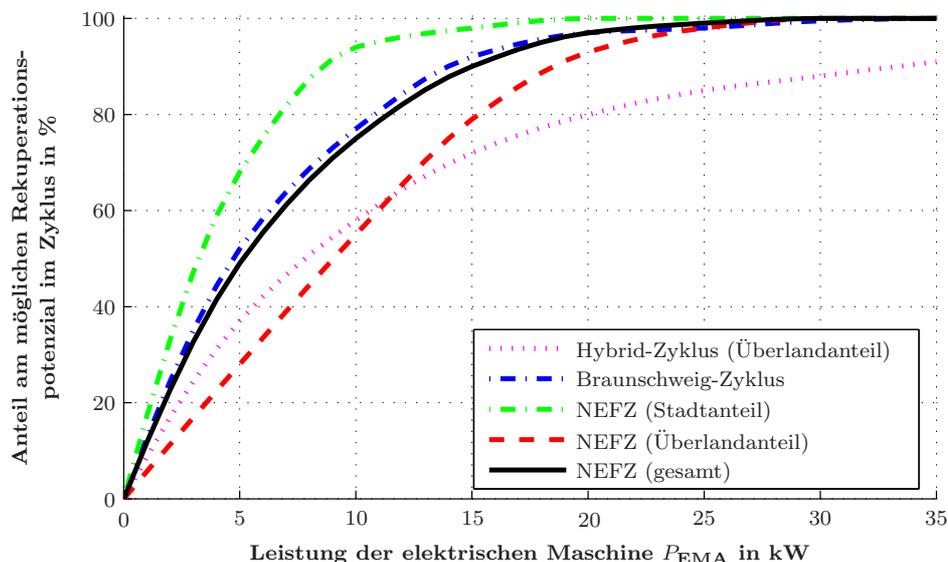


Abbildung 1.8: Rekuperationspotenzial [8]. Dargestellt ist der Anteil des möglichen Kraftstoffeinsparpotenzials durch Bremsenergierückgewinnung als Funktion der elektrischen Leistung für unterschiedliche Fahrzyklen. Vor allem in den Stadtzyklen (NEFZ (Stadtanteil) und Braunschweig-Zyklus) kann bereits mit $P_{EMA} = 15\text{kW}$ ein Großteil der kinetischen Energie zurück gewonnen werden.

1.2.3 Konfiguration der untersuchten Hybridfahrzeuge

Im Abschnitt 1.2.2.4 wurden die Vorteile des parallelen Hybrids dargestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden daher zwei Skalierungen des parallelen Hybrids behandelt: ein Full Hybrid und ein Mild Hybrid.

1.2.3.1 Bora Full Hybrid

Der Full Hybrid nach **Abbildung 1.10** wurde im Rahmen des EU-Projekts SUVA (SUrplus VAValue Hybrid [39]) bei Volkswagen entwickelt. Der eingebaute NiMH-Speicher besteht aus zehn Modulen zu jeweils 24 Zellen.

Bei dieser Konfiguration können Generator und Ritzelstarter entfallen, da das 12V-Bordnetz über einen DC/DC-Wandler aus dem Hochvolt-Bordnetz versorgt wird und den Verbrennungsmotorstart die elektrische Maschine (EMA) übernimmt. Diverse Nebenaggregate wie Klimakompressor, Lenkhilfpumpe und Bremsunterstützung wurden beim Bora Full Hybrid elektrifiziert.

Eine Zelle des Traktionsspeichers hat eine Leerlaufspannung von etwa 1.2V und eine Kapazität von 6.5Ah. Die 240 Zellen sind in Reihe geschaltet, was eine Leerlaufspannung von 288V und den beträchtlichen Energieinhalt von $6.5\text{Ah} \cdot 288\text{V} = 1872\text{Wh}$ ergibt. Dabei ist

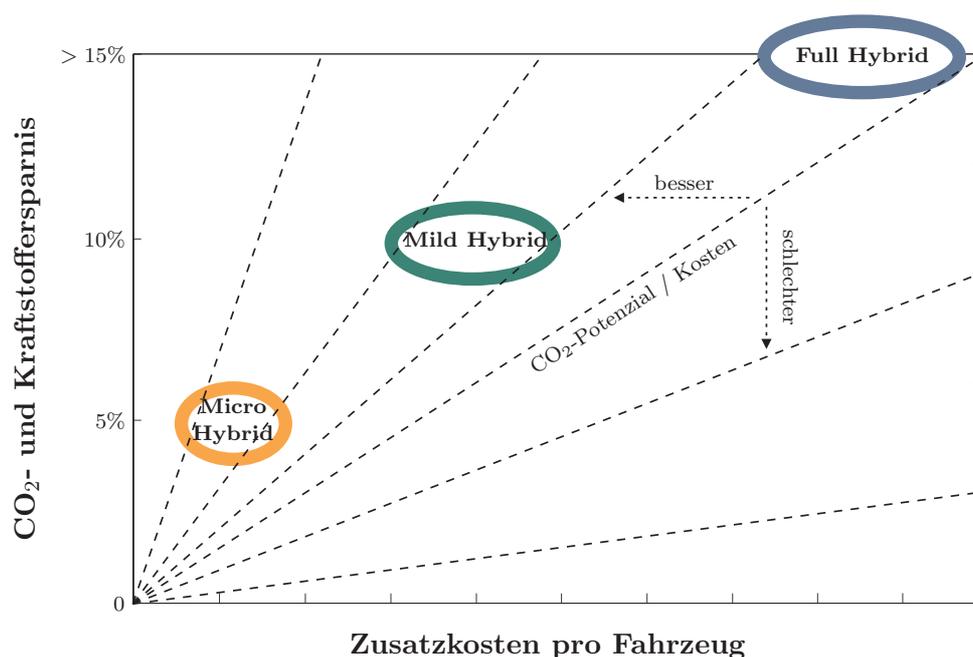


Abbildung 1.9: Vergleich von Micro, Mild und Full Hybrid. Schematische Darstellung der Zusatzkosten und der CO₂-Reduzierung von hybriden Antrieben. Der Full Hybrid hat größte CO₂-Potenzial, jedoch das das schlechteste Kosten-Nutzen-Verhältnis [13].

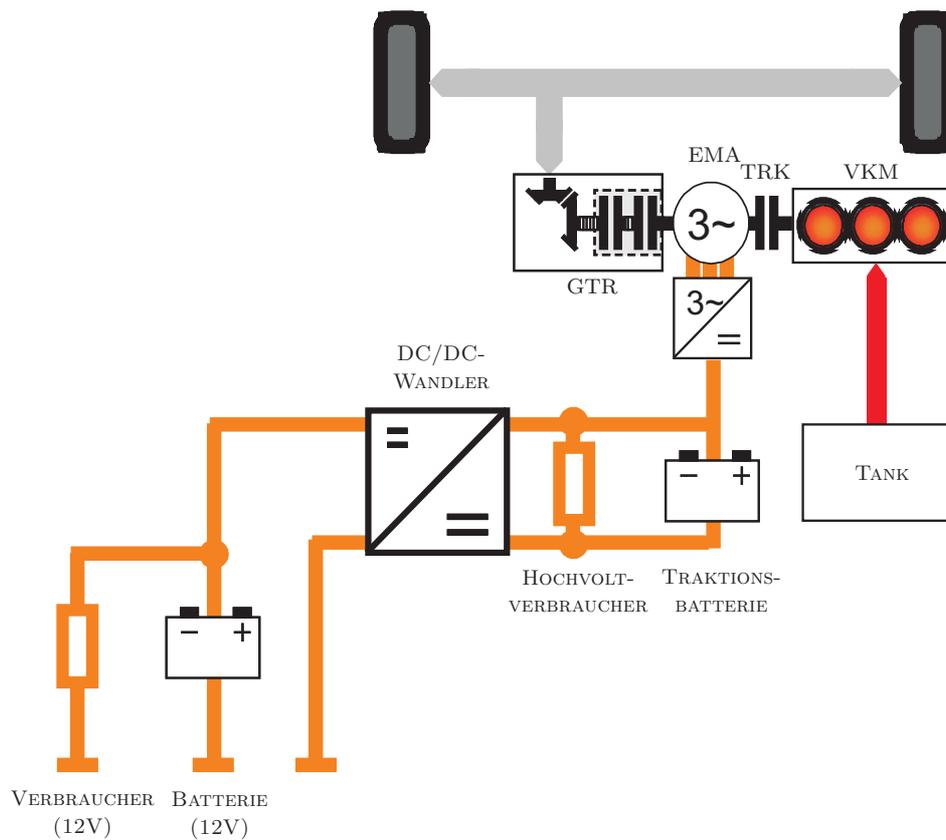
zu erwähnen, dass es sich beim angegebenen Energieinhalt um den *nominellen* Energieinhalt handelt. Bei NiMH-Batterien wird jedoch davon abgeraten, diesen großen Energieinhalt auch zu nutzen, da sich dadurch die Lebensdauer stark verringert [76, 77]. Viel mehr ist davon auszugehen, dass nur etwa 10% des nominellen Energieinhalts tatsächlich genutzt werden können. Dies ergibt einen nutzbaren Energieinhalt von 187Wh. Geht man davon aus, dass man bei einer Konstantfahrt mit 50km/h auf der Ebene etwa 5kW benötigt und weitere 2kW für Klimatisierung und Bordnetz zur Verfügung gestellt werden müssen, so reicht der nutzbare Energieinhalt für

$$\Delta t = \frac{187\text{Wh} \cdot 60\text{min/h}}{7000\text{W}} = 1.6\text{min oder } 1.3\text{km.} \quad (1.1)$$

Die Lebensdauer von NiMH-Batterien wird im Abschnitt 2.1.7 und speziell in Abbildung 2.7 genauer erörtert.

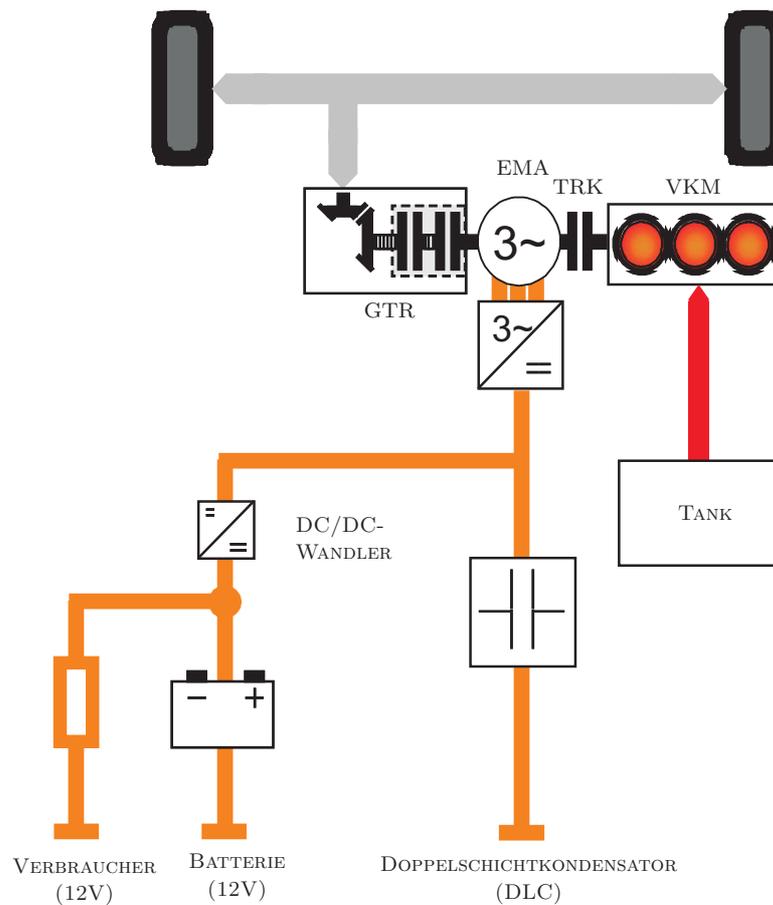
1.2.3.2 Bora Mild Hybrid

Der Antriebsstrang für den Mild Hybrid ist in **Abbildung 1.11** dargestellt. Als Energiespeicher wird bei diesem Fahrzeug ein Doppelschichtkondensator (Double Layer Capacitor, DLC) eingesetzt. Dieser Energiespeicher zeichnet sich durch eine große Leistungsdichte und



Verbrennungskraftmaschine	Bezeichnung	Volkswagen 1.4l-TDI
	Kraftstoffart	Diesel
	Nenndaten	55kW, 195Nm
elektromotorischer Antrieb	Bezeichnung	Full Hybrid PSM
	Anordnung	koaxial
	Nenndaten	25kW (8kW dauer), 110Nm
Traktionsspeicher	Typ	Panasonic NiMH-Zellen
	Kapazität pro Zelle	6.5Ah
	Verschaltung der Zellen	(10 × 24 =) 240 Zellen in Reihe
	Leerlaufspannung	288V
	nomineller Energieinhalt	1872Wh
Hybridfunktionen	Motorstart/-stopp	+
	elektrisch Fahren	+
	Boosten	+
	Rekuperieren	+

Abbildung 1.10: Konfiguration und technische Daten des Bora Full Hybrid [74, 75, 8].



Verbrennungskraftmaschine	Bezeichnung	Volkswagen 1.4l-TDI
	Kraftstoffart	Diesel
	Nennndaten	55kW, 195Nm
elektromotorischer Antrieb	Bezeichnung	Mild Hybrid PSM
	Anordnung	koaxial
	Nennndaten	Abbildung 4.5: 8kW, 60Nm
Traktionsspeicher	Typ	Doppelschichtkondensator
	Kapazität pro Zelle	1800F
	Verschaltung der Zellen	20 Zellen in Reihe
	Spannungsbereich	21V – 48V
	nutzbarer Energieinhalt	23Wh
Hybridfunktionen	Motorstart/-stopp	+
	elektrisch Fahren	×
	Boosten	+
	Rekuperieren	+

Abbildung 1.11: Konfiguration und technische Daten des Bora Mild Hybrid.

sehr gute Zyklenfestigkeit aus, jedoch besitzt er im Vergleich zum NiMH-Speicher nur eine geringe Energiedichte [54, 76]. Doppelschichtkondensatoren sind besonders für kostenoptimierte Mild Hybrids interessant [78].

Der Spannungsbereich des Hochvoltspeichers ist so gewählt, dass eine Spannung von 60V nicht überschritten wird. Über dieser Spannungsgrenze müssen besondere Maßnahmen zum Berührungsschutz [79] getroffen werden, was die Mehrkosten für den Hybrid weiter steigen lassen.

Der Energieinhalt des Speichers berechnet sich aus der Gesamtkapazität des Kondensatormoduls C_{DLC} und dem genutzten Spannungsbereich ($U_{DLC,min} \dots U_{DLC,max}$) zu

$$W_{DLC,max} = \frac{1}{2} C_{ges}(U_{DLC,max}^2 - U_{DLC,min}^2) = \frac{1}{2} \frac{C_{Zelle}}{20}(U_{DLC,max}^2 - U_{DLC,min}^2) \quad (1.2)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1800F}{20}((48V)^2 - (21V)^2) = 84kJ = 23Wh. \quad (1.3)$$

Bei einer Rekuperation mit einer mittleren Leistung von 10kW ist der zuvor entladene Doppelschichtkondensator nach nur

$$\Delta t = \frac{\Delta W_{DLC,max}}{P} = \frac{84kJ}{10kW} = 8.4s \quad (1.4)$$

voll geladen.

Der Mild Hybrid besitzt – wie auch der Full Hybrid – eine Trennkupplung (TRK) zwischen Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine. Diese Kupplung dient zum Abkoppeln des Verbrennungsmotors beim Rekuperieren. Dadurch kann in Verzögerungsphasen mehr Energie zurückgewonnen werden.

1.2.4 Energiemanagement in Hybridfahrzeugen

Das Energiemanagement regelt den Betrieb der Hybridfunktionen (Rekuperieren, Motorstart/-stopp, elektrisch Fahren, Fahren mit Verbrennungskraftmaschine und Boosten) und steuert somit den Energiefluss im Hybridfahrzeug. In den verbrennungsmotorischen Betriebsbereichen wird durch Lastpunktverschiebung an der Verbrennungskraftmaschine der Traktionsspeicher ge- bzw. entladen. Bei der Regelung des Ladezustands gilt es stets einen Kompromiss zwischen einem gewissen *Energievorhalt* für die Rekuperation und einem ausreichenden *Energieinhalt* für die anderen Hybridfunktionen (elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten) zu finden.

Mittels Prognose der rekuperierbaren Energie und des Energiebedarfs für die Hybridfunktionen elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten kann das Energiemanagement an die Fahrsituation angepasst (adaptiert) und somit der verfügbare Energieinhalt des Traktionsspeichers effizienter genutzt werden.

Da aus Gewichts-, Bauraum- und Kostenaspekten der Dimensionierung des Traktionspeichers stets Grenzen gesetzt sind, ergibt sich durch die Adaption ein zusätzliches Kraftstoffsparepotenzial von Hybridfahrzeugen [80, 75, 81]. Den begrenzten Energieinhalt elektrochemischer Speicher von Mild- und Full-Hybrids zeigen die Gln. (1.1-1.3).

Bekannt sind Arbeiten [82, 83, 84, 85, 86, 87, 88], bei denen das Energiemanagement mittels Fuzzy- und Optimierungsalgorithmen festgelegt und adaptiert wird. Alternativ gibt es analytische Energiemanagement-Algorithmen [89, 9] und die analytische Beschreibung der Verbrennungskraftmaschine [90].

Unter dem Begriff Energiemanagement wird auch die Optimierung des Energieflusses in konventionellen 12V-Bordnetzen bezeichnet [91, 71, 92]. Diese Form des Energiemanagements wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

1.3 Ziel und Gliederung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Energiemanagement eines parallelen hybriden Antriebsstrangs zu beschreiben und durch Adaption und Prädiktion weiter zu optimieren. Die Betriebsstrategie ist dabei in erster Linie auf Kraftstoffverbrauchsreduzierung ausgelegt. Dies erfolgt durch

- ◇ Auswahl des, für den aktuellen Betriebspunkt optimalen Antriebs (elektromotorischen oder verbrennungsmotorischen Antrieb) und
- ◇ Ladezustandsregelung des Traktionsspeichers um für zukünftige Fahrsituationen die notwendigen Reserven im Speicher¹⁴ sicherzustellen.

Dazu werden in der vorliegenden Arbeit die energetischen Zusammenhänge in einem Parallelhybrid analytisch abgeleitet und daraus ein *konventionelles Energiemanagement* entwickelt, welches Zustandsgrößen zum Zeitpunkt $\tau = t$ nutzt (vgl. **Abbildung 1.12**). Der analytische Ansatz basiert auf einer linearen Modellierung der Antriebsstrangkomponenten (Verbrennungskraftmaschine, elektromotorischer Antrieb und Traktionsspeicher).

Aufbauend auf dem konventionellen Energiemanagement werden ein adaptives und ein prädiktives Energiemanagement beschrieben. Deren zusätzliche Kraftstoffsparepotenziale gegenüber dem konventionellen Algorithmus werden mittels Simulation aufgezeigt.

Das *adaptive Energiemanagement* nutzt Zustandsgrößen der Vergangenheit (Zeitpunkte $\tau \leq t$). Es wurde speziell für den kostenoptimierten Mild Hybrid (Abbildung 1.11) entwickelt und berücksichtigt dessen geringen nutzbaren Energieinhalt nach Gl. (1.3). Um einen

¹⁴Energievorhalt für Rekuperieren und Energieinhalt für elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten.

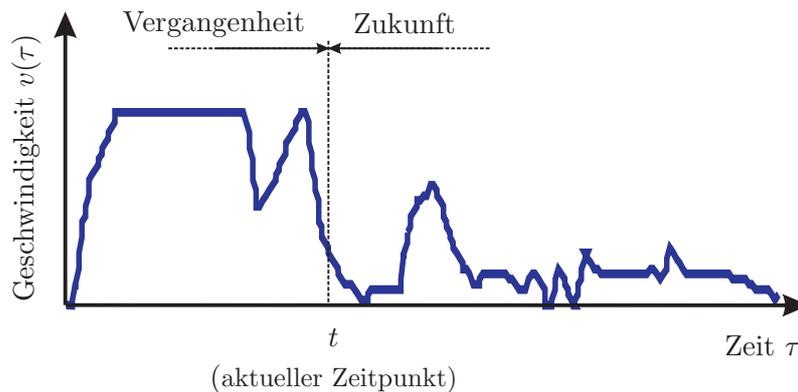


Abbildung 1.12: Adaptives versus prädiktives Energiemanagement. Das adaptive Energiemanagement nutzt zum Zeitpunkt t nur Informationen aus der Vergangenheit ($\tau \leq t$). Ein prädiktives Energiemanagement nutzt darüber hinaus prognostizierte Daten einer Streckenvorausschau ($\tau > t$).

baldigen und kostengünstigen Einsatz in Serienfahrzeugen zu ermöglichen, ist das adaptive Energiemanagement völlig autark¹⁵ (vgl. **Abbildung 1.13**).

Ist im Fahrzeug eine Streckenvorausschau mittels Infrastrukturdaten möglich, so kann das adaptive Energiemanagement analog **Abbildung 1.12** zu einem *prädiktiven Energiemanagement* erweitert werden. Dies erlaubt eine noch präzisere Adaption an den zukünftigen elektrischen Energiebedarf im Hybridfahrzeug, **Abbildung 1.13**.

Gliederung der Arbeit

Im **Kapitel 2** wird zunächst ein Fahrzeuglängsdynamikmodell unter Matlab/Simulink beschrieben. Es dient zum Vergleich der Energiemanagement-Algorithmen und liegt allen Simulationsergebnissen zugrunde. Das Modell beinhaltet den hybriden Antriebsstrang, das Fahrzeug und den Fahrer, der einem vorgegebenen Fahrzyklus folgt. Das Kapitel beschreibt auch eine Auswahl an Zyklen, die in dieser Arbeit für die Verbrauchsbewertung der Energiemanagement-Algorithmen herangezogen werden. Ein Zyklus wurde mittels Kopplung des Fahrzeuglängsdynamikmodells mit dem Verkehrssimulationsprogramm PELOPS¹⁶ generiert.

Kapitel 3 erläutert die energetischen Wechselwirkungen im Hybridfahrzeug. Dazu werden die Antriebsstrangkomponenten analytisch modelliert. Die Erkenntnisse münden in ein konventionelles Energiemanagement für Mild und Full Hybrids, welches ebenfalls in **Kapitel 3** dargestellt wird.

¹⁵Er ist auf keinerlei Informationen über Strecke oder Verkehr angewiesen.

¹⁶PELOPS ermöglicht es ein Fahrzeugmodell in diversen Verkehrsszenarien zu untersuchen.

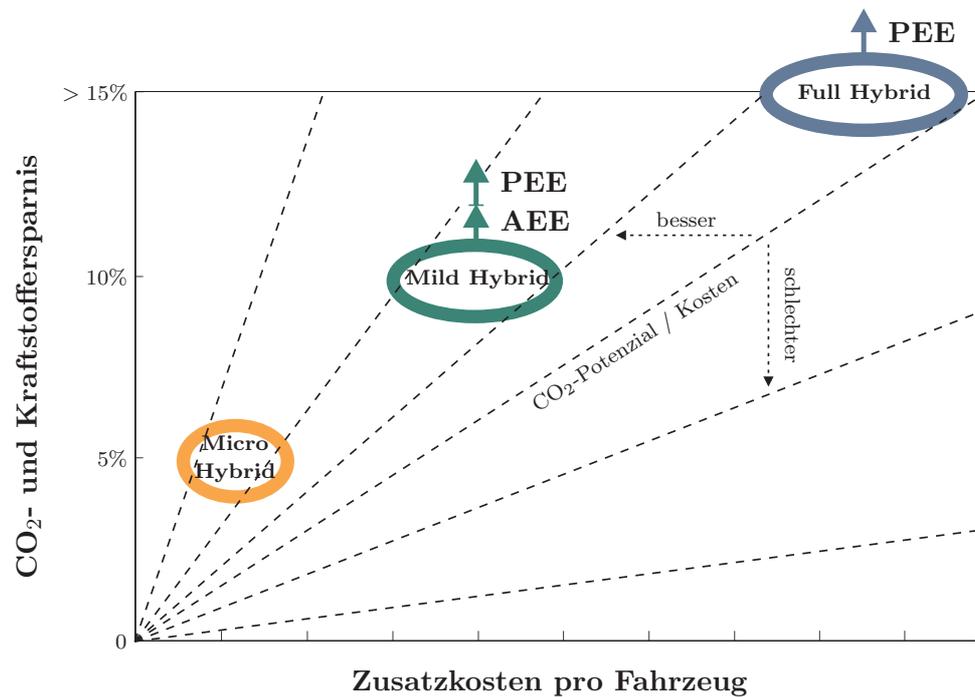


Abbildung 1.13: Adaptives und prädiktives elektrisches Energiemanagement (AEE und PEE). Ziel von AEE und PEE ist es den Kraftstoffverbrauch von Hybridfahrzeugen nach Abbildung 1.9 zu verbessern, ohne dabei Kosten und Gewicht zu erhöhen. Das AEE ist speziell für Mild Hybrids mit geringem nutzbaren Energieinhalt entwickelt, das PEE für alle Mild und Full Hybrids.

Darauf aufbauend wird im **Kapitel 4** ein adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE) entwickelt. Die Vorteile des adaptiven Energiemanagements gegenüber dem konventionellen Energiemanagement werden mittels Simulation nachgewiesen und ausführlich diskutiert.

Im **Kapitel 5** wird davon ausgegangen, dass Informationen über die voraus liegende Fahrtstrecke bekannt sind, aus denen der zukünftige Energiebedarf prognostiziert werden kann. Dieser wird für ein prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE) genutzt, welches in Kapitel 5 beschrieben wird. Das Potenzial des PEE zeigt die Simulation eines Stauszenarios.

Neue Ergebnisse aus wissenschaftlicher Sicht enthalten die Kapiteln 3, 4 und 5. Im Rahmen der Arbeiten für die Dissertation entstanden die Veröffentlichungen [80], [75] und [74].

Kapitel 2

Modellierung und Fahrzyklen

Inhalt

2.1	Fahrzeugmodellierung und Simulation	24
2.1.1	Rückwärtssimulation	24
2.1.2	Vorwärtssimulation	26
2.1.3	Aufbau des Simulationsmodells	28
2.1.4	Verbrennungskraftmaschine	29
2.1.5	Trennkupplung	30
2.1.6	Elektromotorischer Antrieb	31
2.1.7	Traktionsspeicher	31
2.1.8	Elektrische Nebenaggregate	36
2.1.9	Fahrzeug	36
2.1.10	Fahrer (inkl. Fahrzyklus)	37
2.1.11	Kopplung von Fahrzeug- und Verkehrssimulation	37
2.2	Auswahl der Fahrzyklen	38
2.2.1	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	39
2.2.2	modifizierter NEFZ (mNEFZ)	40
2.2.3	Braunschweig-Zyklus (BS-Zyklus)	41
2.2.4	Hybrid-Zyklus	41
2.2.5	Stau-Zyklus	41
2.2.6	Harz-Zyklus	42
2.2.7	Vergleich der Fahrzyklen	43

Im diesem Kapitel werden die Fahrzeugmodellierung und die Fahrzyklen erläutert, welche den Simulationen in den Abschnitten 4.4 und 5.3 zugrunde liegen.

2.1 Fahrzeugmodellierung und Simulation

Für die Entwicklung und die Potenzialbestimmung von Energiemanagementstrategien wurde ein Simulationsmodell eingesetzt. Ziele des Modells sind

- ◇ das Abbilden der elektrischen und mechanischen Energieflüsse im Fahrzeug,
- ◇ die Möglichkeit zum Implementieren und Testen von Energiemanagement-
Algorithmen,
- ◇ eine flexible Bedatung, um unterschiedliche Antriebsstränge abbilden zu können und
- ◇ eine schnelle Rechenzeit, um innerhalb überschaubarer Zeiträume Parametervaria-
tionen durchführen zu können.

Da Einflüsse der Querdynamik im Umfang dieser Arbeit nicht betrachtet werden, kommt ein Einspur-Fahrzeughängedynamikmodell unter Matlab/Simulink zum Einsatz. Als Simulationstool bietet Simulink den Vorteil, dass sich relativ einfach diverse Controlleralgorithmen implementieren lassen. Nachteile hat Simulink bei der Modellierung von physikalischen Systemen, da es sich um eine signalorientierte Modellierungsumgebung handelt [93]. Das Abbilden von Antriebssträngen ist dabei mittels zwei Verfahren, der Vorwärts- und der Rückwärtssimulation, möglich.

2.1.1 Rückwärtssimulation

Bei der Rückwärtssimulation ist der Ausgangspunkt ein vorgegebener Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit. Daraus wird rückwärts berechnet, was die Komponenten bereitstellen müssten, um diesem Verlauf zu folgen.

Im Falle des verwendeten Fahrzeugmodells bedeutet dies, dass ein Zyklus in jedem Zeitpunkt die Geschwindigkeit vorgibt. Mittels der Fahrwiderstände wird dann berechnet, welche Kraft F_{Rad} notwendig ist um Roll-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand bei der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit zu überwinden. Aus dieser Kraft F_{Rad} wird über den dynamischen Reifenradius r_{dyn} das notwendige Radmoment

$$M_{\text{Rad}} = F_{\text{Rad}} r_{\text{dyn}} \quad (2.1)$$

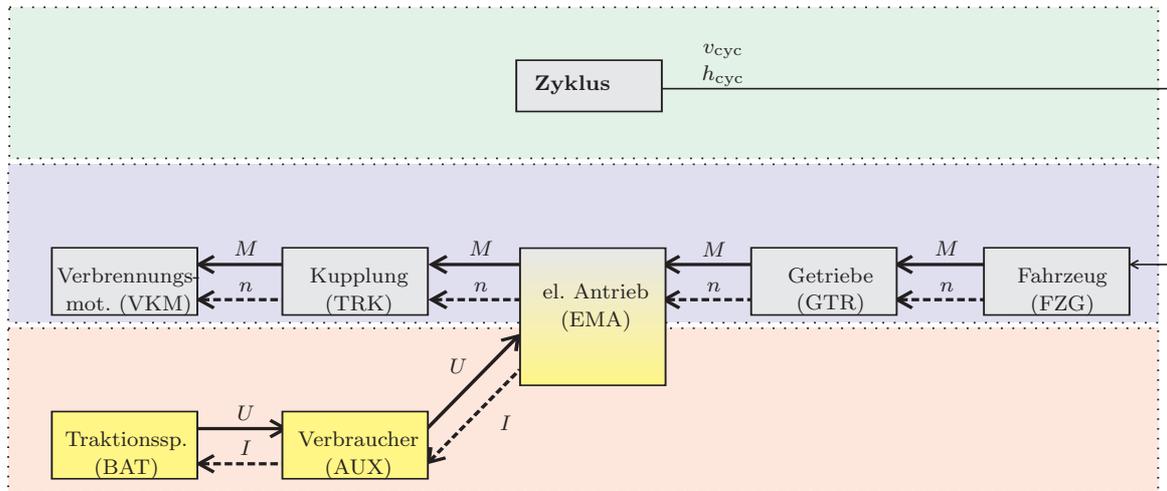


Abbildung 2.1: Prinzip der Rückwärtssimulation. Der Zyklus gibt Geschwindigkeits- und Höhenprofil (v_{cyc} und h_{cyc}) vor. Daraus wird die Reaktion des Antriebsstrangs *rückwärts* berechnet. Die Abbildung zeigt im oberen Teil die Zyklusvorgabe. Darunter sind die Komponenten, die mechanisch verbunden sind, dargestellt. Das untere Drittel enthält die elektrisch verbundenen Bauteile. Der elektromotorische Antrieb (EMA) stellt das Bindeglied zwischen Elektrik und Mechanik dar.

berechnet. Mittels der Übersetzung i_{GTR} und den Verlusten $M_{V,GTR}$ im Getriebe¹ im aktuellen Gang erhält man das Drehmoment am Getriebeeingang

$$M_{GTR} = \frac{M_{Rad}}{i_{GTR}} + M_{V,GTR}, \quad (2.2)$$

welches entsprechend der Betriebsstrategie² auf verbrennungsmotorischen und elektromotorischen Antrieb aufgeteilt wird.

Wie das Drehmoment wird auch die Drehzahl rückwärts berechnet. Aus der Geschwindigkeitsvorgabe v_{cyc} wird über den dynamischen Radradius r_{dyn} die Raddrehzahl (in U/min)

$$n_{Rad} = \frac{v_{cyc}}{r_{dyn}} \frac{60}{2\pi} \quad (2.3)$$

berechnet. Mittels Getriebeübersetzung i_{GTR} kann daraus die Drehzahl am Getriebeeingang

$$n_{GTR} = n_{Rad} i_{GTR} \quad (2.4)$$

¹Unter dem Begriff Getriebe (GTR) wird Achs- und Schaltgetriebe zusammengefasst.

²Die Betriebsstrategie legt den Einsatzbereich der Betriebsmodi im Hybridfahrzeug laut Abschnitt 3.1 (elektrisch Fahren, verbrennungsmotorisch Fahren, Rekuperieren, Boosten) fest.

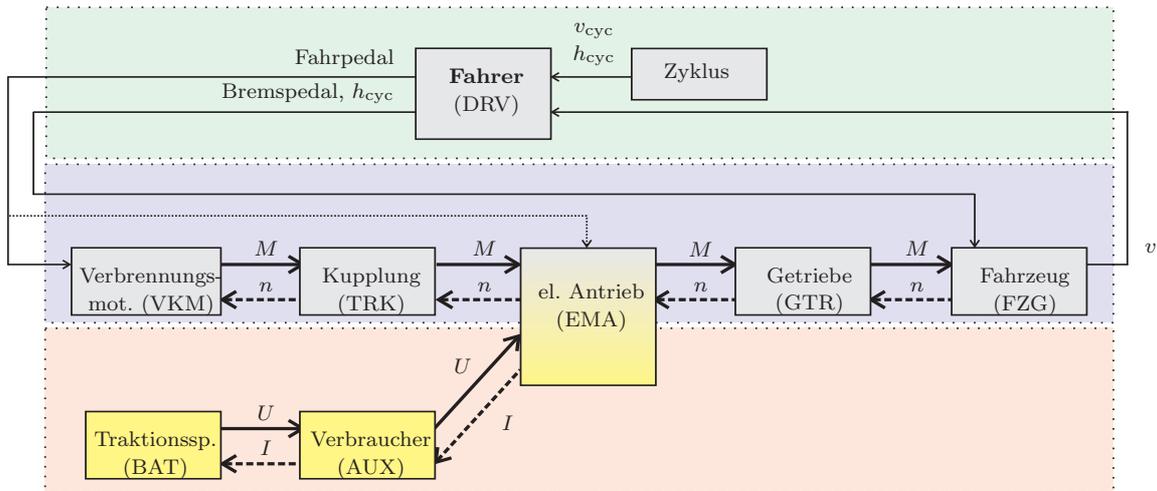


Abbildung 2.2: Prinzip der Vorwärtssimulation. Hier steht ein *Fahrermodell* im Mittelpunkt: Der Zyklus gibt Geschwindigkeits- und Höhenprofil (v_{cyc} und h_{cyc}) vor, aus dem der Fahrer Fahr- und Bremspedal ableitet. Daraus wird die Reaktion des Antriebsstrangs *vorwärts* berechnet. Die Abbildung zeigt im oberen Teil die Zyklusvorgabe und den Fahrer. Darunter sind die Komponenten, die mechanisch verbunden sind, dargestellt. Das untere Drittel enthält die elektrisch verbundenen Bauteile. Der elektromotorische Antrieb (EMA) stellt das Bindeglied zwischen Elektrik und Mechanik dar.

berechnet werden.

Da die Rückwärtsrechnung keinen geschlossenen Regelkreis aufweist, ist sie stets *stabil*. Der Nachteil der Rückwärtssimulation ist, dass sie die tatsächliche Architektur im Fahrzeug nicht so gut abbilden kann wie die Vorwärtssimulation. Dadurch entstehen Ungenauigkeiten, wenn das Fahrzeug nicht im Stande ist, dem Geschwindigkeitsverlauf zu folgen. In diesem Fall wird über die Fahrzeugbeschleunigung eine Leistung an den Antrieb vorgegeben, die dieser nicht erbringen kann. Eine Abbildung der Antriebsgrenzen und deren Auswirkung auf Fahrzeuggeschwindigkeit und Belastung anderer Komponenten ist nur mittels Vorwärtssimulation möglich.

2.1.2 Vorwärtssimulation

Bei dieser Art der Simulation steht ein Fahrermodell (DRV) im Zentrum (**Abbildung 2.2**). Auf die Aktion des Fahrers (Betätigen von Fahr- bzw. Bremspedal) wird die Reaktion des Antriebsstrangs und des Fahrzeugs (Beschleunigung bzw. Verzögerung) berechnet [94].

Aus der aktuellen Geschwindigkeit v und einer vorgegebenen Geschwindigkeit v_{cyc} , wird am Eingang des Fahrermodells³ die Regelabweichung als Differenz aus Soll- und Istgeschwindigkeit gebildet. Daraus generiert der (als Regler modellierte) Fahrer einen Wert für

³Der Fahrer ist als Regler modelliert.

Fahrpedal (zwischen 0..1) und Bremspedal (ebenfalls zwischen 0..1)⁴. Betätigt der Fahrer das Fahrpedal, so wird entsprechend der Betriebsstrategie der Fahrerwunsch auf verbrennungsmotorischen und elektromotorischen Antrieb aufgeteilt. Entsprechend der Dynamik des Antriebs wird das Drehmoment am Getriebeeingang

$$M_{\text{GTR}} = M_{\text{VKM}} + M_{\text{EMA}}. \quad (2.5)$$

bei geschlossener Trennkupplung aus der Summe aus Drehmoment von der Verbrennungskraftmaschine M_{VKM} und elektromotorischem Antrieb M_{EMA} gebildet. Entsprechend der Übersetzung i_{GTR} und den Verlusten $M_{\text{V,GTR}}$ im Getriebe⁵ wird das Radmoment

$$M_{\text{Rad}} = (M_{\text{GTR}} - M_{\text{V,GTR}}) i_{\text{GTR}} \quad (2.6)$$

berechnet. Aus dem Radmoment kann anschließend die Antriebskraft

$$F_{\text{Rad}} = M_{\text{Rad}}/r_{\text{dyn}} \quad (2.7)$$

am Rad bestimmt werden. Diese Kraft wirkt den Fahrwiderständen F_{ges} nach Gl. (2.24) entgegen. Die resultierende Kraft

$$F_{\text{a}} = F_{\text{Rad}} - F_{\text{ges}} \quad (2.8)$$

mündet in eine Beschleunigung

$$a = \frac{F_{\text{a}}}{m_{\text{a}}}. \quad (2.9)$$

Die für die Beschleunigung relevante Masse m_{a} wird aus Fahrzeugmasse und der Massenträgheit des Antriebsstrangs im aktuellen Gang gebildet. Aus der Beschleunigung wird die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit

$$\begin{aligned} v(t) &= \int_0^t a(\tau) \, d\tau + v_0 = \\ &= v(t - \Delta t) + a(t) \Delta t = v(t - \Delta t) + \frac{F_{\text{a}}}{m_{\text{a}}} \Delta t \end{aligned} \quad (2.10)$$

mittels zeitdiskreter Integration berechnet. Δt bezeichnet dabei einen Zeitschritt der Simulation.

Aus der aktuellen Geschwindigkeit wird analog den Gln. (2.3 – 2.4) die Raddrehzahl und anschließend die Getriebeeingangsdrehzahl n_{GTR} bestimmt.

⁴Bei dem Fahrzeugmodell handelt es sich um das Modell eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe. Das Modell des Fahrers muss daher kein Kupplungssignal generieren.

⁵Auch bei der Vorwärtssimulation versteht man unter dem Begriff Getriebe die Einheit aus Achs- und Schaltgetriebe.

Bei der Vorwärtssimulation wird der Fahrpedalwunsch des Fahrers im Antrieb von Komponente zu Komponente als Drehmoment *vorwärts* berechnet. Daraus wird die Fahrzeuggeschwindigkeit errechnet und diese als Drehzahl von Komponente zu Komponente rückwärts berechnet. Im elektrischen Pfad wird Spannung vorwärts und die Stromstärke rückwärts gerechnet. Die Schnittstelle zwischen den einzelnen Komponenten im Antriebsstrang bildet bei (siehe auch Abbildung 2.2)

1. mechanischer Kopplung: Drehmoment (M) und Drehzahl (n) (bzw. Kraft und Geschwindigkeit),
2. elektrischer Kopplung: elektrische Spannung (U) und Stromstärke (I).

Das Produkt der beiden Schnittstellengrößen entspricht stets der Leistung.

Dabei ist die Vorwärtssimulation sehr ähnlich den tatsächlichen Gegebenheiten im Fahrzeug. Der Fahrer bildet aus diversen Randbedingungen, wie Fahrbahn- und Fahrzeugbeschaffenheit, Streckenverlauf, Verkehrszeichen, Sicht, usw. eine Sollgeschwindigkeit, die er mit Fahr- und Bremspedal regelt. Das Fahrzeug reagiert dann auf die Eingaben des Fahrers, indem es beschleunigt oder verzögert. Daher ist diese Methode der Modellierung auch besser für die Entwicklung von Controlleralgorithmen geeignet [95].

Die Rückwärtssimulation wird auf Grund der schnellen Rechenzeit und der garantierten Stabilität beim Algorithmus für das prädiktive Energiemanagement nach Abbildung 5.2 verwendet.

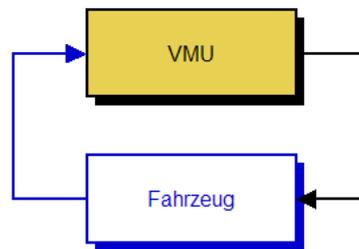
Im Folgenden wird nun der Aufbau der Simulationsumgebung und die Modellierung der einzelnen Komponenten erläutert. Darüber hinaus wird die Kopplung mit der Verkehrssimulation PELOPS behandelt, welche zur Untersuchung von Stau- und Ampelszenarien verwendet wurde [80].

2.1.3 Aufbau des Simulationsmodells

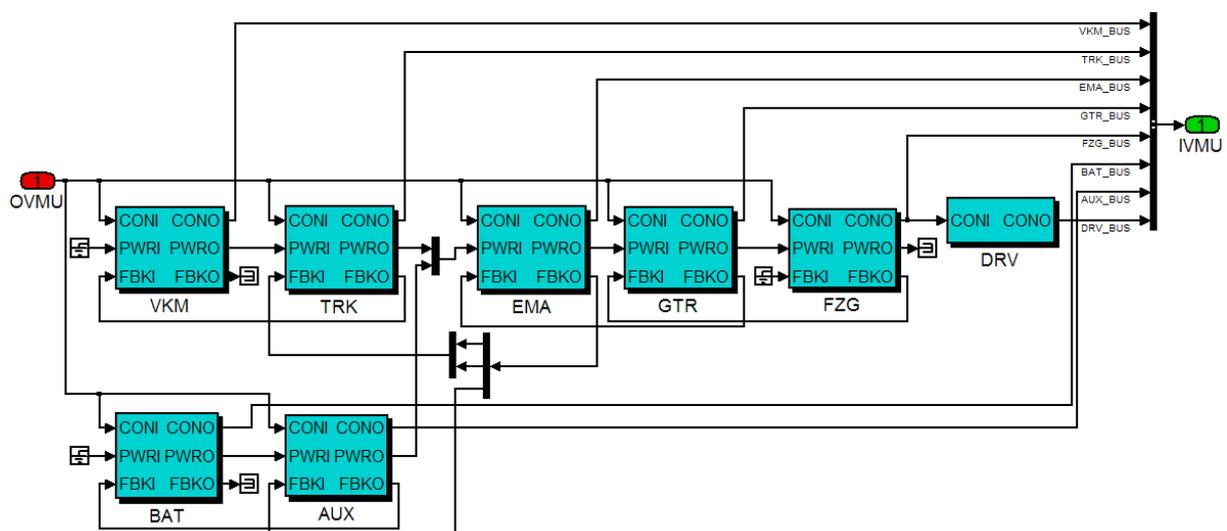
Das Gesamtfahrzeugmodell wird auf oberster Ebene nach **Abbildung 2.3** in einen Block „Controller“ und einen Block „Fahrzeug“ aufgeteilt. Alle Modellteile sind in Matlab/Simulink programmiert. Das Modell kann sowohl für den Mild Hybrid nach Abbildung 1.11 als auch für den Full Hybrid nach Abbildung 1.10 bedatet werden.

Im „Controller“ ist die Fahrzeugsteuerung untergebracht. Er enthält auch das Energiemanagement, wie es in Kapitel 3 für den Mild und den Full Hybrid dargestellt ist. Auch die Algorithmen des adaptiven und des prädiktiven Energiemanagements (AEE und PEE nach Kapitel 4 und 5) sind im „Controller“ implementiert.

Die einzelnen Komponenten des hybriden Antriebsstrangs sind im Block „Fahrzeug“ modelliert. Die einzelnen Modelle werden nun genauer beschrieben.



(a) Aufbau des Simulationsmodells



(b) Subsystem „Fahrzeug“

Abbildung 2.3: Aufbau des Simulationsmodells. Im Controller (VMU, Vehicle Management Unit) ist das Energiemanagement analog den Algorithmen analog den Kapiteln 3 - 5 beschrieben. Es regelt entsprechend dem Fahrerwunsch und der Komponenten des Fahrzeugs [80], zu denen die Verbrennungskraftmaschine (VKM), die Trennkupplung (TRK) zum Abkoppeln des Verbrennungsmotors vom elektromotorischen Antrieb (EMA), das Getriebe (GTR), das Fahrzeug (FZG), der Fahrer (Driver, DRV), die Nebenverbraucher inklusive dem 12V-Bordnetz (Auxiliaries, AUX) und der Traktionsspeicher (Batterie, BAT)), der als Batterie bzw. Doppelschichtkondensator modelliert ist, zählen.

2.1.4 Verbrennungskraftmaschine

Die Verbrennungskraftmaschine (VKM) ist als kennfeldbasiertes Modell beschrieben und besteht aus

- ◇ einer Kennlinie für das Maximaldrehmoment,

- ◇ einem Kennfeld, das den Kraftstoffmassenstrom in Abhängigkeit von Motordrehmoment und -drehzahl abbildet,
- ◇ einem Modell für die Schubabschaltung, um den Kraftstoffmassenstrom bei Fahrpedal gleich Null korrekt abzubilden,
- ◇ einem Leerlaufregler, der den Kraftstoffmassenstrom im Verbrennungsmotorleerlauf abbildet⁶, und
- ◇ der Massenträgheit der VKM, das für die Berechnung der Beschleunigung nach Gl. (2.9) notwendig ist.

Die Bedatung entspricht einem Volkswagen Diesel Motor mit einem Hubraum von 1422cm³, einer Leistung von 55kW und einem maximalen Drehmoment von 195Nm [96]. Das Verbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors zeigt Abbildung 3.2.

Das Modell ist universell einsetzbar, es muss nur an die Bedatung des entsprechenden Verbrennungsmotors angepasst werden. Die Dynamik des induzierten Moments wird über ein PT1-Glied dargestellt.

2.1.5 Trennkupplung

Die Trennkupplung (TRK) zwischen Verbrennungskraftmaschine und elektrischer Maschine dient zum Abkoppeln der Verbrennungskraftmaschine beim Rekuperieren und beim elektrischen Fahren. Durch das Abstellen der Verbrennungskraftmaschine treten in dieser keine Schleppverluste auf. Dadurch kann beim Rekuperieren mehr Energie zurückgewonnen werden. Beim elektrischen Fahren wird gemäß Abschnitt 3.3.5 der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs bei geringen Lasten verbessert.

Zum Fahren mit der Verbrennungskraftmaschine wird die Trennkupplung wieder geschlossen, zum Verbrennungsmotorzustart sei auf [49] verwiesen.

Die Trennkupplung ist als Komponente mit zwei Zuständen (*auf* und *zu*) modelliert. Im Zustand „*zu*“ ist das Drehmoment am Ausgang der Kupplung gleich dem Drehmoment am Eingang der Kupplung

$$M_{\text{TRK}} = M_{\text{VKM}}. \quad (2.11)$$

Ist die Kupplung geöffnet (Zustand „*auf*“), so ist das Drehmoment am Ausgang

$$M_{\text{TRK}} = 0. \quad (2.12)$$

⁶Bei der Funktion „Motorstart/-stopp“ wird der Leerlaufregler in Motorstopp-Phasen deaktiviert.

2.1.6 Elektromotorischer Antrieb

Zum elektromotorischen Antrieb (EMA) zählen die elektrische Maschine und deren Leistungselektronik. In der Simulation werden beide Komponenten über ein Kennfeld beschrieben. Der elektromotorische Antrieb ist elektrisch an das Gleichspannungs-Hochvolt-Bordnetz angeschlossen und mechanisch mit dem Getriebeeingang verbunden (Abbildung 1.5). Beide untersuchten hybriden Antriebsstränge sind mit einer permanenterrregten Synchronmaschine ausgestattet, einmal mit 25kW und einmal mit 10kW Leistung. Die 25kW Maschine kann für den Zustart des Verbrennungsmotors kurzzeitig (für $< 1s$) überlastet werden.

