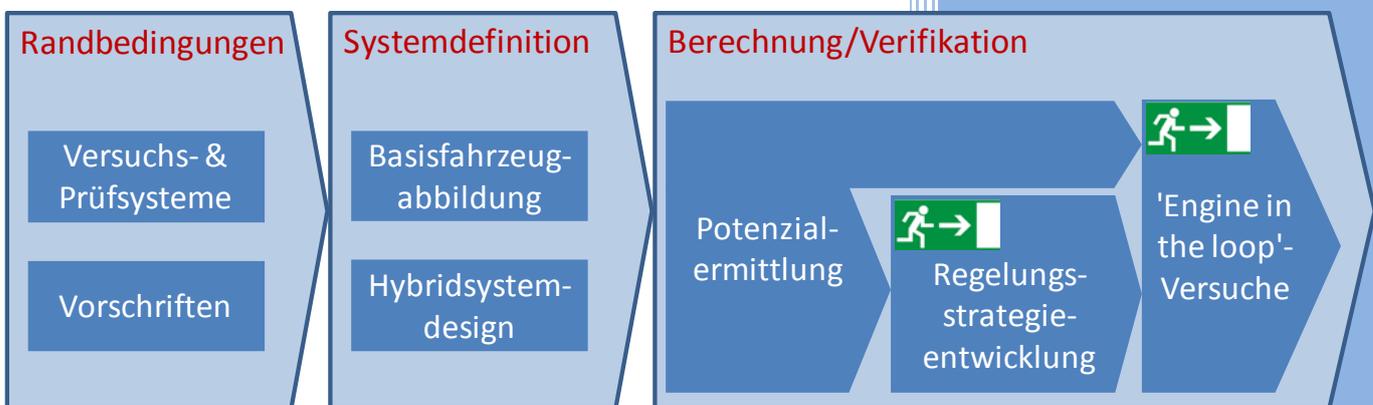


2012



Vorentwicklungsprozess 'Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebsstränge'

Entwicklung, Anwendung und Ergebnisse einer Methodik für
die Potenzialbestimmung mittels Simulation und Versuch

Bernd Klima
Dissertation

Vorentwicklungsprozess 'Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebsstränge'

Entwicklung, Anwendung und Ergebnisse einer
Methodik für die Potenzialbestimmung mittels
Simulation und Versuch

*Dissertation von
Bernd Klima*

vorgelegt zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der Doctoral School Maschinenbau der
Technischen Universität Graz

begutachtet von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder (TU Graz)
und
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Geringer (TU Wien)

„Wenn jemand aus allen Künsten die Rechenkunst und die Messkunst und die Waagekunst ausscheidet, so ist es, geradeheraus zu sagen, nur etwas Geringfügiges, was von einer jeden dann noch übrig bleibt.“

Sokrates (469 – 399 v. Chr.)

„Den lieb' ich, der Unmögliches begehrt.“

Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832)

„Ernst zu nehmende Forschung erkennt man daran, dass plötzlich zwei Probleme existieren, wo es vorher nur eines gegeben hat.“

Thorstein Bunde Veblen (1857-1929)

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als Universitäts-Projektassistent im Arbeitsbereich Brennverfahrensentwicklung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der Technischen Universität Graz entstanden.

Die Ergebnisse habe ich im Rahmen zweier geförderte Projekte des COMET K2 Forschungsförderungs-Programm des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, des Österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend, der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft, des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung erarbeitet. Die beiden vom VIRTUAL VEHICLE getragenen Forschungsvorhaben 'Advanced & Alternative Diesel Propulsion Systems – Emission Reduction & Fuel Economy Improvement' und 'Integrated Propulsion System Development – Emission Reduction & Fuel Economy Improvement' sind am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik gemeinsam mit den Industriepartnern AVL List GmbH, MAN Nutzfahrzeuge Österreich AG, OMV AG und Behr GmbH & Co. KG durchgeführt worden.

Ich bedanke mich beim Institutsvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder für die Ermöglichung dieser Arbeit, die spannende und lehrreiche Zeit am Institut, seine durchgehende und hochwertige Unterstützung und die gewissenhafte Begutachtung dieser Arbeit. Rückblickend ist meine Zeit am Institut eine Zeit, in der ich neben dieser Arbeit auch viele andere interessante Tätigkeiten durchführen, meine Fähigkeiten entwickeln und verfeinern durfte, sowie genügend Freiräume hatte, um meine Ziele zu erreichen. Dabei gewonnene Erfahrungen sind ein wichtiger Beitrag zu meiner Ausbildung. Das gilt nicht nur für die erzielten Erfolge, sondern insbesondere auch für so manche Rückschläge.

Bei Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger bedanke ich mich für die Durchsicht und Diskussion ausgewählter Kapitel dieser Arbeit. Sein Feedback hat wesentlich zur Verbesserung der Lesbarkeit und Verdeutlichung einiger Formulierungen beigetragen.

Ich danke auch allen Kollegen des Institutes für die gute Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich die Kollegen, mit denen ich im Rahmen der beiden K2-Forschungsprojekte enger zusammenarbeiten durfte: Kurt Leopold, Andreas Neureiter, Jochen Pramhas, Hannes Schweiger und Eberhard Schutting. Deren über das gewöhnliche Maß hinausgehender Einsatz und nicht zuletzt das ausgezeichnete Verhältnis im Projektteam haben mir gerade auch immer dann geholfen, wenn es schwierig geworden ist. Sei es mit den richtigen Tipps oder aber auch mit der nötigen Portion Humor, um Abstand zu gewinnen. Dadurch ergibt sich oft erst der entscheidende Blick auf das Wesentliche.

Außerdem gilt mein Dank den Mitarbeitern der Projektpartner, die mich unterstützt haben. Entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Ludwig Bürgler, Alois Danninger, Michael Glensvig, Arno Huss, Horst Mitterecker, Klemens Neunteufl, Michael Nöst, Herwig Ofner, Christian Sauer, Eduard Simitsch und Thomas Wimmler.

Schließlich bedanke ich mich noch bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Geringer, Dekan der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften und Vorstand des Institutes für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik an der Technischen Universität Wien, für die Übernahme und Durchführung der Zweitbegutachtung dieser Arbeit.

Wichtig ist mir auch zu betonen, dass meine Familie und meine Freunde mich immer begleitet haben und mir so die nötige Ausdauer ermöglicht haben.

Graz, September 2012

Bernd Klima

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt die Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebsstränge. Auf Basis konventioneller Diesel-Fahrzeuge werden Hybridelektrofahrzeuge definiert. Beschränkt wird der Umfang auf die Schwerpunkte der Vorentwicklungsphase Simulation und Motorprüfstandsversuch. Die Bearbeitung der Teilelektrifizierung beinhaltet keine Plug-In-Hybridfahrzeuge und Batterieelektrofahrzeuge.

Eine Motivationsanalyse, eine Zusammenfassung der Historie von Hybridantrieben, die Beschreibung von Hybridantriebsstrang-Topologien und die Analyse der spezifischen Vorteile von Dieselmotoren gegenüber Ottomotoren führen in das Thema ein.

Der vorgestellte Prozess ermöglicht die Potenzialermittlung hinsichtlich verschiedener Zielgrößen, wie dem Kraftstoffverbrauch. Mit einer Methodik zur objektiver Bewertung und Auswahl möglicher Betriebsmodi eines Hybridfahrzeugs werden Grenzpotenziale für definierte Fahrzyklen errechnet und am Motorprüfstand bestätigt. Das Konzept fußt auf der Bewertung aller zu einem Zeitpunkt möglichen Betriebsmodi mittels eines einheitlichen Verfahrens. Vom elektrischen Fahren bis zu Lastpunktanhebungen zum Laden des Energiespeichers werden alle Möglichkeiten erfasst und somit direkt vergleichbar. Eine darauf basierende Regelungsstrategie kann die Potenziale in den realen Fahrbetrieb übertragen. In der Konzeptphase sind verschiedene Systeme so bewertbar und vergleichbar.

Die Hybridisierung zeigt mit Dieselmotoren große Potenziale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Für Pkw der oberen Mittelklasse betragen diese je nach Fahrprofil zwischen zehn und 40 Prozent, wenn die Verbrennungskraftmaschine vom restlichen Antriebsstrang durch eine Trennkupplung abtrennbar ist. Hauptursache dafür ist die Vermeidung der parasitären Schleppverluste der Verbrennungskraftmaschine. Lastpunktmanipulationen zum Laden des Energiespeichers bieten praktisch keine Vorteile zur weiteren Senkung des Kraftstoffverbrauchs. Typischerweise ist bei deren Einsatz mit Verlusten im elektrischen System zu rechnen, die die Vorteile überwiegen. Das liegt an den bei Dieselmotoren üblicherweise näherungsweise leistungsunabhängigen Verlusten. Da die elektrischen Verluste im seriellen Hybrid-Betrieb aufgrund der höheren elektrischen Leistungen weitaus größer sind, bringt dieser gegenüber parallelem meist keine Vorteile.

Ist die elektrische Leistung beschränkt, führen auch vereinfachte Betriebsstrategien, die nicht oder nur teilweise auf der komplexen Methodik der Betriebsmodibewertung beruhen, zu vergleichbaren Einsparungen. Ebenfalls wegen der näherungsweise leistungsunabhängigen Verluste der Dieselmotoren soll die rekuperierte Energie hauptsächlich für elektrisches Fahren bei Vortriebsanforderungen mit geringer Leistungsanforderung verwendet werden.

Das Hybridsystem kann auch zur Emissionsminimierung genutzt werden. Ohne Lastpunktmanipulationen ergeben sich bei Stickoxidminimierung ähnliche Betriebsbereiche der Verbrennungskraftmaschine wie bei Verbrauchsminimierung. Gegenüber konventionellen Fahrzeugen sind bei verbrauchsoptimaler Betriebsführung auch für Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Partikelemissionen keine Steigerungen zu erwarten. Mit Lastpunktmanipulationen entsteht ein Trade-Off zwischen Verbrauch und Stickoxidemissionen.

Obwohl die Methodik anhand der Hybridisierung von Pkw-Dieselantriebssträngen entwickelt worden ist, ist ihre Anwendung nicht darauf beschränkt. Beispielrechnungen für leichte Nutzfahrzeuge demonstrieren, dass qualitativ ähnliche Ergebnisse erhalten werden.

Die Arbeit beschreibt abschließend auch die mögliche Integration der Ansätze in eine Gesamtsystemsimulation.

Abstract

This thesis deals with the electrification of Diesel motor-vehicle drive trains. On the basis of conventional diesel vehicles, hybrid electric vehicles are defined. The scope of the thesis is limited to the pre-development phase with a focus on simulation and engine test bench work. The development of plug-in hybrid vehicles and battery electric vehicles is not covered within this thesis.

A motivation analysis, a summary of the history of hybrid drives, the description of topologies, and an analysis of the specific advantages of diesel engines compared to gasoline engines introduce the issue.

The proposed process enables the potential determination with respect to various targets, such as fuel consumption. With an objective method for evaluation and selection of possible operating modes of a hybrid vehicle potentials are calculated for given driving cycles and confirmed on the test bench. The concept is based on evaluation of all possible modes of operation for a time step by a single procedure. From electric driving up to load point increase to charge the energy storage all options are considered and thus directly comparable. A control strategy based thereon can transfer the potential to real driving conditions. This allows the assessment and comparison of different systems during the concept phase.

In combination with Diesel engines the hybridization shows great potential to reduce fuel consumption. With a clutch used to separate the internal combustion engine from the rest of the drive train the fuel economy improvement is between ten and 40 percent for upper middle class passenger cars, depending on the driving cycle. This is mainly caused by avoiding the parasitic drag losses of the engine. Load point manipulations to charge the energy storage system offer virtually no advantage in terms of fuel economy. Typically, the use leads to electrical system losses which outweigh the benefits. This is due to the diesel engines losses that are usually approximately independent of power. Since the electrical losses in the serial hybrid operation are far greater because of higher electrical power serial hybrid operation shows generally less benefit than parallel.

If the electric power is limited comparable savings may be achieved with simplified operation strategies. These strategies are not or only partly based on the complex methodology of the operation mode assessment. Again, due to the diesel engines losses being usually approximately independent of power, the recuperated energy shall mainly be used for electric driving at low driving power requirements.

The hybrid strategy can be designed for emission reduction, too. Without load point manipulation the resulting operating ranges of the internal combustion engine for optimization with respect to nitrogen oxide minimization are very similar to the results for optimal fuel economy. Compared to conventional vehicles an increase in hydrocarbons, carbon monoxide, or particulate matter emissions by fuel-optimal management is not expected. Load point manipulations create a trade-off between consumption and emissions of nitrogen oxides.

Although the methodology has mainly been developed with respect to hybridization of Diesel power trains of passenger cars, the application is not limited thereto. Based on sample calculations for light-duty vehicles this thesis shows that qualitatively similar results are obtained.

The thesis finally also describes the possible integration of the calculation approach in an overall system simulation.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, 2012

Bernd Klima eh.

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort und Danksagung	II
	Kurzfassung	III
	Abstract	IV
	Eidesstattliche Erklärung	V
	Inhaltsverzeichnis	VI
	Abkürzungen	IX
	Formel- und Legendenzeichen	X
	Indizes	XII
1	Einleitung.....	1
	1.1 Allgemeine Begriffsdefinitionen.....	1
	1.2 Motive zur Untersuchung der Teilelektrifizierung.....	2
	1.3 Systemvarianten und Klassifizierung der Hybridfahrzeugantriebe.....	5
	1.4 Mögliche erweiterte Betriebsarten.....	6
	1.5 Geschichte des Hybridantriebs für Pkw	7
	1.6 Gründe zur Untersuchung der Elektrifizierung von Diesel-Antrieben.....	9
	1.7 Bedingungen für den Einsatz im Rahmen der Vorentwicklung	11
	1.8 Aufgabenstellung, Ziele und Abgrenzungen.....	11
	1.9 Exklusivitätsanspruch der Arbeit mit Vor- und Nachteilen der Methodik.....	13
2	Gliederung des Prozesses und der Arbeit.....	14
3	Versuchs- und Prüfsysteme.....	15
	3.1 Motorenprüfstand.....	15
	3.2 Rollenprüfstand.....	15
	3.3 Kontrolle der Korrelation	18
4	Vorschriften	19
	4.1 Emissionsermittlung für gasförmige Komponenten	19
	4.2 Emissionsermittlung für feste Abgaskomponenten.....	25
	4.3 Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs	27
5	Basisfahrzeugabbildung	30
	5.1 Längsdynamiksimulation.....	30
	5.2 Fahrzeugvermessung	32
	5.3 Modellabgleich.....	32
6	Hybridsystemdesign	33
	6.1 Hybridsystemdefinition.....	33
	6.2 Verbrennungskraftmaschine	34
7	Potenzialermittlung	36
	7.1 Kennfeldmodelle	36

7.2	Ideale Betriebsstrategie	37
7.3	Berücksichtigung elektrischer Verbraucher	60
7.4	Vorteile gegenüber anderen Verfahren und Schlüsse bezüglich des Potenzials von Lastanhebungen	60
8	Regelungsstrategieentwicklung	68
8.1	Intelligente Regelungsstrategie	68
8.2	Vereinfachte Varianten	74
8.3	Erkenntnis aus der Regelungsstrategieentwicklung	75
9	'Engine in the loop'-Versuche	76
9.1	Kontrolle der Basisfahrzeugabbildung	76
9.2	Verifikation der Potenzialergebnisse	77
9.3	Verifikation der Ergebnisse der Regelungsstrategieentwicklung	80
9.4	Stoppparameter des Prüfstandsystems	80
9.5	Berücksichtigung von Abweichungen bei der Zyklusarbeit	80
9.6	Gemeinsame Speicherung transienter Messdaten	82
9.7	Absicherung durch Wiederholungsmessungen	82
10	Anwendung und Ergebnisse	83
10.1	Referenzfahrzeug mit Handschaltgetriebe	84
10.2	Virtueller Triebstrang in verschiedenen Fahrzeugen	85
10.3	Referenzfahrzeug mit Automatikgetriebe	92
10.4	Automatikgetriebefahrzeug mit verbesserter VKM	116
10.5	2.Virtueller Triebstrang mit Doppelkupplungsgetriebe	120
10.6	Leichte Nutzfahrzeuge	136
11	Quervergleiche der Entwicklungsschritte	142
11.1	Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Motor- bzw. Getriebevarianten	142
11.2	'Engine in the Loop'-Ergebnisse mit unterschiedlichen Motor- und Getriebevarianten	144
12	Umsetzungsvorschläge	145
12.1	Topologieauswahl	145
12.2	Komponentenauswahl	145
12.3	Betriebsstrategieauswahl	146
12.4	Integration in gekoppelte Simulationsmodelle	147
13	Zusammenfassung	148
14	Ausblick	150
	Literatur	152
	ANHANG A (Andere Einsatzgebiete für ähnliche Antriebe)	159
	ANHANG B (Drehmomentmesswelle)	161
	ANHANG C (Glättungsmethode für die Geschwindigkeit)	164

ANHANG D (Information zum Programmcode).....	167
ANHANG E (Detaillierter Vergleich der Kriteriumsermittlung für verschiedene Vortriebsanforderungen).....	168
ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter)	172
ANHANG G (Zusätzliche Eingangsdaten und CRUISE-Simulationseinstellungen)	177
ANHANG H (Details Basisfahrzeugabbildung).....	179
ANHANG I (Ausgewählte Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen)	184
ANHANG J (Korrektur transienter Gastemperaturmessungen)	187
ANHANG K ('Engine in the Loop'-Ergebnisse mit leicht abweichenden Vorgaben).....	192

Abkürzungen

Kürzel	Bedeutung
AGR	Abgasrückführung
AMT	Automatisiertes manuelles Getriebe (automated manual transmission)
CAN	Controller Area Network
CVS	Konstantvolumenentnahme (constant volume sampling)
DCT	Doppelkupplungsgetriebe (double clutch transmission)
DMS	Dehnmessstreifen
DPF	Dieselpartikelfilter
DRR	Dynamischer Reifenradius
ECU	Motorsteuereinheit (engine control unit)
EES	Elektrischer Energiespeicher
EiL	engine in the loop
EM	Elektromaschine
EW	Emissionswert
FFT	Fast Fourier Transformation
FTP	Federal Test Procedure
KFZ	Kraftfahrzeug
LNfZ	leichtes Nutzfahrzeug
LPM	Lastpunktmanipulation
ND	Niederdruck
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PH	Paralleler Hybrid (in Zusammensetzungen auch Parallel-Hybrid)
PM	Partikelemission (particulate matter)
RB	Rußbelastung
REX-EV	Elektrofahrzeug mit VKM zur Nachladung des EES und damit Verlängerung der Reichweite (electric vehicle with range extender)
RRW	Rauchrichtwert
SH	Serieller Hybrid (in Zusammensetzungen auch Seriell-Hybrid)
SMK	Schwungmassenklasse
SUV	Sport Utility Vehicle
VKM	Verbrennungskraftmaschine

Formel- und Legendenzeichen

Kürzel	Bedeutung	SI-Einheit	verwendete abweichende Einheiten
A	Fläche	m^2	
E	Energie	J	kJ, kWh
EW	Emissionswert (fahrstreckenbezogene Masse)	kg/m	g/km, mg/km
F_0	Konstanter Fahrwiderstandsbeiwert	N	
F_1	Linearer Fahrwiderstandsbeiwert	Ns/m	Nh/km
F_2	Quadratischer Fahrwiderstandsbeiwert	Ns ² /m ²	Nh ² /km ²
H	Feuchte	-	
J	Trägheitsmoment	kgm ²	
$Krit.$	Kriterium	-	
L	Länge	m	
M	Molare Masse	-	
Nu	Nusselt-Zahl	-	
P	Leistung	W	kW
PED	Gaspedalstellung	-	
Q	Ladung	J	kJ, kWh
ROE	Ansteuersignal für Einspritzsystem (rate of energizing)	-	
$ROHR$	Heizgesetz (rate of heat release)	-	
ROI	Einspritzmengenverlauf (rate of injection)	-	
T	Temperatur	K	°C
Tr	Trübung	-	
V	Volumen (fahrstreckenbezogen)	m ³ /m	L/100km
W	Fahrwiderstand	N	
ZA	Zeitanteil	-	
a	Beschleunigung	m/s ²	
b	Leistungsbewerteter Wert	-/W	-/kW
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)	
d	Durchmesser	m	mm
f	Frequenz	1/s	
i	Übersetzung	-	
k	Korrekturfaktor	-	
$korr.$	korrigiert		

Kürzel	Bedeutung	SI-Einheit	verwendete abweichende Einheiten
m	Masse	kg	g
\dot{m}	Massenstrom	kg/s	kg/h, g/h
$\max()$	Maximum (der Werte in der Klammer)	-	
md	Drehmoment	Nm	
$\min()$	Minimum (der Werte in der Klammer)	-	
n	Drehzahl	1/s	1/min
p	Druck	Pa	kPa
r	Rate	-	
s	Strecke	m	
$\text{sign}()$	Vorzeichen (der Werte in der Klammer)	-	
t	Zeit	s	
v	Geschwindigkeit	m/s	km/h
w	Massenanteil	-	
x	Stoffmengenanteil	-	
z	Beliebiger Ergebniswert	-	
α	Wärmeübertragungszahl	W/(m ² K)	
β	Schrittzahl zur Bestimmung der geringen Glättung	-	
γ	Schrittzahl zur Bestimmung der starken Glättung	-	
Δ	Schrittweite (des folgenden Wertes)	-	
δ	Schrittzahl zur Bestimmung der Glättung des Gewichtungsfaktors	-	
ε	Emissionsgrad	-	
η	Wirkungsgrad	-	
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s	
ρ	Dichte	kg/m ³	
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	-	
μ	Anzahl der Schritte zur Behandlung von Vorzeichenwechsel	-	
φ	Volumenanteil	-	
ψ	Bewertungsfaktor	-	
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung	rad/s ²	
f	Funktion	-	

Indizes

Kürzel	Bedeutung
A	Arbeitskorrekturberücksichtigung
abs	absolut
ausg	ausgeglichen
BAW	Betriebsartenwechsel
COM	Änderung des Fahrerwunschs (change of mind)
d	Dampf
e	bezogen auf effektiven Verbrauch und effektive Leistung
EI	Element
G	Grenz- (in Zusammensetzungen)
gg	gering geglättet
HR	Hochrechnung (aus einem stationären Kennfeld)
i	Index über alle Rasterpunkte/Betriebsmodi/Berechnungsschritte/Kennfelder
ind	indiziert
j	zusätzlicher Index über Berechnungsschritte/Betriebsmodi
k	korrigiert
Krit	Kriterium
Kr	Kraftstoff
L	Längenmaßstab
lam	laminar
Lim	Limit
LL	Leerlauf
max	maximaler Wert
min	minimaler Wert
norm	normiert
O	Oberfläche
p	bei konstantem Druck
P	Potenzial
rel	relativ
Res	Reserve
sg	stark geglättet
Sys	System
T	Temperatur
tf	trocken – feucht (bei Umrechnungen)

Kürzel	Bedeutung
turb	turbulent
u	unterer
U	Umrechnung
Ü	Übergang

„Man darf nur dann etwas Neues machen, wenn man etwas besser machen kann.“

Adolf Loos (1870-193)

„Fortschritt kann auch darin bestehen, auf wissenschaftliche Neuerungen zu verzichten.“

Aurelio Peccei (1908-84)

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen von geförderten Forschungsvorhaben durchgeführt worden. Am Beginn der Ausführungen stehen daher die Definition der unterschiedlichen Begriffe, wie sie in diesem Kontext verwendet werden, die Motive zur Erstellung dieser Arbeit im Rahmen der Forschungsvorhaben, sowie grundlegende Hintergrundinformationen hinsichtlich der geschichtlichen und technologischen Einordnung.

1.1 *Allgemeine Begriffsdefinitionen*

Diese Arbeit behandelt die 'Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebstränge'. Schon dieser Titel erfordert dabei eine Konkretisierung des Begriffs Kraftfahrzeug (KFZ) und eine Erklärung, was unter der Teilelektrifizierung zu verstehen ist.

Ein KFZ ist ein „Fahrzeug mit eigener Antriebsmaschine, mindestens vier Rädern und einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 25 km/h“¹.

Ein solches KFZ wird durch eine 'Teilelektrifizierung' zum 'Hybridelektrofahrzeug', das Energie zum Vortrieb aus dem Betriebskraftstoff und einer Speichereinrichtung für elektrische Energie bezieht.²

Diese Festlegungen entsprechen auch den Definitionen der Vereinten Nationen.³

Es unterscheidet sich damit vom konventionellen Fahrzeug durch das Vorhandensein von mindestens einer Elektromaschine (EM) und einem elektrischen Energiespeicher (EES) und vom (voll elektrifizierten) Elektrofahrzeug durch die zusätzliche Verbrennungskraftmaschine (VKM).

Der Begriff Hybrid geht auf das lateinische Wort 'hybrida' (deutsche Übersetzung: Mischling) zurück.

¹ Europäische Union: RL 2007/46/EG, Art. 3, Zi. 11

² Europäische Union: RL 2007/46/EG, Art. 3, Zi. 15

³ vgl. United Nations: Regulation No. 101, Zi. 2.10 bis Zi. 2.14

1.2 Motive zur Untersuchung der Teilelektrifizierung

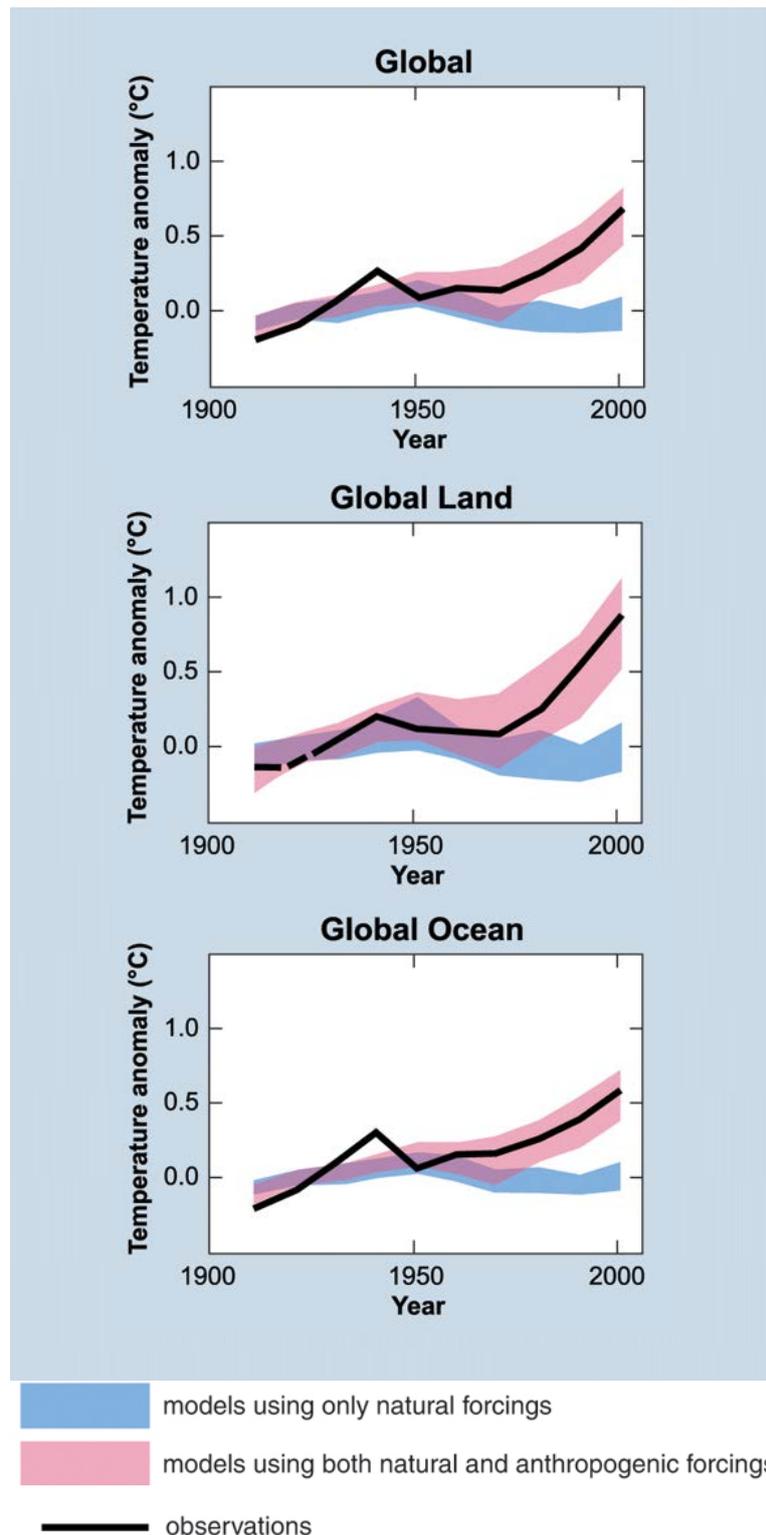


Abbildung 1 – Globale Erwärmung und der Einfluss der anthropogenen Treibhausgasemissionen⁴

Der Zusammenhang zwischen vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen und dem verstärkten Treibhauseffekt gilt heute als wahrscheinlichste aller Theorien. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse einer solchen Studie hinsichtlich der Evidenz dargestellt.

⁴ neu angeordnet übernommen aus Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report, S. 40

Negative Folgen der Klimaerwärmung sind bspw. das Abschmelzen der Gletscher und der Polkappen und damit ein Verlust von Süßwasserspeichern und ein Anstieg des Meeresspiegels. Abbildung 2 zeigt, dass der Verkehr (engl.: Transport) insgesamt weniger als 15% zu den Gesamtemissionen beiträgt. Trotzdem liegt ein öffentlicher Fokus auf diesem Sektor. Problematisch ist hier das enorme Steigerungspotenzial in den sogenannten Schwellenländern. Die Dichte an Fahrzeugen je Einwohner zeigt bisher nämlich einen signifikanten Zusammenhang zur Wirtschaftsleistung (Abbildung 3).

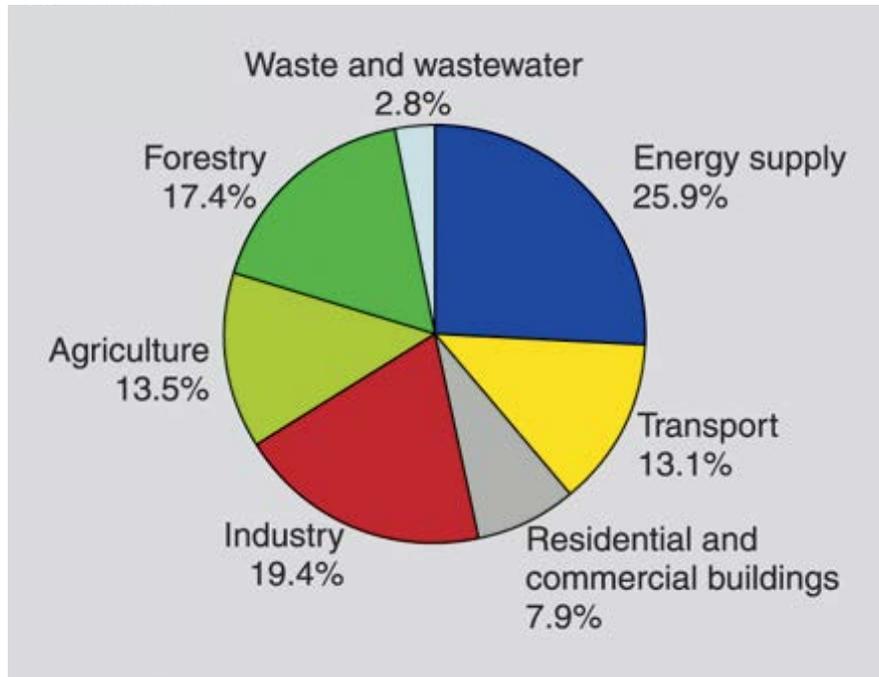


Abbildung 2 – Weltweite anthropogene Treibhausgasemissionen und der Anteil des Verkehrs⁵

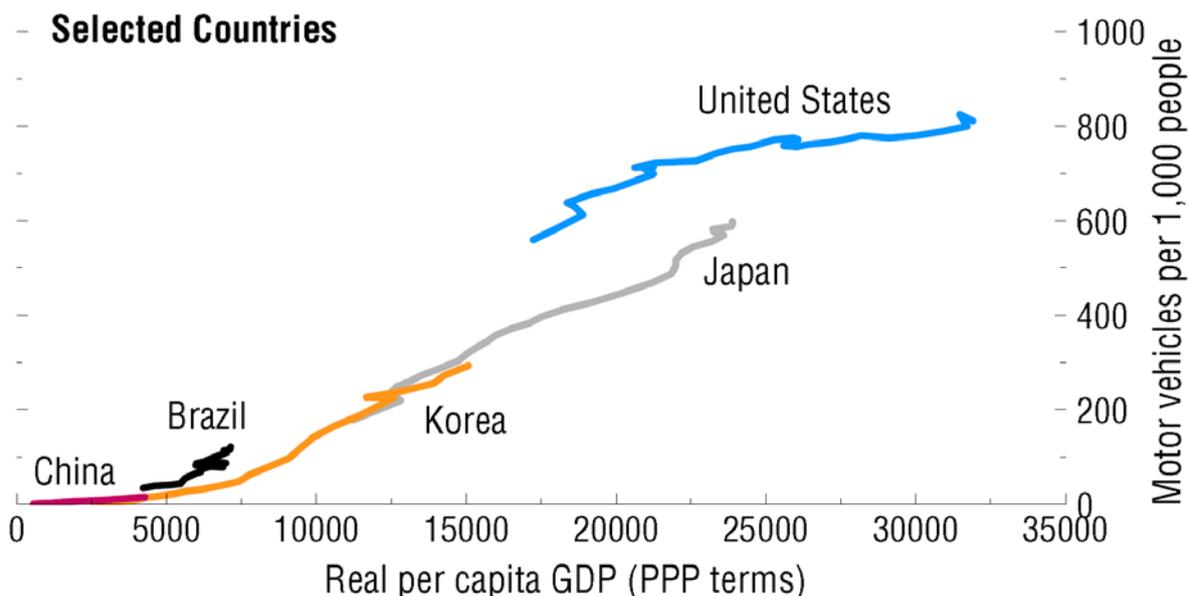


Abbildung 3 – Zusammenhang zwischen Wirtschaftsleistung und Fahrzeugdichte (Auswahl)⁶

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report, S. 36

⁶ International Monetary Fund: World Economic Outlook (chapter 4), S. 167

Ziel muss es daher sein, den Energiebedarf der zukünftig produzierten Fahrzeuge zu senken.

Eine intensiv diskutierte Alternative zu konventionellen Fahrzeugen sind Elektrofahrzeuge. Immer mehr Hersteller bieten zurzeit schon Serienfahrzeuge mit ausschließlich elektrischem Antrieb und Batterien als Energiespeicher an. Das Einsatzspektrum der sogenannten Batterieelektrofahrzeuge beschränkt sich allerdings aufgrund der beschränkten Reichweite noch auf den Stadtverkehr. Problematisch ist hier vor allem die geringe Speicherdichte der elektrischen Systeme (Abbildung 4).

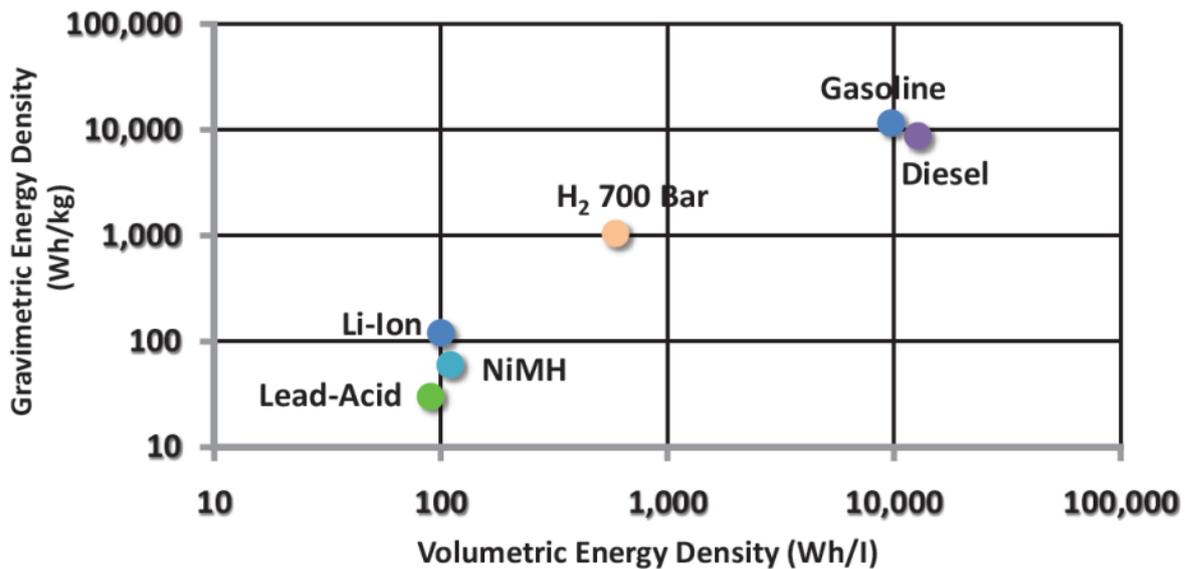


Abbildung 4 – Speicherdichten elektrischer Systeme im Vergleich zu Alternativen⁷

Trotz der möglichen günstigeren Wirkungsgradkette im Batterieelektrofahrzeug selbst ergibt eine Gesamtbetrachtung derzeit außerdem gegenüber konventionellen Fahrzeugen noch höhere Treibhausgasemissionen, wenn für die Ladung die durchschnittlichen spezifischen Emissionen berücksichtigt werden, die bei der Bereitstellung elektrischer Energie anfallen.⁸ Optimistische Studien gehen von der Versorgung aus erneuerbaren Energieträgern aus. Das ist aber nur theoretisch möglich, weil die Ladung der meisten Batterieelektrofahrzeuge vorzugsweise in der Nacht stattfinden wird. Üblicherweise werden gerade dann aber die erneuerbaren Energieträger bereits heute vollständig genutzt.⁹

Langfristig sind durch Änderung beim Energiemix Verbesserungen in der Gesamtbilanz möglich. In der Europäischen Union werden sehr starke Zunahmen des Anteils erneuerbarer Energieträger erwartet (Abbildung 5). Wegen der hohen Investitionskosten und den langen Laufzeiten von Kraftwerken sind keine kurzfristigen Lösungen zu erwarten.

⁷ Grebe U. D.: GM's Voltac Antriebssystem - Elektrifizierung der Fahrzeuge auf neuem Niveau (in: Proceedings of Engine & Environment, Graz, 10.-11.9.2009), S. 12

⁸ Kurzweil P.: Alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge in: Tiefel T. [Hrsg.]: Strategische Aktionsfelder des Patentmanagements, 2006, S. 262

⁹ Roth H. et al.: Energiespeicher für Fahrzeuge mit Elektroantrieb (in: 1. ATK, München, 16.-17.4.2009)

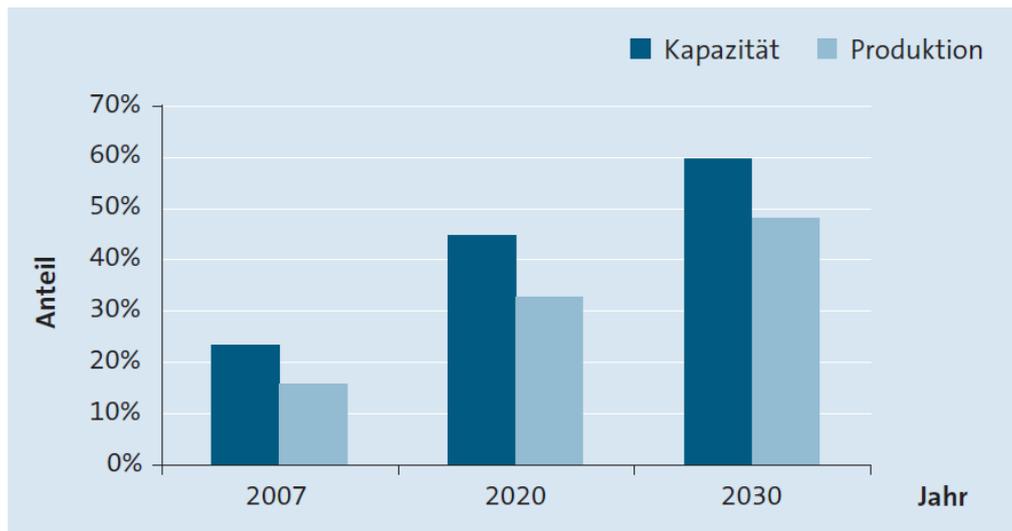


Abbildung 5 – Prognostizierte Anteile erneuerbarer Energieträger (Europäische Union)¹⁰

Global gesehen steht für Batterieelektrofahrzeuge auch noch keine ausreichende Infrastruktur bereit, um diese in vertretbarer Zeit laden zu können.

Hybridelektrofahrzeuge bieten daher die Chance den Energiebedarf zu senken ohne gegenüber konventionellen Fahrzeugen Reichweite und Alltagstauglichkeit einzuschränken.¹¹ Die Hybridtechnologie kann außerdem auch für Fahrzeuge mit höherem Energiebedarf (Busse, Nutzfahrzeuge) eingesetzt werden. Eine Beschreibung der wichtigsten Entwicklungen abseits des Pkw-Einsatzes bietet ANHANG A (Andere Einsatzgebiete für ähnliche Antriebe). Es ergeben sich somit größere Synergien hinsichtlich der Entwicklung. Schließlich kann die Teilelektrifizierung auch noch als Brückentechnologie angesehen werden, die die Erprobung von Komponenten ermöglicht, die dann in Batterieelektrofahrzeugen eingesetzt werden können, wenn die wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen zukünftig besser erfüllt sind.

1.3 Systemvarianten und Klassifizierung der Hybridfahrzeugantriebe

Bei der Kombination von EM und VKM zum Antrieb eines Fahrzeuges entstehen mehrere Freiheitsgrade. Zum einen betrifft das die Topologie des Systems im Sinne der Anordnung der Maschinen und der damit verbundenen Leistungsflussmöglichkeiten. Zum anderen legen die Spitzenleistungen von VKM und EM in Kombination mit der nutzbaren Kapazität des EES fest, welche Betriebsarten mit der gewählten Konfiguration schließlich möglich sind.

Man unterscheidet zwischen parallelen, seriellen und leistungsverzweigten (oder kombinierten bzw. gemischten) Hybridantrieben. Serielle Hybride (SH) erfordern mindestens zwei EM und auch die Leistung der VKM wird elektrisch übertragen. Für genauere Beschreibungen, die teilweise auch noch weitere Unterteilungen vornehmen, wird auf entsprechende Literatur verwiesen.¹²

¹⁰ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Strommix in der EU27, S. 5

¹¹ In diesem Zusammenhang sind unter Hybridelektrofahrzeugen nur Varianten ohne Möglichkeit zur externen Ladung des Energiespeichers gemeint. Die in Kapitel 1.3 beschriebenen Plug-In-Hybride bilden je nach Nutzung einen Übergangsbereich zu den Batterieelektrofahrzeugen.

¹² siehe bspw. Hofmann P.: Hybridfahrzeuge, 2010, S. 17ff, Stiegeler M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge, 2008, S. 5ff, Kirchner E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben, 2007, S. 565ff, bzw. Bildstein M. et al.: Hybridantriebe in: Reif K. [Hrsg.]: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik, 6. Auflage 2011, S. 394ff

Hinsichtlich der Klassifizierung nach Leistungen wird die folgende Einordnung gewählt:¹³

Als Micro-Hybride werden Fahrzeuge mit Start-Stopp-System und intelligenten Ladestrategien für die Standard-Fahrzeuggatterie bezeichnet.

Fahrzeuge mit zumindest unterstützendem elektrischem Vortrieb gelten als Mild-Hybridfahrzeuge. Dabei kann eine Kupplung die Trennung der VKM vom Antriebsstrang erlauben. Das Leistungsangebot der EM oder die begrenzte Kapazität des EES reichen jedoch nicht aus, um elektrisch hohe Fahrleistungen zu ermöglichen.

Ist mindestens eine EM noch leistungsstärker ausgelegt vorhanden, spricht man von Strong-Hybriden. Sind diese mit Trennkupplung zur VKM ausgestattet und eine EM kann die gesamte Fahrleistung aufbringen, ist das Fahrzeug ein Voll-Hybrid. SH-Fahrzeuge fallen damit automatisch unter diese Kategorie.

Der Übergang zum Elektrofahrzeug ist dann fließend. Ein Strong-Hybrid mit der Möglichkeit zur elektrischen Ladung des EES wird als Plug-In-Hybrid bezeichnet.¹⁴ Ein Grenzfall ist schließlich das Elektrofahrzeug mit VKM zur Nachladung des EES und damit Verlängerung der Reichweite (engl.: electric vehicle with range extender, REX-EV). Solche Fahrzeuge können ohne externe Nachladung auskommen oder nicht. Teilweise steht bei REX-EV ohne Nachladung auch nur eine begrenzte Fahrleistung zur Verfügung.

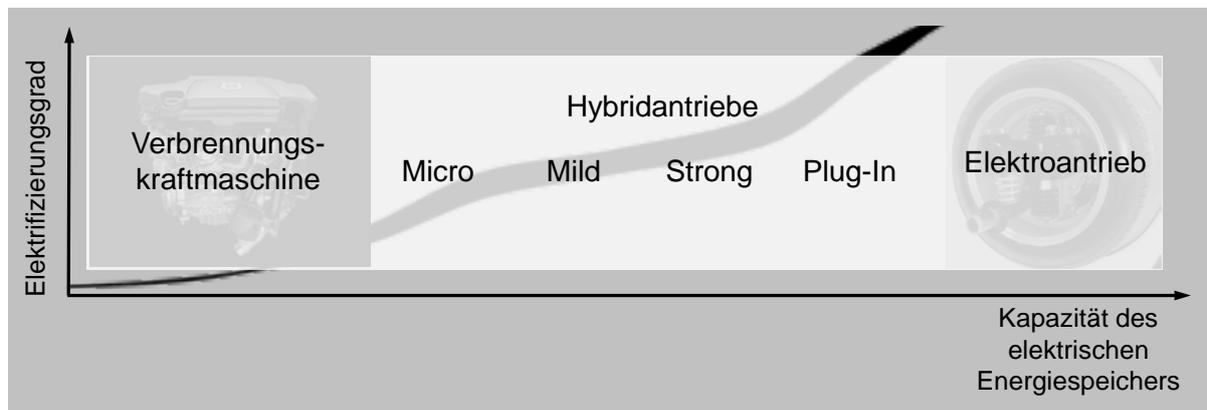


Abbildung 6 – Einteilung der Hybridfahrzeuge¹⁵

Typische Zusammenhänge zwischen der Kapazität des EES, dem Elektrifizierungsgrad (im Sinne des Verhältnisses der Leistungen von EM und VKM) und der Art des Hybridsystems zeigt Abbildung 6.

1.4 Mögliche erweiterte Betriebsarten

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen sind mit Hybridfahrzeugen verschiedene Betriebsarten möglich. Außer bei seriellen Hybridfahrzeugen ist aber immer auch Vortrieb möglich, der ausschließlich die VKM zur Leistungsbereitstellung nutzt.

Hybridfahrzeuge ermöglichen die VKM bei Fahrzeugstillstand abzuschalten. Schon diese Start-Stopp-Systeme allein bedingen einen gesteigerten Entwicklungsaufwand.¹⁶

¹³ Diese Festlegung ist dabei willkürlich. Es sind auch andere Einteilungen möglich und üblich, die bspw. nur auf der installierten Leistung der EM beruhen.

¹⁴ Engel T.: Plug-in Hybrids, 2007, S. 13

¹⁵ Bei Fahrzeugen mit ausschließlich elektrischem Antrieb ist der Elektrifizierungsgrad definitionsgemäß unendlich. Das Bild ist überarbeitet übernommen aus Klima B. et al.: Durchgängige Methodik für Simulation und Messung des Diesel-Hybrid-Potenzials (in: ATZ, 11/2010), S. 848ff.

¹⁶ siehe bspw. Gerhard S.: Start-Stopp Betrieb beim Pkw-Dieselmotor, 2009, Hofmann J. et al.: Start-Stopp-System im Porsche Panamera (in: ATZ, 3/2010), S. 154ff, Rücker A. et al.: Einfluss der BMW Auto Start Stop Funktion auf CO₂- und Schadstoffemissionen (in: 4. Emission Control, Dresden, 29.-30.5.2008) bzw. Schell I. et al.: Einhaltung der Emissionsvorschriften bei weltweiter Ausrollung der Auto-Start-Stopp-Funktion (in: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 10.-11.11.2010), S. 373

Durch generatorischen Betrieb einer EM ist es möglich Verzögerungsenergie zu rekuperieren. Ist eine Trennkupplung zur VKM vorhanden, kann diese geöffnet werden, um durch Vermeiden der Schleppverluste der VKM die maximale Rekuperationsleistung zu erreichen. Die so im EES gespeicherte Energie kann entweder zum elektrischen Fahren verwendet werden, oder bei parallelen Hybriden (PH) zur Drehmomentunterstützung (Lastpunktabenkung der VKM). Bezüglich des Einsatzes der Trennkupplung gilt dasselbe wie bei Rekuperationsbetrieb. Elektrisches Fahren und Rekuperation sind bis auf die Energieflussrichtung identisch.¹⁷

Alternativ zur Rekuperation kann auch durch Anheben des Lastpunktes der VKM ein Energiefluss in den EES eingestellt werden. Anheben und Absenken der Lastpunkte werden gemeinsam als Lastpunktmanipulationen (LPM) bezeichnet.

Bei SH oder kombinierten Hybriden im seriellen Betriebsmodus wird definiert, dass die Unterscheidung zwischen Anhebung und Absenkung ebenfalls über die Energieflussrichtung am EES getroffen wird. Bei Betrieb ohne Leistungsfluss wirkt das Hybridsystem quasi als stufenloses elektrisches Getriebe.

Bei spezieller Anordnung von VKM und EM ist auch elektrischer Allradbetrieb möglich.¹⁸

Welche Betriebsart wann eingesetzt wird, hängt von der Betriebsstrategie ab.

1.5 Geschichte des Hybridantriebs für Pkw

Am Beginn der Pkw-Entwicklung war noch nicht entschieden, dass diese heute hauptsächlich von VKM angetrieben werden. Fahrzeuge mit VKM, Dampfmaschinen und Elektroantrieben kamen gleichzeitig auf. Von Ferdinand Porsche stammt dann das erste Fahrzeug, das eine Hybridtechnologie einsetzte. Der 1901 vorgestellte, im Auftrag von Jacob Lohner konstruierte Semper Vivus-Prototyp (Abbildung 7) nutzte als Antrieb elektrische Radnabenmotoren und zwei Einzylindermotoren und einen Generator zur kontinuierlichen Versorgung der Batterie. Als Mixte ging 1902 ein überarbeitetes Fahrzeug mit Vierzylindermotor als Generatorantrieb in Serie. Die elektrische Kraftübertragung war damals zuverlässiger als mechanische Kupplungen und Getriebe. Technisch gesehen handelt es sich bei diesen ersten Hybridfahrzeugen demnach um SH-Konzepte. Die anfänglichen Versuche mit Hybridfahrzeugen brachten keinen wirtschaftlichen Erfolg.¹⁹ Schließlich setzte sich die VKM als überwiegender Antrieb für Pkw durch. Derzeit arbeitet in 99 Prozent aller Pkw eine VKM.²⁰

¹⁷ Bildstein M. et al.: Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge in: Reif K. [Hrsg.]: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik, 6. Auflage 2011, S. 419f

¹⁸ siehe bspw. Chehab C. et al.: Der elektrische Achs-Hybrid von PSA und Bosch (in: 32. Wiener Motorensymposium, 5.-6.5.2011)

¹⁹ Seiffert R.: Das Genie und sein Auftrag für eine Technik, die sich nicht durchsetzte (in: FAZ, 30.5.2000), S. T4, Grünweg T.: Porsche Semper Vivus und Kurzweil P.: Alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge in: Tiefel T. [Hrsg.]: Strategische Aktionsfelder des Patentmanagements, 2006, S. 252

²⁰ Eichlseder H.: Future of Powertrains - Challenges and Risks for IC Engines (in: 9th International Powertrain Conference, Seoul, 17.11.2009)

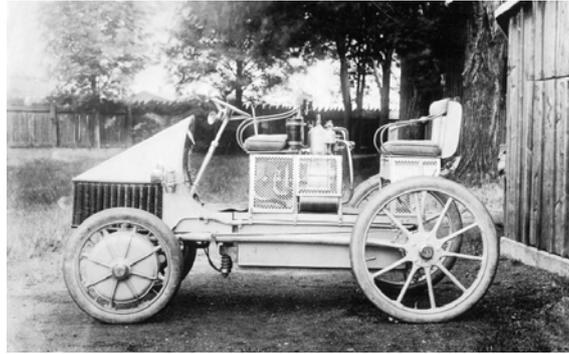


Abbildung 7 – Hybridelektrofahrzeug anno 1901²¹

Erst nach den Ölkrisen der 1970er-Jahre wurden Hybridantriebe wieder konsequent beforscht. Bis auf einige kommerziell wenig erfolgreiche Kleinserienfahrzeuge²² konnte jedoch erst 1997 mit dem Toyota Prius ein Hybridfahrzeug erfolgreich am Markt etabliert werden. Der Prius verwendet einen leistungsverzweigten Hybridantrieb mit zwei EM und einem Otto-Motor, die über Planetengetriebe zusammenwirken.²³ Inzwischen ist bereits die weiterentwickelte dritte Generation am Markt (Abbildung 8).²⁴

Auch andere Hersteller haben entsprechende Angebote entwickelt und in den Markt eingeführt. Anders als beim Prius wird der Hybridantrieb meistens als eine Variante unter vielen Antrieben angeboten und die Hersteller beginnen die Einführung der Hybridisierung im Segment der Sport Utility Vehicle (SUV).²⁵

Ausgenommen von diesem Trend ist die Einführung von Start-Stopp-Systemen in praktisch allen Fahrzeugen.



Abbildung 8 – Toyota Prius (3. Generation)²⁶

²¹ www.spiegel.de/fotostrecke/fotostrecke-65368-2.html (Zugriff: 6.2.2012)

²² siehe bspw. Lehna M.: Audi duo, ein Hybridfahrzeug für die City-Logistik (in: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, Dresden, 17.-18.2.1998), S. 119ff

²³ Hofmann P.: Hybridfahrzeuge, 2010, S. 9ff bzw. Bady R. et al.: Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen (in: 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Esslingen, 11.-12.5.2000)

²⁴ siehe Schöttle M.: Technik-Portrait Toyota Prius III (in: ATZ, 11/2009), S. 806ff bzw. Costlow T.: The upside of downsizing (in: aei, 8/2009), S. 31ff

²⁵ siehe bspw. Böhle J. et al.: Der neue Touareg Hybrid (in: ATZ extra, 3/2010), S. 30ff bzw. Leinhos D. C. et al.: Die Betriebsstrategie und Emissionierung des BMW ActiveHybrid X6 (in: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 10.-11.11.2010), S. 15ff

²⁶ www.autorevue.at/best_of_test/fahrberichte/das-andersauto.html (Zugriff: 7.2.2012)

1.6 Gründe zur Untersuchung der Elektrifizierung von Diesel-Antrieben

In fast allen bisher serienmäßig ausgeführten Pkw-Hybridfahrzeugen werden Otto-Motoren eingesetzt.²⁷ Für den Gesamtverbrauch konventioneller Fahrzeuge mit VKM ist der Wirkungsgrad ebendieser ein entscheidender Einflussfaktor. Wie verschiedene Veröffentlichungen zeigen, weisen Dieselmotoren sowohl den Wirkungsgrad des vollkommenen Motors, als auch den Verbrauch in repräsentativen Betriebspunkten betreffend Vorteile gegenüber Ottomotoren auf.²⁸ Zukünftig wird für Ottomotoren im Fahrzeugeinsatz eine Annäherung an die Dieseltechnologie prognostiziert, allerdings auch verbunden mit höheren Kosten und Abgasnachbehandlungsaufwand.²⁹ Moderne Dieselmotoren verwenden eine drosselfreie Laststeuerung. Verglichen mit konventionellen Saugottomotoren ergibt die Qualitätsregelung vor allem im Teillastbereich geringere Ladungswechselverluste. Möglicherweise ergeben sich deshalb geringere Potenziale für die Hybridisierung.

Kritisch hinsichtlich der Emissionen sind beim Dieselmotor vordergründig die NO_x ³⁰ und Partikel (engl.: particulate matter, PM).

²⁷ Ein Beispiel für einen Diesel-Hybrid-Pkw wurde 2011 von PSA und Bosch vorgestellt. Siehe dazu Chehab C. et al.: Der elektrische Achs-Hybrid von PSA und Bosch (in: 32. Wiener Motorensymposium, 5.-6.5.2011)

²⁸ siehe bspw. Pischinger R. et al.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage 2009, S. 379ff bzw. Wimmer A. et al.: Wirkungsgrad und Leistung von Großgasmotoren (in: coJen, 11/2008), S. 10

²⁹ Eichlseder H. et al.: Zukünftige Otto-DI-Brennverfahren - Thermodynamische Potenziale und Grenzen im Vergleich zu Dieselmotoren (in: Der Antrieb von morgen, Neckarsulm, 22.-23.5.2007)

³⁰ virtuelle Summenformel für die Summe aus NO und NO_2

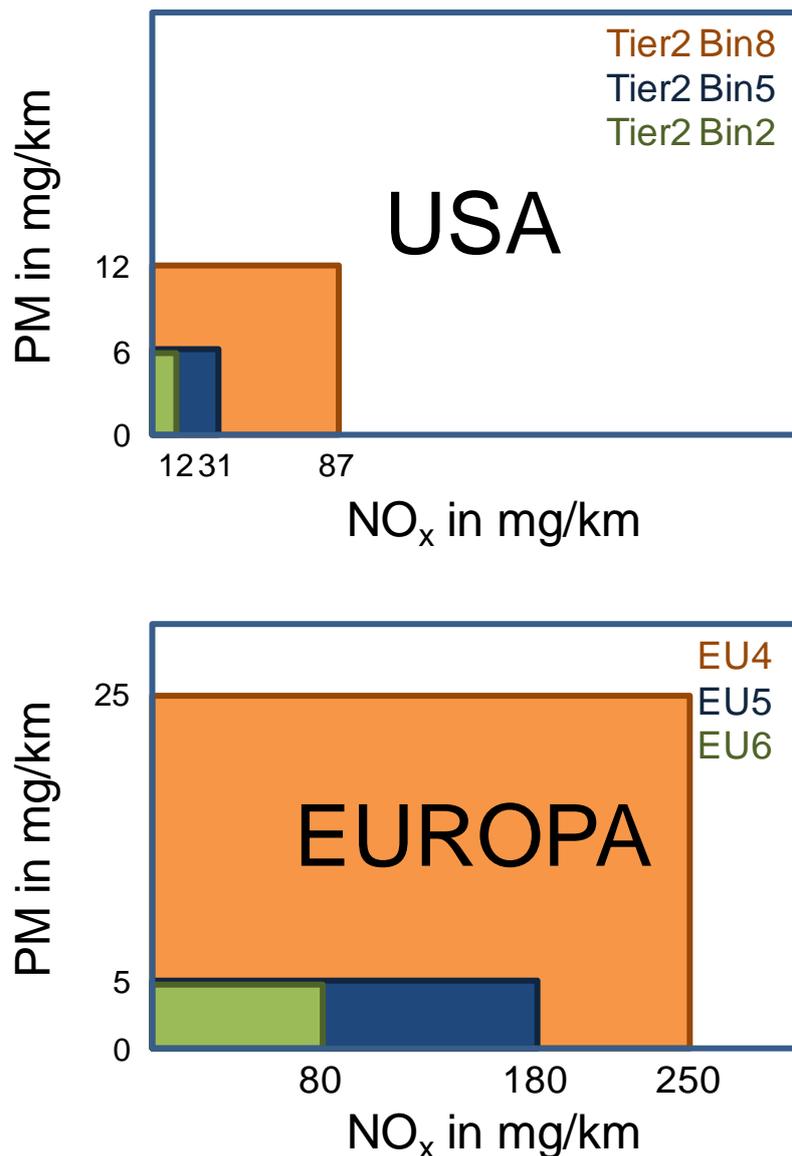


Abbildung 9 – Entwicklung der Pkw-Grenzwerte für NO_x und PM³¹

Die vorliegende Arbeit analysiert, welche Potenziale die Hybridisierung speziell für Diesel-Antriebsstränge trotzdem bietet und geht dabei auf Besonderheiten ein. Randbedingung ist immer die Beachtung aktueller und zukünftiger Abgasvorschriften. Dabei ist auch in Europa eine Annäherung der Grenzwerte für Otto- und Dieselsystem zu beobachten. In den USA gelten schon heute dieselben Vorschriften, wobei allerdings nicht die gesamte Flotte die strengsten Grenzwerte einhalten muss. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der Grenzwerte für NO_x und PM, wobei die Unterschreitung der Grenzwerte in unterschiedlichen Fahrzyklen nachzuweisen ist. Sollten in Zukunft für Pkw auch außerhalb der definierten Profile Grenzwerte vorgeschrieben werden, wird man für Dieselmotoren wahrscheinlich Nachbehandlungssystemen für NO_x einsetzen müssen. Bei Ottomotoren ist in diesem Zusammenhang speziell die Volllastabstimmung kritisch zu beurteilen, weil derzeit vom stöchiometrischen Betrieb abgewichen wird.

³¹ i.A.a. Mahr B. et al.: Innovatives Abgasrückführsystem zur kosten- und verbrauchseffizienten Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (in: 30. Wiener Motorensymposium, 7.-8.5.2009), alle im Rahmen dieser Arbeit relevanten Europäischen Abgasgrenzwerte sind auch bei Delphi: Worldwide Emission Standards 2011/2012, S. 8ff nachzulesen. In dieser Arbeit wird eine leicht abgeänderte Schreibweise verwendet: Bspw. statt der Bezeichnung 'Euro 5' die Schreibweise 'EU5'.

1.7 Bedingungen für den Einsatz im Rahmen der Vorentwicklung

Im Vorentwicklungsprozess ist ein möglichst standardisiertes einfaches Vorgehen zielführend. Speziell für die in dieser Arbeit behandelten Simulations- und Versuchsaufgaben, die hauptsächlich der Konzeptphase zuzuordnen sind, darf die eingesetzte Methodik also möglichst keine Einschränkungen hinsichtlich der Hybridsystemfestlegung bedingen. Sie muss allgemein anwendbar sein und mit möglichst wenigen Hardwareinformationen auskommen.

Dementsprechend liegt der Fokus auf der Simulation, um mit möglichst exakten Verfahren den objektiven Vergleich unterschiedlicher Randbedingungen und Systeme zu ermöglichen. Dabei sind ausgehend von den abstrakten, auch mit hardwareunabhängigen Vorgaben bestimmbaren Potenzialen Strategien zu entwickeln, mit denen die Potenziale bestmöglich ausgeschöpft werden können.

Damit die Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage für eine Konzeptauswahl geeignet sind, müssen nicht alle Vorgänge exakt durch Versuche verifiziert werden. Vorzuziehen sind Verfahren, die schnell und unter Verwendung vorhandener Infrastruktur eine grundlegende Verifikation der makroskopischen Ergebnisse ermöglichen und aufzeigen, wo noch Detailarbeit notwendig ist.

1.8 Aufgabenstellung, Ziele und Abgrenzungen

Die Aufgabenstellung im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Methodik entsprechend den Voraussetzungen für den Vorentwicklungsprozess (siehe Kapitel 1.7) zu entwickeln und deren Anwendung zu demonstrieren.

Für die Simulation stehen quasistationäre und zeitlich hoch aufgelöste Methoden zur Auswahl. Aufgrund der in der frühen Entwicklungsphase eingeschränkten Verfügbarkeit von exakten Eingangsdaten und der Vorteile hinsichtlich der Berechnungsdauer wird hier ein quasistationärer Ansatz gewählt.

Als Randbedingung für die Versuchsphase gilt, dass nur mit Standardmesstechnik (für Drehzahl, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch, Luftmassenstrom, Schadstoffkonzentrationen im Abgas und Kohlendioxidkonzentrationen im Einlassverteiler und Abgas) ausgestattete Motorenprüfstände zur Anwendung kommen sollen. Hinsichtlich der eingesetzten VKM ist ein Zugriff auf die Applikation des Steuergerätes möglich, der aber nicht durch spezielle Zusatzprogramme erweitert werden soll. Das Testverfahren soll damit so einfach sein, dass es ohne Rüstaufwand erledigt werden kann, sobald die zu untersuchende VKM auf einem entsprechenden Prüfstand aufgespannt ist. Im Rahmen der quasistationären Simulation wird das transiente Verhalten der Elemente des Hybridsystems nicht exakt erfasst. Im Rahmen dieser Arbeit werden solche Effekte bewusst auch in der Versuchsphase vernachlässigt. Sie haben somit keine Auswirkungen auf die Betriebsstrategie. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil auch bei den Versuchen nur Teile des Systems in Hardware vorhanden sind. Somit ist es ohnehin nicht möglich alle Auswirkungen zu erfassen, ohne eine andere Simulationsmethode zu verwenden.

Andere vorgestellte Anwendungen zur Nachbildung des Verhaltens von VKM in simulierten Hybridfahrzeugen zielen darauf ab, durch den Einsatz der realen VKM und realer Steuergeräte eine Rückwirkung zu ermöglichen. Dabei kann dann das reale transiente Verhalten der VKM auch die Betriebsstrategie beeinflussen.³²

Die Marktsituation zeigt, dass bis auf wenige Ausnahmen alle Hybridfahrzeuge auch als Variante ohne Hybridantrieb erhältlich sind (siehe Kapitel 1.5). Hybridantriebe können wegen der zusätzlichen Technik auf absehbare Zeit nicht zu den Kosten konventioneller Fahrzeuge

³² vgl. bspw. Geringer B. et al.: Neue Ansätze und Entwicklungsmethoden zur Minimierung der NOx-Emissionen von Dieselmotoren (in: 31. Wiener Motorensymposium, 29.-30.4.2010)

hergestellt werden.³³ Die Mehrkosten müssen sich für den Endverbraucher über Kraftstoffersparnisse rechnen. Meist sind also nicht hybridisierte Fahrzeugvarianten vorhanden, die selbstverständlich die gesetzlichen Abgasvorschriften erfüllen. Da sich die Verwendung gleicher Systeme positiv auf die Gesamtkosten auswirkt, wird für diese Arbeit unterstellt, dass der Hybridantrieb hauptsächlich zur Verbrauchsoptimierung eingesetzt wird. Potenziale zur Emissionsminimierung werden zwar aufgezeigt, die Verifikation am Prüfstand ist jedoch nicht vorgesehen.³⁴ Sind Synergien hinsichtlich der Abgasnachbehandlungstechnik mit anderen Motor- oder Fahrzeugvarianten möglich, können so zusätzliche Kostenvorteile erzielt werden. Demonstratorfahrzeuge mit möglichen Emissionsminimierungskonzepten sind mittlerweile schon Realität.³⁵

Im Rahmen dieser Arbeit werden auch keine Maßnahmen zur Beeinflussung des Aufwärmverhaltens behandelt. Wie das prinzipiell mit der Hybridstrategie auf Basis der Methodik dieser Arbeit dennoch möglich ist, wird im Rahmen des Ausblicks erklärt (siehe Kapitel 14). Die Untersuchungen beschränken sich vielmehr auf das betriebswarme Verhalten der Systeme. Hier wird untersucht, ob durch die Hybridisierung die Voraussetzungen für Wärmemanagementmaßnahmen nach Kaltstarts verschlechtert werden bzw. ob der intermittierende VKM-Betrieb zu speziellen Problemen führt.³⁶

Bei der Analyse des Potenzials soll das nicht lineare Verhalten der Verluste von VKM über Kennfeldmodelle abgebildet werden, um nicht nur zu erkennen, ob eine Ladung des EES aktuell sinnvoll ist, sondern auch mit wie viel Leistung geladen werden soll. Vereinfachende Linearisierungen, wie sie bspw. bei Böckl beschrieben sind, werden daher vermieden.³⁷

Außerdem soll bewusst keine Regelung des Hybridsystems auf Basis zukünftiger prognostizierter Vorgänge berücksichtigt werden. Solche Ansätze erfordern für den Vorentwicklungsprozess zu hohen Entwicklungsaufwand und sind hinsichtlich der Potenzialermittlung und zur Unterstützung der Konzeptauswahl auch aufgrund der geringen Zusatzpotenziale nicht unbedingt erforderlich.³⁸

Die zu entwickelnde Methodik soll für spätere Entwicklungsstufen detaillierter Modelle aus verschiedensten Quellen nutzen, weshalb die Verwendung von Kennfeldmodellen vorgesehen wird. Im Rahmen der Demonstration werden allerdings hauptsächlich konstante Annahmen hinsichtlich der elektrischen Komponenten getroffen, um grundsätzliche Zusammenhänge aufzuzeigen. Dieses Vorgehen vermeidet eine Festlegung auf eine Hardware-Konfiguration, wie sie für viele ähnliche Arbeiten auf dem Gebiet der Ottomotor-basierten Hybridfahrzeuge getroffen worden ist.³⁹

Die Auslegung und Auswahl der elektrischen Teilkomponenten des Hybridsystems ist ausdrücklich nicht Teil dieser Arbeit. Behandelt wird in diesem Zusammenhang

³³ Fehrenbach F.: Herausforderungen globaler Zulieferunternehmen (in: 29. Wiener Motorensymposium, 24.-25.4.2008)

³⁴ Parallel zu dieser Arbeit ist die eingesetzte VKM und das Abgasnachbehandlungssystem zu Erfüllung strengster Grenzwerte in konventionellen Fahrzeugen abgestimmt bzw. ausgelegt worden. Deshalb sind keine Strategieänderungen realisiert, solange die Emissionen nicht ansteigen.

³⁵ siehe bspw. Ziegler A. et al.: Hybridkonzept mit Minimaldiesel (Abschlussbericht zum FVV Vorhaben Nr. 937), 2009

³⁶ Spezielle Untersuchungen mit Kaltstart müssten eigentlich auch die erhöhten Reibungsverluste im Getriebe berücksichtigen. Im Rahmen von parallel zu dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist hingegen nur die VKM bei Raumtemperatur gestartet worden. Diese somit nur näherungsweise für das Verhalten mit Kaltstart repräsentativen Ergebnisse sind in ANHANG I (Ausgewählte Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen) beschrieben.

³⁷ vgl. Böckl M.: Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen, 2008, S. 64

³⁸ vgl. Back M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen, 2005, S. 154

³⁹ vgl. bspw. Kreschl S.: Der Autarke Hybrid - Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparungspotenzials, 1998 bzw. Guttenberg P.: Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse, 2004

ausschließlich der Leistungs- bzw. Kapazitätsbedarf. Für die Technologieauswahl und Optimierung sei an dieser Stelle auf andere Literatur verwiesen.⁴⁰

1.9 Exklusivitätsanspruch der Arbeit mit Vor- und Nachteilen der Methodik

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Merkmale vorab angeführt, die diese Arbeit auszeichnen. Das sind einerseits die spezielle Methodik der Betriebspunktbewertung und andererseits die Anwendung auf Diesel-Pkw. Gerade die speziellen Verhältnisse bei Dieselmotoren bedingen eine exakte methodische Vorgehensweise bei der Bestimmung der optimalen Betriebsweise.

Anders als bei allen mir bisher bekannten Arbeiten, wird die optimale Betriebsstrategie mit der neuen Methode allein auf Basis physikalischer Zusammenhänge bestimmt, wobei alle möglichen Betriebsmodi einheitlich bewertet werden. Entscheidend ist dabei die schrittweise Bewertung der möglichen Leistungsstufen der VKM. In Kapitel 7, das den Kern der entwickelten Methode beschreibt, wird gezeigt, warum gerade dieses Vorgehen auch in Verbindung mit modernen Dieselmotoren zur eindeutigen Bestimmung der Verbrauchsoptima führt. Für vorgegebenen Zyklen können auf Basis der quasistationären Berechnung so ohne willkürliche Festlegungen für alle Zeitschritte, die für das Gesamtergebnis optimalen Betriebsmodi ermittelt werden. Wann elektrisches Fahren zu aktivieren ist, ist dabei ein integriertes Ergebnis. Für Phasen mit VKM-Betrieb wird neben der Entscheidung, ob die Last angehoben oder abgesenkt wird, auch gleich der für das Gesamtergebnis optimale Betrag der LPM mitgeliefert.

Ein weiterer Vorteil ist die einfache Austauschbarkeit der Zielgröße. Es kann somit hinsichtlich jeder mess- oder simulierbaren Größe und allen möglichen Kombinationen daraus optimiert werden.

Eine Einschränkung ist sicherlich die Beschränkung auf quasistationäre Ansätze. Wählt man eine von transienten Vorgängen beeinflusste Berechnung, muss man berücksichtigen, dass jede Entscheidung für eine Maßnahme auch Auswirkungen auf nachfolgende Zeitschritte haben kann. Das ist jedoch mit der vorgestellten Methode nicht möglich.

Die Behandlung von Diesel-Hybridfahrzeugen an sich ist recht neu, aber sicher nicht exklusiv. Aber gerade die Befassung mit den typischen Verlustverhalten von Dieselmotoren und deren Emissionen ist der Anstoß den Einsatz von LPM sehr genau zu analysieren. Diese Arbeit zeigt auf, warum LPM mit Dieselmotoren nahezu kein Potenzial bieten.

⁴⁰ siehe. bspw. Caldevilla A.: Untersuchung von elektrischen Speichersystemen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen, 2008 bzw. Hofmann P.: Hybridfahrzeuge, 2010, S. 113ff

2 Gliederung des Prozesses und der Arbeit

Der hier behandelte Abschnitt des Vorentwicklungsprozesses der Teilelektrifizierung gliedert sich in die Ermittlung der 'Randbedingungen', die 'Systemdefinition' und den Hauptprozess 'Berechnung/Verifikation' (Abbildung 10).

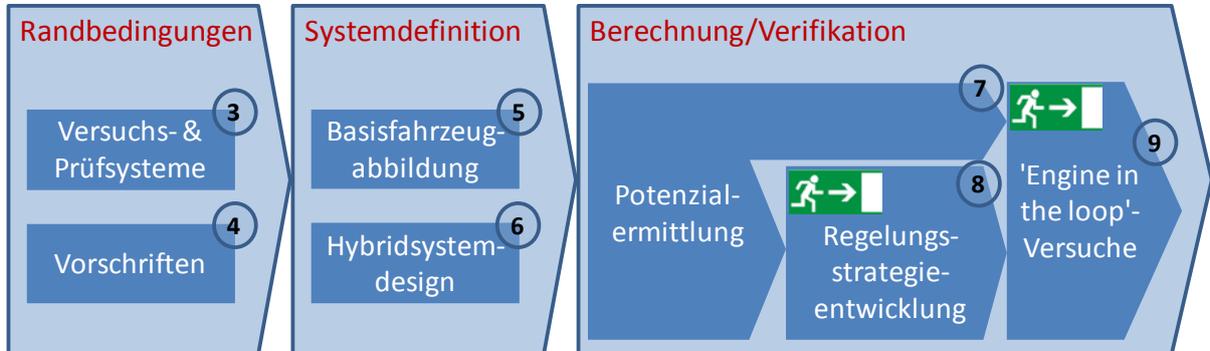


Abbildung 10 – Prozessdefinition

Die Randbedingungsdefinition unterteilt man wiederum in prinzipiell unabhängige Teilaufgaben. Zu definieren sind die eingesetzten 'Versuchs- und Prüfsysteme' und 'Vorschriften' zur Sicherstellung reproduzierbarer Ergebnisse. Diese Vorschriften tragen vor allem bei der Verwendung von Messdaten als Eingangs- oder Ergebnisgrößen entscheidend zur Qualität der Schlussfolgerungen bei.

Die Systemdefinition beinhaltet ein Konzept für das Gesamtsystem – bestehend aus Fahrzeug mit Antriebsstrang, Hybridsystemkonfiguration und eingesetzter VKM. Die 'Basisfahrzeugabbildung' liefert die Kenntnis des Verhaltens eines nicht hybridisierten Grundfahrzeugs und ist Voraussetzung für eine belastbare Vorhersage für ein vergleichbares Hybridfahrzeug. Zur Analyse stehen die Ansätze Längsdynamiksimulation und Fahrzeugvermessung zur Verfügung, die sich auch zum gemeinsamen Verfahren Modellabgleich kombinieren lassen. Gemeinsames Ziel ist die Ermittlung des Lastkollektivs der Antriebsmaschine unter definierten Fahrsituationen, wie bspw. gesetzlichen Zyklen. Die jeweiligen Grundlagen, Voraussetzungen, Vor- und Nachteile, sowie die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit werden in den entsprechenden Unterkapiteln erörtert. Beim 'Hybridsystemdesign' werden schließlich die Komponenten für das konzipierte Hybridfahrzeug spezifiziert.

Der Hauptprozess beinhaltet schließlich alle Arbeitsschritte, die zur Auslegung der Teilelektrifizierung dieselmotorischer Antriebsstränge notwendig sind. Zwischen den Teilabschnitten der 'Potenzialermittlung', der (optionalen) 'Regelungsstrategieentwicklung' und der 'Engine in the loop – Versuche' (EiL-Versuche) besteht die Möglichkeit, den Prozess abzubrechen oder mit anderen Randbedingungen neu zu starten (gekennzeichnet durch die Notausgangssymbole).

Zur leichteren Zuordnung der folgenden Kapitel, sind in Abbildung 10 die entsprechenden Kapitelnummern angeführt.

Werden zur Erklärung des Prozesses Beispiele bzw. Ergebnisse verwendet, werden solche auf Basis des in Kapitel 10.3.1 beschriebenen Automatikgetriebe-Referenzfahrzeug (AUT-REF) mit der Referenz-VKM in Basiskonfiguration (VKM2BAS, beschrieben in Kapitel 10.3.2) herangezogen.

Ergebnisse verschiedener Anwendungen werden anschließend in Kapitel 10 präsentiert. Die hier vorweggenommenen Beispielergebnisse enthält dabei Unterkapitel 10.3.

3 Versuchs- und Prüfsysteme



Zuordnung Kapitel 3

3.1 Motorenprüfstand

Zur Untersuchung des Verhaltens der VKM wird ein dynamischer Motorenprüfstand eingesetzt, der in der Lage ist alle Betriebsarten der VKM zu simulieren, die im realen Fahrzeugeinsatz auftreten.

Eine Ausnahme bilden hier hochdynamische Vorgänge, die nur eingeschränkt nachgebildet werden können, wenn auf Standard-Motorprüfständen gearbeitet werden soll. Hierzu zählen bspw. Schaltvorgänge. Die detaillierte Simulation dieser hoch transienten Vorgänge würde den Einsatz spezieller teurer trägheitsarmer Belastungsmaschinen erfordern.

Im Vorentwicklungsprozess sind aber die Antriebsstrangkomponenten oft noch nicht definiert und deren Verhalten somit unbekannt. Dadurch wird eine exaktere Abbildung unmöglich und überflüssig.

Für die Motoruntersuchungen sind keine speziellen Prüfstände notwendig. Die Steuerung der Belastungsmaschine, Koordination der Messtechnik und Überwachung der sicherheitsrelevanten Betriebsparameter übernimmt die Steuerungssoftware. Sämtliche langsame Messdaten der VKM werden automatisiert erfasst. Notwendige Eingriffe in die Software der VKM und das Protokollieren von transienten Steuergeräteinformationen sind über eine Applikationssoftware möglich.

Zur Erfassung von schnellen Messdaten (Indizierdaten), Kraftstoffverbrauch und Emissionen steht geeignete Messtechnik zur Verfügung. Besonderheiten, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen, werden im Kapitel 4 behandelt.

Um auch Untersuchungen zur Hybridisierung ohne spezielle gekoppelte Softwarestrukturen zu ermöglichen, wird ein sogenanntes 'Offline-Hardware-in-the-Loop-Konzept' angewandt. Dabei wird die Fahrzeugsimulation von der Prüfstandmessung entkoppelt, wodurch auch Hybridkonzepte auf nicht speziell ausgestatteten Motorprüfständen untersucht werden können. Die Vorgaben für die VKM am Prüfstand erfolgen immer in Form von Sollspuren für Drehzahl und Drehmoment. Lediglich hinsichtlich der Nachbildung von hybridspezifischen Anforderungen bspw. hinsichtlich der Start- und Stoppvorgänge sind die Vorschriften anzupassen (siehe Kapitel 9).

3.2 Rollenprüfstand

Anforderungen an Rollenprüfstände zur Zertifizierung von Pkw sind im Europäischen Wirtschaftsraum einheitlich definiert.⁴¹ Zusätzlich zu den geforderten Integralwerten sind für die Entwicklung vorrangig zeitaufgelöste Verläufe von Verbrauch und Emissionen

⁴¹ siehe Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang III, Art. 4

entscheidend. Um die Korrelation mit Motorprüfstanduntersuchungen zu erleichtern, müssen daher nur die Belastungsdefinitionen in Anlehnung an die Norm durchgeführt werden, während dieselbe Messtechnik wie am Motorenprüfstand eingesetzt werden kann. Da auf Rollenprüfständen normalerweise keine eigenen Luftmassenmesssysteme installiert werden, muss das Luftmassensignal der Motorsteuereinheit (engl.: engine control unit, ECU) verwendet und gegebenenfalls in einen Massenstromwert umgerechnet werden.⁴²

Außerdem kann zur Sicherstellung gleicher Randbedingungen ein eventuell vorhandener Dieselpartikelfilter (DPF) durch ein Leerrohr ersetzt werden, wenn davon ausgegangen wird, dass dieser im Normalbetrieb alle PM filtert und Verbrauch und Emissionen im Regenerationsmodus nicht untersucht werden sollen.

Im Fahrzeug können Sensoren für Drücke und Temperaturen im Luft- und Abgassystem, sowie Abgasentnahmesonden zur Messung der Schadstoffkonzentrationen bzw. der Trübung des Rohabgases eingebaut werden. Außerdem kann das Fahrzeug mit einer externen Kraftstoffversorgung ausgestattet werden, die es ermöglicht den Kraftstoffverbrauch gravimetrisch zu erfassen. Aufgrund des generell trägen Ansprechverhaltens von Analysatoren zur Messung von Schadstoffkonzentrationen kann somit die Genauigkeit der transienten Verbrauchsmessung gesteigert werden (siehe auch Kapitel 4.3).

Möglichkeiten zur Messung der normalerweise nicht erfassten Größe Drehmoment, die einerseits zur Verifikation von Simulationen und andererseits zur vereinfachten Korrelation mit Motorprüfstandergebnissen verwendet werden kann (siehe Kapitel 5.2 und 5.3 bzw. 9.1), werden im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

Anschließend folgt ein Kapitel, das das Vorgehen und die Vorteile der für diese Untersuchungen eingesetzten Automatisierung behandelt.

3.2.1 Erfassung des Drehmoments der VKM

Die Messung der Drehzahl der VKM im Fahrzeug bereitet keine Probleme, weil die ECU hierzu mit Sensoren, die nach dem gleichen optischen Prinzip wie Prüfstandensensoren arbeiten, ausgestattet ist und deren Signal als Referenz verwendet werden kann. Beim Drehmoment gestaltet sich die Messaufgabe ungleich schwieriger, weil auch bei der heute üblichen drehmomentgeführten Motorsteuerung das eigentliche Momentsignal der ECU nur auf Basis einer Umrechnung aus den Ansteuersignalen ermittelt wird.

⁴² Vergleiche mit Referenzsystemen am Motorprüfstand zeigen dabei eine gute Übereinstimmung, was wegen des gleichen Messprinzips auch zu erwarten ist.

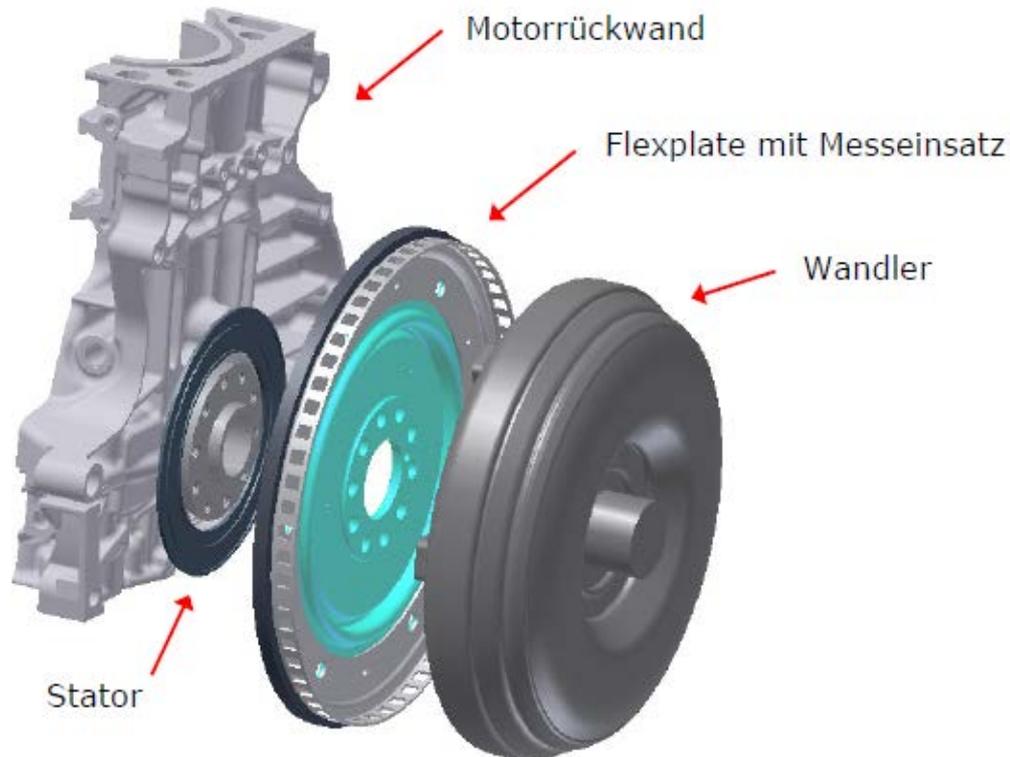


Abbildung 11 – Drehmomentmesssystem auf der Flexplate

Die beengten Platzverhältnisse in Pkws lassen generell keine Messung an der Kurbelwelle der VKM mit konventioneller Messtechnik (z.B.: Messflansch) zu. Um die Belastung der VKM messtechnisch richtig zu ermitteln, ist jedoch die Messung zwischen VKM und dem Getriebe- bzw. Drehmomentwandler eingang notwendig.

Aus diesem Grund kann die Ausgangswelle der VKM mit einem Messsystem bestückt werden. Solche Systeme arbeiten bspw. mit induktiv versorgten Dehnmessstreifen, die auf einem speziellen Messeinsatz angebracht sind. Abbildung 11 zeigt ein Explosionsmodell eines für diese Arbeit eingesetzten Messsystems, bei dem der zwischen VKM und Wandler eingebaute Schwingungsdämpfer ('Flexplate') mit einem Dehnmessstreifen-System bestückt ist. Details zu diesem System und den Problemen damit können ANHANG B (Drehmomentmesswelle) entnommen werden. Für eine verlässliche Funktion wäre eine weitere Überarbeitung und Funktionssicherstellung seitens des Herstellers zwingend notwendig gewesen. Für diese Arbeit wird das Signal aufgrund der Probleme nicht als Referenz verwendet.

Als Alternativlösung kann das Drehmoment aus der Vollindizierung der VKM ermittelt werden. Voraussetzung dazu ist die Kenntnis des Reibungsverhaltens und des Trägheitsmoments der VKM. Aus dem auf ein feines Raster⁴³ übertragenen stationären Kennfeld des indizierten Mitteldrucks aus der Basisvermessung, dem indizierten Mitteldruck und dem Trägheitsmoment wird über den Impulssatz das Drehmoment an der Kurbelwelle ermittelt (Formel 1). Dieses Verfahren ist ohne aufwendige Messungen des temperaturabhängigen Reibungsverhaltens nur für betriebswarme Messungen anwendbar.

$$md_{Kurbelwelle} = md_{stationär}(n, p_{ind}) - J_{VKM} \times \dot{\omega}$$

Formel 1 – Bestimmung des Drehmoments an der Kurbelwelle mittels Impulssatz

⁴³ in dieser Arbeit: Drehzahlraster = 1 1/min, Drehmomentraster = 2.5 Nm

3.2.2 *Automatisierte Zyklusfahrt*

Referenzzyklen sollen für den Abgleich der Simulation und als Emissionsreferenz dienen. Beim manuellen Betrieb können große Abweichungen durch den Einfluss des Prüfstandfahrers auftreten, ohne die Sollbereiche der Fahrgeschwindigkeit zu verlassen.⁴⁴

Um diese Abweichungsursache auszuschließen, können Automatisierungssysteme wie automatisierte Fahrpedale verwendet werden. Solche Systeme ermöglichen eine vollautomatische Zyklusfahrt, indem einerseits der ECU ein Gaspedalsignal aufprägt und andererseits die Steigungsmodellierung des Prüfstandes so beeinflusst wird, dass die Verzögerung ohne Bremsen erfolgen kann.⁴⁵

3.3 *Kontrolle der Korrelation*

Im Rahmen der Versuche am Rollenprüfstand werden stationäre Betriebspunkte des Motors vermessen und mit den Ergebnissen vom Motorenprüfstand verglichen. Dieses Vorgehen wird durch Automatisierung der Last- und Geschwindigkeitssteuerung (siehe Kapitel 3.2.2) ermöglicht.

Die Korrelation von instationären Messdaten wird durch Vergleich von Fahrzyklusmessungen von Rollen- bzw. Motorprüfstand (als EIL-Test) überprüft (siehe Kapitel 9.1).

⁴⁴ Im neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) für Automatikfahrzeuge kann bspw. durch die Toleranzen die verrichtete Arbeit um mehr als 10% schwanken, ohne dass der Zyklus ungültig ist.

⁴⁵ siehe Vögl R. et al.: Innovative Anwendung des Rollenprüfstands für die Fahrbarkeitsabstimmung (in: ATZ, 11/2009), S. 857f

4 Vorschriften



Zuordnung Kapitel 4

Für alle Messungen im Rahmen dieser Arbeit werden die Ergebnisgrößen angelehnt an die Europäischen Vorschriften für die Pkw-Zulassung ermittelt. Die Richtlinie bezüglich der Emissionen von Pkw gilt streng genommen nur für Messungen auf Fahrzeugrollenprüfständen mit einer Anlage zur Entnahme mit konstantem Volumen (engl.: constant volume sampling, CVS).⁴⁶ Abweichend davon kommt im Vorentwicklungsprozess aber wie erwähnt Standardmesstechnik zum Einsatz. In diesem Kapitel werden deshalb die abweichenden Verfahren definiert. Zum besseren Verständnis werden diejenigen Vorschriften, die direkt umsetzbar sind, ebenfalls angeführt.

Abweichende Normen für außereuropäische Prüfaufgaben werden im Sinne der besseren Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt. Die beschriebenen Verfahren werden also für alle Fahrzyklen angewandt.

4.1 Emissionsermittlung für gasförmige Komponenten

Für die Berechnungen der Konzentrationen wird vorausgesetzt, dass Dieselaabgas als Gemisch idealer Gase behandelt werden kann.⁴⁷

Außerdem wird wegen der üblichen Betriebsverhältnisse mit Luftüberschuss die molare Masse der Luft näherungsweise auch für das Abgas verwendet. Dabei werden der reduzierte Anteil an Sauerstoff, der erhöhte Anteil an CO₂ und die geringen Anteile der Schadstoffe vernachlässigt.

Die Emissionswerte für Fahrzyklusmessungen erhält man als streckenbezogene bewertete Integrale der Massenströme (Formel 2).

$$EW_{Komponente} = \frac{\int_t \dot{m}_{Komponente} dt}{S}$$

Formel 2 – Emissionswert

Die Massenströme berechnet man ohne Verwendung einer CVS-Anlage als Produkt aus Massenanteil und Abgasmassenstrom, der wiederum die Summe aus Kraftstoff- und Luftmassenstrom ist (Formel 3).

$$\dot{m}_{Komponente} = w_{Komponente} \times \dot{m}_{Abgas} = w_{Komponente} \times (\dot{m}_{Luft} + \dot{m}_{Kr})$$

Formel 3 – Massenstrom

Die Massenanteile erhält man für Gemische idealer Gase aus den Stoffmengenanteilen, wenn man die molaren Massen der Komponenten und die des Gemischs kennt (Formel 4).

⁴⁶ siehe Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang I, Zi. 5.3.1.2.5 bzw. Anhang III, Zi. 4.2

⁴⁷ Pischinger R. et al.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage 2009, S. 11

Für das Abgasgemisch wird wie erwähnt näherungsweise die molare Masse von trockener Luft angesetzt. Diese ergibt sich aus den gerundeten Volumenanteilen der drei Hauptbestandteile der Luft (Stickstoff, Sauerstoff und Argon) und deren molaren Massen ebenfalls als Gemisch idealer Gase zu 28.86.

$$w_{Komponente} = \frac{M_{Komponente}}{M_{Abgas}} \times x_{Komponente}$$

Formel 4 – Massenanteil

Tabelle 1 – molare Massen

Reglementierter Schadstoff bzw. sonstige Komponente	molare Masse	Anteil in der Luft	Quelle
	kg/mol	%	
CO	28		
CO ₂	44		
NO	30		
NO ₂	46		
NO _x	46		als NO ₂ -Äquivalent ⁴⁸
C _x H _y ⁴⁹	13.86		als C ₁ H _{1.86} ⁵⁰
CH ₄	16		
N ₂	14	78	
O ₂	16	21	
Ar	40	1	

Für die Komponenten setzt man die Werte nach Tabelle 1 ein. Näherungsweise sind jeweils nur die Verbindungen der häufigsten Isotope berücksichtigt.

Die am Motor- und Rollenprüfstand eingesetzten Emissionsmesssysteme müssen mit normgerechten Messverfahren⁵¹ arbeiten und geben meistens Volumenanteile aus. Für ideale Gase entsprechen die Volumenanteile den Stoffmengenanteilen (Formel 5).

$$x_{Komponente} = \varphi_{Komponente}$$

Formel 5 – Stoffmengenanteil

4.1.1 Verzugszeiten

In Formel 3 zur Massenstrombestimmung müssen die Faktoren für jeden Zeitschritt die Ergebnisse derselben Ereignisse sein. Es müssen also Verzugszeiten der Messwerte zueinander berücksichtigt werden.

Alle Messwerte sollen nach der Korrektur synchron zum Motorverhalten vorliegen. Änderungen im Motorverhalten sind praktisch zeitsynchron an den Führungsgrößen der ECU erkennbar. Daher werden alle anderen Größen mit diesen synchronisiert. Als Bezugsbasis

⁴⁸ Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang I, Zi. 2.4

⁴⁹ virtuelle Summenformel für die gesamten Kohlenwasserstoffe mit nicht exakt bekannter Zusammensetzung

⁵⁰ virtuelle Summenformel entsprechend Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang I, Zi. 2.4

⁵¹ siehe Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang III, Zi. 4.3

wird die aktuelle Einspritzmenge herangezogen, weil sich diese zu jedem Einspritzzeitpunkt ändern kann.

Kraftstoff- und Luftmassenstrom werden durch sehr schnell ansprechende Messgeräte (Kraftstoffwaage bzw. Heißfilm-Anemometer) erfasst. Korrekturen entfallen daher.

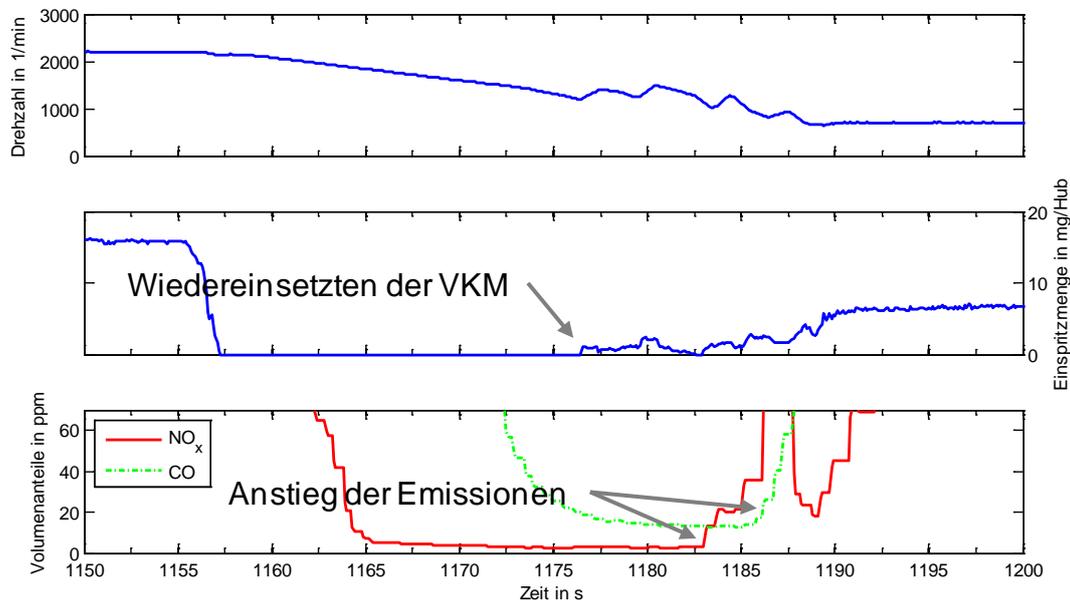


Abbildung 12 – Beispiel für Messwertverschiebung

Bei der Emissionsmessung setzt sich die Ansprechzeit aus dem Gasweg vom Motorausstritt zur Messzelle und den Sensoransprechverhalten zusammen. Um beide gemeinsam beurteilen zu können, wird anhand des Wiedereinsetzens der Verbrennung nach einer Schubphase ermittelt, wie groß die Verzögerungen zwischen dem Beginn der Einspritzung und dem Ansteigen der Konzentrationen sind (Abbildung 12 zeigt für den betrachteten Ausschnitt aus einer EiL-Messung des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) die Zeitverläufe der Rohwerte zweier Schadstoffkonzentrationen und des Einspritzsignals). Durch die lange vorangegangene Schubphase stellen sich vor dem Wiedereinsetzen stationäre Verhältnisse ein. Die von 0 abweichenden Konzentrationen sind auf Kalibrier-, Messfehler bzw. Sensordriften zurückzuführen.

Als Verzugszeit wird die Zeitspanne zwischen dem Anstieg des Einspritzmengensignals und dem ersten merkbaren Konzentrationsanstieg definiert (Abbildung 13).

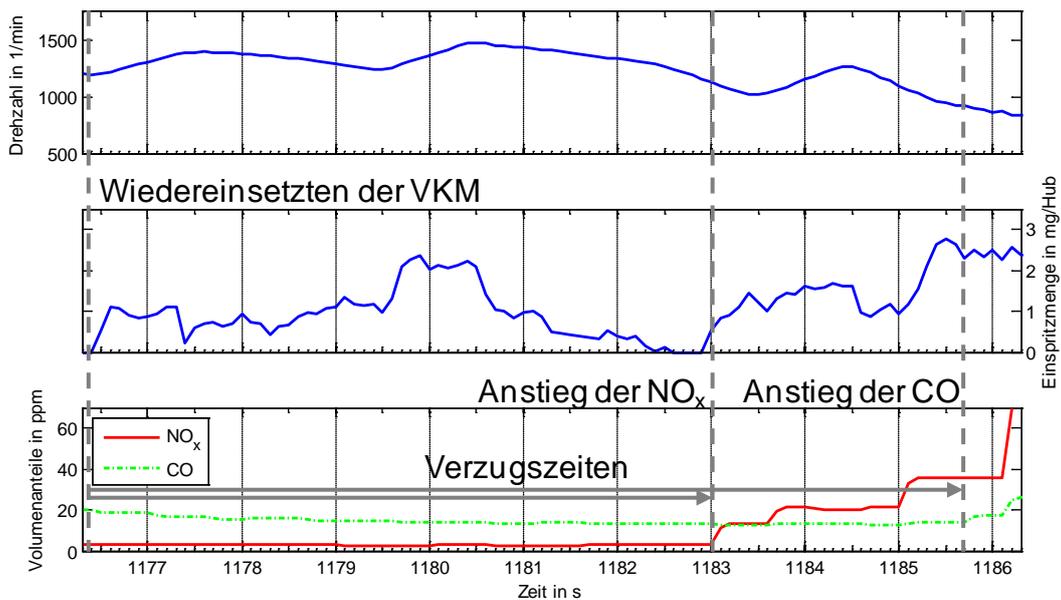


Abbildung 13 – Ermittlung der Verzugszeiten

Durch Mittelung aus mehreren Versuchen ergeben sich am Motorenprüfstand bzw. am Rollenprüfstand die Verzugszeiten nach Tabelle 2.

Tabelle 2 – Verzugszeiten

Reglementierter Schadstoff bzw. sonstige Komponente	Verzugszeit Motorenprüfstand	Verzugszeit Rollenprüfstand
	s	s
CO	8.2	4.9
CO ₂	10.5	4.9
NO _x	6.2	4.3
C _x H _y	7.3	2.3

Deutlich erkennbar sind die Unterschiede zwischen den beiden verschiedenen Prüfstandssystemen.

Aufgrund der im Verhältnis zum Gasweg bis zur Entnahmestelle, in dem der Massenfluss die Verzugszeit beeinflusst, langen Analysegasleitung mit konstantem Volumenfluss werden die so ermittelten Werte näherungsweise als konstant über alle Massenströme und Motorkonfigurationen betrachtet. Das dynamische Sensoransprechverhalten selbst und Vermischungseffekte in und gegen die Strömungsrichtung bleiben unberücksichtigt.

Eine zusätzliche Verschiebung bspw. um die halbe Sensorreaktionszeit würde den Gesamtfehler nicht unbedingt verkleinern, weil ja dann auch die Abklingphasen verschoben wären.

Außerdem wären folgende Nachteile zu berücksichtigen:

- In den Darstellungen wären Auswirkungen bereits vor deren Ursachen erkennbar.
- Auch die Sensorreaktion ist abhängig vom Konzentrationsanstieg und somit nur schwer verlässlich für alle möglichen Zustände zu erfassen.
- Vor allem bei der Simulation von Hybrid-Zyklen könnten die (hohen) Startemissionskonzentrationen durch weiteres Verschieben teilweise in Stillstandphasen verschoben werden und somit nicht zum Gesamtergebnis beitragen.

Durch diese Festlegung sind also Fehlbewertungen möglich. Abbildung 14 zeigt bspw. für NO_x , dass die möglichen Abweichungen beim Vergleichen mit Grenzwerten bzw. mit anderen Messungen vernachlässigt werden können, wenn die Verzugszeiten nicht stark abweichen. Unter Verzugszeitverschiebung ist dabei zu verstehen, dass die Verzugskorrektur um diesen Wert vom Wert in Tabelle 2 abweicht.

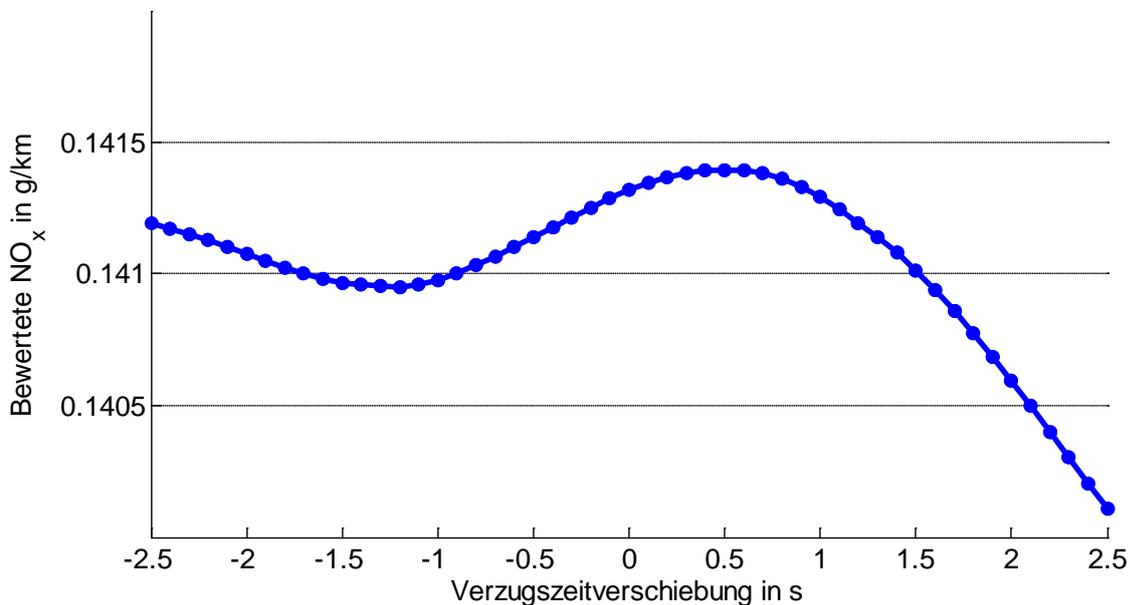


Abbildung 14 – Auswirkung eines Fehlers bei der Verzugszeit am Beispiel einer EIL-Messung am Motorprüfstand (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

4.1.2 Korrekturen für Emissionsmessungen im Vorentwicklungsprozess

4.1.2.1 Luftfeuchte

NO_x -Emissionen aus der Verbrennung in VKM sind allgemein von der Feuchte der Ladung abhängig. Um dem Rechnung zu tragen und eine möglichst unbeeinflusste relative Vergleichbarkeit untereinander und mit den gesetzlichen Grenzwerten zu ermöglichen, gibt es entsprechende Korrekturvorschriften.

Die feuchten Abgase wiederum müssen vor der Messung mit einzelnen Analysatoren getrocknet werden, wenn unverdünntes Abgas zugeführt wird. Durch die Trocknung entsprechen die ermittelten Konzentrationen nicht mehr den Anteilen am Gesamtmassenstrom. Da die unverdünnte, trockene Messung für Pkw gesetzlich nicht vorgesehen ist⁵², muss man für entsprechende Korrekturfunktionen auf Richtlinien für Nutzfahrzeuge ausweichen.

4.1.2.1.1 Korrektur für NO_x

Die gemessenen NO_x -Konzentrationen werden gemäß den Vorschriften für Emissionstest von Pkw korrigiert.⁵³ Diese Korrektur nach Formel 6 berücksichtigt näherungsweise die aufgrund des Einflusses des in der angesaugten Luft enthaltenen Wasserdampfes veränderten Voraussetzungen für die NO_x -Bildung.

⁵² Europäische Union: RL 70/220/EWG, Abs. 4.3.1.3

⁵³ siehe Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anlage 8, Zi. 1.4

$$\varphi_{NO_x} = \text{Messgerät} \varphi_{NO_x} \times \frac{1}{1 - 0.0329 \times (H_{Luft}^{abs} \times 1000 - 10.71)} \text{ mit } [H_{Luft}^{abs}] = \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Luft}_{trocken}}$$

Formel 6 – Feuchtkorrektur für NO_x⁵⁴

Die absolute Luftfeuchte (oder auch Feuchtegrad) wird dabei nach Formel 7 ermittelt. Abweichend vom Faktor aus der Norm werden für die molare Masse von Luft der schon bei der Kumulierung verwendete Wert (28.96) und für Wasser der aus dem Periodensystem ermittelte Wert für die Verbindung der häufigsten Isotope (18) eingesetzt. Außerdem wird nur die relative Luftfeuchte der Ansaugluft gemessen und daher auch für Druck und Umgebungstemperatur (zur Sättigungsdampfdruckbestimmung) die Messwerte der Ansaugluft eingesetzt. Die Sättigungsdampfdruckermittlung erfolgt durch Interpolation aus der Dampftafel.⁵⁵

$$H_{Luft}^{abs} = \frac{M_{Wasser}}{M_{Luft}} \times \frac{p'_{d}(T_{Luft})}{\frac{p_{Luft}^{abs}}{H_{Luft}^{rel}} - p'_{d}(T_{Luft})}$$

Formel 7 – Absolute Luftfeuchte (Feuchtegrad)

4.1.2.1.2 Korrekturen für trocken gemessene Größen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird im unverdünnten Vollstrom des Rohabgases gemessen und es kommen Analytoren mit vorgeschalteter Trocknung für CO und CO₂ zum Einsatz. Dafür wird eine Korrektur angewandt, die aus der Norm für Nutzfahrzeuge entnommen wird, in der trockene Messungen vorgesehen sind (Formel 8).⁵⁶

$$\varphi_{CO} = \text{Messgerät} \varphi_{CO} \times k_{tf} \text{ bzw. } \varphi_{CO_2} = \text{Messgerät} \varphi_{CO_2}^{rel} \times k_{tf}$$

Formel 8 – Feuchtkorrekturen für CO und CO₂

Der Korrekturfaktor errechnet sich nach Formel 9.

$$k_{tf} = \left(1 - \frac{1244.2 \times H_{Luft}^{abs} + 111.19 \times w_H^{Kr} \times \frac{\dot{m}_{Kr}}{\dot{m}_{Luft}^{trocken}}}{773.4 + 1244.2 \times H_{Luft}^{abs} + \frac{\dot{m}_{Kr}}{\dot{m}_{Luft}^{trocken}} \times k_{Kr}} \right) \times 1.008 \text{ mit } [H_{Luft}^{abs}] = \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Luft}_{trocken}}$$

Formel 9 – Korrekturfaktor für CO und CO₂

Den darin enthaltenen Kraftstofffaktor wiederum erhält man aus den Massenanteilen über Formel 10 und für die absolute Luftfeuchte gilt wieder das Ergebnis aus Formel 7.

$$k_{Kr} = 55.584 \times w_H^{Kr} + 0.1083 \times w_C^{Kr} + 0.1562 \times w_S^{Kr} + 7.9936 \times w_N^{Kr} + 6.9978 \times w_O^{Kr}$$

Formel 10 – Kraftstofffaktor

4.1.2.2 Hintergrundkonzentrationen

Zur Beurteilung der Emissionen ist die Messung und Subtraktion der Hintergrundkonzentrationen vorgeschrieben.⁵⁷ Aufgrund des Verzichts auf eine eigene Messkette zur Luftanalyse, wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich für CO₂ als Hintergrundkonzentration die mittlere Konzentration in der Atmosphäre (380 ppm⁵⁸)

⁵⁴ In dieser Arbeit kommen bei Mess- bzw. Rechenwerten bis zu vier Indizes zum Einsatz, die rund um die Variable zur Unterscheidung angeführt werden können.

⁵⁵ siehe TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik: Thermodynamik Studienblätter, 1999, Studienblatt Nr. 8/1

⁵⁶ siehe Europäische Union: RL 2005/55/EG, Anlage 1, Zi. 5.2

⁵⁷ Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anlage 8, Zi. 1.1

⁵⁸ Williams D. R.: Earth Fact Sheet

abgezogen (Formel 11). Die Hintergrundkonzentrationen der Schadstoffe werden vernachlässigt.

$$\overset{\text{Messgerät}}{\varphi}_{CO_2^{rel}} = \overset{\text{Messgerät}}{\varphi}_{CO_2} - \frac{380}{1000000}$$

Formel 11 – Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration von CO₂

4.1.3 Bestimmung der Abgasrückführrate⁵⁹

Die Abgasrückführrate wird bei Systemen mit Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR) benötigt, um die Beladung des DPF mit PM aus der Partikelkonzentration und dem Luftmassenstrom zu ermitteln (Formel 12).⁶⁰ Dabei wird die Spülmasse vernachlässigt.

$$\dot{m}_{PM_{DPF}}^{ND-AGR} = w_{PM} \times (\dot{m}_{Abgas} + \dot{m}_{AGR}) = w_{PM} \times \left(\dot{m}_{Kr} + \dot{m}_{Luft} \times \frac{1}{1 - r_{AGR}} \right)$$

Formel 12 – Partikelmassenstrom in den DPF bei ND-AGR

Die Abgasrückführrate wird näherungsweise aus der CO₂-Massenbilanz nach Formel 13 berechnet.

$$r_{AGR} = \frac{CEB_{Einlassverteiler} \varphi_{CO_2^{rel}}}{CEB_{Abgas} \varphi_{CO_2^{rel}}}$$

Formel 13 – Näherungsweise Berechnung der Abgasrückführrate aus den CO₂-Konzentrationen

4.2 Emissionsermittlung für feste Abgaskomponenten

Zur Bestimmung der Masse an emittierten PM sind gravimetrische Verfahren vorgesehen⁶¹, die jedoch keine zeitaufgelösten Informationen liefern und nur selten auf Motorenprüfständen im Einsatz sind. Stattdessen misst man analog zu den gasförmigen Schadstoffen die Konzentration und ermittelt daraus den Massenstrom (Formel 14). Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Messverfahren eingesetzt, die hier kurz vorgestellt werden.

$$\dot{m}_{PM} = w_{PM} \times \dot{m}_{Abgas} = w_{PM} \times (\dot{m}_{Luft} + \dot{m}_{Kr})$$

Formel 14 – Partikelmassenstrom⁶²

4.2.1 Rauchrichtwert

Weil im Rahmen der Messungen für diese Arbeit teilweise kein Messsystem zur Bestimmung der Ruß- bzw. Partikelkonzentration zur Verfügung gestanden ist, wird zur qualitativen vergleichenden Beurteilung dieser transienten Messungen der Rauchrichtwert (RRW) auf Basis der Trübung des Abgases bestimmt.

$$RRW = \int_t Trübung_{Abgas} \times (\dot{m}_{Luft} + \dot{m}_{Kr}) dt \text{ mit } [Trübung_{Abgas}] = \% \text{ und } [\dot{m}_{Luft}] = [\dot{m}_{Kr}] = \frac{kg}{h}$$

Formel 15 – Rauchrichtwert

Die Trübung des Abgases für die Ermittlung nach Formel 15 wird mit einem Teilstromverfahren mithilfe eines Opazimeters bestimmt.⁶³ Belastbare quantitative Werte hinsichtlich der PM-Emissionen sind auf Basis der Trübung nicht möglich.

⁵⁹ i.A.a. Pischinger R. et al.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage 2009, S. 238f

⁶⁰ Aufgrund der eingesetzten Messsysteme wird im Rahmen dieser Arbeit statt der PM-Belastung die Rußbelastung (RB) des DPF bestimmt. Für Relativvergleiche ist dies aufgrund der angenommenen Korrelation möglich.

⁶¹ Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang III, Anlage 5, Zi. 2.4.4

⁶² Diese Formel gilt nur für Systeme ohne ND-AGR. Für diese gilt Formel 12 aus Kapitel 4.1.3.

4.2.2 Rußkonzentrationsermittlung

4.2.2.1 Fotoakustisches Messprinzip⁶⁴

Ruß im Sinne des elementaren Kohlenstoffs ist ein Hauptteil der emittierten PM. Der eingesetzte Rußsensor arbeitet nach dem fotoakustischen Messverfahren und misst damit die Rußkonzentration im Abgas. Dabei werden die Rußpartikel mit moduliertem Laserlicht bestrahlt und so zu Schwingungen angeregt, die als Schallwellen detektiert werden können (Abbildung 15). Die Intensität des Schalls ist dabei proportional zur Rußkonzentration im Abgas.

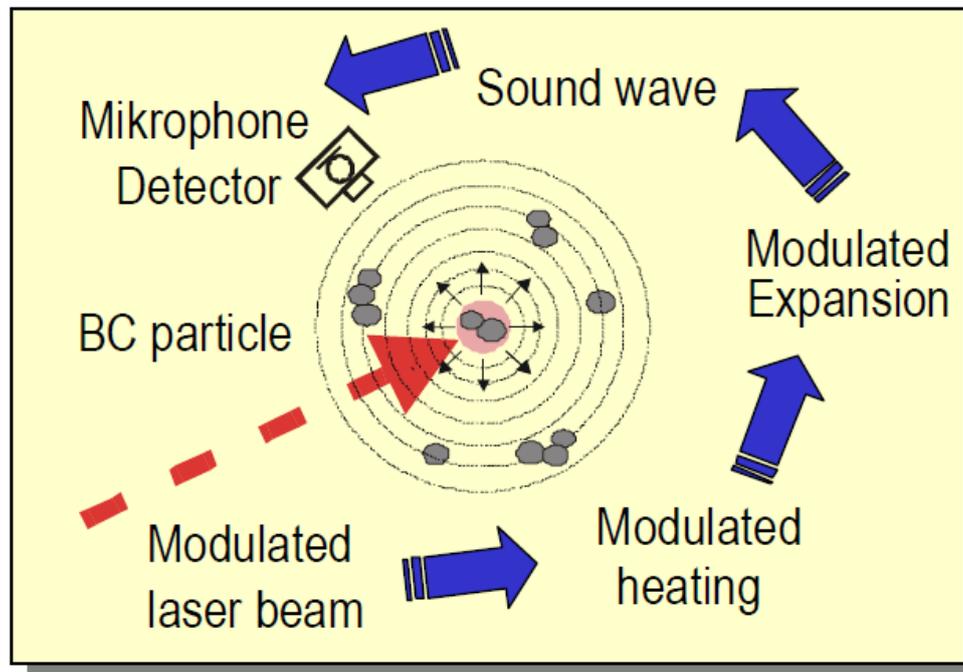


Abbildung 15 – Fotoakustisches Messprinzip

⁶³ Informationen zu diesem Messsystem enthält Pongratz H et al.: Messtechnik für transiente Erfassung der Deselemissionen (in: MTZ, 10/2003), S. 824ff

⁶⁴ Schindler W. et al.: A Photoacoustic Sensor System for Time Resolved Quantification of Diesel Soot Emissions (Society of Automotive Engineers 2004-01-0968), 2003

4.2.2.2 Filterpapiermethode⁶⁵

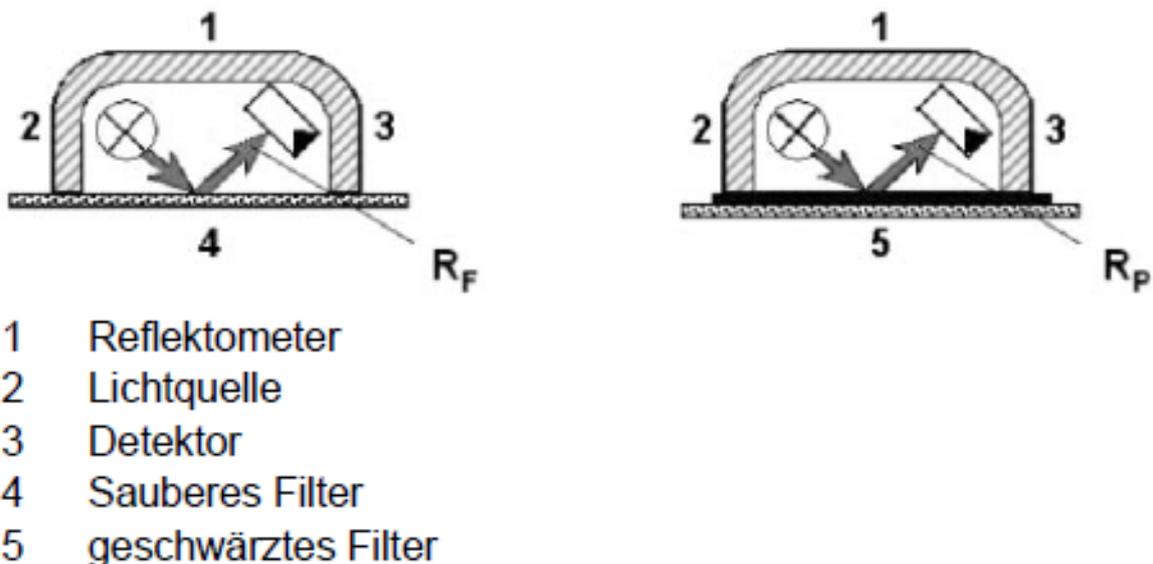


Abbildung 16 – Messprinzip bei der Filterpapiermethode

Bei diesem Messprinzip (Abbildung 16) wird die Schwärzung eines Filterpapiers, durch das ein definiertes Abgasvolumen gesaugt wird, mittels Reflektometers bestimmt und mit der Rußkonzentration über einen empirischen Zusammenhang korreliert. Durch das intermittierende Verfahren funktioniert diese Methode nur für stationäre Messungen. Auch dieses Verfahren ist nur für Relativvergleiche geeignet.

4.3 Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs

Als Quellen für Verbrauchswerte stehen zur Verfügung:

- Kraftstoffwaage
- ECU (Berechnung aus Einspritzmengensignal)
- Berechnung aus Emissions-Massenströmen (siehe Kapitel 4.1)

Von diesen Messsystemen liefert nur die Kraftstoffwaage einen integralen Verbrauchswert. Es besteht nämlich die Möglichkeit neben den aktuellen Massenfluss auch den aktuellen Füllstand aufzuzeichnen. Aus diesem Grund wird diese Methode im Rahmen dieser Arbeit möglichst durchgängig angewandt.

Die Berechnung des Kraftstoffmassenflusses kann auch aus Steuergerätsignalen erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich lediglich um eine Umrechnung aus den Ansteuersignalen und somit eigentlich um keine echte Messung handelt.

Aus den Emissions-Massenströmen kann auf Basis der Kohlenstoffbilanz ebenfalls auf den aktuellen Kraftstoffmassenfluss geschlossen werden. Abweichend von der Vorschrift zur Ermittlung des Gesamtverbrauchs in der Richtlinie werden für die Umrechnung nach Formel 16 wieder die molaren Massen der häufigsten stabilen Isotope eingesetzt und die Umrechnung erfolgt mittels des ermittelten Kohlenstoffanteils im Kraftstoff.⁶⁶

$${}_{\text{Abgas}}\dot{m}_{Kr} = \left(\dot{m}_{CO_2} \times \frac{M_C}{M_{CO_2}} + \dot{m}_{CO} \times \frac{M_C}{M_{CO}} + \dot{m}_{C_xH_y} \times \frac{M_C}{M_{C_xH_y}} \right) \times \frac{1}{w_C^{Kr}}$$

Formel 16 – Kraftstoffmassenfluss aus Abgasanalyse

⁶⁵ AVL List GmbH: Rauchwertmessung mit der Filterpapiermethode

⁶⁶ Europäische Union: RL 80/1268/EWG, Anhang I, Zi. 7

Auch für die molare Masse des Kohlenstoffs wird der Wert des häufigsten Isotops (12) angesetzt.

4.3.1 Integralwertermittlung

Die aus den Signalen der ECU bzw. der Abgasanalyse ermittelten Massenströme müssen noch kumuliert und in Bezug zur Fahrstrecke gebracht werden (Formel 17). Liegt von der Kraftstoffwaage kein Füllstandsignal vor, muss gleich verfahren werden. Außerdem sind Verbrauchsangaben als streckenbezogene Volumina üblich, weshalb hier eine Umrechnung auf Basis der Kraftstoffdichte erfolgt.

$${}_{\text{Methode}}V_{Kr} = \frac{\int_t {}_{\text{Methode}}\dot{m}_{Kr} dt}{s} \times \frac{1}{\rho_{Kr}}$$

Formel 17 – Verbrauchswertermittlung durch Kumulierung

Liegen hingegen Füllstandverläufe vor, kommt Formel 18 zur Anwendung. Der Vorteil liegt an der höheren Genauigkeit, weil die Auflösungsfehler bei der Digitalisierung sich nicht summieren können. Außerdem kommt es vor allem durch Start-Stopp-Betrieb zu kurzfristigen Temperaturschwankungen im Kraftstoffsystem, die die Massenstromanzeige beeinflussen können.

$${}_{\text{Waage}}V_{Kr} = \frac{\text{Füllstand}^{\text{Beginn}} - \text{Füllstand}^{\text{Ende}}}{s} \times \frac{1}{\rho_{Kr}}$$

Formel 18 – Verbrauchswertermittlung aus Füllstandsignal

4.3.2 Einfluss von Kraftstofftemperaturänderungen

Kommt ein Kraftstoffkonditioniersystem zum Einsatz, das keine Heizung des Kraftstoffs erlaubt, bedeutet das, dass die Kraftstofftemperatur nur durch die Abwärme gesteigert wird. Vor allem nach Kaltstarts, aber auch durch die kurzen Abkühlphasen vor den Starts der Zyklen, ist somit die Kraftstofftemperatur im System nicht konstant. Durch die Erwärmung während des Betriebes dehnt sich der Kraftstoff im System somit aus, was die ermittelte Füllstandabnahme reduziert.⁶⁷

Diese Reduktion lässt sich allerdings rechnerisch berücksichtigen, wenn man den Zusammenhang zwischen Kraftstofftemperatur und Füllstandänderung ohne Entnahme kennt. Wenn das System keine Heizoption besitzt und da die Ausdehnung grundsätzlich keiner Hysterese unterliegt, kann dieser Zusammenhang aus Abkühlversuchen gewonnen werden. Eine theoretisch mögliche analytische Ermittlung auf Basis von Kraftstoffvolumen und Ausdehnungskoeffizienten kann hier entfallen, weil die exakten Volumina meistens nicht bekannt sind.

⁶⁷ Die Ausdehnung des Kraftstoffs im Messbehälter der Waage selbst hat keine Auswirkung auf das Messergebnis, weil innerhalb des Behälters genug Platz vorhanden ist, sodass es zu keinem zusätzlichen Kraftstofffluss aus diesem kommt. Dieses Verhalten ist demnach unabhängig vom Typ der eingesetzten Kraftstoffwaage.

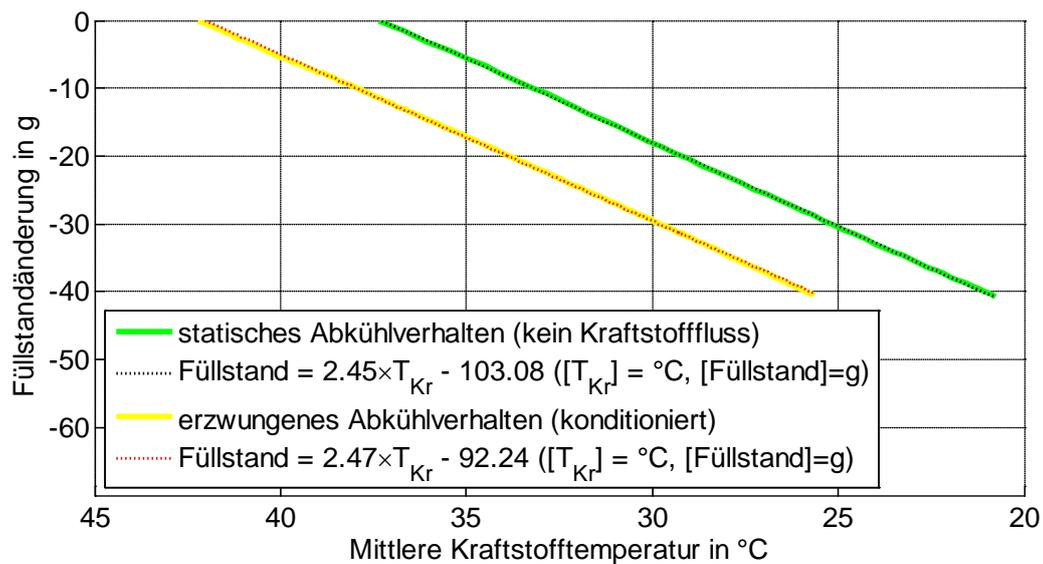


Abbildung 17 – Füllstandänderung bei Änderung der Kraftstofftemperatur

In Abbildung 17 sind zwei Beispiele für Abkühlvorgänge aufgetragen, wobei die Kurven einem Langzeitversuch über eine Nacht mit ausgeschalteter Konditionieranlage und einem Versuch mit aktiver Kühlung entsprechen.⁶⁸ Die mittlere Kraftstofftemperatur entspricht dabei dem Mittelwert aus den Temperaturmessungen am Austritt des Konditioniersystems und am Eintritt des Rückflusses.

Aufgrund der ausgezeichneten Linearität und des nahezu unveränderten Faktors, kann der Mittelwert (2.46) als Füllstandkorrekturfaktor $k_T^{\text{Füllstand}}$ verwendet werden.

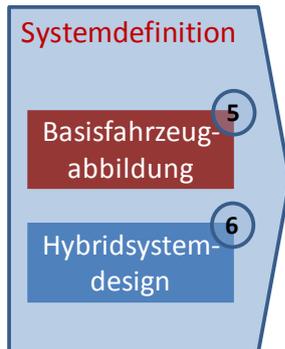
Das korrigierte Verbrauchsergebnis erhält man schließlich nach Formel 19.

$$Waage_k V_{Kr} = Waage V_{Kr} + \frac{(T_{Kr}^{Ende} - T_{Kr}^{Beginn}) \times k_T^{\text{Füllstand}}}{s} \times \frac{1}{\rho_{Kr}}$$

Formel 19 – Berücksichtigung der Kraftstofftemperaturdehnung

⁶⁸ Die Zeitschrittweite ist so gewählt worden, dass im betrachteten Temperaturintervall mehr als 200 Messpunkte für die Ausgleichsrechnung zur Verfügung stehen.

5 Basisfahrzeugabbildung



Zuordnung Kapitel 5

Zu Beginn der Berechnung muss eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Entweder steht das Modell eines Fahrzeugs zur Verfügung, mit dem die Leistungsanforderung (Drehzahl und Drehmoment) an der Schnittstelle zum Antrieb⁶⁹ und die Bremsleistung ermittelt werden können.
- Oder es ist ein Versuchsfahrzeug und die Möglichkeit dieses auf einem Fahrzeugrollenprüfstand zu testen vorhanden. Für diese Messungen müssen die Fahrwiderstände als Funktion der Fahrgeschwindigkeit ausgedrückt werden können. Zusätzlich müssen Drehzahl und Drehmoment am Getriebeeingang gemessen oder errechnet werden können (bspw. wie in Kapitel 3.2.1). Dieses Fahrzeug kann eine andere VKM einsetzen, als später für das Hybridsystem geplant ist, allerdings können ohne Simulationsmodell keine Anpassungen der Getriebeabstimmung vorgenommen werden.

Für beide Varianten ist die Zuordnung zu einer Schwungmassenklasse (SMK) bzw. die Kenntnis der Fahrzeugmasse erforderlich.

Zur Berechnung der Rekuperation sind auch bei Verwendung eines Versuchsfahrzeugs Informationen über die Verluste im Antriebsstrang notwendig.

5.1 Längsdynamiksimulation

Bei der Berechnung der Fahrzeuglängsdynamik werden im gesamten Antriebsstrang zu jedem Zeitpunkt die Lösungen des Energieerhaltungssatzes gesucht. Die einzelnen Komponenten können dabei verschiedene Detailierungsgrade aufweisen, die sich bspw. durch die Berücksichtigung von Trägheiten, Elastizitäten und Verlusten unterscheiden.

Zur Beschreibung des Systems stehen Impuls- und Drallsatz, gegebenenfalls ergänzt durch Verlustdefinitionen (absolut oder bezogen auf die aktuelle Ein- oder Ausgangsleistung) zur Verfügung.

Zur Simulation von dynamischen Vorgängen zusätzlich erforderlich ist die Modellierung von Steuer- und Regelementen. Je nach Art des Antriebsstranges zählen hierzu Komponenten der Getriebesteuerung und der Kupplungsbetätigung. Im Fall eines konventionellen Antriebsstrangs mit manuellem Schaltgetriebe übernimmt der Fahrer alle Funktionen, sonst sind Teilaufgaben automatisiert. Demnach muss das Fahrerverhalten im Modell berücksichtigt werden.

Nur mit bekannten Ergebnissen des dynamischen Systemverhaltens ist eine Vereinfachung im Sinne einer Rückwärtsrechnung möglich, bei der Ursache und Wirkung quasi vertauscht werden. Die Simulation von Regelungssystemen ist damit nur sehr eingeschränkt möglich.

⁶⁹ Bei einem konventionellen Fahrzeug ist das die Kurbelwelle.

Bei Verwendung von gemessenen Geschwindigkeitsverläufen als Vorgabegrößen ist eine geeignete Glättung vorzusehen, weil ansonsten durch die Digitalisierung bei der Messdatenerfassung verursachte Sprungstellen in den Ergebnissen auftreten können. Nähere Informationen zur Realisierung enthält ANHANG C (Glättungsmethode für die Geschwindigkeit).

Bewegt sich ein Fahrzeug, so wirken die Fahrwiderstände dieser Bewegung entgegen. Diese setzen sich aus den bekannten Anteilen Luft-, Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand zusammen. Die Anteile sind jeweils aufteilbar in translatorische und rotatorische Widerstände.

Für den hier ausschließlich betrachteten Fall der ebenen geradlinigen Bewegung kann der gesamte Fahrwiderstand auch näherungsweise aus zwei Teilen zusammengesetzt werden. Einerseits der der Masse des Fahrzeugs proportionale Beschleunigungswiderstand und andererseits die Summe aus Luft- und Rollwiderstand, die durch ein quadratisches Polynom in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit berücksichtigt wird (Formel 20).

$$W = F_0 + F_1 \times v + F_2 \times v^2 + SMK \times a$$

Formel 20 – Fahrwiderstand⁷⁰

Die benötigten Polynomfaktoren können dabei bspw. aus einem Ausrollversuch ermittelt werden.⁷¹

Alle Simulationsrechnungen im Rahmen dieser Arbeit werden unter Vernachlässigung von Schlupfeffekten durchgeführt.

Zur Modellbildung für den Antriebsstrang stehen verschiedene Programmpakete zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit ist das Programm CRUISE eingesetzt worden. Diese bietet die Möglichkeit mittels grafischer Benutzeroberfläche ein Abbild des zu simulierenden Antriebsstrangs aufzubauen. Ebenfalls verfügt CRUISE über Modelle für Steuer- und Regelungssysteme, sowie ein Fahrermodell. Viele Komponenten sind auch individuell anpassbar.⁷²

Ergebnisse der Simulation sind zeitliche Verläufe von Drehzahl und Drehmoment an der Schnittstelle zur Antriebsmaschine, sowie von der Summe der Bremsmomente an den Rädern und vom aktuell eingelegten Gang bzw. Kupplungsstatus.⁷³ Steht zusätzlich auch ein Gaspedalsignal zur Verfügung, können Schubphasen einfach erkannt werden.