Das Modell des elektromotorischen Antriebs in Abbildung 2.2 bildet sowohl den elektrischen, als auch den mechanischen Teil ab, welche aus den Eingängen *Solldrehmoment* und *Istspannung* die Ausgänge *Istdrehmoment* und *Stromstärke* bestimmt. Das Modell dafür besteht aus

- ◇ einem Kennfeld, welches das maximale Motordrehmoment als Abhängigkeit von Drehzahl und Spannung abbildet,
- ◇ einem Kennfeld für die Verluste in Abhängigkeit von Drehzahl, Drehmoment und Spannung und
- ◇ der Massenträgheit der elektrischen Maschine.

Das Drehmoment am Ausgang des Blocks EMA stellt das Getriebeeingangsdrehmoment

$$M_{GTR} = M_{EMA} + M_{TRK} \quad (2.13)$$

dar und wird aus dem elektromotorischen Drehmoment M_{EMA} und dem Drehmoment am Ausgang der Trennkupplung M_{TRK} gebildet.

2.1.7 Traktionsspeicher

Als Traktionsspeicher ist der Mild Hybrid mit einem Doppelschichtkondensator und der Full Hybrid mit einer NiMH-Batterie ausgestattet. Die Unterschiede dieser beiden Technologien sind u.a. aus dem Ragone-Diagramm in **Abbildung 2.4** ersichtlich.

2.1.7.1 Doppelschichtkondensator

Wie das Ragone Diagramm zeigt, schließen Doppelschichtkondensatoren (Double Layer Capacitor, DLC) die Lücke zwischen herkömmlichen Kondensatoren (z.B. Elektrolytkondensatoren) und Batterien (z.B. NiMH- oder Li-Ion-Batterien).

Doppelschichtkondensatoren eignen sich für den Einsatz als Kurzzeitspeicher für rekuperierte Energie [78, 98, 99]. Weitere Eigenschaften des Doppelschichtkondensators sind

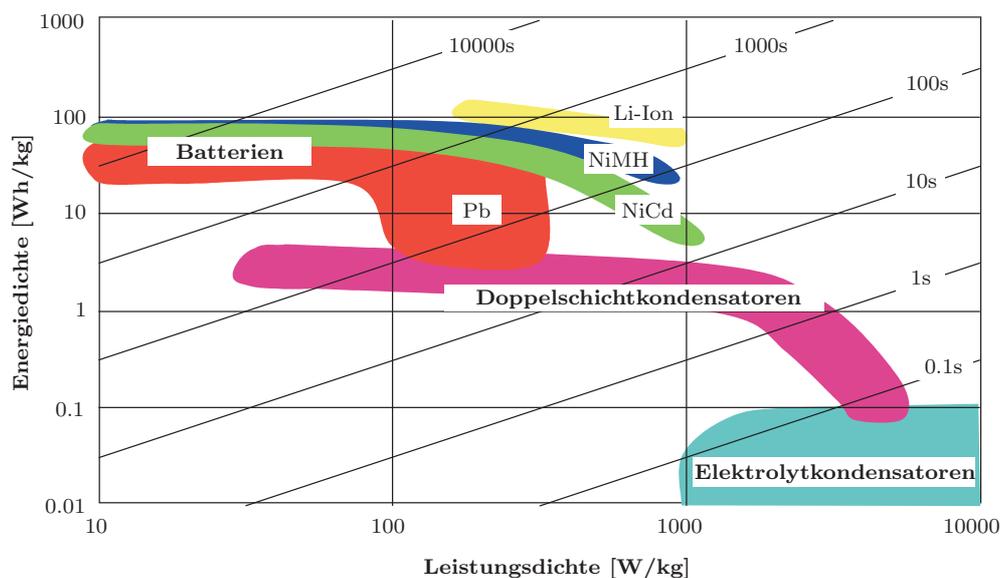


Abbildung 2.4: Ragone-Diagramm [97]. Es zeigt die Unterschiede der diversen Speichertechnologien: Doppelschichtkondensatoren weisen eine größere Leistungsdichte als Batterien auf, sie haben jedoch eine geringe Energiedichte.

eine gute Zyklenfestigkeit [54, 97] und ein geringer Innenwiderstand, weshalb auf eine aufwendige Kühlung des Speichers verzichtet werden kann. Aus diesen Gründen wird der Doppelschichtkondensator beim kostenoptimierten Mild Hybrid laut Abbildung 1.11 eingesetzt.

Aufgrund ihrer geringen Energiedichte (vgl. Abbildung 2.4) und damit verbundenen geringen elektrischen Reichweite können Doppelschichtkondensatoren nur schlecht im Full Hybrid verwendet werden.

Aufbau und Funktionsweise. Ein Doppelschichtkondensator besteht aus zwei gewickelten Elektroden, die durch einen Separator getrennt sind. Die Zelle ist mit einem Elektrolyten, meist Acetonitril oder Propylencarbonat, gefüllt [100]. Als Elektrode wird meist Aktivkohle eingesetzt, da diese wegen ihrer porösen und damit verbunden großen Oberfläche eine große Kapazität ermöglicht.

Wie aus herkömmlichen Kondensatoren bekannt, ist die Kapazität umso größer, je kleiner der Abstand und je größer die Fläche der Elektroden ist [101]. Dies erreicht der Doppelschichtkondensator durch die von Helmholtz entdeckte *elektrochemische Doppelschicht*, welche sich beim Anlegen einer Spannung zwischen Elektrode und Elektrolyt ausbildet. Das Funktionsprinzip des Doppelschichtkondensators ist in **Abbildung 2.5** dargestellt.

Modellierung. Der Doppelschichtkondensator ist nach **Abbildung 2.6** durch seine

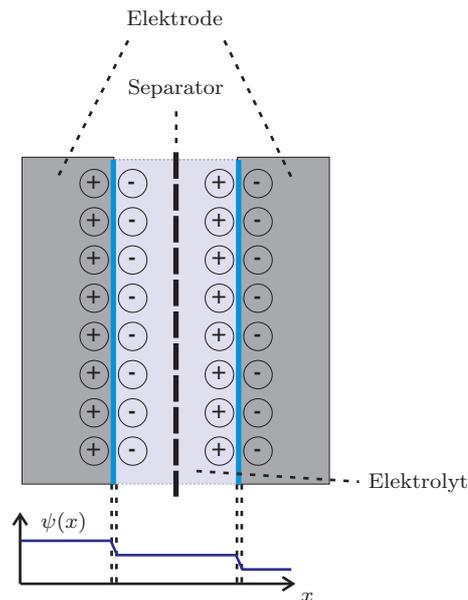


Abbildung 2.5: Prinzip des Doppelschichtkondensators. Zwischen Elektrode und Elektrolyt bildet sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung eine elektrochemische Doppelschicht aus. Dieser Effekt wurde erstmals von Helmholtz beschrieben [97]. Die Doppelschicht stellt einen sehr dünnen Isolator dar, was einen steilen Potenzialverlauf $\psi(x)$ möglich macht. Dadurch sind mit einem Doppelschichtkondensator deutlich größere Kapazitäten erreichbar als mit herkömmlichen Elektrolytkondensatoren (ELKO).

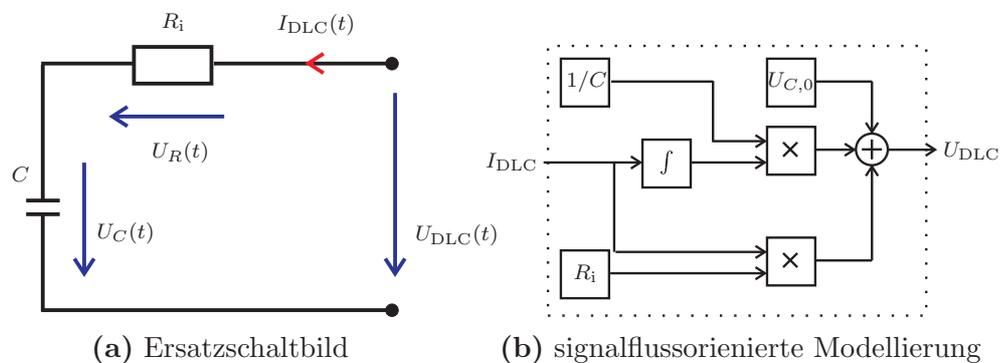


Abbildung 2.6: Modellierung des Doppelschichtkondensators. Die Kapazität C stellt den Energiespeicher dar, die Verluste werden durch den Innenwiderstand R_i abgebildet.

Kapazität C und seinen Innenwiderstand R_i beschrieben. Die Klemmenspannung berechnet sich nach

$$U_{\text{DLC}}(t) = U_{\text{R}}(t) + U_{\text{C}}(t) = R_i I_{\text{DLC}}(t) + \frac{1}{C} \int_0^t I_{\text{DLC}}(\tau) \, d\tau + U_{\text{C},0}. \quad (2.14)$$

Die signalflussorientierte Modellierung dieses Terms zeigt Abbildung 2.6 (b). Die Ein- und Ausgänge entsprechen dem Block BAT in Abbildung 2.2.

Beim Kondensator ist der aktuell gespeicherte Energieinhalt

$$W_{\text{DLC}}(t) = \frac{1}{2} C U_C^2(t). \quad (2.15)$$

direkt proportional zum Quadrat der aktuellen Leerlaufspannung am Kondensator $U_C(t)$. Somit steigt bzw. sinkt die Spannung beim Laden bzw. Entladen des Speichers. Da die Spannung nicht beliebig klein werden kann, ist die Spannung nach unten durch die Stromstärke und den Arbeitsbereich der Leistungselektronik begrenzt. Die obere Spannungsgrenze ist beim Mild Hybrid durch die Berührungsgrenze, welche bei 60V liegt, gegeben. Um einen ausreichenden Abstand zu dieser Spannung gewährleisten zu können, wird der Spannungsbereich auf 21 – 48V festgelegt. Der nutzbare Energieinhalt des Kondensators ist nach Gl. (1.3) 84kJ oder 23Wh.

Der Ladezustand (State of Charge, SOC) des DLC wird auf den Arbeitsbereich 21 – 48V mittels „SOC-Mapping“ normiert. Für $SOC = 0$ gilt:

$$SOC = 0 : Q_{\text{DLC},\min} = C U_{C,\min} = 90\text{F} \cdot 21\text{V} = 1890\text{C} \quad (2.16)$$

und für $SOC = 100\% = 1$ wird ein Ladungsinhalt

$$SOC = 1 : Q_{\text{DLC},\max} = C U_{C,\max} = 90\text{F} \cdot 48\text{V} = 4320\text{C} \quad (2.17)$$

festgelegt. Der Ladezustand des Kondensators SOC kann wegen des linearen Zusammenhangs $Q_{\text{DLC}} = C U_C$ direkt über die Leerlaufspannung U_C ermittelt werden:

$$\begin{aligned} Q_{\text{DLC}} = Q_{\text{DLC},\min} & : SOC = 0 \\ Q_{\text{DLC},\min} \leq Q_{\text{DLC}} \leq Q_{\text{DLC},\max} & : SOC = \frac{Q_{\text{DLC}} - Q_{\text{DLC},\min}}{Q_{\text{DLC},\max} - Q_{\text{DLC},\min}} = \frac{U_C - U_{C,\min}}{U_{C,\max} - U_{C,\min}} \\ Q_{\text{DLC}} = Q_{\text{DLC},\max} & : SOC = 1 \end{aligned} \quad (2.18)$$

wobei $U_{C,\max} = 48\text{V}$ und $U_{C,\min} = 21\text{V}$ ist.

2.1.7.2 NiMH-Batterie

Die NiMH-Batterie ist ein elektrochemischer Speicher, bei dem die Kathode aus Nickelhydroxid und die Anode aus einer Metalllegierung besteht. Das verwendete Batteriemodell und deren Bedatung stammt aus [102].

Der SOC (State Of Charge, Ladezustand) ist bei einer Batterie als das Verhältnis der momentan in der Batterie gespeicherten Ladung Q_{BAT} zur Nennkapazität des Speichers Q_{Nenn} , die nach Abbildung 1.10 $Q_{\text{Nenn}} = 6.5\text{Ah}$ beträgt, definiert:

$$SOC_{\text{BAT}} = \frac{Q_{\text{BAT}}}{Q_{\text{Nenn}}} = \frac{Q_{\text{BAT}}}{6.5\text{Ah}} \quad (2.19)$$

Die Kapazität⁷ ist in der Elektrotechnik ein Maß für die Speicherfähigkeit an elektrischer Ladung und wird in Farad angegeben ($1\text{F} = 1\text{As}/\text{V}$). Bei der Angabe der Kapazität von Batterien ist zu beachten, dass in der Batterietechnik bei deren Angabe eine Spannung unterstellt wird und sie in der Einheit Amperestunden ($1\text{Ah} = 3600\text{As}$) angegeben wird.

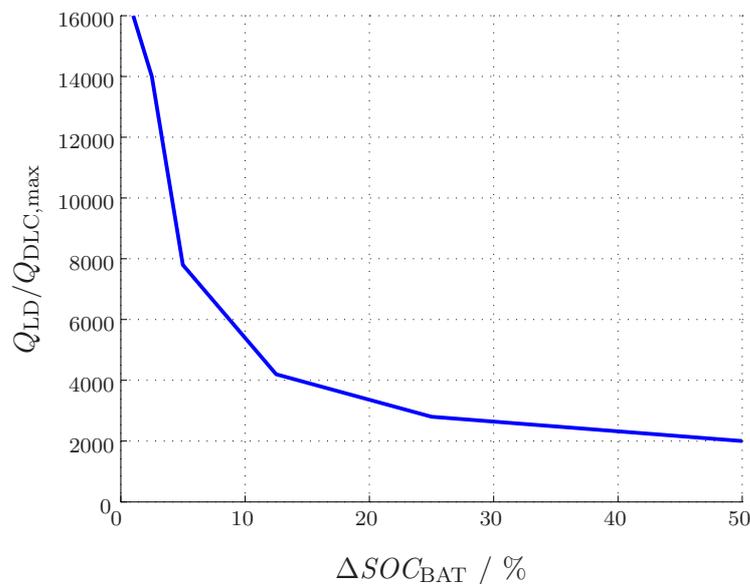


Abbildung 2.7: Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Zyklisierung bei einer NiMH-Batterie. Dargestellt ist die Abhängigkeit des Ladungsdurchsatzes bis zum Lebensdauerende Q_{LD} bezogen auf die Nennkapazität Q_{Nenn} nach Gl. (2.19) einer Zelle in Abhängigkeit von der Entladungstiefe ΔSOC_{BAT} . Da die Lebensdauer bei gleichem Ladungsdurchsatz mit größerer Zyklentiefe sinkt, empfehlen Batteriehersteller, den Speicher nur mit 5 – 10% von ΔSOC_{BAT} zu betreiben [76].

NiMH-Batterien weisen eine kalendarische und eine nutzungsbedingte Alterung auf. Mit zunehmender Alterung sinkt die Kapazität und steigt der Innenwiderstand des Speichers. Die kalendarische Alterung ist hauptsächlich von der Speichertemperatur im Betrieb und bei der Lagerung abhängig, die nutzungsbedingte Alterung vom Energiedurchsatz und von der Zyklentiefe, **Abbildung 2.7**. Bei der Dimensionierung muss berücksichtigt werden, dass die nutzbare Zyklentiefe nur etwa 5 – 10% beträgt. Beim Bora Full Hybrid ergibt sich dadurch nach Gl. (1.1) eine elektrische Reichweite von 1.3km.

Analog zum Doppelschichtkondensator wird auch beim Modell der NiMH-Batterie ein „SOC-Mapping“ durchgeführt, womit der Ladezustand auf den nutzbaren Bereich begrenzt wird. Somit gilt

$$\Delta SOC = 0.1 \Delta SOC_{\text{BAT}} \quad (2.20)$$

⁷aus *lat.* *capacitas* „Fassungsvermögen“ [29]

2.1.8 Elektrische Nebenaggregate

Zu den elektrischen Nebenaggregaten (Auxiliaries, AUX) werden alle Komponenten gezählt, die neben der elektrischen Maschine und dem Traktionsspeicher an das Hochvoltbordnetz angeschlossen sind. Beim Bora Mild Hybrid ist dies der DC/DC-Wandler, der das 12V-Bordnetz versorgt (Abbildung 1.11).

Der Bora Full Hybrid hat zusätzlich zum DC/DC-Wandler einen elektrischen Klimakompressor als elektrischen Verbraucher im Hochvoltbordnetz integriert (Abbildung 1.10).

Im Block *elektrische Nebenaggregate (AUX)* nach Abbildung 2.8 wird zum Eingangsstrom des elektromotorischen Antriebs I_{EMA} der Strom, der zur Versorgung der elektrischen Verbraucher notwendig ist dazuaddiert

$$I_{BAT} = I_{EMA} + I_{AUX} = I_{EMA} + I_{DC/DC} + I_{Klima} \quad (2.21)$$

$$U_{EMA} = U_{AUX} = U_{BAT}. \quad (2.22)$$

Die Eingangsspannung vom Block *Traktionsspeicher (Batterie, BAT)* ändert sich nicht, da die einzelnen Komponenten im Hochvoltbordnetz parallel geschaltet sind (der Spannungsabfall in den Leitungen wird nicht berücksichtigt). Die aufgenommene Leistung der elektrischen Nebenaggregate beträgt

$$P_{AUX} = I_{AUX} U_{AUX} = I_{AUX} U_{BAT}. \quad (2.23)$$

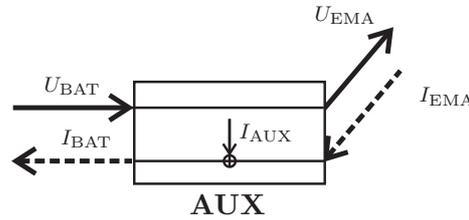


Abbildung 2.8: Modellierung der Nebenaggregate (AUX). Die elektrischen Nebenaggregate (AUX, vgl. Abbildung 2.2) werden über einen zusätzlichen Strom I_{AUX} berücksichtigt.

Die Reibung der mechanischen Nebenaggregate (z.B. Wasserpumpe) ist im Kennfeld des Verbrennungsmotors mit enthalten.

2.1.9 Fahrzeug

Im Block Fahrzeug (FZG) werden die Fahrwiderstände (Roll-, Luft- und Steigungswiderstand) und die Bremskraft der mechanischen Bremse F_{br} abgebildet. Die Summe aus Fahrwiderstände und Bremskraft ergibt

$$F_{ges} = m g \mu \cos \alpha + c_w A \frac{\rho}{2} v^2 + m g \sin \alpha + F_{br}. \quad (2.24)$$

Dabei bezeichnet m die Fahrzeugmasse, g die Erdbeschleunigung, μ den Rollwiderstandsbeiwert, α den Steigungswinkel, c_w den Luftwiderstandsbeiwert, A die Stirnfläche des Fahrzeugs, ρ die Luftdichte und v die Fahrzeuggeschwindigkeit⁸. Die Bremskraft wird

- ◇ bei einem bilanzierbaren Bremssystem⁹ in Abhängigkeit von Bremspedal und Drehmoment des Antriebsstrangs (inkl. Rekuperation) und
- ◇ bei einem konventionellen Bremssystem nur in Abhängigkeit vom Bremspedal

eingestellt.

Aus F_{ges} nach Gl. (2.24) und der Antriebskraft am Rad F_{Rad} wird im Block FZG nach Gln. (2.8 – 2.10) die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet.

2.1.10 Fahrer (inkl. Fahrzyklus)

Als Fahrer dient ein PI-Regler, der aus der Regelabweichung (Differenz aus Geschwindigkeitsvorgabe vom Zyklus v_{soll} und Fahrzeugistgeschwindigkeit v) einen Wert für Fahr- und Bremspedal jeweils zwischen 0 und 1 bestimmt. Bei Zyklen mit großen Beschleunigungen, kann es vorkommen, dass das Fahrzeug wegen mangelnder Leistung der Zyklusvorgabe nicht folgen kann. Eine damit verbundene Regelabweichung kann zu einem Überlaufen des Integralanteils führen. Ist der Fahrpedalwert gleich eins, so ist der Integralanteil zurück zu setzen.

Der Block Fahrer beinhaltet neben dem eigentlichen Fahrermodell auch die Zyklusvorgabe. Der Block Fahrer kann durch den Block PELOPS (siehe nächsten Abschnitt 2.1.11) ersetzt werden. Damit wird die Fahrzeugsimulation in eine Verkehrssimulation integriert.

2.1.11 Kopplung von Fahrzeug- und Verkehrssimulation

Das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS¹⁰ erlaubt es, Fahrzeug- und Verkehrssimulation miteinander zu koppeln. PELOPS ersetzt im Fahrzeugmodell den, im Abschnitt 2.1.10 beschriebenen Fahrer inklusive Zyklus. Wie **Abbildung 2.9** zeigt, läuft PELOPS auf einem eigenen Rechner und kommuniziert über eine Netzwerkverbindung (als Protokoll dient TCP/IP) mit dem Fahrzeugmodell unter Matlab/Simulink.

Als Eingang empfängt PELOPS die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit v . PELOPS bindet das Fahrzeug in eine Verkehrssimulation mit ein. Je nach Streckentopologie, erlaubter

⁸Windgeschwindigkeit wird gleich Null angenommen.

⁹Im Gegensatz zu konventionellen Bremssystemen, bei denen die Bremskraft am Rad vom Winkel des Bremspedals abhängt, kann bei einer bilanzierbaren Bremse die Bremskraft zusätzlich in Abhängigkeit der Rekuperation reguliert werden.

¹⁰www.pelops.de

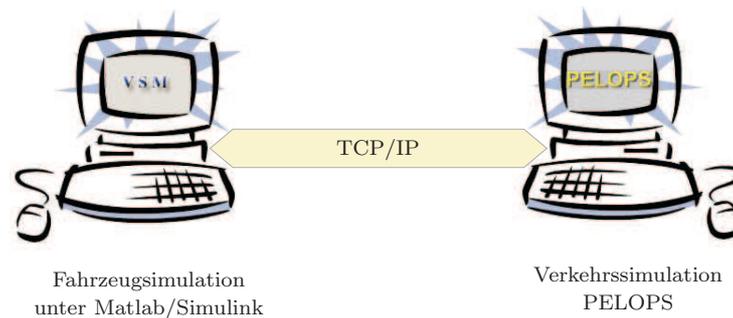


Abbildung 2.9: Kopplung von Fahrzeug- und Verkehrssimulation.

Geschwindigkeit, Verkehrsaufkommen usw. gibt PELOPS Fahr- und Bremspedal an das Fahrzeugmodell zurück.

Neben den in [80, 75] dargestellten Ergebnissen¹¹, wurde mit PELOPS der Stau-Zyklus (Abschnitt 2.2.5) aufgezeichnet.

2.2 Auswahl der Fahrzyklen

Das Potenzial des adaptiven und des prädiktiven elektrischen Energiemanagements (AEE und PEE in den Kapiteln 4 und 5) wird mittels Simulation von Fahrzyklen nachgewiesen werden. Dazu wird in diesem Abschnitt die Auswahl an Fahrzyklen erläutert. Dabei wird Wert auf ein breites Spektrum an Zyklen gelegt. Neben dem bekannten europäischen Normzyklus NEFZ sollen vor allem kundennahe Zyklen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Die Zyklen sollen einen Mix aus unterschiedlichen Randbedingungen widerspiegeln. Ausgewählt wurden daher

1. der neue europäische Fahrzyklus (NEFZ), welcher in Europa zur Herstellerangabe des Kraftstoffverbrauchs dient,
2. ein modifizierter NEFZ (mNEFZ), der mehr Dynamik als der Normzyklus aufweist,
3. der Braunschweig-Zyklus (BS-Zyklus), welcher eine typische Stadtfahrt darstellt,
4. der Hybrid-Zyklus, welcher im EU-Projekt „HYZEM“ entwickelt wurde und einen Mix aus Stadt, Überland und Autobahnfahrt repräsentiert,
5. ein Stau-Zyklus und
6. der Harz-Zyklus, welcher als einziger ein Höhenprofil beinhaltet.

¹¹Die Arbeiten zeigen das Potenzial von Hybridfahrzeugen in Verbindung mit automatischen Geschwindigkeitsregelsystemen bei Ampelszenarien.

Die Zyklen werden nun einzeln beschrieben und im Abschnitt 2.2.7 anhand ausgewählter Kenndaten miteinander verglichen.

2.2.1 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

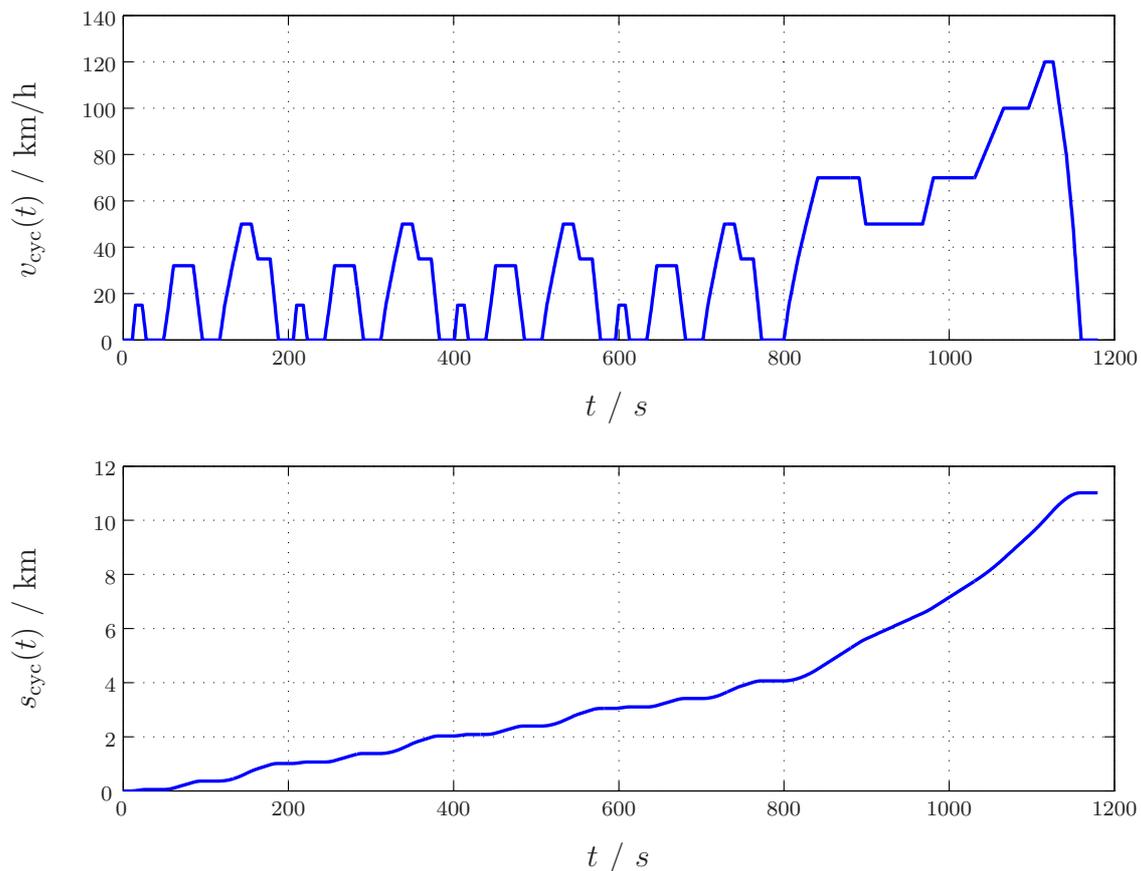


Abbildung 2.10: Zeitverlauf NEFZ. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} und der zurückgelegte Weg s_{cyc} . Der NEFZ-Zyklus ist zusammengesetzt aus:
vier gleichen Stadtanteilen (Dauer: $4 \times 195\text{s} = 780\text{s}$, Distanz: $4 \times 1\text{km} = 4\text{km}$),
dem Überlandanteil EUDC (Dauer: 400s, Distanz: 7km).

Als weit verbreiteter Standardzyklus gilt im europäischen Raum der so genannte „Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ)“. Er ist die Basis für die gesetzlich vorgeschriebene Herstellerangabe für Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen von Fahrzeugen. Darüber hinaus dient er für vergleichende Untersuchungen der Kraftstoffeinsparungspotenziale neuer Technologien in der Forschung und Entwicklung.

Als synthetisch entworfenes Fahrprofil gibt er einen geometrischen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit über die Zeit vor [103]. **Abbildung 2.10** zeigt den Geschwindigkeitsverlauf, der aus vier gleichen Stadtzyklen im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 50km/h

und einem daran anschließenden Überlandzyklus mit einer maximalen Geschwindigkeit von 120km/h besteht. Zwischen den Fahrzeiten liegen Standphasen von etwa 20s, sodass der Zyklus in Anbetracht der relativ geringen Geschwindigkeit als äußerst undynamisch gilt.

Sinnvoll und notwendig ist ein solcher Standardzyklus aufgrund der damit gegebenen Vergleichbarkeit von Fahrzeugen und Technologien. Risiken liegen allerdings darin, dass Fahrzeughersteller damit die Möglichkeit besitzen, ihre Produkte gezielt auf den Einsatz unter diesen Zyklusbedingungen zu trimmen oder darauf zu applizieren. Da solch ein Standardprofil aber nur in geringem Maße mit dem Praxiseinsatz eines Fahrzeugs beim Kunden vergleichbar ist, kommt es je nach Fahrzeug zu einer mehr oder weniger großen Schere zwischen Praxis- und Zyklusverbrauch. Daher werden die hier vorgestellten Energiemanagement-Strategien auch unter praxisnahen Zyklen untersucht.

2.2.2 modifizierter NEFZ (mNEFZ)

Wie bereits erwähnt, gilt der europäischen Normzyklus als sehr undynamisch. Dies führt bei viele Kunden zu einem höheren Kraftstoffverbrauch, als die Herstellerangabe verspricht.

Abbildung 2.11 stellt eine modifizierte Version des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) dar, der im Weiteren als mNEFZ bezeichnet wird. Das Geschwindigkeitsprofil des mNEFZ $v_{\text{cyc,mNEFZ}}(t)$ wird vom NEFZ abgeleitet. Dazu wird das Geschwindigkeitsprofil des NEFZ $v_{\text{cyc,NEFZ}}(t)$ zuerst skaliert¹²

$$v_{\text{cyc,NEFZ}}(t) \longrightarrow v_{\text{cyc,NEFZ}}(2t) \quad (2.25)$$

und zweimal hintereinander gereiht¹³

$$v_{\text{cyc,mNEFZ}}(t) = v_{\text{cyc,NEFZ}}(2t) + v_{\text{cyc,NEFZ}}\left(2\left(t - \frac{1180\text{s}}{2}\right)\right) \quad (2.26)$$

$$= v_{\text{cyc,NEFZ}}(2t) + v_{\text{cyc,NEFZ}}(2t - 590\text{s}). \quad (2.27)$$

Die mittlere Geschwindigkeit und die Zeitdauer (1180s) sind bei beiden Zyklen identisch. Wie Abschnitt 2.2.7 zeigt, weist der mNEFZ jedoch eine größere Dynamik als der NEFZ auf.

2.2.3 Braunschweig-Zyklus (BS-Zyklus)

Dieser Zyklus wurde im realen Straßenverkehr aufgezeichnet. Er soll eine Stadtfahrt bei mittlerer Verkehrsdichte wiedergeben.

Der Zeitverlauf ist in **Abbildung 2.12** dargestellt. Der Zyklus dauert 2061s und dabei werden 15.4km zurückgelegt. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 57.9km/h.

¹²Substituiert man $t \longrightarrow 2t$, so entspricht dies einer *Halbierung* der Zeit, d.h. der gleiche Zyklus wird in der halben Zeit durchfahren.

¹³ $t \longrightarrow t - \frac{1180\text{s}}{2}$: entspricht einer Verschiebung um $\frac{1180\text{s}}{2}$ nach rechts.

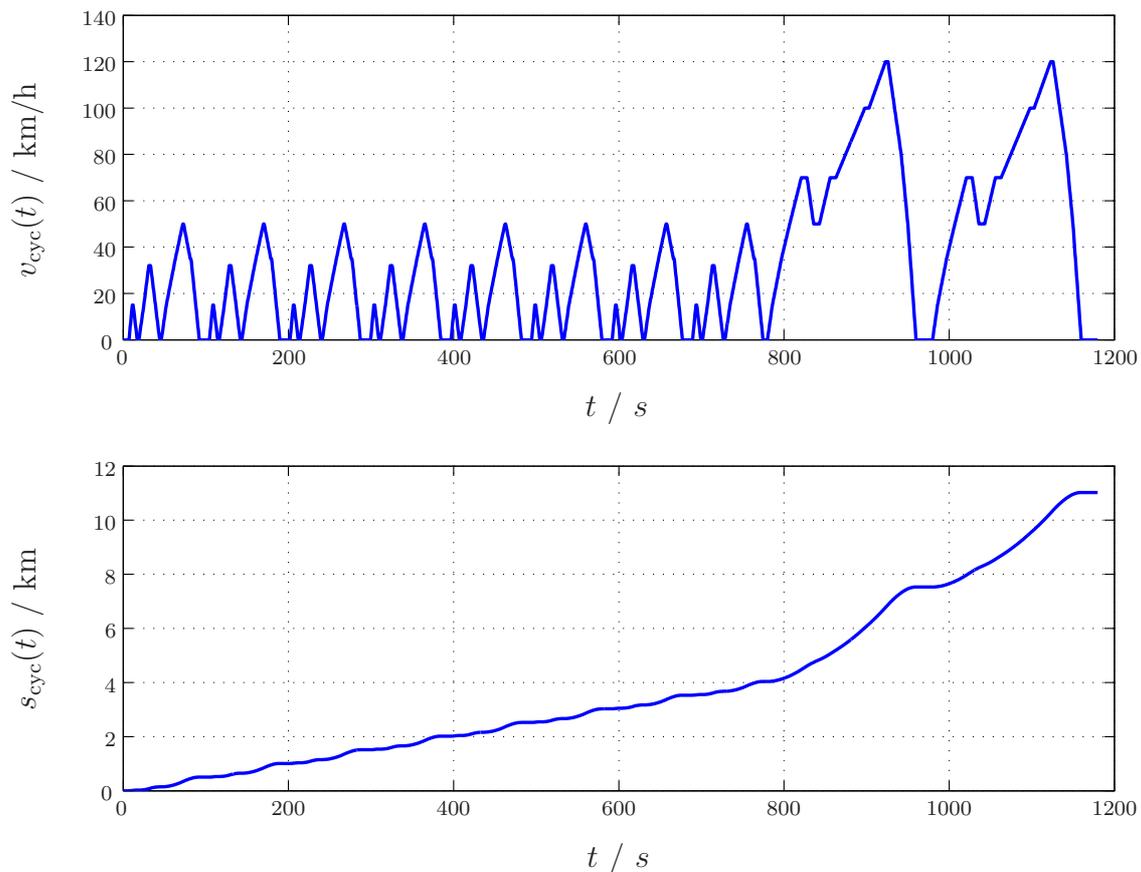


Abbildung 2.11: Zeitverlauf mNEFZ. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} und der zurückgelegte Weg s_{cyc} . Die Geschwindigkeit des mNEFZ wird nach Gl. (2.27) aus dem Profil des NEFZ berechnet. Wie der Zyklenvergleich laut Tabelle 2.2 zeigt, weist der modifizierter NEFZ (mNEFZ) die doppelte Dynamik des NEFZ auf (vgl. *RPA* der beiden Zyklen).

2.2.4 Hybrid-Zyklus

Der Hybrid-Zyklus stammt vom französischen Forschungsinstitut *Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)* und wurde im Rahmen des EUCAR-Projekt HYZEM (Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility) entwickelt [104]. In dem Projekt wurden drei Zyklen *HYZEM-urban*, *HYZEM-rural* und *HYZEM-highway* definiert. Reiht man diese drei Teile aneinander so erhält man einen Zyklus der einen Mix aus Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt wiedergibt. Der Hybrid-Zyklus ist insgesamt 60.9km lang und dauert 3204s.

Im Gegensatz zum NEFZ und zum mNEFZ besitzt der Hybrid-Zyklus nur einen geringen Stadtanteil. (NEFZ und mNEFZ: $\frac{4\text{km}}{11\text{km}} 100\% = 36\%$; HYZEM: $\frac{3.5\text{km}}{60.9\text{km}} 100\% = 5.7\%$).

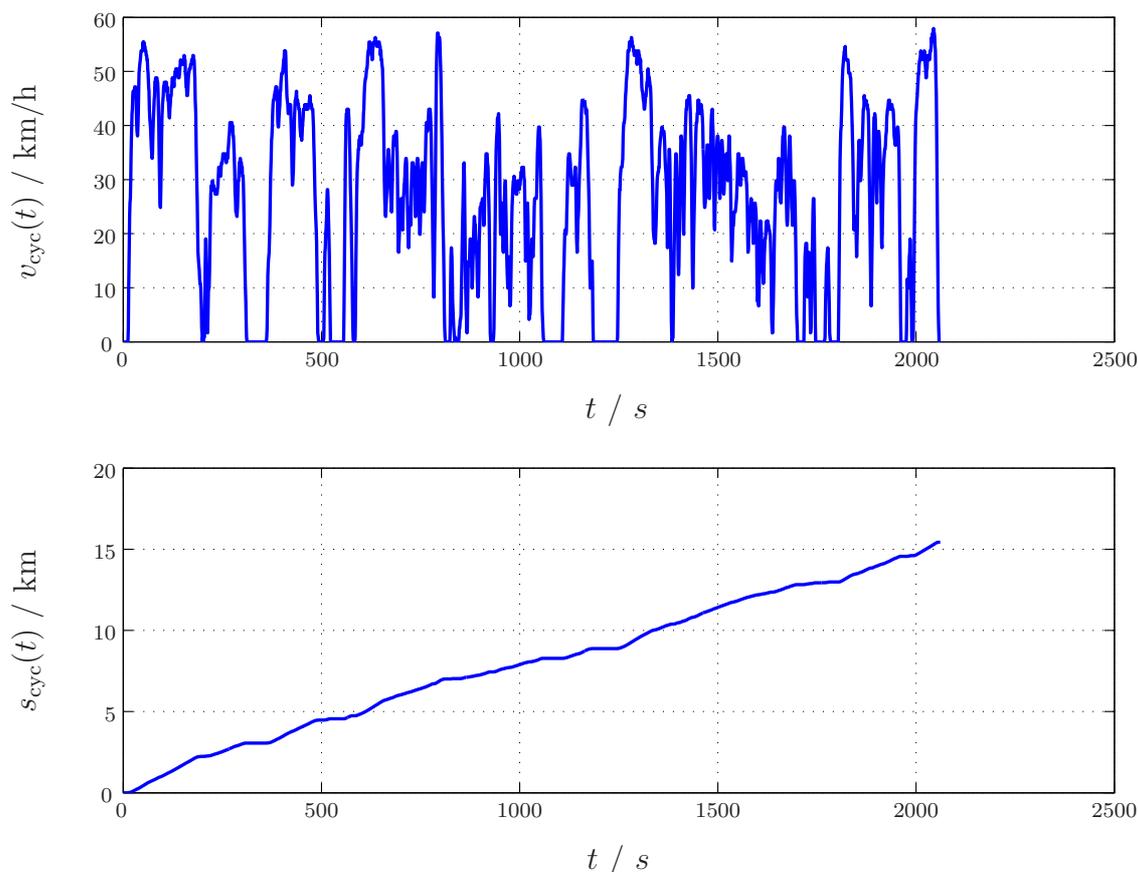


Abbildung 2.12: Zeitverlauf BS-Zyklus. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} und der zurückgelegte Weg s_{cyc} .

2.2.5 Stau-Zyklus

Der Stau-Zyklus (**Abbildung 2.14**) wurde im Rahmen des BMBF-Projekts 19 U 1030 C mittels Kopplung von PELOPS und Matlab/Simulink aufgezeichnet [80]. Der Zyklus stellt eine typische Situation auf einer städtischen Autobahn dar. Ein Fahrzeug fährt mit etwa 80km/h und läuft auf ein Stauende auf. Der Zyklus dauert 806s und ist 3.8km lang, etwa die Hälfte des Weges wird bereits in den ersten 100s zurückgelegt.

Wie Untersuchungen mit PELOPS gezeigt haben, ist in einem Stau-Szenario der Handlungsspielraum des Fahrers durch den Verkehr sehr stark eingeschränkt. Unterschiedliche Fahrertypen (verbrauchsorientierter Fahrer, sportlicher Fahrer) zeigten ab Beginn des Staus einen ähnlichen Geschwindigkeitsverlauf. Kann man so ein Stauszenario durch ein vorausschauendes Energiemanagement rechtzeitig erkennen, so ist eine Streckenvorausschau mit geringen Unsicherheiten möglich (siehe Kapitel 5 und [80]).

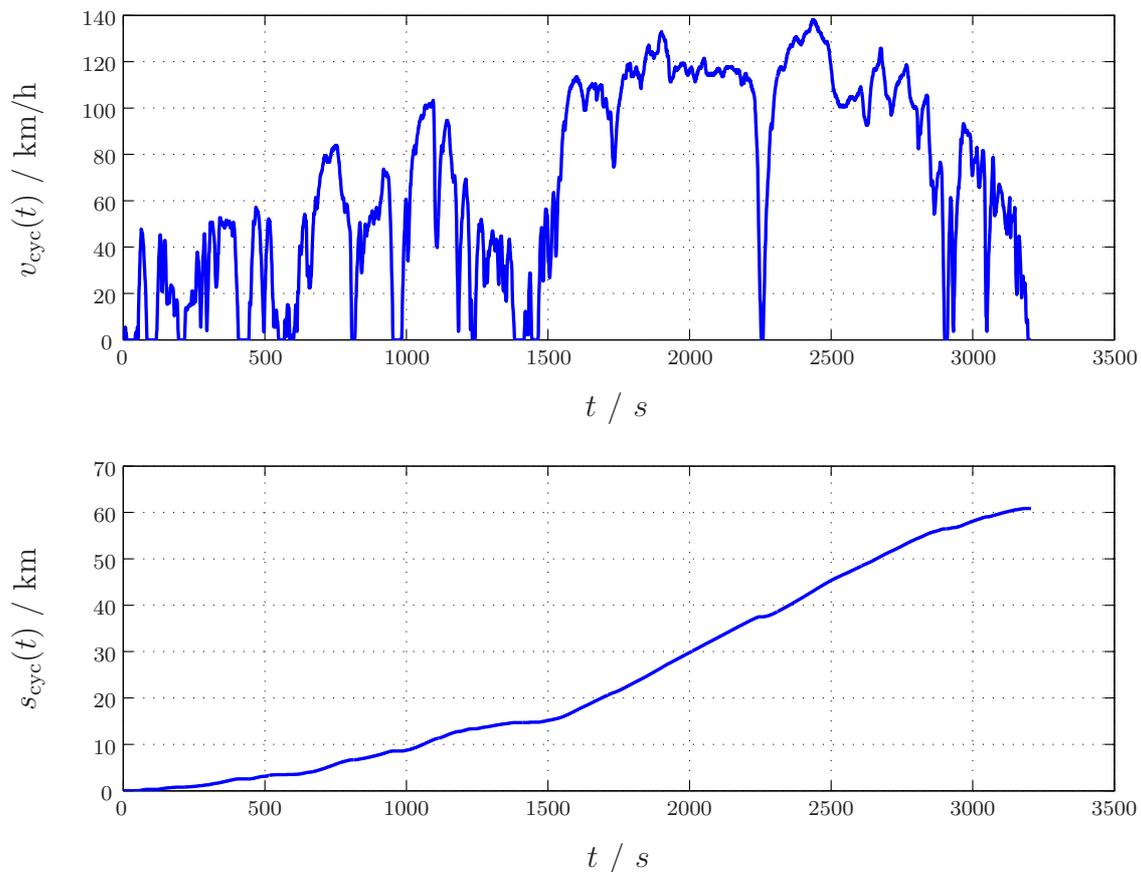


Abbildung 2.13: Zeitverlauf Hybrid-Zyklus. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} und der zurückgelegte Weg s_{cyc} . Der Hybrid-Zyklus ist zusammengesetzt aus: einem Stadtanteil HYZEM-urban (Dauer: 559s, Distanz: 3.5km), einem Überlandanteil HYZEM-rural (Dauer: 842s, Distanz: 11.2km) und einem Autobahnanteil HYZEM-highway (1803s, Distanz: 46.2km).

2.2.6 Harz-Zyklus

Der Zyklus wurde – wie auch der Braunschweig-Zyklus – im realen Straßenverkehr aufgezeichnet. Als Messfahrzeug diente der Volkswagen Bora Hybrid [8, 39], dessen Antriebsstrang in Abbildung 1.10 dargestellt ist. Die Aufzeichnung der Fahrt startete in Bad Harzburg auf ca. 300m über dem Meeresspiegel und führte 76km durch das deutsche Mittelgebirge, den Harz. Ende der Fahrt war Torfhaus auf etwa 800m über dem Meeresspiegel.

2.2.7 Vergleich der Fahrzyklen

In Kapitel 4 werden Simulationsergebnisse dargestellt, bei denen das Kraftstoffeinparpotenzial durch Rekuperation (Bremsenergie rückgewinnung) eine wesentliche Rolle spielt. In [8] wurde als Maß dafür die relative Beschleunigung in Relation zur Durchschnittsge-

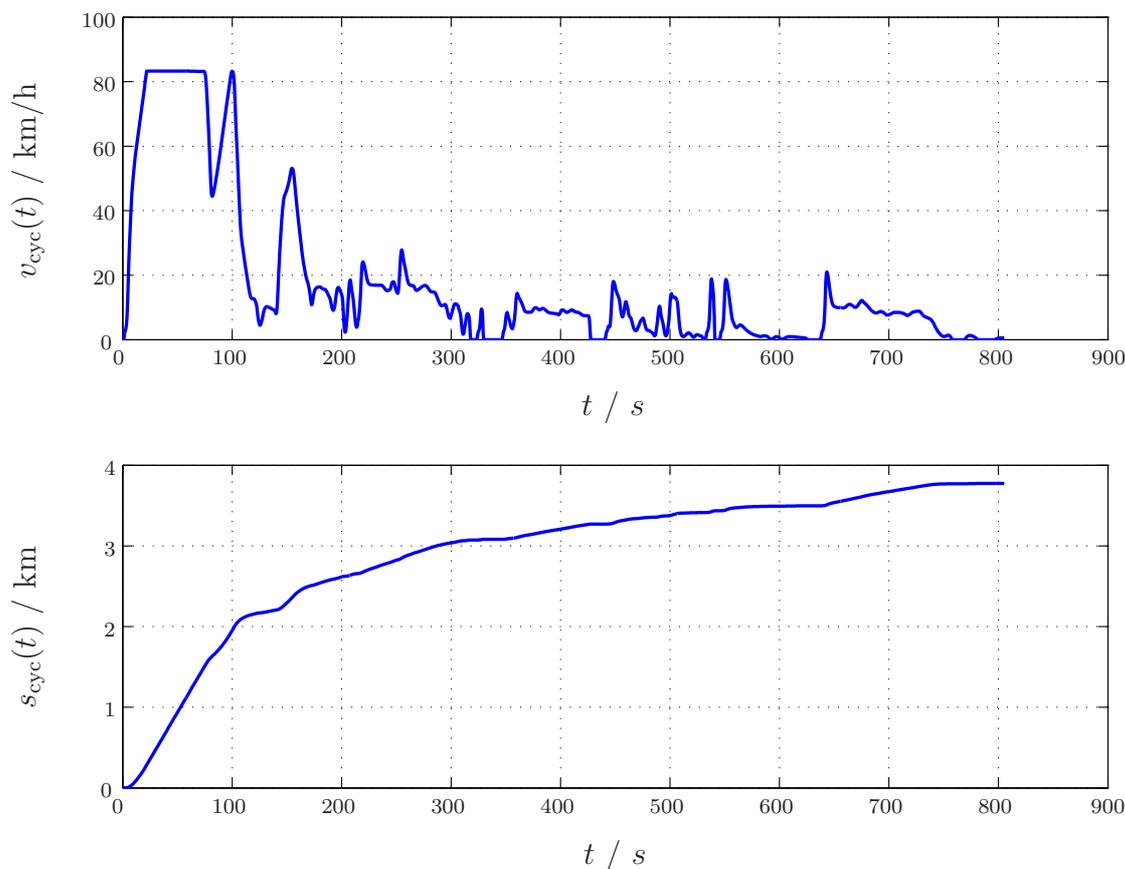


Abbildung 2.14: Zeitverlauf Stau-Zyklus. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} und der zurückgelegte Weg s_{cyc} .

geschwindigkeit \bar{v} identifiziert.

Die relative positive Beschleunigung (relative positive acceleration) RPA ist definiert [105]¹⁴

$$RPA = \frac{\int_0^L a^+ ds}{L} = \frac{\int_0^T va^+ dt}{L}, \quad (2.28)$$

wobei die Beschleunigung a^+ auf positive Werte beschränkt wird. Die Einheit der RPA ist m/s^2 . Die RPA gibt die *Dynamik* eines Zyklus wieder¹⁵ und wird in [105] als wichtiger Parameter für die Emissionen in einem Zyklus identifiziert.

Für die Rekuperation ist die *Verzögerung* und somit die relative *negative* Beschleuni-

¹⁴Bei der relativen positiven Beschleunigung wird der – auf die die Fahrstrecke L bezogene – Mittelwert gebildet.

¹⁵Unterschiedliche Dynamik zeigen die beiden Zyklen NEFZ und mNEFZ in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2.

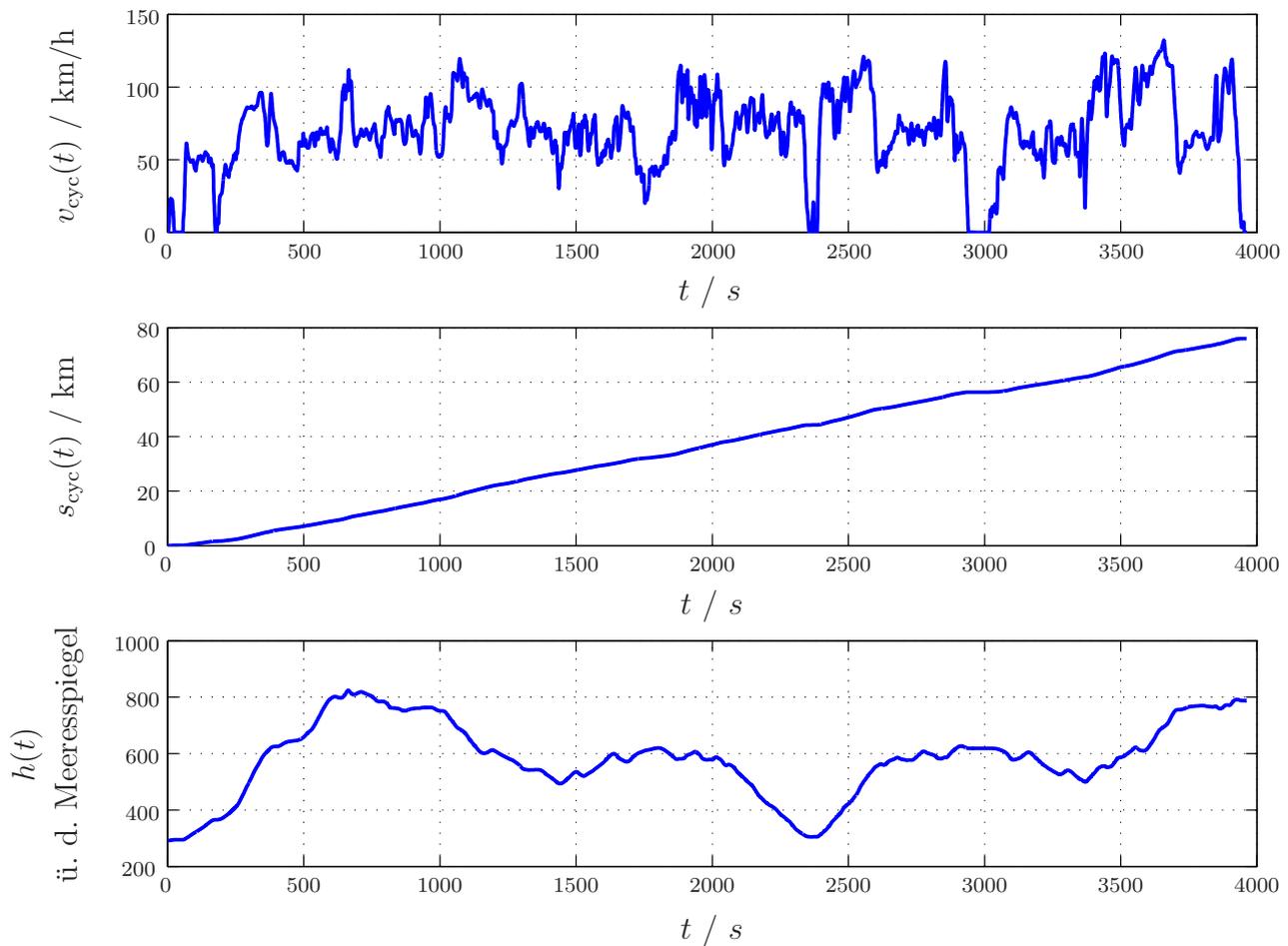


Abbildung 2.15: Zeitverlauf Harz-Zyklus. Dargestellt sind die Geschwindigkeit v_{cyc} , der zurückgelegte Weg s_{cyc} und die Höhe über dem Meeresspiegel $h(t)$.

gung (RNA, relative negative acceleration) relevant, welche sich aus

$$RNA = \frac{\int_0^L a^- ds}{L} = \frac{\int_0^T va^- dt}{L} \quad (2.29)$$

berechnet.

Zyklus	NEFZ	mNEFZ	BS-Zyklus	Hybrid-Zyklus	Stau-Zyklus	Harz-Zyklus
$RPA/m/s^2$	0.11	0.22	0.22	0.14	0.20	0.21
$RNA/m/s^2$	-0.11	-0.22	-0.22	-0.15	-0.20	-0.22

Tabelle 2.1: Relative positive und relative negative Beschleunigung weichen bei den betrachteten Fahrzyklen nur geringfügig voneinander ab.

Tabelle 2.1 vergleicht RPA und RNA der vorgestellten Fahrzyklen. Man erkennt, dass die Zahlenwerte nur unwesentlich voneinander abweichen. In der vorliegenden Arbeit wird daher nur mehr die – in [105] definierte – relative positive Beschleunigung (RPA) für die Bewertung der Rekuperation herangezogen.

In **Tabelle 2.2** wird nun die relative positive Beschleunigung und die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} ins Verhältnis gesetzt. Nach [8] erweisen sich der mNEFZ, der BS-Zyklus und der Stau-Zyklus als Zyklen mit großem Rekuperationspotenzial. Beim Harz-Zyklus hat auch der Höhenunterschied einen Einfluss auf die rekuperierbare Energie.

Zyklus	NEFZ	mNEFZ	BS-Zyklus	Hybrid-Zyklus	Stau-Zyklus	Harz-Zyklus
$\bar{v} / \text{km/h}$	33.6	33.6	27.0	68.4	16.9	69.0
$RPA / \text{m/s}^2$	0.11	0.22	0.22	0.14	0.20	0.21
Rekuperation: $\frac{RPA}{\bar{v}} / 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$	3.3	6.6	8.1	2.0	11.8	3

Tabelle 2.2: Vergleich der Zyklen bezüglich Rekuperationspotenzial. Bei mNEFZ, BS-Zyklus und Stau-Zyklus ist das Verhältnis RPA zu \bar{v} am größten. Sie haben daher nach [8] ein großes Rekuperationspotenzial.

Kapitel 3

Energiemanagement bei parallelen Hybriden

Inhalt

3.1 Betriebsmodi im Hybridfahrzeug	48
3.1.1 Rekuperieren	48
3.1.2 Elektrisch Fahren (inkl. Motorstart/-stopp)	49
3.1.3 Boosten	49
3.1.4 Verbrennungsmotorisch Fahren und Verschieben des Lastpunktes	50
3.2 Analytische Beschreibung der Komponenten	51
3.2.1 Verbrennungskraftmaschine	51
3.2.2 Elektromotorischer Antrieb	55
3.2.3 Traktionsspeicher	59
3.3 Verbrauch der Betriebsmodi	62
3.3.1 Verbrauch beim verbrennungsmotorischen Fahren	63
3.3.2 Verbrauch beim Lastpunkt Anheben	63
3.3.3 Verbrauch bei Lastpunkt Absenken und Boosten	64
3.3.4 Verbrauch beim elektrischen Fahren	65
3.3.5 Elektrisch Fahren mit Energie aus Lastpunktanhebung	65
3.4 Konventionelles Energiemanagement	69
3.4.1 Konventionelles Energiemanagement bei Full Hybrids	70
3.4.2 Konventionelles Energiemanagement bei Mild Hybrids	75

Zu Beginn des Kapitels werden im Abschnitt 3.1 die Betriebsmodi im Hybridfahrzeug (Abschnitt 3.1) erläutert, bevor im Abschnitt 3.2 die wichtigsten Komponenten des hybriden Antriebsstrangs durch ihre Eingangs-Ausgangs-Beziehungen beschrieben werden. Auf dieser Art der Komponentenbeschreibung baut die analytische Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs der einzelnen Betriebsmodi im Abschnitt 3.3 auf. Abschnitt 3.3.5 bestimmt die E-Fahren-Grenze durch Vergleich des Kraftstoffverbrauchs bei elektrischer und bei verbrennungsmotorischer Fahrt.

Zum Abschluss wird im Abschnitt 3.4 ein Energiemanagement für Full und Mild Hybrids dargestellt, welches die Erkenntnisse der vorangegangenen Abschnitte nutzt. Die Ergebnisse des Kapitels werden in [74] genutzt um die Auslegung des elektrischen Antriebs und die Betriebsstrategie des Hybridfahrzeugs aufeinander abzustimmen.

3.1 Betriebsmodi im Hybridfahrzeug

Die Betriebsmodi im einem Hybridfahrzeug unterteilen sich in

- ◇ Rekuperieren,
- ◇ elektrisch Fahren (inkl. Motorstart/-stopp),
- ◇ Boosten und
- ◇ verbrennungsmotorisch Fahren mit
 - Lastpunkt Anheben zum Laden des Traktionsspeichers bzw.
 - Lastpunkt Absenken zum Entladen des Traktionsspeichers.

Im Folgenden werden diese Hybridfunktionen genauer beschrieben.

3.1.1 Rekuperieren

Ein konventionelles Fahrzeug bremst mittels Radbremse und Bremswirkung der Verbrennungskraftmaschine. Ist die Verbrennungskraftmaschine dabei in der Schubabschaltung, so verbraucht sie keinen Kraftstoff und die Nebenaggregate (Klimakompressor, Generator, etc.) werden aus der im Fahrzeug gespeicherten Bewegungsenergie versorgt. Die zusätzlich dabei anfallende Energie wird jedoch in Wärme umgewandelt und geht somit verloren.

Beim Verzögern eines Hybridfahrzeugs sorgt die Rekuperationsfunktion dafür, dass ein Großteil der kinetischen und potentiellen Energie über die elektrische Maschine in elektrische Energie gewandelt wird. Die rekuperierte elektrische Energie

- ◇ versorgt die elektrischen Nebenaggregate (Abschnitt 2.1.8) und
- ◇ lädt den elektrischen Energiespeicher.

Um bei der Rekuperation die Verluste zu minimieren, wird dabei meist die Verbrennungskraftmaschine abgekoppelt. Die im Traktionsspeicher gespeicherte Energie kann später zum

- ◇ Versorgen der elektrischen Nebenaggregate und
- ◇ Antreiben des Fahrzeugs (elektrisch Fahren, Boosten und Lastpunkt absenken)

genutzt werden.

Abhängig ist die rekuperierbare Energie vom Bremssystem¹, von den Verlusten während der Rekuperation und von der Dimensionierung des elektrischen Antriebs und des Traktionsspeichers.

3.1.2 Elektrisch Fahren (inkl. Motorstart/-stopp)

Neben der Gesetzes- und Kundenrelevanz des emissionsfreien, elektrischen Fahrens (auch als „Hybrid Move“ bezeichnet) ist der elektrische Betrieb des Fahrzeugs vor allem eine Maßnahme, die die Effizienz des Full Hybrids steigert (vgl. dazu Abschnitt 3.3.5 und [74]).

Beim Bora Full Hybrid wird beim elektrischen Fahren die Trennkupplung (TRK) geöffnet und der Verbrennungsmotor steht still. Einflussfaktoren für das elektrische Fahren sind der Ladezustand *SOC* im Traktionsspeicher, die Emissionierung, die Geschwindigkeit, die Klimatisierung (Heizen und Kühlen des Innenraums), Bauteiltemperaturen (Traktionsspeicher, elektrische Maschinen und Verbrennungsmotor) usw.

Motorstart/-stopp. Beim Bora Mild Hybrid beschränkt sich der elektrische Betrieb auf den Fahrzeugstillstand ($v = 0$). Während Motorstopp wird das Bordnetz aus dem Traktionsspeicher versorgt und vor dem Losfahren wird der Verbrennungsmotor über den elektromotorischen Antrieb automatisch gestartet.

3.1.3 Boosten

Verlangt der Fahrer ein Antriebsmoment, welches der Verbrennungsmotor alleine nicht bereitstellen kann, so füllt die elektrische Maschine die Lücke zwischen verfügbarem Verbrennungsmotordrehmoment und dem maximalen Antriebsmoment. Dieser Betriebszustand wird als Boosten bezeichnet und kann einerseits die Trägheit der Verbrennungskraftmaschine ausgleichen und andererseits das maximale Drehmoment und die maximale Leistung erhöhen (vgl. dazu Abbildung 3.15).

¹Bilanzierbares oder konventionelles Bremssystem, vgl. Abschnitt 2.1.9.

3.1.4 Verbrennungsmotorisch Fahren und Verschieben des Lastpunktes

Ist elektrisch Fahren nicht effizient bzw. nicht möglich, so wird das Hybridfahrzeug wie ein konventionelles Fahrzeug über die Verbrennungskraftmaschine angetrieben. In diesem Fall wird über den elektromotorischen Antrieb der Lastpunkt verschoben und somit der Ladezustand *SOC* des Traktionsspeichers geregelt. Beim Lastpunkt Verschieben unterscheidet man je nach Vorzeichen zwischen

1. Lastpunkt Anheben:

Der Lastpunkt des Verbrennungsmotors wird angehoben, um einen Vorhalt für elektrisch Fahren und Boosten zu schaffen. Während der Lastpunktanhebung wird der Traktionsspeicher geladen und zusätzlich das Hochvolt- und das 12V-Bordnetz über den elektromotorischen Antrieb versorgt.

Die Lastpunktanhebung ist auch dafür verantwortlich, dass beim Abstellen des Fahrzeugs genügend Energie für die Standfunktionen (Standlicht, elektrische Klimatisierung im Stand, usw.) und den Wiederstart des Verbrennungsmotors im Speicher vorhanden ist.

2. Lastpunkt Absenken:

Bei der Lastpunktabsenkung wird mit überschüssiger (rekuperierter) Energie im Traktionsspeicher der Verbrennungsmotor entlastet, wodurch dieser weniger Kraftstoff verbraucht. Ein Absenken des Lastpunktes entlädt den Hochvoltspeicher und schafft somit einen Vorhalt zum Rekuperieren.

Energie im Hochvoltspeicher sollte vorrangig zur Versorgung der elektrischen Nebaggregate und zum elektrisch Fahren verwendet werden. Ist darüber hinaus Energie im Traktionsspeicher verfügbar, so sollte erst diese durch Absenken des Lastpunkts ausgegeben werden. Die Lastpunktabsenkung wird vor allem bei dynamischer Fahrweisen, langen Bergabfahrten und Hybridfahrzeugen ohne der Möglichkeit elektrisch zu fahren eingesetzt.

Der *SOC* ist im optimalen Bereich, wenn einerseits genügend Energieinhalt für elektrisches Fahren und Boosten und andererseits genügend Energievorhalt für das Rekuperieren sichergestellt ist. Bei der Regelung des *SOC* ist also stets ein Kompromiss zwischen den Funktionen, die einen möglichst vollen Hochvoltspeicher erfordern (elektrisch Fahren und Boosten) und der Rekuperation, die einen Energievorhalt fordert, zu finden. Üblicherweise wird daher der *SOC* während der verbrennungsmotorischen Fahrt auf einen mittleren Bereich geregelt. In Kapitel 4 und 5 werden ein adaptives bzw. ein prädiktives Energiemanagement vorgestellt, die den Ladezustand *SOC* an den aktuellen bzw. zukünftigen Energiehaushalt anpassen.

3.2 Analytische Beschreibung der Komponenten

Für die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs in den einzelnen Betriebsmodi wird zunächst eine analytische Beschreibung der Antriebsstrangkomponenten abgeleitet, welche auf heuristischen² Annahmen basiert. Dabei wird der Eingang jeder Komponente als linearisierte Funktion des Ausgangs beschrieben³. Beim Verbrennungsmotor ist dieses Darstellung durch die *Willanslinien* bekannt [90].

Mit den analytischen Komponentenmodellen lassen sich die energetischen Zusammenhänge in einem Hybridfahrzeug sehr anschaulich beschreiben. Abschnitt 3.3.5 leitet auf diese Weise die Grenze ab, bis zu der es sich lohnt elektrisch zu fahren, wenn die Energie dafür zuvor aus Lastpunktanhebung gewonnen wurde.

3.2.1 Verbrennungskraftmaschine

Betrachtet man die Verbrennungskraftmaschine als ein System mit Eingang und Ausgang, so stellt nach **Abbildung 3.1** der Kraftstoffvolumenstrom den Eingang und die mechanische Leistung an der Kurbelwelle den Ausgang dar.



Abbildung 3.1: Ein- und Ausgang der Verbrennungskraftmaschine. Die Verbrennungskraftmaschine wandelt chemische Leistung (den Kraftstoffvolumenstrom \dot{V}) in eine mechanische Leistung P_{VKM} .

Der Kraftstoffverbrauch einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) wird oft anhand des Verbrauchs- bzw. Muschelkennfeldes, **Abbildung 3.2**, angegeben. Der dargestellte spezifische Kraftstoffverbrauch b_e gibt das Verhältnis der eingesetzten Kraftstoffmenge (in g/h) zu der abgegebenen Leistung (in kW) an. Daraus lässt sich der Wirkungsgrad der VKM mittels der Zahlenwertgleichung

$$\eta_{\text{VKM}} = \frac{3600}{b_e[\text{g/kWh}] H_u[\text{MJ/kg}]} \quad (3.1)$$

berechnen, H_u ist der spezifische Heizwert des verwendeten Kraftstoffs in MJ/kg. Der spezifische Verbrauch b_e ist also proportional zum Kehrwert des Wirkungsgrades $\frac{1}{\eta_{\text{VKM}}}$. Mit $b_e = 210\text{g/kWh}$ und $H_u = 42,5\text{MJ/kg}$ (Heizwert von Diesel) ergibt sich ein

²Als Heuristik (aus *gr.* heureka „ich habe (es) gefunden“ [29]) bezeichnet Prof. Gigerenzer, Professor am Berliner Max-Planck-Institut für Bildungsforschung eine Methode, komplexe Probleme, die sich nicht vollständig lösen lassen, mithilfe einfacher Regeln und unter Zuhilfenahme nur weniger Informationen zu entwirren [106].

³Eingangslleistung als Funktion der Ausgangslleistung: $P_{\text{in}} = f(P_{\text{out}})$.

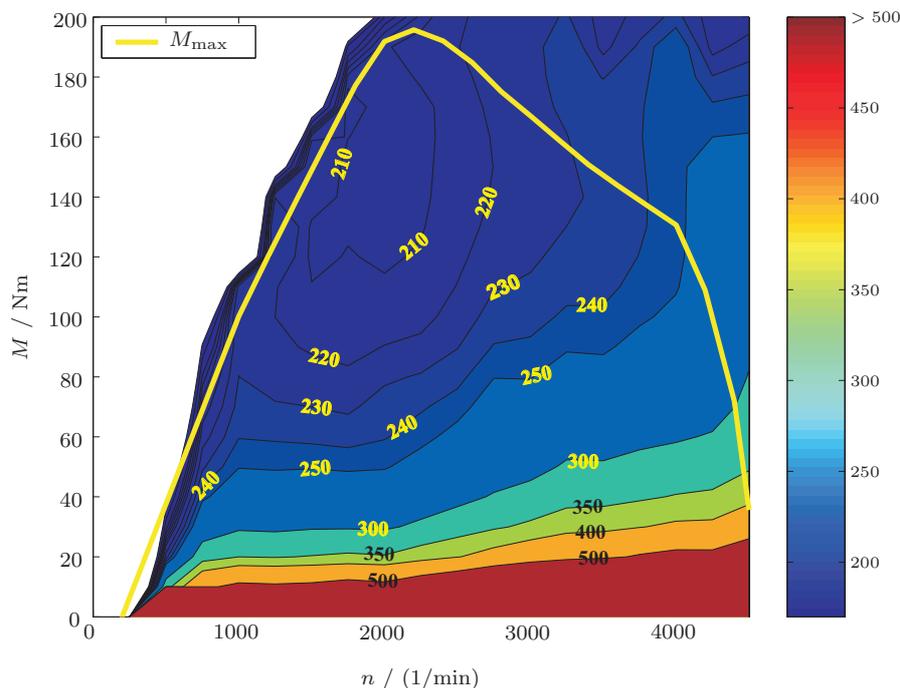


Abbildung 3.2: Verbrauchskennfeld 1.4I-TDI Motor. Das Kennfeld zeigt den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e in g/kWh und das maximale Drehmoment M_{\max} der VKM.

Wirkungsgrad von $\eta_{\text{VKM}} = 3600 / (210 \cdot 42,5) = 0,4 = 40\%$. Der Begriff „(spezifisches) Verbrauchskennfeld“ ist daher im eigentlichen Sinne nicht korrekt, da es sich vielmehr um ein *Wirkungsgradkennfeld* handelt.

Willans-Linen der VKM. Anschauliche Aussagen über den tatsächlich verbrauchten Kraftstoff erlauben die Willans-Linen, **Abbildung 3.3**. Sie zeigen den Verbrennungsmotoringang (Volumen- oder Massenstrom des Kraftstoffs) über dem Verbrennungsmotorausgang (mechanische Ausgangsleistung, effektiver Mitteldruck oder Drehmoment) bei konstant gehaltener Drehzahl [107, 108] und werden üblicherweise genutzt um die Verlustleistung des betriebswarmen Motors im stationären Betrieb durch lineare Extrapolation abzuschätzen [109].

Für jede Drehzahl lässt sich die Willans-Linie zerlegen in

$$\dot{V}(P_{\text{VKM}}) = \dot{V}_0 + \underbrace{\int_0^{P_{\text{VKM}}} \dot{v}_{\text{VKM}}(P) \, dP}_{\dot{V}_{\text{VKM}}} \quad (3.2)$$

Wobei $\dot{V}_0 = \dot{V}(P_{\text{VKM}} = 0)$ als *Null-Leistungsverbrauch* und \dot{V}_{VKM} als *Verbrauch für effek-*

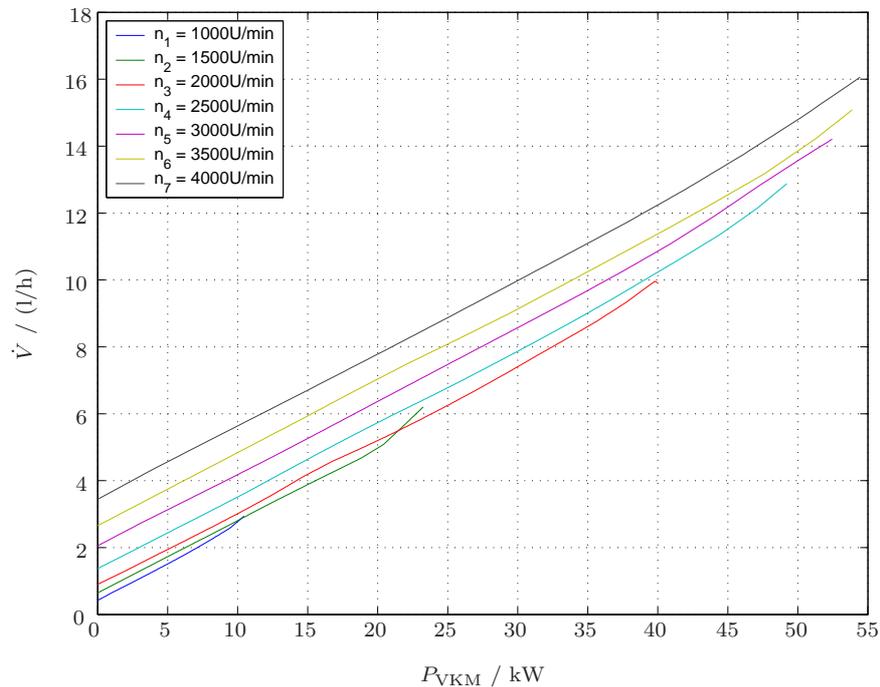


Abbildung 3.3: Willans-Linien 1.4I-TDI Motor. Sie zeigen den Kraftstoff-Volumenstrom \dot{V} als Funktion der effektiven Ausgangsleistung P_{VKM} . Die Linien sind auf den nutzbaren Bereich ($M < M_{\text{max}}$ in Abbildung 3.2) begrenzt.

tive Leistung bezeichnet wird [90].

$$\dot{v}_{P_{\text{VKM}}} = \frac{d\dot{V}}{dP_{\text{VKM}}} \quad (3.3)$$

stellt die Ableitung (bzw. Steigung) der Willans-Linie dar und ist ein spezifischer Kraftstoffverbrauch in l/kWh.

Null-Leistungsverbrauch \dot{V}_0 . Er stellt gewissermaßen den Grundverbrauch dar, den die VKM benötigt um sich auf einer bestimmten Drehzahl zu halten. Er setzt sich in erster Linie aus Reibungs- und Ladungswechselferlusten zusammen. \dot{V}_0 ist von der Drehzahl abhängig und kann aus Abbildung 3.3 für $P_{\text{VKM}} = 0$ ermittelt werden. **Abbildung 3.4** zeigt den Verlauf des Null-Leistungsverbrauchs in Abhängigkeit der Drehzahl.

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Null-Leistungsverbrauch linear mit dem Hubraum der VKM zusammenhängt [90].

Verbrauch für effektive Leistung $\dot{V}_{P_{\text{VKM}}}$. Er nimmt mit der effektiven Leistung zu und man erhält ihn durch Integration der *Steigung der Willans-Linie* $\dot{v}_{P_{\text{VKM}}}$, Gl. (3.2). Der Verlauf von $\dot{v}_{P_{\text{VKM}}}$, siehe **Abbildung 3.5**, ist für kleine Leistungen nahezu konstant. Für

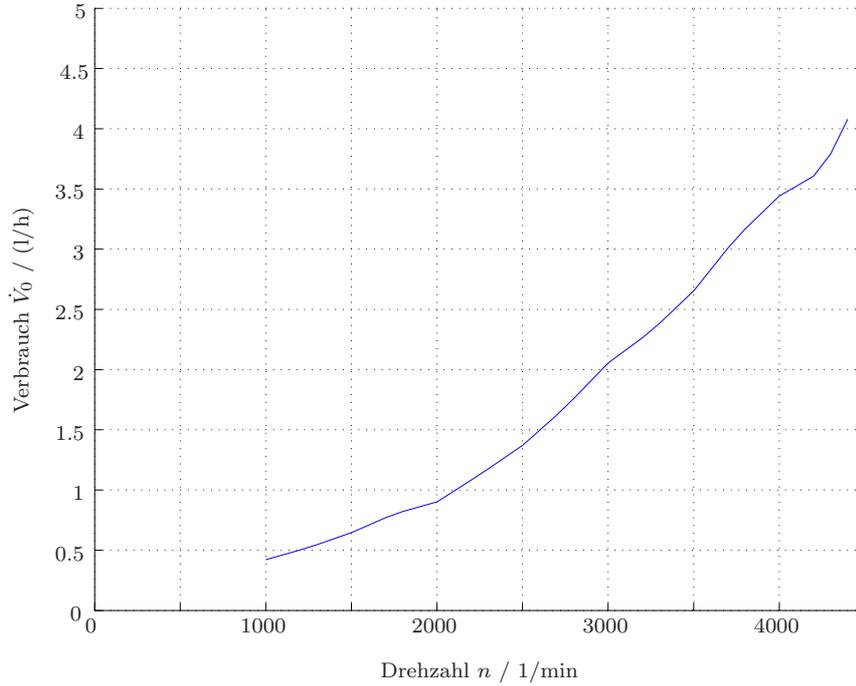


Abbildung 3.4: Nulleistungsverbrauch 1.4l-TDI Motor. Er gibt den Verbrauch \dot{V}_0 / der VKM bei Ausgangsleistung $P_{\text{VKM}} = 0$ als Funktion der Drehzahl n an. Man erhält ihn aus Abbildung 3.3 aus $\dot{V}_0 = \dot{V}(P_{\text{VKM}} = 0)$.

eine Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs bei kleinen und mittleren Lasten des Verbrennungsmotors kann man $\dot{v}_{P_{\text{VKM}}}$ daher als konstant annehmen.

Willans-Linien von Otto-Motoren zeigen bei großen Lasten einen deutlichen Anstieg von $\dot{v}_{P_{\text{VKM}}}$, welcher auf die Vollastanfettung zurückzuführen ist [90]. Für Hybridantriebe ist jedoch in erster Linie der Teillastbereich der VKM relevant. Auch neue Technologien, wie beispielsweise Zylinderabschaltung oder Benzindirekteinspritzung mit Homogen- und Schichtbetrieb, können Anpassungen der vorgestellten Vereinfachungen erforderlich machen.

Näherung für die Willans-Linie der VKM. Mit der Annahme $\dot{v}_{P_{\text{VKM}}}(P_{\text{VKM}}) = \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} = \text{const.}$ erhält man aus Gl. (3.2) für den Kraftstoffvolumenstrom der Verbrennungskraftmaschine die Abschätzung

$$\dot{V} \approx \dot{V}_0 + \int_0^{P_{\text{VKM}}} \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} dP = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} \int_0^{P_{\text{VKM}}} dP = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} P_{\text{VKM}}. \quad (3.4)$$

Somit werden die Willans-Linien als Geraden angenähert.

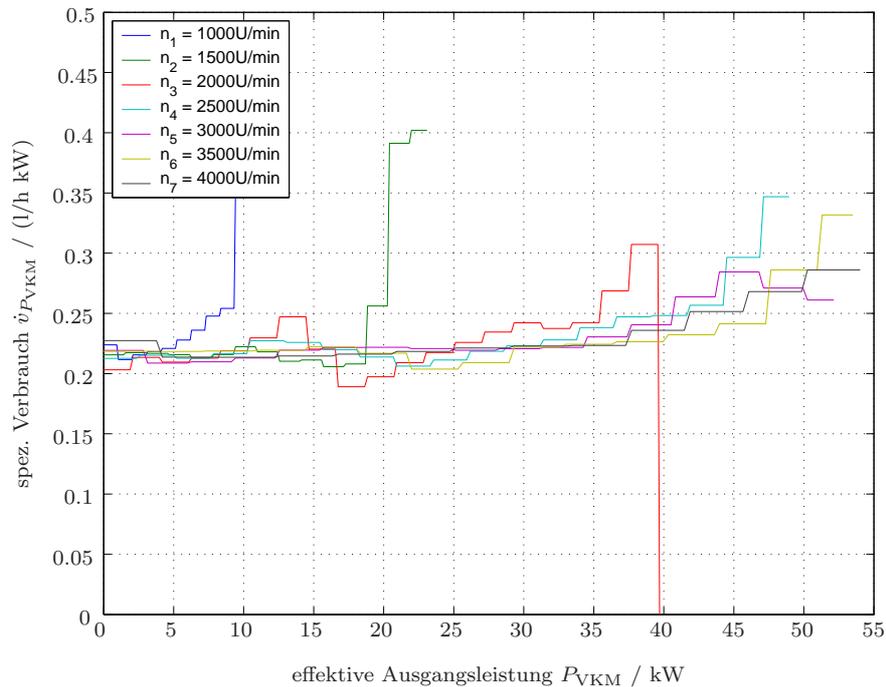


Abbildung 3.5: Steigung der Willans-Linien 1.4I-TDI Motor. Erhält man aus Abbildung 3.3 aus $\dot{v}_{P_{VKM}} = d\dot{V}/dP_{VKM}$

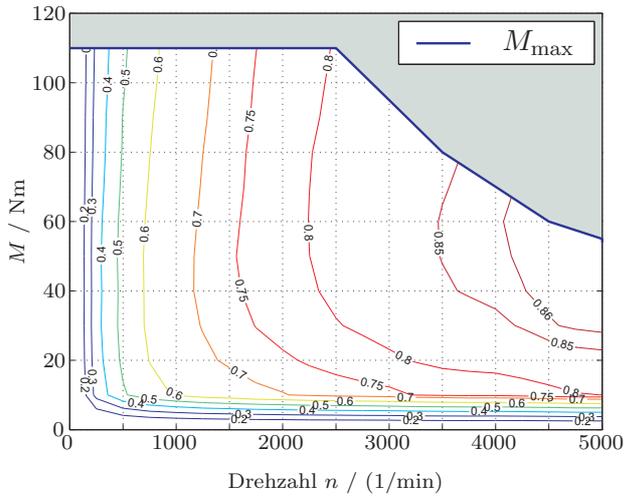
3.2.2 Elektromotorischer Antrieb

Für die Bewertung der Lastpunktverschiebung ist die konventionelle Betrachtung des Wirkungsgrades vom elektromotorischen Antrieb (EMA) nach **Abbildung 3.6** nicht zielführend. Der Grund dafür ist, dass durch die Drehzahlkopplung des EMA an die VKM ein Teil der Verluste (z.B. Reibung) stets vorhanden ist. Für die Betrachtung der Lastpunktverschiebung ist vielmehr der *relative Wirkungsgrad*, der sich durch den Übergang von einem Kennfeldpunkt zu einem anderen ergibt, relevant.

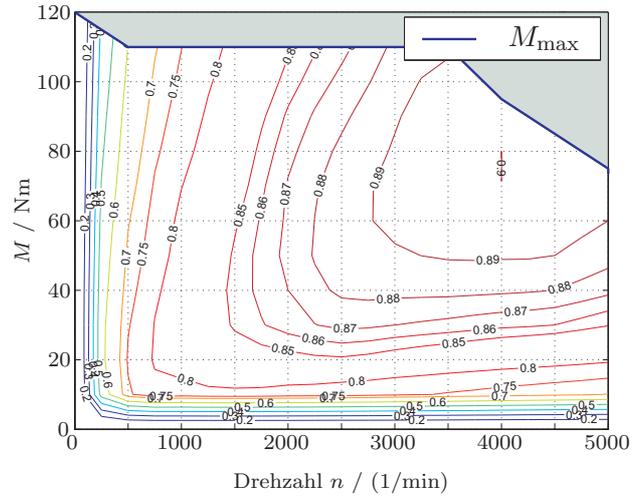
Betrachtet man den elektromotorischen Antrieb als ein System mit Ein- und Ausgang, so stellt im *motorischen Betrieb* nach **Abbildung 3.7** die elektrische Leistung den Eingang und die mechanische Leistung den Ausgang dar. Im *generatorischen Betrieb* sind Ein- und Ausgang vertauscht.

Willans-Linien des EMA. Ähnlich wie es im letzten Abschnitt anhand der VKM gezeigt wurde, kann man auch beim EMA den Motoreingang (Eingangsleistung) als Funktion des Motorausgangs (Ausgangsleistung) darstellen, **Abbildung 3.8**.

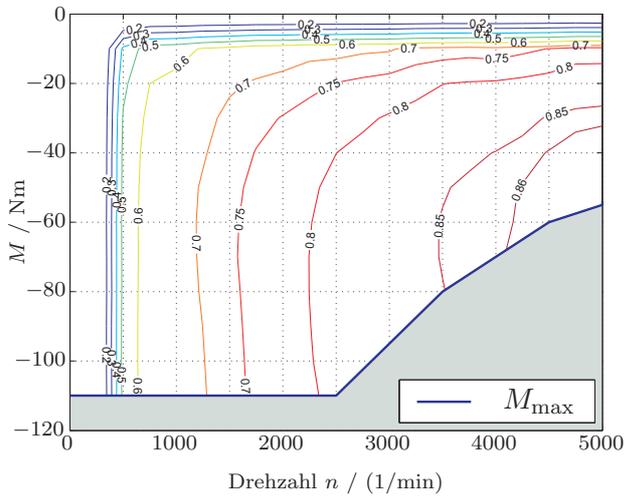
Die Kurven sind äquivalent zu den Willans-Linien der VKM. Man erkennt in **Abbildung 3.8**, dass bei $P_{\text{out}} = 0$ bereits eine Eingangsleistung (sprich Verluste) vorhanden ist.



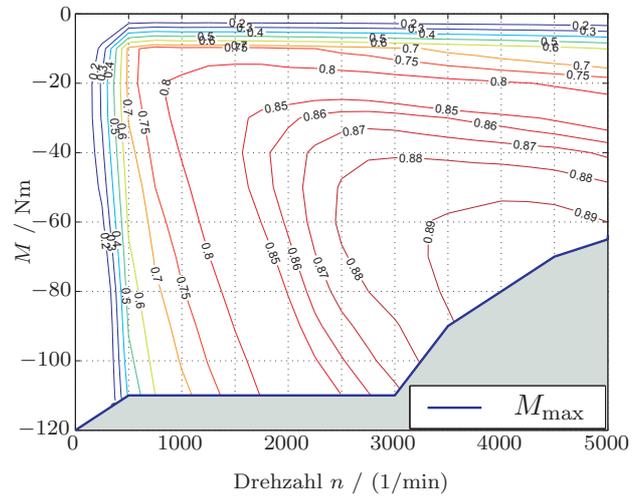
(a) motorischer Betrieb der ASM



(b) motorischer Betrieb der PSM



(c) generatorischer Betrieb der ASM



(d) generatorischer Betrieb der PSM

Abbildung 3.6: Wirkungsgradkennfelder der elektromotorischen Antriebe des Bora Full Hybrids [74, 8].

Die Willans-Linien des EMA lassen sich für jede Drehzahl wie folgt darstellen,

$$P_{\text{in}} = P_0 + \underbrace{\int_0^{P_{\text{out}}} p_1(P_{\text{out}}) dP}_{P_{P_{\text{out}}}}. \quad (3.5)$$

Dabei gibt P_0 die Null-Leistungsverluste des EMA und $P_{P_{\text{out}}}$ die Eingangsleistung für effektive Ausgangsleistung an.

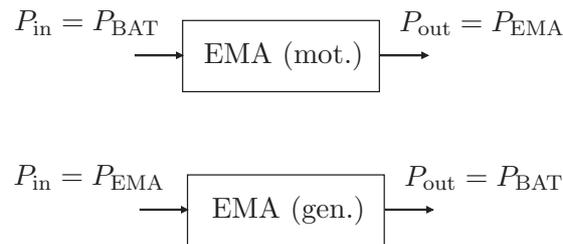


Abbildung 3.7: Ein- und Ausgang der elektrischen Maschine. Die elektrische Maschine wandelt im motorischen Betrieb elektrische Leistung des Hochvoltspeichers P_{BAT} in eine mechanische Leistung P_{EMA} , im generatorischen Betrieb vice versa.

Null-Leistungsverluste P_0 des EMA. Sie sind in **Abbildung 3.9** dargestellt und entstehen im Wechselrichter, durch Reibung der elektrischen Maschine und durch das Magnetisieren des EMA. Die Verluste sind sowohl bei der Asynchronmaschine (ASM), als auch bei der permanenterregten Synchronmaschine (PSM) von der Drehzahl abhängig und setzen sich zusammen aus

1. Wechselrichterverluste,
2. Eisenverluste (hauptsächlich im Stator) und
3. OHMSche Verluste
 - (a) im Stator (bei der PSM),
 - (b) in Stator und Rotor (bei der ASM).

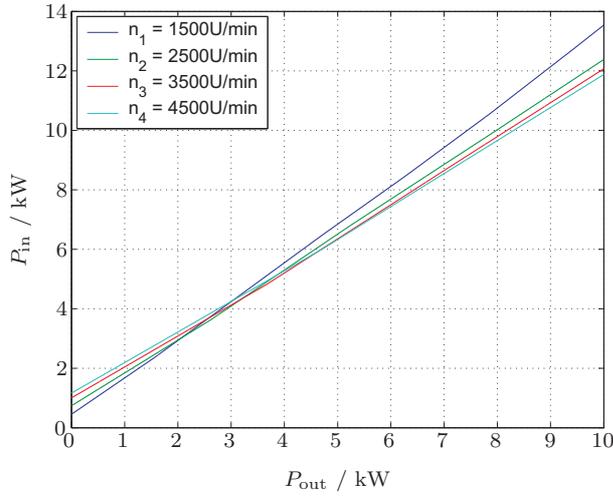
Wenn man die ASM bei $P_{\text{out}} = 0$ nicht magnetisiert, so ist es möglich, Null-Leistungsverluste des EMA größtenteils zu vermeiden.

Eingangsleistung für effektive Ausgangsleistung $P_{P_{\text{out}}}$. Man erhält $P_{P_{\text{out}}}$ durch Integration der *Ableitung der Willans-Linie des EMA* $p_1 = dP_{\text{in}}/dP_{\text{out}}$

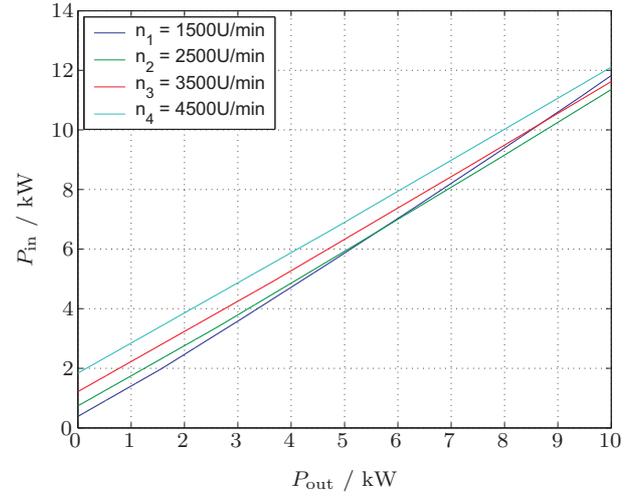
$$P_{P_{\text{out}}} = \int_0^{P_{\text{out}}} p_1(P) dP \quad (3.6)$$

p_1 ist der Kehrwert eines relativen Wirkungsgrades und ist in **Abbildung 3.10** dargestellt. Für die ASM kann p_1 näherungsweise als konstant betrachtet werden, bei der PSM steigt p_1 etwas mit der Leistung an.

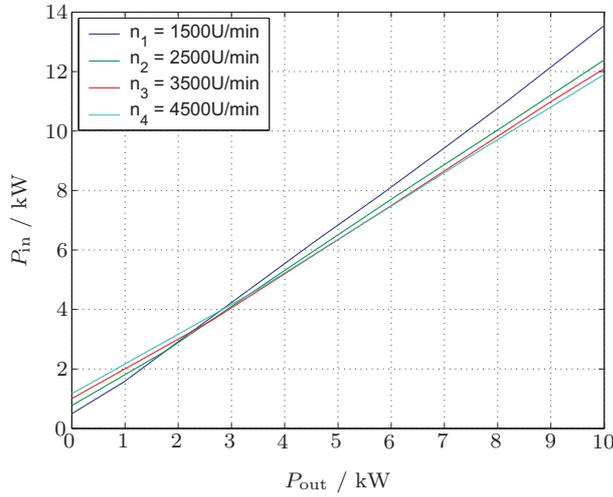
Näherung für die Willans-Linie des EMA. Beim elektrischen Fahren und beim Lastpunktverschieben wird der elektromotorische Antrieb größtenteils bei kleinen Lasten betrieben [110, 74]. Daher ist es zulässig die Willanslinien des EMA in diesem Bereich zu



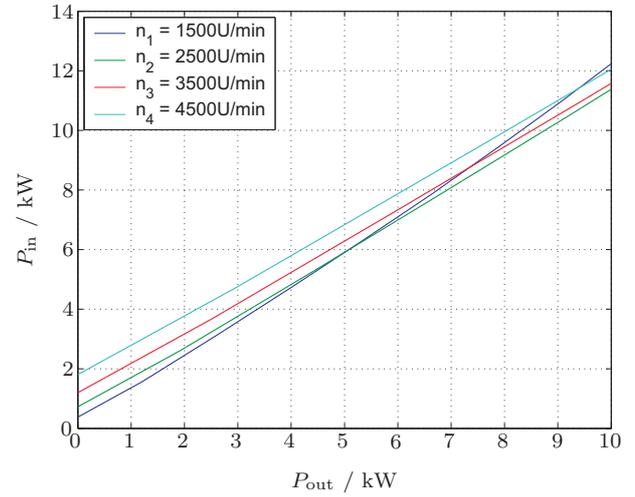
(a) motorischer Betrieb der ASM



(b) motorischer Betrieb der PSM



(c) generatorischer Betrieb der ASM



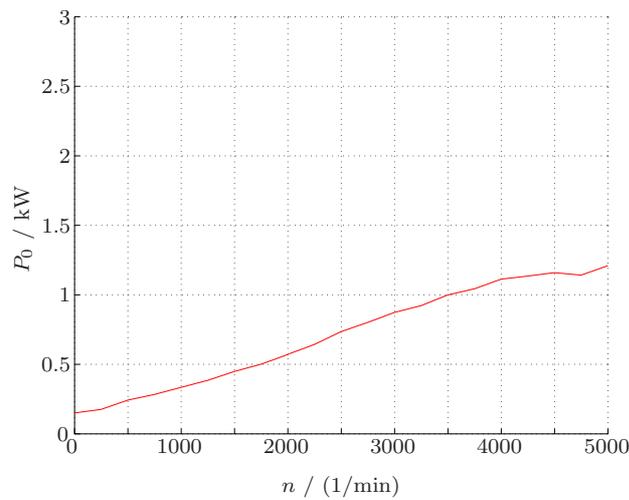
(d) generatorischer Betrieb der PSM

Abbildung 3.8: Willans-Linien des elektromotorischen Antriebs. Sie zeigen die Eingangsleistung P_{in} als Funktion der Ausgangsleistung P_{out} . Im Motorbetrieb gilt $P_{\text{out}} = M\omega$ und $P_{\text{in}} = M\omega + P_v$, im Generatorbetrieb ist $P_{\text{in}} = M\omega$ und $P_{\text{out}} = M\omega - P_v$. Die Drehzahl ist bei jeder Kurve konstant.

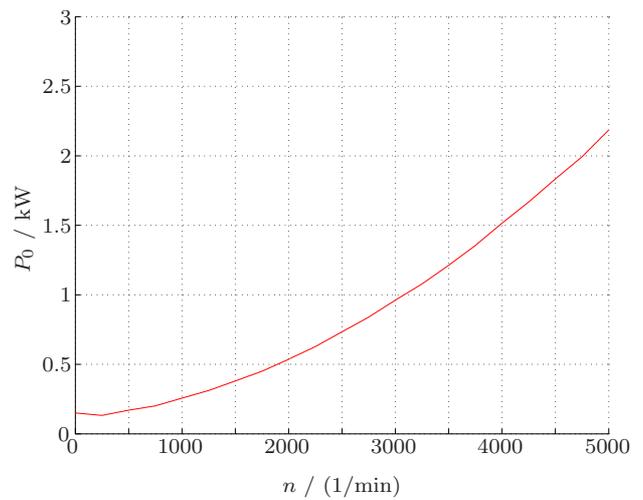
linearisieren und p_1 als konstant anzunehmen [74, 111]. Man erhält mit Hilfe der Gln. (3.5) und (3.6) die Eingangsleistung des elektromotorischen Antriebs

$$P_{\text{in}} \approx P_0 + \int_0^{P_{\text{out}}} p_1 dP = P_0 + p_1 \int_0^{P_{\text{out}}} dP = P_0 + p_1 P_{\text{out}}. \quad (3.7)$$

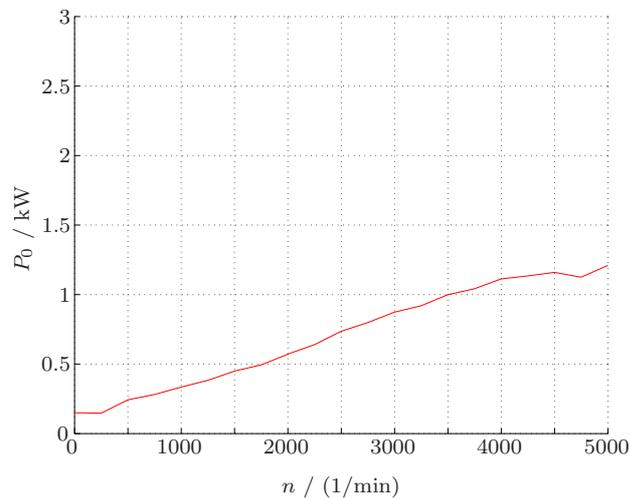
als *lineare Abhängigkeit von der Ausgangsleistung P_{out} .*



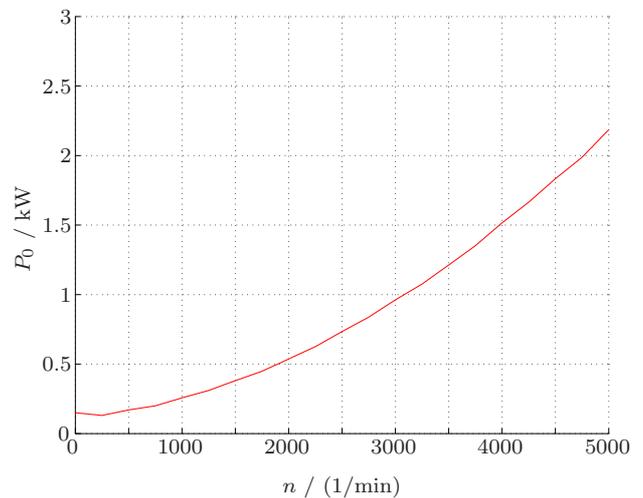
(a) motorischer Betrieb der ASM



(b) motorischer Betrieb der PSM



(c) generatorischer Betrieb der ASM



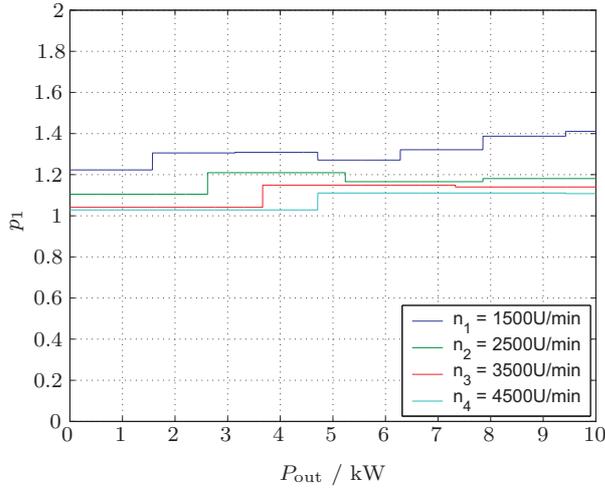
(d) generatorischer Betrieb der PSM

Abbildung 3.9: Null-Leistungsverluste des EMA.