Für alle Simulationsmethoden sprechen die Vorteile der allgemeinen kostengünstigen Anwendbarkeit, der rasche Erhalt von streuungsunabhängigen Ergebnissen, sowie die einfache Durchführung von Variationen. Nachteilig ist jedoch die fehlende Verifikation ohne Bezug auf konkrete Messergebnisse.

⁷⁰ Für Rollenprüfstandversuche und Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wird die SMK des Fahrzeugs zur Simulation der Masse verwendet. Die Massenveränderungen durch das Hybridsystem werden näherungsweise vernachlässigt, weil kein Wechsel in eine andere SMK erwartet wird und im Rahmen dieser Arbeit keine Massenangaben zu den Komponenten vorliegen. Eine mögliche Erhöhung des Rollwiderstandes wird ebenfalls nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen kann allgemein nicht auf alle Hybridisierungsberechnungen übertragen, sondern ist gegebenenfalls zu hinterfragen. Rotatorische Trägheiten werden in dieser Formel nicht berücksichtigt, sondern in den Simulationsmodellen.

⁷¹ siehe Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang III, Anlage 3

⁷² CRUISE ist ein Tool der AVL List GmbH. Zusätzliche Informationen zu CRUISE enthält Bacher C.: Validierungsbeispiel für ein Hybridantriebssystem, 2009

⁷³ Mit diesen Informationen kann erkannt werden, wann das Fahrzeug anfährt oder stoppt. In diesem Fall ist eine Kupplung geöffnet, der Gang, mit dem angefahren wird, eingelegt und es erfolgt kein Wechsel in einen höheren Gang bevor die Kupplung geschlossen wird. Diese Information ermöglicht eine vereinfachte Potenzialberechnung (siehe Kapitel 10.2).

5.2 Fahrzeugvermessung

Mittels Rollenprüfstandversuch kann unabhängig von Einzelmodellen und Verlustdaten das Gesamtfahrzeugverhalten unter definierten Randbedingungen ermittelt werden. Voraussetzung ist ein verfügbares Versuchsfahrzeug mit einer Möglichkeit zur Bestimmung von Drehzahl und Drehmoment der Antriebsmaschine. Beim Versuch werden Luft-, Trägheits- und der veränderte Rollwiderstand vom Prüfstandsystem geschwindigkeitsabhängig vorgegeben. Dazu werden wie bei der Längsdynamiksimulation Fahrwiderstandsfaktoren verwendet.

Vorteile bei diesem Verfahren sind der gleichzeitige Erhalt von Referenzdaten für Motorprüfstanduntersuchungen und der Verzicht auf komplexe Detailmodelle.

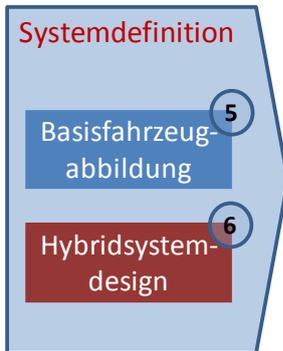
Nachteile sind neben der Notwendigkeit eines Versuchsfahrzeugs die nicht erfüllte Allgemeingültigkeit aufgrund der Beschränkung auf das unmittelbare Messprogramm, der Messaufwand und die eingeschränkte Messbarkeit des Kurbelwellendrehmoments (siehe auch Kapitel 3.2). Außerdem sind zur Simulation des abgeleiteten Hybridfahrzeugs auch auf Basis von Messergebnissen Informationen hinsichtlich der Antriebsstrangverluste erforderlich. Insbesondere die mögliche Rekuperationsleistung kann sonst nicht berechnet werden, weil das Leistungsangebot aus der geglätteten Fahrgeschwindigkeit über die Fahrwiderstandsgleichung und die Verluste im Antriebsstrang ermittelt werden muss.

5.3 Modellabgleich

Unter Modellabgleich ist die Kombination aus Simulation und Rollenprüfstandversuch zu verstehen. Durch Verifikation des Modells in möglichst unterschiedlichen Fahrsituationen erhöht man die Verlässlichkeit der Vorausberechnung.

Im Rahmen der Verifikation kann man unterschiedliche Abweichungen Teilmodellen zuordnen. So wird deutlich, wo primär Verbesserungsbedarf besteht.

6 Hybridsystemdesign



Zuordnung Kapitel 6

In diesem Abschnitt wird die Definition der Komponenten des Hybridsystems beschrieben. In der Vorentwicklung sind dabei Methoden anzuwenden, die einerseits die Übertragbarkeit der Erkenntnisse in spätere Entwicklungsphasen sicherstellen und andererseits die Aussagen nicht im Sinne einer Festlegung auf ein spezifisches System einschränken.

6.1 Hybridsystemdefinition

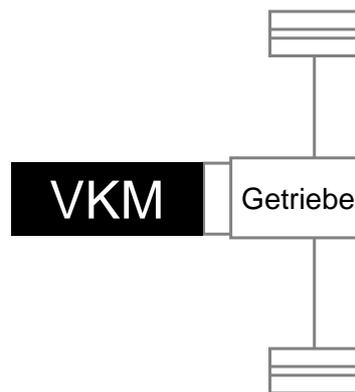


Abbildung 18 – Basiskonfiguration

Um die Konzeptauswahl für die Hybridsystem-Architektur im Vorentwicklungsprozess erst auf Basis der Vorausberechnungsergebnisse treffen zu können, wird ein System definiert, das alle Betriebsarten von PH- und SH-Fahrzeugen (siehe Kapitel 1.4) ermöglicht. Dazu wird der Triebstrang um zwei EM und eine Trennkupplung erweitert (vgl. Abbildung 18 mit Abbildung 19). Die VKM ist somit, wenn nicht anders angegeben, als vom restlichen Antriebsstrang abtrennbar anzusehen.

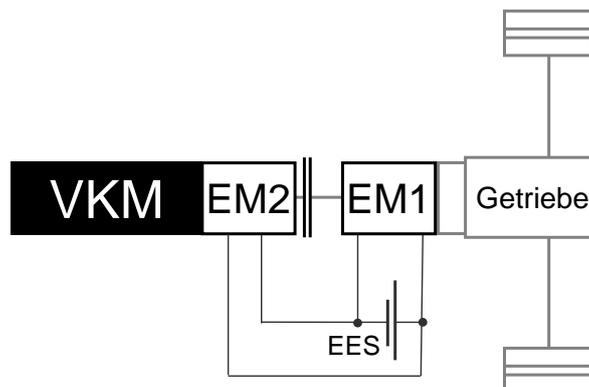


Abbildung 19 – Hybridsystem

Die (optionale) EM2 ist dabei nur für die SH-Funktionalität notwendig. Die Grundidee der Berechnung stellt die Abbildung eines Hybridfahrzeuges dar, bei dem keine externe Ladung des EES vorgesehen ist (kein Plug-In-Hybridfahrzeug). Ohne Änderung im prinzipiellen Berechnungsverfahren kann die Position der EM1 frei gewählt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden grundsätzlich auch für kombinierten und ausschließlich elektrischen Vortrieb Drehzahl und Drehmoment der VKM im Basisfahrzeug als Bedarf angesetzt.⁷⁴ Für Losfahr- bzw. Stoppvorgänge und bei negativer Fahrleistungsanforderung wird davon abgewichen. Die Vorgehensweise ist dabei vom eingesetzten Getriebe abhängig. Nähere Informationen sind in Kapitel 10 bei den jeweiligen Anwendungen enthalten.

Die Auswahl bzw. Auslegung der EM erfolgt im Rahmen des Vorentwicklungsprozesses auf Basis von Variationsrechnungen. Für die Vorausberechnung sind keine Prototypen erforderlich und so kann rasch die sinnvolle Maximalleistung gefunden werden. Dazu vergleicht man die Einsparungspotenziale mit dem Ergebnis ohne EM-Leistungsbeschränkungen. Schon für die Variationsrechnung müssen Verluste für das elektrische System berücksichtigt werden, weil sonst die Einsparungsmöglichkeiten nicht realistisch vorausberechnet werden können (siehe Kapitel 7). Als einfachstes Näherungsmodell kommen konstante Wirkungsgrade zum Einsatz. Die Verluste werden also als proportional zur elektrischen Leistung modelliert.⁷⁵

Tabelle 3 – Wirkungsgrade der elektrischen Komponenten

$\eta_{EM}^{generatorisch}$	$\eta_{EM}^{motorisch}$	η_{EES}^{76}
%	%	%
90	87	96

Wenn nicht anders angegeben, gelten in dieser Arbeit die technologieunabhängigen Standardwirkungsgrade für die Simulation des Hybridsystems für die EM und den EES nach Tabelle 3. Das optimistische Niveau wird für zukünftige Systeme erwartet und entspricht dabei im Wesentlichen veröffentlichten Daten für rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge.⁷⁷ Nicht berücksichtigt wird auch die Abhängigkeit der Speicherwirkungsgrade von der Temperatur.⁷⁸

Das Trägheitsmoment der EM wird generell nicht berücksichtigt, weil es im Vergleich zum Trägheitsmoment der VKM klein und vorerst unbekannt ist. Somit wird auch eine Vorausberechnung ohne Vorauswahl der EM-Technologie ermöglicht.

6.2 Verbrennungskraftmaschine

Die einzusetzende VKM wird durch vorhandene Mess- oder Simulationsergebnisse charakterisiert. Benötigt werden einerseits stationäre Kennfelder derjenigen Ergebnisgrößen, die im Zuge der Hybridisierung berücksichtigt werden sollen. Andererseits notwendig sind die

⁷⁴ Für Wandler-Automatik-Fahrzeuge wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine alternative Berechnung mit geschlossener Wandlerüberbrückung verzichtet. Ebenso wird bei der Anwendung die Gangwahl als gegebene Randbedingung betrachtet und nicht verändert. Andernfalls wäre eine aufwändige Simulation von Ein- und Auskuppelvorgängen notwendig und auch die Gangwechsel wären unbedingt genau abzubilden, weil während eines Getriebeeingriffs der Wandler nicht immer überbrückt werden kann. Die Leistung müsste dann auf Basis der Getriebeverluste berechnet werden.

⁷⁵ Problematisch ist auch bei Verwendung von Wirkungsgradkennfeldern die fehlende Berücksichtigung von Verlusten im lastfreien Zustand. Eine mögliche Verbesserung wäre hier der Übergang auf absolute Verlustleistungskennfelder.

⁷⁶ für Laden und Entladen

⁷⁷ vgl. Helms H. et al.: Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions (in: Symposium Transport and Air Pollution, Dübendorf, 18.-19.5.2010), S. 115

⁷⁸ vgl. Sauer D. U.: Lithium-Ionen Batterien in: Sirch O. und 46 Mitautoren: Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, 2009, S. 5

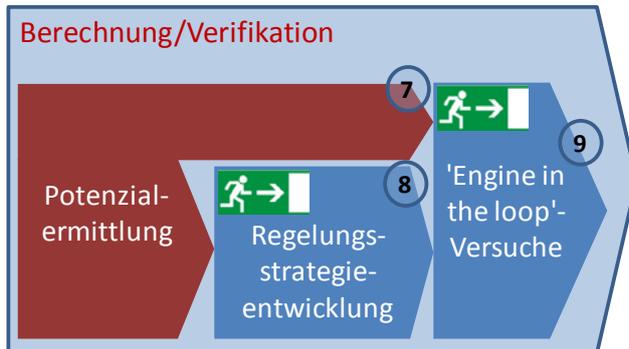
Schleppkurve der VKM im Sinne der Betriebslinie bei Gaspedalstellung 0%. Alle Stellelemente im Luftsystem der VKM arbeiten also entsprechend den Vorgaben der ECU.

Überschreitet die Summe aus der maximalen Leistung der EM und der Fahrleistung beim Basisfahrzeug in einem untersuchten Fahrprofil die Volllast der eingesetzten VKM, muss diese durch die entsprechende Volllastkurve gegeben sein.

Vorteilhaft bei der Beurteilung des Potenzials von Start-Stopp-Maßnahmen ist die Integration des erwarteten Betriebspunktes der VKM bei Fahrzeugstillstand⁷⁹ in die Kennfeldermittlung. Dieser Betriebspunkt der VKM tritt beim konventionellen Fahrzeug häufig, bei allen Hybridfahrzeugen mit Start-Stopp-System hingegen nicht auf. Für den Relativvergleich muss das Verhalten hier also mit möglichst hoher Genauigkeit bekannt sein.

⁷⁹ Üblicherweise ist das der Betrieb im Leerlauf. Bei Fahrzeugen mit Drehmomentwandler kann ein nicht vernachlässigbares Drehmoment auftreten.

7 Potenzialermittlung⁸⁰



Zuordnung Kapitel 7

Um das Verhalten des hybridisierten Fahrzeugs zu simulieren, werden die Hybridkomponenten nicht direkt in die Fahrzeugabbildung integriert. Auf Basis des Ergebnisses für ein konventionelles Fahrzeug werden deren Einsatzmöglichkeiten und die resultierenden Auswirkungen auf bestehende Fahrzeugkomponenten mittels Post-Processing ermittelt. Mit der Methode bestimmt man nicht direkt, welches Hybridsystem optimal ist, sondern ermittelt für jede vorgegebene Konfiguration das Potenzial.

Alle Berechnungen werden quasistationär durchgeführt. Mögliche Einschränkungen durch dynamische Vorgänge werden bei der Ermittlung des Grenzpotenzials nicht berücksichtigt. Die Zeitschrittintervalle werden grundsätzlich vom Ergebnis der Basisfahrzeugabbildung übernommen.⁸¹

Die Umsetzung des Post-Processing erfolgt im Programmpaket Matlab. Hinweise dazu enthält ANHANG D (Information zum Programmcode).

Alternativ dazu ist auch eine integrierte oder gekoppelte Simulation möglich. Wie dabei vorzugehen ist, ergibt sich aus Kapitel 12.3.

In diesem Kapitel verwendete Beispieldaten sind die Ergebnisse der Anwendung entsprechend den in Kapitel 10.3 definierten Vorgaben. Sie dienen hier nur als Beispiel, weshalb eine genaue Beschreibung an dieser Stelle entfallen kann.

7.1 Kennfeldmodelle

Im Rahmen der Potenzialermittlung werden für alle relevanten Einzelkomponenten Kennfeldmodelle definiert, die das Verhalten im stationären Betrieb repräsentieren. Die Stützstellen der Kennfelder werden so festgelegt, dass ein Raster entsteht, das den gesamten Betriebsbereich so diskretisiert, dass bei der Berechnung der Betriebsabläufe nicht mehr interpoliert werden muss. Stattdessen wird näherungsweise der Wert des nächstliegenden Rasterpunktes verwendet. Das gilt sowohl für Standard-, als auch für Hybridbetrieb. Die definierten Rasterpunkte bilden die Gesamtheit der Betriebsmodi. Bei der Erstellung des Rasters sind Interpolations- bzw. Berechnungsverfahren zu wählen, die relevante Ergebniswertänderungen wiedergeben und den Einfluss von Messfehlern möglichst minimieren. Praktisch erreicht werden kann das bspw. über ein zweidimensionales Fitting, das jedoch nur bei geringen Abweichungen von einem bilinearen Interpolationsergebnis zum Einsatz kommt.

⁸⁰ Teilweise ist der Inhalt dieses Kapitels unverändert oder inhaltlich übernommen aus der folgenden Veröffentlichung, die bereits vor Abschluss der Dissertation erfolgt ist: Klima B. et al.: Durchgängige Methodik für Simulation und Messung des Diesel-Hybrid-Potenzials (in: ATZ, 11/2010), S. 848ff

⁸¹ Eine Vergrößerung ist möglich, wenn die Rechenzeit reduziert werden soll. Das ist dann in Kapitel 10 angeführt.

Dynamische Effekte wie bspw. der Ladedruckaufbau einer VKM werden bei der quasi-stationären Berechnung vernachlässigt. Alle Systeme sind fiktiv in der Lage ohne Verzögerung die gewünschten Zustände einzunehmen. Das ermöglicht einerseits den Verzicht auf gekoppelte Simulationsmodelle und andererseits eine einfache Zeitdiskretisierung.

Die Definition der Kennfelder kann wahlweise durch stationäre Messungen, Ergebnisse separater Simulationsprogramme, durch Vorabschätzungsprogramme⁸², oder durch einfache Annahmen erfolgen. Die einfachste Möglichkeit bildet bspw. für Wirkungsgradkennfelder ein konstantes Verhalten.

Somit kann der Detaillierungsgrad an den Entwicklungsschritt angepasst werden. Während am Beginn Abschätzungen ausreichen, können nach der konkreten Komponentenauswahl detailliertere Modell eingesetzt werden. Der Vorteil liegt im reduzierten Bedarf an Modellen mit hohem Detaillierungsgrad. Bspw. kann zur Festlegung der EM-Leistung mit konstanten Wirkungsgraden eine Vorauswahl getroffen werden.

Im Fall von kombinierten Zielgrößen der VKM, die gleichzeitig minimiert oder begrenzt werden sollen, kann eine Linearkombination normierter Kennfelder verwendet werden. Je nach Wahl der Multiplikatoren ψ_i in Formel 21 verschiebt sich das Optimierungsziel. Durch Berechnung mit verschiedenen Kombinationen erhält man so einen Überblick über die Möglichkeiten, die Zielgrößen durch Hybridisierung zu beeinflussen. Zur Ermittlung optimaler Multiplikatoren bei mehrdimensionalen Problemstellungen eignet sich dann die statistische Versuchsplanung.

$$z(n, md)^{Eingabe} = \sum_i z_i^{norm}(n, md) \times \psi_i \text{ mit } \sum_i \psi_i = 1 \text{ und } z_i^{norm}(n, md) = \frac{z_i(n, md)}{\max(|z_i|)}$$

Formel 21 – Kombination mehrerer Zielgrößen⁸³

7.2 Ideale Betriebsstrategie

Je nach Zielsetzung der Elektrifizierung müssen eine oder mehrere Zielgrößen minimiert werden. In diesem Kapitel wird die Ermittlung der idealisierten Betriebsstrategie am Beispiel der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs für eine PH-Konfiguration erklärt. Der Kraftstoffverbrauch kann ohne Änderung durch jede andere Zielgröße ersetzt werden. Die Erweiterung auf SH-Funktionalität wird im Anschluss behandelt (Kapitel 7.2.4).

Welche Vorteile das hier vorgestellte Verfahren im Gegensatz zu anderen, die nur auf zum aktuellen Zeitschritt optimalen Betrieb der VKM abzielen, bietet und warum diese anderen Verfahren insgesamt zu höherem Verbrauch führen, wird abschließend noch in Kapitel 7.4 erläutert.

Grundsätzlich gibt es für jede Hardwarekombination bei vorgegebenen Fahrzyklen eine verbrauchsoptimale Betriebsführung entsprechend dem physikalisch minimal möglichen Verbrauch. Auch wenn dieses Potential nicht erreicht wird, ist seine Ermittlung wichtig, weil sich ausgehend davon einzelne Betriebsstrategien besser bewerten lassen.

Hybridfahrzeuge zeichnen sich durch mindestens zwei Antriebsaggregate aus. Deshalb ist der momentane Kraftstoffverbrauch im Gegensatz zu konventionellen Antrieben von der aktuellen Vortriebsanforderung entkoppelt.

Elektrische Energie kann durch Rekuperation oder Erhöhen der Leistung der VKM gespeichert und für elektrischen Vortrieb oder Absenken der VKM-Leistung eingesetzt werden.

⁸² siehe bspw. Habersbrunner G. et al.: Methodische Vorgehensweise zur Erstellung von Dieselmotor-Kennfeldern zur Gesamtfahrzeugsimulation (in: 1. ATK, München, 16.-17.4.2009)

⁸³ Negiert man alle Werte von $z_i(n, md)$, sind auch Maximierungsaufgaben möglich.

Für Fahrzeuge ohne externe elektrische Energieversorgung muss die im EES gespeicherte Energie im zeitlichen Mittel konstant bleiben. Als Ziel für die Betriebsstrategie folgt somit VKM und EM so zu betreiben, dass bei minimalem Gesamtkraftstoffverbrauch der Energieinhalt im EES ausgeglichen bleibt. Hierfür wird für die komplexen Zusammenhänge ein Berechnungs-Kriterium entwickelt, anhand dessen für jede Vortriebsanforderung die zur Erfüllung des Ziels optimale Betriebsweise ermittelt werden kann. Der Einfachheit halber wird vorerst die Anwendung auf vorgegebene Fahrprofile angestrebt. Dadurch ist definiert, über welchen Zeitraum der Energieinhalt ausgeglichen bilanzieren soll.

7.2.1 Trennung von Bewertung und Auswahl

Während des Fahrbetriebs kommt es zu verschiedensten Vortriebsanforderungen. Für jede Anforderung gibt es verschiedene Betriebsmodi, die sich durch momentanen Kraftstoffverbrauch und momentane Leistung am EES (beim Laden als positiv festgelegt) auszeichnen.⁸⁴ Über das Fahrprofil muss das Integral dieser Leistung 0 ergeben. Für alle Zeitpunkte müssen alle Modi mit einem objektiven Kriterium bewertet werden. Hier wendet man eine diskrete Zeitschrittweite an. Anschließend erfolgt die Auswahl.

7.2.2 Bewertung der Betriebsmodi am Beispiel der Anforderung: Drehzahl: 1250/min, Drehmoment: 65 Nm

Die Beurteilung der Modi erfolgt anhand des Zusammenhangs zwischen Leistung am EES und Verbrauch der VKM. Das auf alle Zeitschritte anzuwendende Verfahren zur Festlegung des Kriteriums wird anhand einer typischen Anforderung für einen konkreten Zeitschritt erläutert. Die Methode ist nicht auf bestimmte Fahrprofile beschränkt und kann allgemein angewandt werden.

Zuerst ermittelt man für alle auf Basis der aktuellen Vortriebsanforderung möglichen Betriebsmodi Kraftstoffverbrauch und Leistung am EES. Vernachlässigt man elektrische Verluste, so basiert dieser Zusammenhang für Modi mit aktiver VKM auf dem Drehzahlschnitt des Verbrauchskennfelds, der auch als Willans-Linie bekannt ist.⁸⁵

Für die folgenden Diagramme wird eine typische Vortriebsanforderung ausgewählt. Diese Anforderung (Drehzahl: 1250/min, Drehmoment: 65 Nm (als Summe der Drehmomente von VKM und EM)) wird im Weiteren als Referenzanforderung bezeichnet. An diesem Beispiel werden alle Einflüsse detailliert aufgezeigt und das Kriterium erklärt. Die mechanische Leistung der EM ist dabei mit 20 kW limitiert.

⁸⁴ Möglich sind prinzipiell alle Modi, die sich durch die einstellbaren Übersetzungen und die möglichen Leistungen der Komponenten (VKM, EM und EES) ergeben. Die Einschränkung der unendlichen Anzahl an möglichen Leistungswerten erfolgt auf Basis des definierten diskreten Berechnungsrasters (siehe Kapitel 7.1).

⁸⁵ Pischinger R. et al.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage 2009, S. 360

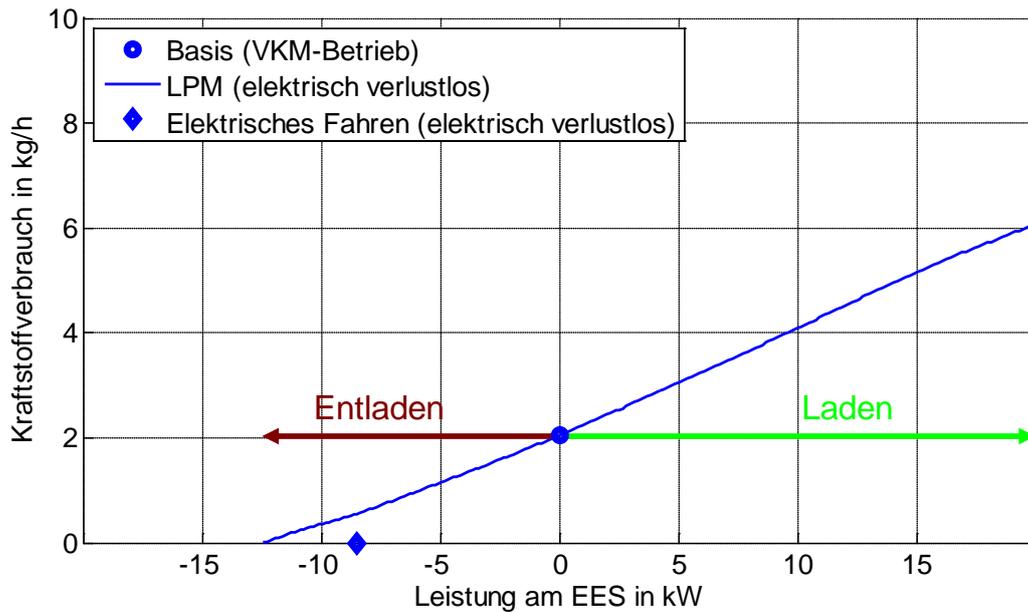


Abbildung 20 – Referenzanforderung ($n = 1250/\text{min}$, $\Sigma m d = 65 \text{ Nm}$) – mögliche Modi unter Vernachlässigung elektrischer Verluste

In Abbildung 20 ist unter Vernachlässigung der elektrischen Verluste dargestellt, wie sich eine Drehmomentvariation (Lastpunktabsenkung bei negativer bzw. Lastpunktanhebung bei positiver Leistung am EES) auswirkt. Der Zusammenhang ('LPM') entspricht der erwähnten Willans-Linie, deren Abszissennullpunkt allerdings in den VKM-Betriebspunkt ohne elektrischen Leistungsfluss⁸⁶ verschoben ist. Die Beziehung zwischen Leistung am EES und Kraftstoffverbrauch ist dabei näherungsweise linear. Die Begrenzungen entsprechen dem Betrieb auf der Schlepplinie bzw. der Leistungsgrenze. Im Beispiel ist die generatorische Vollast der EM die begrenzende Größe.

Wird die VKM vollständig deaktiviert und abgekuppelt ('Elektrisches Fahren' in Abbildung 20) ergibt sich wie bei einer Lastabsenkung auf Schleppbetrieb⁸⁷ kein Kraftstoffverbrauch, jedoch gegenüber dem Schleppbetrieb ein verringerter elektrischer Leistungsbedarf. Diese Leistungsdifferenz zum ebenfalls verbrauchsreichen Betrieb mit geschleppter VKM ergibt sich aus der Schleppleistung.

Die Einführung elektrischer Verluste (motorischer, generatorischer Verluste und Verluste für Ein- bzw. Ausspeicherung) bewirkt ein Abknicken der Charakteristik im als 'Basis' bezeichneten Modus (Abbildung 21). Dieser Betrieb entspricht dem VKM-Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs und ist der einzig mögliche ohne elektrischen Leistungsfluss. Sowohl beim Laden, als auch beim Entladen des EES erhöhen Verluste den Kraftstoffverbrauch. Im Beispiel sind die Verluste im elektrischen System entsprechend Kapitel 6.1 näherungsweise als proportional zur Leistung modelliert. Bei Berücksichtigung anderer Modelle ergibt sich auch im 'Basismodus' möglicherweise ein höherer Verbrauch als beim nicht hybridisierten konventionellen Fahrzeug. Das qualitative Verhalten ändert sich allerdings nicht, solange die elektrischen Verluste auch einen leistungsabhängigen Anteil aufweisen.

⁸⁶ Dieser Modus wird im Folgenden als 'Basismodus' bezeichnet. Er entspricht dem VKM-Betriebspunkt eines konventionellen Fahrzeugs. Er bildet aber generell nicht die Berechnungsbasis.

⁸⁷ Das VKM-Drehmoment entspricht dem der aktuellen Drehzahl entsprechenden stationären Schleppmoment.

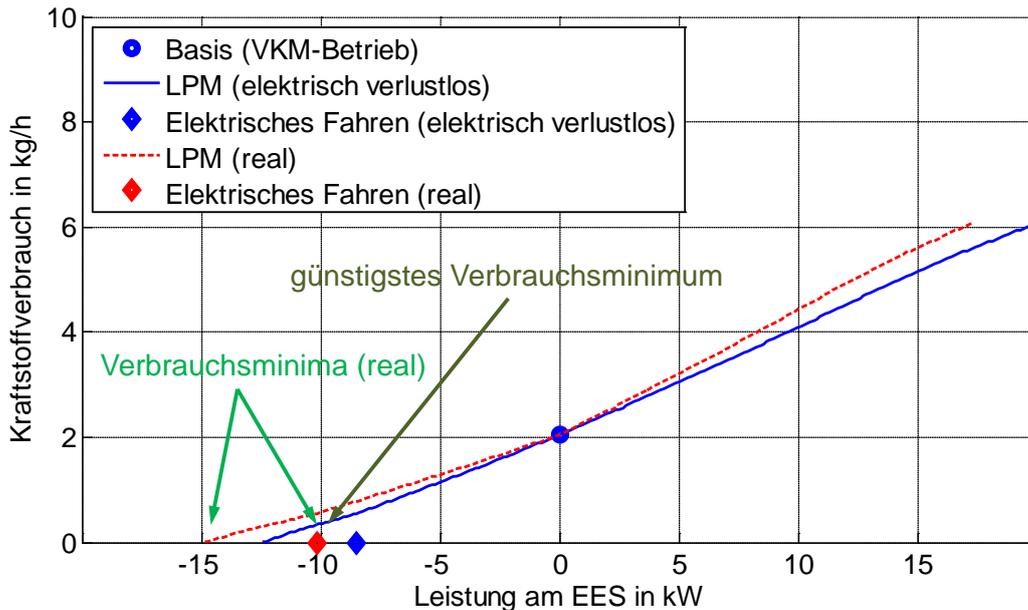


Abbildung 21 – Referenzanforderung ($n = 1250/min, \Sigma md = 65Nm$) – Modi und Verbrauchsminima

Für die realen Betriebsmodi⁸⁸ erhält man unterschiedliche Minima für den Verbrauch. Im Beispiel sind es zwei Minima. Kann der Gang frei gewählt werden oder ist SH-Betrieb möglich, ergeben sich eventuell entsprechend mehr. Das günstigste Verbrauchsminimum ist das mit der höchsten Leistung am EES.⁸⁹ Höchste Leistung ist vorzeichenbehaftet im Sinn von möglichst positiv gemeint. Wie im Beispiel ist das typischerweise 'elektrisches Fahren', außer diese Betriebsart ist nicht möglich. Das kann bspw. aufgrund zu geringer elektrischer Systemleistung der Fall sein.

7.2.2.1 Weiteres Vorgehen – Entwicklung des Kriteriums

Es wird nun ein Kriterium gebildet, das für alle zum aktuellen Zeitschritt realisierbaren Modi einem Verhältnis zwischen spezifischem Aufwand und Nutzen entspricht. Dabei gelten folgende Überlegungen:

- Aufwand ist nur der Kraftstoff. Nur über diesen wird Energie ins System eingebracht.
- Nutzen ist jede Veränderung der Leistung am EES, die den Ladezustand positiv beeinflusst.⁹⁰ Die Änderung des Ladezustands des EES ist proportional zu dieser Leistung.
- Dem EES entnommene elektrische Energie ist kein Aufwand, weil sie nur zwischengespeichert ist.⁹¹ Das gilt auch für die Nutzung durch Rekuperation gespeicherter Energie. Diese wird aus der kinetischen Energie umgewandelt und entspricht somit auch transformierter Kraftstoffenergie.
- Vortriebsleistung ist kein Nutzen, weil sie nicht spezifisch für die unterschiedlichen Modi ist.⁹²

⁸⁸ Unter realen Betriebsmodi werden die Betriebsmodi unter Berücksichtigung der elektrischen Verluste verstanden.

⁸⁹ Im Vergleich zu allen anderen Minima ergibt die Auswahl dieses günstigsten Verbrauchsminimums nach dem Zeitschritt die höchste Ladung im EES.

⁹⁰ Ausgehend vom günstigsten Verbrauchsminimum (bei üblichen Anforderungen meistens 'elektrisches Fahren', siehe bspw. Abbildung 21), das meistens ein Entladen des EES bedeutet, ist damit eine Verringerung der Entladeleistung als Nutzen zu bewerten. Wird der EES hingegen geladen, ist jede Vergrößerung der Ladeleistung ein Nutzen.

⁹¹ Die dafür eingesetzte Kraftstoffenergie ist schon zum Zeitpunkt der Einspeicherung bewertet worden.

⁹² Die Vortriebsleistung kann über die Wahl des Betriebsmodus nicht beeinflusst werden. Sie bildet somit für die Auswahl keine geeignete Bezugsgröße.

Die Bewertung erfolgt durch schrittweise Bildung eines Kriteriums im Sinne eines spezifischen Mehrverbrauchs. Die mathematische Umsetzung der iterativen Ermittlung ist anhand des Flussdiagramms in Abbildung 22 ersichtlich. Die Größen ohne Index repräsentieren dabei Leistung am EES und Kraftstoffmassenstrom aller Betriebsmodi, der Index i bezeichnet den im Iterationsschritt gesuchten Betriebspunkt, $i-1$ den im vorherigen gefundenen.

Die einzelnen Schritte des Ablaufschemas in Abbildung 22 werden in diesem Abschnitt einzeln erläutert. Zum leichteren Verständnis werden dazu Teilprogrammabschnitte an den Stellen wiederholt dargestellt, wo sie textlich erläutert sind.

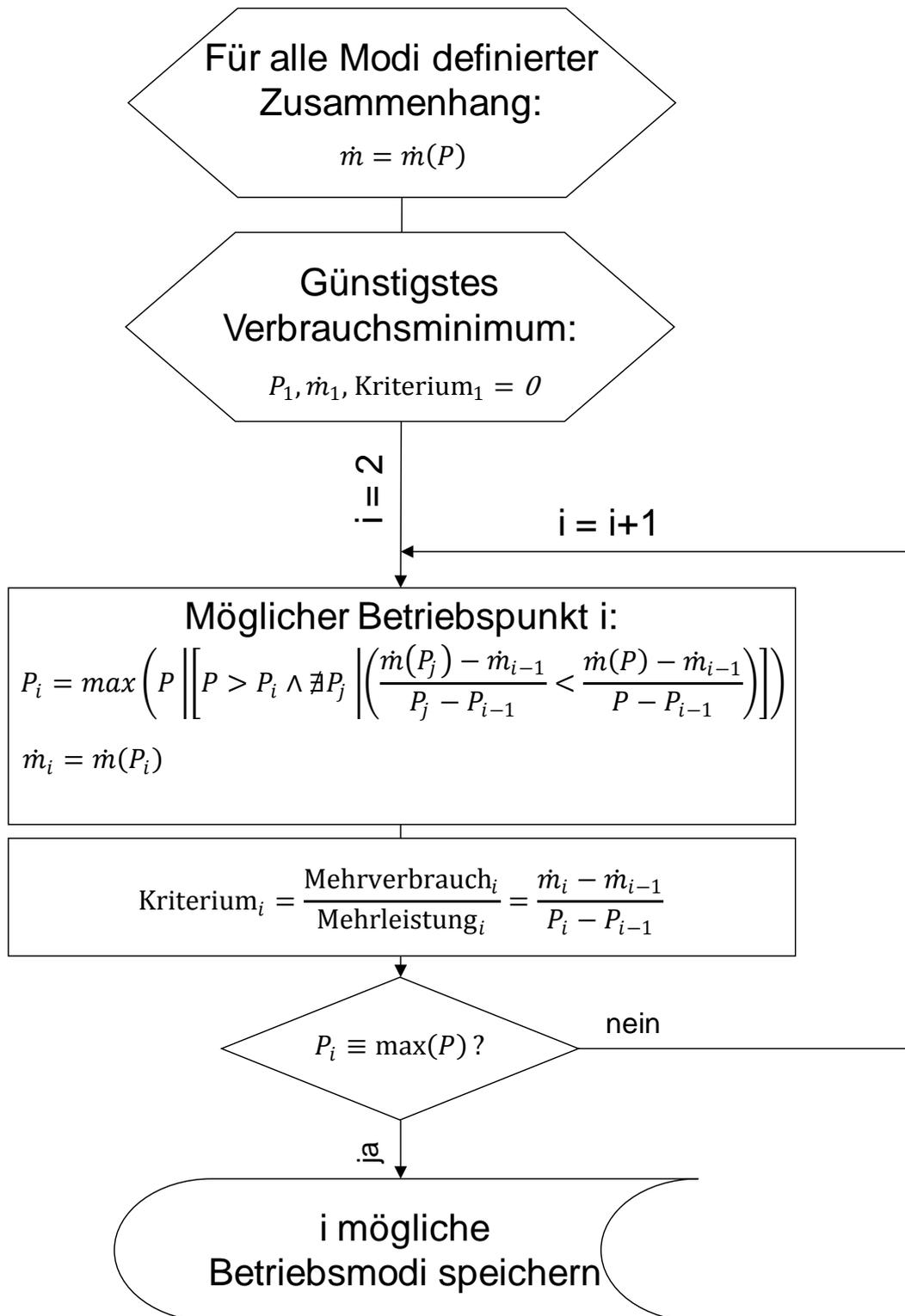


Abbildung 22 – Gesamtablaufschema der iterativen Betriebspunktbewertung (zusammengesetzt aus in diesem Kapitel einzeln erklärten Teilprogrammabschnitten)⁹³

⁹³ Wegen der besseren Übersichtlichkeit sind bei dieser Prozessdarstellung (und den folgenden Teilprogrammabschnitten) die Indizes Kr (für den Kraftstoffmassenstrom \dot{m}) bzw. EES (für die Leistung am EES P) weggelassen. Das günstigste Verbrauchsminimum ist das mit der höchsten Leistung am EES (vorzeichenbehaftet, vgl. dazu Abbildung 21).

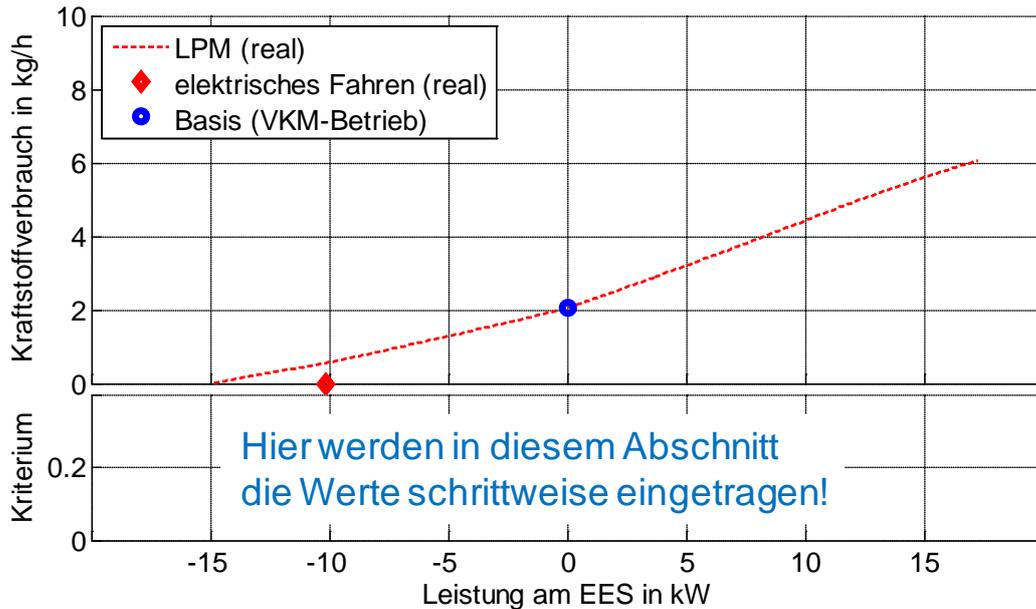


Abbildung 23 – Referenzanforderung ($n = 1250/min, \Sigma md = 65Nm$) – Einführung der Achse für das Kriterium, in die die Werte in diesem Abschnitt schrittweise eingetragen werden

Zur Einzeichnung der Werte für das hier definierte Kriterium wird das Diagramm aus Abbildung 21 um eine Achse zum Eintragen erweitert (Abbildung 23). Es werden ab hier nur mehr die verlustbehafteten 'realen' Zusammenhänge betrachtet.

Damit ist für alle Modi der Zusammenhang zwischen Leistung am EES und Kraftstoffmassenstrom definiert (Abbildung 24).

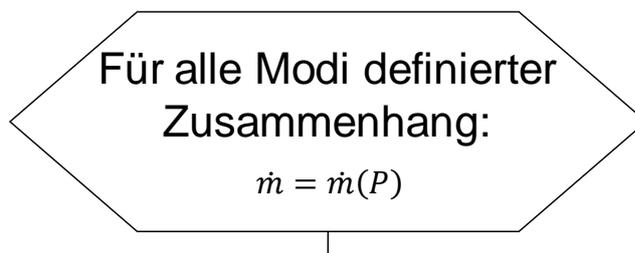


Abbildung 24 – Teilprogrammabschnitt 1 (Voraussetzung zur Bewertung) aus Abbildung 22

Das günstigste Verbrauchsminimum ist der erste mögliche Betriebsmodus (Index 1). Für diesen wird das Kriterium mit Null definiert (Abbildung 25): in Abbildung 26 im unteren Diagramm eingezeichnet als grünes Quadrat bei ca. -10 kW am EES für 'elektrisches Fahren'. Zusätzlich wird auch der Betriebspunkt im oberen Diagramm durch ein grünes Quadrat markiert.

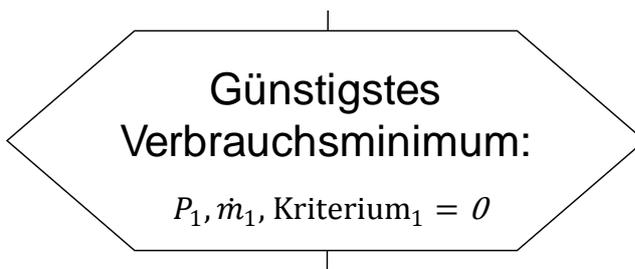


Abbildung 25 – Teilprogrammabschnitt 2 (Beginn der Bewertung) aus Abbildung 22

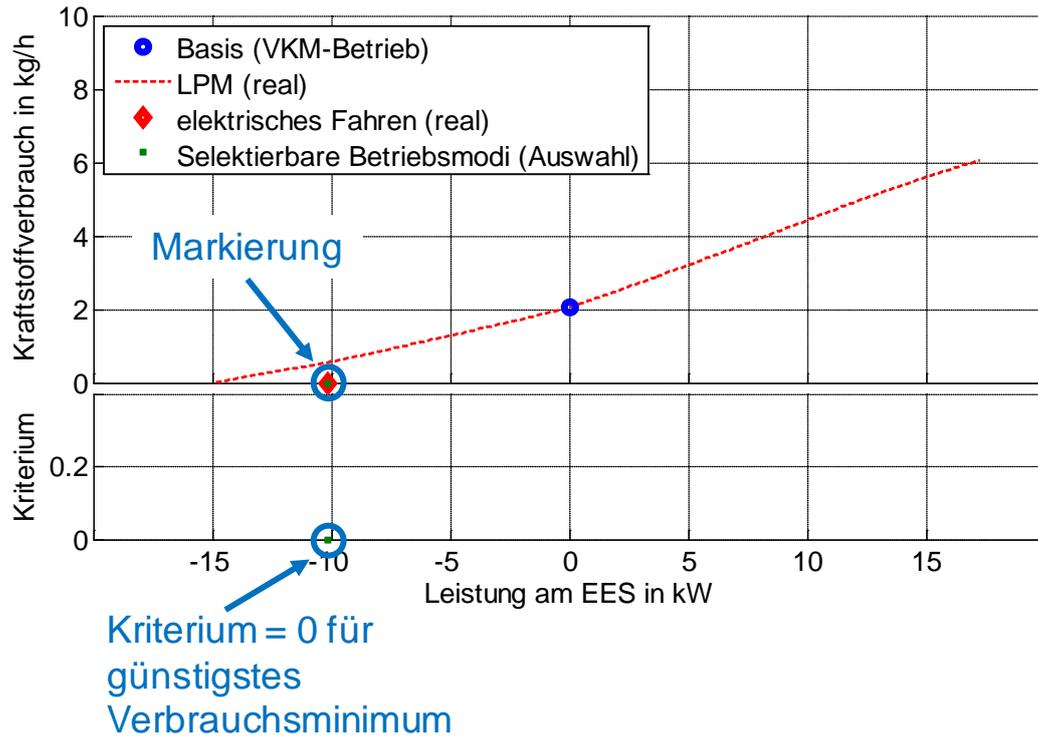


Abbildung 26 – Referenzanforderung ($n = 1250/min, \Sigma md = 65Nm$) – Festlegung des Kriteriums für das günstigste Verbrauchsminimum

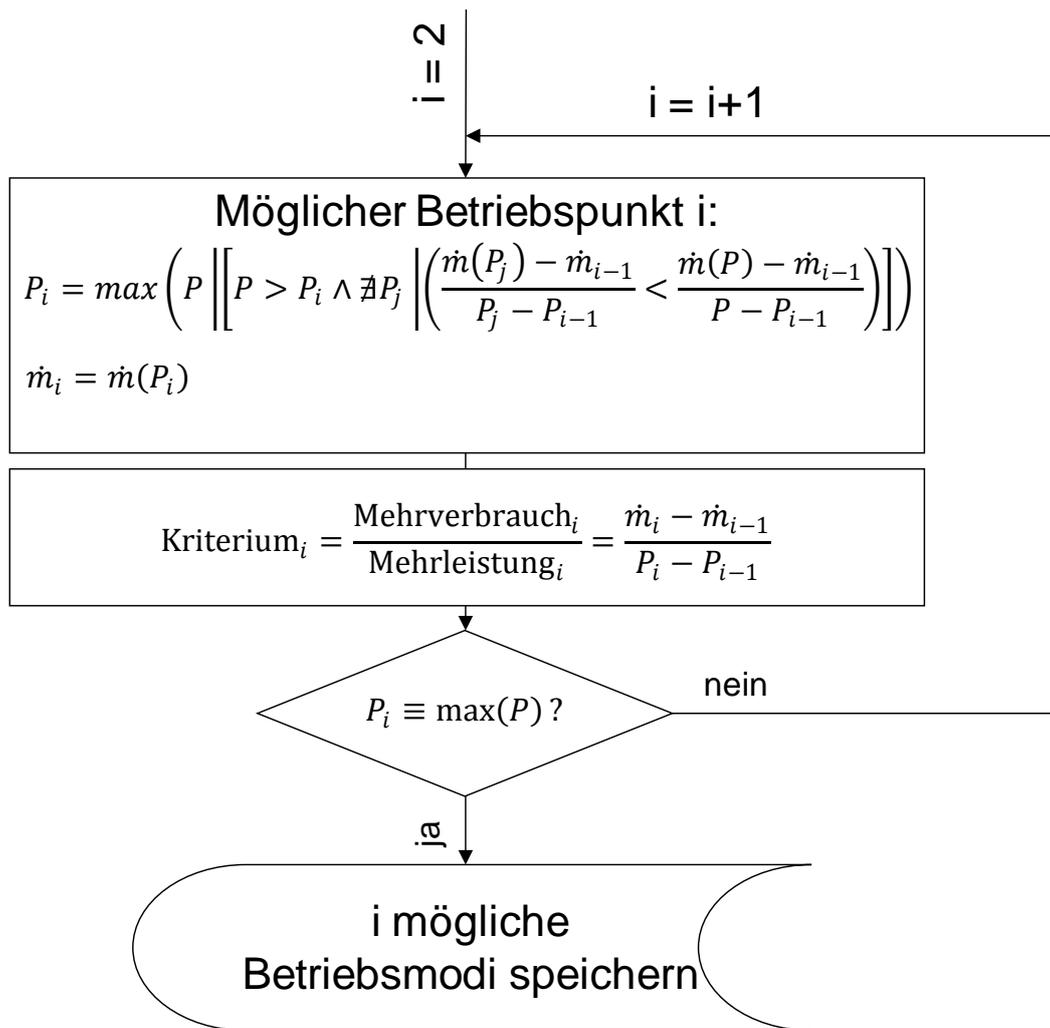


Abbildung 27 – Übersicht: Teilprogrammabschnitt 3 (Bewertungsschleife) aus Abbildung 22

Anschließend wird der Modus aus der Menge der zum aktuellen Zeitschritt möglichen Modi⁹⁴ gesucht, für den der Quotient aus Mehrverbrauch und Mehrleistung minimal ist. Die in Abbildung 27 dargestellte gesamte Bewertungsschleife wird wiederholt durchlaufen, bis die Leistungsgrenze von EM oder VKM erreicht wird (Abbildung 28). Die einzelnen Elemente der Schleife werden im folgenden Abschnitt noch detailliert erläutert.

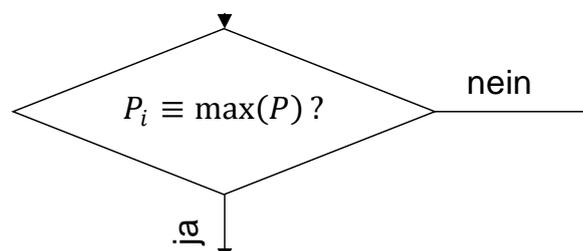


Abbildung 28 – Teilprogrammabschnitt 3c (Abbruchbedingung für Bewertungsschleife) aus Abbildung 22

Hierzu bildet man das Verhältnis aus Mehrverbrauch und Mehrleistung jeweils gegenüber dem letzten durch die Bewertung als selektierbar definierten Modus (Index i-1). So kann eine Verschlechterung objektiv dem verursachenden Modus (Index i) zugeordnet werden. Sind mehrere Modi mit gleich großem Quotienten verfügbar, wird der Modus mit der höchsten Leistung gewählt. Diese Auswahl des Modus mit der höchsten Leistung beschreibt

⁹⁴ Bei PH-Hybriden bildet ein entsprechend dem Berechnungsraster diskretisierter (eventuell durch die EM-Leistung begrenzter) Drehzahlschnitt der VKM die Menge der möglichen Modi.

mathematisch die erste Formelzeile zur Bestimmung des möglichen Betriebspunkt i in Abbildung 29. Die Bedingung, dass der Quotient aus Mehrverbrauch und Mehrleistung minimal ist, wird hier umgesetzt, indem gefordert wird, dass kein anderer Modus (mit Index j) existiert, für den das Verhältnis kleiner ist. Die Verwendung der Minimumfunktion ist nicht möglich, weil sie kein eindeutiges Ergebnis liefert. Der Kraftstoffmassenstrom wird entsprechend dem für alle Modi definierten Zusammenhang zugeordnet.

$$P_i = \max \left(P \left[\left[P > P_i \wedge \nexists P_j \left(\frac{\dot{m}(P_j) - \dot{m}_{i-1}}{P_j - P_{i-1}} < \frac{\dot{m}(P) - \dot{m}_{i-1}}{P - P_{i-1}} \right) \right] \right] \right)$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}(P_i)$$

Abbildung 29 – Teilprogrammabschnitt 3a (Suchen des nächsten Modus) aus Abbildung 22

Das Vorgehen entspricht der schrittweisen Bestimmung der jeweiligen Möglichkeiten zur weiteren Leistungssteigerung mit den spezifisch geringsten Aufwänden. Der Wert des Kriteriums entspricht dem Quotienten aus Abbildung 30 und kann als spezifischer Mehrverbrauch interpretiert werden.

$$\text{Kriterium}_i = \frac{\text{Mehrverbrauch}_i}{\text{Mehrleistung}_i} = \frac{\dot{m}_i - \dot{m}_{i-1}}{P_i - P_{i-1}}$$

Abbildung 30 – Teilprogrammabschnitt 3b (Kriteriumsrechnung) aus Abbildung 22

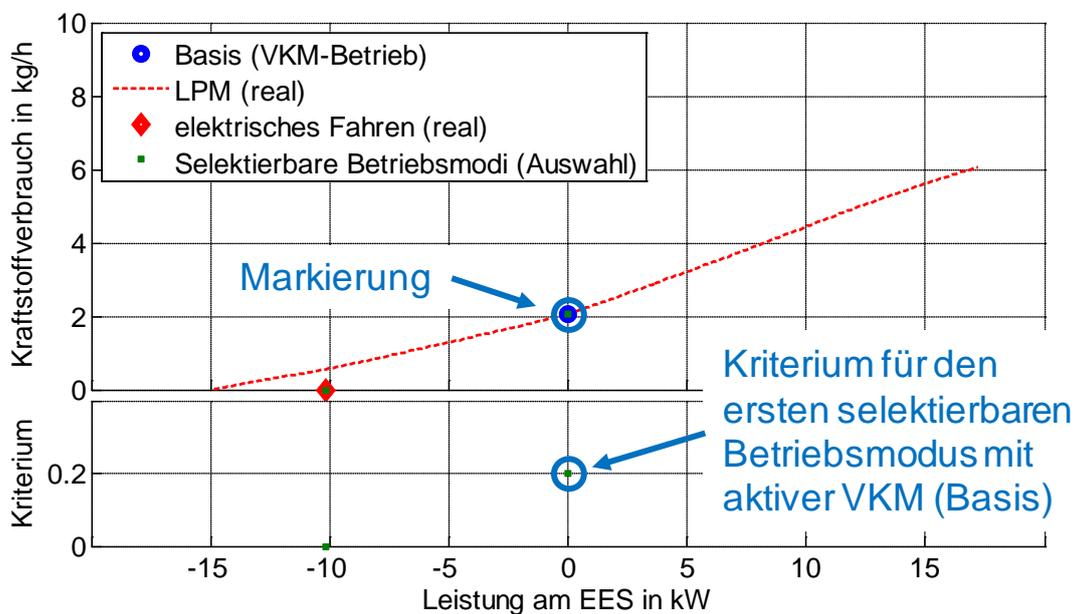


Abbildung 31 – Referenzanforderung ($n = 1250/\text{min}$, $\Sigma m_d = 65\text{Nm}$) – Festlegung des Kriteriums für den ersten selektierbaren Betriebsmodus mit aktiver VKM

Für die Referenzanforderung ist der 'Basismodus' der zweite zum aktuellen Zeitschritt selektierbare mögliche Betriebsmodus und zugleich der erste selektierbare Betriebsmodus mit aktiver VKM. Diesem Modus ohne Leistungsfluss am EES wird der Wert des Kriteriums zugewiesen, der in Abbildung 31 dem grünen Quadrat im unteren Diagramm bei 0 kW entspricht. Auch im oberen Diagramm wird wieder der Betriebsmodus markiert.

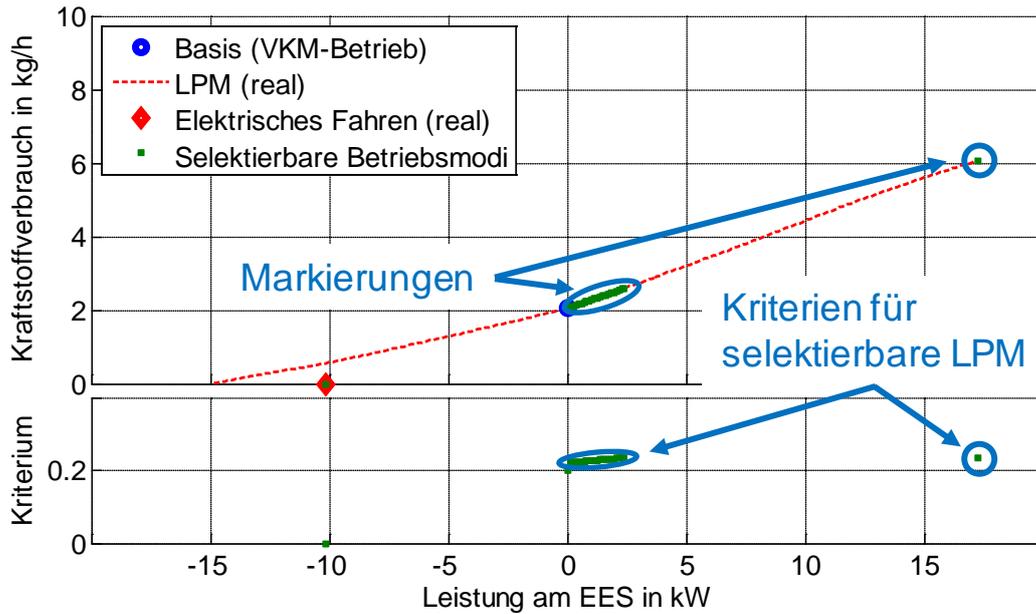


Abbildung 32 – Referenzanforderung ($n = 1250/min, \Sigma md = 65Nm$) – Festlegung des Kriteriums für selektierbare LPM

Der letzte bewertete Modus in Abbildung 32 entspricht schließlich der generatorischen Volllast der EM und ist mit dem Kriteriumswert entsprechen dem grünen Quadrat im unteren Diagramm bei ca. 17 kW bewertet. Im Bereich zwischen 0 und 2.5 kW sind die Leistungsunterschiede zwischen den 21 bewerteten Betriebspunkten und den damit selektierbaren 'LPM' sehr gering, sodass diese hier fast wie eine kontinuierliche Linie erscheinen.

Modi zwischen den durch die Indizes i und $i-1$ definierten⁹⁵ wird kein Kriterium zugeordnet, weil sie ungünstigere Varianten der Leistungssteigerung sind.⁹⁶ In Abbildung 32 gilt das für die Leistungsbereiche von ca. -10 bis 0 kW und ca. 2.5 bis 17 kW.

Nach Abbruch der Bewertungsschleife ist der Zusammenhang zwischen Kriterium, Leistung am EES und Kraftstoffmassenstrom für alle selektierbaren Modi definiert und kann gespeichert werden (Abbildung 33). Er dient dann zur Auswahl der endgültigen Betriebsmodi bei dieser Anforderung (siehe Kapitel 7.2.3). Die Modi ohne zugeordnetes Kriterium sind im Rahmen der Auswahl nicht selektierbar.

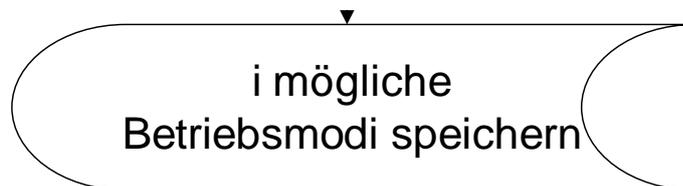


Abbildung 33 – Teilprogrammabschnitt 3d (Abschluss der Bewertung) aus Abbildung 22

⁹⁵ Der Index i durchläuft nur alle bewerteten Modi. Dazwischen kann es also auch andere geben.

⁹⁶ Eine Verschlechterung dieses Verhältnisses kann nur sinnvoll sein, wenn dadurch mehr Leistung erzielt wird. Warum das so ist und wie bei der Auswahl im zeitlichen Mittel auch Leistungen entsprechend der hier nicht bewerteten Bereiche erreicht werden können, wird in Kapitel 7.2.3 beschrieben.

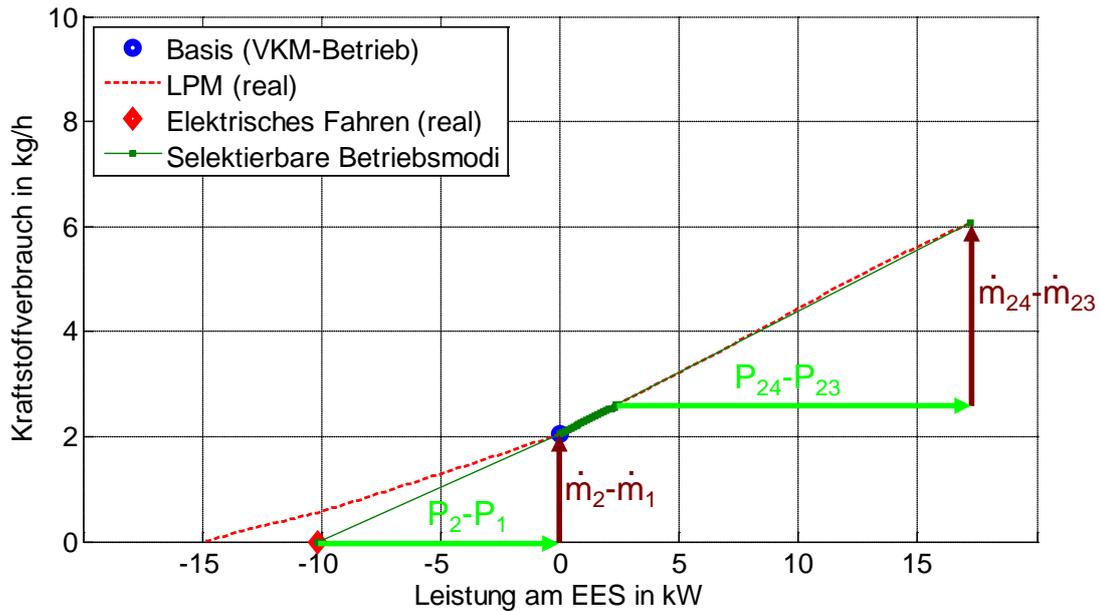


Abbildung 34 – Referenzanforderung ($n = 1250/min, \Sigma md = 65Nm$) – Grafische Betriebspunktermittlung

In Abbildung 34 ist demonstriert, dass das Vorgehen grafisch dem Suchen nach den Eckpunkten einer unteren einhüllenden Geradenkette entspricht. Es ergibt sich ein Linienzug (grün dünn eingezeichnet) mit monoton zunehmender Steigung.⁹⁷ Die Steigungen der vorausgehenden Abschnitte selbst entsprechen den Kriterien der Eckpunkte. Es darf jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass für Betriebspunkte zwischen den selektierbaren, die die relativen Optima darstellen, ein Kraftstoffverbrauch entsprechend dem grünen Linienzug ermittelt werden kann. Dort gilt immer noch der reale, rot dargestellte Zusammenhang, der gegenüber den auswählbaren Betriebspunkten ungünstig ist. Exemplarisch markiert sind für Ermittlungen des zweiten und letzten möglichen Modus die Zähler (in dunkelrot) und Nenner (in hellgrün) der die Kriterien bildenden Achsabschnitte.

Das Problem der Betriebspunktbewertung entartet für konstante elektrische Wirkungsgrade, wenn man die Willans-Linie linearisiert. Dann besteht der Zusammenhang aus Kraftstoffverbrauch und Leistung am EES aus zwei linearen Teilfunktionen, die bis zum bzw. ab dem Basisbetriebspunkt gelten. Als Folge daraus sind nur noch maximal drei mögliche Betriebsmodi vorhanden. 'Elektrisches Fahren' bzw. bei Leistungsbegrenzung die maximale Lastpunktabsenkung, Betrieb an der Volllast (von EM oder VKM) und eventuell 'Basisbetrieb', falls dieser günstiger als der Betrieb an der Volllast ist.

7.2.2.2 Besonderheit

Ein besonderes Phänomen ist der gezeigte Knick im 'Basismodus'. Diesem wird bei qualitätsgeregelten VKM für viele Vortriebsanforderungen ein Kriteriumswert zugewiesen. Er ist somit im Rahmen der Auswahl der Betriebspunkte selektierbar (siehe Kapitel 7.2.3). Im zyklusrelevanten Anforderungsbereich ist er außerdem häufig der leistungsschwächste selektierbare VKM-Betriebspunkt. Das gilt auch für den gewählten Referenzpunkt. Das wirkt sich auf die Wahl der Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge mit qualitätsgeregelten VKM, wie den untersuchten Dieselhybridbeispielen, aus.

⁹⁷ Da der Linienzug nur schrittweise ermittelt werden kann, ist auch keine Definition mittels einer mathematischen Formel möglich.

7.2.3 Auswahl der aktiven Betriebsmodi (Ausgleich der Energiebilanz)

Bisher ist ein Verfahren vorgestellt worden, dass für alle Zeitschritte eindeutige Zusammenhänge zwischen der Leistung am EES und einem definierten Kriterium festlegt. Diese Zusammenhänge sind streng monoton. Sie sind für alle im Rahmen der Auswahl selektierbaren Modi definiert.

Zur Auswahl wird jetzt ein sogenannter Schwellwert definiert und mit dem Kriterium verglichen. In Abbildung 35 bis Abbildung 38 ist anhand der Referenzanforderung gezeigt, welche Modi bei ausgewählten Schwellwerten selektiert werden. Es wird definiert, dass immer der Modus mit dem größtmöglichen Kriterium, das noch kleiner als der Schwellwert ist, selektiert wird. Der Schwellwert wird im Rahmen dieser Variation schrittweise angehoben. Die resultierende Leistung am EES und der auftretende Kraftstoffverbrauch steigen dadurch ebenfalls sukzessiv an.