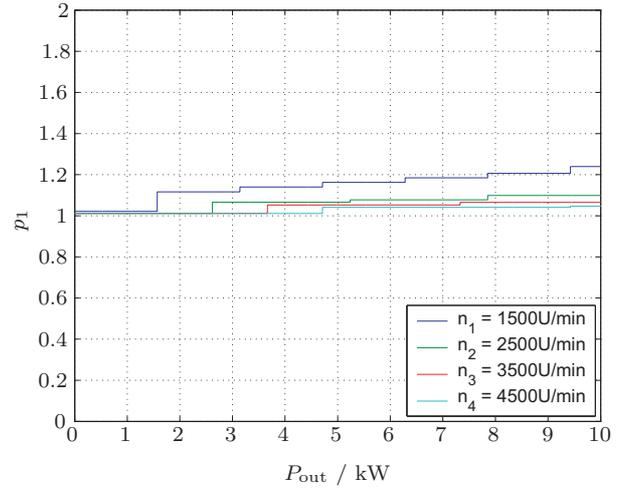
3.2.3 Traktionsspeicher

Der Traktionsspeicher (mit BAT für Batterie abgekürzt) wird analog Abschnitt 2.1.7 durch eine Ersatzschaltung mit Spannungsquelle und Innenwiderstand entsprechend **Abbildung 3.11 (a)** modelliert. Die Leerlaufspannung $U_{\text{BAT},0}$ und der Innenwiderstand R_i des Traktionsspeichers sind u. a. vom Ladezustand SOC abhängig. Weiters unterscheidet sich der Innenwiderstand im Lade- und Entladebetrieb. Die Verluste im Traktionsspeicher sind durch Strom und Spannung am Innenwiderstand R_i gegeben.

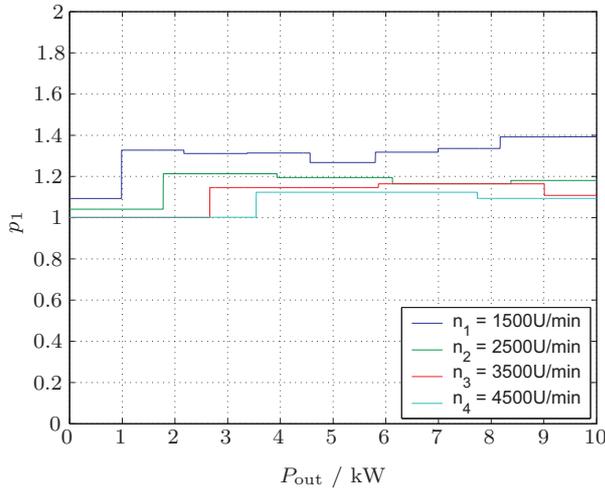
Wie die Abbildungen 3.11 (a) und (b) zeigen, sind beim Traktionsspeicher Ein- und



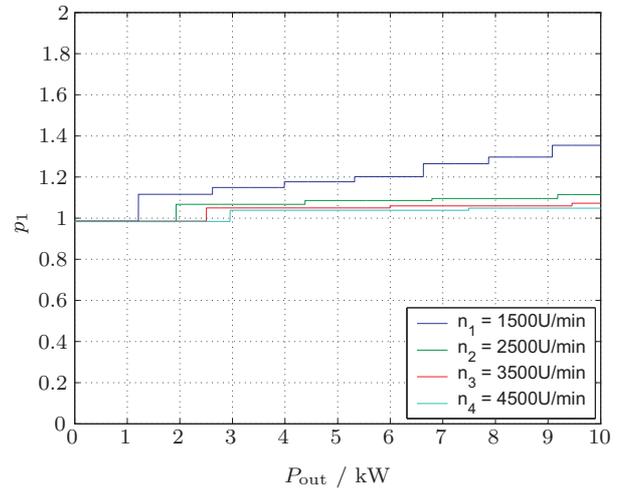
(a) motorischer Betrieb der ASM



(b) motorischer Betrieb der PSM



(c) generatorischer Betrieb der ASM



(d) generatorischer Betrieb der PSM

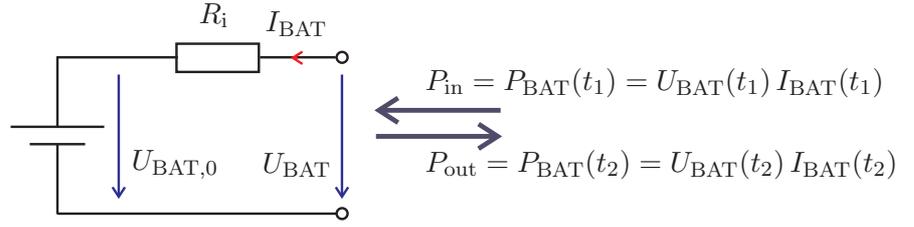
Abbildung 3.10: Ableitung der Willans-Linien des elektromotorischen Antriebs.

Ausgang die gleichen Anschlüsse. Da jedoch Laden und Entladen stets zeitlich disjunkt auftreten, lässt sich auch beim Traktionsspeicher der Eingang als Funktion des Ausgangs darstellen.

Beim Entladen zum Zeitpunkt $t = t_2$ ergibt sich die Ausgangsleistung ($I_{\text{BAT}} < 0$)

$$P_{\text{out}} = P_{\text{BAT}}(t_2) = I_{\text{BAT}} U_{\text{BAT}} = I_{\text{BAT}}(U_{\text{BAT},0} + I_{\text{BAT}} R_i) \quad (3.8)$$

$$= \underbrace{I_{\text{BAT}} U_{\text{BAT},0}}_{P_{\text{BAT},0}} + \underbrace{I_{\text{BAT}}^2 R_i}_{\text{Verluste}} = P_{\text{BAT},0} \underbrace{\left(1 + \frac{I_{\text{BAT}} R_i}{U_{\text{BAT},0}}\right)}_{\eta_{\text{ELA}}} = P_{\text{BAT},0} \eta_{\text{ELA}} \quad (3.9)$$



(a) Ersatzschaltbild einer Batterie.



(b) Ein- und Ausgang des Speichers.

Abbildung 3.11: Modellierung des Traktionsspeichers. Der Speicher wird durch die Leerlaufspannung $U_{\text{BAT},0}$ und den Innenwiderstand R_i abgebildet. Eingangsleistung $P_{\text{in}} = P_{\text{BAT}}(t_1)$ und Ausgangsleistung $P_{\text{out}} = P_{\text{BAT}}(t_2)$ sind zeitlich stets disjunkt (disjunkt aus *lat.*: getrennt [29], $t_1 \neq t_2$). Der Strom I_{BAT} ist beim Laden positiv und beim Entladen negativ.

mit *negativem* Batteriestrom I_{BAT} , der *abgegebenen* Leistung der idealen Spannungsquelle $P_{\text{BAT},0}$ und dem Entladewirkungsgrad η_{ELA} .

Beim Laden zum Zeitpunkt $t = t_1$ gilt analog für die Eingangsleistung ($I_{\text{BAT}} > 0$)

$$P_{\text{in}} = P_{\text{BAT}}(t_1) = I_{\text{BAT}} U_{\text{BAT}} = I_{\text{BAT}} (U_{\text{BAT},0} + I_{\text{BAT}} R_i) \quad (3.10)$$

$$= \underbrace{I_{\text{BAT}} U_{\text{BAT},0}}_{P_{\text{BAT},0}} + \underbrace{I_{\text{BAT}}^2 R_i}_{\text{Verluste}} = P_{\text{BAT},0} \underbrace{\left(1 + \frac{I_{\text{BAT}} R_i}{U_{\text{BAT},0}}\right)}_{1/\eta_{\text{LAD}}} = P_{\text{BAT},0} \frac{1}{\eta_{\text{LAD}}}, \quad (3.11)$$

wobei η_{LAD} der Ladewirkungsgrad und $P_{\text{BAT},0}$ die *aufgenommene* Leistung der idealen Spannungsquelle ist. Der Batteriestrom I_{BAT} ist in diesem Fall *positiv*.

Stellt man den Eingang nach Abbildungen 3.11 (b) als Funktion des Ausgangs dar, so ergibt sich

$$P_{\text{in}} = \frac{1}{\eta_{\text{ELA}} \eta_{\text{LAD}}} P_{\text{out}}. \quad (3.12)$$

Man erkennt, dass im Traktionsspeicher *keine Null-Leistungsverluste* auftreten, da bei einem Traktionsspeicher nach Abbildung 3.11 (a) nur beim Laden und beim Entladen Verluste auftreten.

3.3 Verbrauch der Betriebsmodi

Mit Hilfe der analytischen Beschreibung der Komponenten (Abschnitt 3.2) werden nun für die Betriebsmodi

- ◇ verbrennungsmotorisch Fahren (Abkürzung: VKM-FAhren, VF),
- ◇ Lastpunkt Anheben (Abkürzung: LAn)
- ◇ elektrisch Fahren (Abkürzung: E-Fahren, EF),
- ◇ Boosten (Abkürzung: BO) und Lastpunkt Absenken (Abkürzung: LAb)

aus Abschnitt 3.1 der Verbrauch an Kraftstoff (Kraftstoff-Volumenstrom \dot{V}) und der Verbrauch aus dem Traktionsspeicher ($P_{\text{BAT},0}$) mit Hilfe der analytischen Komponentenbeschreibung nach Abschnitt 3.2 bestimmt.

Aus den Verbräuchen der einzelnen Betriebsmodi wird im Abschnitt 3.3.5 abgeleitet, in welchen Bereichen sich elektrisch Fahren bezüglich Effizienz lohnt. Dies bildet die Basis für das Energiemanagement, wie es im Abschnitt 3.4 dargestellt wird. Für die nächsten Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen:

- ◇ Bordnetzverbrauch tritt bei jedem Antriebsmodus auf und wird daher beim folgenden Vergleich nicht explizit berücksichtigt.
- ◇ Die Komponenten werden durch die analytische, linearisierte Beschreibung nach Abschnitt 3.2 beschrieben.

Die berücksichtigten Leistungen sind in **Abbildung 3.12** dargestellt.

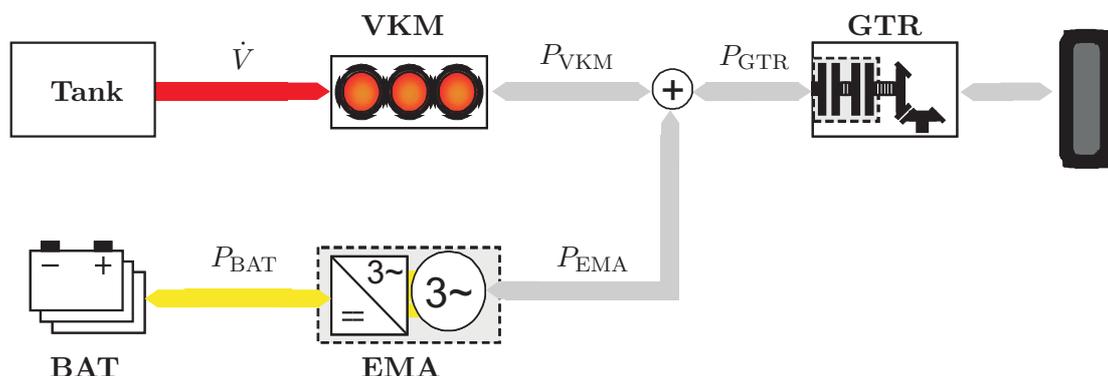


Abbildung 3.12: Energieflüsse im Antriebsstrang eines Parallelhybrids.

3.3.1 Verbrauch beim verbrennungsmotorischen Fahren

Beim VKM-Fahren (VF) wird die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs ausschließlich von der VKM geliefert, der Lastpunkt wird durch die elektrische Maschine weder angehoben noch abgesenkt.

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs muss zwischen ASM und PSM unterschieden werden, da die ASM in diesem Fall nicht magnetisiert wird und dadurch die Null-Leistungsverluste des EMA P_0 sehr gering sind. Bei einer PSM treten auf Grund der permanenten Magnetisierung stets die vollen Null-Leistungsverluste auf (vgl. dazu Abschnitt 3.2.2).

1. PSM:

Durch die feste Drehzahlkopplung zwischen VKM und EMA beim Parallelhybrid, treten die Null-Leistungsverluste P_0 beim VKM-Fahren zum Großteil als zusätzliche Schleppleistung auf und müssen von der VKM bereitgestellt werden.

Beim VKM-Fahren muss daher die VKM $P_{\text{VKM}} = P_{\text{GTR}} + P_0$ die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs P_{GTR} und die Schleppleistung der PSM P_0 aufbringen, der Kraftstoff-Volumenstrom beträgt nach Gl. (3.4)

$$\dot{V}_{\text{VF}} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} P_{\text{VKM}} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} (P_{\text{GTR}} + P_0). \quad (3.13)$$

2. ASM:

Eine ASM kann, falls sie kein Drehmoment aufbringen muss, entmagnetisiert werden, wodurch P_0 nahezu Null ist [111]. Beim VKM-Fahren muss die VKM nur die Getriebeeingangsleistung $P_{\text{VKM}} = P_{\text{GTR}}$ bereitstellen, der Kraftstoff-Volumenstrom ist also

$$\dot{V}_{\text{VF}} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} P_{\text{VKM}} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} P_{\text{GTR}}. \quad (3.14)$$

Aufgrund der Null-Leistungsverluste der PSM P_0 weist die ASM beim VKM-Fahren einen *geringeren Verbrauch* auf als die PSM.

3.3.2 Verbrauch beim Lastpunkt Anheben

Im Falle von Lastpunktanhebung (LAN) während VKM-Fahren treibt die VKM das Fahrzeug an und lädt zusätzlich den Energiespeicher. Für das Laden von $P_{\text{BAT},0,\text{LAN}}$ in den Energiespeicher benötigt sowohl eine ASM als auch eine PSM nach Gl. (3.7) die mechanische Leistung

$$P_{\text{EMA}} = P_0 + p_{1,\text{GEN}} \frac{P_{\text{BAT},0,\text{LAN}}}{\eta_{\text{LAD}}} \quad (3.15)$$

von der Kurbelwelle. Die VKM muss $P_{VKM} = P_{EMA} + P_{GTR}$ aufbringen. Der Kraftstoff-Volumenstrom ist mit Gl. (3.4)

$$\dot{V}_{LAn} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}}(P_{EMA} + P_{GTR}) = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}}\left(P_0 + p_{1,GEN} \frac{P_{BAT,0,LAn}}{\eta_{LAD}} + P_{GTR}\right). \quad (3.16)$$

Um zu bestimmen wie viel *zusätzlicher* Kraftstoff auf Grund von Lastpunktanhebung verbraucht wird, muss Gl. (3.16) mit der entsprechenden Formel für VKM-Fahren, also Gl. (3.13) bei einer PSM bzw. Gl. (3.14) bei einer ASM, verglichen werden. Es ergibt sich ein Mehrverbrauch durch Lastpunktanhebung $\Delta\dot{V}_{LAn}$ bei der

1. PSM:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{LAn} &= \dot{V}_{LAn} - \dot{V}_{VF} = \\ &= \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}}\left(P_0 + p_{1,GEN} \frac{P_{BAT,0,LAn}}{\eta_{LAD}} + P_{GTR}\right) - \left(\dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}}(P_{GTR} + P_0)\right) \\ &= \dot{v}_{P_{VKM}} p_{1,GEN} \frac{P_{BAT,0,LAn}}{\eta_{LAD}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

2. und bei der ASM:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{LAn} &= \dot{V}_{LAn} - \dot{V}_{VF} = \\ &= \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}}\left(P_0 + p_{1,GEN} \frac{P_{BAT,0,LAn}}{\eta_{LAD}} + P_{GTR}\right) - \left(\dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}} P_{GTR}\right) \\ &= \dot{v}_{P_{VKM}}\left(P_0 + p_{1,GEN} \frac{P_{BAT,0,LAn}}{\eta_{LAD}}\right). \end{aligned} \quad (3.18)$$

In den Gln. (3.17) und (3.18) ist $\dot{v}_{P_{VKM}}$ der einzige Parameter der VKM und dieser ist nahezu unabhängig vom Arbeitspunkt (vgl. dazu Abbildung 3.5 und Gl. (3.4)). *Der Wirkungsgrad bei der Lastpunktanhebung ist also im Großen und Ganzen unabhängig vom Arbeitspunkt der VKM.*

3.3.3 Verbrauch bei Lastpunkt Absenken und Boosten

Beim Boosten (BO) und beim Lastpunkt Absenken (LAb) wird Leistung für das Antreiben des Fahrzeuges von der VKM und von der EMA geliefert ($P_{GTR} = P_{VKM} + P_{EMA}$).

Der Kraftstoff-Volumenstrom ergibt daher

$$\dot{V}_{LAb} = \dot{V}_{BO} = \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}} P_{VKM} \quad (3.19)$$

und die benötigte elektrische Leistung aus dem Energiespeicher ist sowohl für die ASM als auch für die PSM

$$P_{BAT,0,LAb} = \frac{P_{BAT,LAb}}{\eta_{ELA}} = \frac{P_0 + p_{1,MOT} P_{EMA}}{\eta_{ELA}}. \quad (3.20)$$

In den Betriebsarten Lastpunkt Absenken und Boosten treten sowohl die Null-Leistungsverluste des EMA P_0 , als auch der Null-Leistungsverbrauch der VKM \dot{V}_0 auf.

3.3.4 Verbrauch beim elektrischen Fahren

Beim elektrischen Fahren (EF) wird das Fahrzeug ausschließlich von der EMA angetrieben. Die Trennkupplung TRK ist geöffnet und die VKM abgeschaltet. Es wird folglich kein Kraftstoff verbraucht ($\dot{V}_{\text{EF}} = 0$).

Die Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs wird ausschließlich aus dem Energiespeicher zur Verfügung gestellt ($P_{\text{VKM}} = 0$ und $P_{\text{GTR}} = P_{\text{EMA}}$ in Abbildung 3.12) und beträgt (mit Gln. (3.7) und (3.9))

$$P_{\text{BAT},0,\text{EF}} = \frac{1}{\eta_{\text{ELA}}} P_{\text{BAT},\text{EF}} = \frac{P_0 + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}}}. \quad (3.21)$$

Da beim elektrisch Fahren die Null-Leistungsverluste der VKM \dot{V}_0 vermieden werden, wird es gegenüber der Lastpunktabsenkung bevorzugt.

3.3.5 Elektrisch Fahren mit Energie aus Lastpunktanhebung

Im Folgenden wird betrachtet, welcher Kraftstoffvolumenstrom sich ergibt, wenn die Energie zum elektrisch Fahren aus Lastpunktanhebung generiert wird. Dies kann dem Kraftstoffvolumenstrom für verbrennungsmotorisches Fahren ohne Lastpunktanhebung gegenübergestellt werden.

Da sich in den letzten Jahren die permanenterreichte Synchronmaschine (PSM) als Antrieb für Hybridfahrzeuge durchgesetzt hat, wird die Berechnung an dieser Stelle für die PSM durchgeführt. Für die Asynchronmaschine (ASM) wird nur das Ergebnis diskutiert.

3.3.5.1 E-Fahren-Grenze bei der permanenterreichte Synchronmaschine (PSM)

Lastpunktanhebung bei der PSM. Der Kraftstromvolumenstrom für Lastpunktanhebung $\Delta\dot{V}_{\text{LAN}}$ ist bei der PSM durch Gl. (3.17) gegeben. Für den Kraftstoff, der in einer bestimmten Zeit $\Delta\tau_{\text{LAN}}$ für Lastpunktanhebung verbraucht wird, ergibt sich aus

$$V_{\text{LAN}} = \Delta\dot{V}_{\text{LAN}} \Delta\tau_{\text{LAN}} = \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} p_{1,\text{GEN}} \frac{P_{\text{BAT},0,\text{LAN}}}{\eta_{\text{LAD}}} \Delta\tau_{\text{LAN}} \quad (3.22)$$

Dabei wird die Energiemenge $P_{\text{BAT},0,\text{LAN}} \Delta\tau_{\text{LAN}}$ in den Energiespeicher geladen.

E-Fahren. Für elektrisches Fahren im Zeitraum $\Delta\tau_{\text{EF}}$ wird $P_{\text{BAT},0,\text{EF}} \Delta\tau_{\text{EF}}$ an Energie benötigt. Diese muss gleich der Energie sein, die vorher durch Lastpunktanhebung generiert wurde. Es ergibt sich

$$P_{\text{BAT},0,\text{EF}} \Delta\tau_{\text{EF}} = P_{\text{BAT},0,\text{LAN}} \Delta\tau_{\text{LAN}}. \quad (3.23)$$

Mittels Gln. (3.21), (3.22) und (3.23) kann man nun *den Kraftstoffverbrauch für E-Fahren* bestimmen, er beträgt

$$V_{\text{LAn}} = \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} p_{1,\text{GEN}} \frac{P_0 + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}} \eta_{\text{LAD}}} \Delta\tau_{\text{EF}}. \quad (3.24)$$

Gegenüberstellung: E-Fahren \leftrightarrow VKM-Fahren. Stellt man sich nun die Frage ob man in einem bestimmten Arbeitspunkt E-Fahren oder VKM-Fahren günstiger ist, so muss man den Kraftstoffverbrauch für elektrisch Fahren ΔV_{LAn} dem Kraftstoffverbrauch beim VKM-Fahren ΔV_{VF} gegenüberstellen. Gilt also

$$\Delta V_{\text{LAn}} < V_{\text{VF}}, \quad (3.25)$$

dann ist E-Fahren „günstiger“ als VKM-Fahren. Der Kraftstoff für E-Fahren ist durch Gl. (3.24) gegeben, der für VKM-Fahren beträgt (mit Gl. (3.13))

$$V_{\text{VF}} = \dot{V}_{\text{VF}} \Delta\tau_{\text{EF}} = \left(\dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} (P_{\text{GTR}} + P_0) \right) \Delta\tau_{\text{EF}}. \quad (3.26)$$

Damit ergibt sich für Gl. (3.25):

$$\dot{v}_{P_{\text{VKM}}} p_{1,\text{GEN}} \frac{P_0 + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}} \eta_{\text{LAD}}} \Delta\tau_{\text{EF}} < \left(\dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} (P_{\text{GTR}} + P_0) \right) \Delta\tau_{\text{EF}} \quad (3.27)$$

$$\dot{v}_{P_{\text{VKM}}} p_{1,\text{GEN}} \frac{P_0 + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}} \eta_{\text{LAD}}} < \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{\text{VKM}}} (P_{\text{GTR}} + P_0) \quad (3.28)$$

Gl. (3.28) lässt sich gut grafisch darstellen und interpretieren: In **Abbildung 3.13** ist der Kraftstoffvolumenstrom (\dot{V}) als Funktion der Getriebeeingangsleistung (P_{GTR}) aufgetragen. Die Grafik links oben stellt den Verbrauch für elektrisch Fahren aus Lastpunktanhebung dar, die Grafik rechts oben repräsentiert den Verbrauch beim verbrennungsmotorischen Fahren. Der Schnittpunkt beider Verbräuche ergibt die E-Fahren-Grenze (Grafik unten in der Mitte) qualitativ bei einer Drehzahl.

Man kann erkennen, woher Hybridfahrzeuge einen Teil ihres Verbrauchspotenzials schöpfen: Die Null-Leistungsverluste ($P_{\text{GTR}} = 0$) sind beim E-Fahren geringer als beim VKM-Fahren. Der lastabhängige Verbrauch steigt beim E-Fahren auf Grund der langen Wirkungsgradkette⁴ stärker als beim VKM-Fahren.

⁴Falls die Energie zum E-Fahren nicht durch Rekuperation gewonnen wird, muss sie die Wirkungsgradkette Verbrennungskraftmaschine, elektrische Maschine als Generator, Traktionsspeicher und elektrische Maschine bis zum Getriebeeingang durchlaufen.

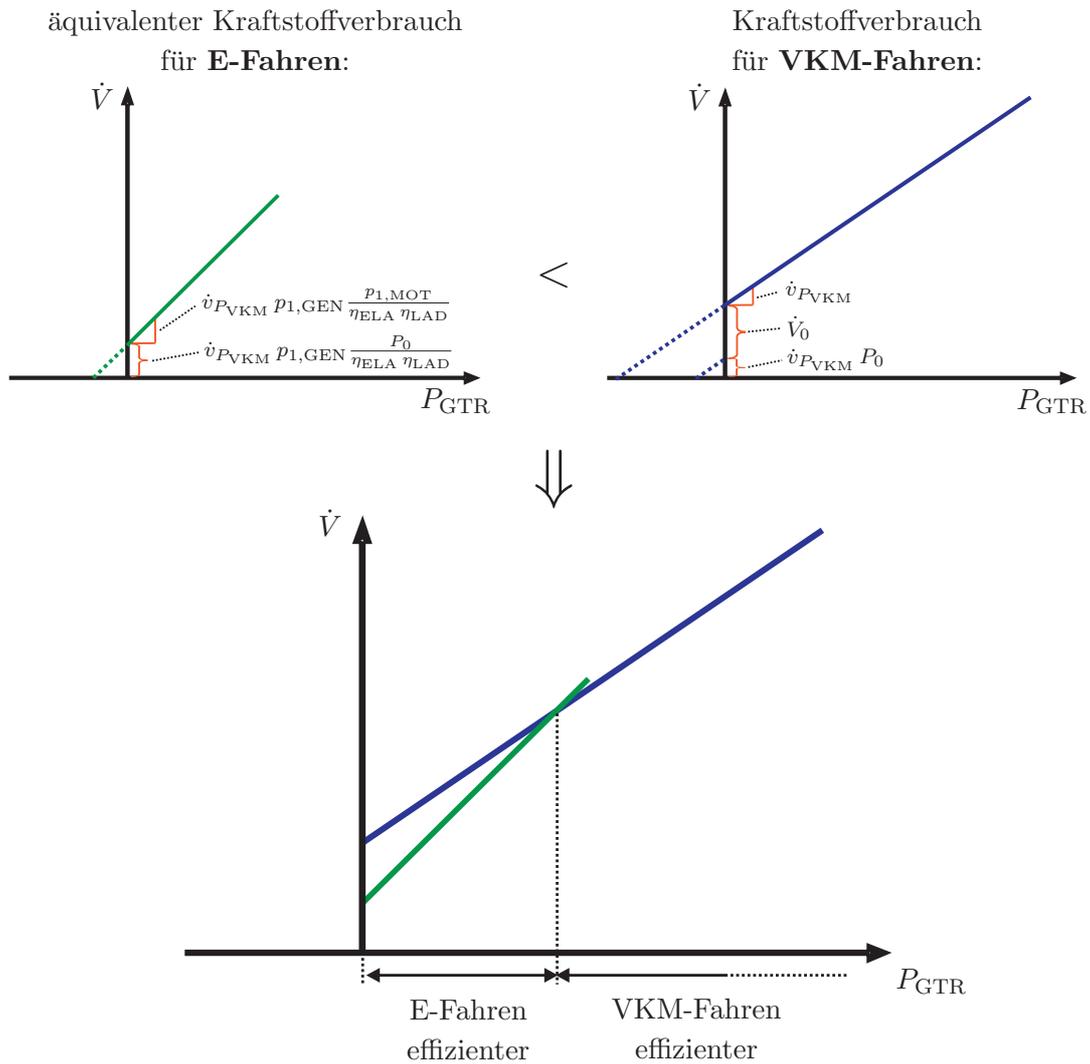


Abbildung 3.13: E-Fahren-Grenze. Qualitative Darstellung des äquivalenten Kraftstoffvolumenstroms \dot{V} für E-Fahren und VKM-Fahren nach Gl. (3.28) bei einer konstanten Drehzahl. Bei geringen Lasten ist der elektromotorische Antrieb zu bevorzugen, bei großen Lasten weist der verbrennungsmotorische Betrieb den geringeren Verbrauch auf. Die E-Fahren-Grenze ist der Schnittpunkt von \dot{V} für E-Fahren und \dot{V} für VKM-Fahren.

Bringt man P_0 in Gl. (3.28) von der rechten auf die linke Seite, so erhält man

$$\dot{v}_{P_{VKM}} \left(p_{1,GEN} \frac{P_0 + p_{1,MOT} P_{GTR}}{\eta_{ELA} \eta_{LAD}} - P_0 \right) < \dot{V}_0 + \dot{v}_{P_{VKM}} P_{GTR}. \quad (3.29)$$

Mit dieser Darstellung kann die E-Fahren-Grenze direkt in das Kennfeld der VKM (Abbildung 3.2) übertragen werden, da die rechte Seite der Näherung für die Willans-Linie der VKM nach Gl. (3.4) bei der Leistung P_{GTR} und einer bestimmten Drehzahl entspricht.

Die linke Seite in Gl. (3.29)

$$\underbrace{\dot{\nu}_{P_{\text{VKM}}}}_{(a)} \left(\underbrace{\frac{p_{1,\text{GEN}}}{\eta_{\text{LAD}}}}_{(a)} \underbrace{\frac{P_0 + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}}}}_{(b)} - \underbrace{P_0}_{(c)} \right). \quad (3.30)$$

kann wie folgt interpretiert werden:

Term (a) beschreibt die *Lastpunktanhebung*, also die Kette vom Verbrennungsmotor ($\dot{\nu}_{P_{\text{VKM}}}$) über die elektrische Maschine als Generator ($p_{1,\text{GEN}}$) bis zum Traktionsspeicher (η_{LAD}).

Term (b) repräsentiert das *E-Fahren*, also die Kette vom Traktionsspeicher (η_{ELA}) über die elektrische Maschine als Motor ($P_0, p_{1,\text{MOT}}$) bis zum Eingang des Getriebes (P_{GTR}).

Term (c) ist gleich den Null-Leistungsverlusten der EMA P_0 . Sie treten bei einer PSM im Antriebsstrang auch beim VKM-Fahren auf und sind (wegen des negativen Vorzeichens) vorteilhaft für das E-Fahren.

3.3.5.2 Elektrisch Fahren bei der Asynchronmaschine (ASM)

Analog zu Abschnitt 3.3.5.1 kann man auch für die ASM die E-Fahren-Grenze bestimmen. Die einzelnen Rechenschritte, wie sie im Abschnitt 3.3.5.1 für die PSM durchgeführt wurden sollen nicht weiter vertieft werden.

Ergebnis für die ASM. Für die E-Fahren-Grenze erhält man

$$\dot{\nu}_{P_{\text{VKM}}} \left(p_{1,\text{GEN}} \frac{P_{0,\text{EF}} + p_{1,\text{MOT}} P_{\text{GTR}}}{\eta_{\text{ELA}} \eta_{\text{LAD}}} - P_{0,\text{LAN}} \frac{\Delta\tau_{\text{LAN}}}{\Delta\tau_{\text{EF}}} \right) < \dot{V}_0 + \dot{\nu}_{P_{\text{VKM}}} P_{\text{GTR}}. \quad (3.31)$$

$P_{0,\text{EF}}$ und $P_{0,\text{LAN}}$ sind die Null-Leistungsverluste der elektrischen Maschine beim elektrischen Fahren (EF) und beim Lastpunkt Anheben (LAN). Anders als bei der PSM, spielt bei der ASM die Zeitdauer für Lastpunktanhebung $\Delta\tau_{\text{LAN}}$ eine Rolle. Der Grund dafür ist einfach erklärt: Wird die ASM nicht benötigt, so kann man sie entmagnetisieren und es treten nur geringe Null-Leistungsverluste auf. Dies ist bei der PSM nicht möglich, sodass auch im Schleppbetrieb signifikante Verluste auftreten. Daher ist es bei der ASM sinnvoll, Lastpunktanhebung über kurze Zeiträume mit höheren Leistungen zu betreiben und sie über längere Zeiten entmagnetisiert zu lassen. Dadurch werden die Null-Leistungsverluste während der Lastpunktanhebung $P_{0,\text{LAN}} \Delta\tau_{\text{LAN}}$ reduziert.

3.3.5.3 Zusammenfassung zum elektrischen Fahren mittels Energie aus Lastpunktanhebung

Trägt man die E-Fahren-Grenze für die PSM laut Gl. (3.29) und für die ASM laut Gl. (3.31) in das Verbrauchskennfeld der VKM (Abbildung 3.2) für jede Drehzahl ein, so erhält man **Abbildung 3.14**. Die PSM weist dabei einen größeren E-Fahrenbereich als die ASM auf.

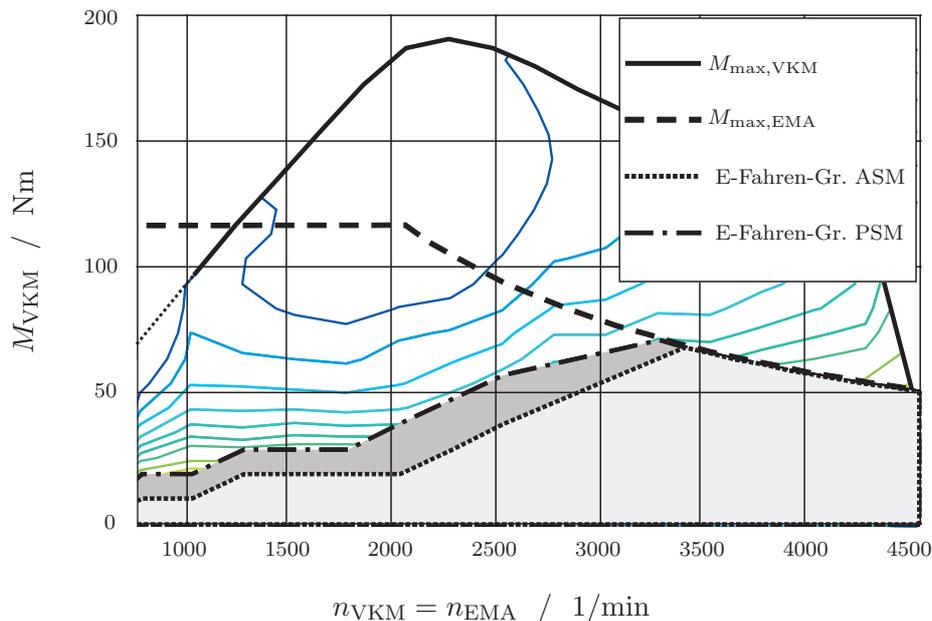


Abbildung 3.14: E-Fahren-Grenze bei Energie aus Lastpunktanhebung für ASM und PSM. Dargestellt ist das Verbrennungsmotorkennfeld aus Abbildung 3.2. Die grau eingezeichneten Kennfeldbereiche kennzeichnen wo E-Fahren verbrauchsgünstiger ist als VKM-Fahren. Es liegen die Gln. (3.29) und (3.31) und die Kennfelder der Komponenten aus Abschnitt 3.2 zugrunde [74].

3.4 Konventionelles Energiemanagement

Aus den vorangegangenen Abschnitten 3.2-3.3 können folgende Erkenntnisse für das Energiemanagement zusammengefasst werden:

- ◇ Der Vorteil eines Hybridfahrzeugs gegenüber eines konventionellen Fahrzeugs ist die Möglichkeit, die Verbrennungskraftmaschine im Betrieb abzuschalten und dadurch ihren Null-Leistungsverbrauch \dot{V}_0 zu sparen. Dies lohnt sich in der Rekuperation, im Stillstand (Motorstart/-stopp) und bis zur E-Fahren-Grenze nach Abschnitt 3.3.5.
- ◇ Überschüssige Energie im Traktionsspeicher, die aus Rekuperation gewonnen wurde, soll primär für E-Fahren und Bordnetz Versorgen ausgegeben werden. Lastpunktabsenkung ist weniger effizient, weil dabei nach Abschnitt 3.3.3 sowohl der Null-Leistungsverbrauch der VKM \dot{V}_0 als auch die Null-Leistungsverluste des EMA P_0 auftreten.
- ◇ Lastpunktanhebung ist bei einer PSM und dem hier untersuchten Verbrennungsmotor über weite Bereiche unabhängig vom Betriebspunkt der VKM. Durch Lastpunktanhebung wird zwar der absolute Wirkungsgrad der VKM verbessert, der relative

Wirkungsgrad bleibt jedoch nahezu gleich⁵.

Dass eine analytische Betriebsstrategie, welche auf heuristischen Annahmen beruht, zulässig ist, zeigt [112]. In dieser Arbeit werden eine analytische und eine optimierte Betriebsstrategie für einen leistungsverzweigten Hybriden miteinander verglichen. Die Schlussfolgerung ist, dass eine Optimierung keinen nennenswerten Verbrauchsvorteil aufweist und in Summe die Nachteile einer Online-Optimierung im Fahrzeug deutlich überwiegen. Mit einem guten Systemverständnis lassen sich deutlich einfachere Algorithmen entwickeln, die die Anforderungen an das Energiemanagement besser erfüllen⁶.

3.4.1 Konventionelles Energiemanagement bei Full Hybrids

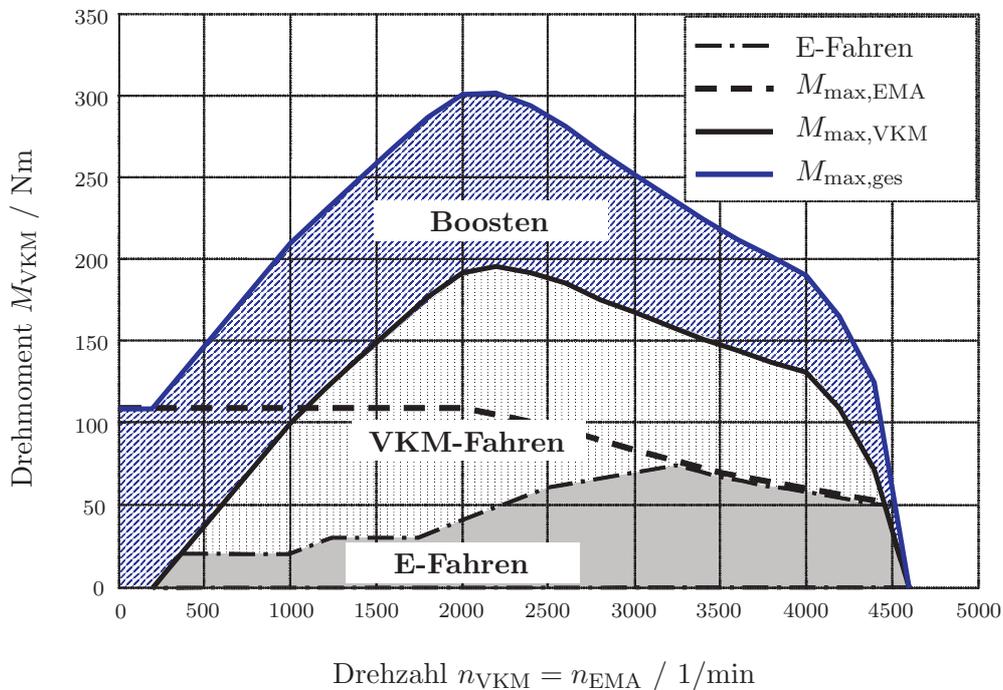


Abbildung 3.15: Betriebsstrategie bei optimalem Ladezustand für die PSM. Bei Lasten bis zur E-Fahren-Grenze nach Gl. (3.29) wird elektrisch gefahren (grauer Bereich analog Abbildung 3.14). Bei mittleren Lasten wird das Fahrzeug mit der Verbrennungskraftmaschine angetrieben (gepunkteter Bereich), zusätzlich wird der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC mittels Lastpunktverschiebung auf seinen Zielwert geregelt. Oberhalb des maximalen Drehmoments der VKM $M_{max,VKM}$ wird das Hybridfahrzeug bis zu seinem maximalen Drehmoment $M_{max,ges} = M_{max,VKM} + M_{max,EMA}$ mit beiden Antrieben angetrieben.

⁵Der absolute Wirkungsgrad der VKM verbessert sich, weil auf Grund der besseren Auslastung der VKM der Anteil des Null-Leistungsverbrauchs am Gesamtverbrauch sinkt.

⁶Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher! [Albert Einstein]

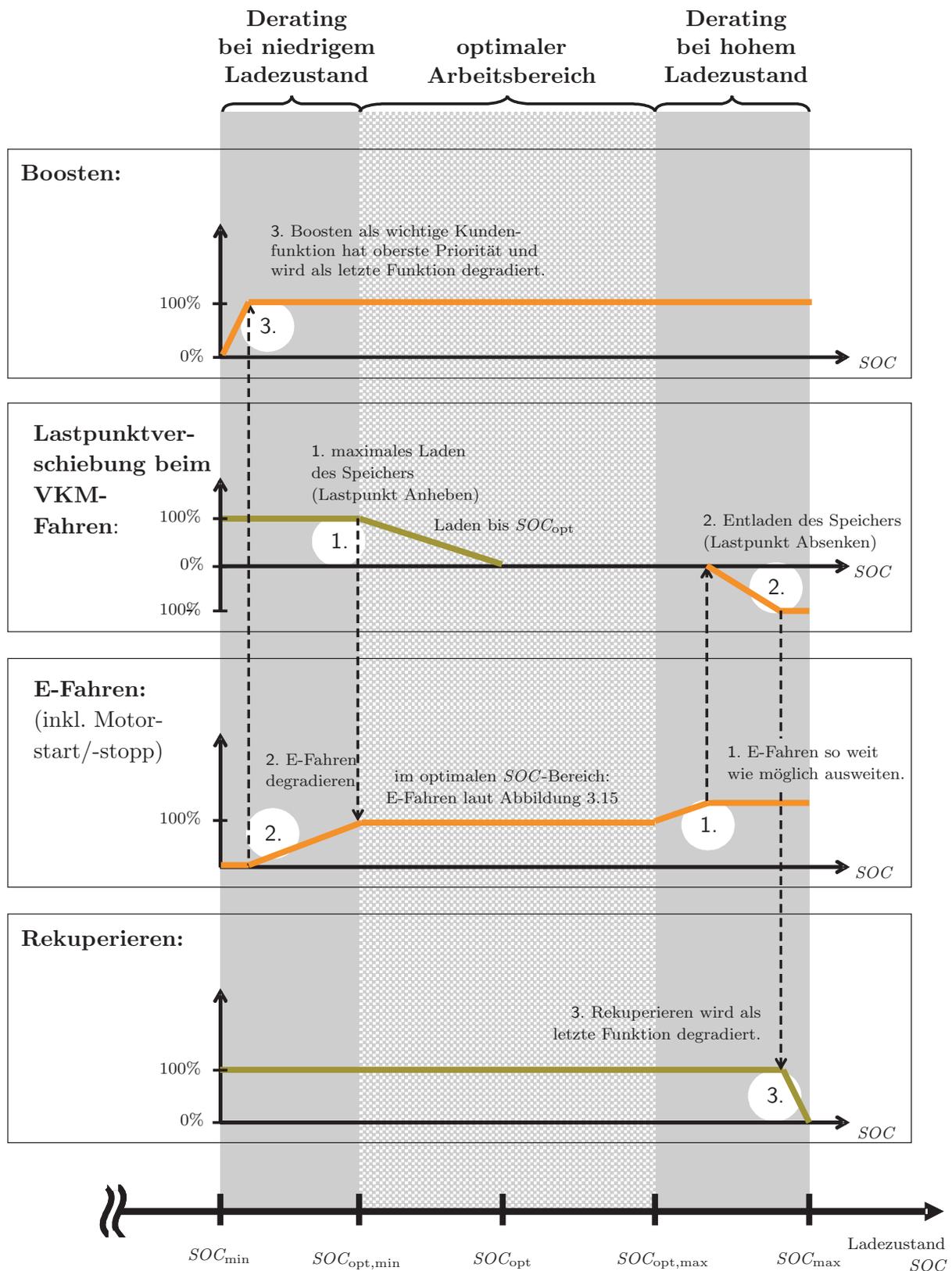


Abbildung 3.16: Betriebsstrategie der Betriebsmodi beim Full Hybrid. Im Bereich zwischen $SOC_{opt,min}$ und $SOC_{opt,max}$ wird zwischen den Betriebsmodi analog Abbildung 3.15 gewechselt. Grün eingezeichnete Funktionen laden den Traktionspeicher, orange eingezeichnete Funktionen entladen ihn. Außerhalb des optimalen SOC-Bereichs müssen die Betriebsmodi entsprechend ihrer Priorisierung in der angegebenen Reihenfolge (1., 2. und 3.) angepasst bzw. degradiert werden.

Wie Abschnitt 3.3.5 gezeigt hat, kann der E-Fahren-Bereich analytisch bestimmt werden. In **Abbildung 3.15** ist - auf das Kennfeld der Verbrennungskraftmaschine bezogen - dargestellt, in welchem Bereich welcher Betriebsmodus gewählt wird:

- ◇ Liegt der angeforderte Betriebspunkt unterhalb der E-Fahren-Grenze, so wird elektrisch gefahren.
- ◇ Liegt der angeforderte Betriebspunkt oberhalb der E-Fahren-Grenze, so wird verbrennungsmotorisch gefahren und der Lastpunkt zum Laden und Entladen des Traktionspeichers verschoben.
- ◇ Liegt der angeforderte Betriebspunkt außerhalb der Maximalkurve der VKM(M_{\max} in **Abbildung 3.2**), so wird geboostet.
- ◇ Ist das angeforderte Drehmoment negativ, so wird rekuperiert.

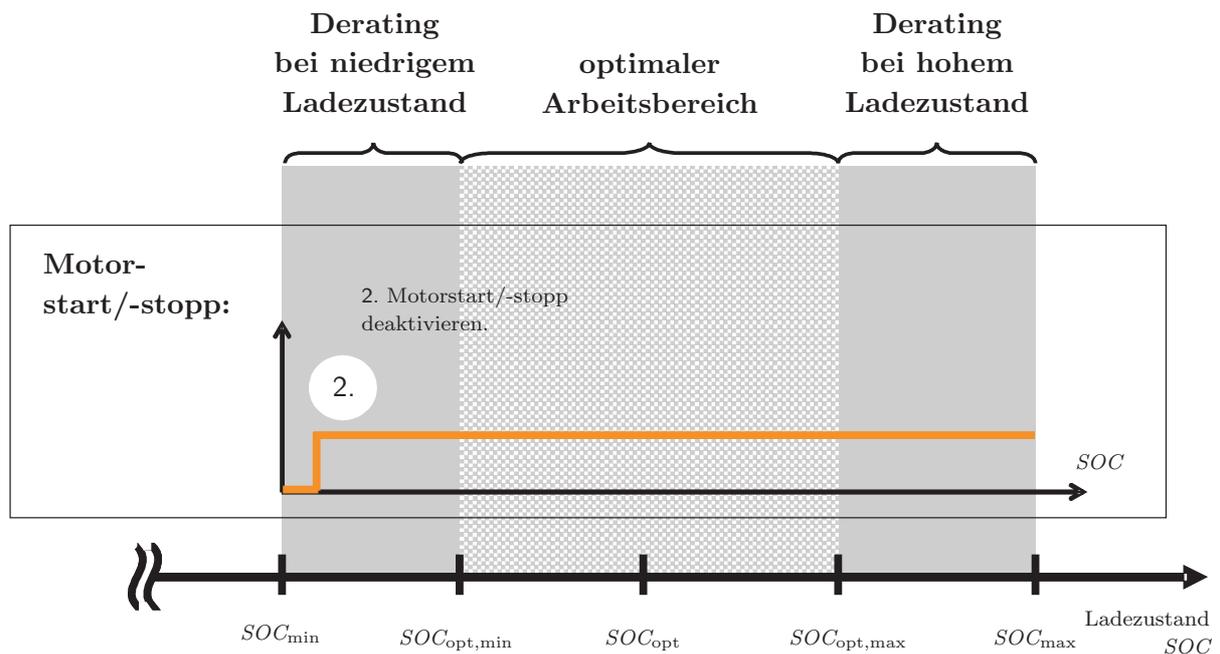
Je nach Fahrstrecke, Fahrstil etc. kann es jedoch zu einem Energieüberschuss auf Grund rekuperierter Energie oder zu einem Energiedefizit auf Grund elektrisch Fahren bzw. Boosten kommen. In diesem Fall müssen die Betriebsmodi angepasst bzw. degradiert werden. **Abbildung 3.16** zeigt die entsprechende Betriebsstrategie.

3.4.1.1 Energieüberschuss: Derating bei hohem Ladezustand

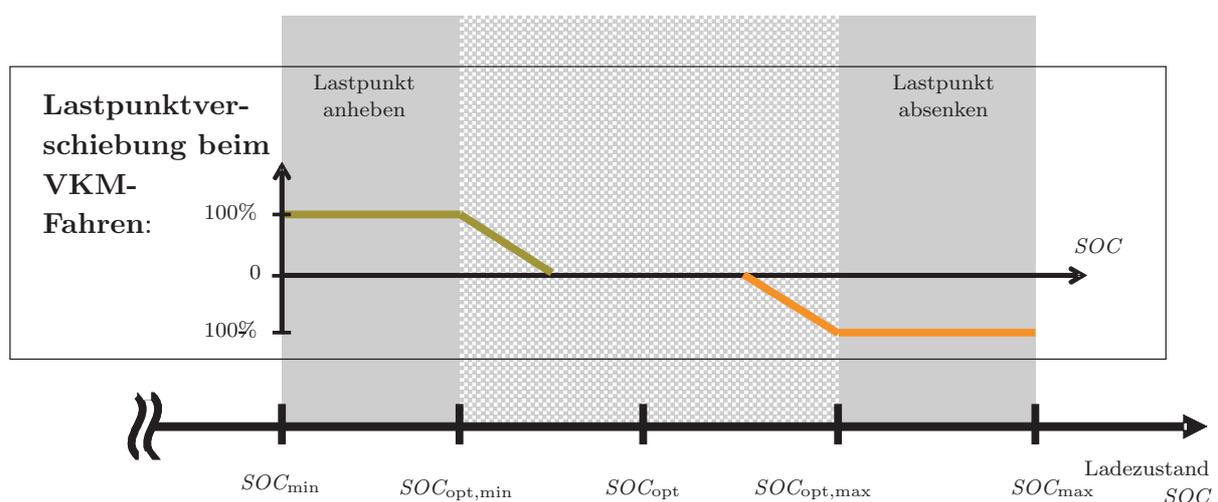
Kommt es zum Beispiel bei einer langen Bergabfahrt auf Grund der Rekuperation zu einem Energieüberschuss, so steigt der Ladezustand im Traktionsspeicher an. Die überschüssige Energie kann nun zum elektrisch Fahren und zum Lastpunkt Absenken eingesetzt werden. Elektrisch Fahren ist die energetisch günstigere Alternative, da in diesem Fall geringere Verluste auftreten (vgl. Abschnitt 3.3.4). Folglich wird bei steigendem *SOC* elektrisch Fahren so weit wie möglich ausgeweitet⁷ (1. in **Abbildung 3.16**).

Steigt der Ladezustand auf Grund rekuperierter Energie weiter an, so wird die Energie zusätzlich zum Lastpunkt Absenken ausgegeben (2. in **Abbildung 3.16**). Reicht auch das nicht aus, den Ladezustand entsprechend abzusenken, erfolgt als letzte Möglichkeit ein Derating der Rekuperation (3. in **Abbildung 3.16**). In diese Fall muss auf kostbare rekuperierbare Energie verzichtet werden. Hat der Full Hybrid die Möglichkeit, diese Situation frühzeitig zu prognostizieren, etwa durch eine Streckenvorausschau, so kann rechtzeitig begonnen werden, den Ladezustand abzusenken. Ein solches präditives Energiemanagement wird in Kapitel 5 vorgestellt.

⁷Elektrisch Fahren ausweiten bedeutet, dass die E-Fahren-Grenze in **Abbildung 3.15** mit steigendem *SOC* immer mehr zu hohen Lasten hin verschoben wird, bis man an der Grenze des elektrischen Antriebs angelangt ist.



(a) **elektrisch Fahren beschränkt sich auf Motorstart/-stopp.** Derating bedeutet, dass der Verbrennungsmotor bei Fahrzeugstillstand nicht mehr abgeschaltet werden kann, da der Traktionspeicher nicht mehr genügend Energieinhalt hat um das Bordnetz zu versorgen und den Verbrennungsmotor wieder zu starten.



(b) **Lastpunktverschiebung beim Mild Hybrid.** Es wird berücksichtigt, dass elektrisch Fahren beim Mild Hybrid nicht verfügbar steht und dadurch weder ausgeweitet noch eingeschränkt werden kann.

Abbildung 3.17: Änderungen in der Betriebsstrategie des Mild Hybrids. Elektrisch Fahren wird durch Motorstart/-stopp ersetzt und die Lastpunktverschiebung wird angepasst.

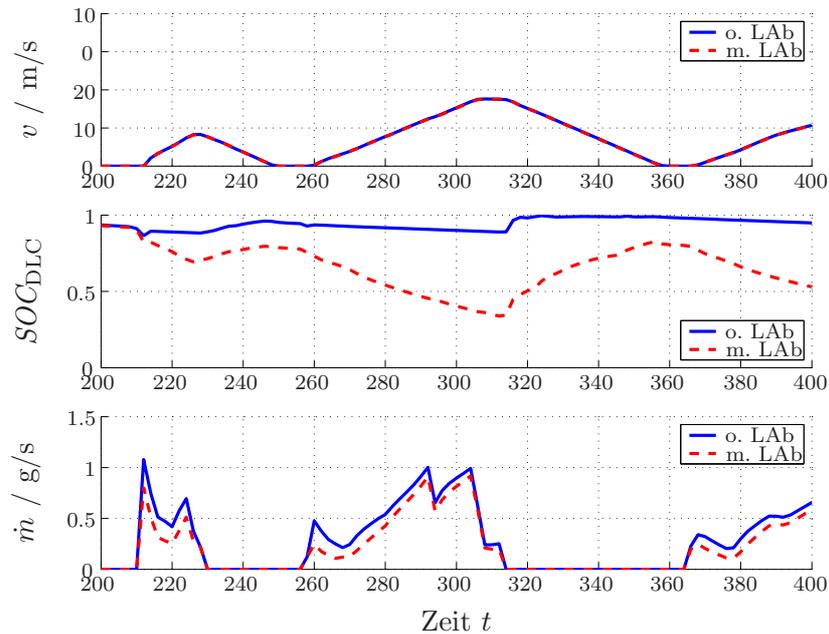


Abbildung 3.18: Die Verläufe von Geschwindigkeit v , Ladezustand des Doppelschichtkondensators SOC_{DLC} und Kraftstoffmassenstrom der VKM \dot{m} zeigen, wie durch Lastpunktabsenkung die VKM entlastet und folglich Kraftstoff gespart wird (m. LAb: mit Lastpunktabsenkung, o. LAb: ohne Lastpunktabsenkung).

3.4.1.2 Energiedefizit: Derating bei niedrigem Ladezustand

Die Betriebsstrategie wird so ausgelegt, das bis zu einem Ziel-Ladezustand SOC_{opt} der Traktionsspeicher während VKM-Fahren durch Lastpunktanhebung geladen wird (1. in Abbildung 3.16). In Phasen, wo vermehrt elektrisch gefahren oder geboostet wird, kann es (etwa in einem Stau) zu einem Defizit an elektrischer Energie kommen. In diesem Fall können die energetisch optimalen E-Fahren-Bereiche nicht mehr gehalten werden und elektrisch Fahren muss degradiert werden⁸ (2. in Abbildung 3.16), was einen erhöhten Kraftstoffverbrauch zur Folge hat. Kann auch mit dieser Maßnahme der Ladezustand des Traktionsspeichers nicht ausreichend angehoben werden, so ist auch ein Derating der Funktion Boosten erforderlich, was Einschränkungen in der Fahrleistung mit sich bringt (3. in Abbildung 3.16).

Wie ein Energieüberschuss kann auch ein Energiedefizit durch ein präditives Energiemanagement für Full Hybrids (Kapitel 5) abgefangen werden.

⁸Elektrisch Fahren degradieren bedeutet, dass die E-Fahren-Grenze in Abbildung 3.15 mit sinkendem SOC immer mehr zu niedrigen Lasten hin verschoben wird, bis elektrisch Fahren und Motorstart/-stopp ganz deaktiviert werden.

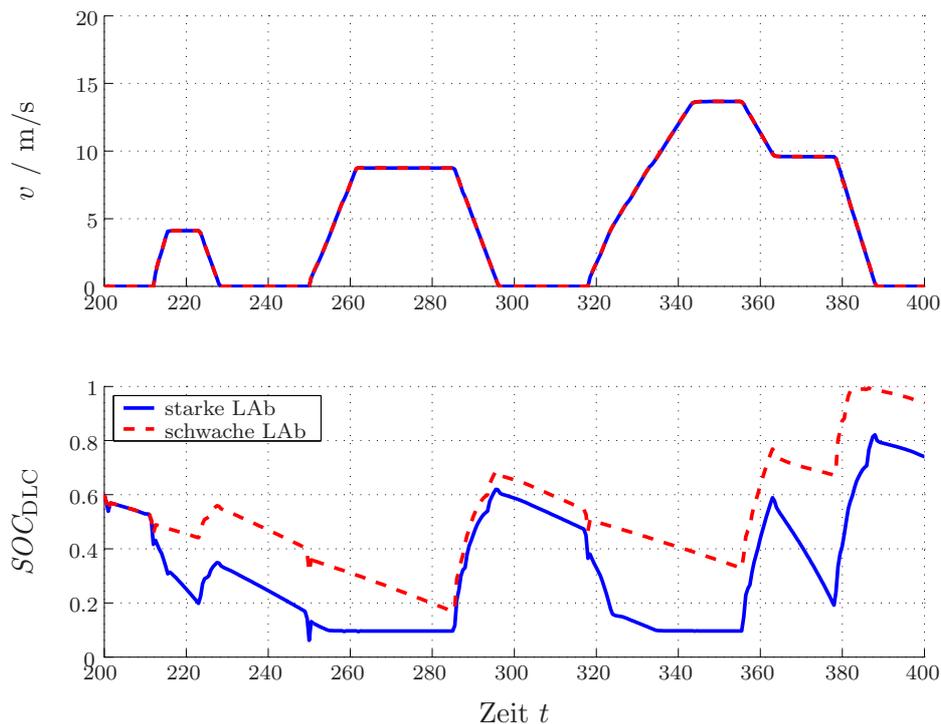


Abbildung 3.19: Applikation der Lastpunktabsenkung. Dargestellt ist der Ladezustand SOC_{DLC} bei zu starker und bei zu schwacher Lastpunktabsenkung (LAb). Dies führt sehr leicht zu einem Energieüberschuss bzw. -defizit. Mit einem adaptive Energiemanagement für Mild Hybrids (Kapitel 4) kann die Lastpunktverschiebung an die verfügbare Rekuperation angepasst werden.

3.4.2 Konventionelles Energiemanagement bei Mild Hybrids

Die Betriebsstrategie für den Mild Hybrid kann ähnlich der Betriebsstrategie des Full Hybrids gestaltet werden. Der größte Unterschied besteht im elektrischen Fahren, das beim Mild Hybrid auf Motorstart/-Stopp ($v = 0$) beschränkt ist, da elektrisch Fahren in der Auslegung des Mild Hybrid nach Abschnitt 1.2.3.2 nicht vorgesehen ist. Die Änderungen gegenüber dem Full Hybrid zeigt **Abbildung 3.17**.

Neben der Versorgung des Bordnetzes ist also das Lastpunkt Absenken die einzige Möglichkeit, den Ladezustand des Traktionsspeichers zu senken, um genügend Vorhalt für rekuperierte Energie zu gewährleisten. Wie beim Mild Hybrid der Kraftstoffverbrauch durch Lastpunkt Absenken reduziert wird zeigt **Abbildung 3.18**.

Eine weitere Besonderheit des Bora Mild Hybrid ist der geringe Energieinhalt des Doppelschichtkondensators, vergleiche dazu Gl. (1.4). Wie **Abbildung 3.19** zeigt, macht es der geringe nutzbare Energieinhalt des Doppelschichtkondensators schwierig, die Lastpunktverschiebung optimal einzustellen: Ist die Leistung bei der Lastpunktabsenkung zu groß (starke LAb in **Abbildung 3.19**), so sinkt der Ladezustand sehr rasch ab und das Bordnetz muss in den Zeitbereichen $t = 260 - 280$ s und $t = 330 - 350$ s über Lastpunktanhebung

versorgt werden. Ist die Leistung bei der Lastpunktabenkung zu gering (schwache LAb in Abbildung 3.19), so führt dies zu einem Energieüberschuss und ab $t = 380s$ kann wegen des vollen Traktionsspeichers nicht mehr rekuperiert werden. Beide Applikationen resultieren in einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Kapitel 4 wird daher eine *adaptive Lastpunktverschiebung* für Mild Hybrids vorgestellt.

Kapitel 4

Adaptives Energiemanagement

Inhalt

4.1	Anforderungen an ein adaptives Energiemanagement	78
4.2	Adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE)	79
4.2.1	Prinzip des AEE	79
4.2.2	Adaption an die momentane Fahrsituation	81
4.2.3	Eingangsgrößen in das AEE	81
4.2.4	Ergebnis des AEE: Die adaptive Lastpunktverschiebung	89
4.3	Wahl der Bilanzzeit	90
4.4	Simulationsergebnisse	94
4.4.1	Ergebnisse im NEFZ	96
4.4.2	Ergebnisse im mNEFZ	98
4.4.3	Ergebnisse im BS-Zyklus	100
4.4.4	Ergebnisse im Hybrid-Zyklus	102
4.4.5	Ergebnisse im Stau-Zyklus	104
4.4.6	Ergebnisse im Harz-Zyklus	106
4.5	Schlussfolgerungen zum AEE	108

Im ersten Abschnitt werden die Motivation und die Kriterien für ein adaptives Energiemanagement diskutiert. Im Abschnitt 4.2 wird ein Algorithmus präsentiert, der das konventionelle Energiemanagement zu einem adaptiven elektrischen Energiemanagement (AEE) erweitert. Der Algorithmus ist speziell für Hybridfahrzeuge mit geringem Energieinhalt geeignet. Der Einfluss eines wichtigen Parameters, der Bilanzzeit, wird im Abschnitt 4.3

diskutiert, bevor Abschnitt 4.4 die Stärken und Schwächen des adaptiven Energiemanagements mittels Simulation aufzeigt.

4.1 Anforderungen an ein adaptives Energiemanagement

Bei der Darstellung des konventionellen Energiemanagements im Abschnitt 3.4 wurde aufgezeigt, dass der begrenzte Energieinhalt des Traktionsspeichers zu einem Überschuss bzw. Defizit an elektrischer Energie führen kann. Als Folge ist ein Derating von Hybridfunktionen¹ unvermeidlich. Beim Kunden führt dies zu Einschränkungen bzgl. Kraftstoffverbrauch, Fahrleistung oder Komfort. Um auf Situationen mit Energieüberschuss bzw. -defizit reagieren zu können, wurde ein adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE) entwickelt.

Untersucht wurden Signalanalyse-Verfahren, die auch in der Regelungs- und Nachrichtentechnik angewandt werden². Folgende Anforderungen wurden an das Verfahren gestellt:

- ◇ **Schnelle Adaption:** Ein wesentlicher Punkt ist die Zeit, die das Verfahren benötigt, um sich an einen Energieüberschuss bzw. ein Energiedefizit anzupassen. Es hat sich gezeigt, dass Verfahren, die sich direkt an der Energiebilanz orientieren, besonders effektiv sind.
- ◇ **Kostengünstige Umsetzung:** Damit das adaptive Energiemanagement auch in Fahrzeugen ohne Navigations- und Kommunikationssysteme eingesetzt werden kann, soll der Algorithmus auf keinerlei Informationen über Straßentyp, Verkehrsdichte etc. angewiesen sein, vgl. dazu Abbildung 1.13. Solche Informationen nutzt dagegen das prädiktive Energiemanagement in Kapitel 5.
- ◇ **Anwendbarkeit auf Zyklen im realen Straßenverkehr:** Das Verfahren soll nicht nur bei genormten Zyklen, die oft einen periodischen Geschwindigkeitsverlauf aufweisen (vgl. dazu den NEFZ im Abschnitt 2.2.1), sondern auch im realen Straßenverkehr gute Ergebnisse liefern.
- ◇ **Signifikanz der Analyse:** Das Ergebnis des entwickelten Algorithmus soll direkt in das Energiemanagement des Hybridfahrzeugs einfließen. Etwaige Zwischenebenen sollten möglichst vermieden werden.

¹Nach Abschnitt 3.4 müssen bei einem Energiedefizit elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten eingeschränkt werden, bei einem Energieüberschuss wird die Rekuperation degradiert.

²Unter anderem wurden Mittelwert & Varianz der Zeitverläufe von SOC, Bremsenergie und Geschwindigkeit untersucht. Weiters wurden die Wavelet-Analyse, die Signalfilterung, die rekursive harmonische Analyse, die Frequenzanalyse und die Fouriertransformation [113, 114, 115, 116, 117, 118] in Betracht gezogen.

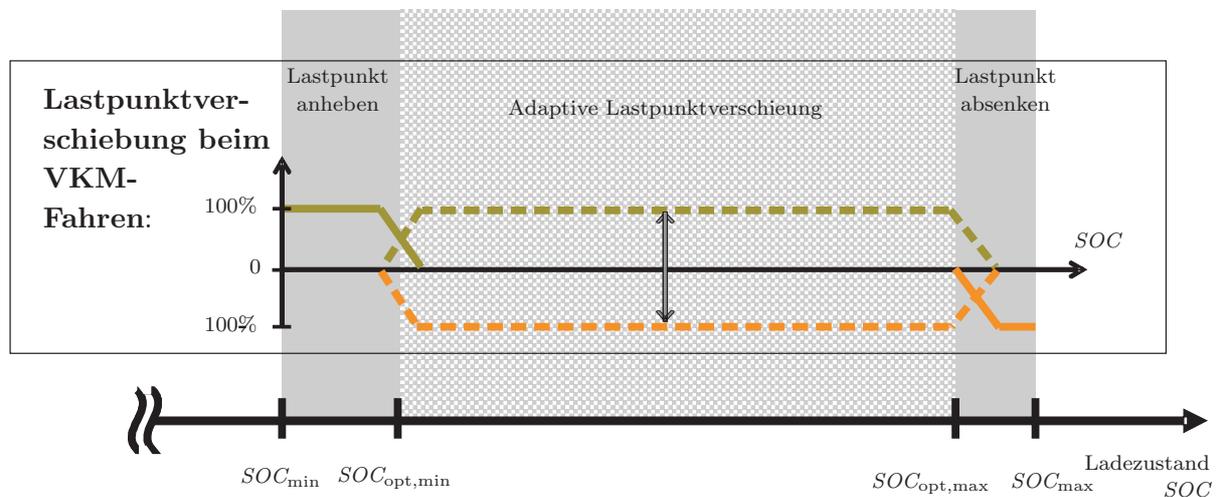


Abbildung 4.1: Lastpunktverschiebung beim AEE. Als Ausgangsbasis gilt das konventionelle Energiemanagement für den Mild Hybrid nach Abschnitt 3.4, vgl. dazu Abbildung 3.17. Beim konventionellen Energiemanagement wird der SOC stets in einem mittleren Bereich zwischen $SOC_{opt,min}$ und $SOC_{opt,max}$ gehalten, um Energie für Rekuperieren, Boosten und Versorgen des Bordnetzes zur Verfügung zu haben. Beim adaptiven Energiemanagement wird der *optimale SOC-Bereich* zwischen $SOC_{opt,min}$ und $SOC_{opt,max}$ im Vergleich zu Abbildung 3.17 *ausgeweitet* und durch eine *adaptive Lastpunktverschiebung* aufgefüllt. Je nach Situation wird in dem SOC-Band der Lastpunkt angehoben oder abgesenkt.

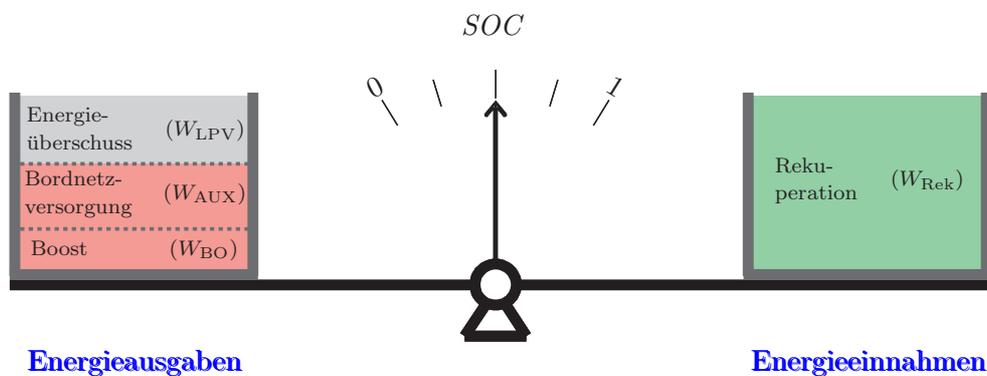
- ◇ **Implementierbarkeit:** Das Verfahren soll weder bzgl. Rechenzeit noch Speicherbedarf aufwendig sein, da es auf einem Steuergerät im Fahrzeug in Echtzeit laufen muss.

Dabei hat das im nun folgenden Abschnitt 4.2 vorgestellte adaptive elektrische Energiemanagement (AEE) die Anforderungen am Besten erfüllt.

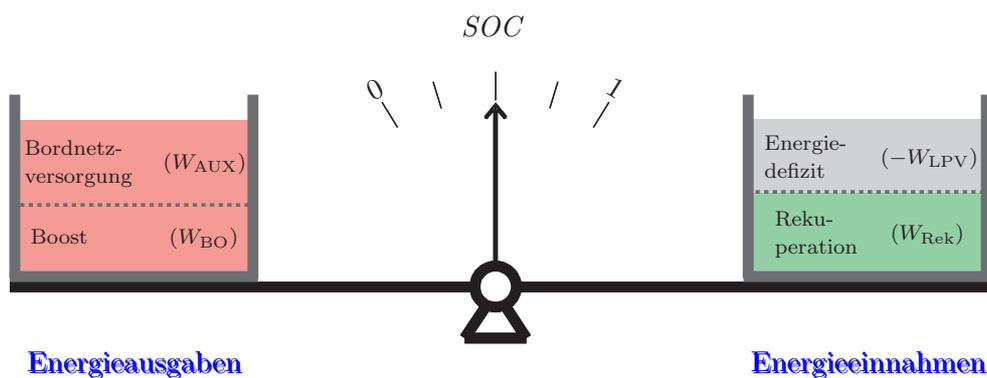
4.2 Adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE)

4.2.1 Prinzip des AEE

Bei der Betriebsstrategie des adaptiven elektrischen Energiemanagements wird die Lastpunktverschiebung entsprechend **Abbildung 4.1** adaptiv gestaltet. Wie **Abbildung 4.2** zeigt, gleicht das AEE analog einer Waage die Differenz zwischen der zur Verfügung stehenden Energie auf der einen Seite (Einnahmen) und der auszugebenden Energie auf der



(a) Bei einem **Energieüberschuss** erreicht man durch *Lastpunktabsenkung* (W_{LPV}) am Verbrennungsmotor eine ausgeglichene Energiebilanz.



(b) Bei einem **Energiedefizit** erreicht man durch *Lastpunktanhebung* ($-W_{LPV}$) am Verbrennungsmotor eine ausgeglichene Energiebilanz.

Abbildung 4.2: Prinzip der adaptiven Lastpunktverschiebung beim Mild-Hybrid. Damit für die Funktionen Boosten, Bordnetz Versorgen und Rekuperieren der Speicher stets richtig konditioniert ist, sorgt die Lastpunktverschiebung (Lastpunktanhebung bzw. -absenkung) für eine ausgeglichene Energiebilanz im Traktionspeicher.

anderen Seite (Ausgaben) durch Lastpunktanheben bzw. -absenken aus.

Beim AEE werden dazu die Energien für die Hybridfunktionen Boosten W_{BO} , Rekuperieren (W_{Rek}) und Bordnetz Versorgen (W_{AUX}) am Traktionspeicher bilanziert. Die Energiebilanz nach Abbildung 4.2 ist gegeben durch

$$W_{AUX} + W_{LPV} + W_{BO} = W_{Rek}, \quad (4.1)$$

wobei W_{LPV} die Energie für Lastpunktverschiebung ist. W_{Rek} gibt die maximal mögliche Energie aus Rekuperation an. Daraus errechnet sich der Energieüberschuss bzw. das Energiedefizit

$$W_{LPV} = W_{Rek} - (W_{AUX} + W_{BO}), \quad (4.2)$$

welches durch Lastpunktverschiebung ausgeglichen werden muss. Ist W_{LPV} positiv, so muss der Lastpunkt abgesenkt werden, ist W_{LPV} negativ so erreicht man durch Lastpunktanhebung eine ausgeglichene Energiebilanz.

4.2.2 Adaption an die momentane Fahrsituation

Eine Adaption³ der Energiebilanz nach Gl. (4.2) erreicht man indem man die Bilanz über einen Zeitraum t_{Bilanz} in der unmittelbaren Vergangenheit bildet. Dazu werden die Leistung der Bordnetzversorgung P_{AUX} , die Rekuperationsleistung $P_{Rek,max}$ und die Boostleistung $P_{BO,max}$ über ein *zeitlich gleitendes Fenster* integriert

$$\begin{aligned} W_{LPV}(t) &= W_{Rek}(t) - W_{AUX}(t) - W_{BO}(t) \\ &= \left(\underbrace{\int_{t-t_{Bilanz}}^t P_{Rek,max}(\tau) d\tau}_{W_{Rek}(t)} - \underbrace{\int_{t-t_{Bilanz}}^t P_{AUX}(\tau) d\tau}_{W_{AUX}(t)} - \underbrace{\int_{t-t_{Bilanz}}^t P_{BO,max}(\tau) d\tau}_{W_{BO}(t)} \right). \end{aligned} \quad (4.3)$$

t gibt den momentanen Zeitpunkt an. **Abbildung 4.3** veranschaulicht die Gleichung grafisch.

Bevor im Abschnitt 4.2.4 die Berechnung der adaptiven Lastpunktverschiebung detailliert wird, behandelt Abschnitt 4.2.3 die Eingangsgrößen des AEE.

4.2.3 Eingangsgrößen in das AEE

Dieser Abschnitt erläutert wie die Eingangsgrößen (Bordnetzverbrauch, maximal mögliche Rekuperation und angeforderter Boost) zu bestimmen sind.

³aus *mLat.* adaptatio „Anpassung“ [29]. Mit Adaption ist eine Anpassung des Energiemanagements an die aktuelle Energiebilanz gemeint, vgl. Abbildung 1.12.

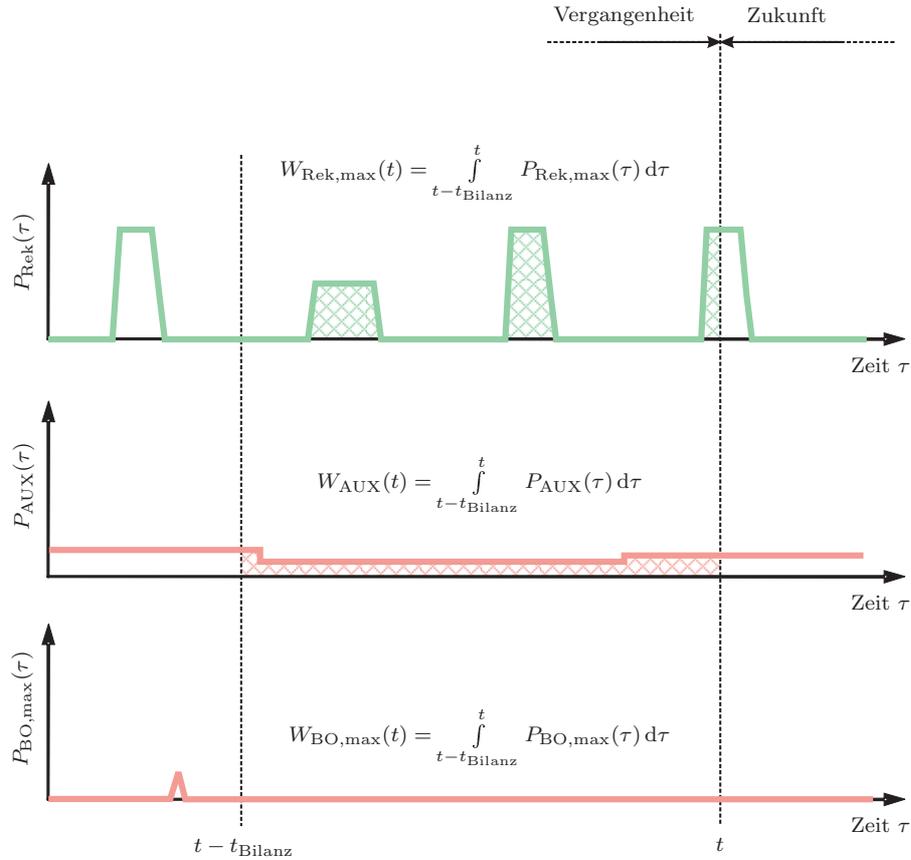


Abbildung 4.3: Adaption der Energiebilanz durch einen gleitenden Mittelwert. Der Algorithmus *lernt* den aktuellen Energiebedarf für die Hybridfunktionen Rekuperieren $W_{\text{Rek}}(t)$, Bordnetz Versorgen $W_{\text{AUX}}(t)$ und Boosten $W_{\text{BO}}(t)$ indem zum aktuellen Zeitpunkt t das Integral über das zurückliegende Zeitintervall $[t - t_{\text{Bilanz}}, t]$ gebildet wird.

4.2.3.1 Energie für Bordnetzversorgung

Wie in Abbildung 4.3 gezeigt, wird der Bordnetzverbrauch nach

$$W_{\text{AUX}}(t) = \int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t P_{\text{AUX}}(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

für das Zeitintervall $[t - t_{\text{Bilanz}}, t]$ bestimmt und so das AEE an diesen Bordnetzverbrauch angepasst. Dabei wird unterstellt, dass sich der Bordnetzverbrauch für das zukünftige Zeitintervall $[t, t + t_{\text{Bilanz}}]$ nicht wesentlich vom vergangenen Zeitintervall $[t - t_{\text{Bilanz}}, t]$ unterscheidet. Die Unsicherheit steckt vor allem im Fahrer, falls dieser elektrische Komfortverbraucher aktiviert. In diesem Fall dauert es t_{Bilanz} bis sich das Energiemanagement an den geänderten mittleren Verbrauch adaptiert hat. Eine weitere Unsicherheit steckt im Fahr-

zeug, da sich manche Verbraucher (z.B. Kühlerlüfter) aufgrund gewisser Randbedingungen ein- bzw. ausschalten.

Um hier eine rasche Adaption zu ermöglichen ist eine kurze Bilanzzeit t_{Bilanz} von Vorteil. Sie sollte jedoch so groß sein, dass übliche Schwankungen der Bordnetzlast⁴ gefiltert werden. Die Wahl von t_{Bilanz} wird im Abschnitt 4.3 noch genauer diskutiert.

Für die Energiebilanz muss auch der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers berücksichtigt werden, der das Bordnetz versorgt. Bei den Simulationen im Abschnitt 4.4 ist die Bordnetzlast stets konstant 500W.

4.2.3.2 Maximal mögliche Energie aus Rekuperation

W_{Rek} in Abbildung 4.3 gibt die maximal rekuperierbare Energie im Zeitintervall $[t - t_{\text{Bilanz}}, t]$ an. Sie ist nicht zwangsläufig gleich der tatsächlich rekuperierten Energie, da die Rekuperation durch einen zu vollen Energiespeicher eingeschränkt sein kann.

Die rekuperierbare Energie im Mild Hybrid ist durch zwei Faktoren begrenzt:

1. **Leistungsbegrenzung:** Es ist nur möglich soviel Leistung zurückzuspeisen wie es die maximale generatorische Leistung der elektrischen Maschine $P_{\text{max,gen,EMA}}$ bzw. die maximale Leistungsaufnahme des Traktionsspeichers⁵ $P_{\text{max,DLC}}$ zulassen. Die leistungsbegrenzte, rekuperierbare Leistung $P_{\text{Rek,P-begr}}$ ist gegeben durch

$$P_{\text{Rek,P-begr}} = P_{\text{br}} \in [0, \min(P_{\text{max,gen,EMA}}, P_{\text{max,DLC}})], \quad (4.5)$$

dabei steht P_{br} für die gesamte Bremsleistung, also die Summe aus Rekuperationsleistung und Bremsleistung am Rad.

2. **Energiebegrenzung:** Zum Zweiten ist die rekuperierbare Energie durch die Kapazität und den Ladezustand des Energiespeichers begrenzt. Ist der Speicher voll, so kann durch Rekuperation zwar noch der aktuelle Bordnetzbedarf gedeckt werden, ein Puffern ist aber nicht mehr möglich. Dient als elektrischer Energiespeicher ein Doppelschichtkondensator, kann ein leerer Kondensator bereits nach einigen Sekunden Rekuperation voll sein. Wie Gl. (1.4) zeigt ist ein leerer Speicher beim Mild Hybrid bereits nach ca. 8s Rekuperation voll.

Abbildung 4.4 zeigt Leistungs- und Energiebegrenzung anhand einer Simulation des modifizierten NEFZ nach Abschnitt 2.2.2.

⁴Der Leistungsbedarf für das Bordnetz schwankt beispielsweise durch PWM-geregelte Verbraucher oder durch den Scheibenwischer.

⁵Beim Mild Hybrid ist der Traktionsspeicher ein Doppelschichtkondensator (DLC).

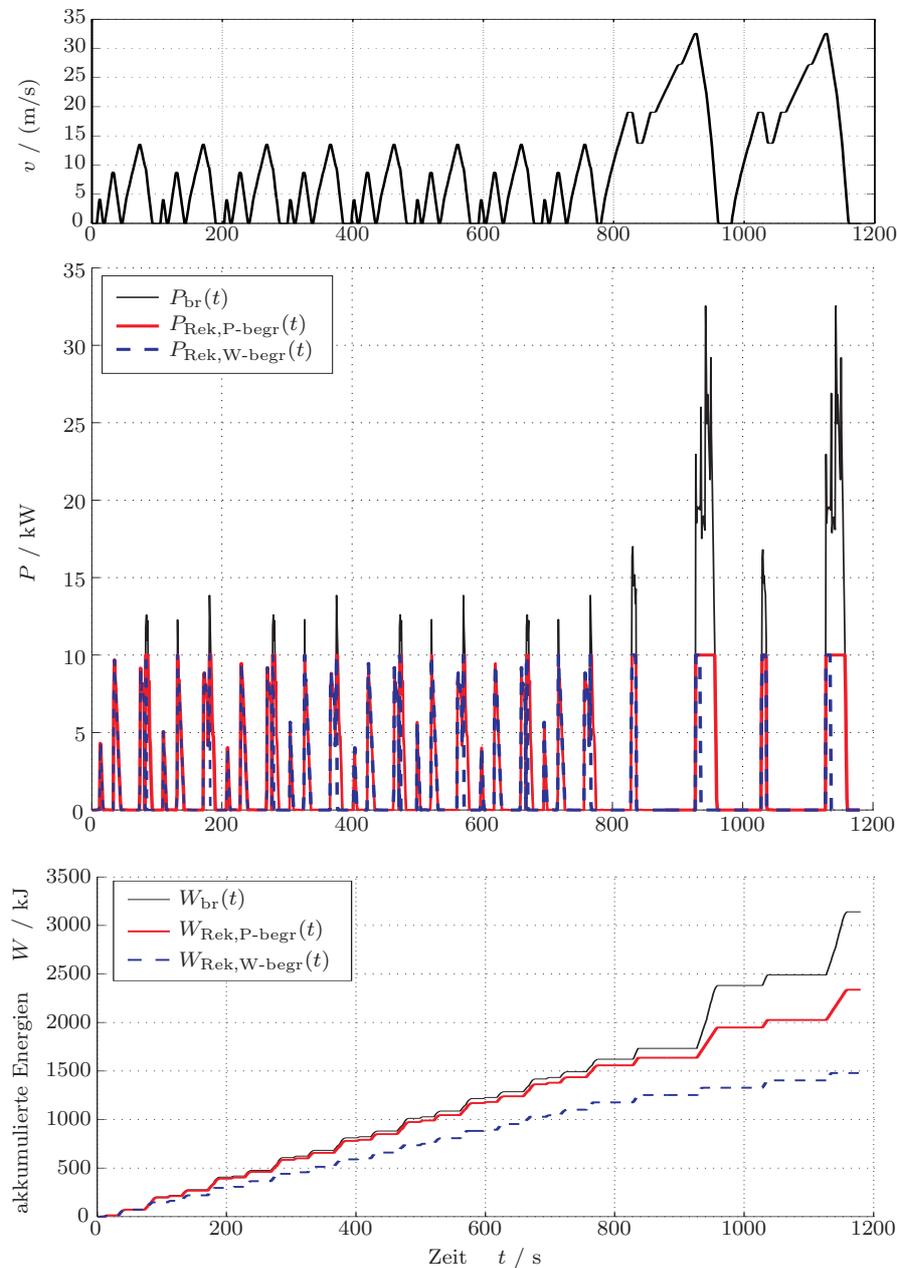


Abbildung 4.4: Modifizierter NEFZ und die dazugehörigen Bremsleistungen, begrenzt durch die maximale Leistung der elektrischen Maschine ($P_{Rek,P-begr}$) und durch den Energieinhalt des Kondensators ($P_{Rek,W-begr}$). Die akkumulierten Energien berechnen sich aus den dazugehörigen Leistungen $W_{br}(t) = \int_0^t P_{br}(\tau) d\tau$, $W_{Rek,P-begr}(t) = \int_0^t P_{Rek,P-begr}(\tau) d\tau$ und $W_{Rek,W-begr}(t) = \int_0^t P_{Rek,W-begr}(\tau) d\tau$.

Der Verlauf der gesamten Bremsleistung P_{Rek} weist Spitzen bis knapp 35kW auf. Durch die Maximalleistung der elektrischen Maschine ist diese Leistung auf $P_{\text{Rek,P-begr}}$ begrenzt. Berücksichtigt man weiters den maximalen Energiehub des DLC so kann nicht mehr als $P_{\text{Rek,W-begr}}$ gespeichert werden. Vor allem bei den zwei großen Bremsungen (bei $t = 950\text{s}$ und $t = 1150\text{s}$) geht viel Bremsenergie durch den zu kleinen Energiespeicher verloren.

Dies zeigen auch die akkumulierten Energien in Abbildung 4.4. Sie driften vor allem im außerstädtischen Bereich des Zyklus ($t > 780\text{s}$) deutlich auseinander. Der Grund dafür sind die großen Bremsleistungen und die großen Bremsenergien, die im außerstädtischen Fahrbetrieb auftreten. Sowohl die elektrische Maschine als auch der Energiespeicher stoßen hier an ihre Grenzen. Bei der gewählten Antriebsstrangkonfiguration kann nur etwa die Hälfte der gesamten Bremsenergie zurückgewonnen werden.

Bestimmen der maximal rekuperierbaren Energie. Dazu berechnet man aus Fahrzeugmasse m_{FZG} , Erdbeschleunigung g und der Haftreibungszahl μ_{HF} die maximale Bremskraft [42]

$$F_{\text{br,max}} = \mu_{\text{HF}} m_{\text{FZG}} g, \quad (4.6)$$

welche einem Bremspedal-Wert $k_{\text{BP}} = 1$ entspricht⁶. Die tatsächliche Bremskraft ist dann

$$F_{\text{br}} = k_{\text{BP}} F_{\text{br,max}}. \quad (4.7)$$

Analog der Rückwärtsrechnung (Abbildung 2.1) kann man aus der Bremskraft die Reku-perationsleistung an der elektrischen Maschine bestimmen. Dazu berechnet man mit dem dynamischen Rollradius $r_{\text{Rad,dyn}}$ das Bremsmoment am Rad

$$M_{\text{Rad,br}} = -r_{\text{Rad,dyn}} F_{\text{br}}. \quad (4.8)$$

Um das Drehmoment auf die Getriebeeingangswelle umzurechnen, benötigt man Übersetzung i_{GTR} und Wirkungsgrad η_{GTR} des Getriebes⁷ (inkl. Achsgetriebe). Man erhält

$$M_{\text{br}} = \frac{M_{\text{Rad,br}}}{i_{\text{GTR}} \eta_{\text{GTR}}}. \quad (4.9)$$

Dieses Drehmoment ist begrenzt durch das maximale Drehmoment der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb $M_{\text{EMA,max,GEN}}$. Es ist gegeben durch die Drehzahl n_{EMA} und die Klemmenspannung U_{EMA} am elektromotorischen Antrieb. Das Kennfeld des verwendeten elektrischen Antriebs ist in **Abbildung 4.5** dargestellt.

⁶ k_{BP} kann Werte im Intervall $[0, 1]$ annehmen, $k_{\text{BP}} = 0$ bedeutet, dass die Bremse nicht betätigt ist, $k_{\text{BP}} = 1$ entspricht einem voll getretenen Bremspedal.

⁷Die Werte sind vom aktuellen Gang abhängig.

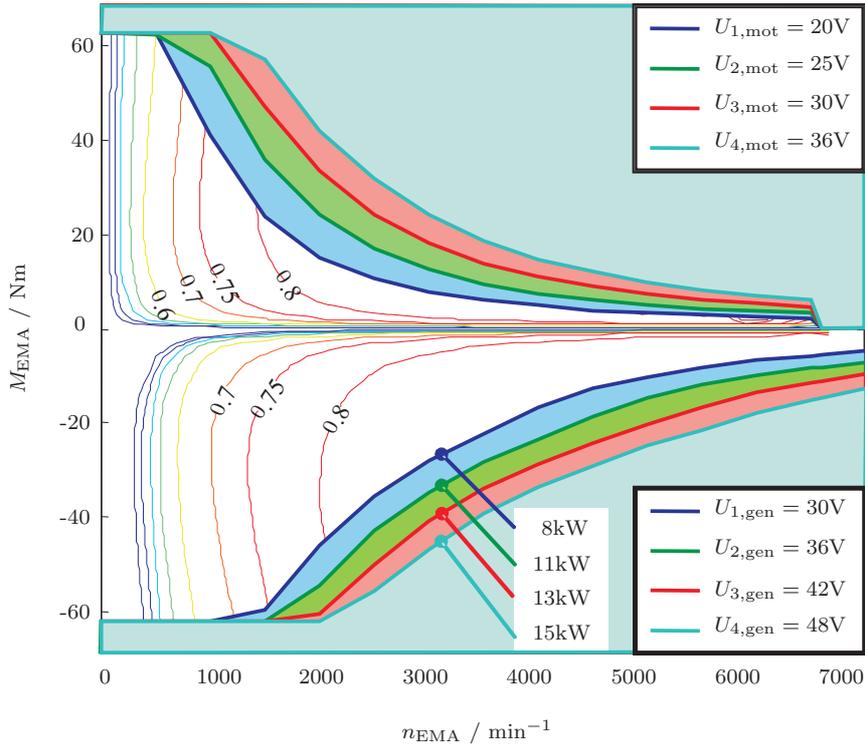


Abbildung 4.5: Kennfeld des elektromotorischen Antriebs des Mild Hybrids. Dargestellt sind Wirkungsgrad und maximales Drehmoment der elektrischen Maschine inkl. Leistungselektronik. Wie man erkennt ist die Maximalleistung von der Spannung abhängig.

Die maximale Leistung der elektrischen Maschine ist je nach Spannungslage zwischen 8 und 15kW. Multipliziert man M_{br} mit der aktuellen Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi n/60$, so erhält man die aktuelle Bremsleistung P_{br} bezogen auf den Getriebeeingang. Das durch die elektrische Maschine begrenzte, rekuperierbare Drehmoment ist

$$M_{\text{Rek,P-begr}} = M_{\text{br}} \in [0, M_{\text{EMA,max,GEN}}] \quad (4.10)$$

und die rekuperierbare Leistung ist

$$P_{\text{Rek,P-begr}} = M_{\text{Rek,P-begr}} \omega. \quad (4.11)$$

In den bisherigen Erläuterungen wurde diese Begrenzung als *Leistungsbegrenzung* bezeichnet.

Die zweite Leistungsbegrenzung (durch die maximale Leistung (bzw. den maximalen Strom) des Energiespeichers) muss bei den Simulationen im Abschnitt 4.4 nicht berücksichtigt werden, da die maximale Stromstärke des Energiespeichers stets größer ist als die Stromgrenze der Leistungselektronik im elektrischen Antrieb⁸. Muss die Grenze des

⁸Berücksichtigt man auch die Temperatur, so kann auch ein überhitzter DLC die rekuperierbare Leistung begrenzen.

Energiespeichers berücksichtigt werden, so ist $P_{\text{Rek,P-begr}}$ analog Gl. (4.5) auf die maximale Leistung des DLC zu begrenzen.

Als Zweites ist die maximal rekuperierbare Energie durch den Energieinhalt des Speichers begrenzt (*Energiebegrenzung*). Dabei wird berücksichtigt, dass im DLC über einen bestimmten Zeitraum nicht mehr Energie gespeichert werden kann, als durch den nutzbaren Energieinhalt $W_{\text{DLC,max}}$ und die Ladeleistung P_{BAT} gegeben ist. Dazu wird die Rekuperationsleistung in den DLC ($P_{\text{Rek,P-begr}} - P_{\text{AUX}}$) über den Zeitraum $t_{\text{W-begr}}$ integriert

$$W_{\text{Rek,DLC}}(t) = \int_{t-t_{\text{W-begr}}}^t (P_{\text{Rek,P-begr}}(\tau) - P_{\text{AUX}}(\tau)) \, d\tau \quad (4.12)$$

und $W_{\text{Rek,DLC}}$ wird auf den verwendeten Energiehub des DLC $W_{\text{DLC,max}}$ nach Gl. (1.3) begrenzt⁹

$$W'_{\text{Rek,DLC}}(t) = W_{\text{Rek,DLC}}(t) \in [0, W_{\text{DLC,max}}]. \quad (4.13)$$

Die energiebegrenzte, rekuperierbare Leistung erhält man durch die positiven Werte der Ableitung von $W'_{\text{Rek,DLC}}$ ¹⁰

$$P_{\text{Rek,W-begr}}(t) = \frac{dW'_{\text{Rek,DLC}}(t)}{dt} \in [0, \infty) \equiv P_{\text{Rek,max}} \quad (4.14)$$

und wird als maximal rekuperierbare Leistung bezeichnet. Durch das Verfahren Gln. (4.6 – 4.14) kann der in Abbildung 4.4 dargestellte Leistungsverlauf $P_{\text{Rek,W-begr}}$ bestimmt werden. Grafisch ist das Verfahren in Abbildung 4.6 erläutert. Das Verfahren wurde anhand einiger realer Zyklen getestet und hat sich stets bewährt. Dabei hat sich gezeigt, dass durch die Energiebegrenzung Gln. (4.12 – 4.14) nahe beisammen liegende Bremsungen zu einer Bremsung zusammengefasst werden. Vergleicht man dazu Abbildung 4.6 (1d) mit Abbildung 4.6 (2d), so ist die maximal rekuperierbare Leistung bei $t_{\text{W-begr}} = 25\text{s}$ ab $t = 180\text{s}$ gleich null. Durch die Wahl von $t_{\text{W-begr}}$ kann man festlegen ab welchem zeitlichen Abstand Bremsungen zusammengefasst werden.

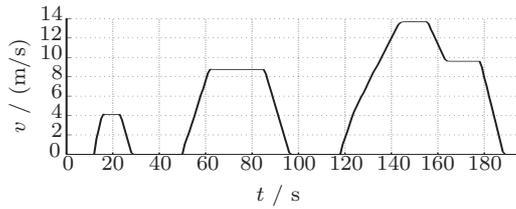
Für die Rekuperationsenergie in der Energiebilanz nach Abbildung 4.2 erhält man

$$W_{\text{Rek}}(t) = \int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t P_{\text{Rek,max}}(\tau) \, d\tau \quad (4.15)$$

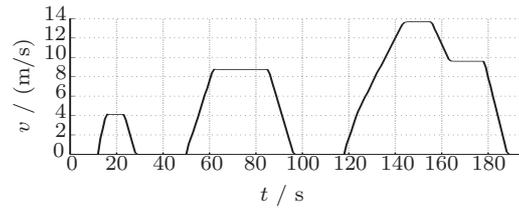
mit der leistungs- und energiebegrenzten Rekuperationsleistung $P_{\text{Rek,max}}$ nach Gl. (4.14).

⁹ $\in [0, W_{\text{DLC,max}}]$ bedeutet, dass $W'_{\text{Rek,DLC}}$ nur Werte zwischen 0 und $W_{\text{DLC,max}}$ enthält.