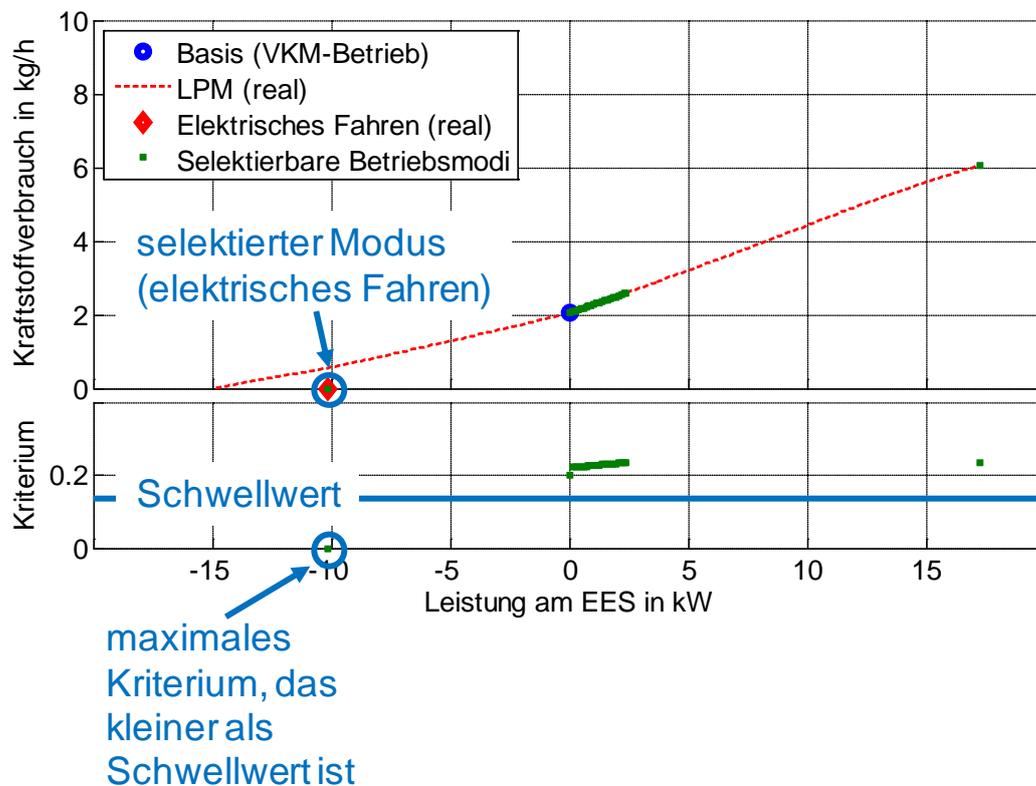


Abbildung 35 – Schwellwertvariation für Referenzanforderung – Schwellwert 1

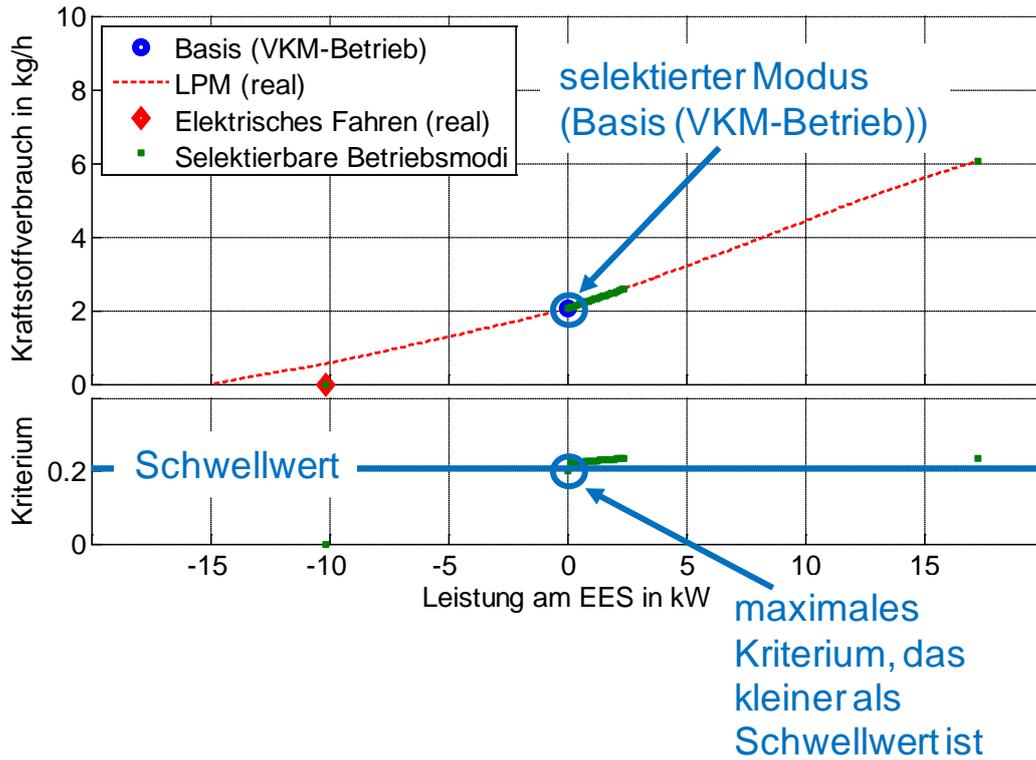


Abbildung 36 – Schwellwertvariation für Referenzanforderung – Schwellwert 2

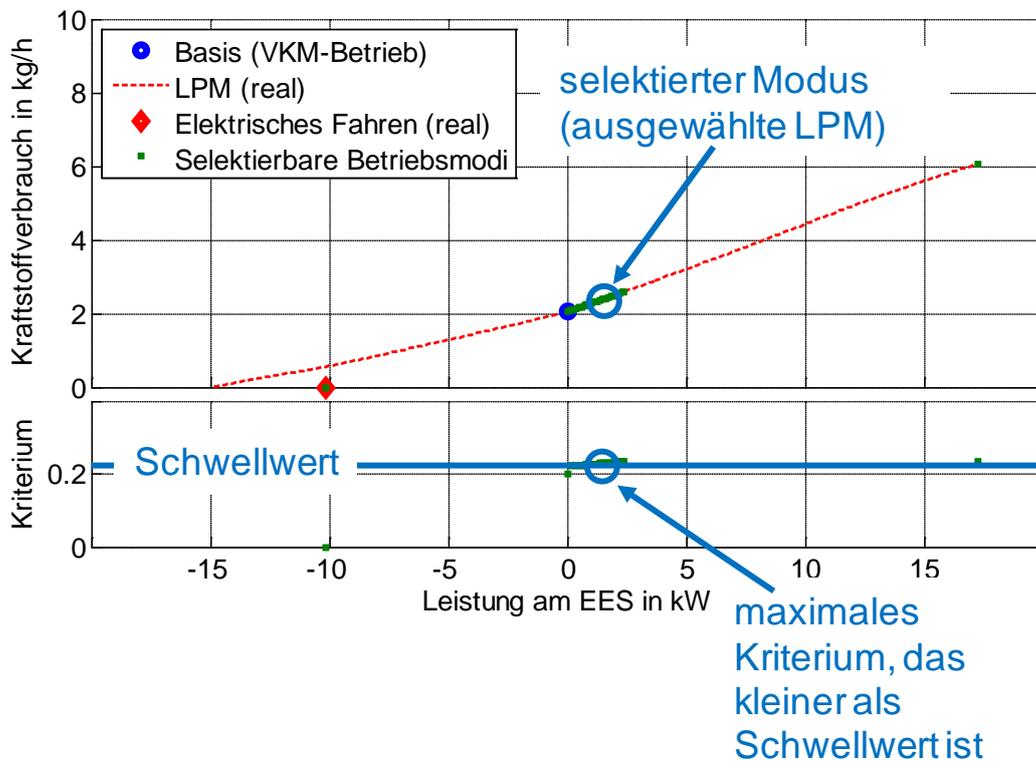


Abbildung 37 – Schwellwertvariation für Referenzanforderung – Schwellwert 3

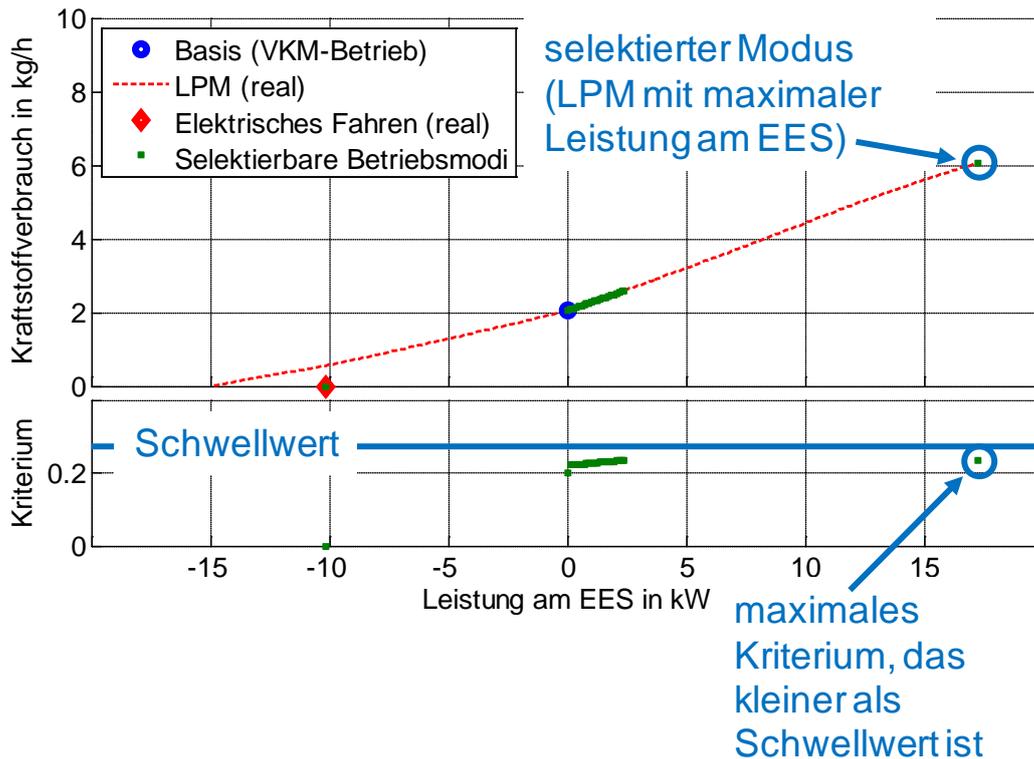


Abbildung 38 – Schwellwertvariation für Referenzanforderung – Schwellwert 4

Anhand dieser Beispiele erkennt man, dass je nach Schwellwert verschiedene Betriebsarten automatisch ausgewählt werden. Es ist also keine weitere Vorschrift notwendig, um die Betriebsart zu bestimmen. Mit der vorgestellten Methodik kann vielmehr die Betriebsart und im Falle von LPM auch deren Ausprägung in einem Schritt bestimmt werden.

Wenn man schließlich für jeden Zeitschritt den Betriebsmodus mit maximalem Kriterium, das noch kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist, auswählt, lässt sich daraus für vorgegebene Fahrprofile die Energiebilanz am EES aufstellen. Der resultierende Zusammenhang zwischen Schwellwert und Energiebilanz am EES ist dann ebenfalls streng monoton.

Somit kann ebendieser Schwellwert iterativ so ermittelt werden, dass der Energieinhalt im EES über ein vorgegebenes Fahrprofil ausgeglichen bleibt.⁹⁸

7.2.3.1 Zeitlich konstante Anforderungen

Der Ablauf der Auswahl im Rahmen der praktischen Berechnung inklusive der Ergebnisberechnung bei nicht ideal ausgeglichener Bilanz wird anhand von einfachen Beispielen demonstriert. Diese behandeln konstante Vortriebsanforderungen entsprechend Fahrsituationen mit konstanter Geschwindigkeit. Anhand dieses Betriebs wird auch gezeigt, warum die elektrischen Verluste schon bei der Auswahl berücksichtigt werden müssen. Eine Variation der elektrischen Wirkungsgrade macht ersichtlich, dass erst mit der integrierten Berücksichtigung der Verluste im elektrischen System die verbrauchsgünstigste Betriebsart gefunden wird, weil sich je nach Vortriebsanforderung, Verlauf der Willians-Linie und elektrischen Verlusten Optima ergeben können, die vom VKM-Betriebsmodus mit minimalem spezifischen Verbrauch deutlich abweichen. Neben der Optimierung der Teilsysteme ist ganz besonders deren günstiges Zusammenwirken für das Gesamtergebnis wichtig.

⁹⁸ Die Festlegung des Schwellwertes im Rahmen der Umsetzung für eine Fahrzeugregelung ist Inhalt von Kapitel 8.

Zur Vereinfachung der Darstellung der Variation wird ein elektrischer Systemwirkungsgrad η_{Sys} definiert. Ohne SH-Betrieb muss die gesamte genutzte elektrische Energie im EES zwischengespeichert werden. Dies ermöglicht die Definition nach Formel 22, die somit alle elektrischen Verluste berücksichtigt, die beim Laden und Entladen auftreten.⁹⁹

$$\eta_{\text{Sys}} = \eta_{\text{Laden}} \times \eta_{\text{Entladen}} = \eta_{\text{EM}}^{\text{generatorisch}} \times \eta_{\text{EES}} \times \eta_{\text{EM}}^{\text{motorisch}} \times \eta_{\text{EES}}$$

Formel 22 – Definition Systemwirkungsgrad

In Abbildung 39 sind für die Referenzanforderung die Zusammenhänge zwischen Leistung am EES und Kraftstoffverbrauch für unterschiedliche Wirkungsgrade dargestellt. Zusätzlich eingezeichnet sind die Position des minimalen spezifischen Verbrauchs der VKM (bezogen auf die mechanisch abgegebene Leistung) und die der ersten beiden selektierbaren Modi. Der erste Modus ist jeweils elektrisches Fahren, während der zweite von den elektrischen Wirkungsgraden abhängt. Je nach Verhältnis von elektrischen Verlusten zu denen, die sich aus der VKM-Willians-Linie ergeben, erhält man vom spezifischen Verbrauchsminimum abweichende Optima. Sinkt der Systemwirkungsgrad im Beispiel unter 80%, wird der Basismodus zum ersten selektierbaren.¹⁰⁰ Für konstante Anforderung ist dann der VKM-Betrieb ohne veränderten Lastpunkt optimal. Bei geringeren Verlusten wird hingegen alternierend die VKM im ermittelten zweiten selektierbaren Modus betrieben und damit der EES geladen bzw. elektrisches Fahren aktiviert. Die Zeitanteile werden entsprechend den ein- bzw. ausgespeicherten Leistungen so gewählt, dass die Bilanz ausgeglichen ist. Für das Potenzialergebnis ist die Ermittlung der Zeitanteile dabei nicht bedeutend. Daher kann alternativ der Wert des Kriteriums für den zweiten Modus mit dem Leistungsbedarf am EES für elektrisches Fahren multipliziert und so der mittlere Kraftstoffverbrauch ermittelt werden. Dieser Wert entspricht dem spezifischen Verbrauch der günstigsten möglichen Steigerung¹⁰¹ der Leistung am EES. Der dabei verwendete Schwellwert entspricht dem ersten, bei dem die Energiebilanz positiv ist.

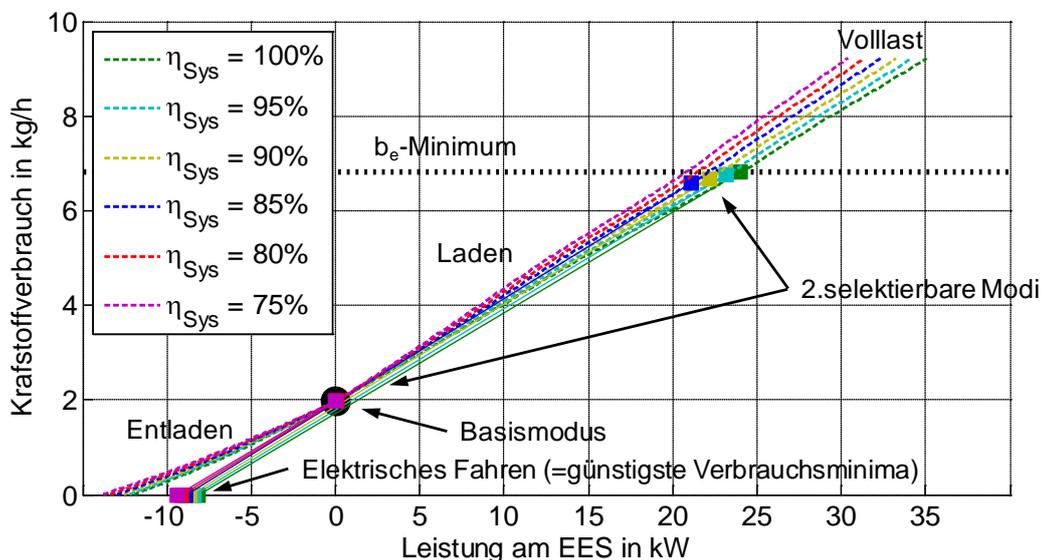


Abbildung 39 – Variation der elektrischen Wirkungsgrade (Auswahl) am Beispiel der Referenzanforderung ($n = 1250/\text{min}$, $\Sigma md = 65 \text{ Nm}$, unbegrenzte EM-Leistung)

⁹⁹ Für die Darstellung wird angenommen, dass die Wirkungsgrade beim Laden und Entladen gleich sind und damit jeweils der Quadratwurzel des Systemwirkungsgrades entsprechen. Die Ergebnisse ändern sich dadurch aber nicht.

¹⁰⁰ Das gilt auch mit den Wirkungsgraden nach Kapitel 6.1 ($\eta_{\text{Sys}} = 72.2\%$, siehe auch Kapitel 7.2.2).

¹⁰¹ Steigerung ist hier vorzeichenbehaftet definiert. Der Betrag kann auch sinken!

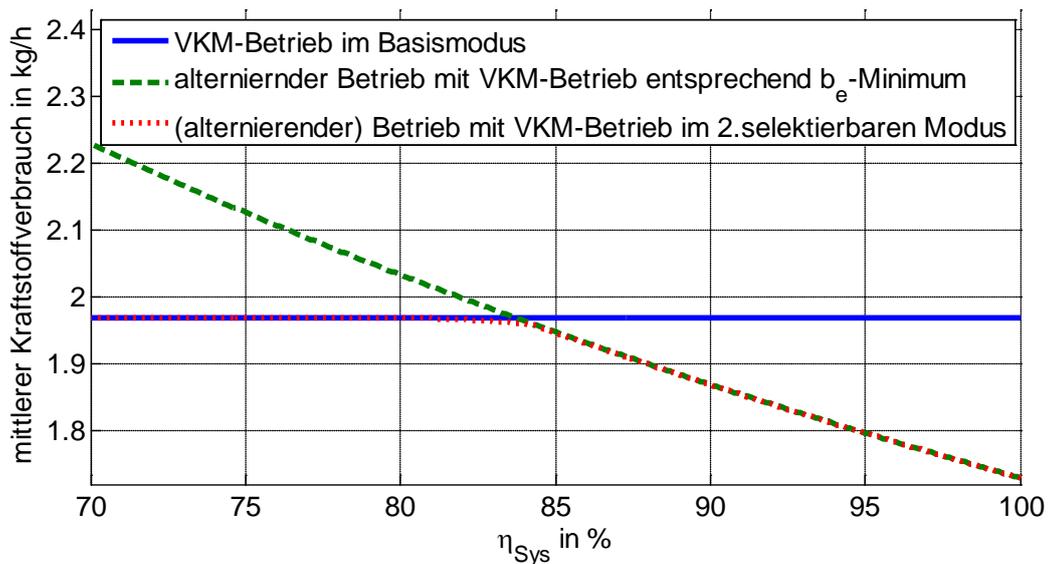


Abbildung 40 – Ermittelter mittlerer Kraftstoffverbrauch bei Variation der elektrischen Wirkungsgrade am Beispiel der Referenzanforderung ($n = 1250/\text{min}$, $\Sigma md = 65\text{Nm}$)

Den Einfluss der elektrischen Verluste verdeutlicht schließlich Abbildung 40 (bzw. der Detailausschnitt in Abbildung 41). Ohne elektrische Verluste wird die VKM nur entsprechend des spezifischen Verbrauchsminimums betrieben. Im den Diagrammen ist diese Möglichkeit auch für schlechtere Wirkungsgrade eingezeichnet. Mit Wirkungsgraden zwischen ca. 80 und ca. 83.6 Prozent, die bei dieser Betriebsart zu geringen oder gar keinen Verbesserungen führen, zeigt sich das (zusätzliche) Potenzial bei Berücksichtigung der Verluste im elektrischen System für die Bewertung und Auswahl.

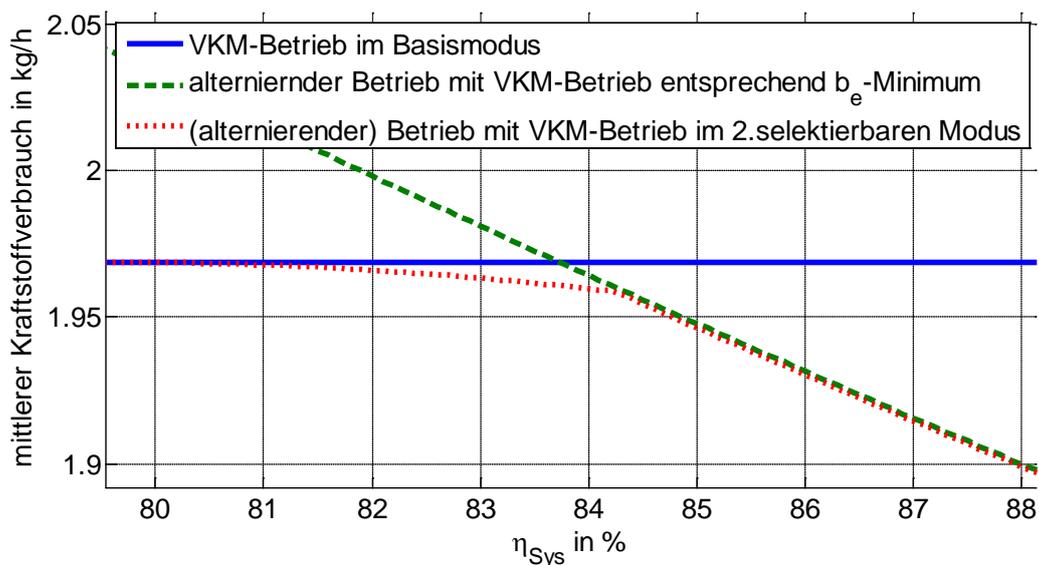


Abbildung 41 – Detail aus Abbildung 40

Die Aussagen bezüglich der Wirkungsgradbereiche können nicht für alle Vortriebsanforderungen verallgemeinert werden. In Abbildung 42 zeigt bspw. ein Detailausschnitt für eine alternative Anforderung einen qualitativ anderen Verlauf und der

Wirkungsgradbereich, bei dem zum alternierenden Bereich übergegangen wird, hat auch ein anderes Niveau.

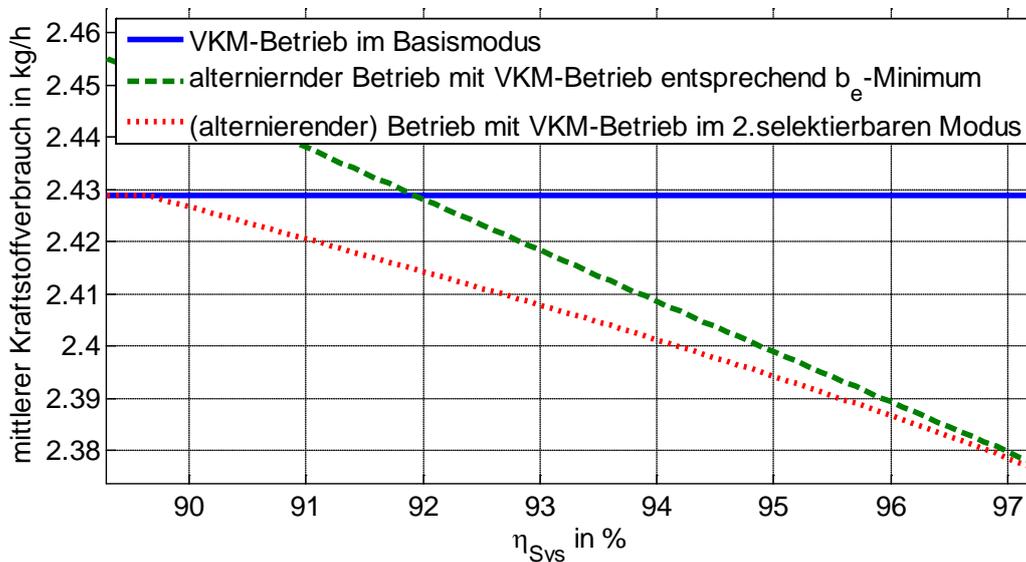


Abbildung 42 – Ermittelter mittlerer Kraftstoffverbrauch bei Variation der elektrischen Wirkungsgrade am Beispiel einer alternativen Anforderung ($n = 1000/\text{min}$, $\Sigma md = 100\text{Nm}$)

Man kann jedoch erkennen, dass die Methodik verglichen mit der Auswahl anhand des niedrigsten spezifischen VKM-Verbrauchs immer die minimalen Verbrauchswerte ergibt. Alternierender Betrieb wird nur dann als optimal ermittelt, wenn die auftretenden elektrischen Verluste kleiner als die reduzierten VKM-Verluste sind. Die VKM-Verluste können durch Vermeidung von Schleppbetrieb und durch Reduktion von Reibungs- oder Ladungswechselverlusten aufgrund des veränderten Betriebspunktes sinken.

Nur bei unrealistisch hohen Wirkungsgraden wäre der Mehrverbrauch bei der beschriebenen Auswahl anhand des niedrigsten spezifischen VKM-Verbrauchs vernachlässigbar. Auch diese Aussage kann nicht verallgemeinert werden, weil sie stark vom Verbrauchskennfeld der VKM und den elektrischen Verlusten abhängt. Setzt man diese in der Modellierung bspw. aus einem konstantem und einem leistungsabhängigen Anteil zusammen, beeinflusst auch deren Verhältnis das Ergebnis entscheidend.

7.2.3.2 Zeitlich variable Anforderungen

Im Fall einer zeitlich variablen Anforderung, wie bspw. einem Fahrzyklus, wird der Schwellwert solange iterativ variiert, bis sich aufgrund der damit selektierten Betriebsmodi eine möglichst ausgeglichene Energiebilanz am EES einstellt.

Basieren die Eingangsdaten auf Messungen, lässt sich mit Wahl entsprechend kleiner Iterationsschrittweiten für den Schwellwert die Bilanz beliebig genau ausgleichen. Bei realen Systemen und Fahrzyklen treten nämlich immer statistische Schwankungen auf, sodass es keine Phasen mit exakt konstanten Anforderungen gibt.

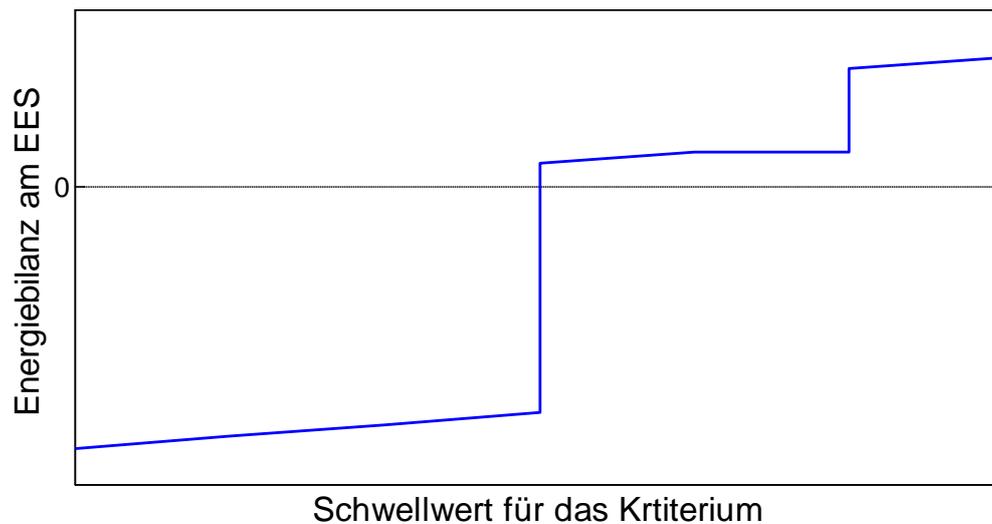


Abbildung 43 – Virtuelles Beispiel für nicht vollständige ausgleichbare Energiebilanz

Bei Eingangsdaten aus Simulationen kann in Kombination mit synthetischen Fahrzyklen mit ausgeprägten Phasen mit konstanter Geschwindigkeit, wie bspw. dem NEFZ, möglicherweise kein idealer Ausgleich erreicht werden. Hier werden ja für alle Zeitschritte mit gleicher Anforderung auch die gleichen Betriebsmodi selektiert, sodass die Integrale der Leistungsdifferenzen, die sich bei einer minimalen Veränderung des Schwellwertes ergeben, zu deutlichen Abweichungen von einer ausgeglichen Bilanz führen können (Abbildung 43).

Analog zur Vorgehensweise bei konstanten Anforderungen in Kapitel 7.2.3.1 kann eine möglicherweise nach Abbruch der Iteration vorhandene Energiedifferenz mittels des iterativ ermittelten Schwellwertes umgerechnet werden. Der Schwellwert ist am Ende der Iteration maximal um die Iterationsschrittweite¹⁰² höher als der auf die Leistungssteigerung am EES bezogene Mehrverbrauch der günstigsten noch selektierbaren Maßnahme zur weiteren Steigerung der mittleren Leistung am EES.

Das Verfahren entspricht somit quasi der zeitlich begrenzten Selektion derjenigen möglichen Maßnahme zur Steigerung der Leistung, die zur minimal möglichen positiven Abweichung der Energiebilanz führt.

7.2.4 Integration der SH-Funktionalität

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie SH-Betrieb in die Bewertungsmethode einbezogen werden kann. Generell wird dabei ein Hybridsystem unterstellt, das parallelen und seriellen Hybridbetrieb alternativ zueinander ermöglicht, wie es nach Kapitel 6.1 definiert ist. Für Systeme ohne mechanischen Durchtrieb entfallen die Möglichkeiten des wie bisher als 'Basis' bezeichneten VKM-Betriebs entsprechend dem Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs, sowie 'LPM' im parallelen Hybridbetrieb. Diese Bezeichnungen werden wie auch das 'elektrische Fahren' in den folgenden Diagrammen beibehalten.

Alternativ dazu können bei Systemen mit zusätzlich oder ausschließlich möglichem SH-Betrieb Drehzahl und Drehmoment der VKM frei gewählt werden. Neben dem Betriebspunkt mit minimalem spezifischem Verbrauch können auch Betriebspunkte mit mehr oder weniger VKM-Leistung gewählt werden, wodurch ebenfalls der Kraftstoffverbrauch und die Leistung

¹⁰² Die Iterationsschrittweite wird solange verkleinert, bis der durch die Umrechnung mögliche Fehler vernachlässigt werden kann.

am EES beeinflusst werden.¹⁰³ Die im SH-Betrieb möglichen VKM-Betriebsmodi werden auf die, die bei gegebener VKM-Leistung den geringsten Kraftstoffverbrauch aufweisen, beschränkt. Dazu wird aus allen Modi die sogenannte SH-Kennlinie festgelegt.¹⁰⁴ Alle Betriebsmodi auf dieser SH-Kennlinie werden in den folgenden Diagrammen als 'SH-LPM' bezeichnet, weil analog zu den 'LPM' die Leistung am EES beeinflusst werden kann. Als Analogie zum dem konventionellen Betrieb entsprechenden VKM-Betrieb ohne Leistungsfluss am EES ('Basis') wird derjenige SH-Betriebsmodus ohne Leistungsfluss am EES jeweils gesondert als 'SH' markiert.

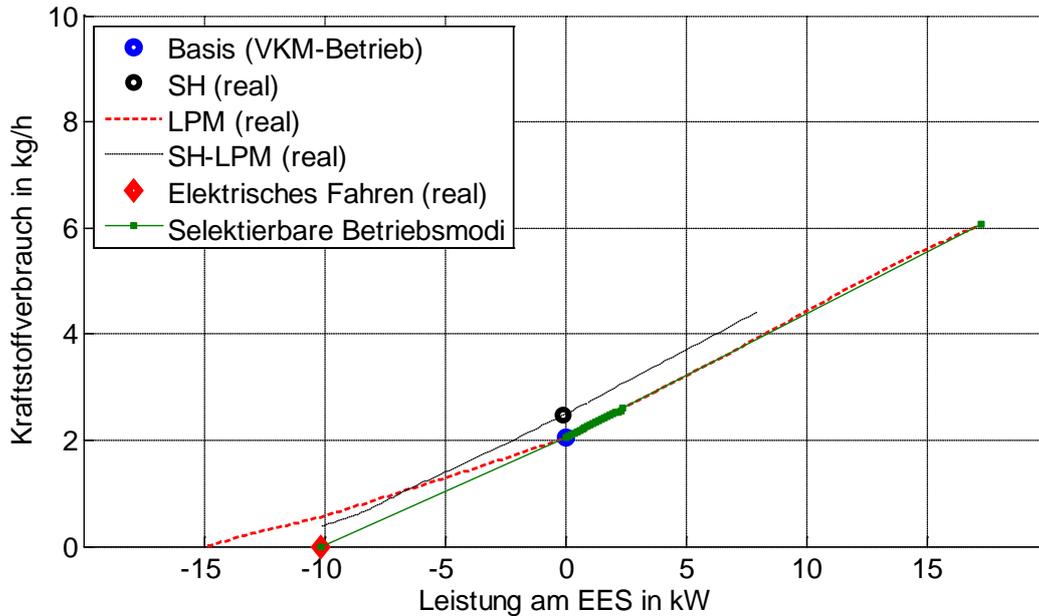


Abbildung 44 – Referenzanforderung ($n = 1250/\text{min}$, $\Sigma md = 65\text{Nm}$) bei möglichem SH-Betrieb

In die Berechnungsmethode kann SH-Betrieb ebenfalls einfach integriert werden. Damit sind Vergleiche zwischen den beiden Betriebs- bzw. Systemvarianten möglich.

Abbildung 44 zeigt dazu, dass sich die elektrischen Verluste beim SH-Betrieb deutlich stärker auswirken, weil auch die gesamte aktuelle Vortriebsleistung zweimal eine Energiewandlung erfährt (mechanisch \rightarrow elektrisch \rightarrow mechanisch).¹⁰⁵ Im konkreten Fall ist auch für den SH-Betrieb ein Leistungsfluss über das Getriebe angenommen. Durch den Entfall der Getriebeverluste bei einem System mit einer EM an der Antriebsachse und einem vollständig auskuppelbaren Getriebe könnte der Verlust durch die Energiewandlung eventuell (teilweise) kompensiert werden.

Wegen des hohen angenommenen Wirkungsgrades des EES (96%) ergibt sich hier kein erkennbarer Knick in der Verbrauchsfunktion.

Die Verluste durch die notwendige zweimalige Umwandlung der Basisleistung bewirken, dass der SH-Betrieb im Beispiel über fast den gesamten möglichen Leistungsbereich Verbrauchsnachteile zeigt. Dieses typische Verhalten ändert sich nur für spezielle Anforderungen bzw. Randbedingungen. Solche Anforderungen kommen in den

¹⁰³ Bei beschränkter EM-Leistung ist eventuell gar kein Betriebsmodus entsprechend dem niedrigsten spezifischen VKM-Verbrauch realisierbar.

¹⁰⁴ Im Rahmen dieser Arbeit werden diskrete Leistungsintervalle von 4 kW zur Suche der Minima verwendet und die restliche SH-Kennlinie durch Interpolation und Glättung näherungsweise ermittelt. Die minimale VKM-Leistung im SH-Betrieb ist dabei größer als 0, weil ein spezifisches Minimum nur für positive Leistungen ermittelbar ist.

¹⁰⁵ Der mögliche Leistungsbereich für SH-LPM ist aufgrund der Leistungsbeschränkungen der EM kleiner als für PH-LPM. Eine EM muss im SH-Betrieb die gesamte VKM-Leistung aufnehmen und damit ist der maximale Leistungsfluss in den EES auf die Differenz aus EM-Volllast und aktueller Vortriebsleistung (von der anderen EM aufzubringen) abzüglich aller Verluste begrenzt.

gebräuchlichen Zertifizierungszyklen in der Regel nicht vor und sind auch im realen Fahrbetrieb selten, weshalb die SH-Funktion auch nur unter ganz spezifischen Einsatz- und Randbedingungen Vorteile bietet (siehe Kapitel 7.2.6).

7.2.5 Einheitliche Berechnung (auch bei Rekuperation)

Rekuperation kann mit oder ohne Abkopplung der VKM vom restlichen Antriebsstrang in die Berechnung ohne Mehraufwand integriert werden. Sie entspricht dann entweder elektrischem Fahren oder der LPM entsprechend dem Betrieb auf der Schlepplinie der VKM.

Im Gegensatz zum elektrischen Fahren ist Rekuperation aber auch dann möglich, wenn die Leistung der EM nicht die ganze Verzögerungsleistung abdecken kann oder soll. Dann wird einfach der begrenzte Leistungswert verwendet.

Der Kraftstoffverbrauch ist grundsätzlich 0. Eine mögliche Überschussleistung kann immer vom konventionellen Bremssystem aufgenommen werden.

7.2.6 Vergleich ausgewählter Vortriebsanforderungen

Die Ermittlung der Kriteriumswerte für unterschiedliche Vortriebsanforderungen zeigt, dass die Anforderung entscheidend für die Auswahl und Bewertung der Modi ist. Einerseits bestimmt die Drehzahl den qualitativen Verlauf der Willians-Linie und andererseits bewirken die elektrischen Verluste je nach Drehmomentanforderung und eben diesem Verlauf unterschiedliche Gesamtzusammenhänge und damit Bewertungen.

Die einzelnen erhaltenen Kriteriumswerte können miteinander verglichen und die Auswirkungen auf die Auswahl nach Kapitel 7.2.3 angeführt werden. Für eine detaillierte Beschreibung spezieller Anforderungen und deren Vergleich wird an dieser Stelle auf ANHANG E (Detaillierter Vergleich der Kriteriumsermittlung für verschiedene Vortriebsanforderungen) verwiesen.

7.2.7 Definition von Beurteilungskenngrößen

Ziel der Hybridisierung ist die Minimierung einer oder mehrerer Zielgrößen. Der Einsatz von zusätzlichen Bauteilen bildet den dafür nötigen Aufwand. Die Grundlage jeder (im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführten) Kosten-Nutzen-Analyse bilden die Anforderungen, die die gewählte Strategie an ein System stellt. Neben dem absoluten Ladungshub am EES (in Abbildung 45 dargestellt) bestimmt das Integral der eingespeicherten Leistung die notwendige Speichergröße. Das Verhältnis dieser als Speicherbelastung eingeführten Größe zum Gesamthub des EES bestimmt nämlich dessen Schädigung und damit die Lebensdauer.¹⁰⁶ Diese Faktoren lassen sich auch durch die Wahl der Speichertechnologie beeinflussen. Moderne Lithium-Ionen-Speichersysteme weisen gegenüber Nickel-basierten Technologien deutliche Vorteile auf.¹⁰⁷

¹⁰⁶ Hofmann P.: Hybridfahrzeuge, 2010, S. 149ff bzw. Köhler U.: Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge in: Naunin D. et al.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, 4. Auflage 2007, S. 43ff

¹⁰⁷ Lamm A. et al.: Lithium-Ionen-Batterie (in: ATZ, 07-08/2009), S. 490ff

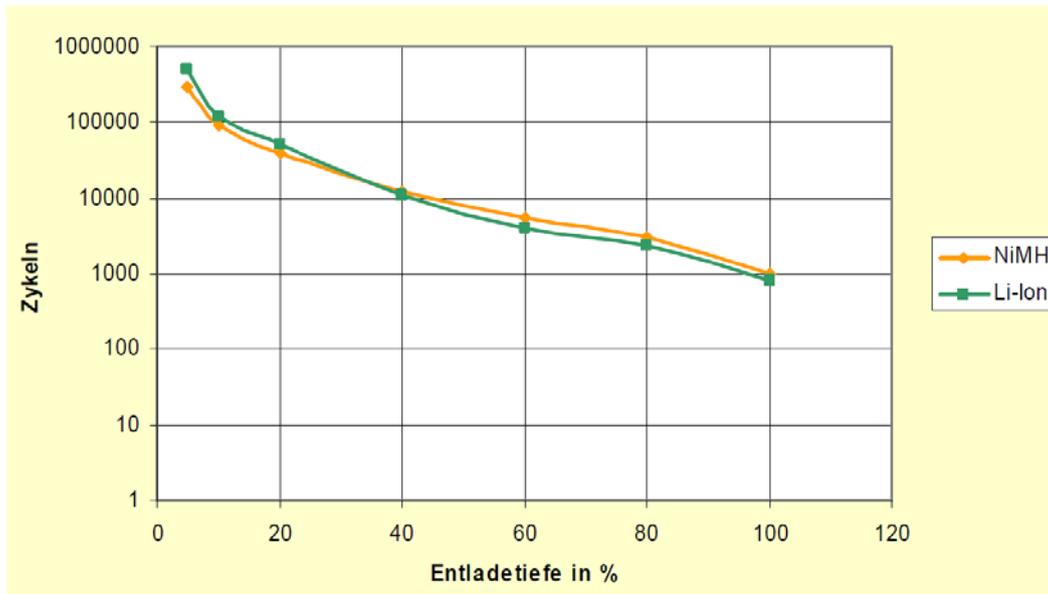
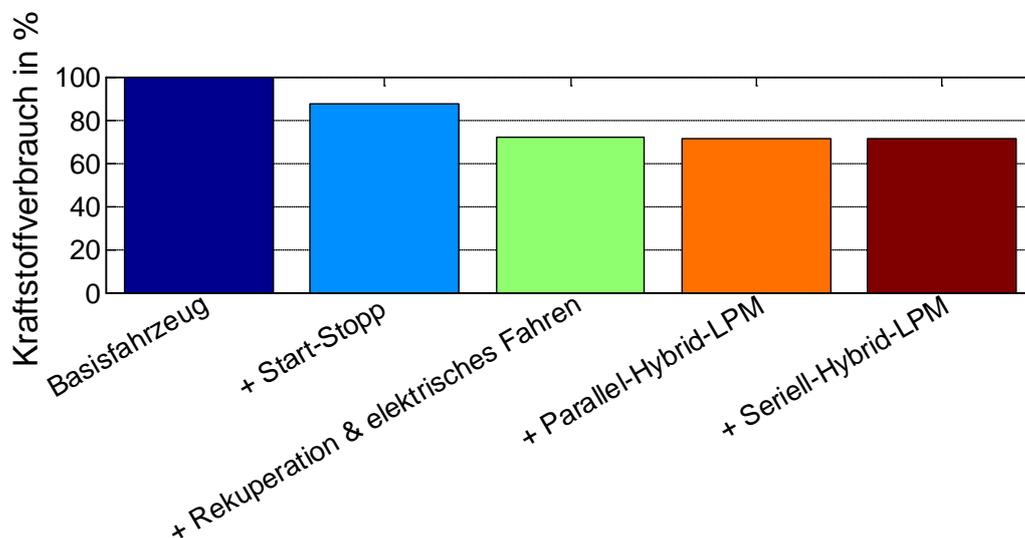


Abbildung 45 – Lebenserwartung als Funktion der Entladetiefe¹⁰⁸

Im Rahmen dieser Arbeit werden für den Vorentwicklungsprozess alle weiteren Schädigungsmechanismen, wie bspw. Temperaturgradienten, vernachlässigt. Um Schädigungen des EES zu vermeiden, ist eine entsprechende Temperierung vorzusehen, die das thermische Verhalten berücksichtigt.¹⁰⁹ Sonstige komfortrelevante Bedingungen werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Dies betrifft bspw. Fragestellungen der Innenraumtemperierung, der Geräuschbelastung und der Starthäufigkeit.

7.2.8 Simulation von Potenzialergebnissen für Fahrzyklen



Aktivierte Hybridfunktionen

Abbildung 46 – BSP für ermittelte Potenziale (AUT-REF, VKM2BAS, NEFZ, 20 kW-EM)

Abbildung 46 zeigt ein aus Kapitel 10.3 entnommenes Beispiel für Potenziale, die mit dem dort simulierten Hybridsystem erzielt werden können. Auf Basis des

¹⁰⁸ Keller M. et al.: Energiespeichersysteme für Hybridfahrzeuge (in: 3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 15.2.2006)

¹⁰⁹ siehe bspw. Wiebelt A. et al.: Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien (in: ATZ, 07-08/2009), S. 500ff

Berechnungsergebnisses kann die erzielte Kraftstoffeinsparung auf die einzelnen Hybrid-Maßnahmen aufgeteilt werden. Im Sinne einer Darstellung nach Umsetzungsaufwand wird diese Reihenfolge gewählt:

- Am einfachsten realisierbar ist die Start-Stopp-Funktion, die schon durch den Einbau verbesserter Starter- und Batteriesysteme möglich ist.
- Den nächsten Schritt stellt die Integration von elektrischem Vortrieb dar. Eine einfache Strategie verwendet die Energie aus der Rekuperation zum teilweisen Ersatz von VKM-Betrieb durch elektrisches Fahren. Dabei kommt es zu keinen LPM während der Phasen des VKM-Betriebs.
- Die weiteren Schritte sind dann die Integration von LPM ohne (PH-Betrieb) und mit (zusätzlich SH-Betrieb) der Möglichkeit von Drehzahländerungen.

LPM bieten beim Dieselmotor nur einen sehr geringen zusätzlichen Verbrauchsvorteil, wenn der Triebstrang ein Abkuppeln der VKM erlaubt. Das liegt hauptsächlich am Ausbleiben elektrischer Verluste im Basismodus (siehe Kapitel 7.2.2.2). Der SH-Betrieb weist aufgrund der zweimaligen Umwandlung der von der VKM bereitgestellten Fahrleistung (siehe Kapitel 7.2.4 und 7.2.6) meistens kein zusätzliches Einsparungspotenzial auf. Hier ist immer unterstellt, dass beide Hybrid-Betriebsarten alternativ zueinander ausgewählt werden können. Ohne mechanischen Durchtrieb ergeben sich deutlich geringere Potenziale.

Für jede Variante können Energieflüsse, Energiebilanzen und die resultierenden Betriebsbereiche der VKM ermittelt werden. Abbildung 47 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der Betriebsbereiche im Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Die Linien konstanten spezifischen Verbrauchs sind dabei entsprechend der rechten Skala eingefärbt. Die Betriebspunkte sind sowohl für das Basisfahrzeug, als auch für die simulierte Hybridvariante eingezeichnet. Jeder markierte Betriebspunkt entspricht einem Zeitschritt. Da jedoch einzelne Punkte wiederholt auftreten können, ermöglicht diese Art der Darstellung allein keine Angaben hinsichtlich der zeitlichen Verteilung. Sie bietet jedoch deutliche Hinweise, welche Betriebsbereiche durch das Hybridsystem vermieden werden können.

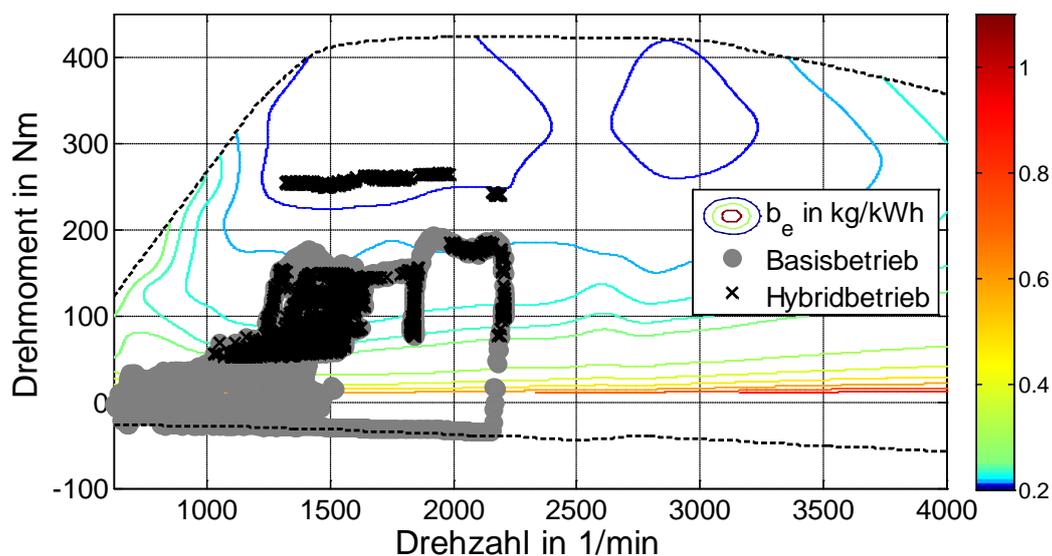


Abbildung 47 – BSP für veränderte Betriebsbereiche mit LPM (AUT-REF, VKM2BAS, NEFZ, 20 kW-EM)¹¹⁰

¹¹⁰ Diese Ergebnisse müssen für eine mögliche eIL-Prüfstandanwendung noch adaptiert werden, weil sie keine Einschränkungen hinsichtlich der dynamisch möglichen Betriebspunktwechsel berücksichtigen. Das genaue Vorgehen zeigt Kapitel 9.2.

7.3 Berücksichtigung elektrischer Verbraucher

Bei der Grenzpotenzialermittlung werden elektrische Verbraucher grundsätzlich vernachlässigt. Im Fahrzeugmodell sind sie nicht modelliert, weshalb die erhaltenen Drehmomentverläufe keine Leistung zur Abdeckung enthalten. Um möglichst einfach Variationen als Post Processing zu ermöglichen, wird auf eine Integration in die Längsdynamikermittlung verzichtet. Bei der hier demonstrierten Vorgehensweise kann die benötigte elektrische Leistung mit Betrag und Zeitpunkt variabel vorgegeben werden. Für Vergleichszwecke wird die Energie auch in den Varianten ohne vollständigen Hybridfunktionsumfang jeweils berücksichtigt.

Verbraucher werden als zu jedem Zeitpunkt bekannte elektrische Leistungsanforderungen behandelt. Einerseits wird für das Basisfahrzeug die Drehmomentanforderung entsprechend der über den Lichtmaschinenwirkungsgrad errechneten mechanischen Leistungsanforderung erhöht und so der Basisverbrauch bestimmt und andererseits die elektrische Leistung direkt aus dem Hybridnetz angefordert. Somit kommt es bei der Betriebspunktwahl zu einer Verschiebung der Verbrauchslinien zu niedrigeren Speicherleistungen. Die Methode an sich kann unverändert angewandt werden.

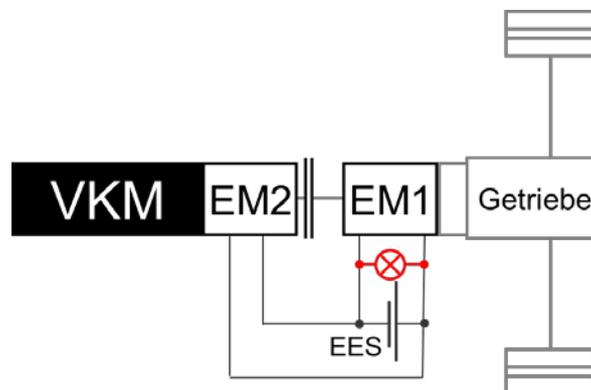


Abbildung 48 – Hybridisiertes Antriebskonzept mit Verbraucher (in rot)

Die definierte elektrische Anschlusssituation für das elektrische Bordnetz zeigt Abbildung 48. Dieses ist dabei als Verbraucher dargestellt. Es wird kein Wirkungsgrad für die Spannungswandlung definiert. Die angeforderte Leistung muss schon auf das Niveau des Hybridsystems bezogen sein. Für das Basisfahrzeug wird vereinbart, dass die Bereitstellung der elektrischen Leistung in Leerlaufphasen durch den vorgegebenen Leerlaufverbrauch abgedeckt ist. Bei Variationen müsste dieser Wert also angepasst werden, um bspw. veränderte Bordnetzanforderungen zu berücksichtigen. Variationsrechnungen für nicht hybridisierte Varianten sind allerdings ein (im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelter) Spezialfall, weshalb dies keine problematische Einschränkung ist.

7.4 Vorteile gegenüber anderen Verfahren und Schlüsse bezüglich des Potenzials von Lastanhebungen

Zum Abschluss von Kapitel 7 wird in diesem Abschnitt die vorgestellte, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Potenzialermittlung hinsichtlich verschiedener Kriterien bewertet. Dabei werden auch ihre Vorteile durch Vergleich der Ergebnisse mit einer einfacher anzuwendenden Alternative aufgezeigt. Die hier beschriebenen abweichenden Varianten entsprechen Zwischenstufen, die bei der Entwicklung der Methode durchlaufen worden sind. Die Lösung der dabei erkannten Probleme hat entscheidend bei der Festlegung der Vorgehensweise geholfen.

Auf die Behandlung elektrischer Verbraucher, deren Integration in Kapitel 7.3 gezeigt ist, und auf möglichen SH-Betrieb wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

7.4.1 Einheitliche Auswahlbasis

Die Wahl der (günstigsten) Verbrauchsminima als Basis und die davon ausgehende Ermittlung derjenigen Betriebsmodi, die mit dem insgesamt niedrigsten (Mehr-)Verbrauch eine ausgeglichene Energiebilanz bewirken, ermöglicht erst eine einheitliche Bewertungsmethode.

Eine mögliche alternative Berechnungsbasis wäre bspw. der VKM-Betrieb ohne elektrischen Leistungsfluss (wie beim nicht hybridisierten Fahrzeug). Dann ist es jedoch nicht möglich Nutzen und Aufwand einheitlich zu definieren. Ursache des Problems ist der Vorzeichenwechsel der Leistung am EES. Für Lastabsenkungen (und elektrisches Fahren) auf der einen bzw. Lastanhebungen auf der anderen Seite ist bei Definition eines spezifischen Minder- bzw. Mehrverbrauchs (bezogen auf die entnommene bzw. eingespeicherte Leistung) nämlich eine unterschiedliche Optimierung notwendig. Der Minderverbrauch muss maximiert, der Mehrverbrauch hingegen minimiert werden.

Möglich ist daher nur eine sequenzielle Berechnungsmethode. Zuerst muss eine Auswahl an Lastabsenkungen bzw. Phasen mit elektrischem Fahrbetrieb getroffen werden und anschließend mittels einer Auswahl an Lastanhebungen die Bilanz ausgeglichen werden, oder umgekehrt. Nur mittels numerischer Algorithmen kann dann das Gesamtoptimum ermittelt werden.

7.4.2 Richtige Zuordnung des (Mehr-)Verbrauchs

In Kapitel 7.2 ist ausgeführt, dass bei der Beurteilung der Betriebsmodi immer die Mehrleistung und der Mehrverbrauch gegenüber dem bisher gefundenen Optimum (mit geringerer Leistung am EES) herangezogen werden. Hier wird jetzt gezeigt, warum so die für das Gesamtergebnis besten Betriebsmodi gefunden werden.

Zum Vergleich wird eine Alternative herangezogen, die auf den ersten Blick als günstig angesehen werden kann. Für den Vergleich gegeben sind zwei verschiedene Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}, \sum m_d = 100\text{Nm}$ bzw. $n = 1200/\text{min}, \sum m_d = 40\text{Nm}$) und gesucht ist für beide Methoden die Abhängigkeit des mittleren Verbrauchs von der geforderten mittleren Leistung am EES.

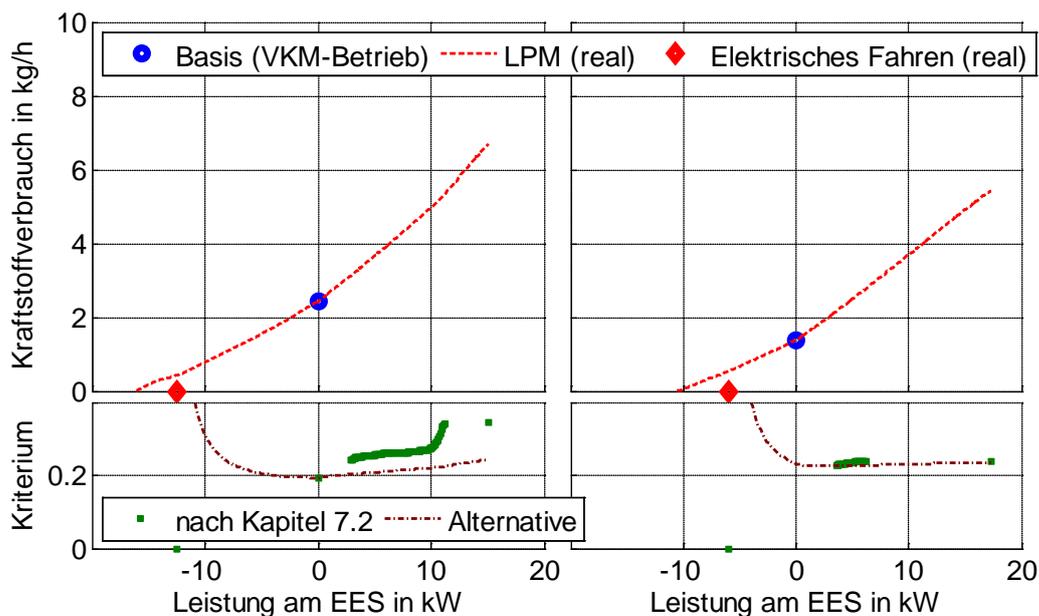


Abbildung 49 – Kriterium nach Kapitel 7.2 und Alternative anhand zweier Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}, \sum m_d = 100\text{Nm}$ links bzw. $n = 1200/\text{min}, \sum m_d = 40\text{Nm}$ rechts)

Am Beginn der Berechnung steht für beide gegebenen Anforderungen die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Kraftstoffverbrauch und Leistung am EES. Die Ergebnisse sind in Abbildung 49 oben dargestellt. Unten eingezeichnet sind das Kriterium nach Kapitel 7.2 und als Alternative die Bewertung der Modi auf Basis des Verhältnisses von aktuellem Verbrauch zur Leistungsdifferenz im EES gegenüber dem günstigsten Verbrauchsminimum (für beide Beispielanforderungen: elektrisches Fahren). Bei dieser Alternative wird keine Monotonie erhalten. Erkennbar ist das am Verlauf der braun eingezeichneten Kurven. Zur Demonstration des Vorteils der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Methode wird die Ermittlung der Betriebsmodi für eine geforderte mittlere Leistung am EES von 1.8 kW gezeigt.

In Abbildung 50 bzw. Abbildung 51 sind für die beiden Varianten jeweils der Schwellwert als waagrechte Linie in den unteren Diagrammen (1)¹¹¹ und die sich ergebenden selektierten Betriebsmodi gekennzeichnet. Diese sind dabei durch senkrechte Linien entsprechend der Leistung am EES (2) und durch waagrechte Linien entsprechend dem Kraftstoffverbrauch (3) hervorgehoben. Zusätzlich sind diese Werte in den Diagrammen angegeben. Die Auswahl selbst erfolgt nach dem Verfahren aus Kapitel 7.2.3 so, dass jeweils der Modus mit dem größtmöglichen Kriterium, das kleiner als der Schwellwert ist, selektiert wird. Aufgrund der fehlenden Monotonie ist bei der Auswahl auf Basis der Alternative der Modus mit der höchsten Leistung aus denen zu wählen, deren Kriterien kleiner als der Schwellwert sind.

Aus Abbildung 50 ergibt sich durch Auswahl der Modi nach Kapitel 7.2 mithilfe des konstanten iterativ ermittelten Schwellwertes ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von 2.30 kg/h, für die Auswahl der Modi anhand der Alternative hingegen nach Abbildung 51 einer von 2.43 kg/h, wobei die dabei ermittelten Schwellwerte unterschiedlich sind.

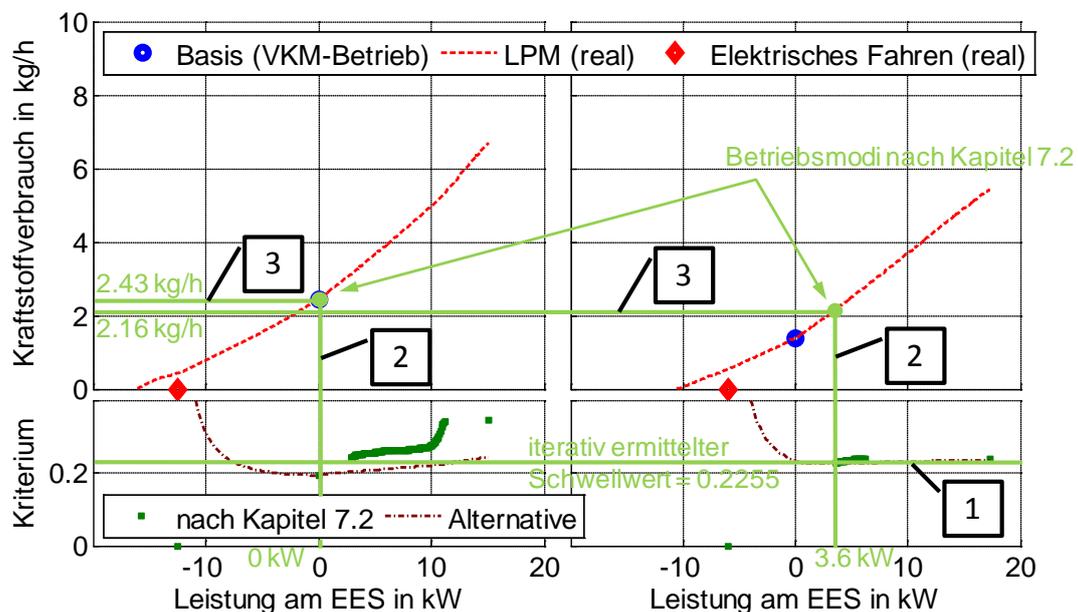


Abbildung 50 – Ermittlung der Modi nach Kapitel 7.2 für $\overline{P_{EES}} = 1.8 \text{ kW}$ anhand zweier Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}$, $\sum m_d = 100 \text{ Nm}$ links bzw. $n = 1200/\text{min}$, $\sum m_d = 40 \text{ Nm}$ rechts)

¹¹¹ Zahlen in Klammern geben in diesem Abschnitt die Nummer der Markierung in den betroffenen Diagrammen an.

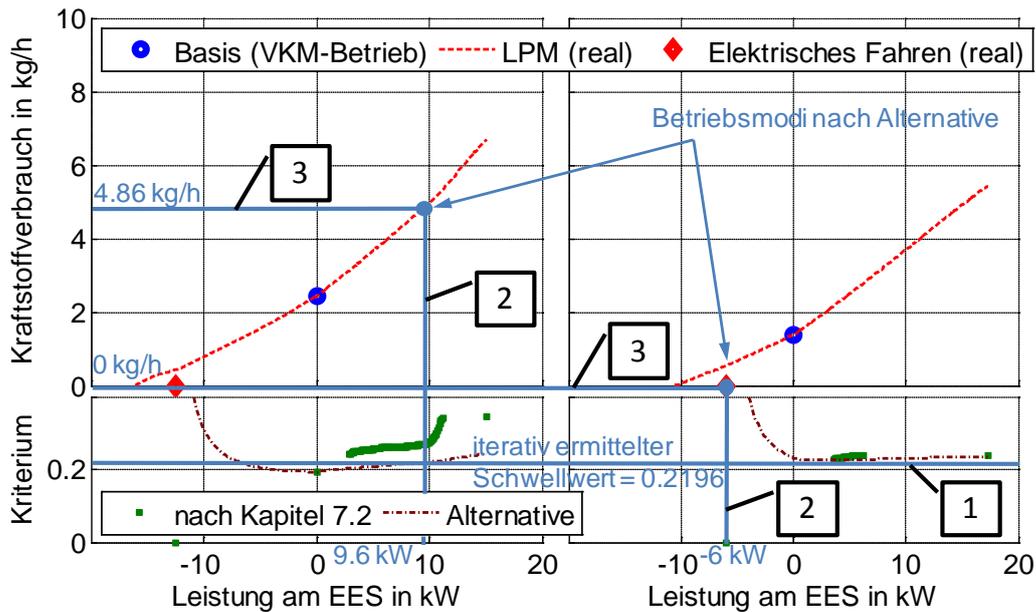


Abbildung 51 – Ermittlung der Modi nach der Alternative für $\overline{P_{EES}} = 1.8\text{kW}$ anhand zweier Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}, \Sigma m_d = 100\text{Nm}$ links bzw. $n = 1200/\text{min}, \Sigma m_d = 40\text{Nm}$ rechts)

Der Vorteil der entwickelten Methodik nach Kapitel 7.2 liegt dabei an der stückweise getrennten Bewertung der Möglichkeiten der Leistungssteigerung am EES.

Zur Erklärung können die Ergebnisse der zwei Methoden verglichen werden. In Abbildung 52 sind dazu die selektierten Betriebsmodi für beide Varianten gemeinsam eingezeichnet. Bei beiden Varianten wird für die links dargestellte Anforderung die VKM aktiviert. Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Leistungssteigerung.

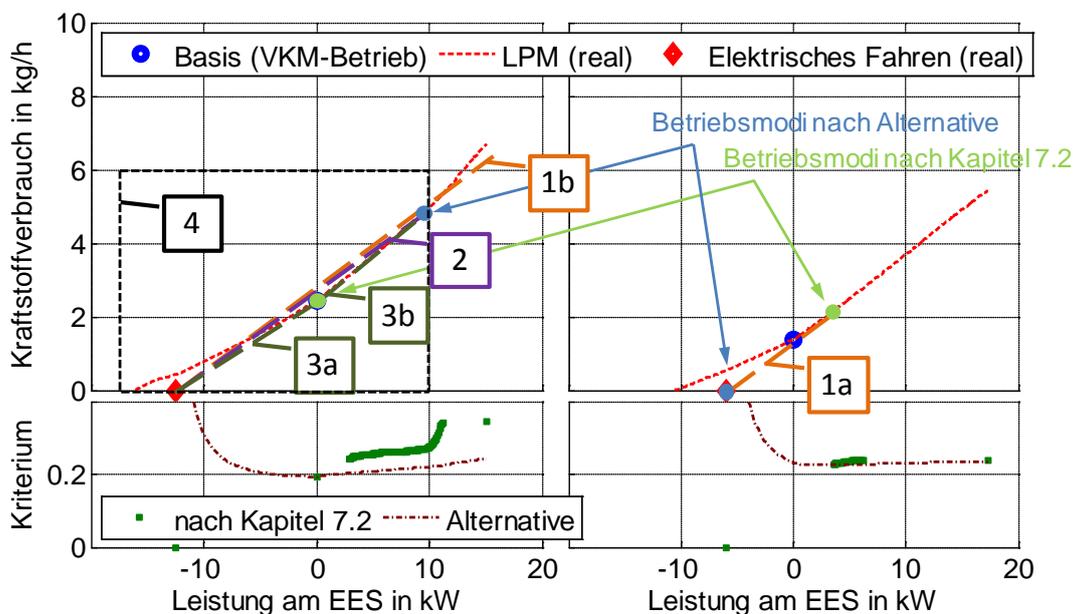


Abbildung 52 – Vergleich der ermittelten Modi für $\overline{P_{EES}} = 1.8\text{kW}$ mittels Kriterium nach Kapitel 7.2 und Alternative anhand zweier Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}, \Sigma m_d = 100\text{Nm}$ links bzw. $n = 1200/\text{min}, \Sigma m_d = 40\text{Nm}$ rechts)

Nach Kapitel 7.2 wird dazu auch bei der rechts dargestellten Anforderung die VKM aktiviert. Die zusätzliche Leistung am EES als Nutzen ruft einen zusätzlichen Verbrauch als Aufwand

hervor. Der spezifische Aufwand ist dabei entsprechend der Steigung der orangen Geraden (1a) 225 g/kWh. Nach der Alternative wird hingegen die Leistung der VKM bei der links dargestellten Anforderung angehoben, bis die geforderte mittlere Leistung erreicht ist. Der spezifische Aufwand für die gesamte Leistung am EES ergibt sich entsprechend der Steigung der violetten Gerade (2) zu 220 g/kWh. Dieser bildet für die Alternative das Auswahlkriterium und ist niedriger als der minimal mögliche spezifische Aufwand für VKM-Betrieb bei der rechts dargestellten Anforderung. Wie bei der Methode nach Kapitel 7.2 beträgt dieser 225 g/kWh. Im linken Diagramm ist der Unterschied durch Vergleich der Steigungen der violetten Gerade (2) und der orangen Gerade (1b) erkennbar. Die orange Gerade (1b) ist hier eine nur zu Vergleichszwecken eingezeichnete Parallelverschiebung der entsprechenden orangen Gerade (1a) aus dem rechten Diagramm. Deutlicher wird dieser Steigungsunterschied in Abbildung 53, die den schwarz umrandete Ausschnitt (4) aus Abbildung 52 vergrößert darstellt.

Der Gesamtverbrauch ist schließlich für die Alternative höher, weil der momentane spezifische Aufwand nicht berücksichtigt, dass die gesamte benötigte Leistungssteigerung auch auf Teilleistungssteigerungen aufgeteilt werden kann.

Nach Kapitel 7.2 sind das die folgenden zwei Anteile: Einerseits die Aktivierung des lokal besten VKM-Betriebs bei der links dargestellten Anforderung, die einen spezifischen Aufwand entsprechen der ersten olivgrünen Gerade (3a) von 194 g/kWh entspricht, und andererseits der Aktivierung des lokal besten VKM-Betriebs bei der rechts dargestellten Anforderung mit dem spezifischen Aufwand von 225 g/kWh.