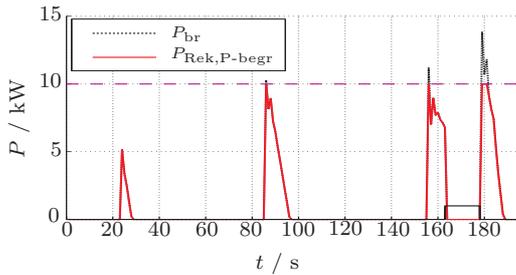
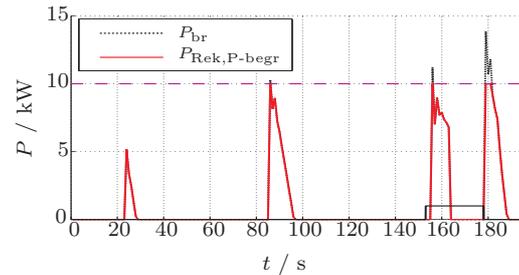
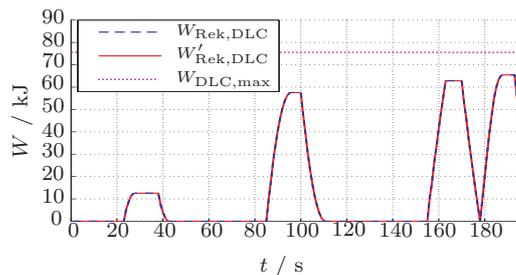
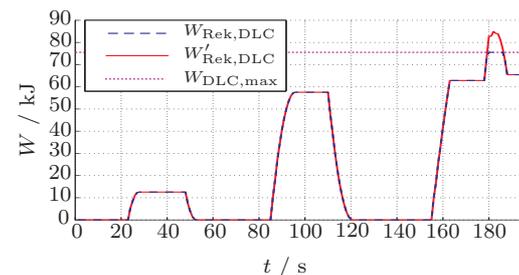
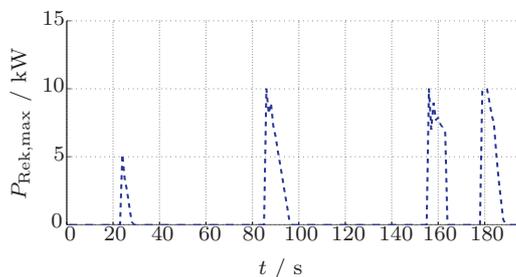
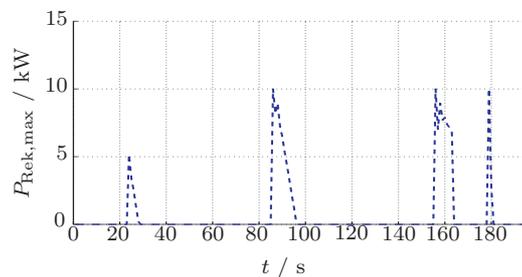
¹⁰ $\in [0, \infty)$ bedeutet, dass $P_{\text{Rek,W-begr}}$ nur Werte ≥ 0 enthält.



(1a) Geschwindigkeitsverlauf ECE-Zyklus



(2a) Geschwindigkeitsverlauf ECE-Zyklus

(1b) Bremsleistung und Zeitfenster für $t_{W\text{-begr}} = 15\text{s}$ (2b) Bremsleistung und Zeitfenster für $t_{W\text{-begr}} = 25\text{s}$ (1c) $t_{W\text{-begr}}$ ist so klein, dass $W_{\text{Rek,DLC}}$ zwischen den letzten beiden Bremsungen auf $W_{\text{Rek,DLC}} = 0$ absinkt. Daher werden die Bremsungen wie zwei einzelne behandelt.(2c) $t_{W\text{-begr}}$ ist größer und dadurch werden die beiden letzten Bremsungen zusammengefasst.(1d) maximal rekuperierbare Leistung bei $t_{W\text{-begr}} = 15\text{s}$ (2d) maximal rekuperierbare Leistung bei $t_{W\text{-begr}} = 25\text{s}$: Die letzte Bremsung wird nicht zur Gänze berücksichtigt.Abbildung 4.6: Bestimmen der maximal rekuperierbaren Leistung und der Einfluss von $t_{W\text{-begr}}$.

4.2.3.3 Energie für das Boosten

Nach W_{Rek} und W_{AUX} ist W_{BO} , die vom Fahrer geforderte Energie für das Boosten, der dritte Eingang in die Energiebilanz nach Abbildung 4.2.

Analog zur Rekuperation darf auch beim Boosten nicht die tatsächliche Energie als Eingang für das AEE verwendet werden. Vielmehr muss das vom Fahrer angeforderte Boostmoment laut Boost-Betriebsstrategie kalkuliert werden.

In welchem Betriebspunkt wieviel Moment des elektrischen Antriebs auf das Moment der Verbrennungskraftmaschine addiert wird, ist durch die Boost-Betriebsstrategie nach Abbildung 3.15 festgelegt. Je nach Fahrpedalstellung wird das Antriebsdrehmoment ausschließlich von der Verbrennungskraftmaschine oder von Verbrennungskraftmaschine und elektrischer Maschine bereitgestellt.

Als Eingang für das AEE muss die vom Fahrer angeforderte Energie für das Boosten berücksichtigt werden, die bei entsprechend vorkonditioniertem Speicher zur Verfügung gestanden wäre.

Bei den untersuchten Zyklen nach Abschnitt 2.2 reicht die Leistung der Verbrennungskraftmaschine aus, um dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil zu folgen, ein Boosten ist daher nicht notwendig. Aus diesem Grund wird die Berechnung der Energie für das Boosten W_{BO} auch nicht genauer behandelt. Im realen Fahrzeug muss es für Vollastbeschleunigungen noch integriert werden.

4.2.4 Ergebnis des AEE: Die adaptive Lastpunktverschiebung

Als Ergebnis des AEE erhält man eine Vorgabe für die Leistung der Lastpunktanhebung bzw. -absenkung. Dazu wird die Energie für die Lastpunktverschiebung $W_{\text{LPV}}(t)$ nach Gl. (4.3) gleichmäßig über die Bilanzzeit t_{Bilanz} verteilt. Man erhält somit die *mittlere Leistung für die Lastpunktverschiebung*

$$\overline{P_{\text{LPV}}(t)} = \frac{W_{\text{LPV}}(t)}{t_{\text{Bilanz}}}. \quad (4.16)$$

Mit Gl. (4.3) ergibt sich

$$\begin{aligned} \overline{P_{\text{LPV}}(t)} &= \frac{1}{t_{\text{Bilanz}}} \left(\underbrace{\int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t (P_{\text{AUX}}(\tau) \, d\tau)}_{W_{\text{AUX}}(t)} + \underbrace{\int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t P_{\text{BO,max}}(\tau) \, d\tau}_{W_{\text{BO}}(t)} - \underbrace{\int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t P_{\text{Rek,max}}(\tau) \, d\tau}_{W_{\text{Rek}}(t)} \right). \\ &= \frac{1}{t_{\text{Bilanz}}} \int_{t-t_{\text{Bilanz}}}^t (P_{\text{AUX}}(\tau) + P_{\text{BO,max}}(\tau) - P_{\text{Rek,max}}(\tau)) \, d\tau \end{aligned} \quad (4.17)$$

Das entsprechende Blockdiagramm zeigt **Abbildung 4.7**.

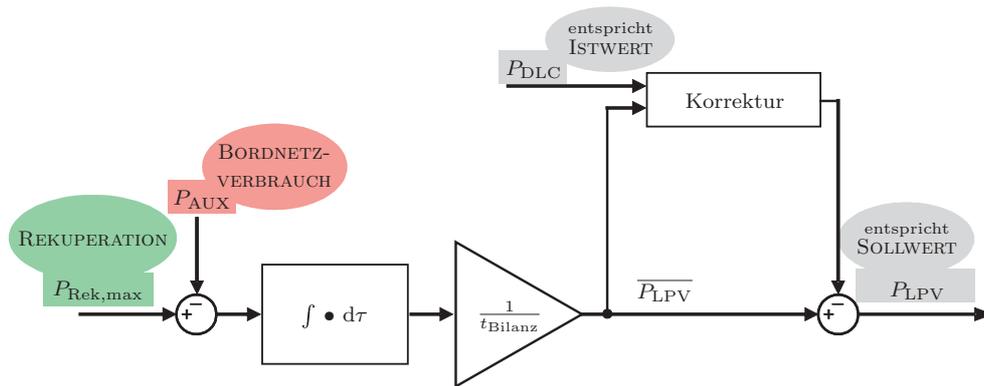


Abbildung 4.7: Blockschnittbild zur Berechnung der Leistung für die Lastpunktverschiebung $P_{LPV}(t)$ nach Gl. (4.17). Die Korrektur berücksichtigt, dass Lastpunktverschiebung nur während verbrennungsmotorischer Fahrt möglich ist.

Korrektur. Die Leistung $\overline{P_{LPV}}$ soll im zeitlichen Mittel über den Zeitraum $[t, t + t_{Bilanz}]$ für die Lastpunktverschiebung ausgegeben werden. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass

1. nur während verbrennungsmotorischer Fahrt der Lastpunkt verschoben werden kann¹¹ und
2. zusätzliche Energie¹² ausgegeben wird.

Diese Faktoren führen zu einer Abweichung zwischen Soll- und Istverbrauch an elektrischer Energie. Diese Abweichung wird aus der tatsächlichen Leistung des Traktionsspeichers P_{DLC} in Abbildung 4.7 bestimmt und somit $\overline{P_{LPV}}$ korrigiert.

Das AEE liefert P_{LPV} als *Sollwert für die adaptive Lastpunktverschiebung*:

- ◇ $P_{LPV} < 0$... Lastpunkt ist anzuheben.
- ◇ $P_{LPV} > 0$... Lastpunkt ist abzusenken.

Die Lastpunktverschiebung ist in der adaptiven Betriebsstrategie für den Mild Hybrid (Abbildung 4.1) strichliert angedeutet und ist entsprechend P_{LPV} einzustellen.

4.3 Wahl der Bilanzzeit

Bei der Wahl der Bilanzzeit t_{Bilanz} gilt es einen Kompromiss zwischen einer schnellen Adaptionszeit und einer stabilen Lastpunktverschiebung zu finden. Wählt man t_{Bilanz} nämlich

¹¹In Start-/Stopp-, Rekuperations- und Boostphasen oder während Schaltvorgängen ist keine Lastpunktverschiebung möglich.

¹²Etwa zum Starten der Verbrennungskraftmaschine.

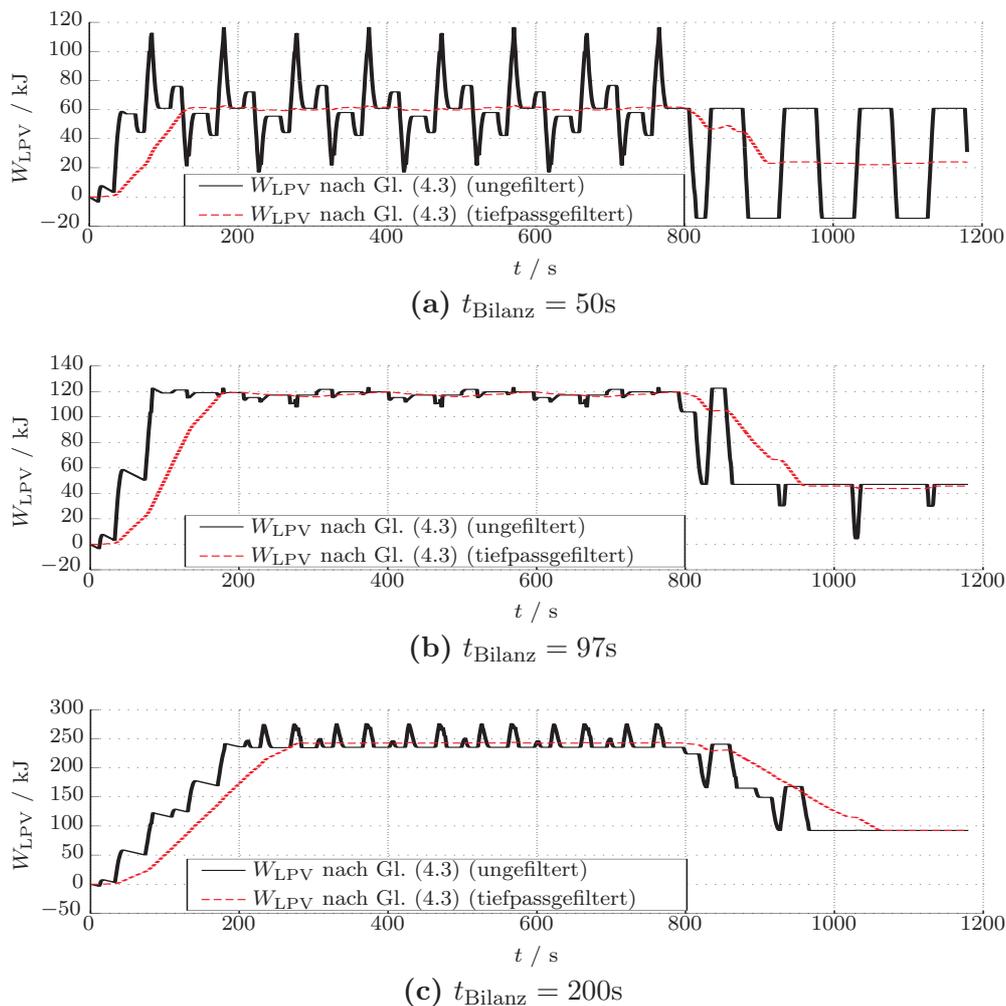


Abbildung 4.8: Einfluss von Bilanzzeit und Filterung. Dargestellt ist die Energie für Lastpunktverschiebung W_{LPV} nach Gl. (4.3) für drei verschiedene Bilanzzeiten t_{Bilanz} (durchgezogene Linien) im mNEFZ. Die strichlierten Linien zeigen W_{LPV} nach Filterung mit einem Tiefpass [119]. Der gefilterte Verlauf schwankt zwar weniger, reagiert jedoch träge auf Änderungen in der Energiebilanz.

zu groß, so ist das AEE sehr träge und reagiert nicht schnell genug auf Änderungen in der Energiebilanz, wie sie z.B. beim Übergang von Stadtfahrt auf Überlandfahrt oder beim Aktivieren von elektrischen Komfortverbrauchern auftreten. Wählt man die Zeit zu kurz, so schwankt der Energieüberschuss W_{LPV} und damit auch die mittlere Leistung für Lastpunktverschiebung $\overline{P_{\text{LPV}}}$ zu stark.

Abbildung 4.9 stellt den Verlauf der Energie für Lastpunktverschiebung W_{LPV} , die nach Gl. (4.16) proportional zur mittleren Leistung für Lastpunktverschiebung $\overline{P_{\text{LPV}}}$ ist, für unterschiedliche Werte von t_{Bilanz} dar. Dazu wird der Mild Hybrid mit einem mittleren Bordnetzverbrauch von 250W und einem Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers

von $\eta = 0.85$ betrachtet, d.h. das HV-Bordnetz muss ständig $P_{\text{AUX}} = 250\text{W}/0.85 = 294\text{W}$ bereitstellen. Aus Abbildung 4.9 (a) ist ersichtlich, dass W_{LPV} bei kleiner Bilanzzeit sehr stark schwankt. Der Verlauf in den Abbildungen 4.9 (b) und (c) ist auf Grund der größeren Bilanzzeit ruhiger.

Adaption der Bilanzzeit

Die gewählte Bilanzzeit in Abbildung 4.9 (b) nimmt eine Sonderstellung ein, sie entspricht nämlich der „Periodendauer“ im Stadtteil des mNEFZ. Dadurch ist auch W_{LPV} im Intervall [100s, 800s] nahezu konstant. Es wäre daher möglich die *Bilanzzeit* so zu *adaptieren*, dass sich eine geringe Welligkeit ergibt. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass das Verfahren bei realen Zyklen nicht zielführend ist, da diese nicht „periodisch“ sind.

Sehr wohl macht jedoch Sinn, die Bilanzzeit an den mittleren Bordnetzbedarf $\overline{P_{\text{AUX}}}$ anzupassen. Nach Gl. (4.4) ist der Energiebedarf für das Bordnetz W_{AUX} gegeben, der als Eingang in die Energiebilanz in Traktionspeicher dient. Da das Energiedefizit im Traktionspeicher maximal dem nutzbaren Energieinhalt $W_{\text{DLC,max}}$ (Gl. (1.3)) entsprechen kann, muss auch W_{AUX} auf diesen begrenzt sein. Dies erreicht man, indem man die Bilanzzeit so wählt, dass

$$t_{\text{Bilanz}} = \frac{W_{\text{AUX}}}{P_{\text{AUX}}} = \frac{W_{\text{DLC,max}}}{\overline{P_{\text{AUX}}}} \quad (4.18)$$

ist. Wählt man eine andere Bilanzzeit so ist W_{AUX} auf den nutzbaren Energieinhalt des Traktionsspeichers W_{Nutz} zu begrenzen.

Filterung

Die Welligkeit von W_{LPV} kann durch Filterung verringert werden. Aus Abbildung 4.8 geht jedoch hervor, dass das gefilterte Signal immer eine Verzögerung gegenüber dem ungefilterten aufweist. Die Verzögerung steigt mit der Größe der Zeitkonstante an. Eine große Zeitkonstante geht daher klar auf Kosten der Schnelligkeit (vgl. dazu die Anforderungen an die Adaption, Abschnitt 4.1). *Eine Filterung kann daher nicht empfohlen werden.*

Wahl der Bilanzzeit

Um den Einfluss der Bilanzzeit auf den Kraftstoffverbrauch zu untersuchen, wurden diverse Stadt- und Überland- und Autobahnzyklen untersucht und dabei die Bilanzzeit und der Bordnetzverbrauch variiert. Die Simulationsergebnisse sind den **Abbildungen 4.9 (a)-(c)** dargestellt.

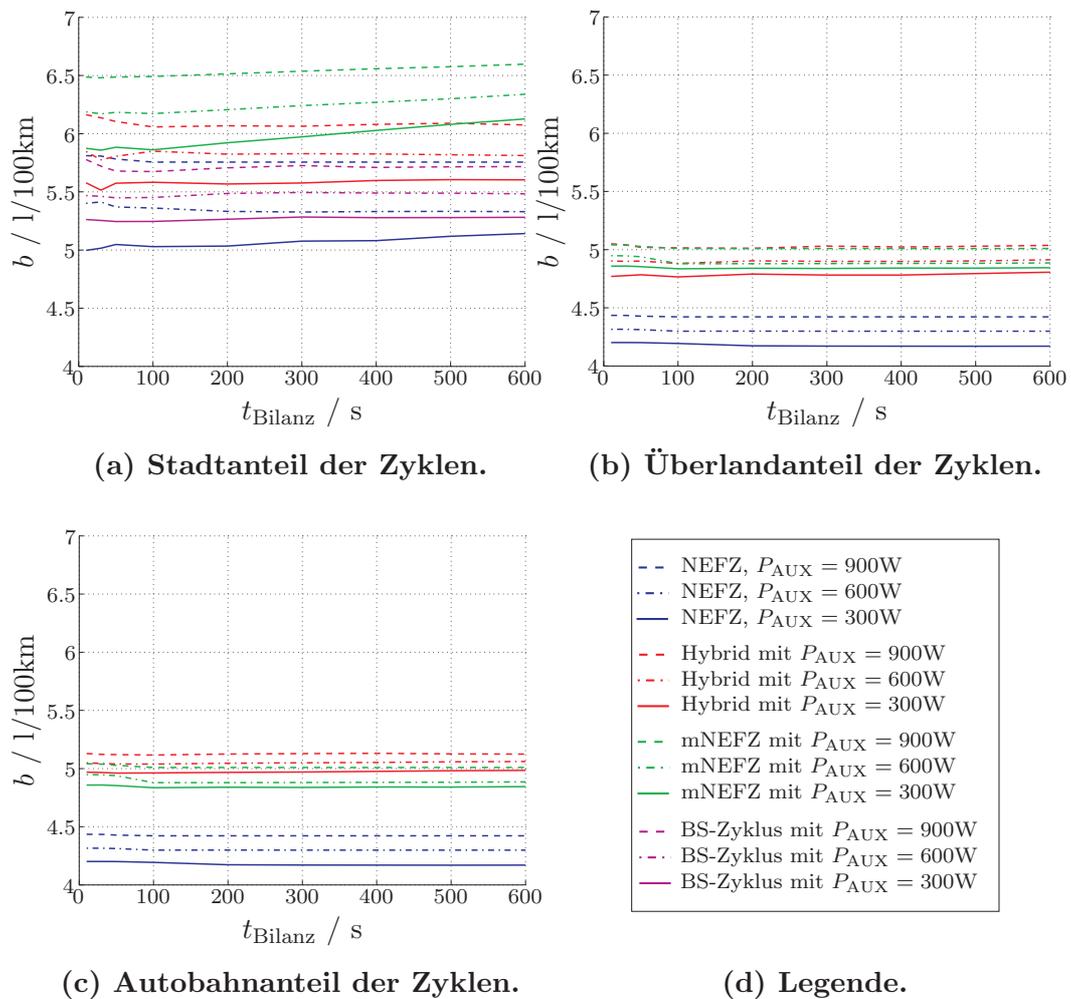


Abbildung 4.9: Variation der Bilanzzeit t_{Bilanz} für unterschiedliche Zyklen und Bordnetzverbräuche (300W, 600W und 900W). Damit der Ladezustand SOC_{DLC} am Ende gleich SOC_{DLC} am Anfang ist, wurden die Zyklen mehrfach hintereinander gereiht („SOC-Neutralität“).

Bei Stadtzyklen mit geringem Bordnetzverbrauch (300W) variiert der Kraftstoffverbrauch am stärksten mit der Bilanzzeit. Der Grund dafür ist, dass Hybridfahrzeuge nach Abschnitt 2.2.7 ein großes Verbrauchspotenzial wegen dem hohen Rekuperationsanteil in Stadtzyklen haben (W_{Rek} groß). Ist darüber hinaus der Bordnetzverbrauch relativ gering (W_{AUX} klein), so resultiert dies in einem großen Energieüberschuss (Gl. (4.1) mit $W_{\text{AUX}} = 0$)

$$W_{\text{LPV}} = W_{\text{Rek}} - W_{\text{AUX}}, \quad (4.19)$$

was durch Lastpunktabsenkung den Kraftstoffverbrauch reduziert. Eine zu groß gewählte Bilanzzeit verhindert, dass in diesem Fall das Verbrauchspotenzial genutzt werden kann.

Sowohl bei Überland- als auch beim Autobahnzyklen ist der Einfluss der Bilanzzeit auf den Kraftstoffverbrauch deutlich geringer. Für die praxisnahen Zyklen (z. B. den Hybrid-Zyklus) ist eine Bilanzzeit von $t_{\text{Bilanz}} = 100\text{s} - 200\text{s}$ eine gute Wahl.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Bilanzzeit entsprechend Gl. (4.18) an den Bordnetzbedarf angepasst werden soll, jedoch bei dieser Größe des TraktionsSpeichers in einem Bereich zwischen 100s und 200s liegen sollte, da in diesem Fenster ein guter Kompromiss aus Schnelligkeit, Welligkeit und Kraftstoffverbrauch erreicht wird.

4.4 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt wird die Funktion des AEE anhand diverser Zyklen überprüft. Dazu wird das adaptive Energiemanagement (AEE) mit zwei konventionellen Energiemanagementstrategien verglichen.

Simuliert werden alle Zyklen aus Abschnitt 2.2 mit drei unterschiedlichen Betriebsstrategien (konventionell 1, konventionell 2 und AEE). Als Fahrzeug dient der Mild Hybrid entsprechend Abschnitt 1.2.3.2. Die Betriebsstrategien unterscheiden sich folgendermaßen:

konventionell 1: Die konventionelle Betriebsstrategie entspricht Abschnitt 3.4.2. Der Ladezustand des TraktionsSpeichers SOC wird mittels SOC-Mapping (Abschnitt 2.1.7) auf den nutzbaren Spannungsbereich (21V ... 48V) normiert. So entspricht eine Leerlaufspannung von 21V einem Ladezustand $SOC = SOC_{\text{min}} = 0$ und eine Leerlaufspannung von 48V einem Ladezustand $SOC = SOC_{\text{max}} = 1$.

Bei der konventionellen Betriebsstrategie ist $SOC_{\text{opt,max}} = 0.5$ und $SOC_{\text{opt,min}} = 0.25$. Der Ziel-SOC liegt also im Bereich 25% ... 50%, was mehr Reserven für Rekupe-ration als für Boosten lässt. Die Bedatung kann daher als verbrauchs- und nicht als fahrleistungsorientiert bezeichnet werden.

Bei der Betriebsstrategie „konventionell 1“ ist ein konventionelles (nicht bilanzierbares) Bremssystem nach Abschnitt 2.1.9 unterstellt. Beim diesen Bremssystem darf die

Rekuperation nicht zu schnell ausgeblendet werden, da dies vom Fahrer als störend wahrgenommen würde [120]. Aus diesem Grund wird die Rekuperation im Bereich $0.75 < SOC < 1$ degradiert.

konventionell 2: Bei der Betriebsstrategie „konventionell 2“ wird ein bilanzierbares Bremssystem (Abschnitt 2.1.9 und [120]) unterstellt. Dadurch kann das Bremssystem das Derating der Rekuperation ausgleichen und die Rekuperation wird erst im Bereich $0.95 < SOC < 1$ degradiert. Ansonsten gibt es keine Unterschiede zwischen den Betriebsstrategien „konventionell 1“ und „konventionell 2“.

AEE: Beim adaptiven elektrischen Energiemanagement (AEE) wird ebenfalls ein bilanzierbares Bremssystem unterstellt und folglich die Rekuperationsstrategie analog „konventionell 2“ bedatet. Beim AEE wird der optimale SOC-Bereich entsprechend Abbildung 4.1 auf $SOC_{\text{opt,min}} = 0.1$ bis $SOC_{\text{opt,max}} = 0.9$ ausgeweitet und mit einer adaptiven Lastpunktverschiebung nach Gl. (4.17) aufgefüllt.

Um die Funktionsweise des AEE-Algorithmus zu veranschaulichen, werden im Anschluss für jeden Zyklus die Eingänge in die Energiebilanz¹³:

- ◇ die maximal rekuperierbare Leistung $P_{\text{Rek,max}}(t)$ nach Gl. (4.14) und
- ◇ der Bordnetzverbrauch $P_{\text{AUX}}(t)$

und der Ausgang:

- ◇ die Energie für Lastpunktverschiebung $W_{\text{DLC,max}}$ nach Gl. (4.2)

dargestellt.

Der Bordnetzbedarf P_{AUX} beträgt in den Simulationen konstant 500W. Bei den nun folgenden Simulationen wird die Bilanzzeit t_{Bilanz} entsprechend Gl. (4.18) an den nutzbaren Energieinhalt angepasst:

$$t_{\text{Bilanz}} = \frac{W_{\text{Nutz}}}{P_{\text{AUX}}} = \frac{W_{\text{DLC,max}}}{P_{\text{AUX}}} = \frac{84\text{kJ}}{500\text{W}} = 168\text{s}, \quad (4.20)$$

mit $W_{\text{DLC,max}}$ nach Gl. (1.3).

¹³Bei allen hier berechneten Zyklen ist $P_{\text{BO,max}}(t) = 0$.

4.4.1 Ergebnisse im NEFZ

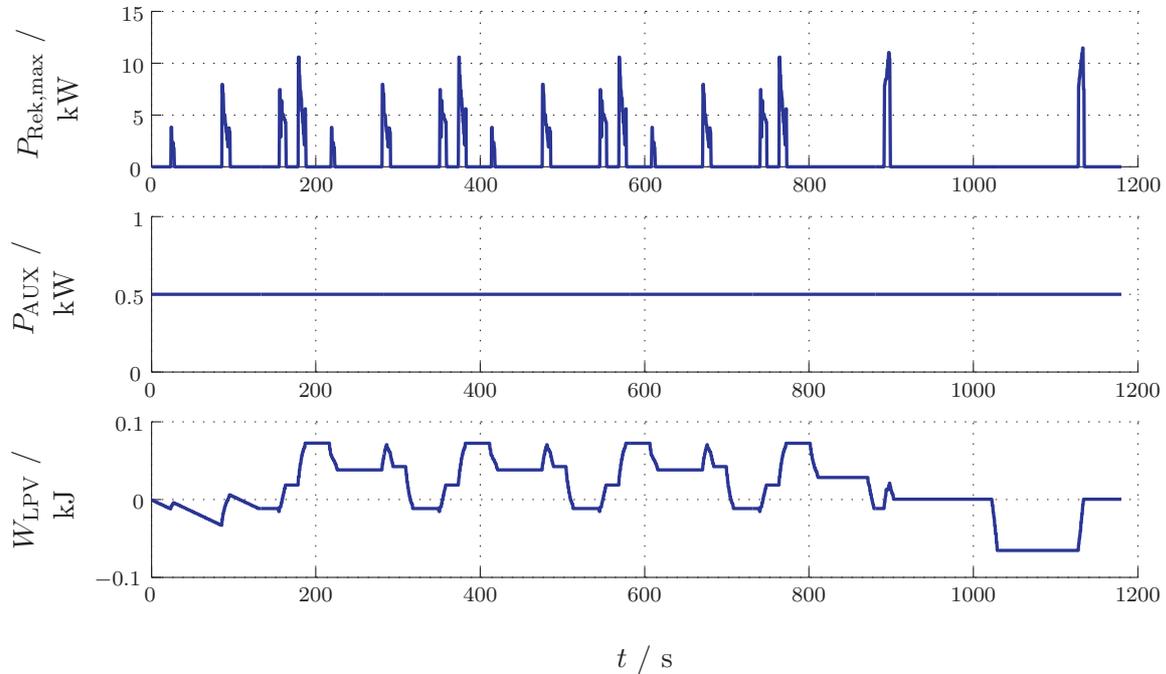


Abbildung 4.10: Energiebilanz im NEFZ nach Abschnitt 2.2.1. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der mittleren Lastpunktverschiebung $\bar{P}_{\text{LPV}}(t)$.

Abbildung 4.10 zeigt das AEE im NEFZ. Man erkennt, dass im Stadtteil (bis $t < 800\text{s}$) mehr Rekuperation auftritt als im Überlandteil (ab $t > 800\text{s}$). Entsprechend ist auch nach einer kurzen Adaptionszeit die Energiebilanz im Stadtteil meist positiv. Die Periodizität des Stadtteils ist auch in der Energiebilanz wieder zu finden. Im Überlandteil ist die Energiebilanz im Mittel negativ, da hier der Bordnetzbedarf überwiegt.

Abbildung 4.11 und **Tabelle 4.1** vergleichen das AEE mit den zwei konventionellen Energiemanagementstrategien. Die rekuperierte Energie in Tabelle 4.1 zeigt, dass bei der Strategie „konventionell 2“ auf Grund des besseren Bremssystems um $214\text{Wh} - 178\text{Wh} = 36\text{Wh}$ zurückgewonnen werden können als bei „konventionell 1“.

Beim AEE kann durch die adaptive Lastpunktverschiebung die rekuperierte Energie um weitere 33Wh gegenüber „konventionell 2“ gesteigert werden. Man erkennt, dass im Stadtteil die Lastpunktabsenkung P_{Lab} beim AEE tendenziell größer ist als in den konventionellen Strategien, wodurch auch im Traktionsspeicher mehr Platz für Rekuperation vorgehalten wird. Im Überlandanteil fällt beim AEE die Lastpunktabsenkung geringer aus und es kann länger Bordnetz aus rekuperierter Energie versorgt werden.

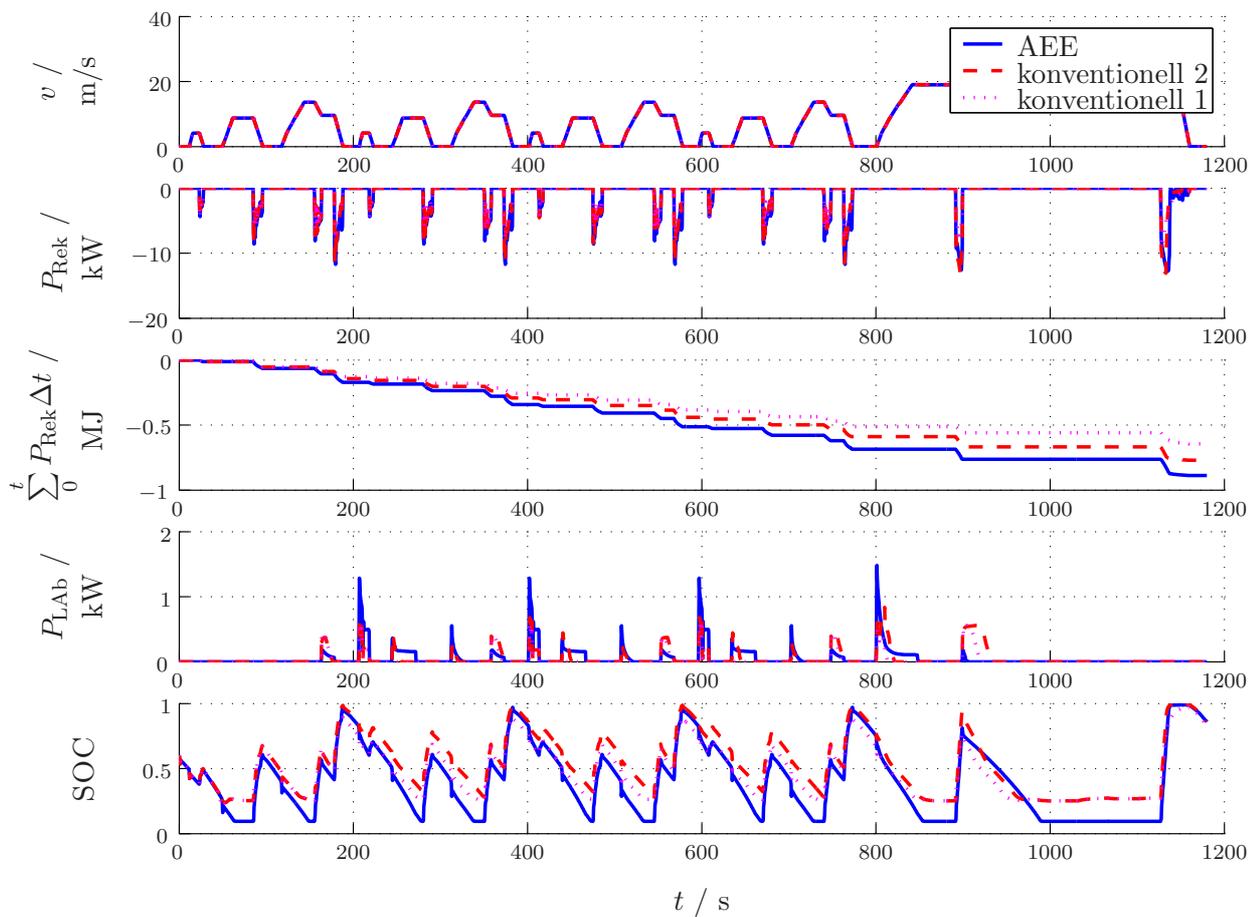


Abbildung 4.11: Simulationsergebnisse im NEFZ: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{LAb} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

Sowohl durch das bessere Bremssystem, als auch durch die das adaptive Energiemanagement kann der Kraftstoffverbrauch um etwa 1% gesenkt werden.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	4.69	4.65	4.60
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	6.5	7.3	7.1
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	1654	1636	1617
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	178	214	247

Tabelle 4.1: Simulationsergebnisse im NEFZ: Kenngrößen.

4.4.2 Ergebnisse im mNEFZ

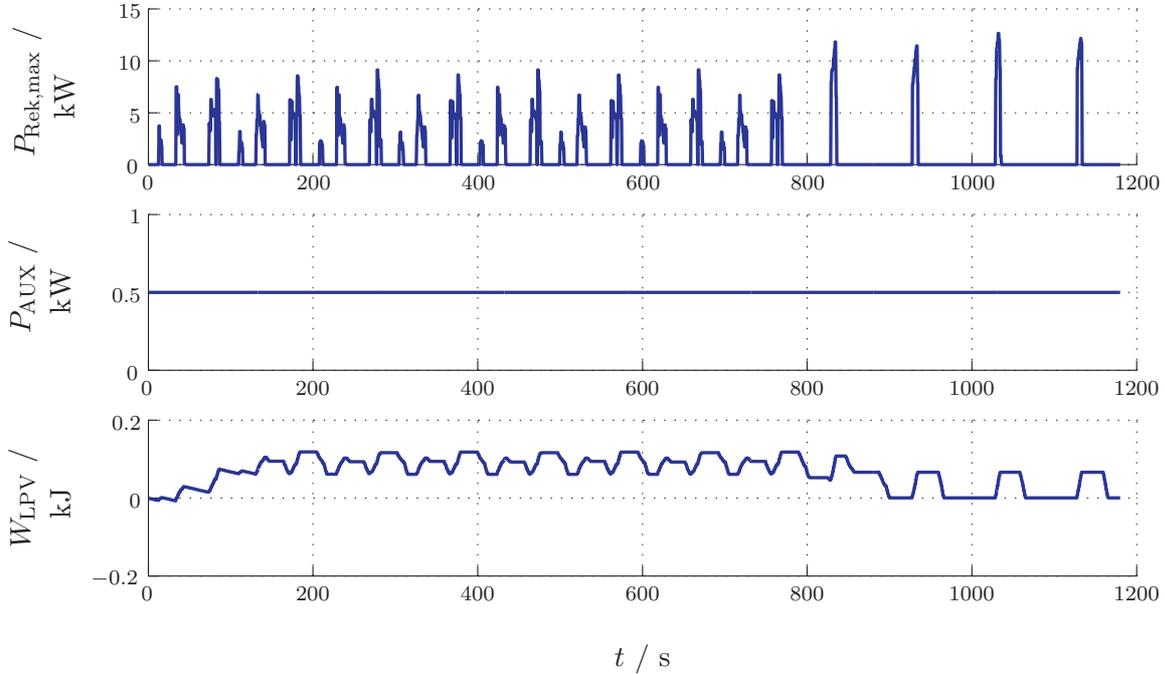


Abbildung 4.12: Energiebilanz im mNEFZ nach Abschnitt 2.2.2. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der mittleren Lastpunktverschiebung $\overline{P_{\text{LPV}}}(t)$.

In **Abbildung 4.12** ist die Energiebilanz des AEE im mNEFZ abgebildet. Der mNEFZ zeichnet sich durch eine höhere Dynamik als der Normzyklus NEFZ aus. Seine höhere Dynamik erkennt man am größeren Energieüberschuss im Stadtteil des Zyklus ($t < 800\text{s}$). Auch im Überlandteil ($t > 800\text{s}$) weist der mNEFZ – im Gegensatz zum NEFZ – einen Energieüberschuss auf.

In **Abbildung 4.13** und **Tabelle 4.2** sind die Simulationsergebnisse vom AEE und von den zwei konventionellen Energiemanagementstrategien dargestellt.

Die Lastpunktabsenkung P_{LAB} zeigt wie sich das Energiemanagement an die größere Dynamik adaptiert. Der Ladezustand SOC lässt erkennen, dass der Energieshub des Traktionsspeichers durch AEE deutlich mehr genutzt werden kann.

Die rekuperierte Energie kann beim mNEFZ durch ein bilanzierbares Bremssystem von 282Wh bei „konventionell 1“ auf 317Wh bei „konventionell 2“ um 35Wh gesteigert werden, was 0,7% an Kraftstoff spart. Durch AEE ist eine weitere Steigerung um 69Wh auf 386Wh möglich. Als Kraftstoffeinsparpotenzial durch AEE ergeben sich dadurch 1,5%.

Vergleicht man die rekuperierte Energie an der elektrischen Maschine mit der mecha-

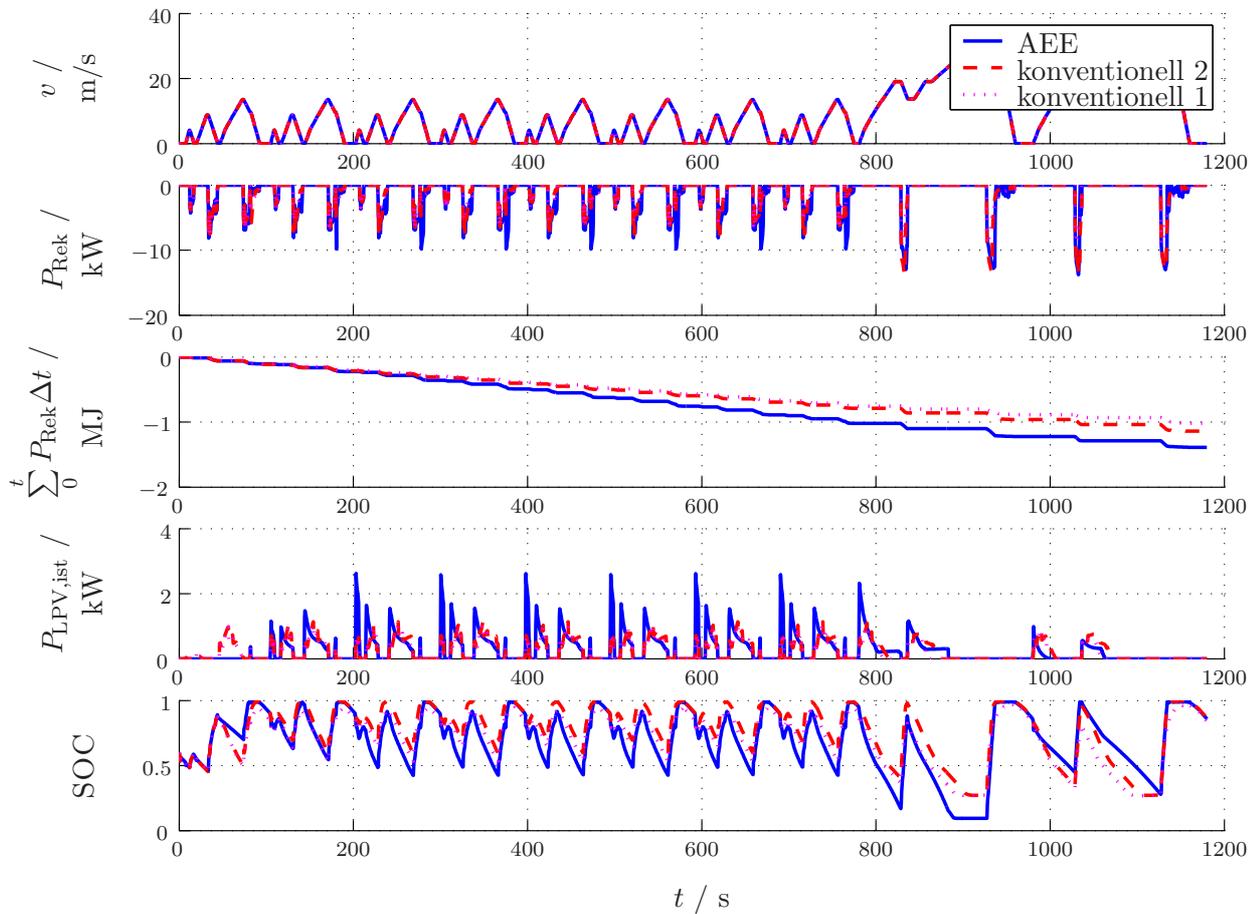


Abbildung 4.13: Simulationsergebnisse im mNEFZ: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{Lab} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

nischen Ausgangsenergie der Verbrennungskraftmaschine, so erkennt man, dass bei diesem Zyklus $386\text{Wh}/2004\text{Wh} = 19\%$ der mechanischen Energie wieder zurückgewonnen werden kann. Dies ist ein Indiz für das allgemein hohe Rekuperationsniveau dieses Zyklus.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	5.46	5.42	5.34
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	6.5	7.3	7.1
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	2062	2044	2004
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	282	317	386

Tabelle 4.2: Simulationsergebnisse im mNEFZ: Kenngrößen.

4.4.3 Ergebnisse im BS-Zyklus

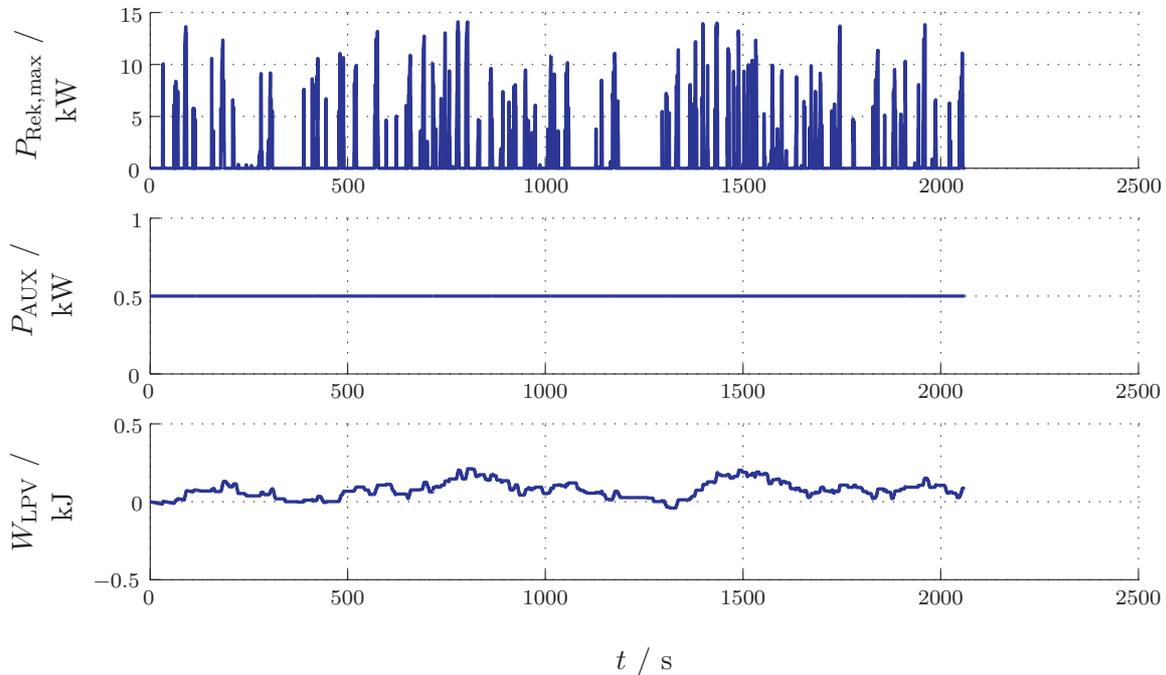


Abbildung 4.14: Energiebilanz im BS-Zyklus nach Abschnitt 2.2.3. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der mittleren Lastpunktverschiebung $\overline{P}_{\text{LPV}}(t)$.

Abbildung 4.14 zeigt die Adaption durch die Energiebilanz im Braunschweig-Zyklus. Als Stadtzyklus weist er einen hohen Rekuperationsanteil auf, der zu einer durchwegs positiven Energiebilanz führt. Besonders in den Bereichen um $t = 800\text{s}$ und $t = 1500\text{s}$ ist die Energiebilanz besonders groß, was auch in der Lastpunktabsenkung in **Abbildung 4.15** wiederzufinden ist.

In **Abbildung 4.15** und **Tabelle 4.3** sind die Simulationsergebnisse vom adaptiven Energiemanagement und von den zwei konventionellen Energiemanagementstrategien dargestellt. Auf den ganzen Zyklus betrachtet kann durch AEE die rekuperierte Energie um 27% von 550Wh auf 698Wh gesteigert werden, was den Kraftstoffverbrauch um 1.1% reduziert. Das bessere Bremssystem in „konventionell 2“ bedeutet 20% mehr Rekuperationsenergie als „konventionell 1“ und hat damit ein Verbrauchspotenzial von 0.7%.

Das Verhältnis aus rekuperierter Energie am EMA zu mechanischer Ausgangsenergie der VKM ist beim BS-Zyklus noch größer als beim mNEFZ. Es beträgt $2472\text{Wh}/698\text{Wh}=28\%$.