Bei der Alternative hingegen kann der Gesamtaufwand rechnerisch auch aus zwei Anteilen zusammengesetzt werden: Einerseits wieder die Aktivierung des lokal besten VKM-Betriebs bei der links dargestellten Anforderung mit dem spezifischen Aufwand entsprechend der ersten olivgrünen Gerade (3a) von 194 g/kWh und andererseits der Laststeigerung mit dem spezifischen Aufwand entsprechend der zweiten olivgrünen Gerade (3b) von 253 g/kWh.

Die Anhebung der Last über den lokal besten VKM-Betrieb verschlechtert dabei den aktuellen spezifischen Aufwand. Bei dieser Darstellung wird auf die Betrachtung der kleinsten, entsprechend der Diskretisierung möglichen Steigerungsschritte der Übersicht halber verzichtet.

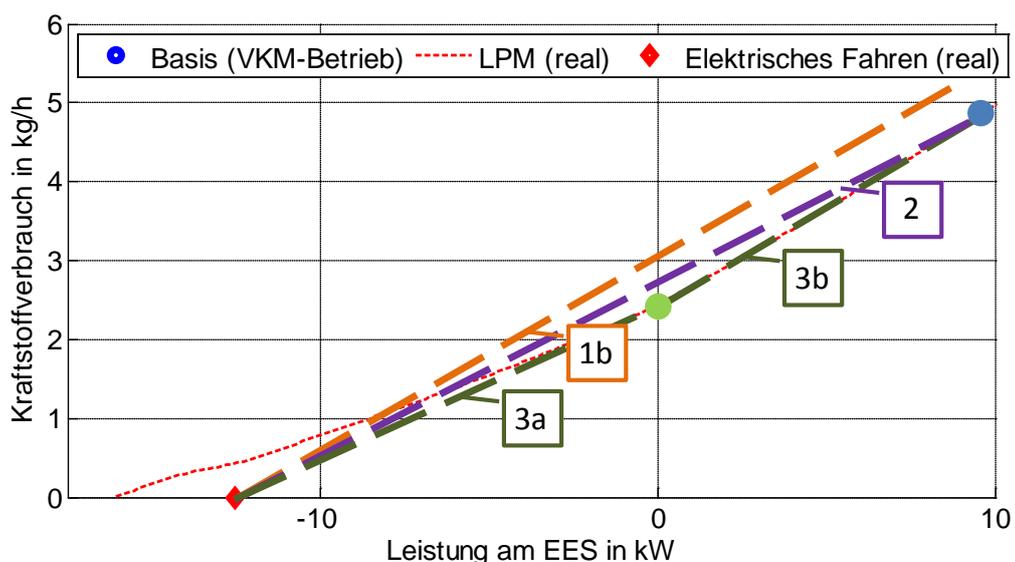


Abbildung 53 – vergrößerter Ausschnitt (4) aus Abbildung 52

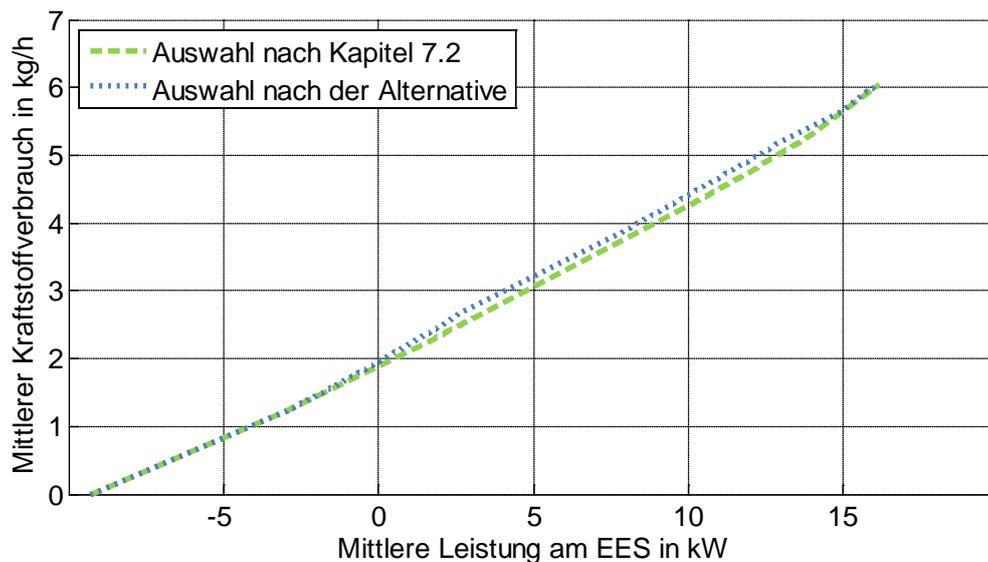


Abbildung 54 – Mittlerer Kraftstoffverbrauch für variable mittlere Leistung am EES bei Auswahl der Modi mittels Kriterium nach Kapitel 7.2 und Alternative anhand zweier Vortriebsanforderungen ($n = 1000/\text{min}$, $\sum m_d = 100\text{Nm}$ bzw. $n = 1200/\text{min}$, $\sum m_d = 40\text{Nm}$)

Abbildung 54 zeigt abschließend, dass für die gezeigten Anforderungen auch unabhängig von der geforderten mittleren Leistung am EES die Auswahl nach Kapitel 7.2 zu den niedrigeren Verbrauchswerten führt.

Anders als bei konventionellen Antrieben, bei denen die abzugebende Leistung immer zum Zeitpunkt der Anforderung bereitgestellt werden muss, ist die Anhebung der VKM-Last in beliebig kleinen Intervallen möglich, die einzeln zu bewerten sind. Spezifische Verschlechterungen zum aktuellen Zeitschritt werden im Zuge der Bewertung mithilfe der vorgestellten Methode nur in Zusammenhang mit Leistungssteigerungen selektierbar.

Somit ist der Bezug des zum aktuellen Zeitschritt auftretenden Mehrverbrauchs auf diese Leistungssteigerung möglich und diese können unabhängig vom Ausgangspunkt mit anderen möglichen Leistungssteigerungen zu anderen Zeitschritten verglichen werden.

Um die mittlere Leistung am EES zu steigern, gibt es somit zwei konkurrierende Möglichkeiten. LPM mit Erhöhung der Leistung sind die Alternative zu zusätzlichem VKM-Betrieb statt elektrischem Fahren. Als solche müssen sie auch bewertet werden. Nachteilig für LPM ist dabei, dass die elektrischen Verluste generell mit Erhöhung der Leistung steigen, während bei zusätzlichem VKM-Betrieb zwar Schleppverluste in Kauf genommen werden müssen, dafür aber die elektrischen Verluste verringert werden.

Spezialfälle der gezeigten Alternative sind Varianten, die die möglichen Modi schon vor der Auswahl auf elektrisches Fahren, den VKM-Betrieb ohne elektrischen Leistungsfluss und den VKM-Betriebspunkt mit dem bei der aktuellen Drehzahl niedrigsten spezifischen Verbrauch einschränken. Dies entspricht der Festlegung einer Betriebslinie für alle PH-LPM, die nur auf Basis der VKM getroffen wird.

Wie Abbildung 55 zeigt, ist der auf die Leistungssteigerung bezogene zusätzliche Verbrauch für Lastanhebungen sogar ohne Berücksichtigung elektrischer Verluste fast immer bei Anhebung der Leistung auf einen Wert unterhalb der Leistung, die dem absoluten spezifischen Verbrauchsminimum entspricht, niedriger als bei Anhebung zu eben dieser Leistung (im Beispiel grün bzw. rot markiert: 186 g zusätzlicher Verbrauch je zusätzlicher Kilowattstunde Energie bei Anhebung um 5 kW gegenüber 204 g zusätzlicher Verbrauch je

zusätzlicher Kilowattstunde Energie bei Anhebung um 15 kW auf die Leistung, die dem absoluten spezifischen Verbrauchsminimum der VKM entspricht).

Das spezifische Verbrauchsminimum der VKM wird dort ermittelt, wo das Verhältnis von Nutzarbeit zu Verlusten möglichst groß ist. Entscheidend bei Lastanhebungen sind allerdings nur die zusätzlichen Verluste. Damit Anhebungen positiv für das Verbrauchsgesamtergebnis sind, müssen diese geringer sein, als die Verluste, die beim Einsatz der Energie vermieden werden können. Beim im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Verfahren sind sowohl diese Verluste, die von der VKM verursacht werden, als auch die elektrischen Verluste durch den Bezug auf die Leistungsdifferenz am EES berücksichtigt.

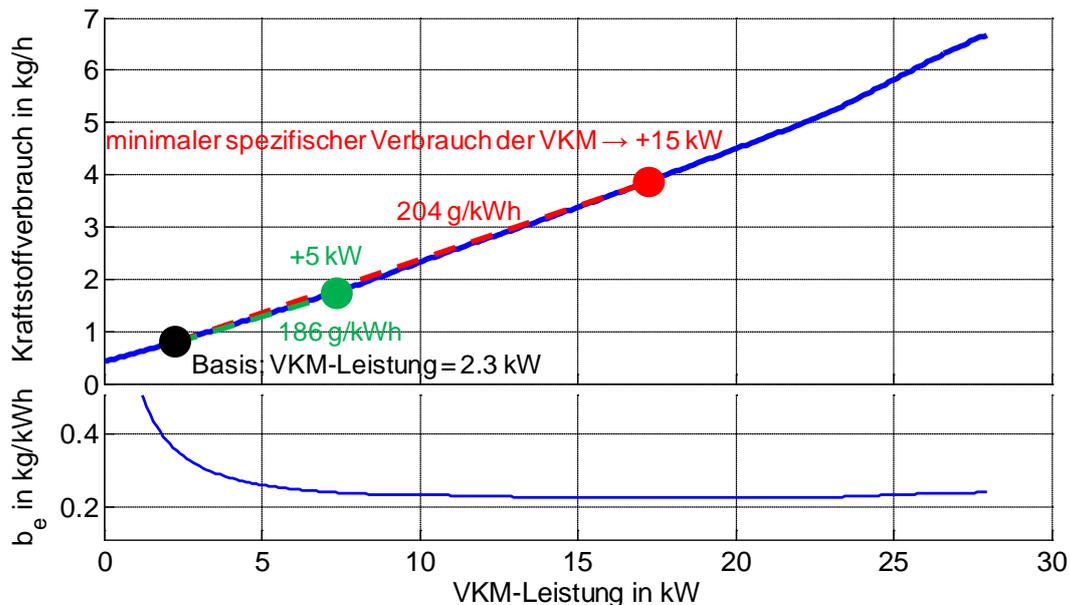


Abbildung 55 – Drehzahlschnitt ($n = 1000/\text{min}$) aus dem Verbrauchskennfeld

Für typische Vortriebsanforderungen und auf Basis konstant modellierter elektrischer Wirkungsgrade nach Kapitel 6.1 ergibt sich der VKM-Betrieb ohne elektrischen Leistungsfluss als erster selektierbarer VKM-Modus (siehe Kapitel 7.2). Daher ist für die Anhebungen dann genau der mit dem elektrischen Wirkungsgrad umgerechnete Zusammenhang aus Abbildung 55 ausschlaggebend. Demnach müsste der spezifische Verbrauch für Lastanhebungen um den Faktor 1.39 geringer sein, als der spezifische Verbrauch eines dadurch ersetzbaren ersten selektierbaren VKM-Modus bei einer anderen Vortriebsanforderung.¹¹² Dabei ist jedoch zu beachten, dass zuerst die günstigsten Maßnahmen zum Laden des EES zu nutzen sind. Das sind die Rekuperationsmaßnahmen, die Laden ohne Kraftstoffeinsatz ermöglichen. Somit wird die VKM bei den dafür ungünstigsten Anforderungen auch ohne Lastanhebungen nicht aktiviert und diese sind somit auch nicht mehr ersetzbar.

Auch Einschränkungen der Modi durch äußere Randbedingungen sind mit der entwickelten Methode möglich und diese funktioniert bis an die Systemgrenzen. Es werden also auch Lastanhebungen über die spezifischen Verbrauchsoptima hinaus analysiert und bei Bedarf selektiert.

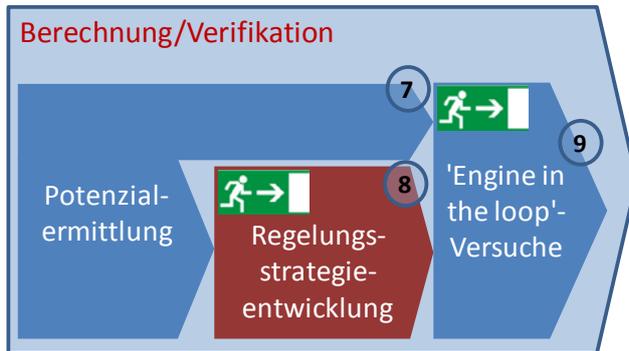
¹¹² Der Faktor 1.39 entspricht dem Kehrwert des Produktes der Wirkungsgrade beim Ein- und Ausspeichern bzw. des Systemwirkungsgrades nach Kapitel 7.2.3 ($\frac{1}{\eta_{EM}^{generatorisch} \times \eta_{EES} \times \eta_{EM}^{motorisch} \times \eta_{EES}} = \frac{1}{\eta_{Sys}} = 1.39$).

7.4.3 Vorteile hinsichtlich der Automatisierbarkeit

Wie gezeigt, ergibt sich bei der Bewertung der Betriebsmodi automatisch ein monotoner Zusammenhang zwischen Leistung am EES und den Werten für das Kriterium. Dadurch ist ein Ausgleichen der Energiebilanz über iterative Variation des Schwellwertes für das Kriterium ohne weitere Maßnahmen möglich.

Außerdem werden alle Verluste berücksichtigt, sodass auch SH-Betrieb unkompliziert integriert werden kann. Es können auch reine SH-Fahrzeuge simuliert werden, wobei dann eben keine Modi außer denen auf der SH-Kennlinie mehr möglich sind. Dabei wird die VKM bei Anforderungen mit geringerer Leistung nicht unbedingt immer im Bestpunkt betrieben, weil analog zum PH-Betrieb Ein- und Ausspeicherverluste auftreten. Wegen des nicht möglichen mechanischen Leistungsflusses von der VKM zu den Rädern treten die Verluste der EM dann immer auf, sodass diese nicht der Anhebung zugeordnet werden.

8 Regelungsstrategieentwicklung



Zuordnung Kapitel 8

Für die Potenzialermittlung (Kapitel 7) gilt, dass einerseits VKM und EM in der Lage sind beliebig schnelle Betriebspunktwechsel durchzuführen und dass andererseits bei der Bestimmung der optimalen Betriebsart der gesamte Fahrzyklus bekannt ist. Außerdem ist der Speicherhub nicht begrenzt. Diese Annahmen sind Vereinfachungen, die für einen realen Betrieb im Fahrzeug nicht zulässig sind. Aufgaben der zu entwickelnden Regelungsstrategie sind daher die Beschränkung von Betriebsartenwechsel auf vernünftige Intervalle und die Begrenzung des Speicherhubs, sowie das Lösen der Strategie von vordefinierten Fahrzyklen.

Hauptziel bleibt unabhängig von der Strategie die Minimierung des Gesamtverbrauchs bzw. einer anderen Zielgröße. Wie schon in Kapitel 7.2 beschränkt sich die Beschreibung auf die Verbrauchsminimierung bei einem PH-Fahrzeug.

Für die Berechnungen der Betriebsstrategien wird der Zeitschritt gegenüber der Potenzialberechnung auf 0.5 s angehoben.

8.1 Intelligente Regelungsstrategie

Für den realen Hybridfahrzeugbetrieb gelten gegenüber dem Grenzpotenzial Einschränkungen hinsichtlich der Dynamik, der Speicherkapazität des EES und der Vorhersehbarkeit zukünftiger Fahrsituationen. Dieses Kapitel beschreibt, welche das sind und wie diese in eine Regelungsstrategie integriert werden.

Gesucht ist eine Methode zur Festlegung des Schwellwertes ohne Kenntnis des gesamten Fahrzyklus, damit eine Auswahl der Betriebsmodi auch für reale Fahrsituationen anhand der vorgestellten Bewertung möglich wird.

8.1.1 *Einschränkungen*

8.1.1.1 *Betriebsartenwechsel*

Unter einem Betriebsartenwechsel wird eine Übergabe der Antriebsaufgabe von der EM an die VKM bzw. umgekehrt verstanden. Außerdem sind Wechsel in den bzw. aus dem Rekuperationsbetrieb und die Aktivierung bzw. Deaktivierung von LPM Betriebsartenwechsel. Diese Vorgänge werden in der Realität nicht in unendlich kurzer Zeit abgeschlossen. Daher muss nach einem Wechsel im Regelfall eine gewisse Zeitspanne gewartet werden, bevor ein Rückwechsel möglich ist.

Dies kann grundsätzlich über zwei Wege erreicht werden. Entweder verhindert das Regelungsprogramm selbst diese Rückwechsel, weil diese als sehr unattraktiv erscheinen, oder die Rückwechsel werden unabhängig vom eigentlichen Ergebnis der Betriebswunschermittlung des Regelungsprogramms unterbunden. Das gelingt bspw. durch zeitlich begrenzte Einschränkung der möglichen Betriebsmodi, aus denen das

Regelungsprogramm dann die Auswahl trifft. Diese zweite Variante wird im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt.

8.1.1.2 Speicherhub

Je nach Strategie kommt es zu Unterschieden bei den Energieflüssen in bzw. aus dem EES. Dadurch ergibt sich in Abhängigkeit von Fahrzyklus und Strategie ein bestimmter Speicherhub, der die effektiv notwendige Speicherkapazität beeinflusst.

Eine Begrenzung ist wieder auf zwei Arten möglich. Einerseits kann ein Regelprogramm ohne Kenntnis des effektiv verfügbaren Hubs zu einer Minimierung des Bedarfs führen, andererseits kann der mögliche Hub auch direkt vorgegeben und bestimmte Betriebsituationen je nach Ladezustand verhindert werden. Da die Strategien bezüglich Speicherhub und Betriebsartenwechsel nicht getrennt behandelt werden können, ergeben sich insgesamt zwei Entwicklungspfade. Bei einem werden Wechsel und Speicherhub durch das Programm selbst begrenzt, beim zweiten extern. Letztere Vorgehensweise wird hier eingesetzt.

Neben dem Speicherhub selbst ist die Minimierung des Energiedurchsatzes durch den EES ein Ziel. Dieser ist nämlich der begrenzende Einfluss für die Lebensdauer.

8.1.2 Integration zu zyklusunabhängiger Strategie

Ohne Kenntnis über den Fahrzyklus muss die Hybridsystemregelung nur auf Basis zurückliegender bzw. aktueller Daten die Betriebsart wählen.

Im Folgenden wird die nutzbare Kapazität des EES ca. 20% größer als der Speicherhub im NEFZ beim Grenzpotenzial ohne LPM (siehe Kapitel 7.2.8) festgelegt.

Die Optimierungsgrößen Gesamtverbrauch und Energiedurchsatz sollen durch die Strategie minimiert werden. LPM werden aufgrund deren trotz des äußerst geringen Verbrauchseinsparungspotenzials grundsätzlich ungünstigen Einflüssen auf Speicherhub und Emissionsverhalten¹¹³ vorerst nicht zugelassen. Somit fällt das Zielkriterium Energiedurchsatz weg, weil die gesamte Energie durch Rekuperation in den EES eingespeichert wird und ohne Zusatzaufwand zur Verfügung steht. Nur das Erreichen der Maximalladung des EES kann dazu führen, dass nicht oder nur eingeschränkt rekuperiert wird.

Die Werte der in diesem Abschnitt definierten Variablen sind von der eingesetzten bzw. simulierten Hardware abhängig. Sie sind für die umgesetzten Beispiele in ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter) enthalten.

¹¹³ siehe Kapitel 10.3.8

8.1.2.1 Grenzen für Betriebssituationen

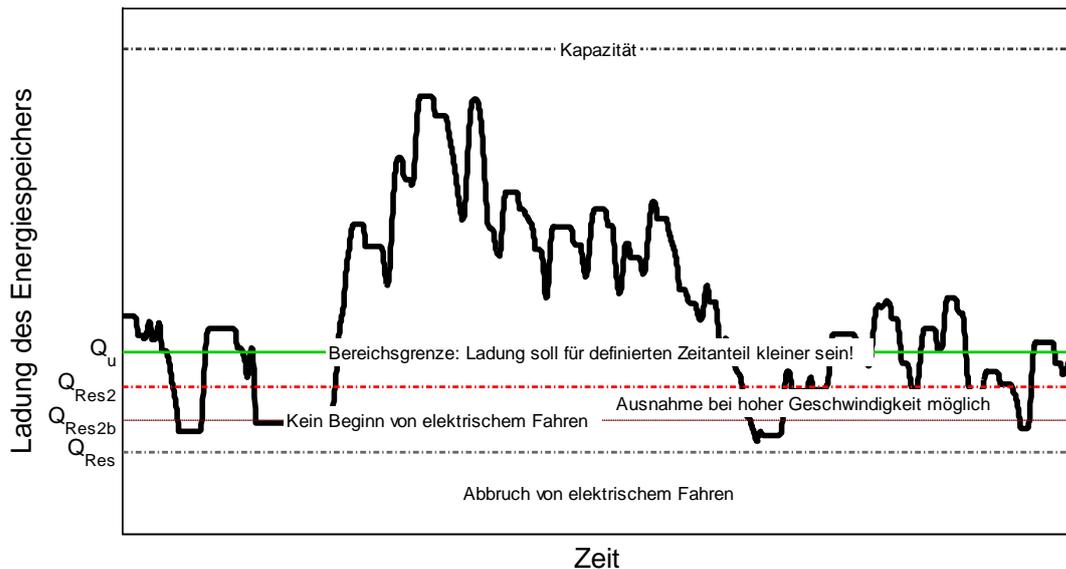


Abbildung 56 – Einteilung der Speicherkapazität in Bereiche¹¹⁴

In Abhängigkeit vom aktuellen Ladezustand des EES werden bestimmte Betriebsvarianten verhindert.

Für gegebene Fahrprofile wird das Optimum hinsichtlich des Verbrauchs erreicht, wenn die Energiebilanz bei konstantem Kriterium ausgeglichen ist. Das Kriterium wird daher grundsätzlich konstant belassen und in Abhängigkeit von der gewählten Strategie nur bei Bedarf verändert. Damit es nicht zu Situationen kommt, in denen die EM den Vortrieb übernehmen soll, obwohl der Ladezustand des EES zu niedrig ist, werden Bereiche für den Ladezustand definiert (Abbildung 56).

Es gibt eine absolute Grenze für den Ladezustand Q_{Res} , unter der elektrisches Fahren jedenfalls abgebrochen wird. Dies dient zum Erhalt von genügend Ladungsreserve für den Start der VKM und die anschließende Drehmomentübergabe. Diese kann so festgelegt werden, dass sie mit steigender EM-Leistung erhöht wird. Da es sich hier um Betrieb mit mehr Vortriebsleistung handelt, muss auch während der Drehmomentübergabephase mit höherem Energiebedarf gerechnet werden.

Bei Ladezuständen wenig über Q_{Res} wird kein elektrischer Vortrieb mehr eingeleitet. Die Grenze Q_{Res2} , über der dann alle Zustände entsprechend der Auswahl möglich sind, kann jedoch bei hoher Geschwindigkeit (über $v_{Schwelle2}$) und dabei geringer Beschleunigung (unter $a_{Schwelle2}$) auf Q_{Res2b} unterschritten werden. Hier ist der Beginn einer Verzögerung wahrscheinlich, die in eine Rekuperationsphase mit aufgrund der hohen Geschwindigkeit hoher Leistung übergeht.

Die Werte für diese Schwellen sind so anzupassen, dass in allen möglichen Fahrsituationen die Minimalladung nicht unterschritten wird. Im realen Einsatz im Hybridfahrzeug wird die Kapazität des Energiespeichers nur bis zu einem bestimmten Anteil genutzt, um dessen

¹¹⁴ Die grün eingezeichnete Bereichsgrenze Q_u , unter der die Ladung für einen definierten Zeitanteil bleiben soll, wird in Kapitel 8.1.2.3 definiert.

Standfestigkeit zu gewährleisten.¹¹⁵ Hier kann demnach noch eine Reserve vorgehalten werden, sodass die Schwellwerte über Lernfunktionen adaptiert werden können.

8.1.2.2 Zeitliche Begrenzungen

Um Betriebsartenwechsel in der Praxis zu ermöglichen, muss zwischen diesen ausreichend Zeit vergehen. Durch die Regelung allein kann diese Forderung nur bedingt umgesetzt werden. Daher wird nach einem Wechsel eine bestimmte Zeitspanne im neuen Zustand verharret, bis ein neuerlicher Wechsel ermöglicht wird.

Die dafür nötigen Zeiten hängen von der eingesetzten Hardware ab. Da derzeit noch keine Hardwareauswahl geplant ist, werden hierfür Richtwerte gebraucht. Unter der Annahme, dass die Reaktionszeiten des elektrischen Systems in Relation zu denen der VKM vernachlässigt werden können, werden die Zeiten so festgelegt, dass die VKM die sich ergebenden Betriebsartenwechsel in der jeweiligen Zeitspanne bewerkstelligen kann. Idealerweise werden auch gleich Bedingungen mit eingebaut, die erfolgreichen Prüfstandbetrieb sicherstellen.

Die Umsetzung der Anforderungen hinsichtlich Start- und Stoppvorgängen wird gemeinsam mit den anderen Versuchsvorschriften in Kapitel 9.3 behandelt.

8.1.2.2.1 Minimale VKM-Betriebszeit

Tabelle 4 – Startphasen

Startphase	Ziel	Dauer	Bemerkung
1	drehmomentfrei auf eine Drehzahl von n_{Start}^1	t_{Start}^1	entspricht dem Hochlauf mit Startmenge: Die mechanische Leistung, die im realen Fahrzeug an die VKM übertragen wird, dient nur zum Erreichen der Drehzahl für die Einspritzfreigabe! ¹¹⁶ Um Beeinflussungen auszuschließen, ist die Wirksamkeit des Leerlaufreglers applikativ auf Drehzahlen unter n_{Start}^1 zu begrenzen.
2	drehmomentfrei auf die Drehzahl des Antriebsstrangs	t_{Start}^2	entspricht dem Einregeln der Drehzahl bis zum Schließen der Kupplung zum restlichen Antriebsstrang! Simuliert wird ein nach dem Start drehmomentfreier Hochlauf der VKM, wie er bei geöffneter Kupplung im PH-Fahrzeug realisierbar ist.
3	Drehmomentübergabe	t_{Start}^3	

Um ständigen 'Ein-Aus'-Betrieb zu vermeiden, wird die VKM mindestens für die Zeit t_{VKM}^{min} betrieben, sobald eine Anforderung zum Start erfolgt ist. Darin sind drei definierte Startphasen nach Tabelle 4 enthalten. In den Phasen 1 und 2 ergibt sich für die Simulation unter Vernachlässigung der unbekanntenen über die Kupplung übertragenen Leistung eine elektrische Leistung wie beim elektrischen Fahren, während in Phase 3 die elektrische Leistung näherungsweise linear reduziert wird. Der Kraftstoffverbrauch wird während der Phasen 1 und 2 vernachlässigt und in Phase 3 für die sich ergebenden VKM-Betriebspunkte aus dem Verbrauchskennfeld ermittelt.

¹¹⁵ Das System des Toyota Prius verwendet bspw. nur ein sehr schmales Zielband für den Ladezustand (siehe Kelly K. J. et al.: Batterie Usage and Thermal Performance of the Toyota Prius and Honda Insight for Various Chassis Dynamometer Test Procedures (in: 17th Battery Conference, Long Beach, 17.-18.1.2002)).

¹¹⁶ Die Leistung kann von der EM über die schleifende Trennkupplung oder von einem separaten Startsystem aufgebracht werden.

$$t_{VKM-Vortrieb}^{min} = t_{VKM}^{min} - t_{Start}^1 - t_{Start}^2 - t_{Start}^3$$

Formel 23 – Dauer des vortriebswirksamen VKM-Betriebs

Es ergibt sich ein effektiver vortriebswirksamer VKM-Betrieb $t_{VKM-Vortrieb}^{min}$ nach Formel 23. Kann jedoch in den Rekuperationsbetrieb übergegangen werden, wird die VKM unabhängig von der Einschaltzeit deaktiviert. Dazu wird auch ein begonnener Start abgebrochen.

8.1.2.2 Minimale VKM-Stillstandzeit

Tabelle 5 – Stillstandzeiten der VKM

Drehzahl vor Stopp der VKM	Minimale Zeit mit elektrischem Betrieb	Bemerkung
$< n_{Schwelle}^{Stopp}$	t_{EM}^{min}	Regelfall
$> n_{Schwelle}^{Stopp}$	t_{EM}^{min2}	

Wird die VKM abgeschaltet, wird ein Wiederstart anschließend je nach Drehzahl der VKM unterschiedlich lange verhindert und eine EM übernimmt den Vortrieb (siehe Tabelle 5). Diese Verhinderung ist dabei ab der Stoppanforderung, also ab Beginn der Drehmomentübergabe an die EM, aktiv. So wird elektrisches Fahren gegenüber Drehmomentrückübergaben priorisiert. Diese Maßnahme dient neben der Verhinderung von kurzfristigen Rückwechselforgängen auch dazu, dass beim Prüfstandbetrieb die VKM sicher zum Stillstand gekommen ist, bevor sie neu gestartet wird. Prüfstandsteuerungen lassen Startvorgänge in der Regel bei drehendem Motor nämlich nicht ohne Zusatzmaßnahmen zu. Innerhalb der Stillstandzeit sind auch zwei Stoppphasen enthalten. Nach einer Drehmomentübergabephase an die EM in t_{Stopp}^1 erfolgt ein drehmomentfreies 'Austrudeln' der VKM. Während der Übergabephase wird die simulierte elektrische Leistung linear auf das Niveau bei elektrischem Fahren gesteigert. Der Kraftstoffverbrauch wird während der Übergabephase näherungsweise für die sich ergebenden VKM-Betriebspunkte aus dem Verbrauchskennfeld ermittelt.

Auch hier sind Ausnahmen möglich. Wenn die Ladung bei elektrischem Fahren unter Q_{Res} sinken oder die EM-Leistung nicht mehr ausreichen würde, wird unabhängig von der Dauer des VKM-Stillstandes sofort ein Start angefordert.

Durch diese Begrenzung ist sichergestellt, dass alle Startanforderungen umgesetzt werden können, weshalb als alleiniges Zielkriterium die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs verbleibt.

8.1.2.2.3 Szenarien mit Fahrerwunschänderung

In realen Fahrsituationen, aber auch in dynamischen Fahrzyklen, kann es vorkommen, dass direkt aus einer Phase mit Drehmomentübergabe an die VKM bzw. aus einer Startphase heraus auf elektrische Rekuperation übergegangen werden soll. Dies bedeutet, dass die VKM frei ausläuft ('austrudelt'). Die elektrische Energie entspricht der bei normaler Rekuperation. Für den nächsten Start gilt der Zeitpunkt des Anfangs der Rekuperation als Stoppzeitpunkt, der anschließend ähnlich einem normalen Stopp behandelt wird. Abweichend vom regulären Stopp wird nach einem 'Change-of-Mind'-Stopp weiterhin das Einschalten der VKM priorisiert. Damit wird entweder rekuperiert oder die VKM sofort wieder angefordert. So wird erreicht, dass durch kurze Schubphasen, die bspw. aufgrund von Schaltvorgängen möglich sind, nicht unnötig lange Phasen mit elektrischem Fahren eingestellt werden. Diese wären meistens nicht sinnvoll und VKM-Anforderungen sind relativ günstig, weil die VKM entweder noch dreht oder zumindest noch nicht auskühlt.

Schwieriger ist die Situation bei einer plötzlichen Startanforderung während oder kurz nach einer Stoppphase. Ist die Drehmomentübergabe noch nicht beendet, erfolgt eine direkte Rückübergabe. Diese wird wie eine Startphase 3 behandelt. Befindet sich die VKM hingegen

bereits in der Auslaufphase, startet die Berechnung wie eine Startphase 1 (siehe Kapitel 8.1.2.2.1). Die Umsetzung dieses Vorgangs, der ja eine Stillstanderkennung und damit eine reguläre Startfreigabe durch die Prüfstandsteuerung verhindert, wird in Kapitel 9.3 behandelt.

8.1.2.3 Regelstrategien bei Begrenzungen durch externe Vorgaben

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Schwellwert für das Kriterium unabhängig vom Fahrprofil festgelegt werden kann, um auch im realen Betrieb einen möglichst geringen Verbrauch erzielen zu können. Zu jedem Zeitschritt kann der Betriebsmodus durch Vergleich der Kriterien aller möglichen Modi mit diesem Schwellwert ausgewählt werden. Auch im realen Fahrbetrieb wird der Modus mit dem größtmöglichen Kriterium, das kleiner als der Schwellwert ist, aktiviert.

Die beschriebenen Begrenzungen ermöglichen prinzipiell unabhängig vom Schwellwert für das Kriterium einen gesicherten Betrieb. Wählt man diesen Schwellwert allerdings ungünstig, kann möglicherweise nicht die gesamte Verzögerungsenergie rekuperiert werden bzw. nicht elektrisch gefahren werden, obwohl die VKM bei schlechtem Wirkungsgrad betrieben wird.

Das zu verhindern, ist Ziel der Strategie 'Lernendes Kriterium': Das Sollkriterium kann laufend an die Fahrsituation angepasst werden. Im Praxisbetrieb kann so eine Anpassung entweder in vordefinierten Intervallen oder im Nachlauf nach Abstellen des Fahrzeugs erfolgen. Somit 'lernt' das System und passt sich dem Verhalten seines Fahrers an. Im Gegensatz zum eher stochastischen Betrieb im Straßenverkehr wiederholt sich bei der Simulation von Fahrzyklen immer wieder dieselbe Fahrsituation. Um die Auswirkungen der Anpassung daher jeweils in einem Zyklus zu erkennen, wird die Fahrzyklusdauer als Standard für das Anpassungsintervall gewählt.

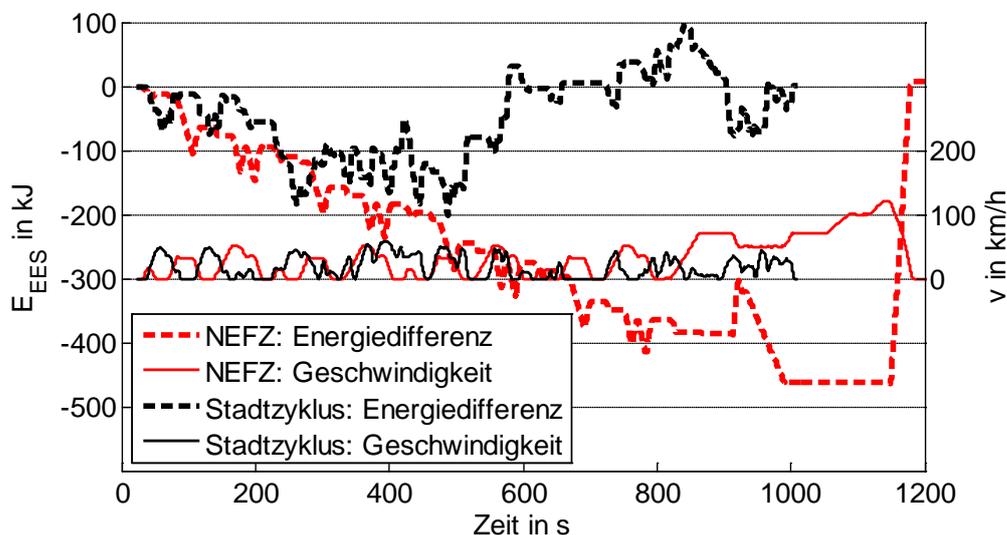


Abbildung 57 – Simulierte Energiebilanz im NEFZ und Stadtzyklus ohne LPM (AUT-REF, VKM2BAS)

Diese im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und angewandte Anpassungsstrategie beruht dabei auf der Beobachtung, dass die Situationen in den Fahrzyklen beim ermittelten Grenzpotenzial praktisch immer einer Kategorie zugeordnet werden können. Zyklen mit hohem Speicherhubbedarf haben ausgeprägte Rekuperationsphasen (Beispiel NEFZ in Abbildung 57), während Zyklen mit kleinem Speicherhubbedarf diese nicht aufweisen (Beispiel Stadtzyklus in Abbildung 57). Will man für alle Zyklen denselben EES einsetzen, kann man dessen Ausnützung in den Zyklen mit ausgeprägten Rekuperationsphasen erreichen, indem man fordert, dass während eines entsprechend großen Zeitanteils ZA_u die

Ladung im unteren Bereich der Kapazität (unter Q_u) bleibt. Für die anderen Zyklen schränkt das wenig ein, weil dort die Kapazität ohnehin nicht ausgenutzt wird.

Ist der Zeitanteil, in dem die Ladung im unteren Bereich der Kapazität (unter Q_u) bleibt, nun zu gering, kann der Schwellwert für das Kriterium gesenkt werden, was zu mehr elektrischem Fahren führt. Ist dieser Zeitanteil hingegen zu hoch, erhöht man den Schwellwert. Ohne LPM bildet der Schwellwert ja den maximalen, auf die Leistung am EES beim elektrischen Fahren bezogenen Kraftstoffaufwand, der beim VKM-Betrieb entsprechend dem konventionellen Fahrzeug auftritt. Je höher dieser sein darf, desto öfter wird die VKM aktiviert.

Es hat sich herausgestellt, dass Definitionen der Parameter gefunden werden können, die zu guten Ergebnissen in allen Zyklen unabhängig vom Anfangsladezustand und Anfangsschwellwert für das Kriterium führen. Die Adaption des Schwellwerts wird in kleinen Schritten (Schrittweite ΔK_{crit}) durchgeführt, weshalb je nach Startwerten sehr viele Zyklen nötig sind, bis sich ein stabiler Zustand einstellt. Als stabil wird auch ein Verhalten betrachtet, bei dem wieder die Ausgangslage eines vorherigen Durchlaufs erreicht wird.

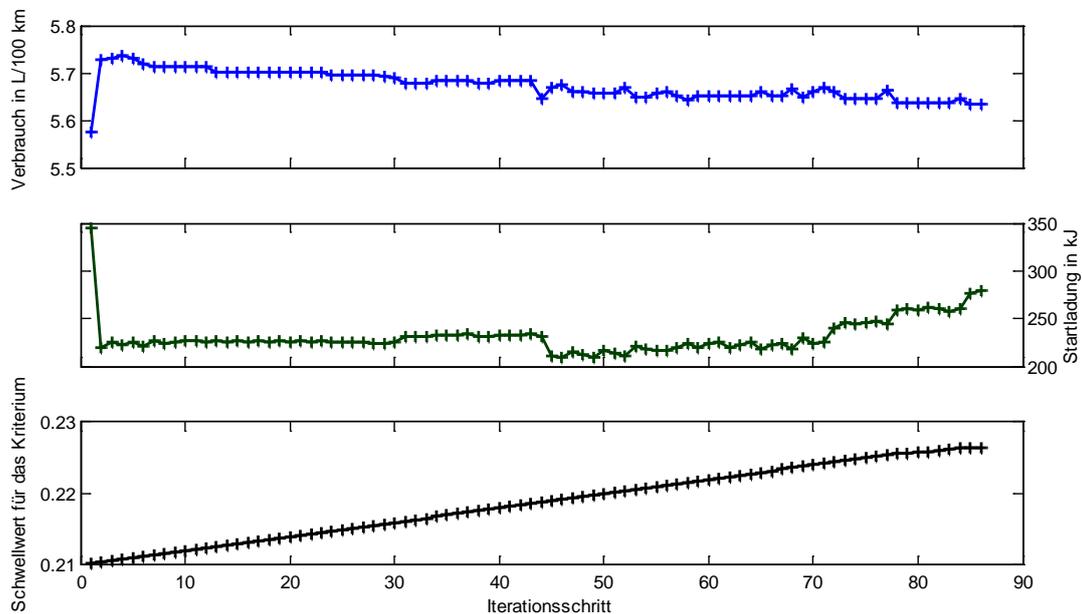


Abbildung 58 – Adaption des Kriteriums (Stadtzyklus, AUT-REF, VKM2BAS)

Abbildung 58 zeigt für einen ausgewählten Zyklus den Einlernvorgang. Es fällt auf, dass die Verbrauchswerte auch bei vom eingeregelteten Zustand abweichenden Kriterien nicht entscheidend schlechter sind. Das Verfahren an sich funktioniert unabhängig vom Fahrzyklus. Es können auch die Endwerte eines Zyklus als Startwerte für einen anderen herangezogen werden.

8.2 Vereinfachte Varianten

Beide hier vorgestellten Varianten reduzieren den Abstimmungsaufwand gegenüber dem 'Lernenden Kriterium' erheblich. Sie kommen auch ohne Einlernvorgang aus, womit sich das relevante Ergebnis schon nach wenigen Zyklen mit Erreichen eines stabilen Ladezustands ergibt.

8.2.1 Konstanter Schwellwert

Wenn die Verbrauchsergebnisse, wie bspw. im Stadtzyklus nach Abbildung 58 erkennbar, trotz abweichender Schwellwerte für das Kriterium nur wenig vom eingeschwungenen Zustand abweichen, kann auch auf die Adaption verzichtet und stattdessen ein konstanter

Schwellwert verwendet werden. Dieser nimmt dabei bspw. den niedrigsten Wert an, den er in den verschiedenen Zyklen eingeschwungen erreicht. Dadurch wird in den anderen Zyklen häufiger elektrisches Fahren aktiviert. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität ist elektrisches Fahren dann teilweise nicht möglich und wird verhindert. Die Rekuperation hingegen wird nicht eingeschränkt.

8.2.2 Verzicht auf Kriterium (elektrisch Fahren, wenn möglich)

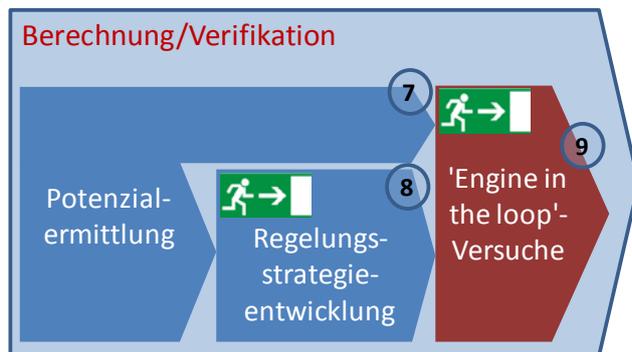
Schließlich ist auch noch eine extreme Variante des konstanten Schwellwerts möglich. Dabei wird auf eine Festlegung ganz verzichtet. Stattdessen wird gefordert immer den Betrieb mit dem minimal möglichen Momentanverbrauch einzustellen. Es kommt daher zu elektrischem Fahren, wenn immer es trotz der Einschränkungen durch den Ladezustand und die maximale elektrische Leistung möglich ist. Hier wird das Rekuperationspotenzial bestmöglich ausgereizt, weil der EES immer möglichst leer ist. Diese sehr einfache Strategie kann ohne Kenntnis des Verbrauchskennfeldes, ohne Bewertung der Betriebspunkte und ohne Kriteriumsrechnung auskommen.

8.3 Erkenntnis aus der Regelungsstrategieentwicklung

Mittels der vorgestellten Regelung auf Basis einer Bewertung der Betriebspunkte mittels eines Gütekriteriums ist es möglich auch bei begrenztem Speicherhub den Betrieb des Hybrid-Systems sicherzustellen. Die errechneten Verbrauchsergebnisse sind unabhängig vom Fahrzyklus im eingeschwungenen Zustand nur unwesentlich höher als das Grenzpotenzial.

Es sind auch Vereinfachungen bei der Betriebsstrategie möglich, die auf eine Adaption verzichten.

9 'Engine in the loop'-Versuche



Zuordnung Kapitel 9

Ziel der Verifikation im Rahmen einer frühen Entwicklungsphase ist die Absicherung der Simulationsergebnisse hinsichtlich des VKM-Verhaltens ohne realen Aufbau des Gesamtsystems. Außer der VKM sollen keine weiteren Komponenten des simulierten Systems benötigt werden.

Bis auf die ECU sollen auch keine Steuergeräte benötigt werden, weil sonst Prototypen benötigt werden und auch die entsprechende Kommunikation der Steuergeräte untereinander sichergestellt werden muss. Außerdem braucht gerade das Hybridsteuergerät zu jedem Zeitschritt Informationen über die Fahrgeschwindigkeit und die Ladung des EES, um die möglichen Betriebsmodi zu beurteilen. Dazu wird dann eine echtzeitfähige Simulation aller Vorgänge außerhalb der getesteten Hardware benötigt.

Im Gegensatz dazu soll der hier gewählte Offline-EiL-Ansatz nur die Infrastruktur von typischen transienten Motorprüfständen nutzen.¹¹⁷

Die Verifikation erfolgt somit durch EiL-Messungen, die so einfach wie möglich durchgeführt werden. Der benötigte Aufwand wird auch hinsichtlich der Messtechnik gering gehalten. Die spätere Übertragbarkeit in die Fahrzeuganwendung soll durch zwei Maßnahmen gewährleistet werden: Einerseits ist zu Beginn die Basisfahrzeugabbildung detailliert zu kontrollieren (siehe Kapitel 9.1) und andererseits werden bei den EiL-Versuchen die relevanten gesetzlichen Normen für Pkw-Fahrzeugvermessungen sorgfältig auf die eingesetzte Standardmesstechnik übertragen und wenn notwendig durch vergleichbare Normen für ähnliche Bereiche oder spezielle Korrekturverfahren ergänzt (siehe Kapitel 4).

9.1 Kontrolle der Basisfahrzeugabbildung

Für das nicht hybridisierte Basisfahrzeug werden im Rahmen der Berechnungen Ergebniswerte generiert. Die Beurteilung der Qualität der vorausberechneten Hybridfahrzeugergebnisse kann nur im Vergleich zur Qualität der Basisfahrzeugabbildung erfolgen.

Deshalb müssen auch Messungen auf Basis der Drehzahl- und Drehmomentverläufe durchgeführt werden, die als Eingangsgrößen für das Simulationsprogramm verwendet werden. Die Durchführung und Auswertung erfolgt analog zur Nachbildung der Potenzialergebnisse, nur dass keine Betriebsarten außer dem Normalbetrieb berücksichtigt werden müssen. Alle Einstellungen bezüglich Starts und Stopps der VKM, sowie für Schubphasen sind daher gleich definiert (siehe Kapitel 9.2).

¹¹⁷ Im Postprocessing-Programm können entsprechende Funktionen integriert werden, die für das Prüfstandsystem EiL-Steuersätze generieren.

Wenn die Berechnungen auf einem realen Fahrzeug basieren und Versuchsergebnisse von einem Rollenprüfstand verfügbar sind, können die Ergebnisse auch mit diesen verglichen werden. Damit ist dann neben der Hochrechnung auch das Längsdynamikmodell verifizierbar.

9.2 Verifikation der Potenzialergebnisse

In Kapitel 7 gelten keine Einschränkungen hinsichtlich der Möglichkeiten aller Komponenten Betriebsartenwechsel durchzuführen. Für die EiL-Versuche zu den Grenzpotenzialergebnissen sind daher Anpassungen erforderlich.

Die hier beschriebenen Adaptionen ermöglichen einen Betrieb der VKM am Prüfstand, der weitgehend dem Potenzialergebnis entspricht. Die Parameter müssen wie die für reale Betriebsstrategien in Kapitel 8.1.2.2 an die jeweilige Simulationsaufgabe angepasst werden. Hinsichtlich der minimalen Zeiten ohne VKM-Betrieb und der Start- und Stoppumsetzung können dabei übereinstimmende Werte angewandt werden (siehe Kapitel 10.3.12).

9.2.1 Minimale Betriebs- und Stillstandzeiten der VKM

Sehr kurze Phasen mit verbrennungsmotorischem Betrieb oder elektrischem Fahrbetrieb werden durch die jeweils andere Betriebsart ersetzt: Wird die VKM kürzer als die Zeit t_{VKM}^{min118} angefordert, wird diese Anforderung ignoriert. Die Leistungsanforderung an das elektrische System wird entsprechend korrigiert. Anschließend werden Ausschaltanforderungen, die kürzer als t_{EM}^{min} (bzw. t_{EM}^{min2} für Auskuppeldrehzahl über $n_{Schwelle}^{Stopp}$) nicht umgesetzt. Die entsprechenden Phasen werden durch Normalbetrieb (wie beim Referenzzyklus) ersetzt.

9.2.2 Zusammenfassen von Phasen mit Betriebsartenwechsel

Häufige Betriebsartenwechsel innerhalb kurzer Zeit beim Potenzialergebnis, würden ohne weitere Maßnahmen durch elektrisches Fahren ersetzt werden, weil die VKM-Anforderungszeiten zu kurz sind. Das kann zu größeren Abweichungen vom idealen Ladezustand führen und deshalb wird jeweils für die Zeitspanne t_{BAW} analysiert, ob es während eines Zeitanteils dieser Zeitspanne von mindestens Z_{BAW} zum Ersatz von VKM-Betrieb kommen würde. In diesem Fall wird die Phase durch eine mit elektrischem Fahren ab der ersten Abschaltanforderung und eine anschließende mit VKM-Betrieb ersetzt, wobei die Zeitanteile entsprechend denen beim ursprünglichen Simulationsergebnis gewählt werden.

¹¹⁸ Bei den hier verwendeten Parametern bezeichnet die Variable selbst, welche physikalische Größe der Parameter repräsentiert. Dazu kommen bis zu vier Indizes, die in dieser Arbeit wie bei den Mess- und Rechenwerten rund um die Variable zur Unterscheidung angeführt werden. Über diese Parameter können die EiL-Vorgaben so abgestimmt werden, dass die VKM am Prüfstand in der Lage ist, diesen ohne Auftreten von Fehlfunktionen zu folgen. Die im Rahmen der Arbeit experimentell ermittelten Werte der Parameter sind in ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter) angegeben.

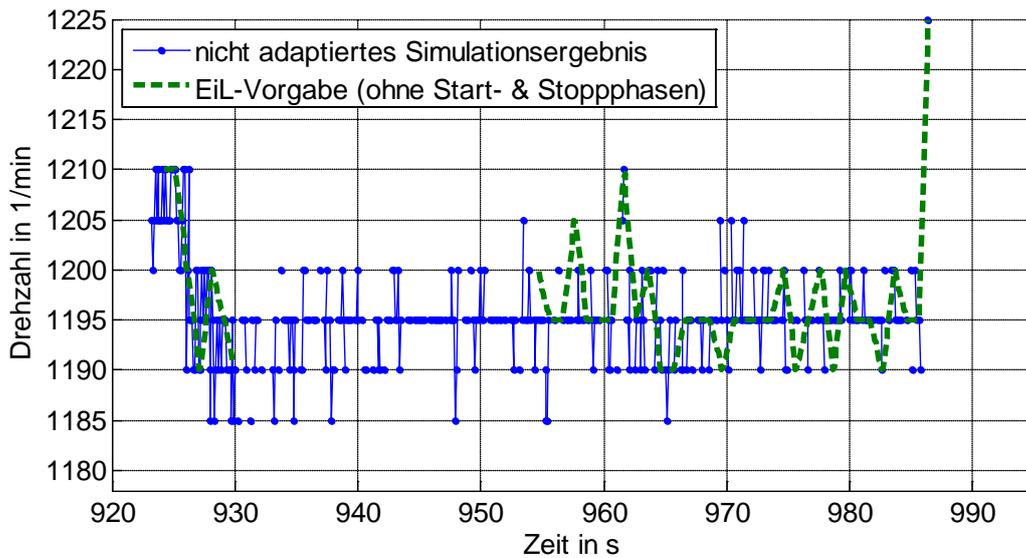


Abbildung 59 – Zusammenfassung (Drehzahl)

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen für einen Ausschnitt aus dem NEFZ die Auswirkungen dieser Maßnahme auf die ermittelten und auf ein größeres Zeitraster für die EiL-Versuche übertragenen Sollverläufe von Drehzahl bzw. Drehmoment. Beim nicht adaptierten Simulationsergebnisse werden die eingezeichneten Linienabschnitten dabei immer wieder durch sehr kurze Phasen mit elektrischem Fahren unterbrochen. Durch die Adaption entstehen lediglich zwei Abschnitte. Zuerst elektrisches Fahren (ca. zwischen 930 und 955 s) und anschließend VKM-Betrieb.

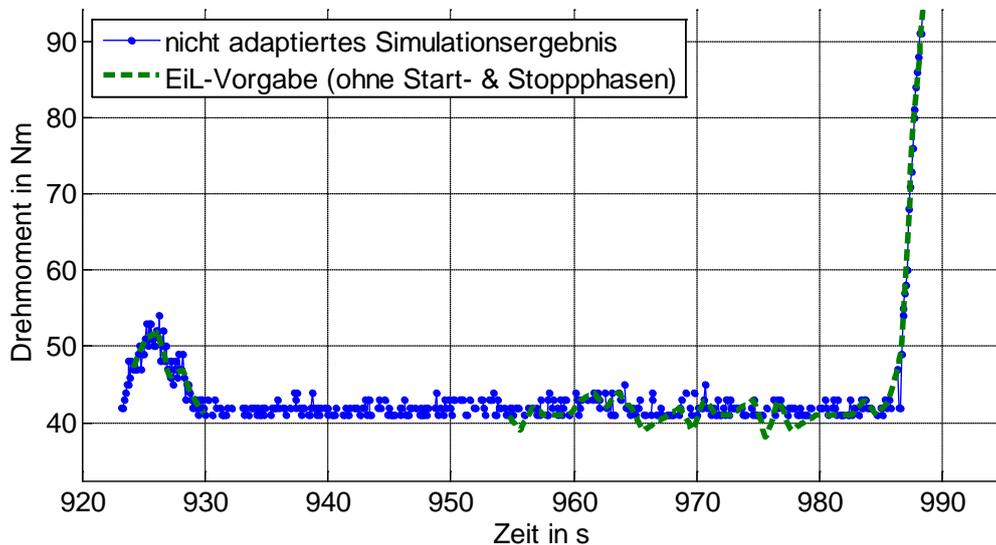


Abbildung 60 – Zusammenfassung (Drehmoment)

Für den Übergang auf bzw. von veränderten Momentanforderungen im Fall von LPM gilt sinngemäß das gleiche Procedere: Für die jeweiligen Beurteilungszeiträume $P_{t_{LPM}}$ müssen zumindest während des Zeitanteils $P_{ZA_{LPM}}$ LPM angefordert sein, sonst werden die Anforderungen nicht umgesetzt. Sind über mindestens entsprechend einem Anteil $P_{ZA_{LPM2}}$ LPM angefordert, wird für die Zeit bis zur letzten Anforderung ebenfalls ein verändertes

Moment, das durch Interpolation ermittelt wird, eingestellt. Kommt es anschließend an die oder während der Übergangsphase wieder zu einer LPM-Anforderung, wird für die gesamte Dauer ein interpoliertes Moment angewandt. Für Anteile zwischen $P_{ZA_{LPM}}$ und $P_{ZA_{LPM2}}$ wird die Phase in zwei Teile aufgeteilt. Deren Dauer ist wieder proportional zu den Zeitanteilen bei ursprünglichen Simulationsergebnis: Zuerst gibt es eine Phase mit verändertem Drehmoment, dann eine mit Basismoment. Außerdem gibt es jeweils eine Übergangsphase der Dauer $P_{t_{LPM}^{\ddot{U}}}$ mit interpolierter Drehmomentanforderung.

9.2.3 Starten und Stoppen der VKM

Die Start- und Stoppstrategien werden wie folgt festgelegt: Bei der Nachbildung des Grenzpotenzials erfolgt der Start am Prüfstand vor dem simulierten Einkuppelzeitpunkt (erste VKM-Anforderung im nach Kapitel 9.2.2 adaptierten Simulationsergebnis) durch Schleppen mit der aktiven Bremse bei eingeschalteter Zündung und Gaspedalstellung $P_{PED_{Start}^1}$ für die Dauer $P_{t_{Start}^1}$ auf eine Drehzahl von $P_{n_{Start}^1}$.¹¹⁹ Dieser 'Vorstart' der VKM ermöglicht ein möglichst genaues Nachbilden in den Phasen mit errechnetem VKM-Betrieb. Somit liegen alle Abweichungen im Bereich der grundsätzlich ohne Hardwarefestlegung nicht exakt nachbildbaren Startphase. Simuliert wird so analog zur Realisierung bei realen Regelstrategien ein nach dem Start drehmomentfreier Hochlauf der VKM, wie er bei geöffneter Kupplung im PH-Fahrzeug realisiert werden könnte.

Durch die Gaspedalanforderung wird von der ECU die Kraftstoffeinspritzung aktiviert. Im Hybridfahrzeug müsste Leistung entweder von der EM über die Kupplung an die VKM übertragen oder von einem separaten Startsystem aufgebracht werden, bis die VKM sich nach der Einspritzfreigabe selbst beschleunigen kann.

Danach soll die Drehzahl in einer Dauer von $P_{t_{Start}^2}$ möglichst drehmomentfrei auf die aktuelle Vortriebsdrehzahl eingeregelt werden. Da Drehzahl-Drehmoment-Regler von Standard-Motorenprüfständen dazu nicht ausreichend schnell in der Lage sind, kann dies mittels Drehzahl-Gaspedal-Regler simuliert werden. Experimentell wird dazu die für näherungsweise drehmomentfreien Betrieb im typischen Einkuppeldrehzahlbereich notwendige Gaspedalstellung $P_{PED_{Start}^2}$ festgelegt. Danach erfolgt eine Phase der Drehmomentübergabe (Dauer $P_{t_{Start}^3}$), während der das Verbrennungsmotorsollmoment an das angeforderte Vortriebsmoment herangeführt wird.¹²⁰

Die Stoppstrategie besteht wieder aus einer Drehmomentübergabe (Dauer $P_{t_{Stopp}^1}$) und einem anschließenden Austrudeln bei ausgeschalteter Zündung.

Durch diese Änderungen ergeben sich beim Grenzpotenzialergebnis Abweichungen vom idealen Ladezustand, weil in Phasen der Drehmomentübergabe die EM nicht genau mit der Leistung des Idealzyklus arbeitet. Die veränderte Energiemenge wird bei der Ermittlung des simulierten Verbrauchs entsprechend berücksichtigt. Da ohne Festlegung der konkreten Startmethode und der dafür verwendeten Systeme keine verlässliche Aussage über den Leistungsbedarf für den Start möglich ist, wird die eigentliche Startenergie nicht berücksichtigt.

Die endgültig eingesetzten Startprozeduren können mit dem Standardstart im Versuchsfahrzeug verglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass der Start im simulierten Hybrid-Fahrzeug nur bedingt mit dem Start über den Anlasser im Basisfahrzeug verglichen werden kann. Weil die Situation mit möglichem Start über die Kupplung aber mit den

¹¹⁹ Um Beeinflussungen auszuschließen, ist die Wirksamkeit des Leerlaufreglers applikativ auf Drehzahlen unter $P_{n_{Start}^1}$ zu begrenzen.

¹²⁰ Bei den zu Beginn der Untersuchungen vermessenen Basiszyklen ist teilweise noch ein Start über den Anlasser der VKM definiert (siehe auch Kapitel 10.3.13). Dabei ergibt sich eine verlängerte Startdauer, weil auch die aktive Bremse beschleunigt werden muss. Für das Gesamtergebnis kann dies vernachlässigt werden, da im Basisbetrieb nur ein Start auftritt.

vorhandenen Informationen nicht berechenbar ist, kann nur näherungsweise angenommen werden, dass die VKM eine ähnliche Drehbeschleunigung wie über den Anlasser erfahren wird. Weil im simulierten PH-Fahrzeug der Wandler beim Start nicht beschleunigt werden müsste, kann der Hochlauf voraussichtlich sogar etwas schneller erfolgen.

9.3 Verifikation der Ergebnisse der Regelungsstrategieentwicklung

Mit der Definition der Einschränkungen in Kapitel 8.1.1 erhält man Vorgaben für die VKM, die prinzipiell ohne Adaptionen auch mittels EiL-Tests umgesetzt werden können. Im Gegensatz zur Nachbildung des Grenzpotenzials sind keine 'Vorstarts' notwendig. Die in Kapitel 8.1.2.2 definierten Startphasen werden analog zur Nachbildung für das Grenzpotenzial mittels Drehzahl-Gaspedalregler realisiert. Die Gaspedalstellungen PED_{Start}^1 und PED_{Start}^2 werden analog zu ${}^P P_{\text{Start}}^1$ und ${}^P P_{\text{Start}}^2$ definiert (siehe Kapitel 9.2.3).

Lediglich bei Starts aus der Auslaufphase ist ein spezielles Vorgehen notwendig: Hier muss die Stoppanforderung durch eine Drehzahlvorgabe $n_{\text{Start}}^{\text{COM}}$ im Bereich des Auslaufens (ohne Lastanforderung) ersetzt werden, wenn die Automatisierung einen vollständigen Abschluss von Stopps erfordert. Dabei ist darauf zu achten, dass durch niedrige Drehzahlen Schwingungsanregungen im Bereich der Eigenfrequenzen des Antriebsstrangs in der Prüfstandkonfiguration möglich sind. Werden solche Schwingungen erkannt, muss $n_{\text{Start}}^{\text{COM}}$ angehoben werden.¹²¹ Es kommt im Schubbetrieb zu geringen Abweichungen hinsichtlich der Massenströme und Temperaturen, sowie anschließend zu reduziertem Energiebedarf bis zum Erreichen der Synchronisation. Diese Abweichungen werden vernachlässigt, weil diese Phase aufgrund des im Vorentwicklungsprozess noch nicht exakt bekannten Systemverhaltens grundsätzlich nur näherungsweise nachgebildet werden kann.

9.4 Stoppparameter des Prüfstandsystems

In der Prüfstandautomatisierung PUMA müssen für den Stopp zwei verschiedene Parameter definiert werden: Das Stoppmoment $md_{\text{Stopp}}^{\text{PUMA}}$ ist das negative Moment, das durch die elektrische Bremse am Beginn der Stoppanforderung erzeugt wird. Ziel hier ist es, dass dieses Moment möglichst dem Trägheitsmoment der Bremse entspricht, damit möglichst kein Moment über die Kurbelwelle übertragen wird. Den zweiten Parameter bildet die Drehzahl der Stillstanderkennung $n_{\text{Stillstand}}^{\text{PUMA}}$. Dieser Wert wird von PUMA benötigt, um eine stillstehende VKM zu detektieren. Sinkt die Drehzahl darunter ab, wird von PUMA das maximale Bremsmoment eingestellt. $n_{\text{Stillstand}}^{\text{PUMA}}$ muss kleiner als $n_{\text{Start}}^{\text{COM}}$ gewählt werden.

9.5 Berücksichtigung von Abweichungen bei der Zyklusarbeit

Die Verbrauchswerte können noch auf Basis der Abweichung der Ist-Arbeit der VKM von der geforderten korrigiert werden, um die Streuung zu reduzieren (Formel 24). Dabei wird die Änderung des Kraftstoffverbrauchs näherungsweise linear abhängig von der Energieabweichung angenommen. Das entspricht der Annahme, dass die Differenzarbeit mit dem mittleren Wirkungsgrad der effektiv geleisteten Arbeit bewertet werden kann. Da Leistungssteigerungen aber die Reibung generell nicht erhöhen, werden so die korrigierten Verbrauchswerte für Zyklen mit zu geringer Gesamtzyklusarbeit tendenziell überbewertet, die von Zyklen mit erhöhter Zyklusarbeit dagegen unterbewertet. Phasen mit Schubbetrieb bei Soll- und Ist-Verläufen sowie die ersten beiden Startphasen (siehe Kapitel 9.2.3) werden unabhängig von der tatsächlichen Leistung nicht für die Korrektur berücksichtigt.

¹²¹ Auch hier darf der Leerlaufregler der VKM nicht eingreifen. Dessen Funktion ist demnach auf Drehzahlen unter $n_{\text{Start}}^{\text{COM}}$ einzuschränken.

$$\text{Methode}_{V_{Kr}}^A = \text{Methode}_{V_{Kr}} \times \frac{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- bzw. Schubphasen}} \text{Soll}_n \times \text{Soll}_{mddt}}{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- bzw. Schubphasen}} \text{Messung}_n \times \text{Messung}_{mddt}}$$

Formel 24 – Korrektur auf Basis der Zyklusarbeit

Wenn Sollwertverläufe aus Indizierdaten berechnet werden, ist die Überführung in Drehmomente mit Unsicherheiten behaftet. Dann kann die Umrechnung auch auf Basis der indizierten Arbeit nach Formel 25 erfolgen.

$$\text{Methode}_{V_{Kr}}^{A_{ind}} = \text{Methode}_{V_{Kr}} \times \frac{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- \& Schubphasen}} \text{Soll}_n \times \text{Soll}_{p_{ind}dt}}{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- \& Schubphasen}} \text{Messung}_n \times \text{Messung}_{p_{ind}dt}}$$

Formel 25 – Korrektur auf Basis der indizierten Zyklusarbeit

Eine genauere Korrektur ist durch Bezug auf die Differenz aus der Zyklusarbeit und einer fiktiven, aus der zur jeweiligen Drehzahl ermittelnden Leistung im Schleppbetrieb errechneten Schlepparbeit möglich. Diese Leistungsdifferenz wird ja tatsächlich vom eingesetzten Kraftstoff verursacht. Da im Rahmen dieser Arbeit die Vergleichbarkeit mit Versuchen mit Kaltstarts, für die keine Informationen bezüglich der Schleppleistungen vorliegen, nur näherungsweise notwendig ist, wird dieser Ansatz nach Formel 26 durchgängig verfolgt.

$$\text{Methode}_{V_{Kr}}^{\Delta A} = \text{Methode}_{V_{Kr}} \times \frac{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- \& Schubphasen}} \text{Soll}_n \times (\text{Soll}_{md} - md_{Schlepp}(\text{Soll}_n)) dt}{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- \& Schubphasen}} \text{Messung}_n \times (\text{Messung}_{md} - md_{Schlepp}(\text{Messung}_n)) dt}$$

Formel 26 – Korrektur auf Basis der Differenz der Zyklusarbeit zur Schlepparbeit

Die Simulationsergebnisse für das Potenzial müssen wegen der Adaptionen (siehe Kapitel 9.2) für Vergleiche mit Messungen ebenfalls angepasst werden. Dies erfolgt durch Neuberechnung des Verbrauchsergebnisses $HR_{V_{Kr}}^A$ mittels Kennfeldauswertung bei den adaptierten Werten für Drehzahl und Drehmoment. Durch veränderte elektrische Leistungen ist die Energiebilanz am EES nicht mehr ideal ausgeglichen. Will man ermitteln, wie groß der Verbrauch mit diesen Änderungen bei ausgeglichener Bilanz wäre, kann man näherungsweise die erwarteten elektrischen Energiedifferenz in Analogie zu Kapitel 7.2.3 auf Basis des Schwellwertes des Kriteriums nach Formel 27 umrechnen. Dabei wird auch gleich die verbleibende Energiedifferenz gegenüber der ideal ausgeglichenen Bilanz beim Simulationsergebnis mit berücksichtigt. Näherungsweise wird dabei davon ausgegangen, dass für die zusätzlichen bzw. weggelassenen Maßnahmen zur Leistungssteigerung am EES dieselben Verhältnisse hinsichtlich der Wirkungsgradkette vorherrschen, wie bei den schlechtesten noch aufgrund des nicht adaptierten Simulationsergebnisses aktivierten.

$$\text{HR}_{V_{Kr}}^{A_{ausg}} = \text{HR}_{V_{Kr}}^A - \frac{\int_{t \text{ au\ss}er \text{ Start- \& Schubphasen}} \text{EiL-Vorgabe} P_{EES} - \text{HR} P_{EES} dt + \text{HR} \Delta E_{EES}}{3600} \times \frac{^U \text{Schwellwert}_{Krit}}{s \times \rho_{Kr}}$$

mit $\int \text{EiL-Vorgabe} P_{EES} = [\text{HR} P_{EES}] = \text{kW}$, $[\text{HR} \Delta E_{EES}] = \text{kJ}$ und $[\text{Schwellwert}_{Krit}] = \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

Formel 27 – Korrektur für Potenzial-Simulationsergebnis mit ausgeglichener Bilanz¹²²

¹²² Der für die Umrechnung angewandte Schwellwert des Kriteriums wird je nach Vorzeichen der gesamten Energiedifferenz nach gewählt: Dadurch wird berücksichtigt, dass zu viel gespeichert Energie bedeutet, dass die schlechtesten Möglichkeiten zur Leistungssteigerung am EES, für die die Werte des Kriteriums gerade noch unter dem Schwellwert liegen, entfallen könnten, bzw. dass zu wenig Energie bedeutet, dass noch schlechtere Möglichkeiten aktiviert werden müssten, was durch Erhöhung des Schwellwertes um die letzte Iterationsschrittweite näherungsweise berücksichtigt wird.

Notwendig ist diese betragsmäßig kleine Korrektur nur bei Vergleichen mit sehr ähnlichen Simulationsergebnissen (bspw. beim Potenzialvergleich mit bzw. ohne LPM in Kapitel 10.3.12).

Für die gemessenen Emissionen werden keine derartigen Verfahren eingesetzt, weil dort keine einfachen Korrelationen bekannt sind.

9.6 Gemeinsame Speicherung transienter Messdaten

Bei allen Messungen erhält man je einen Rekorder vom Prüfstandsmesssystem bzw. vom Applikationssystem. Daneben liegen Simulationsergebnisse, sowie Referenzgeschwindigkeitsverläufe vor. Synchronisiert werden diese anhand der jeweiligen Drehzahlspuren mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wobei Stillstandsphasen nicht berücksichtigt werden.

Um die ECU-Daten vom Applikationssystem, die in unterschiedlichen Zeitrastern vorliegen können, gemeinsam abspeichern und auszuwerten, wird die Matlab-Funktion 'mdfimport' verwendet.¹²³

9.7 Absicherung durch Wiederholungsmessungen

Alle Messungen unterliegen statistischen Schwankungen. Einerseits werden Verbrauch und Emissionen von verschiedenen durch Korrekturen nicht erfassten Faktoren wie bspw. Raum- und Bauteiltemperaturen zum Startzeitpunkt beeinflusst. Andererseits unterliegen auch die Messgeräte äußeren Einflüssen. Dazu zählen bspw. Kalibrierfehler und Drifteffekte.

Um die Auswirkungen der Schwankungen auf das Gesamtergebnis zu minimieren werden im Rahmen der Möglichkeiten Wiederholungsmessungen durchgeführt und die synchronisierten Ergebnisse gemittelt.

Auf die Korrelation der EiL-Ergebnisse mit den Hochrechnungen wird im Rahmen von Kapitel 10 eingegangen.

¹²³ www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9622-mdf-import-tool-and-function (Zugriff: 1.3.2001)

10 Anwendung und Ergebnisse

In diesem Kapitel sind Ergebnisse von Simulationen und Messungen beschrieben. Dabei handelt es sich um Ergebnisse des Prozesses nach Kapitel 2. Zu beachten ist, dass im Rahmen dieser Arbeit nicht für alle der folgenden Anwendungen der gesamte Prozess durchlaufen worden ist.

Einen Überblick über die durchgeführten und vorgestellten Untersuchungen zeigt Tabelle 6: Spalte A verweist auf die Kapitel, die die theoretischen Grundlagen für die Untersuchung enthalten. Die Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln enthalten (siehe Zeile 1).

Welche Basis jeweils verwendet wird, geht aus den Zeilen 2 und 3 hervor.¹²⁴

In den Zeilen 4, 5 und 6 bis 15 ist jeweils die Anzahl der verschiedenen Fahrzyklen angegeben, für die die Rechnung oder Messung durchgeführt worden sind. Rote Felder kennzeichnen dabei nicht durchgeführte Teilaufgaben. Gründe für diese Auswahl gehen aus den Unterkapiteln hervor.

In Zeile 6 wiederum entfällt die Angabe der Anzahl, weil es sich bei der VKM-Korrelationsmessung um eine stationäre, fahrzyklusunabhängige Aufgabe handelt.

Tabelle 6 – Anzahl der untersuchten Fahrzyklen mit Zuordnung zu den Kapiteln

	A	B	C	D	E	F	G
1	Theorie	Kapitel mit Ergebnissen	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5
2	5	Basisfahrzeug	MAN-REF	DCT1-SIM	AUT-REF	AUT-REF	DCT2-SIM
3	6	Motor	VKM1BAS	VKM1BAS	VKM2BAS	VKM2EVO	VKM2EVO
4	5	Fahrzeugvarianten		3			
5	6	Hybridsystemvariation		1	6	3	
6	6	VKM-Korrelationsmessung					
7	5	Längsdynamiksimulation	1	3	6		3
8	5	Fahrzeugvermessung	1		6		
9	5	Modellabgleich	1		6		
10	7	Grenzpotenzialermittlung Verbrauch		3	6	3	3
11	7	Grenzpotenzialermittlung NO _x			6	1	3
12	7	Grenzpotenzialermittlung Kombinationsziel			1	1	
13	8	Betriebsstrategieermittlung Verbrauch			6	3	
14	9	EiL Grenzpotenzial Verbrauch			6		
15	9	EiL Betriebsstrategie Verbrauch			6		3

In den Unterkapiteln folgt die Ergebnisaufbereitung grundsätzlich der Prozessdefinition aus Kapitel 2. Die wichtigsten verwendeten Eingangsparameter und Prozesspfade werden immer

¹²⁴ Die verwendeten Abkürzungen werden bei den jeweiligen Kapiteln definiert und erläutert. Hier dienen sie nur zur Übersicht, um zu erkennen, welche Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen den Varianten bestehen.

angeführt. Informationen zu den weiteren Daten und Parametern enthält ANHANG G (Zusätzliche Eingangsdaten und CRUISE-Simulationseinstellungen). Die Berechnungen und Messungen nach Tabelle 6 bilden den Hauptpfad des in dieser Arbeit beschriebenen Vorentwicklungsprozesses für Diesel-Hybrid-Pkw. Anschließend zeigt Unterkapitel 10.6 anhand ausgewählter Nutzfahrzeuge, dass die Methodik auch über diesen Bereich hinaus anwendbar ist.

Bei den Ergebnissen entfallen die Zwischenschritte der reinen Basisfahrzeugabbildung, soweit sie nicht spezielle Modellanpassungen erfordern. Für die durch EIL-Versuche abgesicherten Simulationsrechnungen werden die Messergebnisse gemeinsam mit den Simulationsergebnissen dargestellt.

Simulierte Verbrauchs- und Emissionswerte beschreiben das erwartete Verhalten bei betriebswarmer VKM ohne Abgasnachbehandlung.¹²⁵

Detaillierte Quervergleiche zwischen den einzelnen Ergebnissen sind nur dort möglich, wo übereinstimmende Randbedingungen vorliegen. Die Darstellung erfolgt jeweils als Vergleich einzelner Entwicklungsschritte in Kapitel 11.

10.1 Referenzfahrzeug mit Handschaltgetriebe

10.1.1 Basisfahrzeug MAN-REF

Als Bezugsbasis für die Untersuchungen hinsichtlich der Hybridisierung wird ein konventionelles Fahrzeug verwendet, für das bereits zu Beginn Simulations- und Messergebnisse vorliegen. So kann sichergestellt werden, dass bei der Entwicklung und Überprüfung der Methode realitätsnahe Ergebnisse erwartet werden können.

Tabelle 7 – Fahrzeugdaten MAN-REF

Antrieb	Motor	Getriebe	SMK	F_0	F_1	F_2	DRR	J_{Reifen} ¹²⁶
			kg	N	Ns/m	Ns ² /m ²	m	kgm ²
Front	VKM1BAS ¹²⁷	manuell, 6 Gänge	1810	163.06	2.7551	0.3808	0.33	1

Die ersten Untersuchungen basieren auf dem Serien-Mittelklassefahrzeug mit manuellem Handschaltgetriebe (MAN-REF). Die wichtigsten Fahrzeugparameter listet Tabelle 7 auf.

Die Längsdynamiksimulation ist mit Rollenprüfstandergebnissen abgestimmt worden. Durch Adaptionen des maximalen Simulationszeitschritts und der Fahrerparameter kann ein Simulationsergebnis mit realistischem Drehmomentverlauf ohne sprungartige Änderungen erzielt werden.

Die Berechnung von hybridisierten Varianten dieses Fahrzeugs erfolgt nicht, weil mit dem Handschaltgetriebe die Basisfahrzeugabbildung nur im NEFZ mit den definierten Schaltpunkten so gelingt, dass eine Ausweitung auf veränderte Fahrzeugparameter möglich wird, weil es für die anderen Zyklen keine allgemein gültigen Gangwahlvorschriften gibt.¹²⁸

¹²⁵ Aus Gründen der einfacheren Darstellung wird in den Tabellen dieses Kapitels auf eine Angabe der genauen Formelbezeichnungen nach Kapitel 4 weitgehend verzichtet. Für die streckenbezogenen Emissionswerte der gasförmigen Schadstoffe werden nur die chemischen Formelzeichen, für die Rußbelastung des DPF die Bezeichnung 'RB_{DPF}' und für den streckenbezogenen arbeits- und temperaturkorrigierten Kraftstoffverbrauchswert der Kraftstoffwaage 'Verbrauch' verwendet. Dadurch werden auch unterschiedliche Bezeichnungen für Ergebnisse von Hochrechnungen und Messungen vermieden.

¹²⁶ Trägheitsmomente müssen nur für die Reifen und die VKM berücksichtigt werden.

¹²⁷ Beschreibung in Kapitel 10.1.2

¹²⁸ vgl. Environmental Protection Agency: Motor Vehicle Emissions Federal Test Procedure, §86.128 - 79

Für die weiteren Simulationen in Kapitel 10.2 wird daher ein Doppelkupplungsgetriebe (engl.: double clutch transmission, DCT) zugrunde gelegt. Die detaillierte Ergebnisdarstellung für das Basisfahrzeug entfällt deshalb.

10.1.2 Referenzmotor VKM1BAS

Tabelle 8 – Motordaten VKM1BAS

Zylinder	V_{Hub}	Hub	Bohrung	Leerlaufdrehzahl	Verdichtungsverhältnis	J_{VKM}^{129}
	L	mm	mm	1/min		kgm ²
5	2.4	93.2	81	700	16	0.22

Für den im Versuchsfahrzeug eingesetzten einstufig aufgeladenen Dieselmotor mit Hochdruck-AGR (VKM1BAS, Daten in Tabelle 8) sind Motorprüfstandmessergebnisse verfügbar. Abbildung 61 zeigt exemplarisch die Volllastkurve, die Schleppkurve und das effektive Wirkungsgradkennfeld.

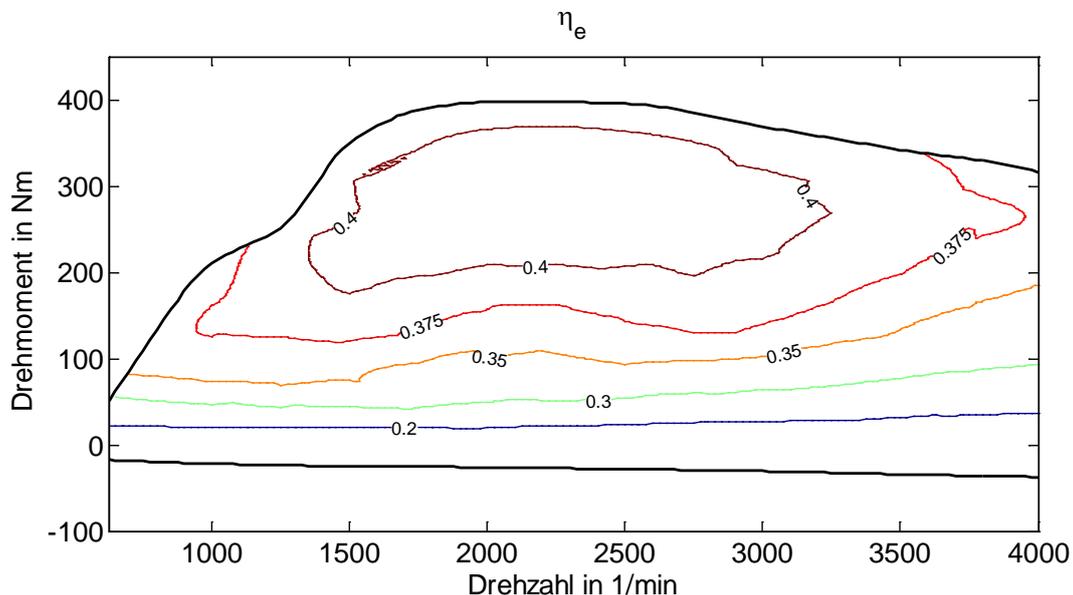


Abbildung 61 – Effektiver Wirkungsgrad VKM1BAS

Ein Vergleich zwischen Rollenprüfstandergebnissen und Simulationsergebnissen auf Basis ermittelter stationärer Motorkennfelder ist aufgrund von unterschiedlichen Datenständen der ECU bei den Messungen nicht sinnvoll möglich.

Alle Untersuchungen auf Basis VKM1BAS basieren auf stationären Kennfeldvermessungen mit einem Datenstand zur Erfüllung der EU4-Abgasgrenzwerte.

10.2 Virtueller Triebstrang in verschiedenen Fahrzeugen¹³⁰

Am Beginn der Simulation der Hybridisierung müssen grundsätzliche Fragen hinsichtlich der Potenziale und Grenzen beantwortet werden. Ziel dabei ist es möglichst rasch einen umfassenden Überblick zu erhalten.

¹²⁹ inklusive Schwungradsystem

¹³⁰ Teilweise ist der Inhalt dieses Kapitels unverändert oder inhaltlich übernommen aus der folgenden Veröffentlichung, die bereits vor Abschluss der Dissertation erfolgt ist: Klima B. et al.: Grenzpotenzialermittlung und Parameterstudie für Diesel-Hybrid-Systeme (in: 1. ATK, München, 16.-17.4.2009)

Genauere Detailergebnisse stehen am Anfang eher im Hintergrund.¹³¹ Deshalb kommen in diesem Kapitel einige Einschränkungen zur Anwendung:

- Erstens wird darauf verzichtet das Schaltverhalten des simulierten Getriebes genau an alle Einsatzbedingungen bei der Variation von Fahrzeugparametern oder Fahrzyklen anzupassen, weil der Aufwand für Simulationsberechnungen im Vorentwicklungsprozess zu hoch wäre.¹³² Ein Fahrzeugpool mit virtuellem DCT wird hierzu herangezogen, um Probleme mit unklaren Schaltpunktdefinitionen für Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe zu vermeiden.
- Zweitens werden die eigentlichen Schaltphasen von der Berechnung ausgenommen und ausgehend vom Stillstand des Fahrzeugs elektrisches Anfahren aktiviert, um nicht Ergebnisunterschiede zu erhalten, die lediglich auf einer ungenauen Abbildung der Längsdynamik während der Schalt- bzw. Anfahrvorgänge basieren:
 - Für Losfahren und Stoppen wird vereinfacht der Bereich mit schleifender Kupplung vollständig durch elektrischen Betrieb mit abgekuppelter VKM ersetzt.
 - Bei negativen Vortriebsanforderungen wird die VKM ebenfalls als abgekuppelt simuliert. So kann die Verzögerungsleistung vollständig (bzw. nur durch die EM-Volllast begrenzt) rekuperiert werden.
 - Im NEFZ wird zusätzlich für die simulierten DCT-Fahrzeuge das Geschwindigkeitsprofil für Handschaltfahrzeuge verwendet und das Schaltverhalten so abgestimmt, dass möglichst alle Beschleunigungen außerhalb der Schaltphasen auftreten.

Schließlich werden für den ersten Überblick weder eine Regelungsstrategie entwickelt oder angewandt, noch EiL-Versuche durchgeführt. Der dominierende Grund für den Verzicht auf Versuche ist die ständige Weiterentwicklung der VKM. Nur Verifikationen mit der aktuellsten Variante lassen daher zukünftig relevante Ergebnisse erwarten, die den Aufwand rechtfertigen.

Die Variation der Hybridsystemparameter kann zeigen, welche Bedingungen entscheidend für ein hohes Potenzial sind. So können Schwerpunkte im weiteren Entwicklungsprozess gezielt gesetzt und auch Topologie- und Komponentenentscheidungen unterstützt werden. Daneben soll ein Stichversuch unter Verwendung von Daten einer konkreten EM zeigen, ob die Verwendung konstanter Wirkungsgrade die Ergebnisse der Methode nachteilig beeinflusst. Schließlich wird das absolute Optimum unter Verwendung verlustloser elektrischer Komponenten ermittelt. Diese Variantenrechnungen werden ausnahmslos im NEFZ für das simulierte Basisfahrzeug DCT1-SIM durchgeführt.

Im NEFZ wird darüber hinaus ermittelt, wie elektrische Bordnetzanforderungen unter verschiedenen Randbedingungen (mit und ohne LPM, Variation von Wirkungsgraden) möglichst verbrauchsgünstig erfüllt werden können.

Berechnungen für die verschiedenen Fahrzeuge werden durchgeführt, um zu erkennen, ob sich gewisse Fahrzeugklassen besser für Hybridisierungsmaßnahmen eignen.

Da der Großteil der untersuchten Fahrzeuge mit VKM1BAS erhältlich ist, kann davon ausgegangen werden, dass die grundsätzliche Erfüllung der EU4-Abgasgrenzwerte gegeben ist. Die Untersuchungen basieren auf einem Motorkennfeld, das nicht Richtung NO_x-Minimierung in einem ausgeweiteten KF-Bereich abgestimmt worden ist. Diese erste Berechnungsstudie zielt daher ausschließlich auf die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs ab.

¹³¹ Abweichend von der Definition in Kapitel 6.1 ist die EM-Leistung für diese Untersuchungen nicht begrenzt und folgende Standardwirkungsgrade gelten: $\eta_{EM}^{generatorisch} = \eta_{EM}^{motorisch} = 85\%$, $\eta_{EES} = 98\%$

¹³² vgl. Bickerstaffe S.: Making the right moves (in: Automotive Engineer, 12/2007), S. 21

Zur Beurteilung der Hybridisierungspotenziale im Praxiseinsatz werden dynamischere Testzyklen als der NEFZ eingesetzt. Verwendet werden dazu einzelne Teile des ARTEMIS-Zyklus.

10.2.1 Abgeleitetes DCT1-Basisfahrzeug DCT1-SIM

Dem Untersuchungszweck entsprechend wird für die Erstellung eines möglichst großen Ergebnisools auf eine vollständig abgestimmte Getriebeauslegung verzichtet. Die Hauptfahrzeugdaten (SMK, Fahrwiderstände, Reifendaten) und die VKM werden vom MAN-REF mit VKM1BAS übernommen (siehe Kapitel 10.1).

Tabelle 9 – Getriebedaten DCT1-Simulationsmodell

	Differenzial	1.Gang	2.Gang	3.Gang	4.Gang	5.Gang	6.Gang	7.Gang
Übersetzung	4.438 ¹³³	3.500	2.087	1.343	0.933	0.708	0.566	0.475
η	0.95	0.94	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

Die Übersetzungen und Wirkungsgraden eines existierenden vereinfachten DCT-Modells nach Tabelle 9 werden unabhängig von der Leistungsflussrichtung definiert. Dieses Vorgehen wird für diese Grundsatzuntersuchung angewandt, obwohl die Verluste dabei bei geringen Leistungen nicht vollständig erfasst werden können.

Hinsichtlich der SMK wird definiert, dass diese auch bei Untersuchungen in amerikanischen Prüfzyklen und nicht standardisierten Fahrprofilen unverändert übernommen wird. Dadurch werden relative Vergleiche vereinfacht.

Die Schaltschwellen werden durch iterative Ermittlung festgelegt und ergeben im NEFZ Schaltvorgänge bei den Geschwindigkeiten, für die diese beim Profil für Fahrzeuge mit Handschaltgetrieben vorgesehen sind. So kann sichergestellt werden, dass der Betrieb der VKM in realitätsnahen ähnlichen Kennfeldbereichen simuliert wird.¹³⁴

10.2.2 DCT1-Fahrzeugpool mit VKM1BAS

Um die Entwicklungsmethodik hinsichtlich unterschiedlichster Betriebsanforderungen zu testen, wird aufbauend auf dem Referenzfahrzeug ein Variationsraum hinsichtlich der Fahrzeugparameter Fahrwiderstände und SMK ausgewählt. Die SMK werden auch hier bei Variation des Fahrzyklus nicht verändert.

¹³³ Die Differentialübersetzung ist so gewählt, dass die gegenüber dem manuellen Schaltgetriebe erweiterte Spreizung im ersten Gang die Gesamtübersetzung verkürzt und im höchsten Gang verlängert.

¹³⁴ Durch die NEFZ-basierte Abstimmung gilt diese Aussage für sehr dynamische Fahrzyklen nur eingeschränkt.

Tabelle 10 – Fahrzeugdaten

Bezeichnung	Beschreibung	SMK	Differenzial- übersetzung	DRR	F ₀	F ₁	F ₂
		kg		mm	N	Ns/m	Ns ² /m ²
PKW A	leichteres Fahrzeug als DCT1-SIM mit vergleichbaren Fahrwiderständen	1590	4.177	320	141.60	1.5088	0.4747
PKW B	entsprechend DCT1-SIM	1810	4.438	330	163.03	2.7551	0.3808
SUV	schweres Allrad-Geländefahrzeug mit höheren Fahrwiderständen	2040	5.002	372	172.39	9.2729	0.4290

Dabei wird das Schaltprogramm und der Antriebsstrang bis auf die Differenzialübersetzung und den dynamischen Reifenrollradius unverändert übernommen. Dargestellt werden die Ergebnisse für zwei zusätzliche Fahrzeuge, deren Daten aus Tabelle 10 hervorgehen.

Diese Fahrzeuge repräsentieren für VKM1BAS ein breites Spektrum hinsichtlich der Lastkollektive.

10.2.3 Elektrische Wirkungsgrade

Um den Einfluss der EM zu analysieren, wurde deren vorgegebener Wirkungsgrad im Rahmen der Potenzialermittlung nach Kapitel 7 variiert. Da die gesamte elektrische Energie sowohl generatorisch als auch motorisch umgewandelt wird, kann eine getrennte Betrachtung entfallen. Abbildung 62 zeigt, dass das Potenzial der Rekuperationsstrategie deutlich vom elektrischen Wirkungsgrad abhängt. Der Gesamtverbrauch sinkt durch Anwendung von LPM hingegen erst bei sehr hohen Wirkungsgraden.

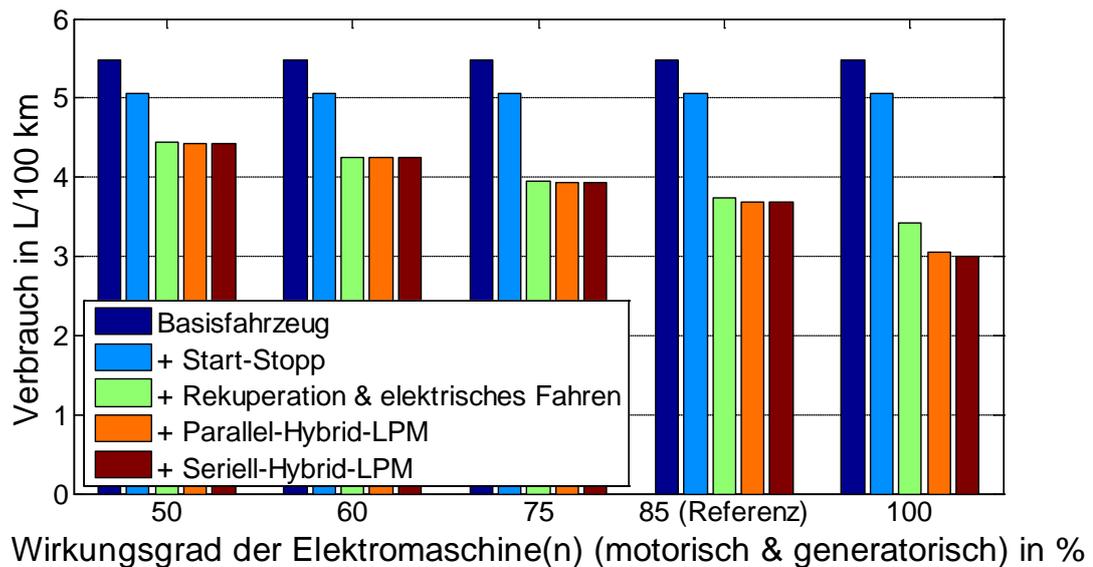


Abbildung 62 – Einfluss des Wirkungsgrades der EM (DCT1-SIM, VKM1BAS, NEFZ)

10.2.4 Konkrete EM

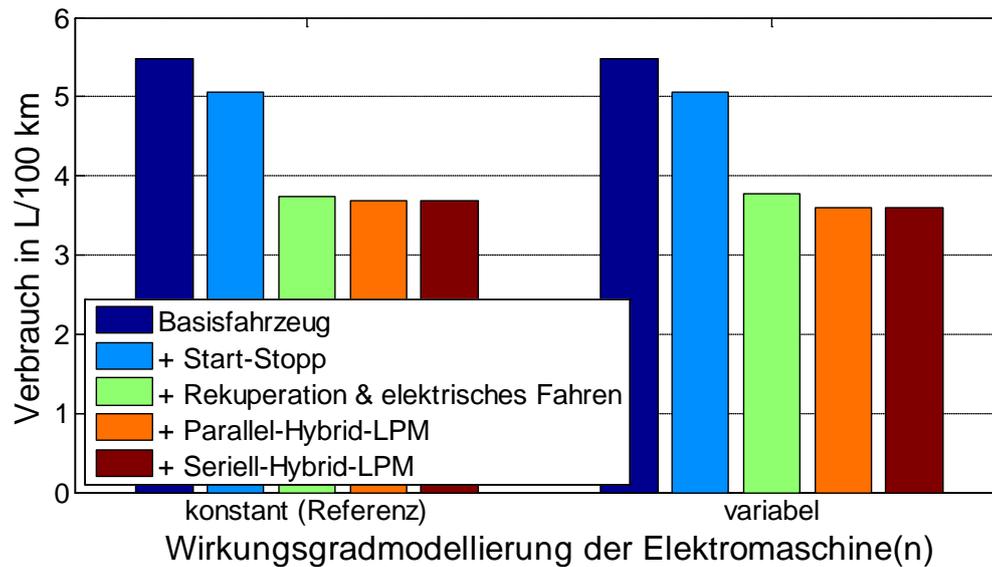


Abbildung 63 – Ergebnisvergleich für unterschiedliche Wirkungsgraddefinitionen (DCT1-SIM, VKM1BAS, NEFZ)

Durch Verwendung variabler Wirkungsgrade für die EM verändert sich die Potenzialaussage nur unwesentlich (Abbildung 63). Es ist lediglich eine leichte Verschiebung der Einsparungen zu den LPM zu beobachten. Dort erreicht die untersuchten EM relativ bessere elektrische Wirkungsgrade. Die Leistungsdaten der verwendeten EM enthält Tabelle 11.

Tabelle 11 – Kenndaten der EM

Maximales motorisches Moment	Nm	285
Maximale motorische Leistung	kW	39
Maximaler motorischer Wirkungsgrad	%	93
Maximales generatorisches Moment	Nm	295
Maximale generatorische Leistung	kW	34
Maximaler generatorischer Wirkungsgrad	%	93

10.2.5 Leistung der EM

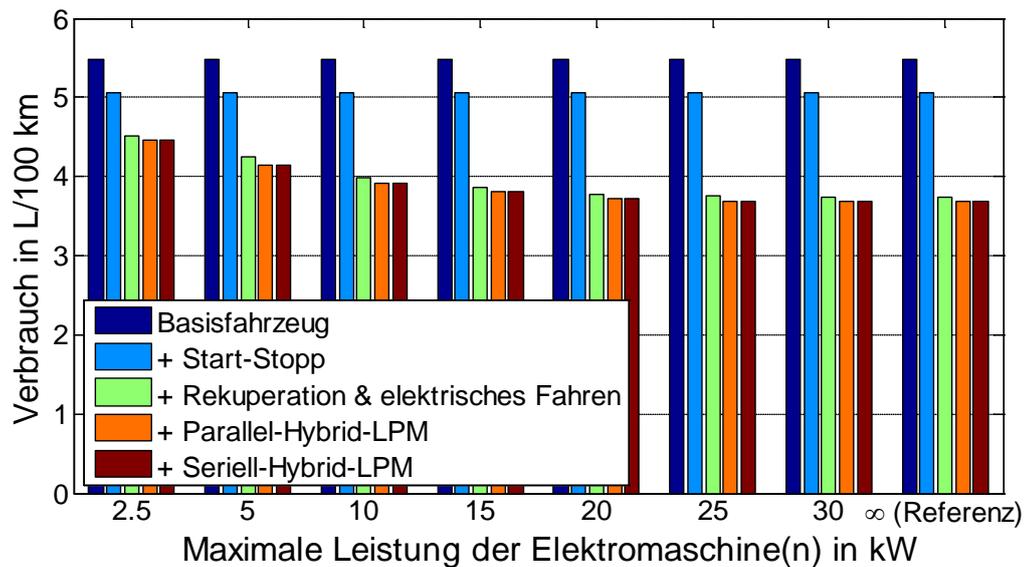


Abbildung 64 – Variation der maximalen EM-Leistung (DCT1-SIM, VKM1BAS, NEFZ)

Eine verringerte Leistung der EM führt zu begrenzter elektrischer Verzögerungsleistung und damit zu weniger Rekuperationspotenzial (Abbildung 64). Der zweite Effekt ist, dass höherlastigere Betriebspunkte nicht mehr durch elektrisches Fahren ersetzbar sind. Weil VKM-Betrieb für diese Punkte aber tendenziell nicht ungünstig ist, ist dieser Nachteil weniger entscheidend. Erst bei sehr geringem EM-Leistungsangebot erreicht man mit LPM die Vermeidung des ungünstigen VKM-Betriebs durch Anhebung der Drehmomente besser.

Erkennbar ist, dass das Hybridisierungspotenzial stark von der möglichen Rekuperation beeinflusst wird und dass LPM nur teilweise das verringerte Potenzial kompensieren können. Das zeigt auch deutlich, dass sich die Vorteile von Rekuperation und LPM nicht linear kombinieren lassen, sondern voneinander abhängig sind. Das Potenzial der LPM ist umso höher, je mehr ungünstige VKM-Betriebspunkte vom Basisfahrzeug nach Anwendung des elektrischen Fahrens mit der rekuperierten Energie noch übrig sind.

Durch verringerte Leistung sinkt nicht nur das Einsparungspotenzial, sondern es verringern sich auch der Energiespeicherhub und die Belastung.

10.2.6 Elektrische Bordnetzbereitstellung

Als typische elektrische Anforderung wird eine zeitlich konstante Leistungsanforderung durch das Bordnetz betrachtet. Die Leistungsanforderung wird dabei als unabhängig vom aktuellen Betriebszustand modelliert.

Ohne LPM wird in diesem Abschnitt festgelegt, dass die gesamte elektrische Energie für die Verbraucher entweder während Rekuperationsphasen direkt bereitgestellt oder dem EES entnommen wird. Somit kommt es im betrachteten Zyklus zu weniger elektrischem Fahren.

Mit LPM kann die Leistung hingegen zu jedem Zeitpunkt auch durch generatorischen Betrieb der EM bereitgestellt werden.

Für die Schaltphasen wird vereinbart, dass mit LPM die Situation des Basisfahrzeugs mit Bordnetz abgebildet wird und ohne LPM die Leistung für das Bordnetz aus dem EES entnommen wird.¹³⁵

Die Abbildung des Bordnetzes wird für drei konstante Leistungsstufen analysiert. Die Darstellung erfolgt für 0.2 kW, 0.3 kW und 0.6 kW. Aus Abbildung 65 ist erkennbar, dass der Zusatzverbrauch näherungsweise linear von der Bordnetzleistung abhängt.

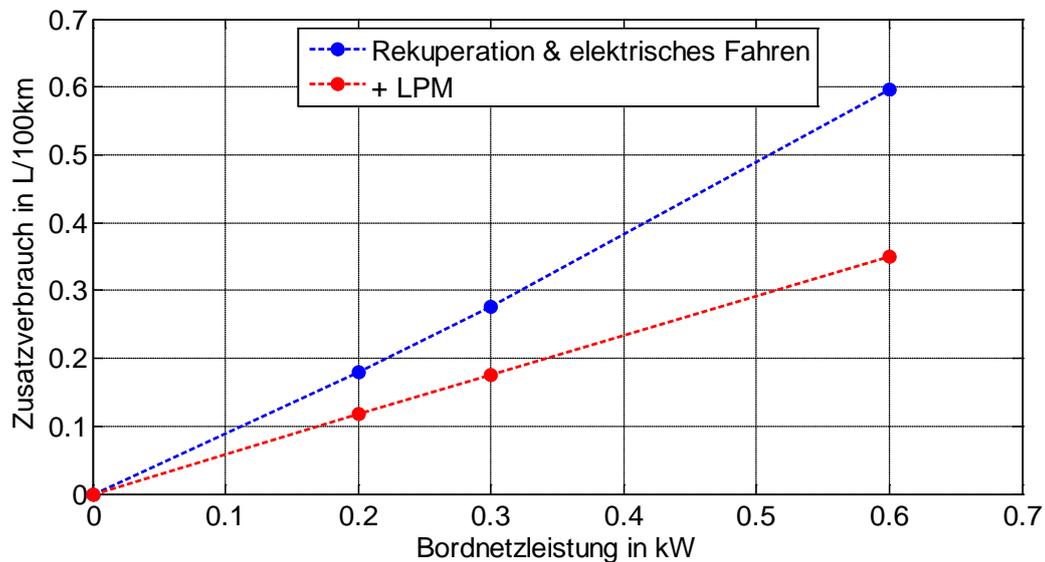


Abbildung 65 – Zusatzverbrauch durch Bordnetz (NEFZ, DCT1-SIM, VKM1BAS)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von rekuperierter Energie zur Bordnetzbereitstellung in Fahrzeugen, die elektrischen Fahrbetrieb erlauben, ungünstig ist. Die Anwendung von LPM erhöht unter allen untersuchten Randbedingungen den mittleren Wirkungsgrad der Energiebereitstellung. Ist dabei die VKM aktiv, wird die Bordnetzleistung praktisch nie dem EES entnommen. Daraus ist zu schließen, dass der mögliche bedarfsgerechtere Einsatz der Hauptvorteil elektrischer Nebenaggregate ist. Da viele LPM hier trotzdem nicht zu großen Leistungen in den EES führen, ist davon auszugehen, dass es ausreicht, die EM nur soweit generatorisch zu belasten, dass dem EES keine Energie für die Bordnetzversorgung entnommen werden muss. In dem Fall arbeitet die EM quasi als Lichtmaschine. Diese leichte Anhebung kann man dann auch als Basisbetrieb bezeichnen, weil ja in Analogie zum Berechnung mit vernachlässigtem Bordnetzbedarf auch nur die zum aktuellen Zeitschritt geforderte Leistung durch die VKM bereitgestellt wird. Diese Leistungsanforderung setzt sich jetzt allerdings aus einer mechanischen und einer elektrischen zusammen.

10.2.7 Fahrzeug- bzw. Fahrzyklusvariation

Während bei den sonstigen Variationen Parameter des Hybridsystems selbst verändert werden, stehen hier die Randbedingungen im Vordergrund. Das Hybridsystem selbst (VKM, Getriebe, EM, EES, Topologie) wird nicht verändert. Der Getriebeausgang stellt somit quasi die Systemgrenze zur hier variierten 'Umwelt' (im Sinne von Fahrzeug und Fahrzyklus) dar.

¹³⁵ Durch den nicht beeinflussbaren Wirkungsgrad der Bordnetzversorgung während der Schaltphasen sind hier geringe Abweichungen vom Idealzustand möglich.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sind:

- Dynamische Fahrzyklen mit niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten zeigen größere relative Einsparungspotenziale (siehe Stadtzyklus in Abbildung 66). Hier kommt es im Basisbetrieb am häufigsten zu ungünstigem VKM-Betrieb.
- In dynamischen, realitätsnäheren Zyklen ist tendenziell mit niedrigeren Speicherhüben als im NEFZ zu rechnen, wobei die Energiedurchsätze aber ähnlich sind.
- Das relative Potenzial ist nahezu unabhängig vom untersuchten Fahrzeugtyp.
- Es gelingt durch Hybridisierung nicht, die grundsätzlichen Verbrauchsnachteile großer Fahrzeuge zu kompensieren, wenn man die Hybridisierung auch für kleine Fahrzeuge anwendet.

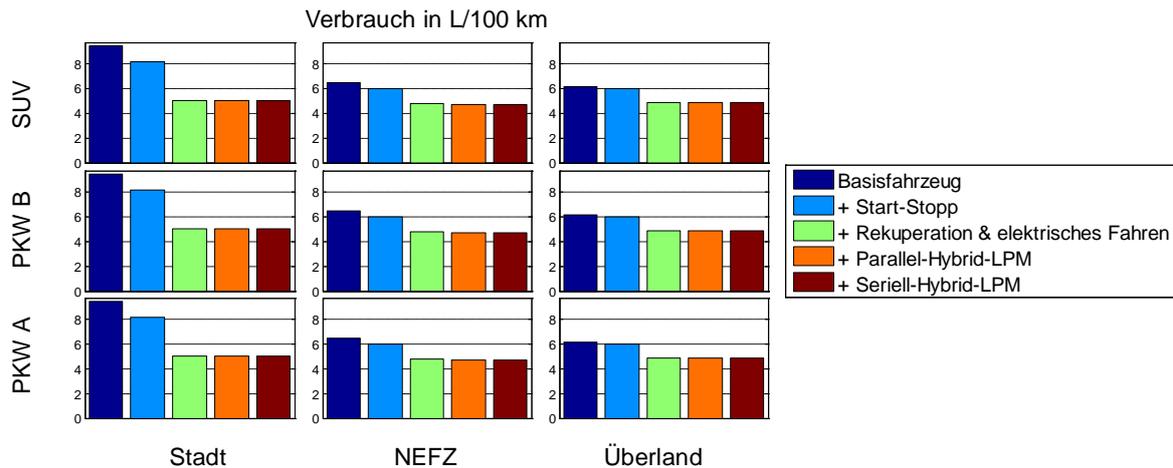


Abbildung 66 – Fahrzyklus und Fahrzeugvariation (VKM1BAS)

10.3 Referenzfahrzeug mit Automatikgetriebe¹³⁶

Die Grundabstimmung der VKM beeinflusst die durch Hybridisierung erzielbaren Ergebnisse entscheidend. Mit VKM1BAS sind zwar Weiterentwicklungen zur Einhaltung strikterer Abgasgrenzwerte erfolgt, es fehlen allerdings Kennfelder mit einer ausreichenden Anzahl an Stützstellen für diese Berechnungen. Außerdem bietet die ECU zu wenig Möglichkeiten zur Realisierung parallel geplanter Weiterentwicklungen hinsichtlich der Abgasnachbehandlung.

Deshalb kommt als Basis für die weiterführenden Untersuchungen die weiterentwickelte Serien-Version VKM2BAS zum Einsatz (Beschreibung in Kapitel 10.3.2). Es steht auch ein neues Versuchsfahrzeug mit dieser VKM zur Verfügung. Um Korrelationsmessungen zu ermöglichen wird daher dieses Referenzfahrzeug mit Automatikgetriebe (AUT-REF) verwendet, um neue Randbedingungen zu definieren. Beim AUT-REF (nach Kapitel 10.3.1) werden Schalt- und Anfahrphasen im Rahmen der Hybridberechnung mit berücksichtigt. Durch dieses Vorgehen wird die Realisierung von realen Betriebsstrategien erst möglich, die Betriebsarten auch unabhängig von Anforderungen beibehalten müssen (siehe Kapitel 8.1.2.2).

¹³⁶ Teilweise ist der Inhalt dieses Kapitels unverändert oder inhaltlich übernommen aus der folgenden Veröffentlichung, die bereits vor Abschluss der Dissertation erfolgt ist: Klima B. et al.: Durchgängige Methodik für Simulation und Messung des Diesel-Hybrid-Potenzials (in: ATZ, 11/2010), S. 848ff

Für dieses Fahrzeug gelten hinsichtlich der Hybridsimulation folgende Näherungen:

- Die Leistung der EM beim elektrischen Fahren wird auch beim Losfahren aus Drehzahl und Drehmoment der VKM beim Basisfahrzeug gebildet und es kommt auch beim elektrischen Fahren zu Wandlerverlusten.¹³⁷
- Bei negativen Vortriebsleistungsanforderungen wird die VKM abgekoppelt und der Wandler als überbrückt simuliert. Die Rekuperation wird so nur durch die Volllast der EM begrenzt.

Aufgrund der Probleme mit dem Simulationsmodell (siehe Kapitel 10.3.6) erfolgt die gesamte Abbildung hauptsächlich auf Basis der Messungen. Das bedingt, dass die Bremsleistung nicht aus der Simulation entnommen werden kann. Außerdem sind Variationsrechnungen nur insofern möglich, als dass die Randbedingungen an der inneren Systemgrenze Getriebeeingang konstant gehalten werden. Fahrzeug- oder Fahrzyklusvariationen, sowie abweichende Schaltstrategien außerhalb des durch das Messprogramm am Rollenprüfstand abgedeckten Umfangs werden daher nicht durchgeführt.

Die reduzierte Parameterstudie besteht somit aus Variationen der elektrischen Wirkungsgrade und der elektrischen Maximalleistung. Erweitert wird der Einsatzbereich der Methode hinsichtlich der Zielsetzung: Mit VKM2BAS wird auch die Minimierung von NO_x-Emissionen berechnet.

Das Leistungsangebot der eingesetzten EM wird so festgelegt, dass im NEFZ 95% der Verzögerungsenergie rekuperiert werden können. Dazu wäre etwas über 19 kW nötig, weshalb die Leistungsgrenze auf 20 kW festgesetzt wird. Um die gesamte Energie rekuperieren zu können, müsste die EM eine Spitzenleistung von ca. 30 kW aufweisen.

Tabelle 12 – Rekuperationspotenziale in Abhängigkeit von der Spitzenleistung der EM (AUT-REF)

Fahrzyklus	Rekuperierbarer Anteil der Verzögerungsenergie ¹³⁸		maximale Verzögerungsleistung
	bei 20 kW maximaler EM-Leistung	bei 50 kW maximaler EM-Leistung	
	%	%	kW
NEFZ	95	100	30
FTP72 ¹³⁹	97	100	29
US06	70	99	59
ARTEMIS Stadt	89	99	51
ARTEMIS Überland	76	97	79
ARTEMIS Autobahn	65	88	119

Mit 20 kW können in den anderen untersuchten Fahrzyklen zwischen 65 und 97% der Verzögerungsenergie rückgespeichert werden. Tabelle 12 liefert detaillierte Daten dazu und

¹³⁷ Die Drehzahlen der EM entsprechen bei Anfahren somit nicht der realen Situation. Gleich nach dem Einschalten nach einem Stillstand mit durch die Start-Stopp-Funktion abgeschalteter VKM kann die EM nicht mit der Drehzahl der VKM beim Basisfahrzeug arbeiten. Aufgrund der konstanten Wirkungsgraddefinitionen für die EM entsteht dadurch aber kein Fehler in Bezug auf den elektrischen Leistungsbedarf. Nur die Leistung zum Beschleunigen des Pumpenrads des Wandlers wird hier vernachlässigt. Diese ist gegenüber den übrigen Wandlerverlusten aber gering. Diese könnten durch Überbrückung des Wandlers vermieden werden, weil die EM ja unabhängig von ihrer Drehzahl Drehmoment abgeben kann. Da die genaue Abbildung des Wandlerverhaltens aufwendig ist, wird diese Abweichung im Rahmen der Vorentwicklung akzeptiert.

¹³⁸ abgerundet auf ganze %

¹³⁹ bundesgesetzlicher Testzyklus 72 (engl.: federal test procedure 72, FTP72)

enthält zusätzlich auch die Angaben zum Rekuperationspotenzial mit 50 kW, sowie die auftretenden Spitzenleistungen.

In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst Simulationsergebnisse und anschließend die EIL-Verifikationen gezeigt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit Quervergleichen und den Erkenntnissen.

10.3.1 Automatikgetriebe-Basisfahrzeug AUT-REF

Als Fahrwiderstandsparameter werden Herstellerangaben verwendet (Tabelle 13).

Tabelle 13 – Fahrwiderstandsfaktoren AUT-REF

F_0	F_1	F_2
N	Ns/m	Ns ² /m ²
151.7	4.7887	0.3383

Diese Daten gelten als Vorgaben für die Simulation und die Versuche am Rollenprüfstand.

Das Fahrzeug wird der SMK 1810 kg zugeordnet, die wieder unabhängig vom Fahrzyklus gilt.

Bei den durchgeführten Versuchen ist der DPF ausgebaut worden, um Beeinflussungen durch unterschiedliche Gegendruckniveaus zu vermeiden.

10.3.2 Basismotorkonfiguration VKM2BAS

Tabelle 14 – Motordaten VKM2BAS

Zylinder	V_{Hub}	Hub	Bohrung	Leerlaufdrehzahl	Verdichtungsverhältnis	J_{VKM}
	L	mm	mm	1/min		kgm ²
5	2.4	93.2	81	700	16	0.06

Die Grunddaten des weiterentwickelten Serienmotors VKM2BAS in Tabelle 14 unterscheiden sich praktisch nicht von VKM1BAS. Durch Einsatz einer zweistufigen Aufladegruppe und andere Detailverbesserungen werden im AUT-REF die EU5a-Grenzwerte unterschritten. Auch für diesen Motor sind Motorprüfstandmessergebnisse verfügbar.

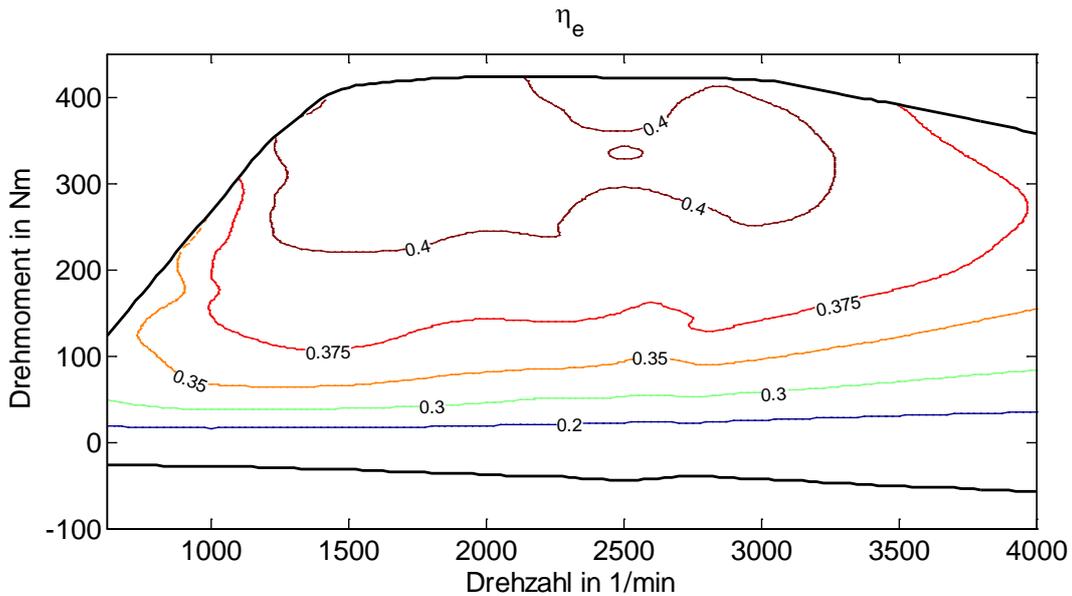


Abbildung 67 – Effektiver Wirkungsgrad VKM2BAS

In Abbildung 67 sind exemplarisch wieder die Vollastkurve, die Schleppkurve und das effektive Wirkungsgradkennfeld dargestellt.

10.3.3 VKM-Korrelationsmessung

Am Rollenprüfstand ist für die Zyklusvermessungen ein Prototyp eines in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Systems für die automatisierte Zyklusfahrt in Betrieb genommen worden. Neben dem Einsatz zum Erhalt automatisiert reproduzierbarer Zyklusergebnisse, kann damit die VKM auch im Fahrzeug stationär belastet werden.

Die Ergebnisse der Korrelation zwischen Rollen- und Motorprüfstand zeigen, dass es nur geringe Abweichungen im Stationärverhalten gibt. Exemplarisch sind hier die Korrelationen bei der Drehzahl 1500/min für Verbrauch (Abbildung 68) und Druck nach Ladeluftkühler (Abbildung 69) dargestellt.

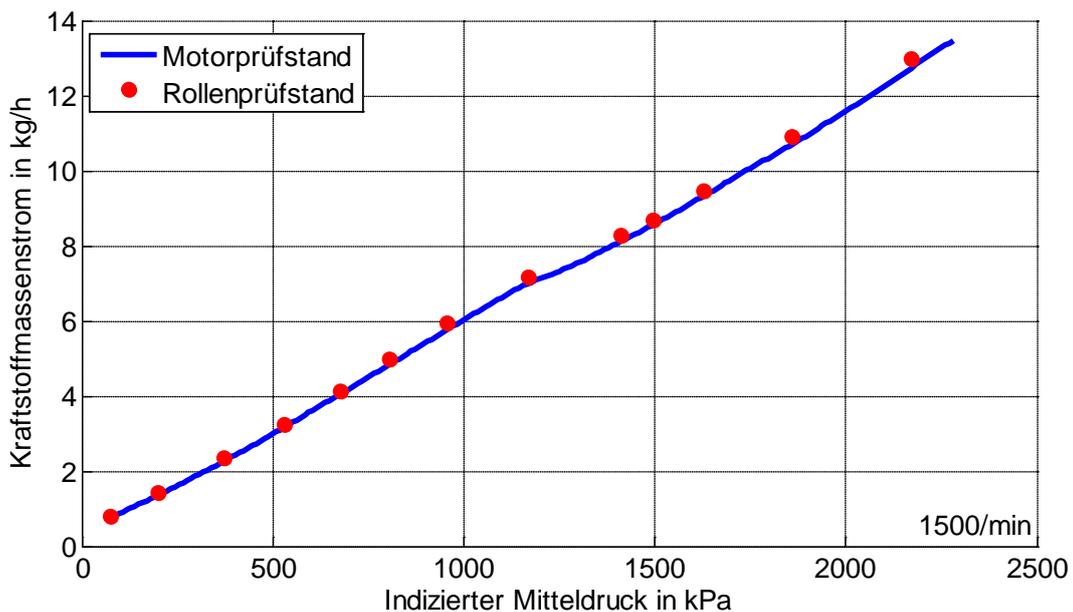


Abbildung 68 – Verbrauch (Vergleich Rollen- mit Motorprüfstand)

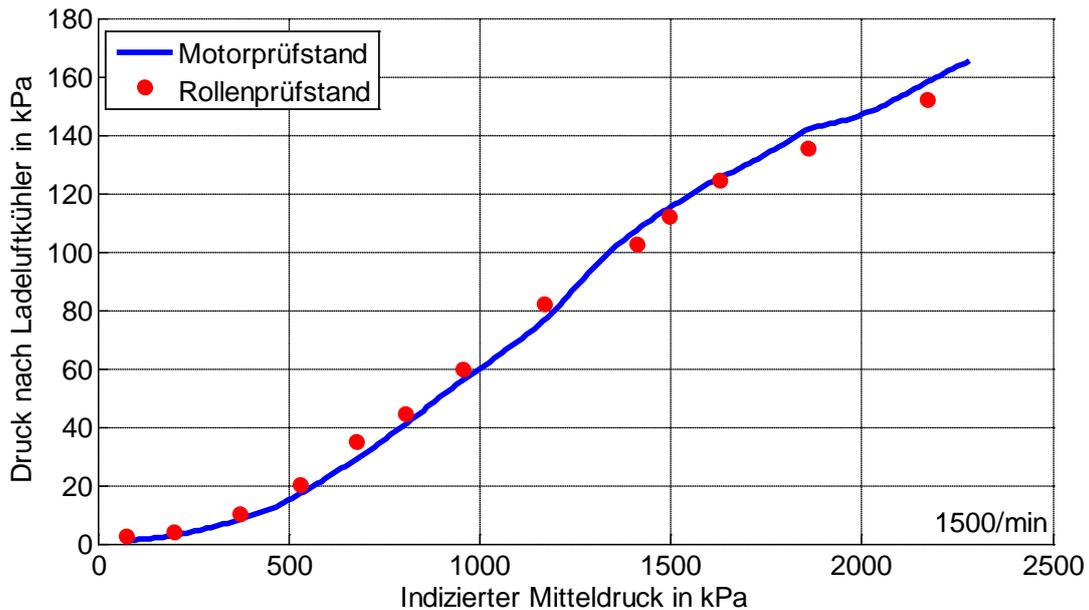


Abbildung 69 – Druck nach Ladeluftkühler (Vergleich Rollen- mit Motorprüfstand)

Die ursprünglich geplante Gesamtvermessung ist daher entfallen. Drehmomentmessdaten aus dem Fahrzeug konnten nicht wie geplant ermittelt werden (siehe Kapitel 3.2.1). Diese Aussage erfolgt daher auf Basis der Gleichstellung des indizierten Mitteldrucks, wobei der Vergleich mit interpolierten Kennfelderergebnissen erfolgt ist.

10.3.4 Längsdynamiksimulation

Die Simulation der Längsdynamik wird in CRUISE für den NEFZ durchgeführt. Das reale Fahrzeug steuert die Schaltungen in Abhängigkeit der Gaspedalstellung und der Zusammenhang zwischen dieser und dem Drehmoment wird geschwindigkeitsabhängig korrigiert. Diese Korrektur wird bei der Simulation nicht verwendet.

10.3.5 Fahrzeugvermessung

Mit dem AUT-REF sind am Rollenprüfstand verschiedene Zyklen vermessen worden. Dabei ist der automatisierte Zyklusbetrieb angewandt worden. Ergebnisse sind für NEFZ, FTP72, US06 und den ARTEMIS-Zyklus verfügbar.¹⁴⁰ Das Fahrzeug ist unter betriebswarmen Bedingungen betrieben worden. Das Drehmoment wird auf Basis der Vollindizierung ermittelt.

Ein weiteres Ergebnis der Analyse der Zykusergebnisse ist, dass bei der Getriebeabstimmung keine besondere Rücksicht auf hochdynamische Zyklen mit hohen Leistungsanforderungen genommen worden ist. Möglicherweise auch bedingt durch die aufgrund der Verwendung des automatischen Gaspedals fehlende Kick-Down-Funktion werden sehr hohe Drehmomente ermittelt (siehe auch Kapitel 10.3.9). Es zeigt sich jedoch, dass allein durch Verwendung von niedrigeren Gängen auch kein Betrieb mit abgestimmter AGR möglich wäre. Hauptursache dafür ist ein Überschreiten der maximalen Leistung, für die die AGR abgestimmt ist.

¹⁴⁰ Der ARTEMIS-Zyklus wird für die Auswertung in die Abschnitte Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt aufgeteilt. Beim Autobahnabschnitt ist für diese Arbeit die Version mit einer maximalen Geschwindigkeit von 130 km/h gewählt worden.

10.3.6 Modellabgleich

Beim Vergleich der Ergebnisse der Simulation und der Messung sind deutliche Abweichungen feststellbar. Unabhängig von der veränderten Gangwahl aufgrund der Gaspedalkorrekturen werden bei der Simulation höhere VKM-Leistungen ermittelt. Fehler in den Herstellerdaten für die Getriebeverluste sind dafür die logischste Erklärung. Da keine anderen Daten zur Verfügung stehen, wird folgender Ansatz zur Gesamtsystemmodellierung gewählt:

Bei positiver Fahrleistung wird das Moment entsprechend der Messung vorgeben und für Verzögerungen trotz der wahrscheinlich zu hohen Annahmen das Rekuperationspotenzial über die Verlustkennfelder ermittelt.

So kann auch auf die aufwendige Integration der Gaspedalkorrekturkennfelder verzichtet werden.

10.3.7 Kontrolle der Basisfahrzeugabbildung

Hier beschränkt sich die Darstellung auf NEFZ-Ergebnisse. Alle anderen vergleichbaren Ergebnisse enthält ANHANG H (Details Basisfahrzeugabbildung).

Tabelle 15 – Ergebnisse mit Vergleich zum Rollenprüfstand (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Zyklus	Datenstand	NO _x	RRW	CO	C _x H _y	Waage _k $\frac{\Delta A}{K_r}$	ECU $\frac{\Delta A}{K_r}$
		mg/km		mg/km	mg/km	L/100km	L/100km
NEFZ	Referenz	249	104	526	171	6.06	6.22
	Basis	171	126	659	169	6.04	6.14
	angepasst	230	79	493	156	6.00	6.02

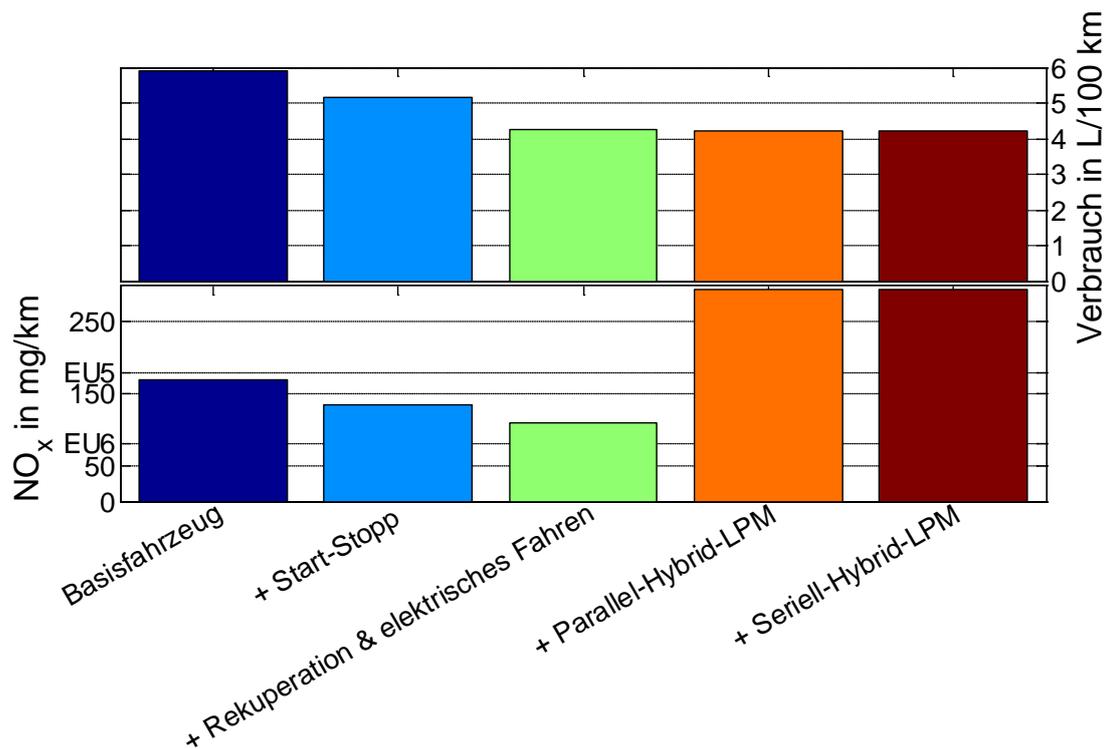
Die Verbrauchsübereinstimmung ist unabhängig vom Ermittlungsverfahren sehr gut.¹⁴¹ Im Vergleich der Zyklusergebnisse in Tabelle 15 sind neben den Ergebnissen mit dem Basisdatenstand auch solche mit veränderten Vorgaben (Sollwerte für die Luftmasse im gesamten Kennfeld um 20 mg/Hub erhöht, siehe 'angepasst'-Zeile) enthalten. Mit dieser Änderung ist ersichtlich, dass die ursprünglich deutlich abweichenden Ergebnisse (deutlich niedrigere NO_x (grün hervorgehoben), dafür aber erhöhte RRW (rot markiert)) tendenziell einer veränderten Luftmengenabstimmung entsprechen und daher nicht auf ein grundsätzlich anderes Motorverhalten schließen lassen. Durch den Bezug auf die Messung bei der Erstellung der Prüfstandvorgaben ist eine Kontrolle des Längsdynamikmodells obsolet.

Diese Annahme wird durch detaillierte Auswertungen bestätigt (siehe ANHANG H (Details Basisfahrzeugabbildung)).

Da die Korrelation zwischen Rollen- und Motorprüfstandergebnissen bis auf Unterschiede mit identifizierten Ursachen gut ist, kann die weitere Entwicklung am Motorprüfstand durchgeführt werden. Eine Übertragbarkeit ist sowohl für stationäre, als auch für instationäre Ergebnisse zu erwarten, wenn die Randbedingungen hinreichend übereinstimmen.

¹⁴¹ Nicht dargestellt sind die Werte aus der Abgasanalyse, weil das CO₂-Ergebnis nicht plausibel ist.

10.3.8 Potenzial Verbrauch



Aktivierte Hybridfunktionen

Abbildung 70 – Verbrauchsreduktionspotenziale (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)¹⁴²

Die Anwendung der Potenzialermittlung (nach Kapitel 7) ergibt folgende Ergebnisse: Im NEFZ ergeben sich mit 20 kW Leistungsbeschränkung der EM und den Wirkungsgraden nach Kapitel 6.1 je nach aktivierten Hybridfunktionen Einsparungspotenziale von an die 30% (Abbildung 70). Typische Angaben zum Einsparungspotenzial durch 'Start-Stopp' aus der Literatur¹⁴³ liegen im Bereich von 5%. Die demgegenüber relativ hohe Einsparung von etwas über 10% ergibt sich vor allem aus der Verlustleistung des Wandler-Automat-Getriebes bei Fahrzeugstillstand.

LPM bieten wenig Zusatzpotenzial, erhöhen aber sowohl den Speicherhubbedarf von ca. 500 auf ca. 800 kJ, als auch den Speicherdurchsatz von ca. 1120 auf ca. 1565 kJ (siehe Vergleich der Energieflüsse und Energiebilanzen mit (Abbildung 71) und ohne (Abbildung 72) LPM).

Durch die verschobenen Betriebsbereiche (siehe Abbildung 73 im Vergleich zu Abbildung 74) sind Nachteile hinsichtlich des NO_x-Emissionsverhaltens für die Variante mit LPM zu erwarten. Da die VKM nur in einem eingeschränkten Betriebsbereich mit AGR abgestimmt ist, fallen diese Nachteile relativ groß aus. Details dazu finden sich auch im folgenden Kapitel 10.3.9.

¹⁴² Die hier und in weiteren analogen Diagrammen dieses Abschnitts mit 'EU5' bzw. 'EU6' bezeichneten NO_x-Niveaus entsprechen den Grenzwerten aus Kapitel 1.7. Diese gelten für Test mit Start bei Raumtemperatur und sind hier nur für Vergleichszwecke eingezeichnet.