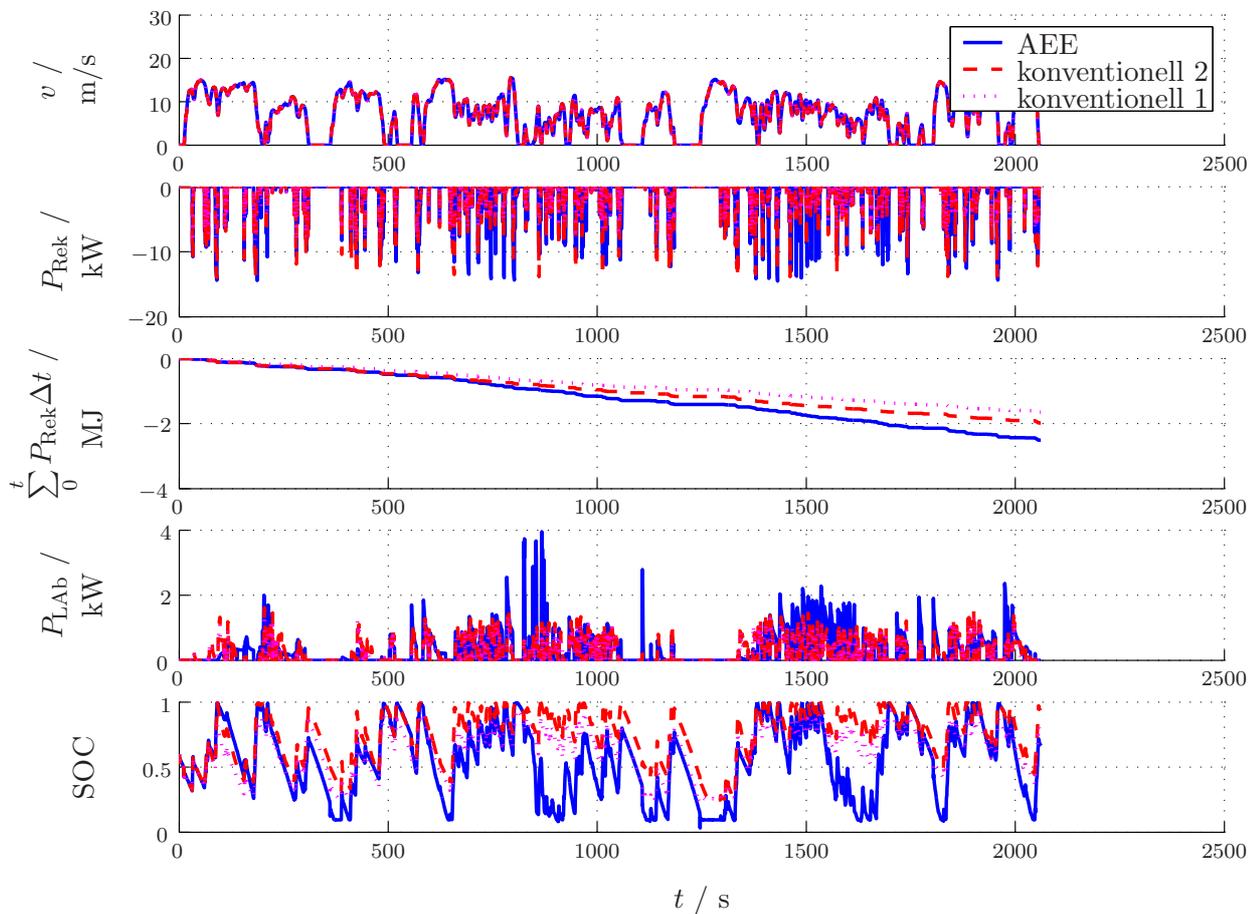


Abbildung 4.15: Simulationsergebnisse im BS-Zyklus: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{LAb} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	5.49	5.45	5.39
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	4.6	9.3	1.6
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	2562	2529	2472
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	458	550	698

Tabelle 4.3: Simulationsergebnisse im BS-Zyklus: Kenngrößen.

4.4.4 Ergebnisse im Hybrid-Zyklus

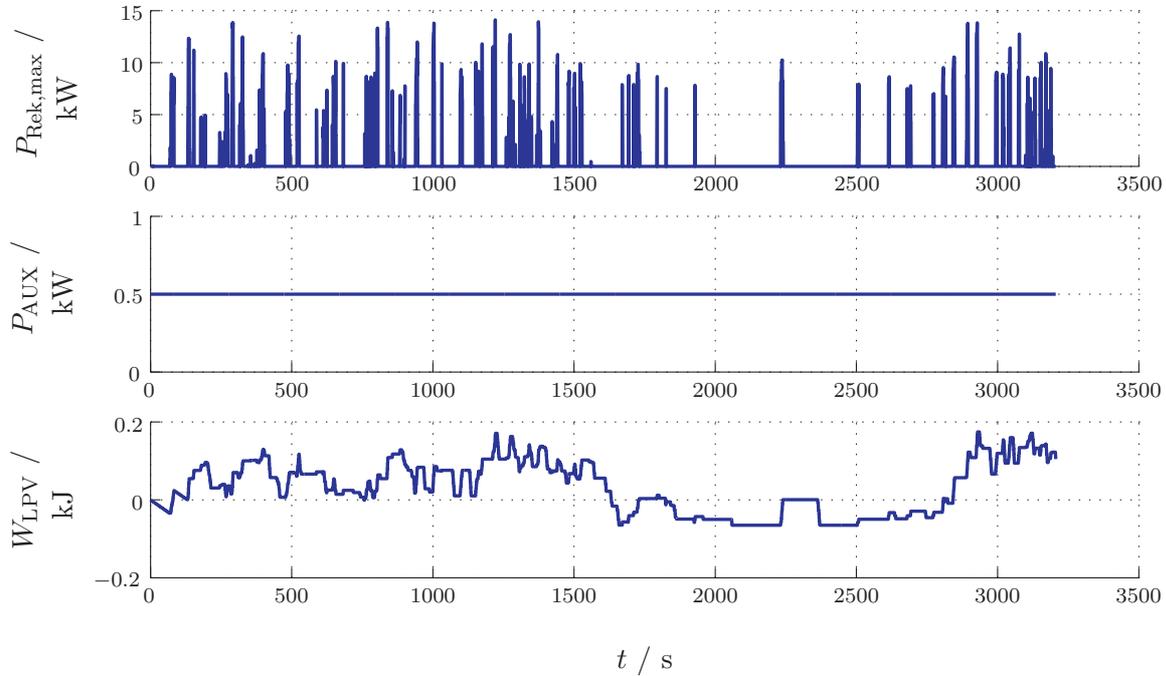


Abbildung 4.16: Energiebilanz im Hybrid-Zyklus nach Abschnitt 2.2.4. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der der mittleren Lastpunktverschiebung $\bar{P}_{\text{LPV}}(t)$.

Der Hybrid-Zyklus stellt eine Kombination aus Stadt, Überland- und Autobahnfahrt dar. Entsprechend variiert auch die Energiebilanz in **Abbildung 4.16**. Ist sie zu Beginn in Stadt- und Überlandanteil meist positiv, so ist sie im Autobahnstück lange Zeit negativ.

Abbildung 4.17 und **Tabelle 4.4** stellt die Simulationsergebnisse vom AEE den Ergebnissen von den zwei konventionellen Strategien gegenüber. Man erkennt nach der Rekuperation im Autobahnstück bei $t = 1250\text{s}$, dass beim AEE das Bordnetz länger mit rekuperierter Energie versorgt werden kann, da auf Grund der Energiebilanz der Lastpunkt nicht abgesenkt wird. Die konventionellen Strategien entladen hingegen den Energiespeicher nach der Rekuperation bis $SOC = 0.5$ mittels Bordnetzversorgung und Lastpunktabsenkung.

Über den ganzen Zyklus kann das AEE die rekupeirierte Energie um 19% von 550Wh in „konventionell 2“ auf 698Wh steigern, was den Kraftstoffverbrauch pro 100km um 0.4% reduziert. Grund für die geringere Reduktion im Vergleich zu mNEFZ und BS-Zyklus ist das allgemein niedrige Rekupeertationspotenzial im Hybrid-Zyklus. Der Stadtanteil nach **Abbildung 2.13** beträgt 17% der Zeit, auf Grund der niedrigeren Geschwindigkeit jedoch nur 5.7% des Weges. Eine Folge davon ist, dass die rekupeirierte Energie (765Wh) nur 7%

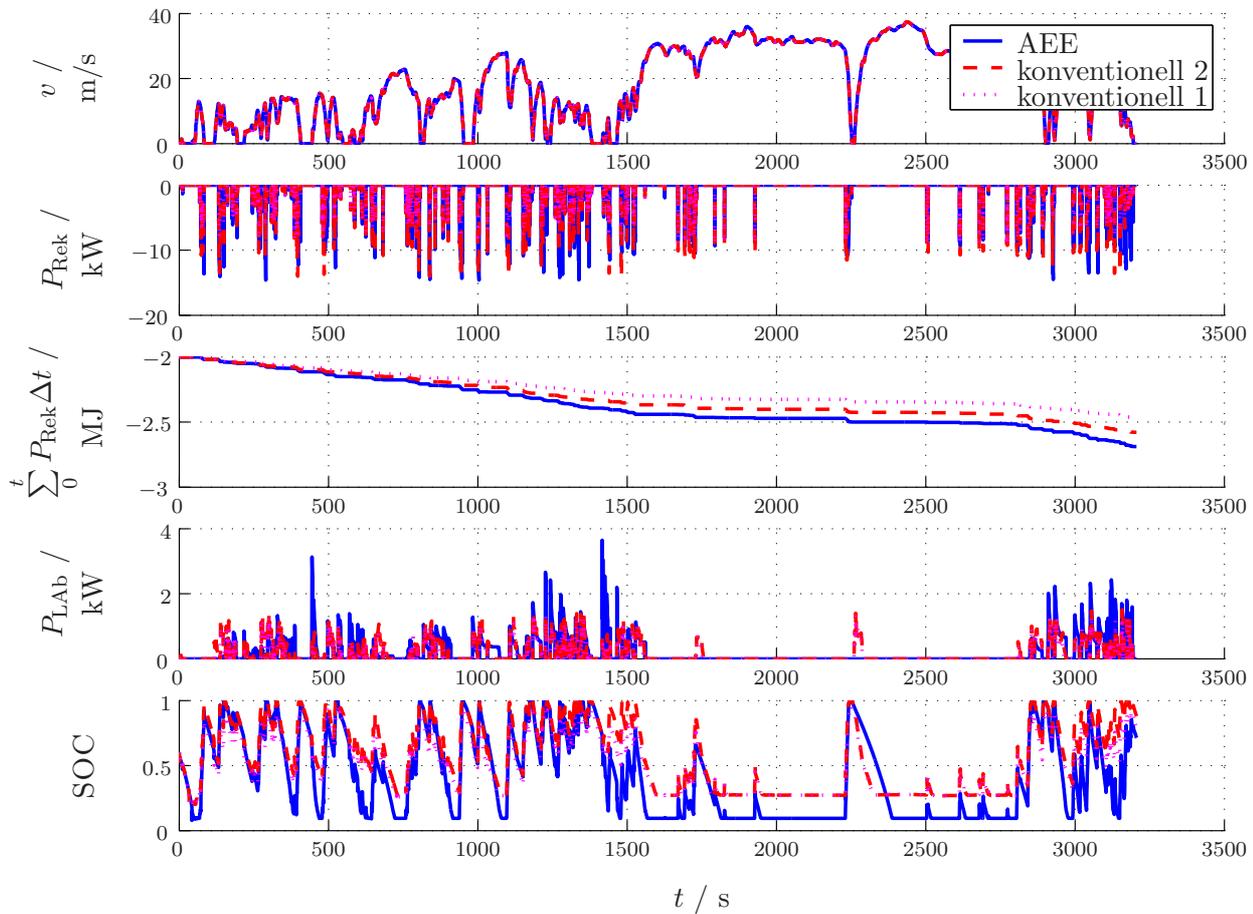


Abbildung 4.17: Simulationsergebnisse im Hybrid-Zyklus: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{LAb} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

der mechanischen Ausgangsenergie der VKM (10757Wh) beträgt. Beim BS-Zyklus liegt der Rekuperationsanteil hingegen bei 28%.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	5.06	5.04	5.02
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	5.1	7.7	2.9
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	10865	10816	10757
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	517	642	765

Tabelle 4.4: Simulationsergebnisse im Hybrid-Zyklus: Kenngrößen.

4.4.5 Ergebnisse im Stau-Zyklus

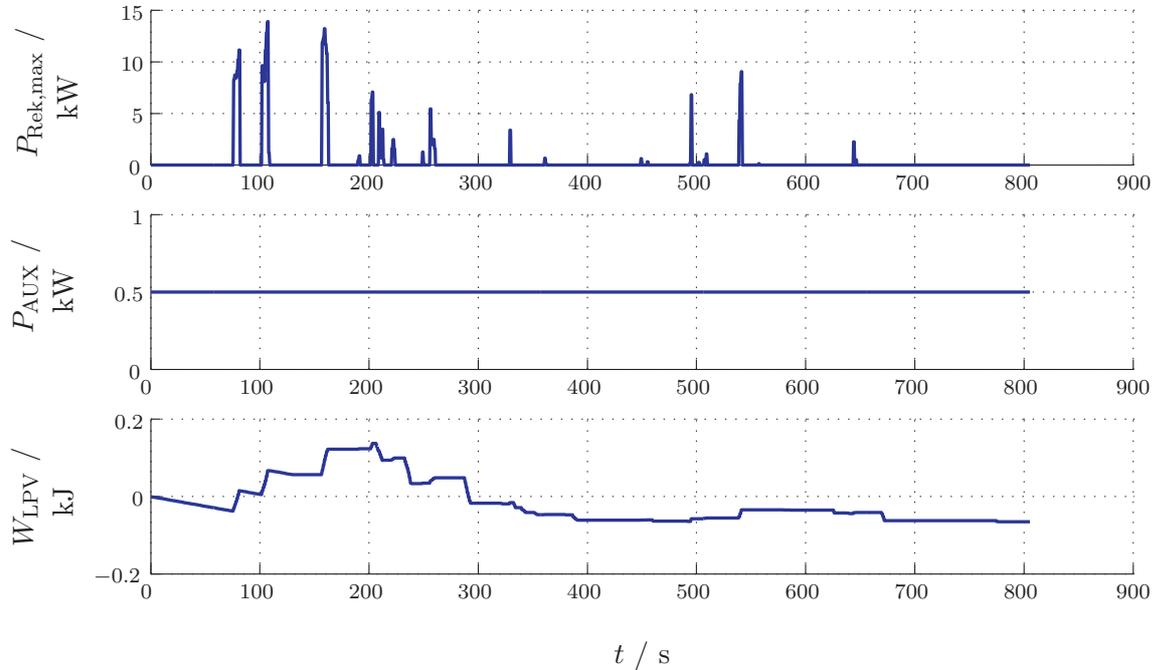


Abbildung 4.18: Energiebilanz im Stau-Zyklus nach Abschnitt 2.2.5. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der der mittleren Lastpunktverschiebung $\overline{P_{\text{LPV}}}(t)$.

Abbildung 4.18 zeigt das AEE im Stau-Zyklus. Vor dem Stau bis ca. $t < 200\text{s}$ ist die Energiebilanz auf Grund von Rekuperation durchwegs positiv. Im Stau ist sie dann ab ca. $t > 300\text{s}$ negativ.

Wie der *SOC* in **Abbildung 4.19** zeigt, kann bei der konventionellen Strategie zu Beginn des Staus das Bordnetz länger als beim AEE aus rekuperierter Energie versorgt werden. Ursache dafür ist die Energiebilanz in **Abbildung 4.18**, die zwischen 200s und 300s weiterhin positiv ist, was eine Lastpunktabsenkung zur Folge hat (siehe P_{LAB} in **Abbildung 4.19**).

Vergleicht man den *SOC* vom AEE mit dem *SOC* von der konventionellen Strategie in **Abbildung 4.19**, so zeigt sich, dass das AEE ab $t > 350\text{s}$ den Traktionspeicher wegen der negativen Energiebilanz in **Abbildung 4.18** lädt und so einen Vorhalt für die Bordnetzversorgung in den Stillstandsphasen schafft. Dadurch kann der Motorstopp-Anteil laut **Tabelle 4.5** von 10% in den konventionellen Strategien auf 22% vergrößert werden. Durch AEE wird daher der Kraftstoffverbrauch um ca. 1% gegenüber „konventionell 2“ reduziert.

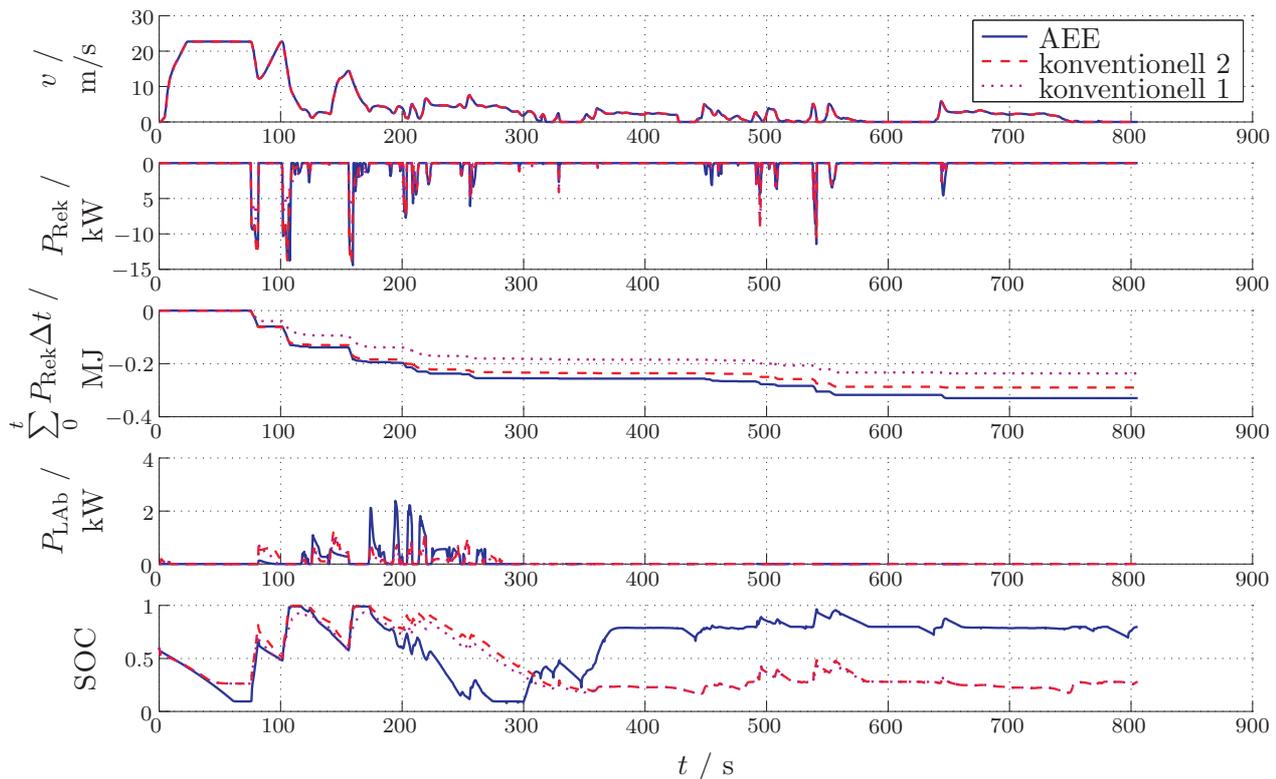


Abbildung 4.19: Simulationsergebnisse im Stau-Zyklus: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{LAb} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

Ein prädiktives Energiemanagement nach Kapitel 5, welches mit einer Vorausschau den Stau prognostiziert, kann das Energiedefizit im Stau früher erkennen und dadurch den Übergang in den Stau optimaler gestalten als ein adaptives Energiemanagement. Vergleiche dazu die Simulation des Full Hybrid im Abschnitt 5.3.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	10.06	10.04	9.95
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	-7.1	-7.1	5.3
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	892	890	913
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	65	80	91
Anteil Motorstopp [%]	10	10	22

Tabelle 4.5: Simulationsergebnisse im Stau-Zyklus: Kenngrößen.

4.4.6 Ergebnisse im Harz-Zyklus

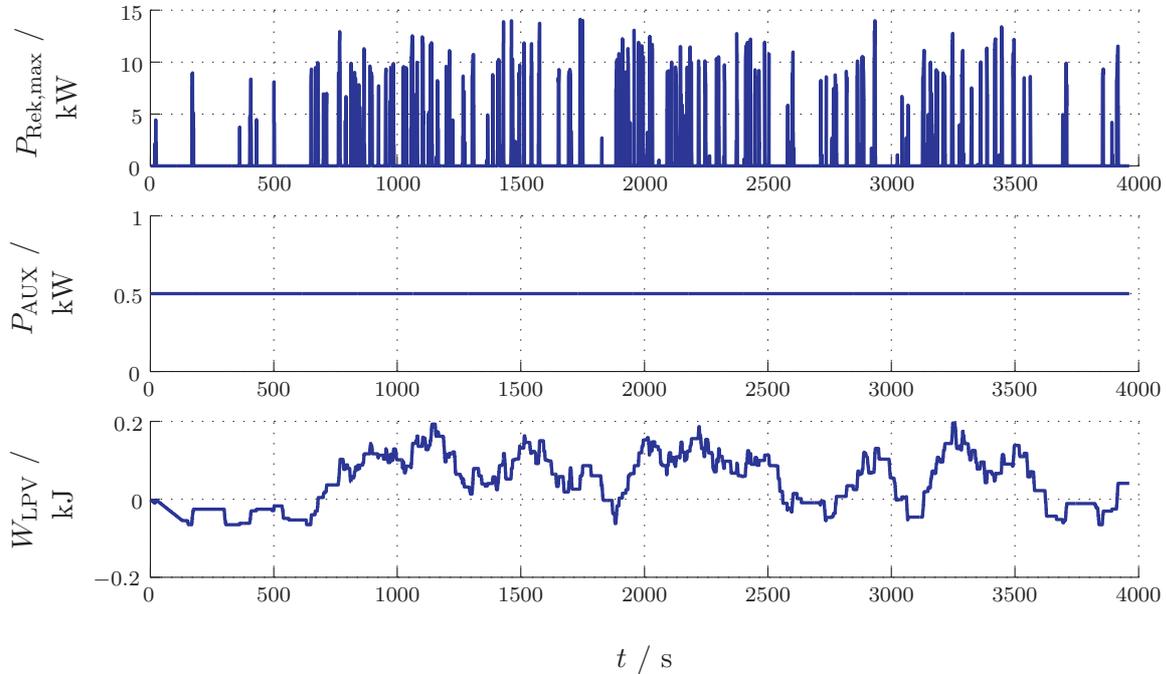


Abbildung 4.20: Energiebilanz im Harz-Zyklus nach Abschnitt 2.2.6. Aus $P_{\text{Rek,max}}(t)$ und $P_{\text{AUX}}(t)$ wird die Energiebilanz $W_{\text{LPV}}(t)$ analog Gl. (4.3) gebildet. $W_{\text{LPV}}(t)$ ist laut Gl.(4.16) proportional der der mittleren Lastpunktverschiebung $\overline{P_{\text{LPV}}}(t)$.

Beim diesem Bergzyklus zeigt die Energiebilanz in **Abbildung 4.20** nach der Bergauffahrt ab ca. $t > 600\text{s}$ meist eine positive Energiebilanz. Hier kann zusätzlich zur kinetischen Energie auch die potenzielle Energie bei der Bergabfahrt teilweise durch Rekuperation zurückgewonnen werden.

Die Simulationsergebnisse in **Abbildung 4.21** und **Tabelle 4.6** zeigen ebenfalls den hohen Rekuperationsanteil und den damit verbundenen hohen Ladezustand im Traktionspeicher SOC . Beim AEE kann der Ladezustand durch mehr Lastpunktabsenkung etwas gesenkt werden.

Laut Tabelle 4.6 kann mit einem bilanzierbaren Bremssystem die rekuperierte Energie von 746Wh um 21% auf 907Wh gesteigert werden und durch das AEE um weitere 27% auf 1154Wh. Der Kraftstoffverbrauch sinkt durch AEE um 0.3%. Wie beim Hybrid-Zyklus fällt auch hier der Verbrauchsvorteil wegen der großen Durchschnittsgeschwindigkeit und der großen Ausgangsenergie der Verbrennungskraftmaschine (Anteil der rekuperierten Energie an der Ausgangsenergie der VKM: 7%) geringer aus als bei Zyklen mit großem Stadtanteil.

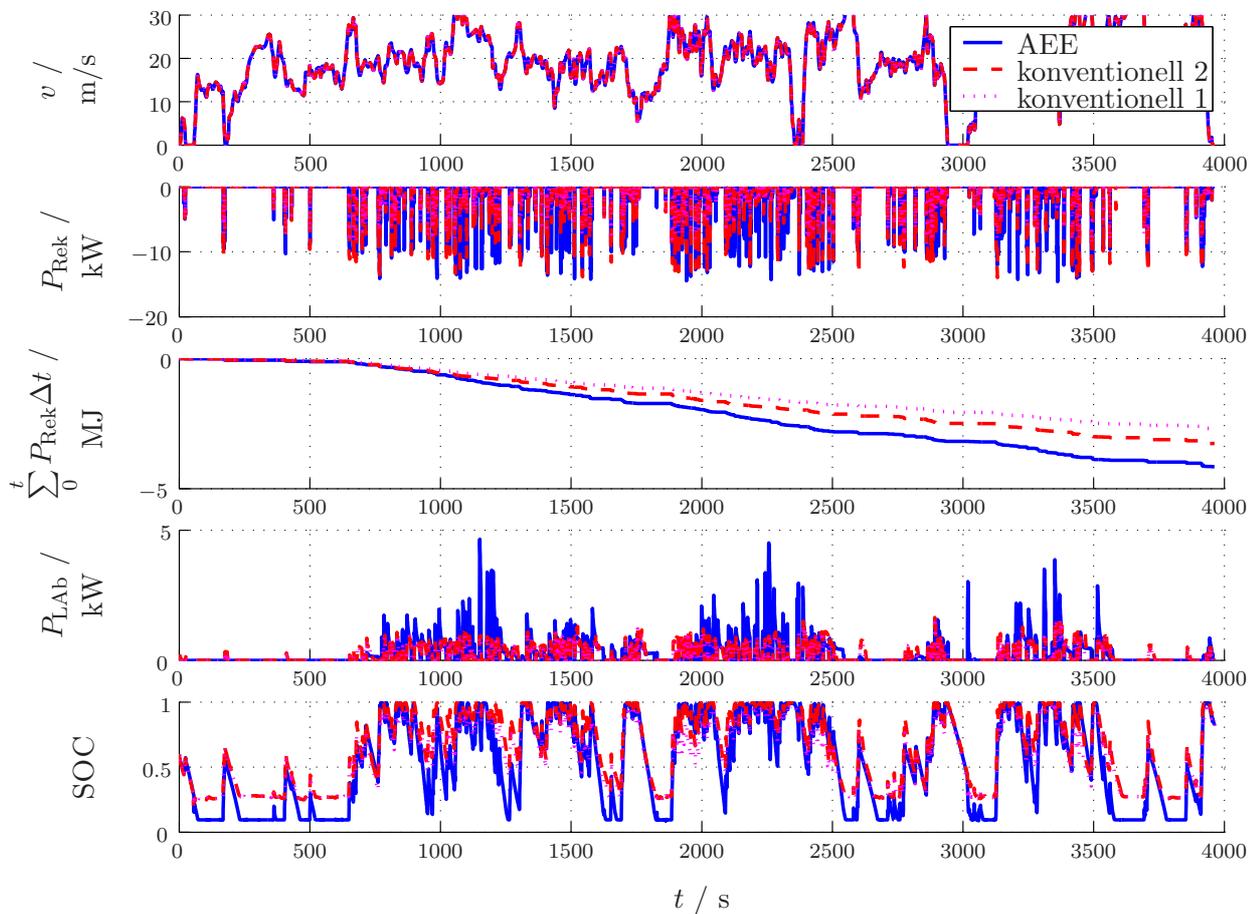


Abbildung 4.21: Simulationsergebnisse im Harz-Zyklus: Zeitverläufe. Dargestellt sind die Geschwindigkeit $v(t)$, die Rekuperationsleistung an der elektrischen Maschine P_{Rek} , die kumuliert rekuperierte Energie bis zum Zeitpunkt t , die Lastpunktabsenkung P_{LAB} an der elektrischen Maschine und der Ladezustand des Traktionsspeichers SOC für drei unterschiedliche Betriebsstrategien.

	konventionell 1	konventionell 2	AEE
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	5.80	5.78	5.76
Energie am Ende minus Anfang im DLC [Wh]	5.9	7.1	6.1
mechanische Ausgangsenergie der VKM [Wh]	15798	15754	15639
rekuperierte Energie am EMA [Wh]	746	907	1154

Tabelle 4.6: Simulationsergebnisse im Harz-Zyklus: Kenngrößen.

4.5 Schlussfolgerungen zum AEE

Tabelle 4.7 stellt nochmal die Ergebnisse der einzelnen Zyklen gegenüber. Es zeigt sich, dass bei den Zyklen mit großem Rekuperationspotenzial auch die Verbrauchseinsparung durch das adaptive elektrische Energiemanagement (AEE) am größten ist. Beim Stau-Zyklus kann durch AEE neben dem Rekuperations- auch der Motorstopp-Anteil vergrößert werden (Tabelle 4.5). Bei den Zyklen mit großem Überlandanteil (Hybrid-Zyklus und Harz-Zyklus) ist die Einsparung eher gering.

Zyklus	NEFZ	mNEFZ	BS- Zyklus	Hybrid- Zyklus	Stau- Zyklus	Harz- Zyklus
Kraftstoffverbrauch:						
konventionell 1: [l/100km]	4.69	5.46	5.49	5.06	10.06	5.80
konventionell 2: [l/100km]	4.65	5.42	5.45	5.04	10.04	5.78
Einsparung [%]	0.9	0.7	0.7	0.4	0.2	0.3
AEE: [l/100km]	4.60	5.34	5.39	5.02	9.95	5.76
Einsparung [%]	1.1	1.5	1.1	0.4	0.9	0.3
Rekuperationsanteil an der Ausgangsenergie der VKM:						
[%]	15	19	28	7	10	7

Tabelle 4.7: Kraftstoffverbrauch und Rekuperationsanteil im Vergleich. Beim Kraftstoffverbrauch ist der absolute Verbrauch in [l/100km] und die Einsparung in [%] aufgeführt, die Einsparung von „konventionell 2“ ist gegenüber „konventionell 1“ angegeben, die von AEE gegenüber „konventionell 2“. Der Rekuperationsanteil gibt an wieviel der mechanischen Ausgangsenergie der Verbrennungskraftmaschine wieder mechanisch an der elektrischen Maschine des Mild Hybrids mit AEE zurückgewonnen werden kann.

Die Ergebnisse des Stau-Zyklus haben klar den Nachteil des AEE aufgezeigt. Da ein adaptives Energiemanagement über keine Prognose verfügt, dauert es eine bestimmte Zeit, bis sich die Betriebsstrategie an die Änderung der Energiebilanz adaptiert hat. Ein vorausschauendes Energiemanagement nach Kapitel 5 kann den Übergangsbereich von der Autobahnfahrt in den Stau optimaler gestalten. Dafür ist jedoch auch eine zuverlässige Vorhersage der Umweltparameter (Fahrstrecke, Verkehrsdichte, etc.) und deren Kommunikation ins Fahrzeug notwendig.

Kapitel 5

Prädiktives Energiemanagement

Inhalt

5.1	Prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE)	110
5.1.1	Nutzen des PEE	110
5.1.2	Stellhebel des PEE	111
5.1.3	Vorgehen beim prädiktiven Energiemanagement	113
5.2	Möglichkeiten und Grenzen der Verkehrssimulation	113
5.3	Simulationsergebnisse	115
5.4	Schlussfolgerungen zum PEE	118

In diesem Kapitel wird das adaptive elektrische Energiemanagement aus Kapitel 4 um eine Vorausschau erweitert und so zu einem prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE) ausgebaut. Das PEE ist im Abschnitt 5.1 beschrieben.

Um das Energiemanagement an die zukünftige Energiebilanz anpassen zu können, erweist sich eine Kombination aus Rückwärtssimulation (Abschnitt 2.1) und Verkehrssimulation als zielführend. Die Anforderungen daran werden im Abschnitt 5.2 erörtert. Anschließend wird im Abschnitt 5.3 das Potenzial des PEE anhand des Stau-Szenarios aus Abschnitt 2.2.5 dargestellt.

Abschnitt 5.4 präsentiert eine Schlussfolgerung zum prädiktiven Energiemanagement und stellt das PEE dem AEE aus Kapitel 4 gegenüber.

5.1 Prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE)

Konventionelle Energiemanagement-Strategien, wie sie im Abschnitt 3.4 dargestellt sind, nutzen Daten, die jedem Hybridfahrzeug zur Verfügung stehen. Dazu zählen die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Ladezustand des Traktionsspeichers und weitere Zustandsgrößen der Komponenten. Darüber hinaus ist es in heutigen Fahrzeugen möglich, das Energiemanagement mit entsprechenden Algorithmen an weitere Parameter wie Fahrertyp oder Energiebilanz (siehe Abschnitt 4.2) zu adaptieren. Dabei ist keine Prognose auf zukünftige Verläufe möglich. Will man jedoch auf die zukünftige Energiebilanz frühzeitig reagieren, so ist dazu, wie im Abschnitt 4.4 bei den Ergebnissen des Stau-Zyklus erwähnt, eine Prognose notwendig. Damit kann bei einem prognostizierten Energieüberschuss der Traktionsspeicher geladen bzw. bei einem möglichen Energiedefizit der Traktionsspeicher entladen werden.

5.1.1 Nutzen des PEE

Ein prädiktives Energiemanagement bietet eine Fülle von Vorteilen, zu denen zählen

- ◇ eine bessere Verfügbarkeit der Hybridfunktionen (elektrisch Fahren und Boosten) da geringen Ladezuständen im Traktionsspeicher präventiv entgegengewirkt wird,
- ◇ ein geringerer Kraftstoffverbrauch, da einem Derating der Funktionen elektrisch Fahren und Rekuperieren laut Abbildung 3.16 entgegengewirkt wird,
- ◇ mehr elektrisches Fahren in sensiblen Bereichen, wie etwa Stau oder Wohngebiet, in denen der Fahrer einen elektrischen Betrieb erwartet,
- ◇ Anheben des Ladezustands, wenn z. B. bei der Fahrt zum Flughafen mit langen Standzeiten zu rechnen ist und
- ◇ eine kleinere Dimensionierung des Traktionsspeichers da der verfügbare Energiehub besser durch Prädiktion genutzt werden kann.

Neben der Effizienz des Antriebs kann durch ein prädiktives Energiemanagement also auch Sicherheit¹ und Komfort² eine bessere Verfügbarkeit der Funktion Boosten des Fahrzeugs gesteigert werden. Darüber hinaus ist durch einen kleineren Energiespeicher eine Reduktion von Zusatzgewicht und Zusatzkosten für einen Hybridantrieb denkbar.

¹durch eine bessere Verfügbarkeit der Funktion Boosten

²durch mehr elektrisch Fahren in Wohngebieten oder im Stau

5.1.2 Stellhebel des PEE

Geht man davon aus, dass der Geschwindigkeitsverlauf durch Fahrer und gewählte Fahrstrecke vorgegeben ist, so kann auch die Verzögerung und damit die Rekuperationsenergie vom Energiemanagement nicht beeinflusst werden. Gleiches gilt für das Boosten, welches der Fahrer durch seinen Fahrstil vorgibt. Daher sind primär Lastpunktverschiebung und E-Fahren-Grenze vom Energiemanagement festzulegen.

5.1.2.1 Maßnahmen bei einem prognostizierten Energieüberschuss

Lässt eine Prädiktion einen Energieüberschuss erahnen, so kann entsprechend der Priorisierung in Abbildung 3.16

1. elektrisches Fahren präventiv ausgedehnt werden, um den Ladezustand des Traktionsspeichers rechtzeitig abzusenken.

Reicht diese Maßnahme nicht aus, so kann darüber hinaus

2. der Lastpunkt des Verbrennungsmotors beim VKM-Fahren abgesenkt werden, um den Traktionsspeicher zusätzlich zu entladen.

Diese Maßnahmen sollen verhindern, dass als letzte Konsequenz die Rekuperation degradiert werden muss, was sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt.

5.1.2.2 Maßnahmen bei einem prognostizierten Energiedefizit

Im Falle eines prognostizierten Energiedefizits wird ebenfalls entsprechend der Priorisierung in Abbildung 3.16

1. der Lastpunkt des Verbrennungsmotors beim VKM-Fahren präventiv angehoben, um den Traktionsspeicher zu laden.

Reicht diese Maßnahme nicht aus, so ist darüber hinaus

2. elektrisches Fahren schrittweise einzuschränken, damit der Ladezustand des Traktionsspeichers weniger entladen wird.

Ist beides nicht ausreichend, so muss schließlich und endlich das Boosten degradiert werden, was einem Verlust an Fahrleistung zur Folge hat.

Wie man aus der Prädiktion die richtige Lastpunktverschiebung und die richtige E-Fahren-Grenze erhält zeigt der nächste Abschnitt.

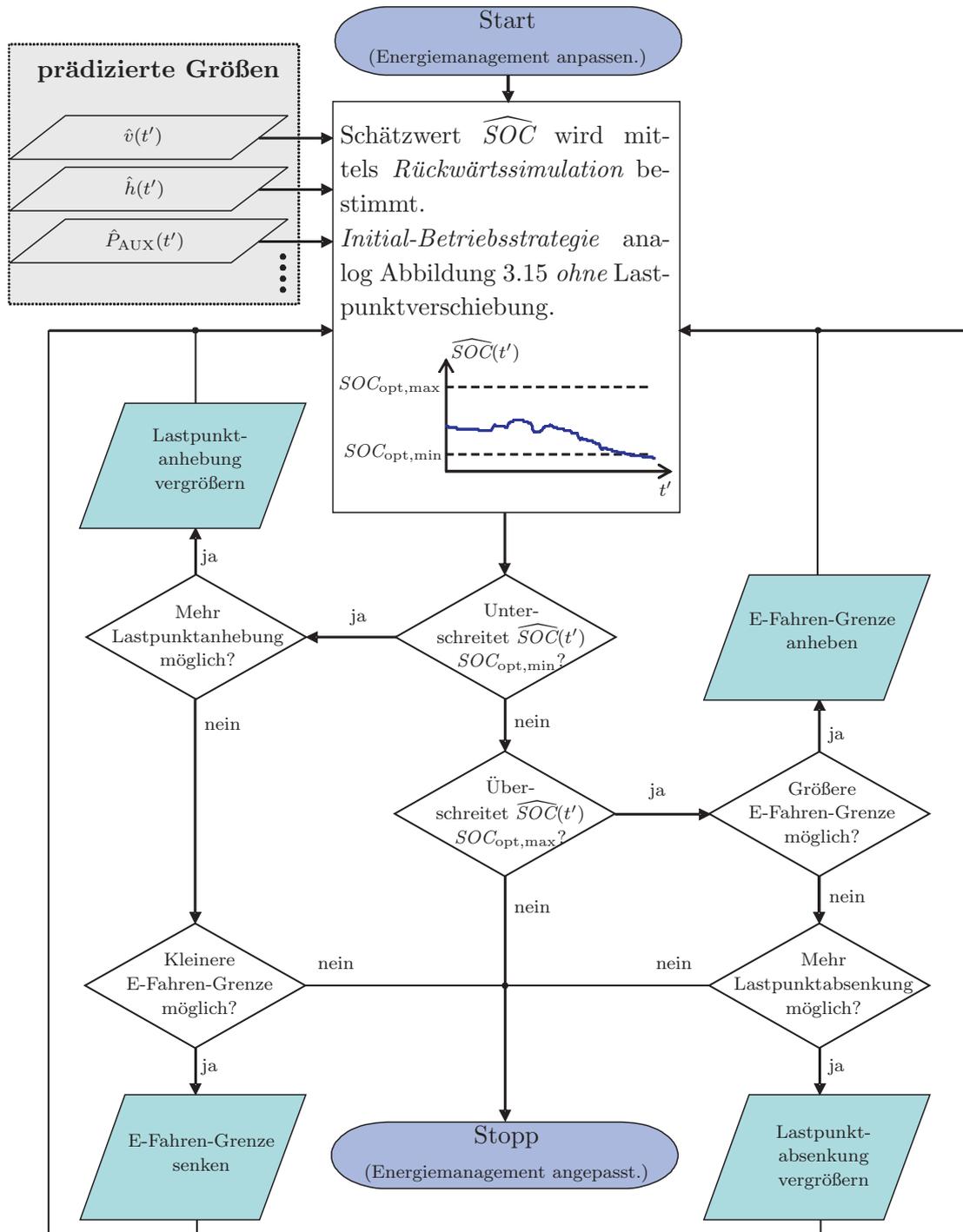


Abbildung 5.1: Prädiktives elektrisches Energiemanagement (PEE). Die Stellhebel des Energiemanagements (E-Fahren-Grenze, Lastpunktanhebung und Lastpunktabsenkung) werden an die prädizierten Größen (Geschwindigkeit $\hat{v}(t')$, Höhenprofil $\hat{h}(t')$ und Bordnetzbedarf $\hat{P}_{AUX}(t')$) angepasst. Jedes Mal wenn sich die prädizierten Größen ändern wird das Energiemanagement angepasst. Der Algorithmus endet, sobald der geschätzte Ladezustand $\widehat{SOC}(t')$ im optimalen Bereich $[SOC_{opt,min}, SOC_{opt,max}]$ liegt.

5.1.3 Vorgehen beim prädiktiven Energiemanagement

Um Energieüberschuss bzw. -defizit bestimmen zu können, ist ein Schätzwert³ für den zukünftigen Verlauf des Ladezustands im Traktionsspeicher $\widehat{SOC}(t')$ notwendig. Diesen erhält man durch die Ladebilanz am Traktionsspeicher. Sie ist durch den Energiebedarf für die Funktionen Rekuperieren, Bordnetz Versorgen $\hat{P}_{\text{AUX}}(t')$, elektrisch Fahren und Boosten gegeben (vgl. dazu Abbildung 4.2).

Um den Energiebedarf für die Hybridfunktionen zu ermitteln, nutzt man die Rückwärts-simulation nach Abschnitt 2.1 und die Betriebsstrategie nach Abbildung 3.15. Als Eingang benötigt die Rückwärtssimulation eine Prognose für Geschwindigkeit $\hat{v}(t')$ und Höhenprofil $\hat{h}(t')$. Mit deren Hilfe kann man auf die Eingangsleistung des Traktionsspeichers zurückrechnen. Auf Grund ihrer geringen Rechenleistung und Stabilität eignet sich die Rückwärtsrechnung besonders gut für eine Implementierung im Fahrzeug.

Verläßt der Verlauf des so prognostizierten Ladezustands $\widehat{SOC}(t')$ den optimalen SOC-Bereich⁴, so muss das Energiemanagement ihre Stellhebel laut Abschnitt 5.1.2 anpassen. Die in **Abbildung 5.1** dargestellte Iteration wird dabei so oft durchlaufen, bis sich der gesamte Verlauf von $\widehat{SOC}(t')$ im optimalen Bereich befindet.

Die Eingänge in das PEE (Geschwindigkeit $\hat{v}(t')$ und Höhenprofil $\hat{h}(t')$) können mittels Verkehrssimulation nach **Abbildung 5.2** prognostiziert werden kann.

5.2 Möglichkeiten und Grenzen der Verkehrssimulation

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, ist für ein prädiktives Energiemanagement ein Prognose des zukünftigen Energiebedarfs im Fahrzeug notwendig. Dieser kann über die zukünftige Wegstrecke (Steigung und Geschwindigkeit) und aus den Fahrzeugdaten (Fahrwiderstände, Bordnetz- und Klimatisierungsbedarf) errechnet werden. Die Steigung von Straßen wird in Karten der nächsten Generation mit enthalten sein. Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann mittels Verkehrssimulation bestimmt werden.

Bei Verkehrssimulationsmodellen unterscheidet man zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen [121], die im Folgenden erläutert werden. Eine Kombination daraus wird mesoskopische Verkehrsmodellierung genannt.

Makroskopische Verkehrsmodellierung

Bei der makroskopischen Verkehrsmodellierung wird der Verkehr – ähnlich wie in der

³Der Schätzwerte für eine Variable x wird analog [114] mit \hat{x} bezeichnet.

⁴Dieser ist durch $SOC_{\text{opt,min}}$ und $SOC_{\text{opt,max}}$ nach Abbildung 3.16 gegeben

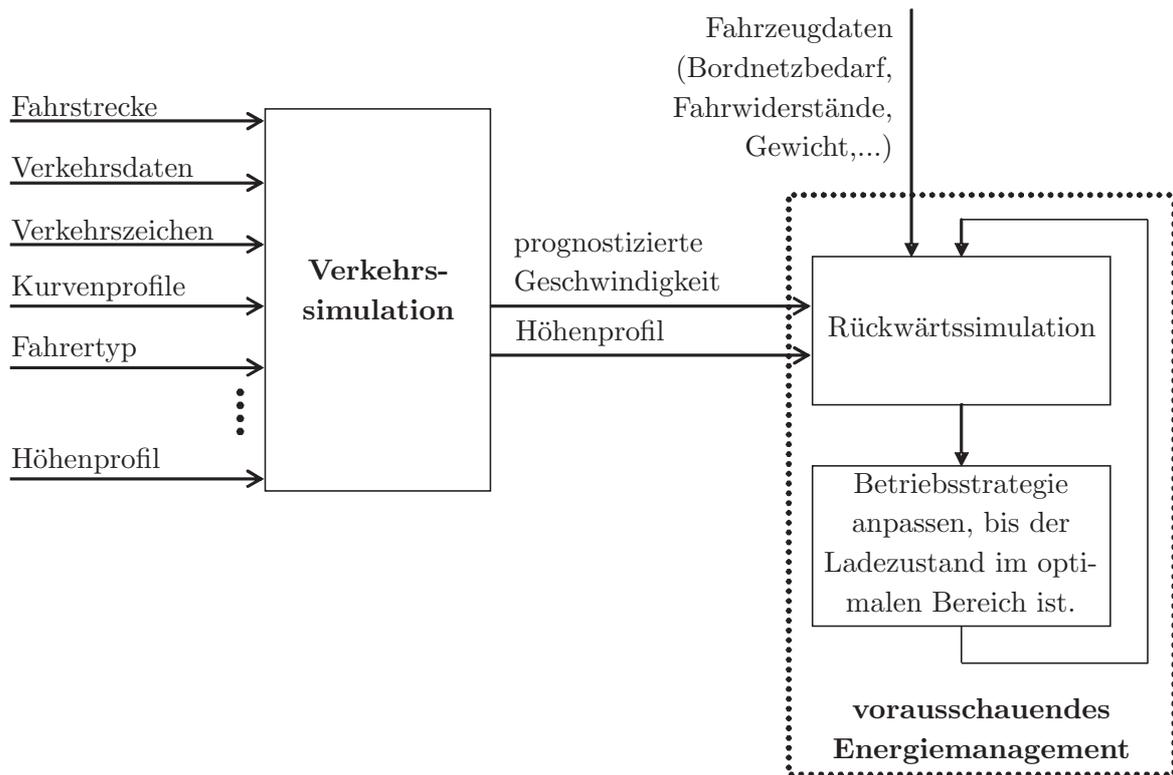


Abbildung 5.2: Vorausschauendes Energiemanagement mittels Verkehrssimulation. Eine Verkehrssimulation bildet aus diversen Eingangsgrößen die Schätzwerte für das Höhenprofil $\hat{v}(t')$ und die Fahrzeuggeschwindigkeit $\hat{v}(t')$ der im Voraus liegenden Fahrstrecke. Das PEE passt daran die Lastpunktverschiebung und die E-Fahren-Grenze entsprechend Abbildung 5.1 an.

Hydrodynamik – durch Dichte, Fluss und mittlere Geschwindigkeit abgebildet. Dabei wird ein Fahrzeugkollektiv als Ganzes beschrieben. Makroskopische Verkehrssimulation wird vor allem zur Verkehrsplanung eingesetzt. Eine Aussage über die Bewegung der Einzelfahrzeuge, wie es für ein vorausschauendes Energiemanagement notwendig ist, kann mit solchen Modellen nicht getätigt werden.

Mikroskopische Verkehrsmodellierung

Wird die Bewegung jedes einzelnen Fahrzeugs im Fahrzeugkollektiv modelliert, so spricht man von mikroskopischer Verkehrssimulation, wie sie auch in PELOPS (Abschnitt 2.1.11, [122]) angewandt wird. Erst damit sind die notwendigen Aussagen zu Geschwindigkeitsprofil und Fahrroute der Einzelfahrzeuge möglich.

Nachteil der mikroskopischen Verkehrssimulation ist der vergleichsweise große Rechenaufwand. Erst seit 1986 Zellularautomaten für die Verkehrssimulation entdeckt wurden [123], ist eine großflächige mikroskopische Verkehrsmodellierung möglich.

Ein verbreitetes Modell zur Simulation des Straßenverkehrs wurde von Kai Nagel und Michael Schreckenberg entwickelt [124, 125]. Das Modell dient als Grundlage für den Service „autobahn.NRW“ (www.autobahn.nrw.de) wo das gesamte Autobahnnetz von Nordrhein-Westfalen mittels Zellularautomaten abgebildet wird. Die aktuelle Verkehrslage wird dabei mittels Induktionszählschleifen erfasst und eine mikroskopische Verkehrssimulation prognostiziert die Bewegung der Fahrzeuge für die nächste Stunde.

Ist es in Zukunft möglich diese Information in das Fahrzeug zu übertragen, so ist eine individuelle Routenplanung mit einem darauf abgestimmten Energiemanagement realisierbar. Welches Verbrauchspotenzial in einem vorausschauenden Energiemanagement steckt, zeigt der nun folgende Abschnitt.

5.3 Simulationsergebnisse

Um das Potenzial eines vorausschauenden Energiemanagements bewerten zu können, wird das PEE nach Abschnitt 5.1 mit dem konventionellen Energiemanagement nach Abschnitt 3.4.1 verglichen. Simuliert wird dazu der Full Hybrid im Stau-Zyklus.