¹⁴³ vgl. Nuglich H. et al.: System Concept Car for CO₂ Reduction Measures (in: 17. Aachener Kolloquium, 7.-8.10.2008) bzw. Rucker A. et al.: Einfluss der BMW Auto Start Stop Funktion auf CO₂- und Schadstoffemissionen (in: 4. Emission Control, Dresden, 29.-30.5.2008)

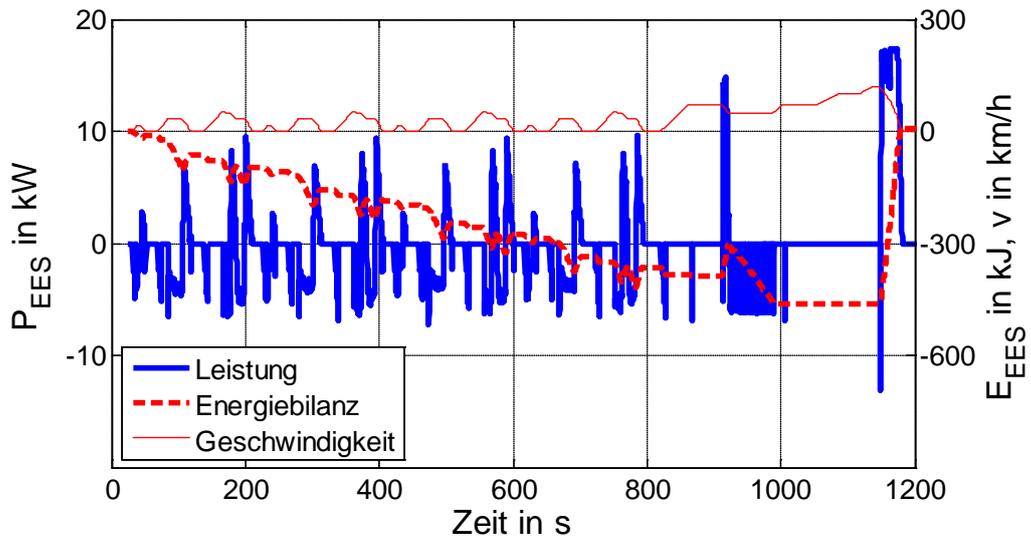


Abbildung 71 – Simulierte elektrische Leistung und Energiebilanz ohne LPM (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

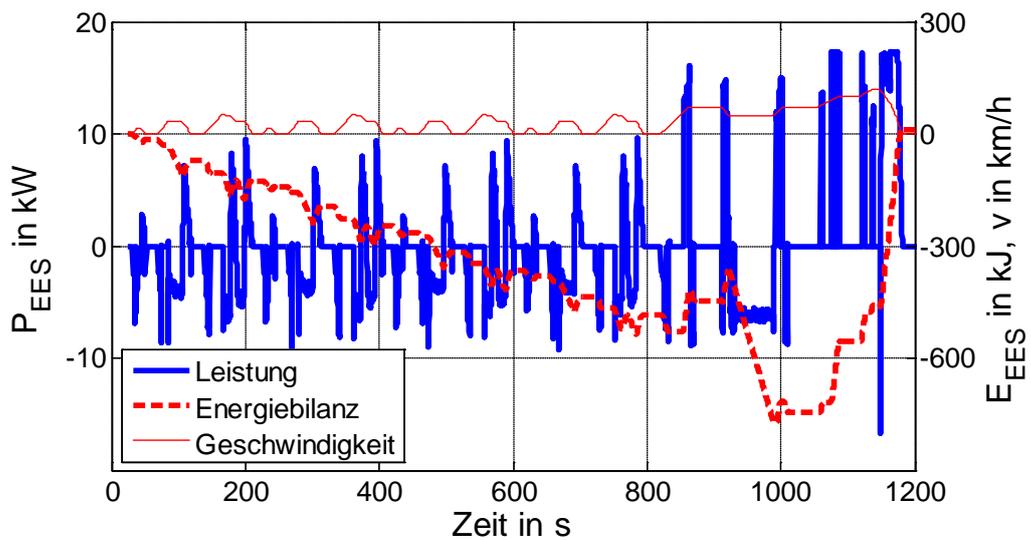


Abbildung 72 – Simulierte elektrische Leistung und Energiebilanz mit LPM (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

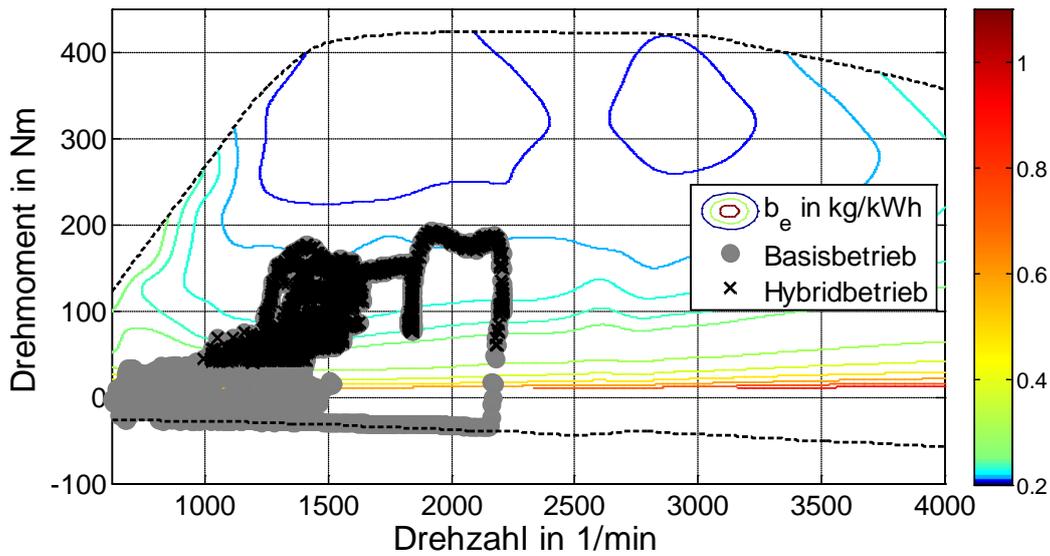


Abbildung 73 – Betriebsbereiche der VKM ohne LPM (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

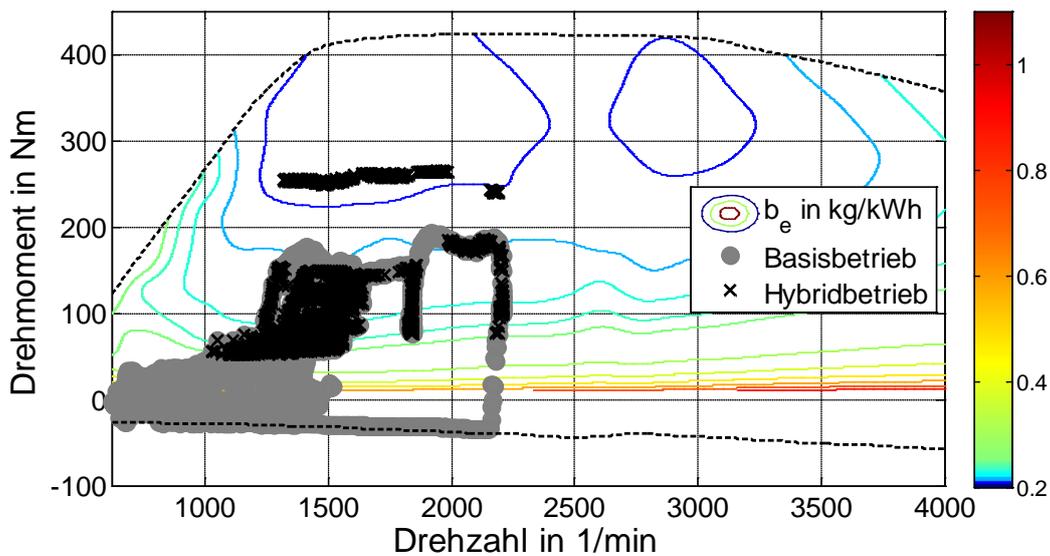


Abbildung 74 – Betriebsbereiche der VKM mit LPM (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Die unbeschränkten raschen Betriebsartenwechsel machen eine Adaption der Verläufe vor einer Prüfstandanwendung notwendig. Das Vorgehen dazu ist in Kapitel 9.2 beschrieben. Die häufigen Betriebsartenwechsel ergeben sich, weil bei AUT-REF die Berechnungen auf Messergebnissen basieren und im Rahmen der Fahrzeugvermessung speziell im Bereich der Konstantfahrt mit 50 km/h (vor $t=1000$ s in Abbildung 71 gut erkennbar an der zwischen 0 und ca. -6 kW schwankenden Leistung am EES) leichte Oszillationen beim Betriebspunkt der VKM aufgetreten sind. Abbildung 75 zeigt den Verlauf der Leistung und Energie nach der Adaption. Zu erkennen ist auch, dass die Bilanz jetzt nicht mehr so gut ausgeglichen ist.

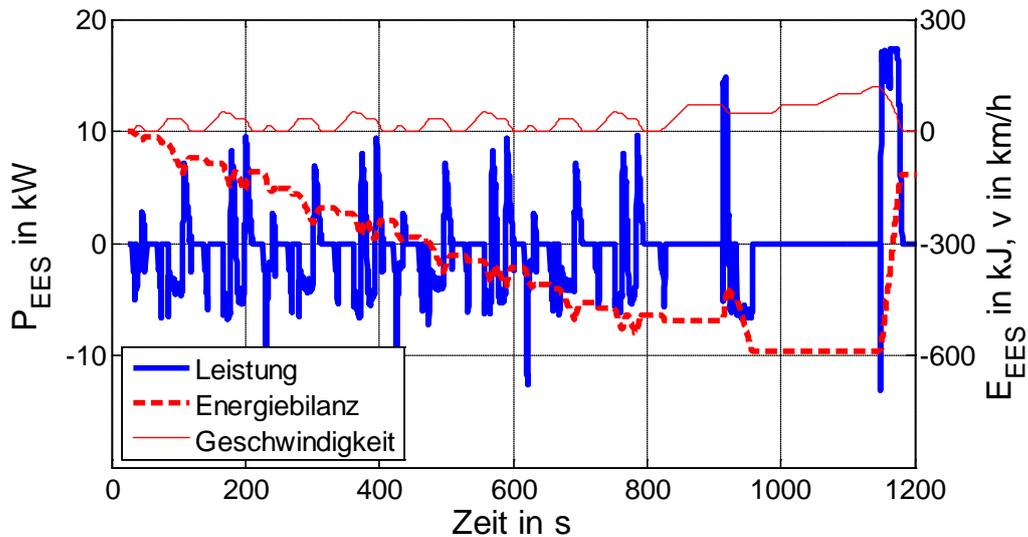


Abbildung 75 – Simulierte angepasste elektrische Leistung und Energiebilanz ohne LPM (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

10.3.8.1 Wirkungsgradvariation (elektrisches System)

Um wieder den Einfluss der elektrischen Wirkungsgrade abschätzen zu können, wird die Simulation des NEFZ bei 20 kW elektrischer Maximalleistung mit verschiedenen Vorgaben wiederholt.

Da serieller Hybridbetrieb unabhängig von diesen Wirkungsgraden keine Vorteile zeigt, kann der in Kapitel 7.2.3 eingeführte Systemwirkungsgrad für die vereinfachte Darstellung in Abbildung 76 verwendet werden. LPM weisen nur dann ein nennenswertes zusätzliches Potenzial auf, wenn der Systemwirkungsgrad noch besser als nach der Basisdefinition (siehe Kapitel 6.1) wird. Das ist jedoch unrealistisch.

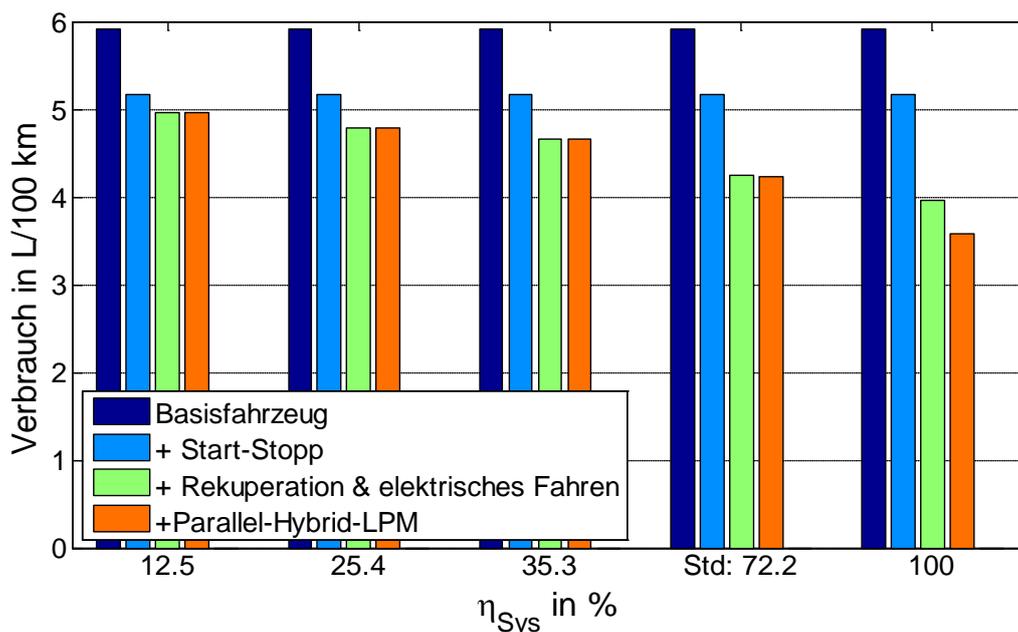


Abbildung 76 – Variation des elektrischen Systemwirkungsgrads (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Die relativen Ergebnisse bei unterschiedlichen elektrischen Wirkungsgraden unterscheiden sich analog zur Basis nicht wesentlich von den Ergebnissen mit dem ersten untersuchten Triebstrang in Kapitel 10.1.

10.3.8.2 Zyklusvariation (auch mit 50 kW EM-Maximalleistung)

Das Potenzial durch die Hybridisierung hängt neben dem elektrischen System auch vom Fahrzyklus ab. Die Potenziale in den untersuchten Zyklen bei 20 bzw. 50 kW maximaler EM-Leistung sind in Abbildung 77 und Abbildung 78 dargestellt. SH-Betrieb weist in keinem der untersuchten Zyklen ein zusätzliches Potenzial auf, weshalb die Darstellung in den Diagrammen wieder entfällt.

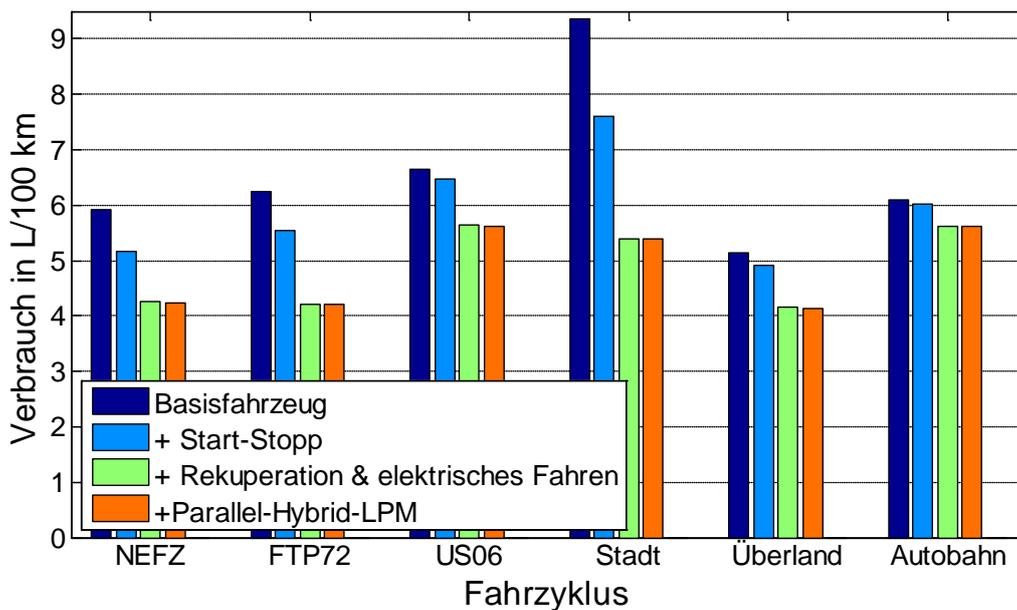


Abbildung 77 – Fahrzyklusvariation (AUT-REF, VKM2BAS)

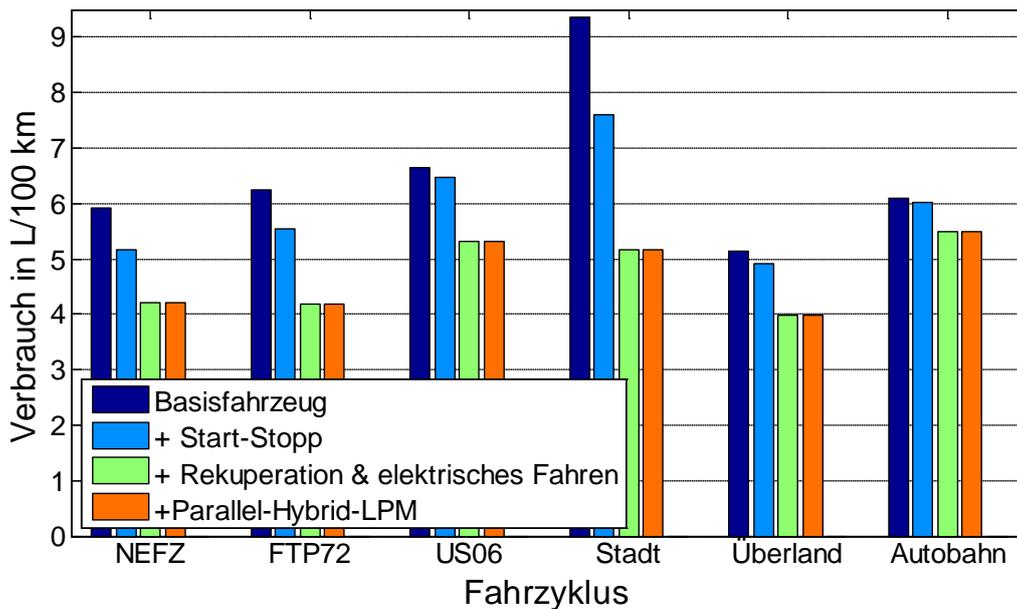


Abbildung 78 – Fahrzyklusvariation (50 kW maximale EM-Leistung, AUT-REF, VKM2BAS)

Die Begrenzung der elektrischen Leistung wirkt sich dabei in unterschiedlichen Fahrzyklen verschieden aus. Neben dem Einfluss auf das Rekuperationspotenzial werden auch die Möglichkeiten des elektrischen Fahrens und der LPM eingeschränkt. EM-Leistungen über 50 kW werden nicht untersucht, weil die Umsetzung ohne Adaption des VKM-Hubraums in einem Hybridfahrzeug nicht sinnvoll wäre. Die Reduktion des gesamten Verbrauchspotenzials bei weiterer Beschränkung der EM-Leistung von 50 auf 20 kW ist jedoch geringer als die Reduktion des Rekuperationspotenzials (siehe Tabelle 16). Im NEFZ werden bspw. nur ca. 0.7% der Verbrauchsreduktion nicht erreicht, obwohl ca. 4.3% der Verzögerungsenergie weniger rekuperiert werden.

Tabelle 16 – Auswirkungen der Reduktion der Spitzenleistung der EM (AUT-REF, VKM2BAS)

Fahrzyklus	Verbrauchssteigerung bei 20 statt 50 kW (VKM2BAS)	Reduktion der rekuperierten Energie bei 20 statt 50 kW
	%	%
NEFZ	0.7	4.3
FTP72	0.5	2.6
US06	5.8	41.5
Stadt	4.3	12.0
Überland	4.3	27.3
Autobahn	2.2	36.4

Hier wird deutlich, dass die für die Verbrauchsreduktion maßgeblich relevanten ersetzbaren VKM-Betriebspunkte bei geringer Leistung auftreten und auch bei leicht verringertem Energieangebot durch elektrisches Fahren ersetzt werden können.

Aufgrund der geringen Potenzialreduktion wird für die EiL-Untersuchungen eine Begrenzung der EM-Leistung auf 20 kW simuliert.

10.3.9 Potenzial NO_x

Die Ausweitung der AGR-Anwendung ist eine gegenüber der Hybridisierung einfache Alternative zur Absenkung NO_x -Emissionen. Deshalb wird die Berechnung des Reduktionspotenzials hier nur für den NEFZ unter denselben Randbedingungen wie bei der Verbrauchsoptimierung dargestellt.

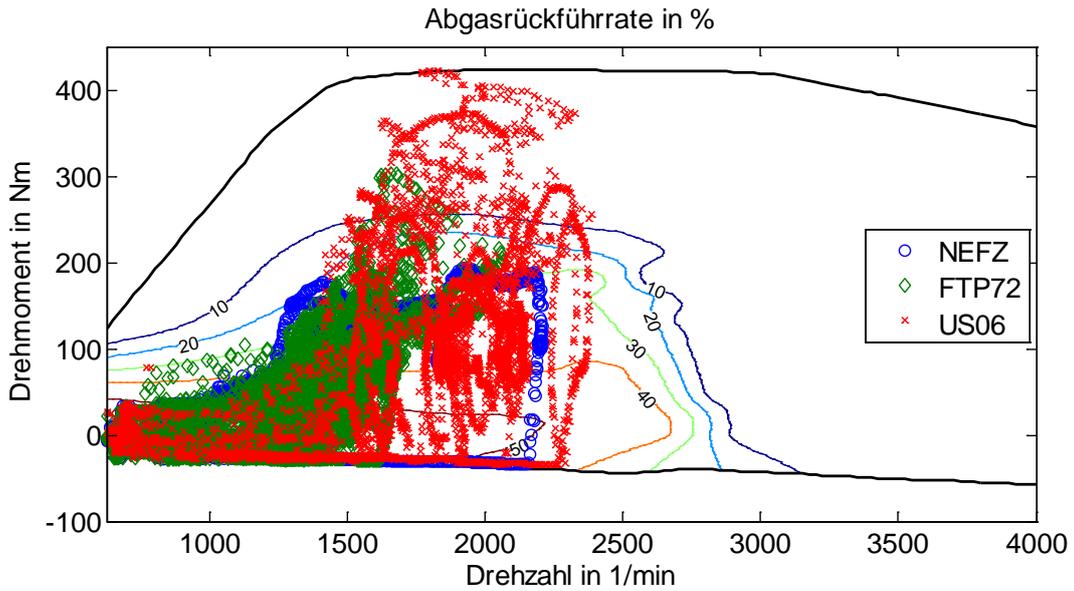


Abbildung 79 – Betriebsbereiche im AGR-Kennfeld (AUT-REF, VKM2BAS)

VKM2BAS ist nämlich so abgestimmt, dass im AUT-REF nur im NEFZ ein vollständiger Betrieb mit AGR sichergestellt ist (Abbildung 79).

Anhand von Abbildung 80 ist ersichtlich, dass mittels Hybridisierungsmaßnahmen eine Absenkung der NO_x-Emissionen im betriebswarmen Zustand um nahezu eine ganze Emissionsgesetzgebungsstufe ohne Zusatzmaßnahmen erwartet werden kann. Bei Anwendung von LPM steigt dabei bedingt durch den vermehrten Betrieb der VKM im Niedriglastbereich der Verbrauch wieder an.

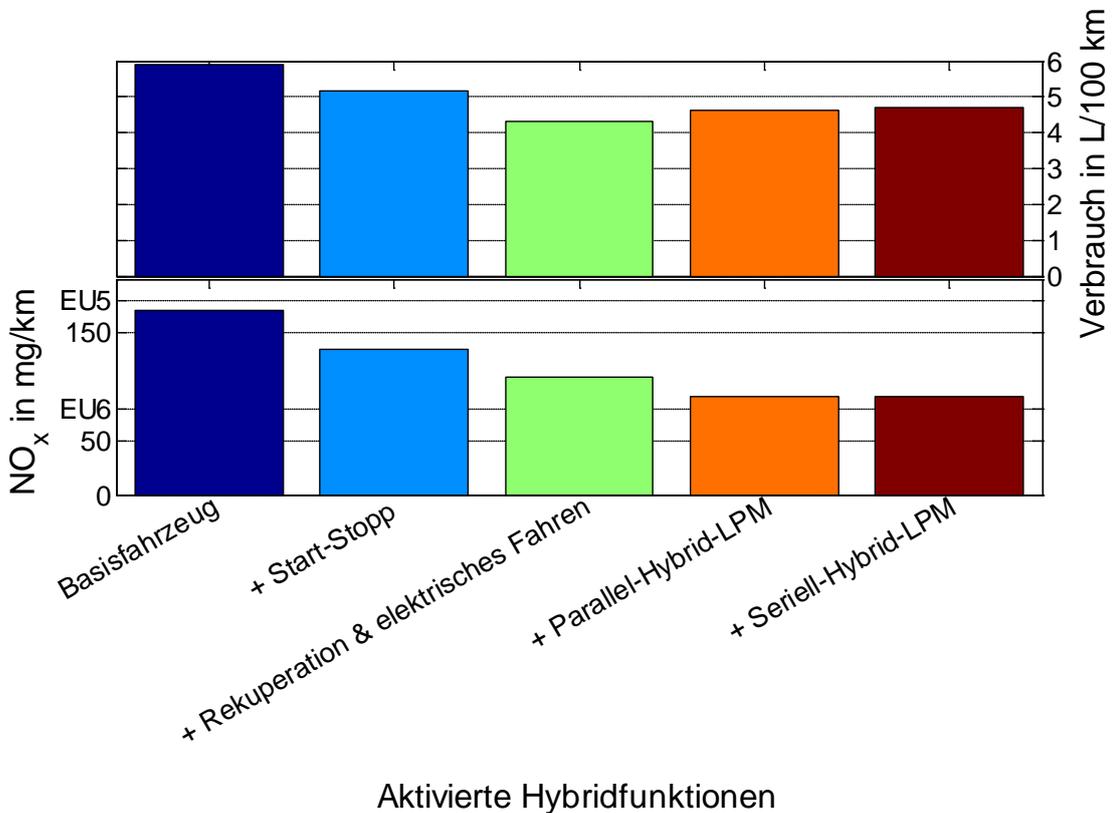


Abbildung 80 – NO_x-Reduktionspotenziale (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Ohne LPM ist das Ergebnis dabei dem verbrauchsoptimalen sehr ähnlich. Daraus folgt, dass über die LPM der Betrieb entlang eines Verbrauch-NO_x-Trade-Offs beeinflusst werden kann, während die Nutzung rekuperierter Energie eben diesen Trade-Off verbessert.

10.3.10 Potenzial NO_x-Verbrauch-Kombination

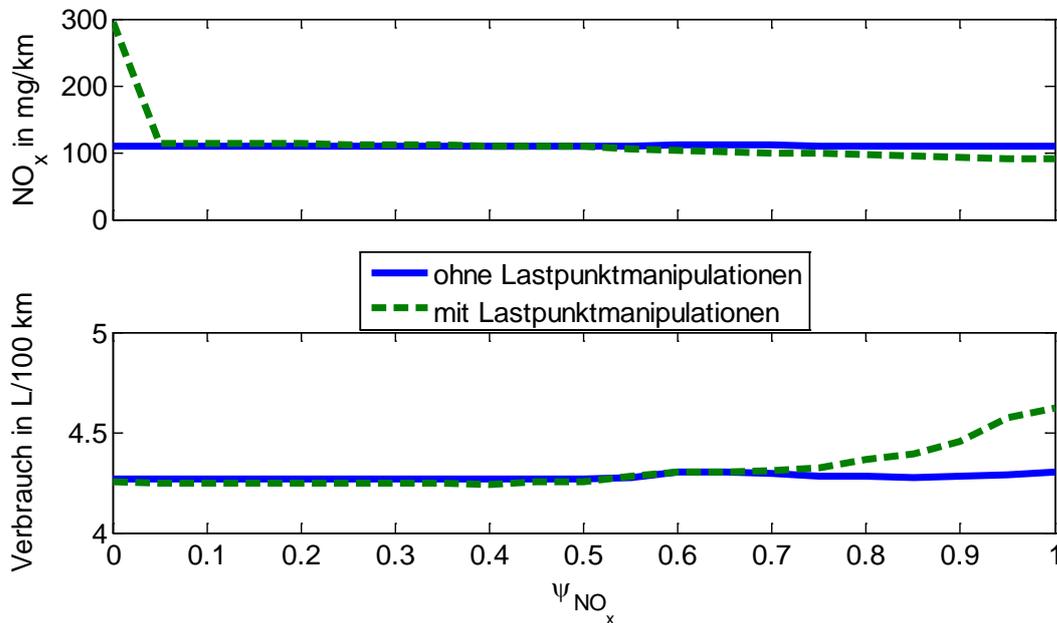


Abbildung 81 – Verbrauch- und NO_x-Ergebnisse für kombinierte Optimierung (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)¹⁴⁴

Die Einschränkungen hinsichtlich der AGR verzerren für VKM2BAS die Aussagen hinsichtlich der Emissionen. Trotzdem kann für die Kombination aus normierten NO_x- und Verbrauchskennfeld eine Variation des Multiplikators ψ_{NO_x} in Formel 28 zeigen, dass es möglich ist mit LPM den Verbrauch abzusenken, ohne die NO_x zu erhöhen (Abbildung 81).

$$z(n, md)^{Eingabe} = \dot{m}_{NO_x}^{norm}(n, md) \times \psi_{NO_x} + \dot{m}_{Kr}^{norm}(n, md) \times \psi_{Kr} \text{ mit } \psi_{Kr} = 1 - \psi_{NO_x}$$

Formel 28 – Kombination NO_x-Verbrauch

10.3.11 Reale Betriebsstrategien Verbrauch

Alle empirisch ermittelten Betriebsstrategieparameter sind in ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter) aufgelistet. Die Werte für ZA_u und Q_u wirken dabei nur bei der Strategie 'Lernendes Kriterium', weil bei den vereinfachten Varianten keine Anpassung erfolgt. Diese sind dabei empirisch auf den Anwendungsfall abgestimmt. LPM werden aufgrund deren geringen Zusatznutzens nicht angewandt.

¹⁴⁴ Bei dieser Darstellung ist bei Abweichungen von ausgeglichenen Energiebilanzen näherungsweise eine Umrechnung über mittlere spezifische Verbrauchs- bzw. NO_x-Werte erfolgt. Ohne LPM ergeben sich je nach Parameter ψ_{NO_x} unterschiedliche Abweichungen, wodurch beim Ergebnis die erwartete Monotonie nicht vollständig eingehalten wird.

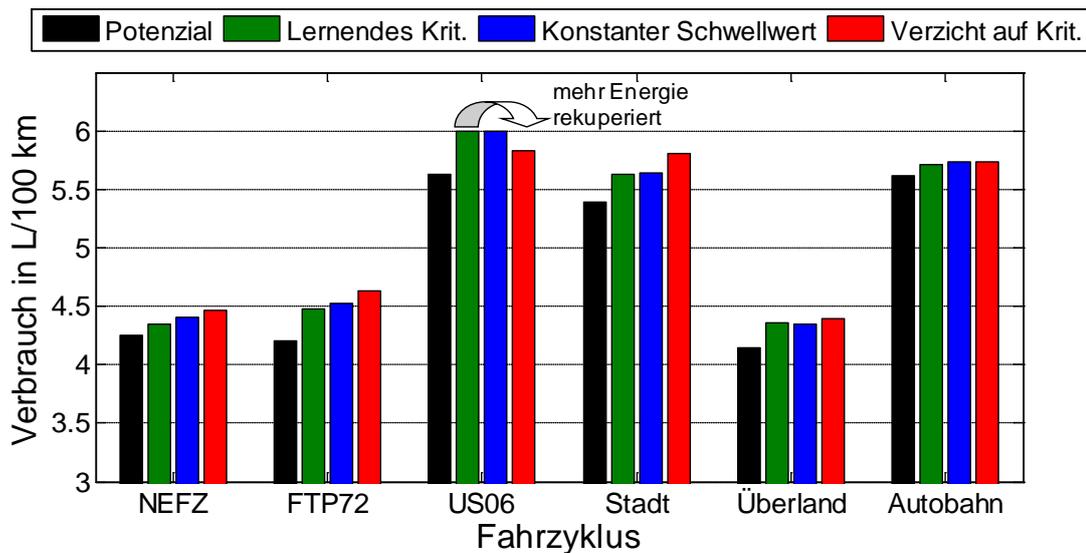


Abbildung 82 – Betriebsstrategievergleich ohne LPM (AUT-REF, VKM2BAS)

In Abbildung 82 und Abbildung 83 sind Verbrauchsergebnisse dokumentiert. Es sind zusätzlich auch die Potenzialergebnisse enthalten.

Die Strategie 'Konstanter Schwellwert' wurde nur mit 20 kW maximaler elektrischer Leistung angewandt. Sie zeigt tatsächlich in allen untersuchten Zyklen kaum Verschlechterungen gegenüber dem 'Lernenden Kriterium'.

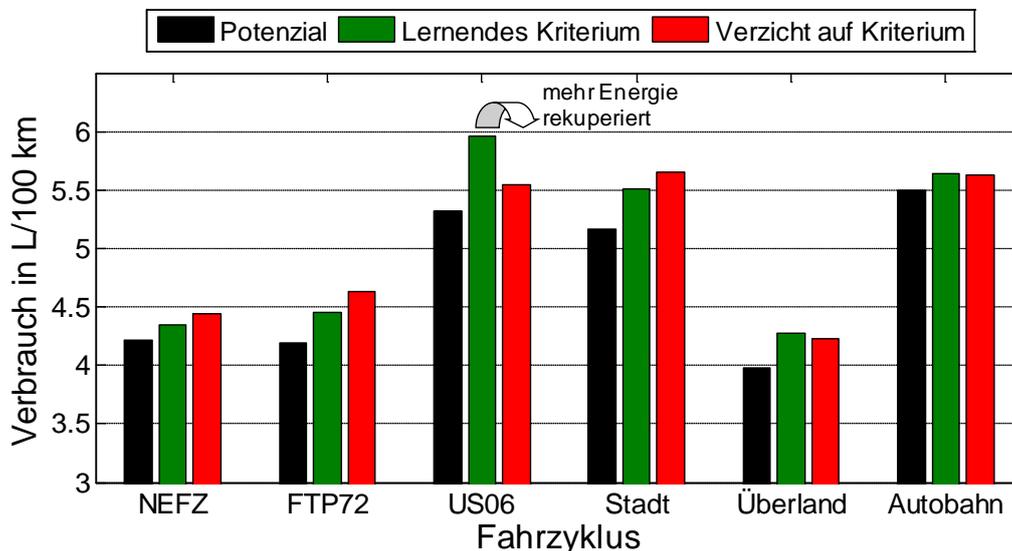


Abbildung 83 – Betriebsstrategievergleich ohne LPM (50 kW maximale EM-Leistung, AUT-REF, VKM2BAS)

Des Weiteren interessant ist noch, dass mit 'Verzicht auf Kriterium' in den dynamischen Zyklen vor allem mit 50 kW maximaler elektrischer Leistung der Verbrauch gegenüber dem 'Lernenden Kriterium' abgesenkt werden kann. Um dieses Verhalten erklären zu können, muss man beachten, dass der Speicherhub in den dynamischen Zyklen beim Grenzpotenzial deutlich größer als die jetzt vorgegebene Kapazität von 600 kJ ist. Bei 'Verzicht auf Kriterium' wird dem EES somit generell öfter Energie entnommen, weshalb mehr Energie durch

Rekuperation gespeichert werden kann. Beim 'Lernenden Kriterium' wird der Schwellwert nicht soweit abgesenkt, da schon vorher die Bereichsvorgaben erfüllt sind, die für die weniger dynamischen Zyklen entwickelt worden sind. Erhöht man den nutzbaren Speicherhub auf 1500 kJ, tritt dieses Verhalten praktisch nicht auf (Abbildung 84).

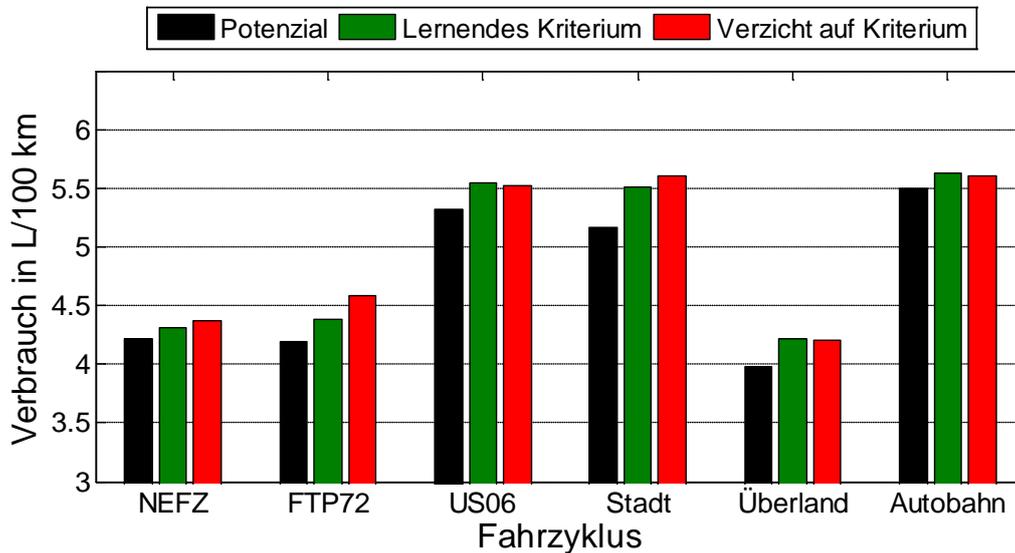


Abbildung 84 – Betriebsstrategievergleich ohne LPM (50 kW maximale EM-Leistung, AUT-REF, VKM2BAS, 1500 kJ EES-Kapazität)

Die Ergebnisse zeigen auch, dass für die untersuchte Fahrzeug-Antriebsstrang-Motor-Konfiguration bei der simulierten milden Hybridisierung ohne LPM keine aufwendigen Regelalgorithmen notwendig wären. Lässt man das Hybrid-System die durch Rekuperation gespeicherte Energie immer wenn möglich verbrauchen, verschlechtert sich das Verbrauchsergebnis nur marginal. Bei eingeschränktem Speicherhub sind sogar Vorteile gegenüber einer zyklusunabhängigen Adaption erzielbar.

10.3.12 *EiL Basis, Potenzial & reale Betriebsstrategie Verbrauch*

Die Werte der Parameter nach Kapiteln 9 für die EiL-Versuche werden empirisch festgelegt. Die verwendeten Einstellung sind in ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter) aufgelistet. Mit diesen werden für alle gemessenen bzw. simulierten Fahrzyklen Versuche durchgeführt. Im NEFZ wird zusätzlich zum Standardprogramm ('Potenzial' ohne LPM und 'Lernendes Kriterium') auch eine Variante mit LPM untersucht. Mit 'Potenzial mit LPM' sollen hauptsächlich die erwarteten Nachteile hinsichtlich der NO_x dokumentiert werden.

Abbildung 85 bis Abbildung 91 enthalten auf den folgenden Seiten die Ergebnisse der Fahrzyklusvariation. Eingetragen sind immer auch die auf Basis der stationären Kennfelder erwarteten Ergebniswerte der Hochrechnungen. Die prozentualen Relationen von Basisfahrzeug- und Hybridfahrzeugergebnis sind für Hochrechnungen bzw. EiL-Ergebnisse jeweils numerisch angegeben.¹⁴⁵

¹⁴⁵ Für den RRW entfallen die Hochrechnungen, weil das Messgerät bei der stationären Vermessung nicht immer verfügbar war.

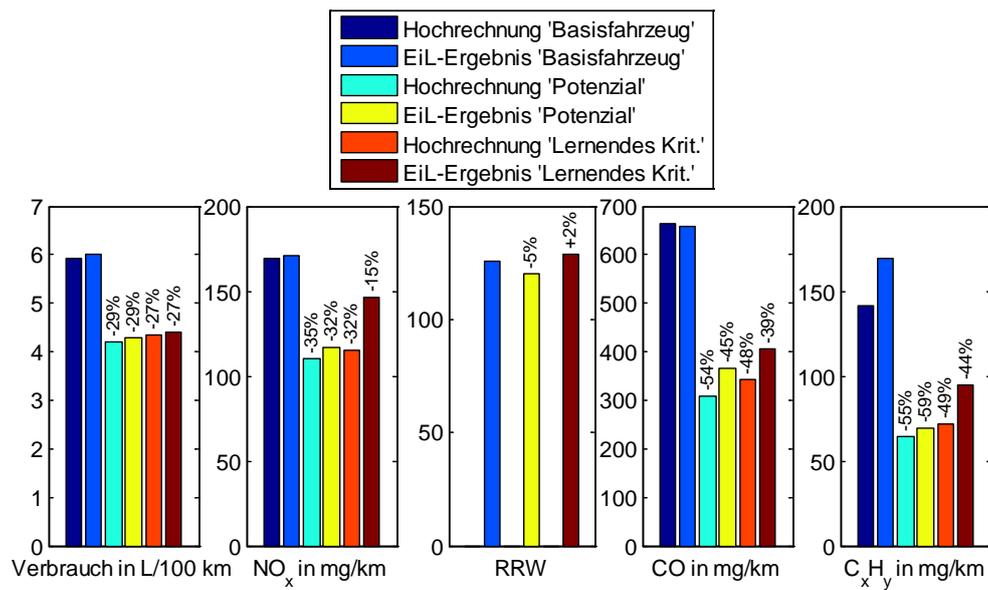
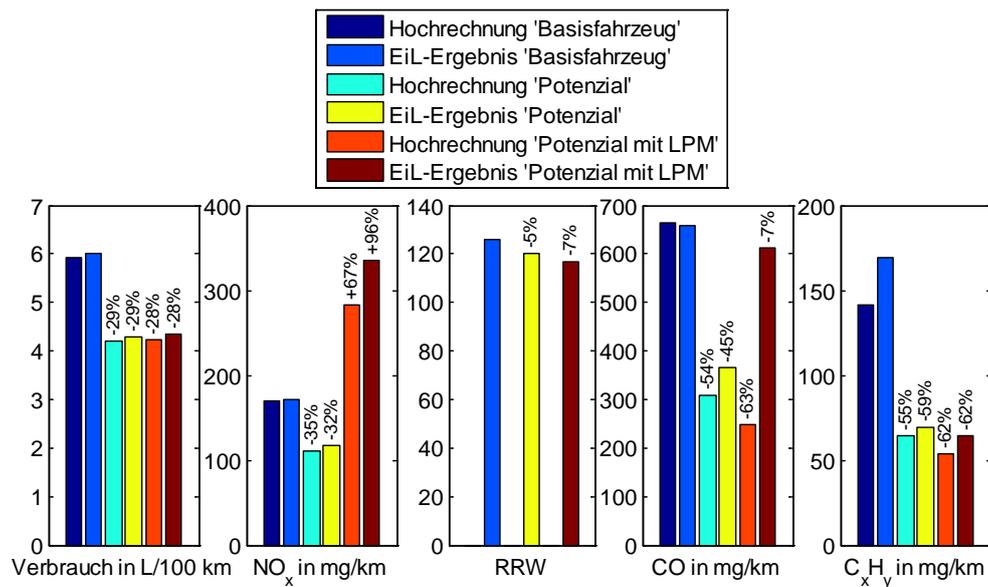


Abbildung 85 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, NEFZ, Teil 1)

Abbildung 86 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, NEFZ, Teil 2)¹⁴⁶

¹⁴⁶ Wegen einem kleineren Ladungsdefizit nach der Korrektur für EiL wird bei 'Potenzial mit LPM' mehr Verbrauch als bei 'Potenzial' erwartet.

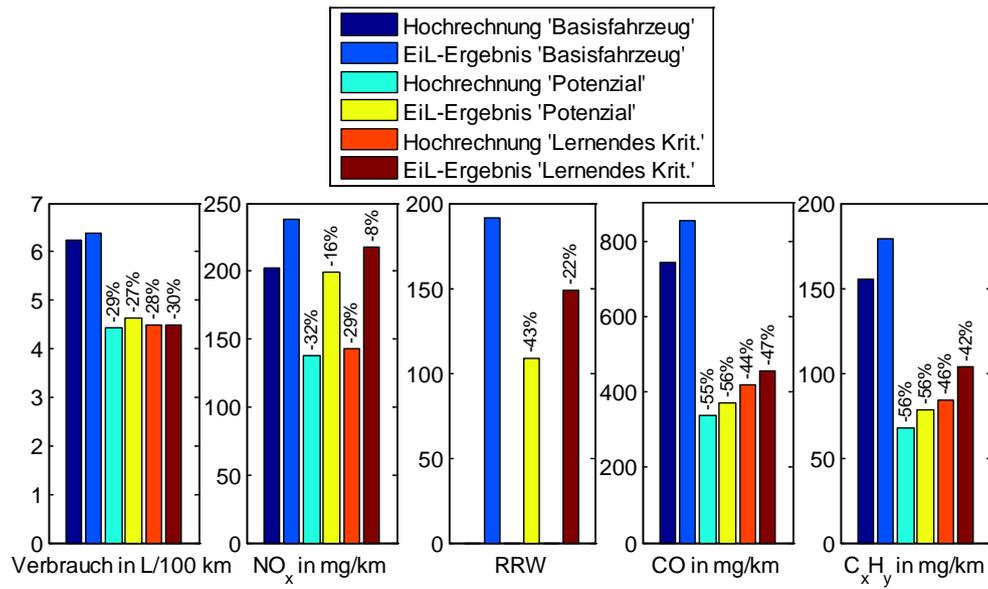


Abbildung 87 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, FTP 72)

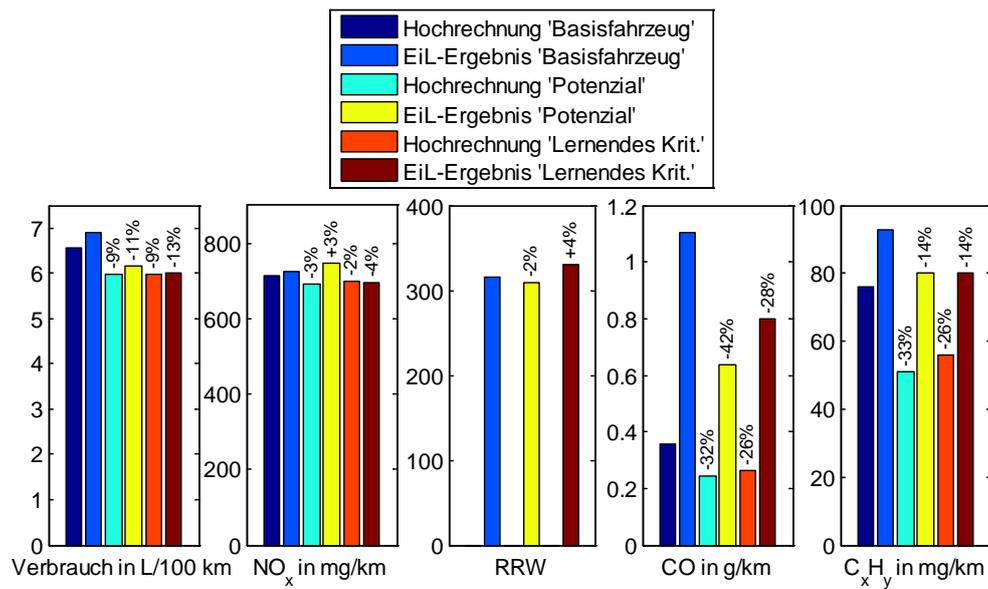


Abbildung 88 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, US06)

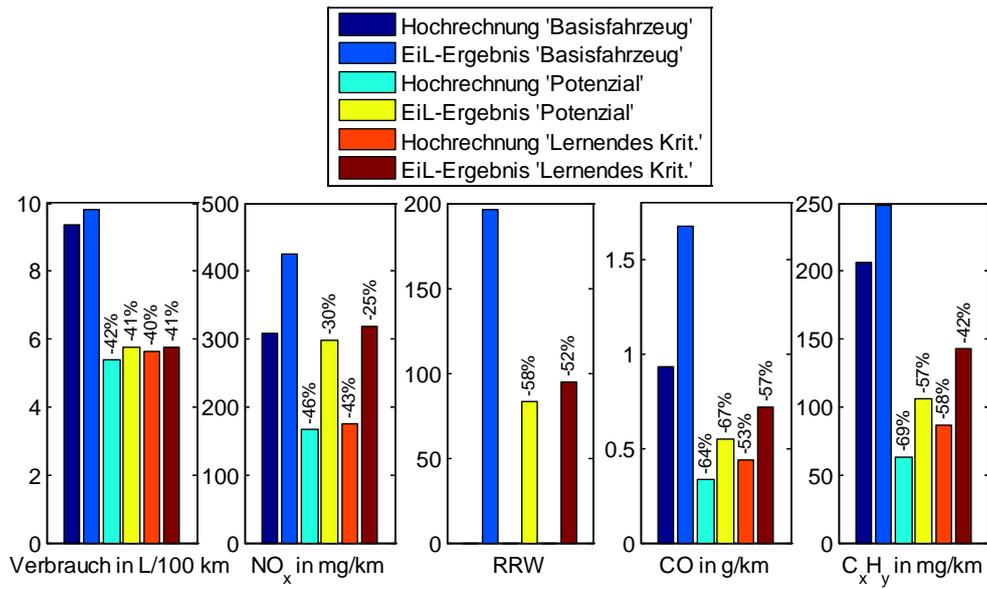


Abbildung 89 – EiL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, ARTEMIS Stadt)

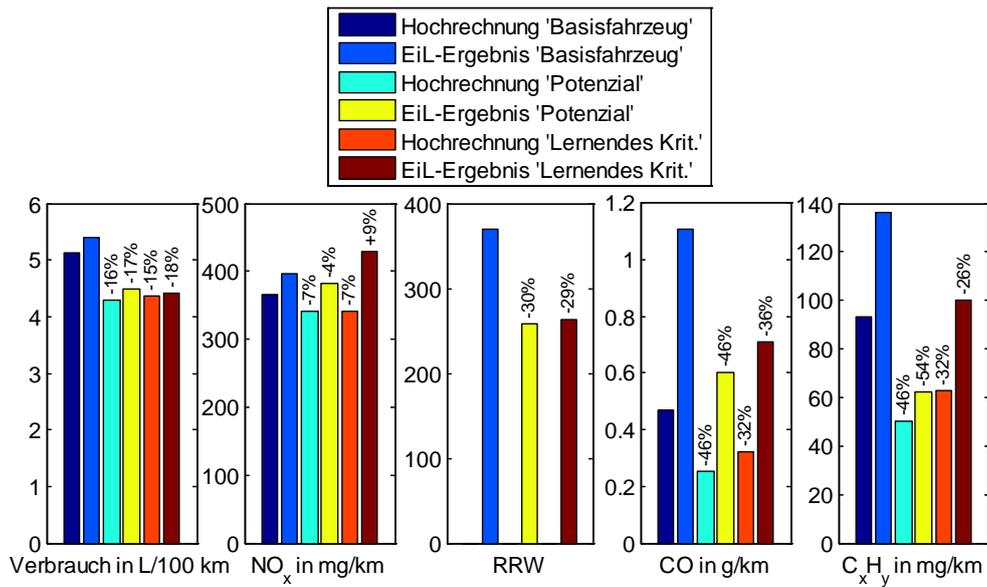


Abbildung 90 – EiL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, ARTEMIS Überland)

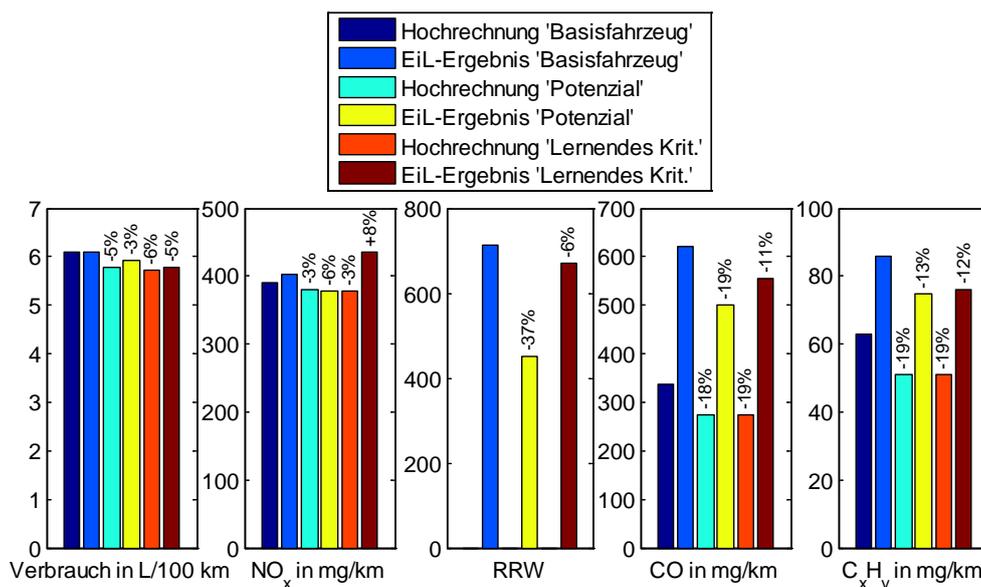


Abbildung 91 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, ARTEMIS Autobahn)

Die Hochrechnungen sagen unter betriebswarmen Bedingungen die tatsächlichen Verbrauchsergebnisse für die unterschiedlichen Hybridstrategien in allen Zyklen gut voraus.

Der Vergleich der Emissionen im Rohabgas mit dem Basisergebnis zeigt, dass ohne LPM neben der Verbrauchseinsparung auch eine deutliche Reduktion aller gesetzlich reglementierten Schadstoffkomponenten ohne zusätzliche Maßnahmen gelingt. Emissionen während Betrieb mit schlechtem Wirkungsgrad werden durch Abschalten der VKM vermieden. Ohne LPM hat die NO_x-Reduktion dieselbe prozentuelle Größenordnung wie die Verbrauchseinsparung.

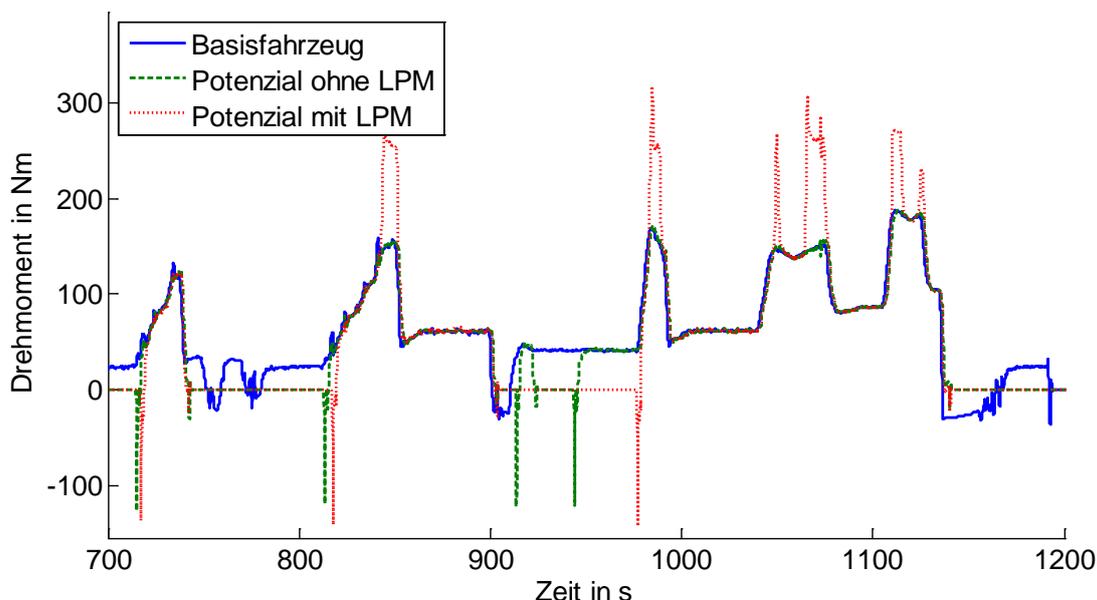


Abbildung 92 – Drehmoment (Potenzial ohne LPM vs. Potenzial mit LPM, NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Im Gegensatz dazu (über)kompensieren erhöhte Emissionen während der Drehmomentanhebung bei Anwendung von LPM diese Reduktion. Die NO_x-Massenströme sind wie erwartet in den Phasen mit erhöhtem Drehmoment (Abbildung 92) deutlich erhöht

(Abbildung 93). Zu erkennen ist auch, dass die Massenströme während des Normalbetriebs praktisch unabhängig von der Vorgeschichte sind und dass Starts zu NO_x -Spitzen führen. Als Folge kommt es auch zu Abweichungen vom Ergebnis der Hochrechnung. Bei C_xH_y gelingt unabhängig von der Hybridstrategie eine Reduktion, weil diese bei erhöhtem Drehmoment tendenziell nicht überproportional ansteigen.

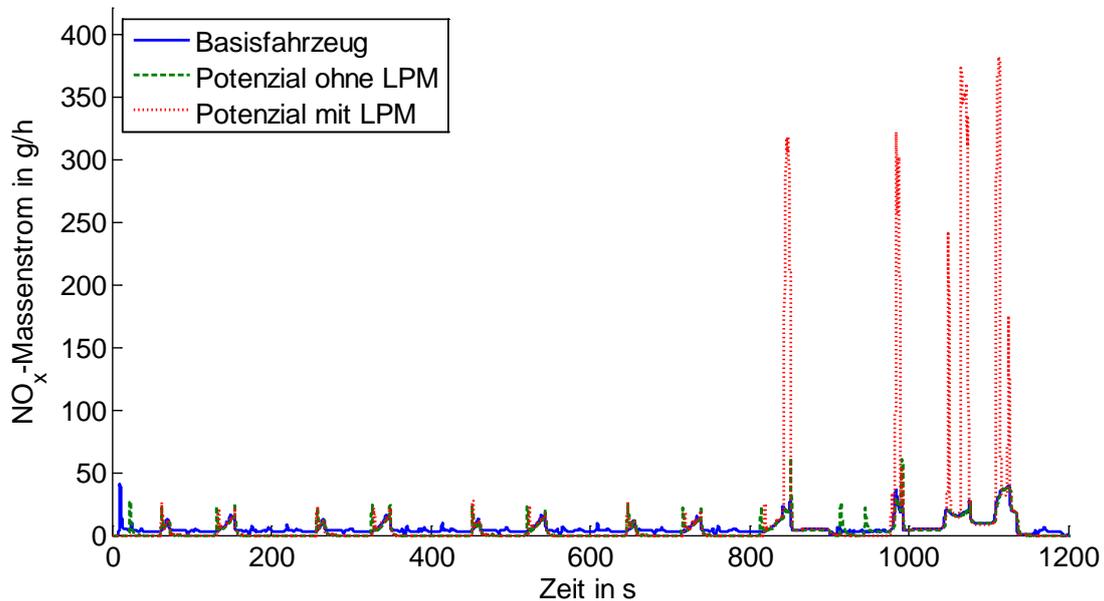


Abbildung 93 – NO_x -Massenstrom (Potenzial ohne LPM vs. Potenzial mit LPM, NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Im NEFZ ist die Korrelation der Emissionen mit den Hochrechnungsergebnissen noch aussagekräftig. In den dynamischeren Zyklen treten unabhängig von der Hybridisierung teilweise große Abweichungen auf. Bei den Zyklen mit höherer Dynamik und niedrigen Leistungen steigen tendenziell die NO_x stärker an als aus dem Kennfeld zu erwarten wäre, bei hoher Dynamik und hoher Last hingegen hauptsächlich die CO-Werte.

Die Tendenzen hinsichtlich aller Emissionen werden grundsätzlich richtig vorausberechnet, auch wenn die absoluten Werte nicht den gemessenen entsprechen. Es ist davon auszugehen, dass Hybridfahrzeuge unter betriebswarmen Randbedingungen nicht zu höheren Herausforderungen für die Abgasnachbehandlung führen. Dazu müssen allerdings die AGR und die Regelung des Luftsystems auf den Basiszyklus abgestimmt sein, was hier nur für den NEFZ gilt. C_xH_y , CO und Rußemissionen können nämlich im betriebswarmen Zustand durch die üblichen Abgasnachbehandlungssysteme Oxidationskatalysator und DPF ausreichend reduziert werden. Systembeschreibungen findet man bspw. in der Literatur.¹⁴⁷ Entscheidend dafür ist die Abgastemperatur vor Eintritt in die Nachbehandlungsstrecke.

¹⁴⁷ siehe bspw. Breitbach H. et al.: Brennverfahren und Abgasnachbehandlung im Mercedes-Benz-Bluetec-Konzept (in: MTZ, 6/2007), S. 432ff bzw. Cipolla G. et al.: Diesel Particulate Filters - Field Experiences with Current Systems and Factors that will define Future Designs (in: 27. Wiener Motorensymposium, 27.-28.4.2006)

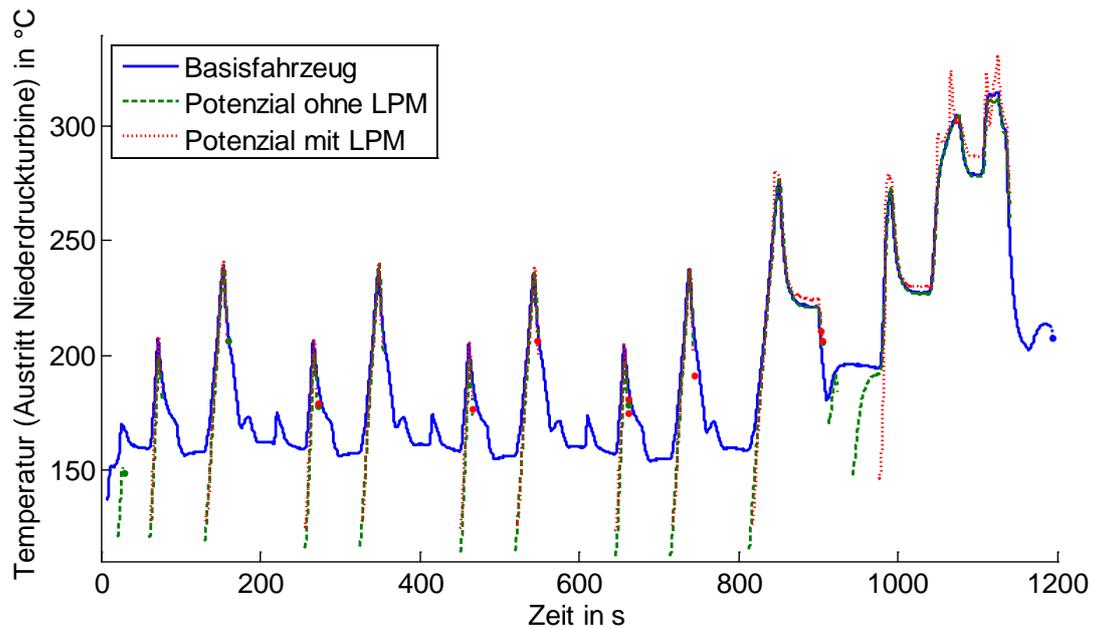


Abbildung 94 – Abgastemperatur (Potenzial ohne LPM vs. Potenzial mit LPM, NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Die während VKM-Betrieb gemessenen Gastemperaturen nach dem Turboladerausritt lassen gegenüber der Referenz keine Nachteile erwarten (Abbildung 94). Außer während der Startphasen sind diese praktisch unabhängig von der Hybridisierung. Die somit erzielbare Oxidation der C_xH_y , ist auch eine wesentliche Voraussetzung für eine effektive NO_x -Nachbehandlung auf Basis der selektiven katalytischen Reduktion.¹⁴⁸ Alle hier gemessenen Temperaturverläufe weisen allerdings noch kein zufriedenstellendes Niveau auf. Die Voraussetzungen für ergänzende Wärmemanagementmaßnahmen werden jedoch durch die hier umgesetzte Hybridisierung und Betriebsstrategie nicht entscheidend verschlechtert. Weiterführende Hinweise dazu enthält ANHANG I (Ausgewählte Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen). Diese Temperaturen sind mit Messaufnehmern mit 1.5 mm Durchmesser gemessen worden. Korrekturen nach ANHANG J (Korrektur transienter Gastemperaturmessungen) sind nicht berücksichtigt. Beim Einsatz von Messaufnehmern mit größeren Durchmessern sind diese aber angezeigt.

¹⁴⁸ siehe Schweiger H.: Untersuchung des Einflusses von Kohlenwasserstoffen auf den NO_x -Umsatz bei Selektiver Katalytischer Reduktion, 2009

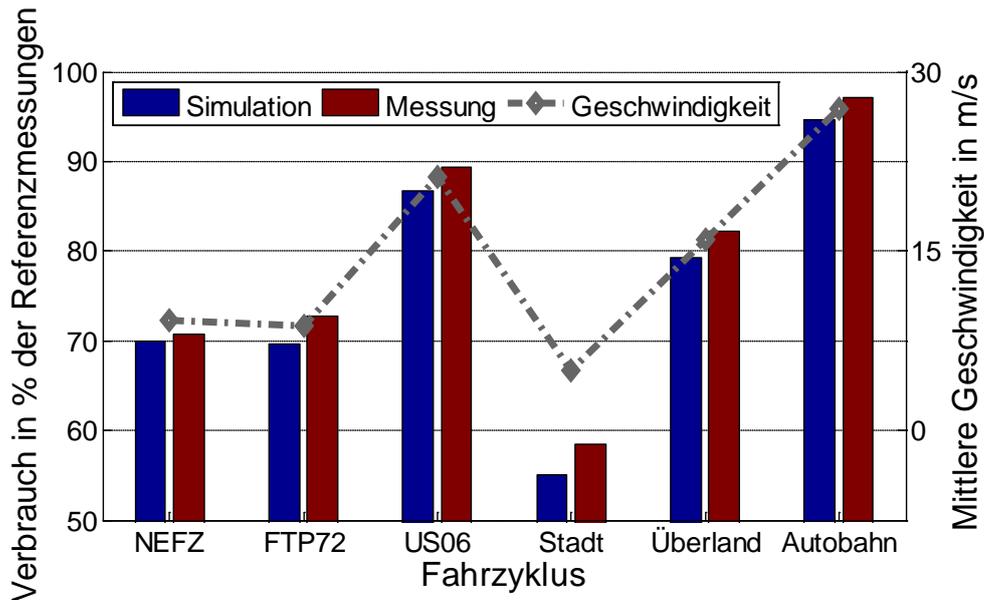


Abbildung 95 – Relative Verbrauchswerte (Potenzial ohne LPM, AUT-REF, VKM2BAS)

Abschließend werden die relativen Verbrauchsergebnisse der untersuchten Zyklen miteinander verglichen (Abbildung 95). Die Verbrauchsreduktion ist dort kleiner, wo die Dynamik des Fahrzyklus, hier gekennzeichnet durch die mittlere Geschwindigkeit, groß ist.

Begründet werden kann dieser Zusammenhang neben dem geringeren Leerlaufanteil und dem verringerten Anteil rekuperierbarer Energie auch über den im Mittel höheren Lastbereich der durch elektrischen Vortrieb vermiedenen VKM-Betriebspunkte, die tendenziell einen günstigeren Wirkungsgrad aufweisen. Auch mit der Strategie 'Lernendes Kriterium' stimmen die gemessenen Verbrauchswerte gut mit der Simulation überein.

Die bei der Strategie 'Lernendes Kriterium' gegenüber dem 'Potenzial' tendenziell erhöhten Emissionen resultieren hauptsächlich aus den vermehrten Starts, die aus der Beschränkung auf die Kenntnis vergangener und gegenwärtiger Zustände resultieren.

Ebenfalls im NEFZ ist das Ergebnis der Wirkungsgradvariation durch Messungen abgesichert. Diese Ergebnisse zeigen auch vergleichbare Korrelationen. Die Emissionsunterschiede liegen allerdings teilweise im Bereich der Messfehler. Aufgelistet sind die Ergebnisse in Tabelle 17.

Tabelle 17 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2BAS, NEFZ, Wirkungsgradvariation)

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO _x	RRW	CO	C _x H _y	Verbrauch
			mg/km		mg/km	mg/km	L/100km
NEFZ	Potenzial bei $\eta_{sys} = 12.5\%$	Hochrechnung	132		509	104	5.08
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 12.5\%$	EiL	160	168	549	104	5.15
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 12.5\%$	EiL/Hochrechnung	121%		108%	100%	102%
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 25.4\%$	Hochrechnung	127		446	93	4.88
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 25.4\%$	EiL	155	150	498	87	4.97
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 25.4\%$	EiL/Hochrechnung	122%		112%	94%	102%
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 35.3\%$	Hochrechnung	122		406	85	4.73
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 35.3\%$	EiL	156	102	391	85	4.81
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 35.3\%$	EiL/Hochrechnung	128%		96%	101%	102%
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 72.2\%$ (Standard)	Hochrechnung	110		308	64	4.20
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 72.2\%$ (Standard)	EiL	117	120	365	69	4.28
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 72.2\%$ (Standard)	EiL/Hochrechnung	107%		119%	108%	102%
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 100\%$	Hochrechnung	104		264	55	3.95
	Potenzial bei $\eta_{sys} = 100\%$	EiL	111	119	310	48	4.03
Potenzial bei $\eta_{sys} = 100\%$	EiL/Hochrechnung	106%		117%	89%	102%	

10.3.13 Erkenntnisse aus den Berechnungen und Messungen

Die Aussagen hinsichtlich der Emissionen beschränken sich in diesem Kapitel wegen der fehlenden AGR-Abstimmung auf dynamischere Zyklen auf den NEFZ. Die Anwendung von Potenzialermittlung zeigt, dass bei geeigneter Wahl der Strategie neben der Verbrauchsreduktion auch eine Absenkung der reglementierten Schadstoffe zu erwarten ist. Eine Strategie ohne LPM ist dabei vorteilhaft. Diese Absenkung tritt auch bei Verwendung der Betriebsstrategie 'Lernendes Kriterium' auf. Teilweise hohe Emissionen sind aufgrund

der Startvorgänge zu erwarten, wobei hier noch keine endgültige Applikation erfolgt ist und auch Abweichungen durch das Prüfverfahren auftreten.

10.4 Automatikgetriebefahrzeug mit verbesserter VKM

Bis auf die VKM gelten in diesem Kapitel dieselben Randbedingungen wie bei den Berechnungen und Versuchen mit dem Basismotor in Kapitel 10.3.