Ausgewählt wurde der Stau-Zyklus nach Abschnitt 2.2.5, da in diesem Szenario (Autobahnfahrt mit anschließendem Auflaufen auf ein Stauende) die Vorteile einer Prädiktion deutlich werden sollen:

- ◇ Das adaptive Energiemanagement hat beim Übergang von der Konstantfahrt in die Stopp-and-Go-Fahrt Nachteile gegenüber dem konventionellen Energiemanagement gezeigt (vgl. Abbildung 4.19). Es ist zu erwarten, dass das PEE durch frühzeitiges Reagieren auf das kommende Verkehrsgeschehen hier Vorteile aufweist.
- ◇ Auf Grund der elektrischen Fahranteile ist mit einem deutlichen Energiedefizit im Stau zu rechnen, was beim konventionellen Energiemanagement zu einem Derating von elektrisch Fahren und Motorstart/-stopp analog Abbildung 3.16 führt. Das PEE sollte dem Derating mit einer angepassten Lastpunktverschiebung entgegenwirken und somit ein Kraftstoffverbrauchspotenzial gegenüber der konventionellen Betriebsstrategie aufweisen.

Bei den folgenden Simulationen wird davon ausgegangen, dass der mittels Verkehrssimulation prognostizierte Geschwindigkeitsverlauf \hat{v} gleich dem tatsächlichen Geschwindigkeitsverlauf v ist

$$\hat{v}(t') = v(t). \quad (5.1)$$

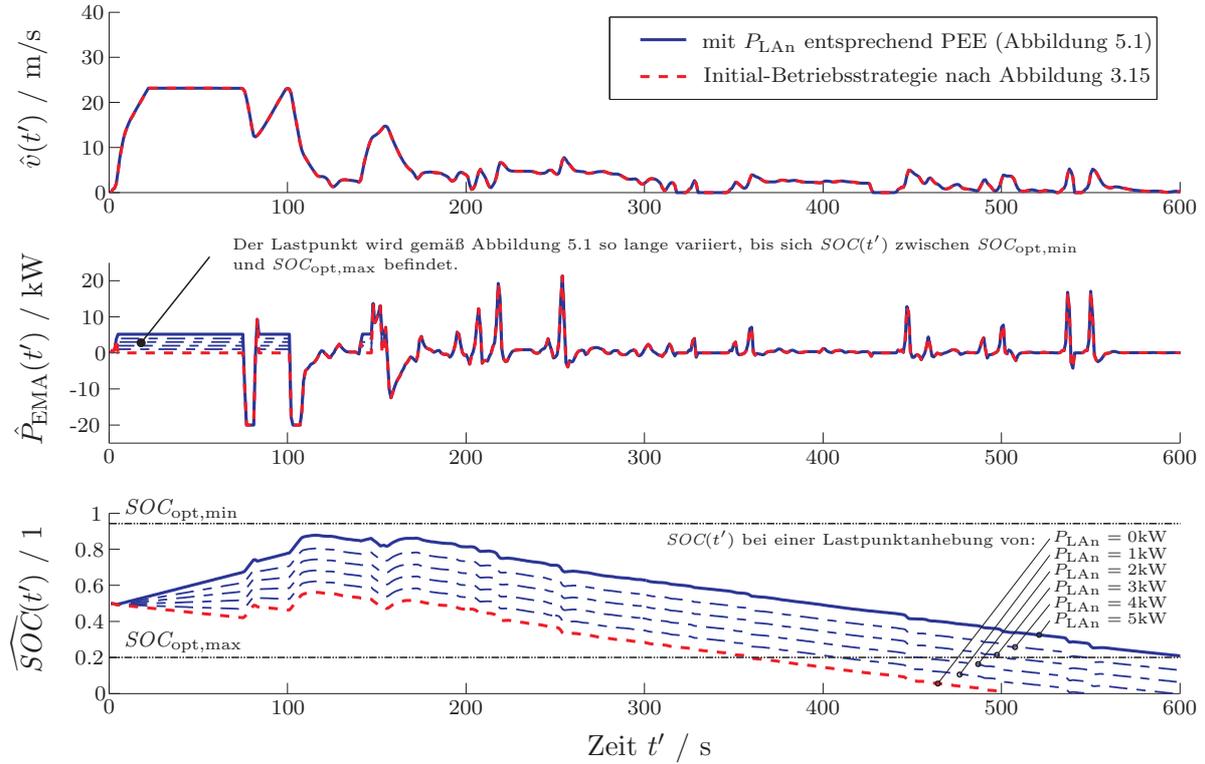


Abbildung 5.3: Prognose mittels PEE im Stau-Zyklus zum Zeitpunkt $t = 0$. Am Beginn des Stau-Zyklus berechnet das PEE mittels Rückwärtssimulation aus der prognostizierten Geschwindigkeit $\hat{v}(t')$ über die elektromotorische Leistung $\hat{P}_{\text{EMA}}(t')$ den Verlauf des Ladezustands $\widehat{SOC}(t')$. Da mit der Initial-Betriebsstrategie laut Abbildung 3.15 der Ladezustand unter $SOC_{\text{opt,min}} = 0.2$ absinken würde, verschiebt das PEE mit der elektrischen Maschine den Lastpunkt des Verbrennungsmotors und lädt somit den Traktionsspeicher. Mit der Iteration nach Abbildung 5.1 ergibt sich eine Lastpunktanhebung von 5kW, bei der $SOC_{\text{opt,min}} = 0.2$ nicht mehr unterschritten wird. Ein Derating des E-Fahrens ist nicht notwendig.

Des Weiteren gilt für die Simulation $SOC_{\text{opt,min}} = 0.2$ und $SOC_{\text{opt,max}} = 0.95$. Der Stau-Zyklus weist kein Höhenprofil auf

$$\hat{h}(t') = h(t) = 0. \quad (5.2)$$

Abbildung 5.3 zeigt, wie das PEE die Betriebsstrategie analog Abbildung 5.1 anpasst. Die Iteration ergibt eine *Lastpunktanhebung* von

$$P_{\text{LAn}} = 5kW. \quad (5.3)$$

Mit dieser Lastpunktverschiebung kann ein Derating der Funktion *elektrisch Fahren* während der Stauphase vermieden werden.

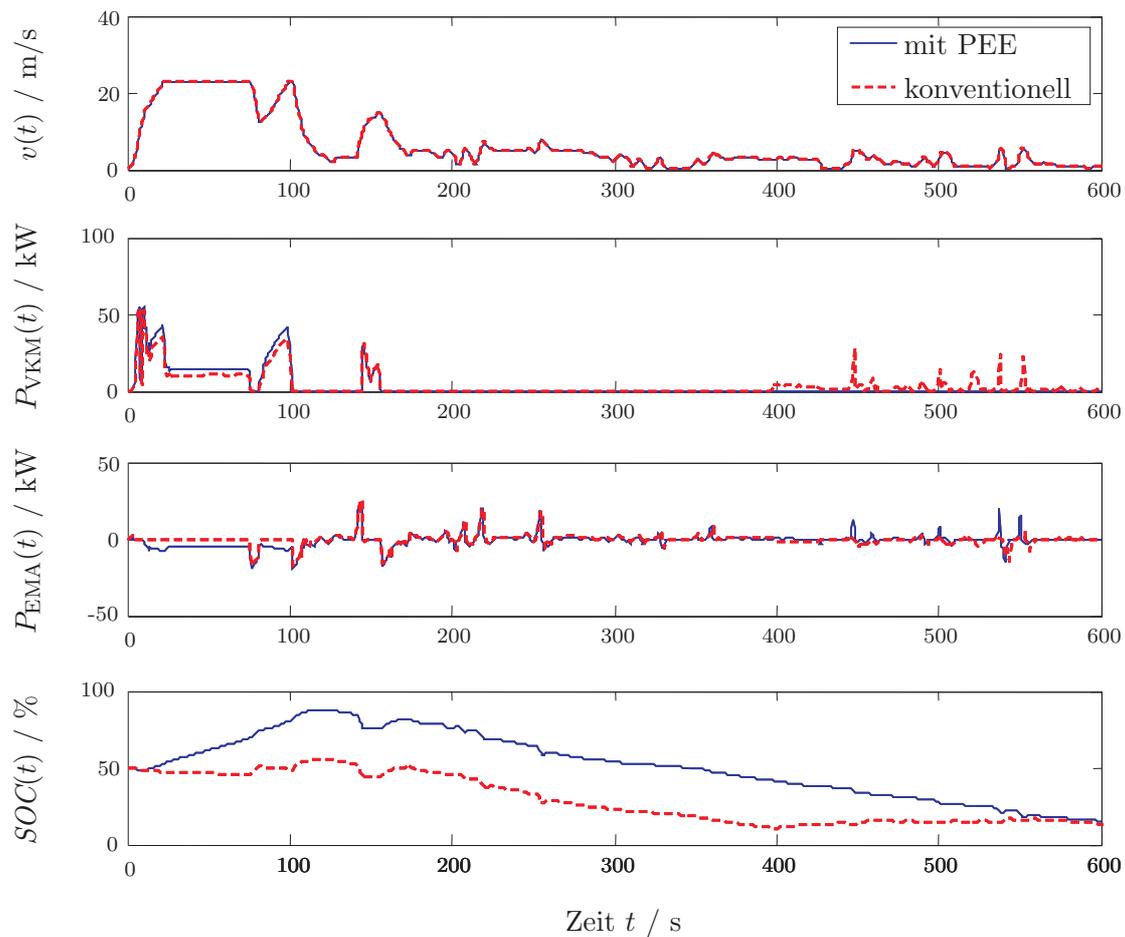


Abbildung 5.4: Full Hybrid mit vorausschauendem und konventionellem Energiemanagement im Stau-Zyklus. Dargestellt ist die Simulation der konventionellen und der prädiktiven Betriebsstrategie für den Full Hybrid. Man erkennt, dass bei der konventionellen Strategie die Lastpunktanhebung zu spät einsetzt und das elektrische Fahren daher ab $t > 400s$ eingeschränkt wird. Da *kein Prognosefehler* unterstellt wird, ist der Verlauf der tatsächlichen Geschwindigkeit $v(t)$ gleich der prognostizierten Geschwindigkeit $\hat{v}(t')$ in Abbildung 5.3.

Eine Gegenüberstellung der konventionellen und der prädiktiven Energiemanagement-Strategie zeigt **Abbildung 5.4**. Bei der konventionellen Betriebsstrategie muss ab $t > 400s$ das elektrische Fahren eingeschränkt werden, was einen um 9% höheren Kraftstoffverbrauch zur Folge hat. Des Weiteren ist durch das prädiktive Energiemanagement der Ladezustand des Traktionsspeichers stets höher als beim konventionellen Energiemanagement. Berücksichtigt man den größeren Energieinhalt am Ende der Simulation, so erhält man einen Verbrauchsvorteil von 11% [80].

Daimler hat in Untersuchungen zum vorausschauendem Energiemanagement ähnliche Ergebnisse erreicht [81]. Es werden für ein Stauszenario 13% Verbrauchsvorteil durch Vorausschau ausgewiesen.

5.4 Schlussfolgerungen zum PEE

Das Kapitel präsentiert ein Vorgehen für prädiktives Energiemanagement. Im Stau-Zyklus konnte damit der Kraftstoffverbrauch um 11% reduziert werden. Unterstellt wurde dabei, dass der Geschwindigkeitsverlauf der vorausliegenden Fahrstrecke mit einer mikroskopischen Verkehrssimulation exakt prognostiziert werden kann.

Interessant wären darüber hinaus Untersuchungen zum prädiktiven elektrischen Energiemanagement (PEE), wenn die Prognose des Verkehrsgeschehens mit einer Unschärfe behaftet ist, wie es in der Realität stets der Fall ist⁵. Daraus kann der Zusammenhang zwischen Prognosewahrscheinlichkeit und Kraftstoffverbrauchspotenzial in unterschiedlichen Szenarien abgeleitet und das PEE an die Prognosewahrscheinlichkeit angepasst werden.

Mit einem adaptiven elektrischen Energiemanagement (AEE), wie es in Kapitel 4 vorgestellt wurde, hätte der Full Hybrid im Stau-Zyklus keine nennenswerte Kraftstoffeinsparung gegenüber dem konventionellen Energiemanagement gezeigt. Grund dafür ist, dass ein adaptives Energiemanagement die negative Energiebilanz erst im Stau erkennt und dadurch keine *präventive* Lastpunktverschiebung, wie sie Abbildung 5.3 zeigt, möglich ist.

Das AEE nach Abschnitt 4.2 spielt daher seine Vorteile vor allem bei Hybridfahrzeugen mit Doppelschichtkondensatoren aus, die nur über einen geringen nutzbaren Energieinhalt verfügen. Das PEE liefert hingegen auch bei Fahrzeugen mit größerem Energieinhalt Verbrauchsvorteile. Für die Prognose ist beim PEE eine Infrastruktur im Fahrzeug erforderlich (Positionsbestimmung, digitale Karten mit Höhenprofil, Kommunikation zu einer Verkehrszentrale oder zu anderen Fahrzeugen⁶, usw.), die heute aus Kostengründen nicht in jedem Fahrzeug verbaut ist oder noch nicht flächendeckend und zuverlässig zur Verfügung steht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass im Rahmen von *Car-to-Infrastructure* und *Car-to-Car Communication* diese Informationen in Zukunft im Fahrzeug bereitgestellt werden.

⁵Vergleiche dazu die Prognose auf autobahn.NRW (<http://www.autobahn.nrw.de>).

⁶Car-to-Infrastructure and Car-to-Car Communication [126, 127].

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs sind hybride Antriebe eine viel versprechende Maßnahme. Der Hybrid spielt seine Vorteile vor allem im urbanen Straßenverkehr aus, wo er durch

- ◇ Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) und
- ◇ elektrischen Fahrzeugbetrieb bei schlechtem Verbrennungsmotorwirkungsgrad (Motorstart/-stopp und elektrisch Fahren)

die Effizienz des Antriebs steigert.

Da der Energieinhalt des Traktionsspeichers stets begrenzt ist, kann es auf Grund von Rekuperation zu einem Energieüberschuss kommen. Bei vollem Traktionsspeicher muss in weiterer Folge die Rekuperation reduziert werden, was einen erhöhten Kraftstoffverbrauch bedeutet.

Ähnliches gilt, wenn der Traktionsspeicher wegen eines Energiedefizits zu stark entladen wird. In diesem Fall muss elektrisch Fahren und Motorstart/-stopp eingeschränkt werden, was eine erhöhte Verbrennungsmotorlaufzeit und mehr Kraftstoffverbrauch zur Folge hat.

In der vorliegenden Arbeit werden Algorithmen vorgestellt, die die Komponenten heutiger und zukünftiger hybrider Antriebe effektiver nützen. Für heutige Fahrzeuge wurde dazu ein adaptives elektrisches Energiemanagement (AEE) entwickelt, welches in Zukunft durch die Nutzung von zuverlässigen Infrastruktur- und Verkehrsdaten zu einem prädiktiven elektrischen Energiemanagement (PEE) ausgebaut werden kann. Beide Energiemanagement-Strategien verfolgen das Ziel, einen Energieüberschuss und ein Energiedefizit zu vermeiden.

Das AEE wurde dabei speziell für den Einsatz im kostengünstigeren Mild Hybrid konzipiert, der mit einem Doppelschichtkondensator als Traktionsspeicher ausgestattet ist. Diese Speicher zeichnen sich durch gute Zyklenfestigkeit und geringe Verluste aus. Sie weisen jedoch nur eine vergleichsweise geringe Energiedichte auf.

Um den nutzbaren Energieinhalt des Traktionsspeichers besser zu nützen, stellt das AEE die Energiebilanz am Traktionsspeicher auf, welche durch Energieeinnahmen und -ausgaben auf Grund der Hybridfunktionen Rekuperieren, elektrisch Fahren, Motorstart/-stopp und Boosten gegeben ist. Angepasst an die Energiebilanz wird der Lastpunkt während der verbrennungsmotorischen Fahrt verschoben.

Das AEE bewies bei der Simulation von Norm- und Kundenzyklen seine Vorteile. Dabei wurde in kundennahen Stadt- und Stau-Zyklen Kraftstoffverbrauchsvorteile von 1 – 1.5% nachgewiesen. Die Einsparungen wurden durch mehr rekuperierte Energie und durch eine bessere Verfügbarkeit von Motorstart/-stopp erzielt. Im europäischen Normzyklus NEFZ wurde ein Verbrauchspotenzial in der gleichen Größenordnung erreicht. Das Verfahren lässt sich als reine Softwarefunktion umsetzen und ist vor allem fahrzeugautonom, d. h. es benötigt *keine Zusatzinformationen* von außen.

Das prädiktive elektrische Energiemanagement (PEE) ist als Erweiterung des AEE bei der Verfügbarkeit von Infrastruktur- und Verkehrsdaten im Fahrzeug zu verstehen. Das PEE ist sowohl für Mild als auch für Full Hybrid geeignet. Dabei wird das Energiemanagement mittels Rückwärtssimulation an eine Streckenvorausschau (Geschwindigkeits- und Höhenprofil der im Voraus liegenden Fahrstrecke) angepasst. In einem Stauszenario konnte mit dem PEE eine Kraftstoffeinsparung von rund 10% gegenüber einem konventionellen Energiemanagement ausgewiesen werden.

Als Basis für das AEE und das PEE dient ein konventionelles Energiemanagement, das auf analytischen, heuristischen Komponentenmodellen basiert. Bei den Modellen wird die Eingangsleistung jeder Komponente als linearisierte Funktion der Ausgangsleistung dargestellt. Dies ermöglicht ein einfaches Hintereinanderreihen der Komponenten, wie es aus der Signal- und Systemtheorie bekannt ist.

Das im Rahmen der vorgestellten Arbeit entwickelte Energiemanagement eröffnet weitere Möglichkeiten. So kann es für die gezielte Abstimmung der Komponenten des hybriden Antriebsstrangs (Traktionsspeicher, elektromotorischer und verbrennungsmotorischer Antrieb) genutzt werden. Darüber hinaus können die analytischen Komponentenmodelle auf Verbrennungsmotoren mit neuen Brennverfahren erweitert werden. Damit wären eine Potenzialanalyse und die Auslegung des Antriebsstrangs und der Betriebsstrategie des hybriden Antriebsstrangs mit diesen Motoren möglich.

Das Potenzial des prädiktiven elektrischen Energiemanagements kann bei weiteren Szenarien und abhängig von der Prognosewahrscheinlichkeit untersucht werden. Der Algorithmus des PEE muss dabei ebenfalls die Prognosewahrscheinlichkeit berücksichtigen.

Beim adaptiven und prädiktiven elektrischen Energiemanagement (AEE und PEE) galt stets die Prämisse, dass das Geschwindigkeitsprofil durch den Fahrer vorgegeben ist. Als Erweiterung können Algorithmen entwickelt werden, die auf eine automatische Geschwin-

digkeitsregelung von Fahrzeugen (ACC, Adaptive Cruise Control) ausgelegt sind. Das Energiemanagement kann dabei dem ACC-System Empfehlungen für die Gestaltung des Geschwindigkeitsverlaufs formulieren. Dabei ist eine weitere Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zu erwarten.

In der vorliegenden Arbeit stand stets der Kraftstoffverbrauch im Mittelpunkt. Ein Energiemanagement hat jedoch auch viele andere Aspekte zu berücksichtigen. So können auch Emissionen, Komfort, Lebensdauer der Komponenten usw. durch das Energiemanagement beeinflusst und durch adaptive und prädiktive Algorithmen verbessert werden.

Bibliographie

- [1] M.J.WERMUTH: *Elemente des Verkehrs*. Skriptum zur Vorlesung, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, TU Braunschweig, 2004.
- [2] H.P.LENZ, E.PUCHER, P.KOHOUTEK, H.RENNENBERG, J.HAHN, E.F.ELSTNER und S.HIPPELI: *Emissionen, Immissionen und Wirkung von Abgaskomponenten*. VDI-Berichte Reihe 12, Nr. 183, ISBN 3-18-148312-5, 1993.
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN und DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG: *Verkehr in Zahlen*. Deutscher Verkehrsverlag GmbH, ISBN 3-87154-294-6, Hamburg, 2003.
- [4] VDA: *Auto 2006*. Jahresbericht, Verband der Automobilindustrie, 2006.
- [5] EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ASSOCIATION AND THE COMMISSION SERVICES: *Monitoring of ACEAs Commitment on CO2 Emission Reductions from Passenger Cars (2003)*. Final Report, Commission of the European Communities, Oktober 2004.
- [6] H.WALLENTOWITZ und B.GNÖRICH: *Entwicklungstrends in der Kfz-Antriebstechnik*. DGES-Fachtagung: Hybrid und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und Strukturen, Ingolstadt, Juni 2005.
- [7] G.SCHMIDT und J.LIEBL: *Senkung der Pkw-CO2-Emission, wirksame Maßnahmen für alle Betriebsbedingungen*. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Nr. 06/2001, ISSN 0024-8525, Seiten 482 – 489, 2001.
- [8] S.KÖHLE: *Entwicklungsziele, Fahrzeugbeschreibung und erste Messergebnisse des VW Bora mit Hybridantrieb*. 2. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, ISBN 3-937655-00-X, Seiten 17 – 40, Februar 2004.
- [9] L.HOFMANN, W.STEIGER, P.ADAMIS und R.PETERSEN: *Möglichkeiten und Grenzen von Elektromaschinen im Antriebsstrang*. Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, VDI-Berichte Nr. 1704, ISBN 3-18-091704-0, Seiten 249 – 269, Oktober 2002.

- [10] K.E.NOREIKAT: *Antriebstechnik, die die Welt (nicht) braucht*. Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, VDI-Berichte Nr. 1704, ISBN 3-18-091704-0, Seiten 143 – 160, Oktober 2002.
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, Berlin: *Nationaler Allokationsplan 2008-2012 für die Bundesrepublik Deutschland*, Juni 2006.
- [12] H.WALLENTOWITZ: *Verbrauchseinsparungen bei Gewichtsoptimierungen*. Werkstoffe im Automobilbau 1999/2000, Sonderausgabe der ATZ Automobiltechnische Zeitschrift und MTZ Motortechnische Zeitschrift, Seiten 69 – 72.
- [13] P.SCHMITZ: *Hybrid-Antriebstechnologie in der Ford Motor Company*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [14] M.KÜSELL: *Hybridsysteme von Bosch*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [15] J.GRÜNEWIG: *DRIVE - Future of Automotive Power*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [16] R.OSTEROTH: *Ferdinand Porsche. Der Pionier und seine Welt*. Rowohlt Verlag GmbH, ISBN 978-3498050368, Reinbek bei Hamburg, 2004.
- [17] J.-W.BIERMANN: *Hybridantriebe - Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile*. 5. Symposium: Elektrische Straßenfahrzeuge, Technische Akademie Esslingen, März 1998.
- [18] H.WALLENTOWITZ, M.JOHANNABER und M.SCHÜSSLER: *Hybrid-Elektro-Antriebssysteme, eine Übersicht*. DGES-Tagung: Hybridtechnologien im Aufschwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, ISBN 3-933634-32-6, Mai 2003.
- [19] K.MUTA, M.YAMAZAKI und J.TOKIEDA: *Development of New-Generation Hybrid System THS II - Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy*. SAE World Congress, March 2004, Session: Advanced Hybrid Vehicle Powertrains, Detroit, SAE-Nr. 2004-01-0064, ISBN 978-0-7680-1369-6, Seiten 55 – 65, 2004.
- [20] K.-U.BLUMENSTOCK: *Generation P*. MOT - Die Autozeitschrift, Nr. 26/2003, ISSN 00271462, Seiten 10 – 13, 2003.

-
- [21] AUTO-TECHNIK: *THS - Toyota Hybrid System*. Auto-Technik, Nr. 06/2003, ISSN 0369-1330, Seiten 32 – 35, 2003.
- [22] H.KUSUMI, K.YAGI, Y.NY, S.ABO, H.SATO, S.FURUTA und M.MORIKAWA: *42V Power Control System for Mild Hybrid Vehicle (MHV)*. SAE World Congress, Detroit, Session: 42 Volt Technology, SAE-Nr. 2002-01-0519, ISBN 978-0-7680-1297-2, Seiten 19 – 25, 2002.
- [23] J.KASSAKIAN: *Challenges of the new 42V Architecture and Progress on Its International Acceptance*. VDI-Tagung: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Berichte Nr. 1415, ISBN 3-18-091415-7, 1998.
- [24] K.-E.NOREIKAT: *Mehrwert mit Hybridfahrzeugen*. DGES-Tagung: Hybridtechnologien im Aufschwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, ISBN 3-933634-32-6, Mai 2003.
- [25] J.STOCKMAR: *Das große Buch der Allradtechnik*. Motorbuch Verlag, ISBN 978-3613024366, Stuttgart, 2004.
- [26] P.PICHLER: *4x4 Hybridmodul mit elektrischer Vorderachse*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [27] T.BRACHMANN, M.MATSUKI, T.WAKASHIRO, T.KAMIYAMA, T.SATO, T.KAKU und M.KANDA: *Development of a Power Train for the Hybrid Automobile, the Civic IMA*. DGES-Tagung: Hybridtechnologien im Aufschwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, ISBN 3-933634-32-6, Mai 2003.
- [28] F.-L.PAEFGEN und M.LEHNA: *Der Audi Duo - das erste serienmäßige Hybridfahrzeug*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 06/1997, ISSN 0001-2785, 1997.
- [29] DUDEN: *Das große Fremdwörterbuch*. Dudenverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, ISBN 3-411-04163-3, 2003.
- [30] M.BERCKMUELLER, H.ROTTENGRUBER, A.EDER, N.BREHM, G.ELSAESSER, G.MUELLER-ALANDER und CH.SCHWARZ: *Wasserstoff-Verbrennungsmotor mit hoher spezifischer Leistung - eine realistische Alternative zu Benzin- und Dieselmotoren*. 20. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung: Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft – Synergien für eine nachhaltige Zukunft?, Wolfsburg VDI-Berichte Nr. 1808, ISBN 3-18-091808-X, Seiten 59 – 72, Dezember 2003.

- [31] S.PISCHINGER, O.RUETTEN und U.UMIERSKI: *Erdgas als Kraftstoff der Zukunft – Effiziente Brennverfahren und Applikation*. 20. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung: Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft – Synergien für eine nachhaltige Zukunft?, Wolfsburg VDI-Berichte Nr. 1808, ISBN 3-18-091808-X, Seiten 73 – 94, Dezember 2003.
- [32] M.LEDERER: *Simulation des instationären Betriebsverhaltens hybrider Antriebsstränge mit aufgeladenem Dieselmotor*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, ISBN 3-89791-322-4, 2004.
- [33] W.STEIGER, B.-G.SCHULZE und T.BÖHM: *Direkthybrid, eine Kombination von Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Getriebe*. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2006.
- [34] S.KERSCHL und E.HIPP: *Der MAN-Ultracap-Bus, Kraftstoffeinsparung durch effiziente Rekuperation*. DGES-Tagung: Hybridtechnologien im Aufschwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, ISBN 3-933634-32-6, Mai 2003.
- [35] L.HOFMANN und W.STEIGER: *Powertrain and Control Concept of the Golf TDI Hybrid*. 21. International Electric Vehicle Symposium, Monaco, April 2005.
- [36] AUTO BILD: *Touran-Vergleich: Hybrid gegen TDI - Ist der Hybrid dem Diesel überlegen?* Auto Bild Nr. 31/2004, ISSN 0930-7095, 2004.
- [37] R.NAJORK: *Getriebesysteme für Hybride*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [38] ST.RINDERKNECHT, M.SEUFERT, R.ELLINGER, R.SCHNEIDER und J.WAGNER: *ECO TARGET: An Innovative Powertrain for fulfilling Future Transportation Requirements*. 25. Internationales Wiener Motorensymposium, ISBN 3-18-356612-5, April 2004.
- [39] J.-W.BIERMANN, C.BUNZ, M.CRAMPEN, S.KÖHLE und D.MESITI: *Drei OEM, ein gemeinsames Antriebskonzept. Drei neue Hybridfahrzeuge, entwickelt im EU-Projekt SUVA*. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2004.
- [40] G.HACK: *VW-Golf-Hybrid: Auf Sparkurs*. AMS - Auto, Motor und Sport Nr. 12/2005, ISSN 0005-0806, 2005.

-
- [41] A.TRUCKENBRODT, L.NITZ und W.EPPLE: *Two Mode Hybrids, Adaptionstärken eines Intelligenten Systems*. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2006.
- [42] BOSCH (Herausgeber): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 24. Auflage, ISBN 978-3-8348-0138-8, 2002.
- [43] A.TRUCKENBRODT und L.NITZ: *Das neue 2-Mode Hybrid-System der globalen Hybrid Kooperation*. 27. Internationales Wiener Motorensymposium, ISBN 3-18-362212-2, April 2006.
- [44] B.KÄHLER, K.KERSTING und M.BROUWER: *Entwicklungskriterien, Analysemethoden und Beurteilung der Leistungsverzweigungen im Antriebsstrang, beispielhaft erklärt am TWOMode Hybridantrieb von DaimlerChrysler*. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2007.
- [45] C.RENNER und H.MEINHEIT: *Parallel, kombiniert oder leistungsverzweigt? Ein simulationsgestützter Konzeptvergleich! Tag des Hybrids: Experten referieren über neueste Entwicklungen und zukünftige Potentiale des Hybridantriebs*, Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Kraftfahrwesen, Oktober 2005.
- [46] CH.RENNER: *Hybridkonzepte, Vergleichende Analyse mittels Längsdynamiksimulation*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [47] F.MÜLLER, P.LÜCK und S.KÖHLE: *Hybrid Electric Vehicles, Discussion of Different Configurations*. Proceedings of the 2000 Global Powertrain Congress, Vol. 15: Advanced Propulsion and Emission Technology, Detroit, Juni 2000.
- [48] P.LÜCK und F.MÜLLER: *Hybridantriebe*. 5. Anwenderforum Elektromobile, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut, Regensburg, Februar 2000.
- [49] L.HOFMANN: *Antriebs- und Steuerungskonzept des VW Golf TDI-Hybrid*. DGES-Fachtagung: Hybrid und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und Strukturen, Ingolstadt, Juni 2005.
- [50] W.JOSEFOWITZ und S.KOEHLE: *Volkswagen Elektro-Hybridfahrzeuge*. 1. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, ISBN 3-18-348412-9, Februar 2002.
- [51] K.ULRICH: *The role of product architecture in the manufacturing firm*. Research Policy, Vol. 24, Nr. 3, Elsevier, ISSN 0048-7333, Seiten 419 – 440, Mai 1995.

- [52] M.SCHÖTTLE: *VW revolutioniert Hybridantrieb*. Automobil-Produktion Nr. 12/2006, ISSN 0934-0394, Seiten 46 – 48, Dezember 2006.
- [53] M.KLÜTING und T.MELCHER: *Effiziente Dynamik, ein integraler Ansatz für die BMW Antriebe der Zukunft*. 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2005.
- [54] A.SCHWAKE: *UltraCaps für Mildhybrid-Anwendungen*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [55] M.FISTER: *Energieeinsparung, Funktionen und Systemaufwände – Elektrisch installierte Leistung in Hybridfahrzeugen im Spannungsfeld zwischen Energieeinsparung, Funktionen und Systemaufwände*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [56] F.V.CONTE, H.GIULIANI, H.OBERGUGGENBERGER und M.NOLL: *Modular design of an energy storage system for Hybrid Electric Vehicle*. Tagung Haus der Technik: Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge, München, expert-Verlag, ISBN 3816926770, 2007.
- [57] TH.CHRIST: *Rekuperation von elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät für Verkehrs- und Maschinenwesen, ISBN 3-18-362312-9, 2005.
- [58] M.HAFKEMEYER, J.LIEBL, F.EL-DWAIK und J.STAUBER: *Effiziente Dynamik durch intelligentes Energiemanagement*. 12. Internationale Tagung: Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, VDI-Berichte Nr. 1907, ISBN 3-18-091907-8, Oktober 2005.
- [59] J.LIEBL, E.FRICKENSTEIN, M.WIER, M.HAFKEMEYER, F.EL-DWAIK und E.HOCKGEIER: *Intelligente Generatorregelung – Ein Weg zur effizienten Dynamik*. ATZelektronik Nr. 04/2006, ISSN 1862-1791, 2006.
- [60] D.KOK, S.PLOUMEN, E.SPIJKER und E.KARDEN: *Energiemanagement in zukünftigen Antriebsstrangkonzepenten*. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Seiten 777 – 800, 2003.
- [61] M.ESPIG und J.-W.BIERMANN: *Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen am Beispiel eines Kompaktklasse-Pkw*. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Oktober 2007.

-
- [62] T.HORIE: *Honda Civic Hybrid – Technical Presentation*. SAE Hybrid Vehicle Technologies Symposium, San Diego, 2006.
- [63] S.STÖLZL, R.SCHMIDT, W.KLING, T.STICHER, G.FACHING, A.KLEIN, B.GIERS und H.FENNEL: *Das Elektro-Hydraulische Bremssystem von Continental Teves, eine neue Herausforderung für die System- und Methodenentwicklung in der Serie*. VDI-Tagung Baden-Baden: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Bericht Nr. 1547, ISBN 3-18-091547-1, Seiten 1211 – 1226, 2000.
- [64] M.KUCERA, H.MAUSER und TH.BRANDMEIER: *Ein Weg zu einer zuverlässigen Systemarchitektur für By-Wire-Systeme am Beispiel des Elektromechanischen Bremssystems EMB*. VDI-Tagung Baden-Baden: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Bericht Nr. 1547, ISBN 3-18-091547-1, Seiten 43 – 58, 2000.
- [65] I.GORILLE: *Leistungsbedarf und Antrieb von Nebenaggregaten*. 2. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Seiten 427 – 444, Oktober 1989.
- [66] B.VOSS: *Bedarfsorientierte Nebenaggregate*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 12/1992, ISSN 0001-2785, Seiten 644 – 648, 1992.
- [67] TH.ESCH, TH.SAUPE, E.FAHL und F.KOCH: *Verbrauchseinsparung durch bedarfsgerechten Antrieb der Nebenaggregate*. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Nr. 08/1994, ISSN 0024-8525, Seiten 416 – 431, 1994.
- [68] H.WALLENTOWITZ und M.CRAMPEN: *Einfluss von Nebenaggregaten auf den Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Fahrzyklen*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 11/1994, ISSN 0001-2785, Seiten 643 – 644, 1994.
- [69] J.SCHMIDT und B.RADERMACHER: *Zu große Nebenaggregate*. Automobil-Produktion, Ausgabe 04/99, Seiten 148 – 151, April 1999.
- [70] R.ISERMANN, G.HOHENBERG, M.SCHMIDT und B.LENZEN: *Nebenaggregate-Management zur Reduktion von Verbrauch und Emissionen*. 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Seiten 271 – 284, Oktober 1997.
- [71] G.HOHENBERG, R.ISERMANN, B.LENZEN und M.SCHMIDT: *Nebenaggregate-Management III, Ganzheitliches Nebenaggregate-Management bei Innovationen im Antriebsstrang*. Informationstagung Motoren, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main, 2000.
- [72] H.WALLENTOWITZ, J.RAPPEN und F.GOSSEN: *Kraftstoff-Einsparpotential durch Gewichtsreduzierung und durch Nebenaggregate-Beeinflussung, Simulationsrechnungen und Prüfstandsversuche*. VDI/VW-Gemeinschaftstagung, Ganzheitliche Be-

- trachtungen im Automobilbau, Wolfsburg, VDI-Berichte Nr. 1307, ISBN 3-18-091307-X, Seiten 201 – 223, 1996.
- [73] M.SCHMIDT, R.ISERMANN und E.POTT: *Energieeinsparung bei Nebenaggregaten ohne Komforteinbußen*. VDI-Tagung Baden-Baden: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Bericht Nr. 1547, ISBN 3-18-091547-1, Seiten 587 – 600, 2000.
- [74] M.BÖCKL und B.RIUS-SAMBEAT: *Auslegung des elektrischen Antriebs und Auswirkungen auf die Betriebsstrategie bei einem Parallelhybrid*. Tagung: Hybridantrieb, die Zukunft des Automobilantriebs?, Haus der Technik, Berlin, ISBN 3-8169-2501-4.
- [75] R.KUBE, M.BÖCKL, M.HOMMEL und S.KÖHLE: *Energy Management Strategies for Hybrid Drive Train Systems Using Infrastructure Information*. EUROMOTOR-Tagung: Energy Management – Today and tomorrow, Aachen, September 2004.
- [76] J.KÜMPERS: *Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge*. 2. Management Circle Fachkonferenz: Hybridfahrzeuge auf dem Vormarsch!, Frankfurt am Main, Management Circle AG, Eschborn, Mai 2006.
- [77] M.ULRICH, W.JOSEFOWITZ und P.LÜCK: *Batteriesysteme für Hybridfahrzeuge, Technologie und Auslegung*. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2003.
- [78] R.KNORR, H.-M.GRAF und G.LUGERT: *Mehr Power für den ISG*. Auto und Elektronik, Nr. 04/2002, ISSN 1439-6556, Seiten 19 – 26, 2002.
- [79] DIN-VDE-NORM 0105: *Betrieb von elektrischen Anlagen*. VDE-Verlag, ISBN 978-3800725564.
- [80] M.BÖCKL, R.KUBE und S.KÖHLE: *Ganzheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride Antriebssysteme – Simulationstechnische Abbildung des Gesamtsystems*. Abschlussbericht, BMBF-Projekt 19 U 1030 C, 2003.
- [81] V.SANCHEN: *Ganzheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategien für hybride Antriebssysteme*. Schlussbericht, BMBF-Projekt 19 U 1030 D, 2002.
- [82] B.BAUMANN, G.RIZZONI und G.WASHINGTON: *Intelligent Control of Hybrid Vehicles using Neural Networks and Fuzzy Logic*. Society of Automotive Engineers, Electric and Hybrid Electric Vehicles, ISBN 978-0-7680-0833-3, (981061):125 – 133, 1998.

-
- [83] A.KLEIMAIER und D.SCHRÖDER: *Optimized Design and Control of a Hybrid Vehicle with CVT*. 1. IFAC-Conference: Mechatronic Systems, Darmstadt, International Federation of Automatic Control, ISBN 0-08-043551-3, Seiten 197 – 202, September 2000.
- [84] A.KLEIMAIER: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [85] A.KLEIMAIER und D.SCHRÖDER: *The Autark Hybrid Vehicle - Optimal Engine Operation*. 18. International Electric Vehicle Symposium, Berlin, Oktober 2001.
- [86] R.LANGARI und J.-S.WON: *A Driving Situation Awareness-Based Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Vehicles*. SAE Future Transportation Technology Conference, Costa Mesa, Session: Hybrid Vehicle Technology II, SAE-Nr. 2003-01-2311, ISBN 978-0-7680-1281-1, Juni 2003.
- [87] L.IPPOLITO, V.LOIA und P.SIANO: *An Agent Based Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles*. IFAC-Symposium: Advances in Automotive Control, University of Salerno, International Federation of Automatic Control, ISBN 0-08-044250-1, April 2004.
- [88] E.MÜNZ, M.SCHWAIGER und V.KREBS: *Controlling Hybrid Electric Vehicles Using Differential Game Theory*. IFAC-Symposium: Advances in Automotive Control, University of Salerno, International Federation of Automatic Control, ISBN 0-08-044250-1, April 2004.
- [89] H.BARSKE und N.SARIDAKIS: *Verfahren zum Betrieb eines Hybridfahrzeugs und Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens*. Patent Nr. DE 43 44 053 A1, Juli 1994.
- [90] K.ROHDE-BRANDENBURGER: *Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen*. Tagung Haus der Technik: Einfluss von Gesamtfahrzeug-Parametern auf Fahrverhalten/Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch, Essen, 1996.
- [91] R.SCHÖTTLE und G.THREIN: *Elektrisches Energiebordnetz: Gegenwart und Zukunft*. VDI-Tagung Baden-Baden: Elektronik im Kraftfahrzeug, VDI-Bericht Nr. 1547, ISBN 3-18-091547-1, Seiten 449 – 475, 2000.
- [92] E.POTT: *Energieflussmanagement zur Kraftstoffverbrauchs-, Emissions- und Heizkomfortoptimierung*. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 08/1998, ISSN 0001-2785, Seiten 480 – 488, 1998.

- [93] M.HOMMEL: *Parallelisierte Simulationsprozesse für virtuelles Prototyping in der Automobilindustrie*. Dissertation, Technische Universität Carolo Wilhelmina, Braunschweig, urn:nbn:de:gbv:084-10440, 2006.
- [94] C.-C.LIN, Z.FILIPPI, Y.WANG, L.LOUCA, H.PENG, D.ASSANIS und J.STEIN: *Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in Simulink and its Use for Power Management Studies*. SAE World Congress, Session: Advanced Hybrid Vehicle Powertrains, Detroit, SAE-Nr. 2001-01-1334, 2001.
- [95] K.B.WIPKE, M.R.CUDDY und S.D.BURCH: *ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach*. IEEE Transactions on Vehicular Technology: Special Issues on Hybrid and Electric Vehicles, ISBN 978-0768007459, 1999.
- [96] K.-H.NEUMANN, D.NEYER und H. STEHR: *Der neue 3-Zylinder-Dieselmotor mit Hochdruckeinspritzung von Volkswagen*. 19. Internationales Wiener Motorensymposium, ISBN 3-18-334812-8, 1998.
- [97] M.WEIDHAS: *Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren*. ZVEI-Workshop: UltraCaps, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt am Main, Jänner 2004.
- [98] A.EGGER und M.SCHMID: *Doppelschicht-Kondensator als Kurzzeitspeicher für den autarken Hybrid*. VDI-Tagung Hybridantriebe, München, VDI-Berichte Nr. 1459, ISBN 3-18-091459-9, Seiten 167 – 180, 1999.
- [99] R.KNORR, M.DEIML und G. LUGERT: *Starter Generator zeigt Biss. Mehr Fahrspaß durch SuperCaps*. 2. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, ISBN 3-937655-00-X, Seiten 17 – 40, Februar 2004.
- [100] H.BRUGLACHNER: *Neue Elektrolyte für Doppelschichtkondensatoren*. Dissertation, Universität Regensburg, Naturwissenschaftliche Fakultät – Chemie und Pharmazie, 2004.
- [101] A.PRECHTL: *Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik, Band 1*. Springer, ISBN 978-3-211-30418-1.
- [102] A.KRAMPE: *Temperaturregelung von luftgekühlten Traktionsbatterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen*. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2002.
- [103] EWG: *Anlage 1: Unterteilung der Fahrzyklen bei der Prüfung Typ I*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, 91 441 EWG, L 242/33-42, 30.08.1991.

-
- [104] S.FRIEDMANN, C.JONES, D.MESITI, M.ANDRÉ, P.CARMINOT, M.AUDINET, A.KÜNZER, W.KRIEGLER, R.HEATH, N.KYRIAKIS, P.DIETRICH, C.REULEIN, W.JOSEFOWITZ und A.LASSON: *Entwicklung von Bewertungswerkzeugen für Hybridfahrzeuge (EUCAR-Projekt HYZEM: Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility)*. VDI-GET-Tagung: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeuge, VDI-Berichte Nr. 1378, ISBN 3-18-091378-9, Dresden, Februar 1998.
- [105] C.J.T.VAN DE WEIJER: *Heavy-Duty Emission Factors*. Dissertation, Technische Universität Graz, Fakultät für Maschinenbau, 1997.
- [106] G.GIGERENZER: *Geistesgrößen (Teil VIII): Sorge dich nicht, denke!* DER SPIEGEL Nr. 37/2007, ISSN 0038-7452, Seite 184, 2007.
- [107] S.J.PACHERNEGG: *A Closer Look at the Willans-Line*. International Automotive Engineering Congress, Detroit, SAE-Nr. 690182, 1969.
- [108] A.GELLER: *Thermodynamische Analyse am 2,0l-TDI-Motor*. Diplomarbeit, Fachhochschule Giessen Friedberg, 1998.
- [109] W.MICHEL: *Das Auto als Persönlichkeit*. Kfz-Betrieb, Nr. 31/2002, ISSN 0170-9852, Seiten 34 – 36, 2002.
- [110] W.-R.CANDERS, H.WÖHL-BRUHN und B.RIUS-SAMBEAT: *Charakterisierung und gezielter Entwurf von Elektromotoren für Fahrzeugantriebe*. 2. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, ISBN 3-937655-00-X, Seiten 17 – 40, Februar 2004.
- [111] B.RIUS-SAMBEAT: *Elektrische Antriebe für Hybridfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Carolo Wilhelmina, Braunschweig, 2008.
- [112] J.V.GRUNDHERR und M.LEDERER: *Möglichkeiten und Grenzen von Online-Optimierung zur Steuerung hybriden Antriebsstrangs*. Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren: AUTOREG 2008, Baden-Baden, Februar 2008.
- [113] R.HOFFMANN: *Signalanalyse und -erkennung: Eine Einführung für Informationstechniker*. Springer, ISBN 978-3-540-63443-0, 1998.
- [114] H.WEINRICHTER und F.HLAWATSCH: *Stochastische Grundlagen Nachrichtentechnischer Signale*. Springer, ISBN 978-3211823033, 1991.
- [115] L.DEBNATH: *Wavelet transforms and their applications*. Birkhäuser, ISBN 978-0-8176-4204-4, 2002.

- [116] K.E.KRÜGER: *Transformationen: Grundlagen und Anwendungen in der Nachrichtentechnik*. vieweg: Studium Technik, ISBN 978-3528039080, 2002.
- [117] R.KUBE: *Einfluss der Blattelastizität auf die höherharmonische Steuerung und Regelung eines gelenklosen Hubschrauberrotors*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Report No. DLR FB 97 26, 1997.
- [118] R.HOFFMANN: *Grundlagen der Frequenzanalyse. Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker*. expert-Verlag, ISBN 978-3816924470, 2001.
- [119] F.HLAWATSCH: *Analog and digital communication techniques*. Skriptum zur Vorlesung, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, TU Wien, 1999.
- [120] J.PICKENHAHN, L.GILLES, TH.HÖNIG und P.THOMAS: *Konzepte für Regeneratives Bremsen in Fahrzeugen mit Hybrid Antriebsstrang*. XXVI. Internationales μ -Symposium – Bremsen-Fachtagung, Bad Neuenahr, ISBN 3-18-362012-X, Seiten 106–136, Juni 2006.
- [121] D.HELBBING: *Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, ISBN 978-3-540-61927-7, 1997.
- [122] PELOPS: *www.pelops.de*.
- [123] M.CREMER und J.LUDWIG: *A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations*. Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 28, Nr. 4, ISSN 0378-4754, Seiten 297–303, August 1986.
- [124] K.NAGEL und M.SCHRECKENBERG: *A cellular automaton model for freeway traffic*. Journal de Physique I, Vol. 2, Nr. 12/1992, ISSN 1155-4304, Seiten 2221–2229, Dezember 1992.
- [125] O.KAUMANN, R.CHROBOK, J.WAHLE und M.SCHRECKENBERG: *Traffic Forecast Using On-Line Simulations*. 8th Meeting of the Euro Working Group Transportation (EWGT), Rome, September 2000.
- [126] A.LÜBKE: *Car-to-Car Communication – Technologische Herausforderungen*. Innovationen für Menschen: VDE-Kongress 2004, ISBN 3-8007-2827-3, Berlin, Oktober 2004.
- [127] W.FRANZ: *Car-to-Car Communication – Anwendungen und aktuelle Forschungsprogramme in Europa, USA und Japan*. Innovationen für Menschen: VDE-Kongress 2004, ISBN 3-8007-2827-3, Berlin, Oktober 2004.

Curriculum Vitae

Name Michael Böckl **geboren** am 31. 12. 1975 in Mistelbach, Niederösterreich.



Studium Doktorat an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, TU Wien.
1996 - 2002 Studium der Elektrotechnik, Studiengang Nachrichten- und Informationstechnik, TU Wien, Abschluss 2002 mit Auszeichnung.
2001 Studium der Telekommunikation, Universität Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Stipendien

2002 Marie Curie Host Fellowship.
2001 Förderungsstipendium der Fakultät für Elektrotechnik.

Berufserfahrung

seit 2005 BMW AG, Entwicklung Energiemanagement, München.
2002 - 2005 Volkswagen AG, Konzernforschung Hybridantriebe, Wolfsburg.

Publikationen

2005 M.BÖCKL, B.RIUS-SAMBEAT: *Auslegung des elektrischen Antriebs und Auswirkungen auf die Betriebsstrategie bei einem Parallelhybrid*, Tagung: Haus der Technik e.V.: Hybridantrieb – die Zukunft des Automobilantriebs?, Berlin.
2004 R.KUBE, M.BÖCKL, M.HOMMEL, S.KÖHLE: *Energy Management Strategies for Hybrid Drive Train Systems Using Infrastructure Information*, Tagung: EUROMOTOR-Symposium: New Advances in Electronics Engineering, Energy Management. Today and tomorrow, Aachen.
2003 M.BÖCKL, R.KUBE: *Gesamtheitliche fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte vorausschauende Energiemanagement-Strategie für hybride Antriebssysteme*, Forschungsbericht: BMBF-Projekt 19 U 1030 C, Wolfsburg.
2002 M.BÖCKL: *Modulation Formats for Fiber Transmission Systems with Direct-Detection Receivers*, Diplomarbeit, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, TU Wien.