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, dass eine Adaption im Antriebsstrang notwendig ist, um in dynamischen Fahrzyklen NO_x -Ergebnisse zu erzielen, die als Basis für Maßnahmen zur Einhaltung zukünftiger Abgasgesetzgebungen geeignet sind. Außerdem ist das Basisverbrauchs-niveau abzusenken, um eine Bezugsbasis zu erhalten, die besser dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Deshalb bildet dieser Abschnitt nur einen Zwischenschritt, bei dem viele Untersuchungen entfallen.

10.4.1 Niedrigemissionskonzept VKM2EVO

Zur Reduktion der NO_x -Emissionen ist VKM2BAS adaptiert worden. Die Evolutionsstufe VKM2EVO weist die folgenden Unterschiede auf:

- Ein Niederdruck-AGR-System ersetzt die bisherige Hochdruckvariante.
- Der Motor wird jetzt mit einem Prototyp eines motornahen Wasser-Luft-Ladungskühlers betrieben, um die Ansprechzeiten der AGR-Regelung kurz zu halten und die Ladung effektiv zu kühlen.
- Der 2-stufige Abgasturbolader mit By-Pass- und Waste-Gate-Regelung ist durch einen 1-stufigen mit variabler Turbinengeometrie ersetzt worden.

Mit diesem System wird der Anwendungsbereich der AGR deutlich erweitert. Die NO_x -Emissionen der neuen Konfiguration zeigt Abbildung 96.

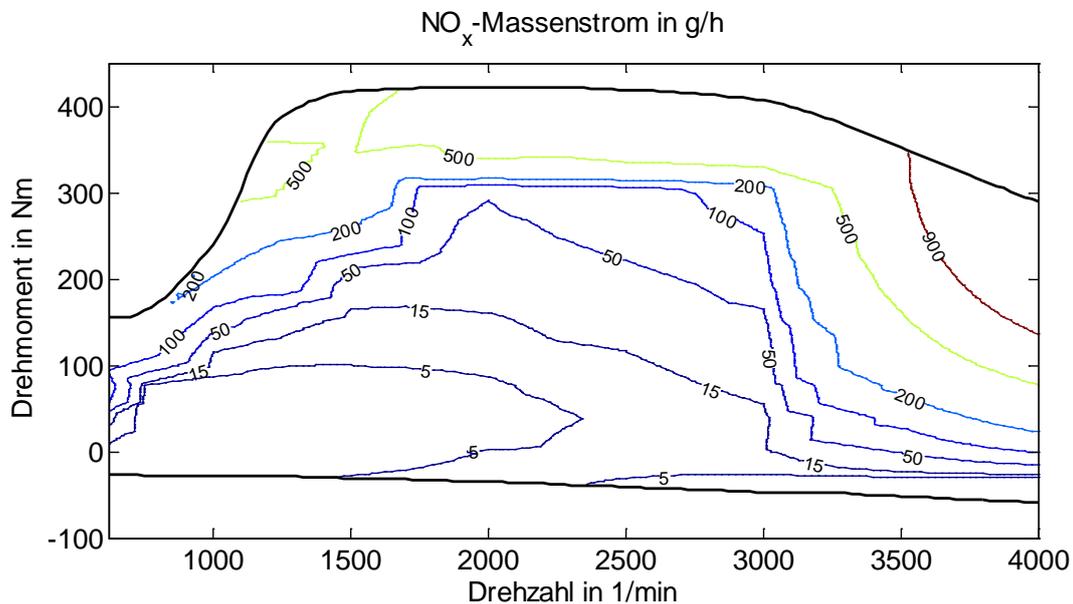


Abbildung 96 – NO_x -Emissionen VKM2EVO

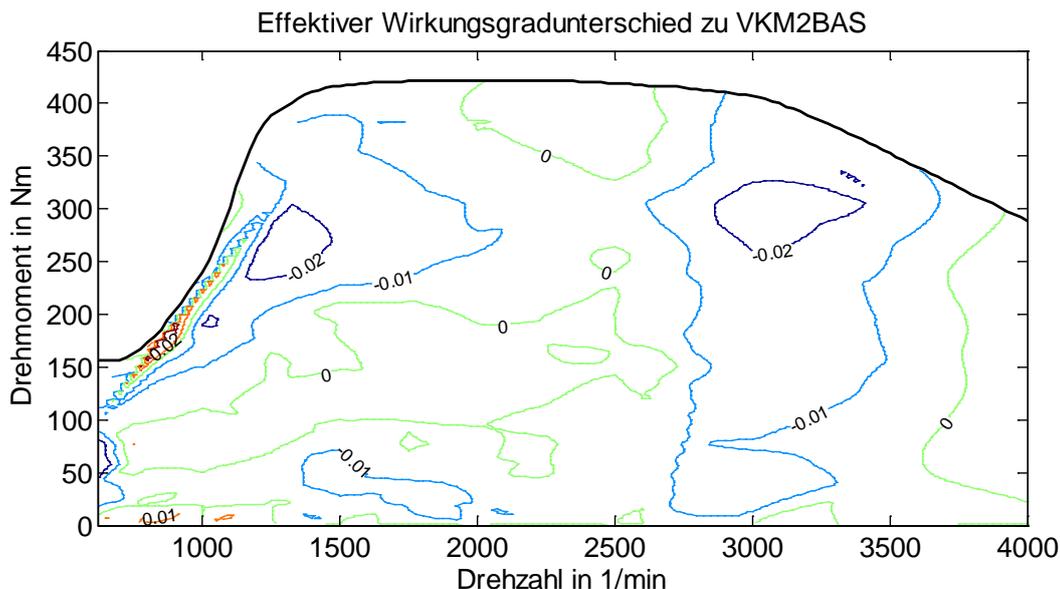


Abbildung 97 – Effektiver Wirkungsgradunterschied durch Motorupdate

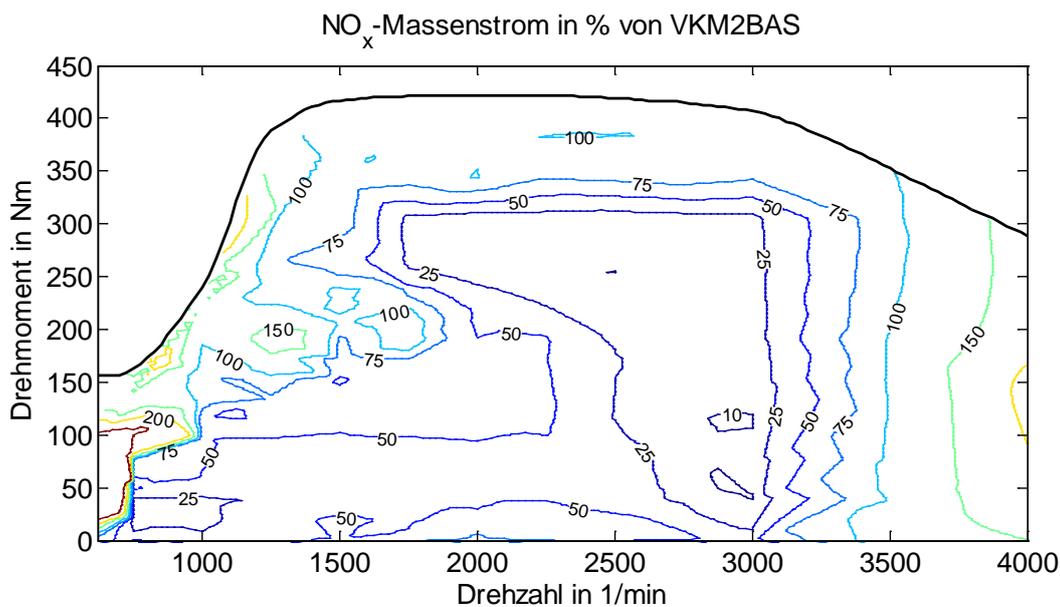


Abbildung 98 – Relativer NO_x -Massenstrom nach Motorupdate

Bei nahezu unveränderten Wirkungsgraden (Abbildung 97) konnte eine deutliche NO_x -Reduktion erreicht werden (Abbildung 98). Dabei ist darauf geachtet worden, dass mit dem ND-AGR-System die Rußemissionen gegenüber der Basis ebenfalls abgesenkt werden müssen, wenn die Beladung des DPF vergleichbar sein soll. Der Grund dafür ist, dass beim ND-AGR-System auch der gesamte AGR-Strom gefiltert wird.

Die detaillierte Beschreibung der Ziele, Methoden und Ergebnisse der Emissionsabstimmung entfällt hier, weil diese hier nur als Randbedingung für die weiteren Berechnungen verwendet werden.

10.4.2 Potenzial Verbrauch

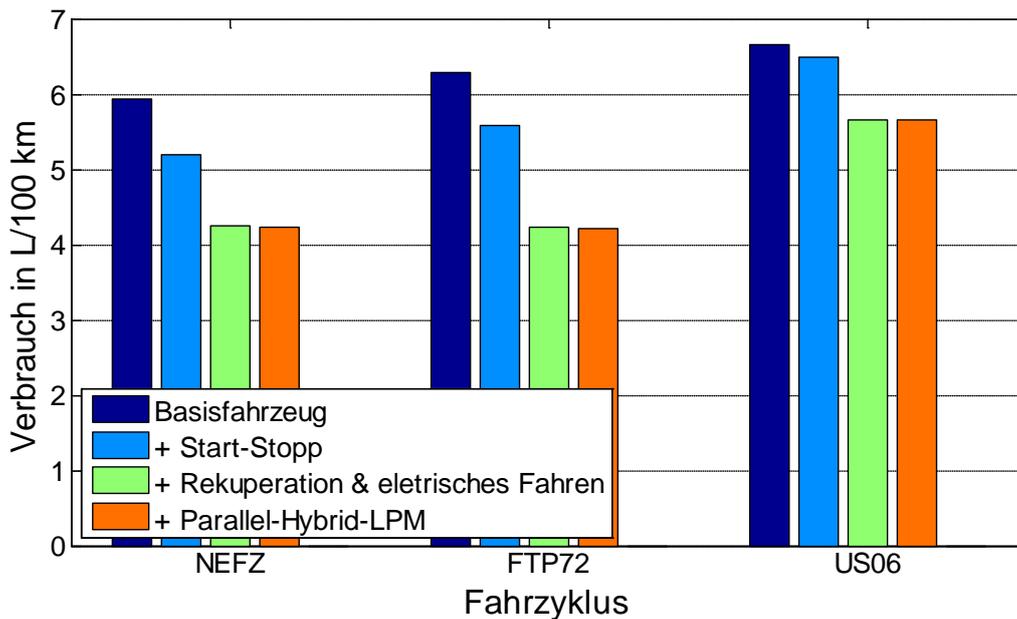


Abbildung 99 – Fahrzyklusvariation (AUT-REF, VKM2EVO)

Mit VKM2EVO mit erweitertem Anwendungsbereich der AGR verändern sich die Verbrauchsergebnisse in den Zertifizierungszyklen (Abbildung 99) nahezu nicht. Die wieder nicht dargestellten LPM im SH-Betrieb zeigen auch hier keine zusätzlichen Potenziale. Bis auf deutlich reduzierte NO_x -Steigerungen bei LPM-Anwendung sind die Ergebnisse qualitativ den mit VKM2BAS erzielten gleichwertig. LPM zeigen keine erkennbaren Vorteile für das Gesamtsystem.

10.4.3 Potenzial NO_x

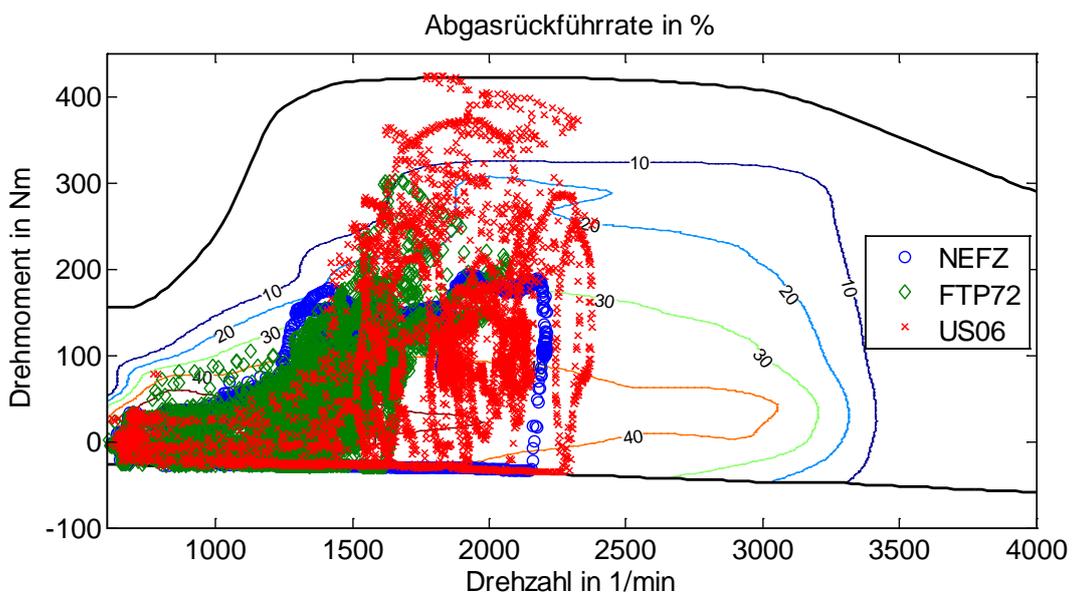
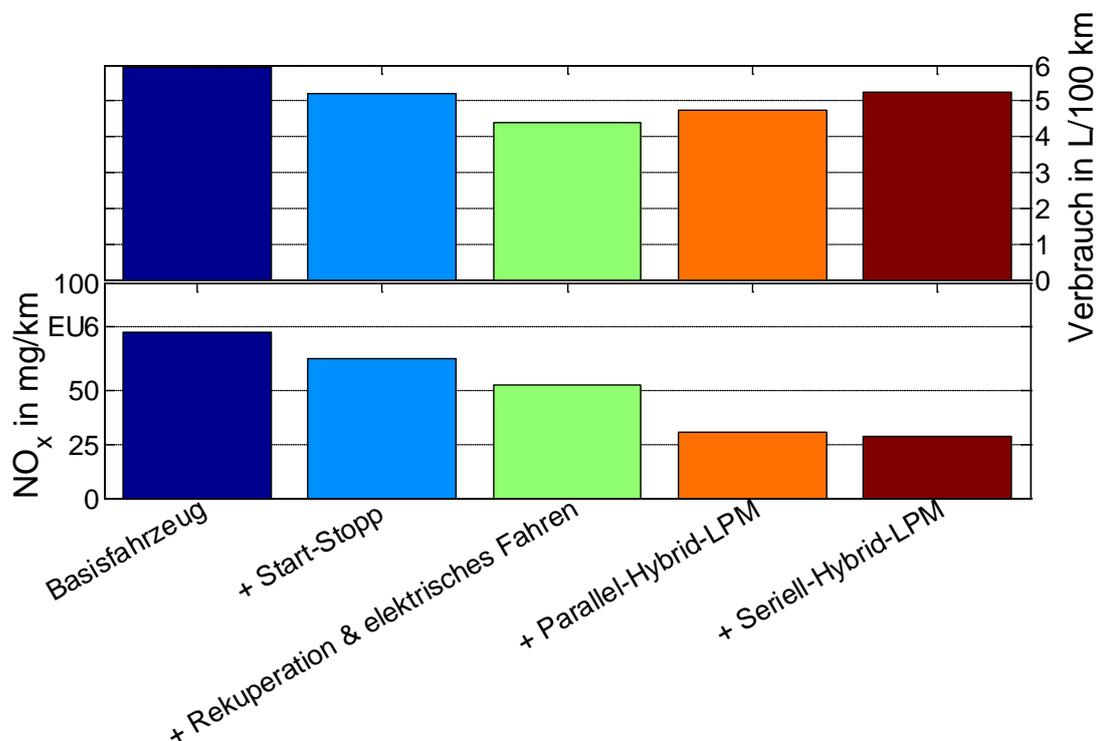


Abbildung 100 – Betriebsbereiche im AGR-Kennfeld (AUT-REF, VKM2EVO)

Mit der bestehenden Antriebsstrangkonfiguration und VKM2EVO ist trotz des deutlich erweiterten AGR-Bereichs nur im NEFZ ein Betrieb mit ausreichender AGR gesichert (Abbildung 100). Die NO_x -Potenziale werden daher wieder nur für diesen Zyklus berechnet

(Abbildung 101). Obwohl schon die Basiskonfiguration ein deutlich abgesenktes NO_x -Niveau erwarten lässt, können noch weitere Reduktionspotenziale errechnet werden. Wieder gilt, dass die Ergebnisse von NO_x - und Verbrauchsoptimierung erst bei Anwendung von LPM entscheidend abweichen.



Aktivierte Hybridfunktionen

Abbildung 101 – NO_x -Reduktionspotenziale (NEFZ, AUT-REF, VKM2EVO)

Um auch für die Amerikanischen Zyklen (auch als Referenz für andere vergleichbare dynamische Zyklen) sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, wird ein veränderter Antriebsstrang simuliert. Diese Ergebnisse folgen in Kapitel 10.5.

10.4.4 Potenzial NO_x -Verbrauch-Kombination

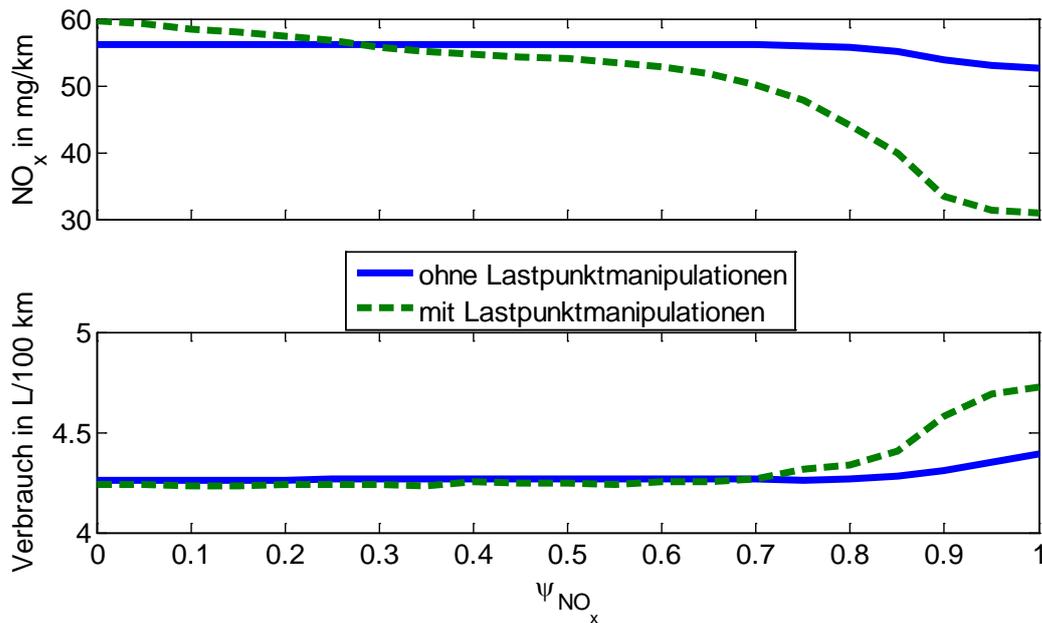


Abbildung 102 – Verbrauch- und NO_x -Ergebnisse für kombinierte Optimierung (NEFZ, AUT-REF, VKM2EVO)

Im NEFZ kann wieder gezeigt werden, dass es durch die Anwendung von LPM möglich ist NO_x oder Verbrauch zu senken ohne die jeweils anderen Größe stark zu erhöhen. Ohne LPM sind nach Abbildung 102 die Ergebnisse wieder nahezu unabhängig von den Multiplikatoren.

10.4.5 EIL Basis

Tabelle 18 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (AUT-REF, VKM2EVO, NEFZ)

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO_x	RB_{DPF}	CO	C_xH_y	Verbrauch
			mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	L/100km
NEFZ	Basisfahrzeug	Hochrechnung ¹⁴⁹	77	34	1357	337	5.94
	Basisfahrzeug	EiL	76	32	1403	384	6.15
	Basisfahrzeug	EiL/Hochrechnung	99%	93%	103%	114%	104%

Aufgrund der in den US-Zyklen nicht gegebenen Möglichkeit des vollständigen Betriebs mit AGR gibt es für diese Variante lediglich im NEFZ-Basiszyklus Messergebnisse (Tabelle 18). Diese zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Hochrechnung.

10.5 2. Virtueller Triebstrang mit Doppelkupplungsgetriebe

Die Ergebnisse mit dem Automatikgetriebefahrzeug AUT-REF weisen verschiedene Probleme auf:

- Einerseits basieren sie auf nicht verifizierbaren Getriebeverlustraten. Damit steht keine abgesicherte Simulationsmethode zur Verfügung und das Schaltverhalten kann ohne Zugriff auf das Getriebesteuergerät und ohne anschließende erneute

¹⁴⁹ Für diese Hochrechnung sind für den VKM-Betriebspunkt bei Fahrzeugstillstand Mittelwerte aus den Leerlaufphasen der ersten Zyklusmessung verwendet worden, um das Verhalten mit Drehmomentwandler besser abzuschätzen.

Vermessung am Rollenprüfstand nicht beeinflusst werden. Variationen hinsichtlich der fahrzeug- oder fahrzyklusdefinierten Randbedingungen sind ebenfalls nicht durchführbar.

- Andererseits werden trotz verbesserter VKM höhere Zyklusverbrauchswerte ermittelt. Anhand des NEFZ kann gezeigt werden, dass hierfür nicht die veränderten Fahrwiderstände, sondern erhöhte Antriebsstrangverluste ursächlich sind (Abbildung 103). Vor allem die Wandlerverluste bei Fahrzeugstillstand wirken sich hier nachteilig aus.
- Der durchschnittliche VKM-Wirkungsgrad (ermittelt ohne Schub- und Leerlaufbetrieb) ist nämlich gegenüber VKM1BAS um 1.9 %-Punkte gesteigert worden. Die Verbesserung der VKM für niedrigere NO_x-Emissionen beeinflusst den mittleren VKM-Wirkungsgrad hingegen näherungsweise nicht.

Aufgrund dieser Probleme wird wieder ein DCT ausgelegt. Im Gegensatz zur ersten Auslegung DCT1 (siehe Kapitel 10.2) wird hier aber Rücksicht auf dynamische Fahrzyklen und geplante EIL-Versuche genommen. In diesem Sinne muss das Schaltverhalten an den AGR-Bereich und das Verbrauchskennfeld angepasst werden. Die Schaltvorgänge werden so simuliert, dass sich ein realistisches VKM-Verhalten ergibt.

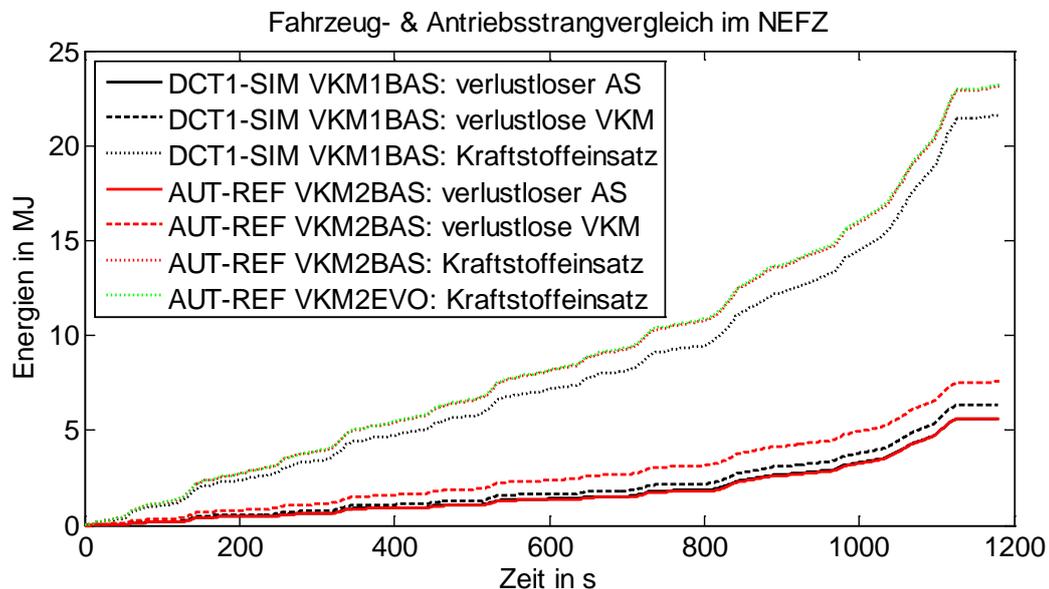


Abbildung 103 – Wirkungsgradnachteil Automatikgetriebe

10.5.1 Abgeleitetes Fahrzeug DCT2-SIM

Basis für die Simulation des Getriebes sind gemessene Verlustdaten eines ähnlichen Getriebes, das die Übertragung etwas höherer Drehmomente und Leistungen erlaubt als VKM2EVO leisten kann. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Verluste tendenziell eher überbewertet werden. Es wird definiert, dass die Verlustdaten unabhängig von der Leistungsflussrichtung gelten, also auch bei Rekuperationsbetrieb.

Außer den Getriebe- und Differenzialdefinitionen werden alle Fahrzeugdaten des AUT-REF übernommen.

Die Übersetzungen werden progressiv gewählt, wobei der höchste Gang nicht für Beschleunigungen vorgesehen wird. Um ausgehend vom stationären Leerlauf mit einer kurzen Einkuppelphase losfahren zu können, ist die Gesamtübersetzung im ersten Gang niedriger als bei der Automatikgetriebe-Variante simuliert. Die Hybrid-Berechnungen werden auch für Schaltvorgänge grundsätzlich unverändert durchgeführt.

Für die Hybridberechnungen mit diesem Getriebe gelten folgende Bedingungen:

- Für die Potenzialberechnungen wird vereinfacht immer elektrisches Fahren bzw. Rekuperation mit abgekoppelter VKM aktiviert, wenn der erste Gang eingelegt ist.
- Mit realen Betriebsstrategien ist hingegen auch im ersten Gang das Aktivieren von VKM-Betrieb möglich. Die Leistungs- und Drehzahlanforderung richtet sich dann näherungsweise nach dem Ergebnis beim Basisfahrzeug.¹⁵⁰
- In Schaltphasen wird kein Betriebsartenwechsel erlaubt.

Ergebnisse der Simulation sind ein wieder in den Bereich der ersten Simulation (DCT1) gesenkter Antriebsstrangverlust und ein in Kombination mit VKM2EVO reduzierter Primärenergieeinsatz (Abbildung 104).

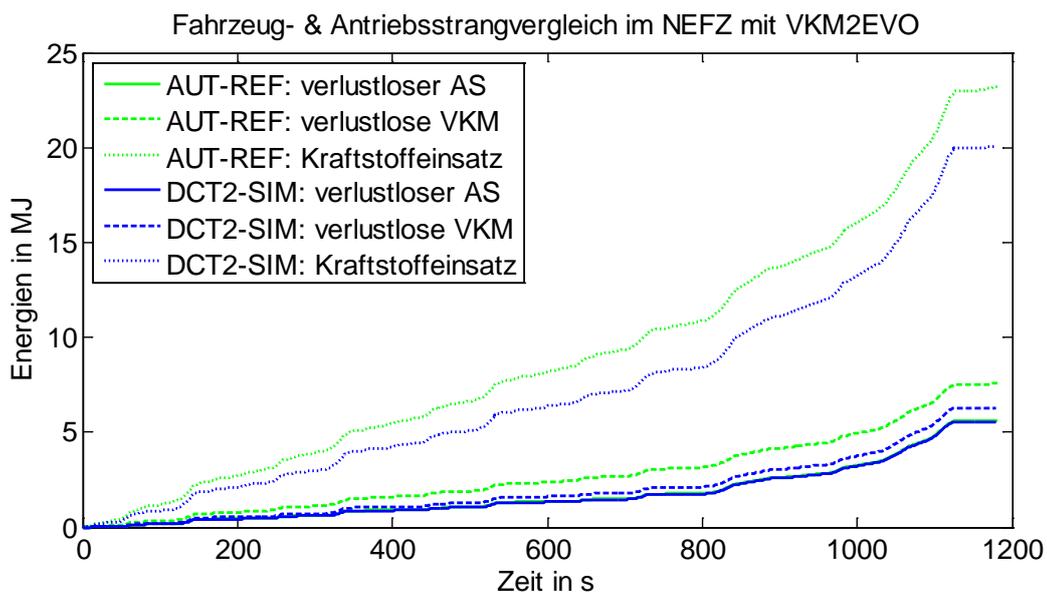


Abbildung 104 – Wirkungsvornachteil des DCT2

10.5.2 Längsdynamiksimulation

Ziel der Auslegung der Schaltstrategie ist die Sicherstellung des Betriebs im Kennfeldbereich mit AGR in den Zyklen NEFZ, FTP72 und US06. Als Nebenbedingung soll der Kraftstoffverbrauch gegenüber der Automatikgetriebe-Variante abgesenkt werden. Neben den verringerten Antriebsstrangverlusten kann auch die Schaltstrategie dazu beitragen.

Um für die eIL-Versuche bei dynamischen Geschwindigkeitsprofilen das Schaltverhalten realitätsnah abzubilden, müssen auch schon im Vorentwicklungsprozess erweiterte Modelle für Schaltprogramme integriert werden. Ziel dabei ist in Phasen mit geringen Geschwindigkeitsgradienten ein ständiges Wechseln zwischen zwei Gangstufen zu verhindern ohne ein rechtzeitiges Rückschalten am Beginn von Beschleunigungsphasen zu verhindern.

Das Schaltprogramm soll somit nicht auf einen einzelnen Fahrzyklus hin optimiert werden, sondern für die drei primär untersuchten Zyklen einheitlich angewandt werden. Die erhaltene Schaltstrategie arbeitet so in möglichst allen Fahrsituationen, die im realen Fahrbetrieb auftreten können, realistisch. Bei den Fahrerparametern zur Simulation der Fahrzyklen

¹⁵⁰ Durch Kontrolle der Simulationsergebnisse kann sichergestellt werden, dass Anfahren mit schleifeneder Kupplung und aktiver VKM durch diese Näherung nicht aufgrund des vermeintlich günstigen VKM-Betriebs aktiviert wird.

werden die Faktoren allerdings für jeden Zyklus individuell abgestimmt, weil sich Fahrer auf das geforderte Profil bzw. die Fahrsituation einstellen.

Mit Erweiterung des Fahrermodells ist es in CRUISE möglich das Lastsignal, das vom Fahrermodul generiert wird, in ausgesuchten Fahrsituationen zu begrenzen.

Zusatzfunktionen für die Simulation können implementiert werden, um das Modell zu adaptieren. Sie sollen schließlich einen menschlichen intelligent vorausschauenden Fahrer nachbilden und das Fahrzeugverhalten so wiedergeben, wie es bei Einsatz intelligenter gekoppelter Steuergeräte zu erwarten ist: Das Lastsignal zur Steuerung der VKM wird nach Formel 29 in Abhängigkeit von der gewünschten Geschwindigkeit v_{Soll} und Beschleunigung a_{Soll} , sowie einem Anfahrbit begrenzt.¹⁵¹

$$PED_{begrenzt} = \begin{cases} 0 & \forall \text{ Nullbit} \\ \min(PED, 0.8 \times a_{Soll}, 0.6) & \forall \neg \text{Nullbit} \wedge \text{Anfahrbit} \\ \min(PED, 0.9 \times a_{Soll}, 0.7) & \forall \neg \text{Nullbit} \wedge \neg \text{Anfahrbit} \wedge v_{Soll} < 15 \frac{km}{h} \end{cases}$$

Formel 29 – Begrenzung für VKM-Lastsignal

Das Anfahrbit wird gesetzt, wenn eine Kupplung betätigt wird, dabei aber kein Schaltvorgang des Getriebes stattfindet. Das Nullbit nach Formel 30 definiert, wann das Gaspedalsignal nicht an die VKM weitergegeben wird.

$$\text{Nullbit} = \text{Bremsbit} \vee a_{Soll} \leq a_{Lim} \vee v_{Soll} \leq 1.44 \frac{km}{h} \vee (a_{Soll} < 0 \wedge v_{Soll} \leq v_{Lim})$$

Formel 30 – Nullbit für Formel 29

Das Bremsbit ist immer gesetzt, wenn der Fahrer das Bremspedal betätigt. Die beiden Parameter a_{Lim} und v_{Lim} können für jeden Zyklus individuell bestimmt werden.¹⁵² In CRUISE ist das bspw. als Streckensignal ('Course Signal') möglich. Sie bilden somit gemeinsam mit den Regelparametern des Fahrermodells die Möglichkeit das Fahrerverhalten an den Zyklus anzupassen. Das CRUISE-Fahrermodell besteht für Fahrzeuge mit automatisierten Getrieben nur aus zwei Parametern, über die Gas- bzw. Bremspedal abhängig von der Abweichung von Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung von den Sollwerten beeinflusst werden.¹⁵³

Außerdem wird noch eine Funktion implementiert, die verhindert, dass der virtuelle Fahrer während Beschleunigungsphasen die Bremsen einsetzt, um nach kleinen Abweichungen beim Schalten dem Sollzyklus besser zu folgen.

Eine Abstimmung simuliert zwei Effekte: Erstens wird sich ein Fahrer auf den zu fahrenden Zyklus einstellen und demnach mehr oder weniger dynamisch das Gaspedal betätigen. Zweitens könnte über die Gaspedal-Drehmoment-Zuordnung ein Betrieb realisiert werden, bei dem der ohne AGR abgestimmte Betriebsbereich nur in Ausnahmefällen verlassen wird. Im einfachen Basismodell der VKM gilt ein linearer Zusammenhang zwischen Gaspedalstellung und der Differenz aus aktueller Momentanforderung und Schleppmoment bei der aktuellen Motordrehzahl. Volllastmoment entspricht einer Gaspedalstellung von 1.

In der zweiten und dritten Zeile der Formel 29 werden Begrenzungen beim Anfahren bzw. bei niedrigen Geschwindigkeiten definiert. Diese könnten im realen Fahrzeug ebenfalls über die Gaspedal-Drehmoment-Zuordnung umgesetzt werden.¹⁵⁴

¹⁵¹ Die numerischen Faktoren dieser Formel sind empirisch festgelegt.

¹⁵² Im Regelfall gilt $a_{Lim} < 0$. Damit wird ein 'Zwischengas' bei Rückschaltvorgängen verhindert. Gilt $v_{Lim} > 0$ kann erreicht werden, dass Verzögerungen bei niedrigeren Geschwindigkeiten generell ohne Gaspedalbetätigung abgefahren werden. So werden Europäische Union: RL 70/220/EWG, Anhang III, Zi. 2.4.1 und Zi. 6.5 auch bei geglätteten Geschwindigkeitsvorgaben bestmöglich eingehalten.

¹⁵³ AVL List GmbH: CRUISE v2010 Users Guide, 2010, S. 4-52ff

¹⁵⁴ Zur Untersuchung mit höheren Leerlaufdrehzahlen müssen diese Funktionen und das Kuppelverhalten über eine externe Funktion angepasst werden!

Außerdem kann in Verbindung mit der Bedingung, dass bei Verzögerungen und Geschwindigkeiten unter 1.75 km/h die Bremsen voll aktiviert werden, das gesamte Geschwindigkeitsprofil stärker geglättet werden. Ohne diese Maßnahmen müsste man die Glättung bei den Anfahr- bzw. Stoppvorgängen individuell zurücknehmen, weil sonst die Toleranzvorgaben nicht eingehalten werden könnten. Die beschriebene vollständige Bremsaktivierung entspricht einem typischen Fahrerverhalten beim Betrieb auf Rollenprüfständen.

Besonders beim Anfahren kann es bei den Standardparametern ohne diese Maßnahmen zu unrealistischen Pedalbetätigungen kommen.

Die Gangwechsel zwischen dem siebenten und sechsten Gang werden abhängig von der aktuellen Beschleunigung auch bei höheren Lastanforderungen entsprechend Formel 31 verhindert. Das ist keine Veränderung des Fahrerverhaltens, sondern entspricht einer intelligenten Steuergerätfunktion.

$$\text{Gangvorgabe}_{\text{begrenzt}} = \begin{cases} 7 & \forall \neg \text{Schaltbit} \wedge \text{Gang} = 7 \wedge -0.4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} < a < 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ \text{Gangvorgabe}_{\text{unbegrenzt}} & \forall \text{Schaltbit} \vee \text{Gang} \neq 7 \vee a \leq -0.4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \vee a \geq 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{cases}$$

Formel 31 – Begrenzung für Gangvorgabe

Das Schaltbit wird vom Getriebeblock in CRUISE während der Schaltvorgänge gesetzt.

Damit das Schaltprogramm bis auf das durch die Drehzahlabenkung erhöhte Lastsignal ansonsten unbeeinflusst bleibt, wird diesem immer, wenn die Vorgabebegrenzung aktiv ist, die unbegrenzte Vorgabe als aktuelles Gangsignal übergeben.

In CRUISE erlauben stark vereinfachte vordefinierte Simulationsblöcke für das DCT, die beiden Kupplungen und die zugehörigen Steuerungen die unkomplizierte Nachbildung des Antriebsstrangs. Das Schaltverhalten ist dabei nur abhängig von Getriebeausgangsdrehzahl oder Fahrgeschwindigkeit und Motorlast definierbar und das Auskuppelverhalten kann nicht schlupfgesteuert erfolgen.

Die Drehzahländerung der Kurbelwelle erfolgt dabei in einer sehr kurzen Zeitspanne, sodass sich durch die Trägheit kurzzeitig hohe Drehmomentgradienten ergeben. Die Kurbelwelle ist für EiL-Versuche die Systemgrenze zur realen Hardware und daher müssten die Drehmomentspitzen als Vorgaben verwendet werden. Diese Vorgaben überfordern die Regelung von Standard-Prüfständen. Da der Aufbau eigener erweiterter Modelle für den Vorentwicklungsprozess zu aufwendig ist, kann folgendes Näherungsverfahren zur Ermittlung der Vorgaben für die Hybrid-Berechnungen und die EiL-Versuche angewandt werden:

Im Modell der Doppelkupplungsgetrieberegulierung ('DCT Control') wird für einen drehzahlabhängigen Kupplungsvorgang eingestellt, dass die Kupplungsbetätigung unendlich schnell möglich ist und die Synchronisation 0.6 s dauert.¹⁵⁵ Es wird erreicht, dass das Schaltbit ('Shifting Status') vor der Drehzahländerung für die Vorgabedauer gesetzt wird. Verzögert man dieses Signal um 0.5 s, erhält man ein Signal, das Bereich und Dauer realistischer Schaltvorgänge anzeigt. Für den Vorentwicklungsprozess werden Drehzahl- und Drehmomentergebnis im Bereich dieses verzögerten Signals näherungsweise linear interpoliert, weil Standard-Prüfstände ohnehin nicht in der Lage sind, schnellere Änderungen nachzubilden, wie sie bei genauer Simulation mit Nachbildung aller Trägheiten und Kuppelvorgängen auftreten würden.

¹⁵⁵ 'Clutch Actuating Process' = 'Speed Dependent'; 'Release Time Clutch Odd' = 0; 'Release Time Clutch Even' = 0; 'DCT Synchronization Time' = 0.6 s

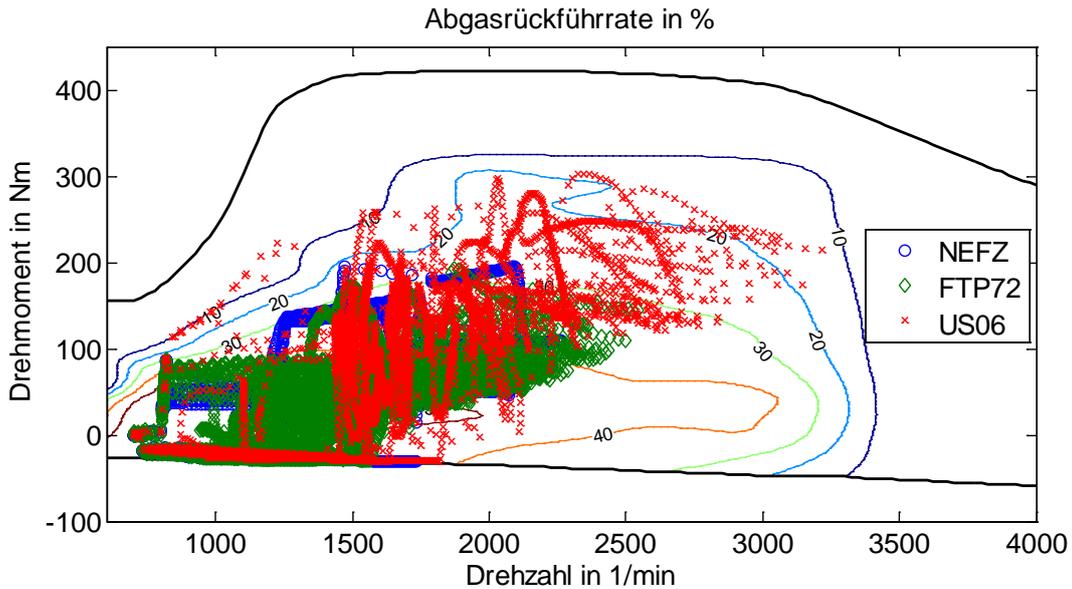


Abbildung 105 – Betriebsbereiche im AGR-Kennfeld (DCT2-SIM, VKM2EVO)

Mit allen Abstimmungen ergeben sich die Betriebsbereiche nach Abbildung 105. Es gelingt fast vollständig den Betrieb mit ausreichend AGR sicherzustellen. Lediglich bei den hochtransienten Anfahrvorgängen und anschließenden Beschleunigungen im US06 kommt es kurzfristig zu hohen Drehmomenten.

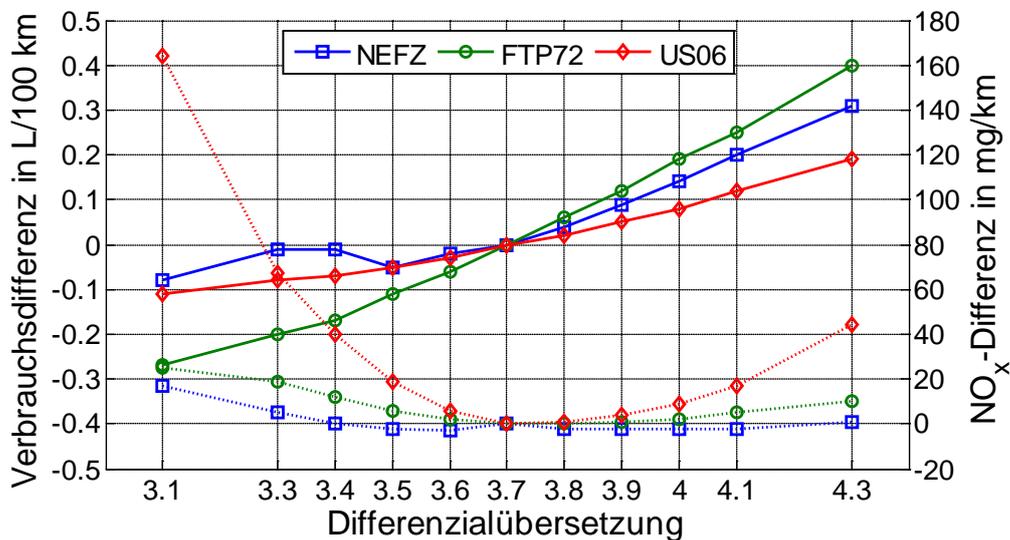


Abbildung 106 – Abschließende Variation der Differenzialübersetzung¹⁵⁶

Zum Abschluss der Antriebsstrangvorauslegung ist noch die Differenzialübersetzung variiert worden, weil so für alle VKM-Betriebspunkte mit näherungsweise konstanter Leistung Drehzahl- und Drehmoment beeinflusst werden können. Dadurch kann eine Verschiebung entlang des NO_x -Verbrauchs-Trade-Offs erreicht werden (Abbildung 106). Mit der gewählten Differenzialübersetzung von 3.7 ergibt die Hochrechnung in den transienten Fahrzyklen

¹⁵⁶ Die Werte in diesem Diagramm sind für den Relativvergleich direkt mit CRUISE ermittelt worden.

minimale NO_x-Rohemissionen. Sie ist somit eine geeignete Basis für die Berechnung der Hybridisierung.

Zu beachten ist, dass die festgesetzte Differenzialübersetzung derjenigen entspricht, mit der die Schaltprogramme entwickelt worden sind. Wenn diese Anpassung für alle Übersetzungsvarianten separat vorgenommen wird, sind theoretisch noch Verbesserungen möglich. Im Vorentwicklungsprozess wird das aber vernachlässigt.

10.5.3 Potenzielle Verbrauch und NO_x

Zyklushochrechnungen für die Optimierung in Bezug auf Verbrauch bzw. NO_x bei 20 kW maximaler Leistung der EM fassen Tabelle 19 bis Tabelle 21 zusammen. Die Auslegungsparameter des elektrischen Systems werden aufgrund der Ähnlichkeit der Konfigurationen unverändert von der Variante mit AUT-REF und VKM2BAS übernommen.

Tabelle 19 – Potenzial-Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, NEFZ)

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO _x	RB _{DPF}	CO	C _x H _y	Verbrauch
			mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	L/100km
NEFZ	Basisfahrzeug		69	30	1378	324	5.16
	Start-Stopp		60	29	1188	280	4.80
	Start-Stopp	relativ zum Basisfahrzeug	87%	98%	86%	87%	93%
	Potenzial	Verbrauchsminimum	53	29	828	198	3.89
	Potenzial	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	77%	96%	60%	61%	75%
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum	58	32	430	92	3.86
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	84%	107	31%	28%	75%
	Potenzial	NO _x -Minimum	46	26	876	212	4.08
	Potenzial	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	67%	87%	64%	65%	79%
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum	29	16	1382	344	4.40
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	41%	53%	100%	106%	85%
	Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum	26	17	2002	471	4.96
Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	37%	56%	145%	145%	96%	

Tabelle 20 – Potenzial-Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72)

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO _x	RB _{DPF}	CO	C _x H _y	Verbrauch
			mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	L/100km
FTP72	Basisfahrzeug		64	24	1855	429	5.39
	Start-Stopp		55	24	1625	377	5.03
	Start-Stopp	relativ zum Basisfahrzeug	85%	98%	88%	88%	93%
	Potenzial	Verbrauchsminimum	41	22	819	184	3.73
	Potenzial	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	63%	91%	44%	43%	69%
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum	47	27	496	105	3.69
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	74%	112%	27%	24%	69%
	Potenzial	NO _x -Minimum	37	20	1045	243	3.84
	Potenzial	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	58%	82%	56%	57%	71%
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum	25	15	1524	366	4.22
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	39%	61%	82%	85%	78%
	Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum	23	15	2022	478	4.72
	Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	36%	64%	109%	111%	88%

Tabelle 21 – Potenzial-Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, US06)

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO _x	RB _{DPF}	CO	C _x H _y	Verbrauch
			mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	L/100km
US06	Basisfahrzeug		143	50	546	112	6.14
	Start-Stopp		141	50	498	101	6.07
	Start-Stopp	relativ zum Basisfahrzeug	99%	100%	91%	90%	99%
	Potenzial	Verbrauchsminimum	129	46	269	49	5.31
	Potenzial	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	90%	93%	49%	44%	87%
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum	128	46	268	49	5.31
	Potenzial mit LPM	Verbrauchsminimum relativ zum Basisfahrzeug	89%	92%	49%	44%	87%
	Potenzial	NO _x -Minimum	125	45	411	81	5.38
	Potenzial	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	87%	91%	75%	72%	88%
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum	86	50	505	97	5.55
	Potenzial mit LPM	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	60%	101%	93%	87%	90%
	Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum	85	49	552	105	5.62
	Potenzial mit LPM und SH	NO _x -Minimum relativ zum Basisfahrzeug	59%	98%	101%	94%	92%

Bei der Verbrauchsoptimierung sinken ohne LPM generell alle errechneten Emissionswerte.¹⁵⁷ Mit LPM steigen NO_x und RB gegenüber dem Minimum ohne LPM wieder an, während C_xH_y und CO weiter sinken. Optimiert man in Richtung NO_x-Minimierung, sinken ohne LPM ebenfalls alle anderen Emissionswerte und der Verbrauch. Die Absenkung von NO_x durch LPM verschlechtert hingegen neben dem Verbrauch alle anderen Emissionswerte.

Ohne LPM sind bei den unterschiedlichen Optimierungszielen ähnliche Ergebnisse zu erwarten. LPM bieten im Vergleich dazu nur geringe Zusatzpotenziale, die noch dazu nur hinsichtlich der eigentlichen singulären Zielwerte positive Auswirkungen zeigen.

¹⁵⁷ Ohne LPM ist die Hochrechnung quasi eine Worst-Case-Betrachtung, weil nicht nur auf eine möglichst ausgeglichene Energiebilanz optimiert wird, sondern auch noch gefordert wird, dass diese nicht negativ ist.

Anhand des NEFZ sind die Ergebnisse detailliert dargestellt. Die Betriebsbereiche der VKM sind repräsentativ für alle drei berücksichtigten Zyklen. Für verbrauchsoptimale LPM wird die Maximalleistung der VKM nicht ausgenutzt und die Drehmomente somit nicht in den Bereich mit minimalem spezifischem Verbrauch angehoben (Abbildung 109). Vielmehr kommt es zu geringfügigen Anhebungen mit damit geringen elektrischen Verlusten. Die Betriebsbereiche unterscheiden sich insgesamt nur geringfügig von denjenigen ohne LPM (Abbildung 108). Das erklärt auch die geringen Verbrauchsunterschiede (Abbildung 107).

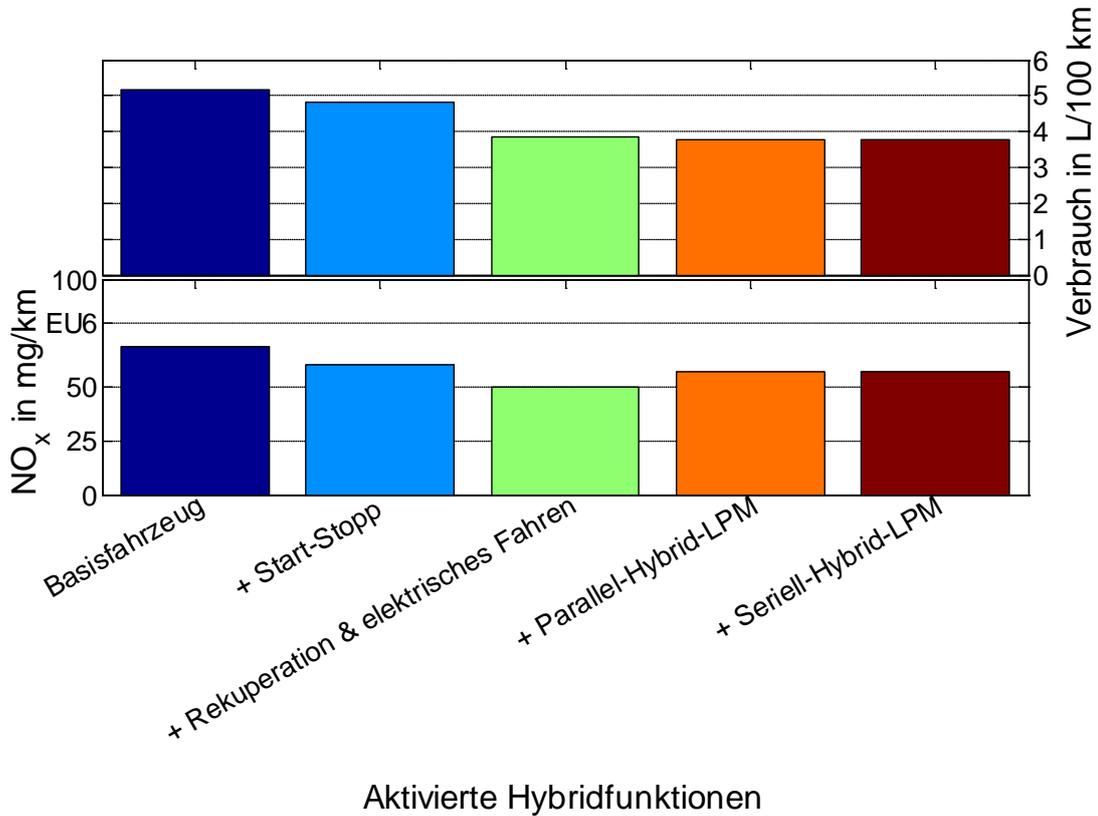


Abbildung 107 – Verbrauchsreduktionspotenziale (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)

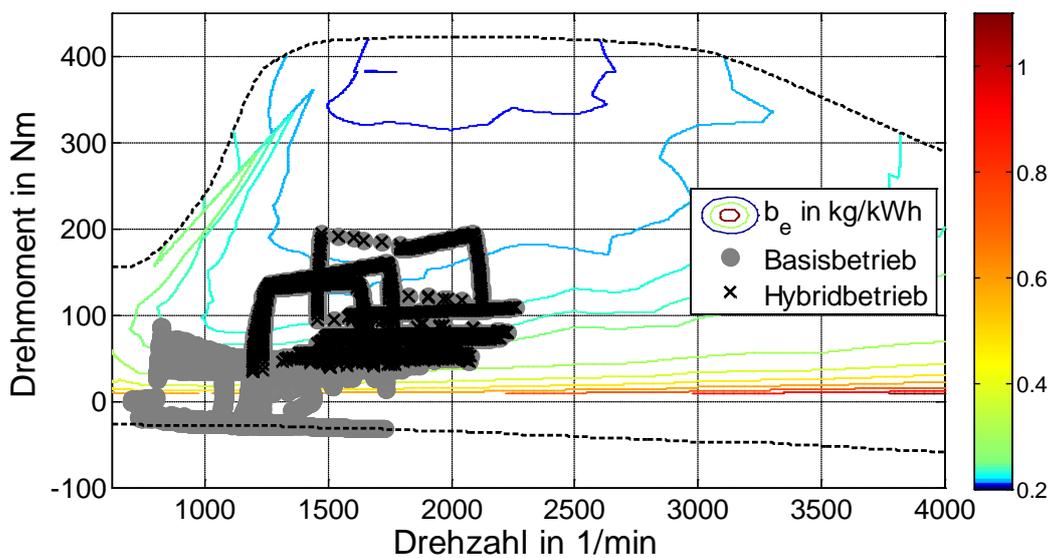


Abbildung 108 – Verbrauchsoptimale VKM-Betriebsbereiche ohne LPM (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)

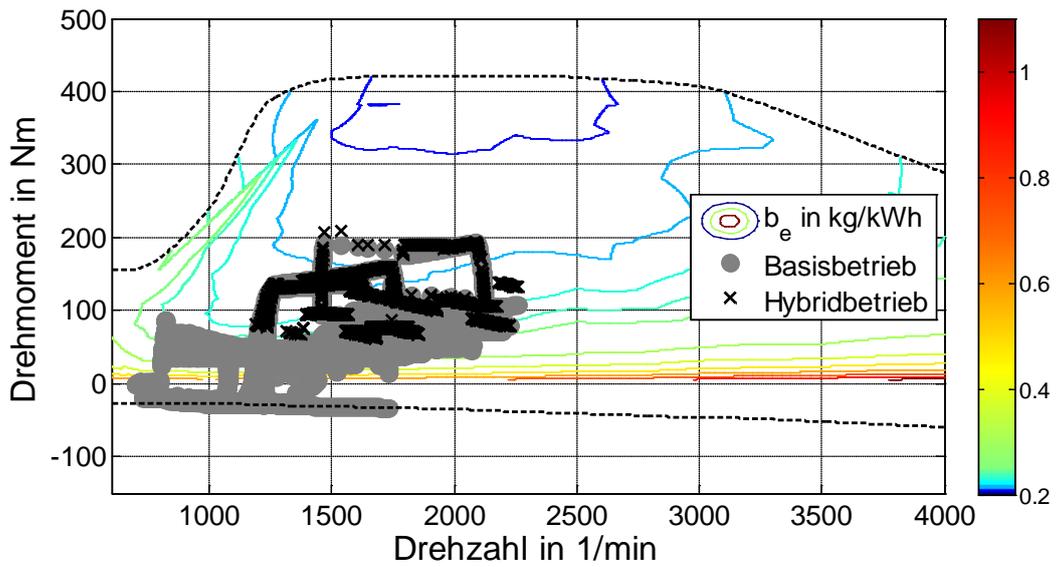


Abbildung 109 – Verbrauchsoptimale VKM-Betriebsbereiche mit LPM (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)

Zur NO_x-Reduktion (Abbildung 110) wird die EM-Leistung zur Absenkung der VKM-Drehmomente ausgenutzt (Abbildung 112). Hier sind die Betriebsbereiche gegenüber der Variante ohne LPM (Abbildung 111) deutlich verändert, was auch die großen Unterschiede erklärt. In diesem Fall verdreifachen die LPM näherungsweise den Speicherhubbedarf im EES und es werden Nachteile für Abgasnachbehandlungssysteme aufgrund von niederen Abgastemperaturen erwartet.

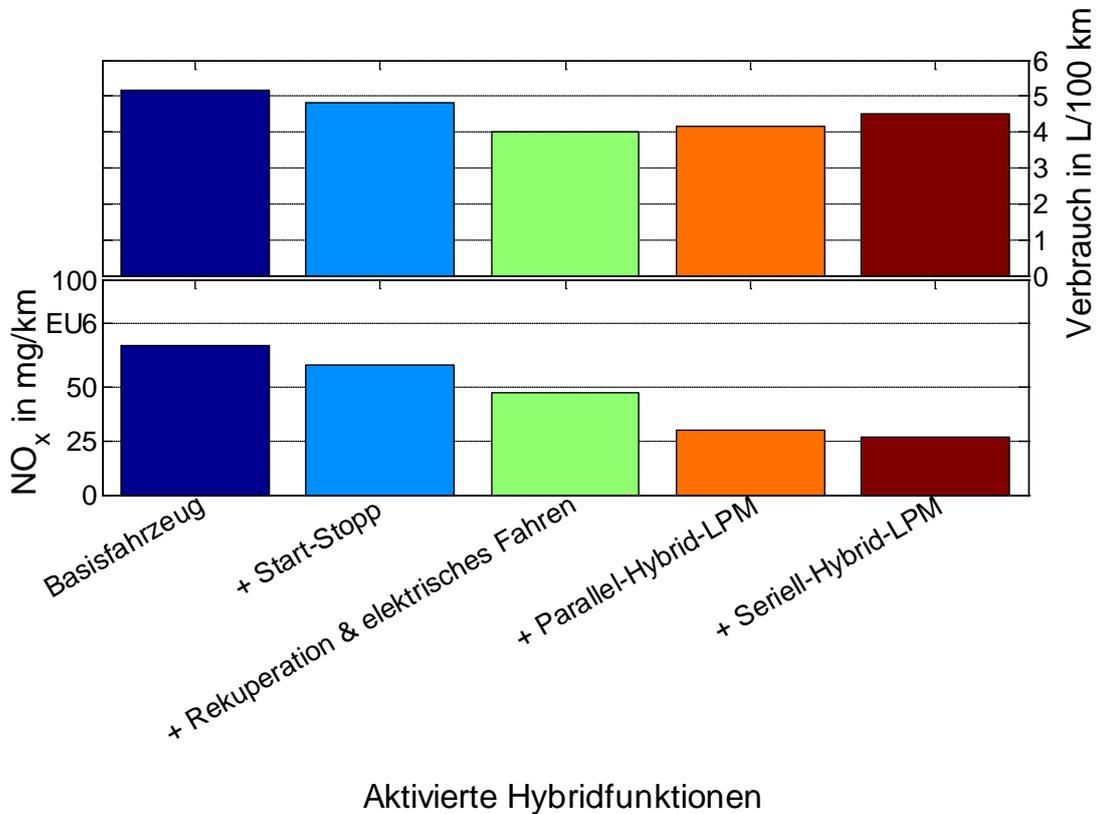


Abbildung 110 – NO_x-Reduktionspotenziale (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)

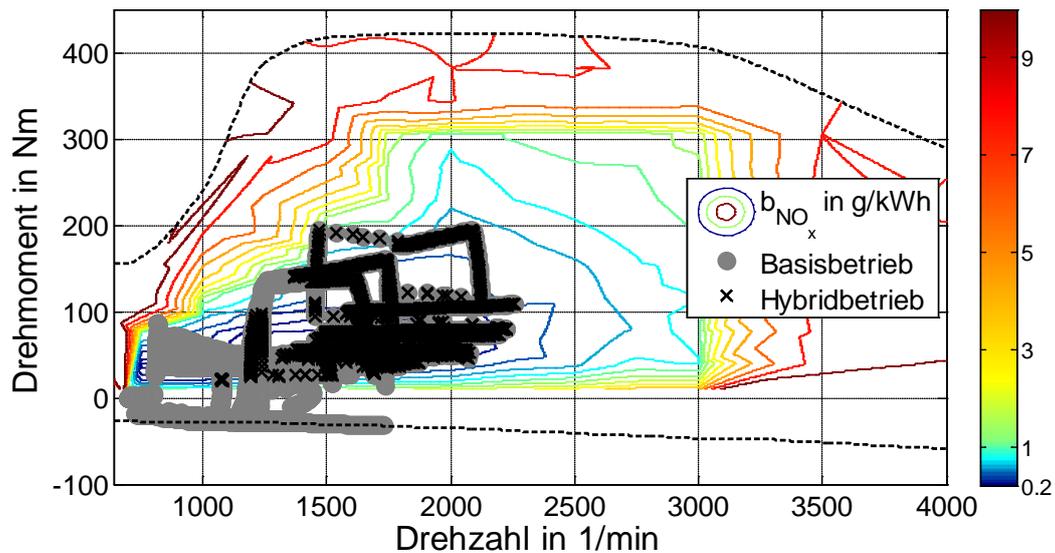


Abbildung 111 – NO_x-optimale VKM-Betriebsbereiche ohne LPM (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)¹⁵⁸

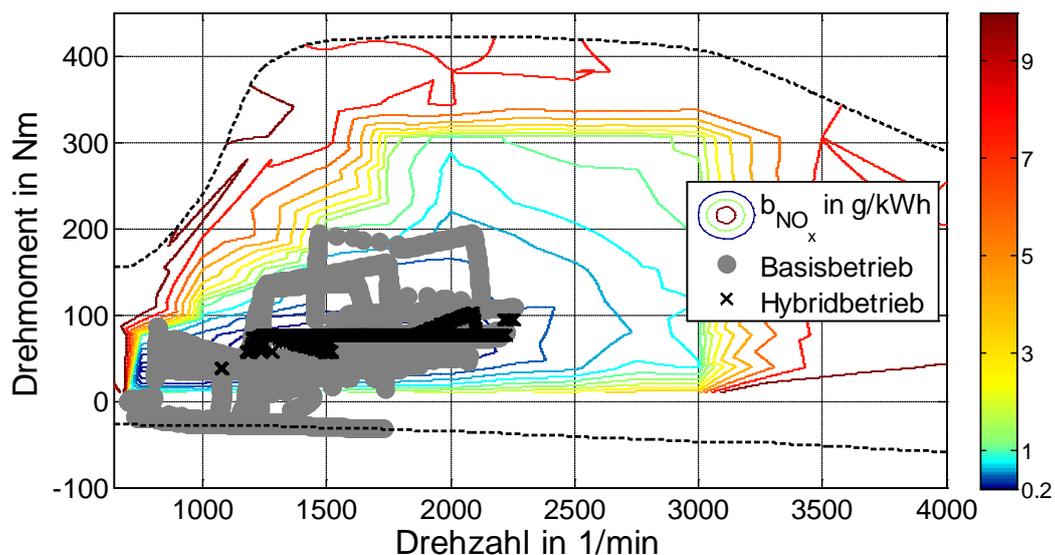


Abbildung 112 – NO_x-optimale VKM-Betriebsbereiche mit LPM (NEFZ, DCT2-SIM, VKM2EVO)

Wegen der nicht gegebenen Umsetzbarkeit und der qualitativen Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus Kapitel 10.3 werden für diese Konfiguration keine Potenzialergebnisse hinsichtlich des Verbrauchs für EIL-Versuche aufbereitet.

Eine Umsetzung der NO_x-Minimierung unterbleibt wegen der Ähnlichkeit mit den Ergebnissen beim Verbrauchsoptimum ohne bzw. aufgrund der erwarteten niedrigen Abgastemperaturen mit LPM.

¹⁵⁸ Die spezielle Ausprägung des spezifischen NO_x-Kennfeldes ist das Ergebnis der Abstimmung mit AGR in einem für das Forschungsvorhaben begrenzten Zielbereich. Diese Abstimmung ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit, sondern dient hier lediglich als Randbedingung. Die bspw. im Bereich über 300 Nm horizontal verlaufenden Isolinien kennzeichnen dabei das Ende des mit AGR abgestimmten Bereiches.

10.5.4 Reale Betriebsstrategien Verbrauch

Wie schon mit dem Fahrzeug AUT-REF und dem Motor VKM2BAS werden auch hier LPM zur Verbrauchsabsenkung wegen deren nicht relevanten Zusatzpotenzials nicht angewandt. Die Bedingungen, wie lange die VKM ein- bzw. abgeschaltet bleiben soll und die Zeitspannen für Start- und Stoppvorgänge werden ebenfalls unverändert übernommen, weil diese hauptsächlich von den mechanischen Eigenschaften der VKM beeinflussten Faktoren näherungsweise nicht durch die Adaptionen beeinflusst werden.

Auch der nutzbare Hub des EES ist unverändert 600 kJ, weil dieser auf Basis der rekuperierbaren Energiemenge mit ausreichend Reserve ausgelegt worden ist. Damit sind die verringerten Antriebsstrangverluste abgedeckt. Gegenüber den Zyklen mit Drehmomentwandler sind die Schaltvorgänge viel dynamischer und es kann dadurch zu kurzfristigen Schwankungen der Drehmomentanforderung kommen. Um durch diese Schwankungen hervorgerufene Betriebsartenwechsel möglichst zu verhindern, darf für im Zeitfenster von ± 2 Sekunden um den Gangwechsellvorgang nicht von elektrischem Fahren auf VKM-Betrieb gewechselt werden, solange die Leistung der EM der Anforderung genügt. Die Allgemeingültigkeit der Methode ohne Verwendung von Informationen über zukünftige Ereignisse wird dadurch nicht eingeschränkt, da der bevorstehende Gangwechsel auch dem Getriebesteuergerät bekannt sein muss.

Die verbleibenden Parameter Zeitanteil x_u und Ladungsschwellwert Q_u für das 'Lernende Kriterium' (nach Kapitel 8.1.2.3) werden jetzt jedoch nicht empirisch, sondern durch systematische Variation ermittelt. Entsprechend den Erfahrungen hinsichtlich der Ladungsverläufe wird ein Variationsraum festgelegt. Abbildung 113 zeigt die erzielten Ergebnisse. Über den gesamten Variationsraum ist die Streuung sehr gering. Die Bedingungen für einen gesicherten Betrieb und die Leistungsgrenze der EM schränken die Betriebsartabweichungen stark ein.

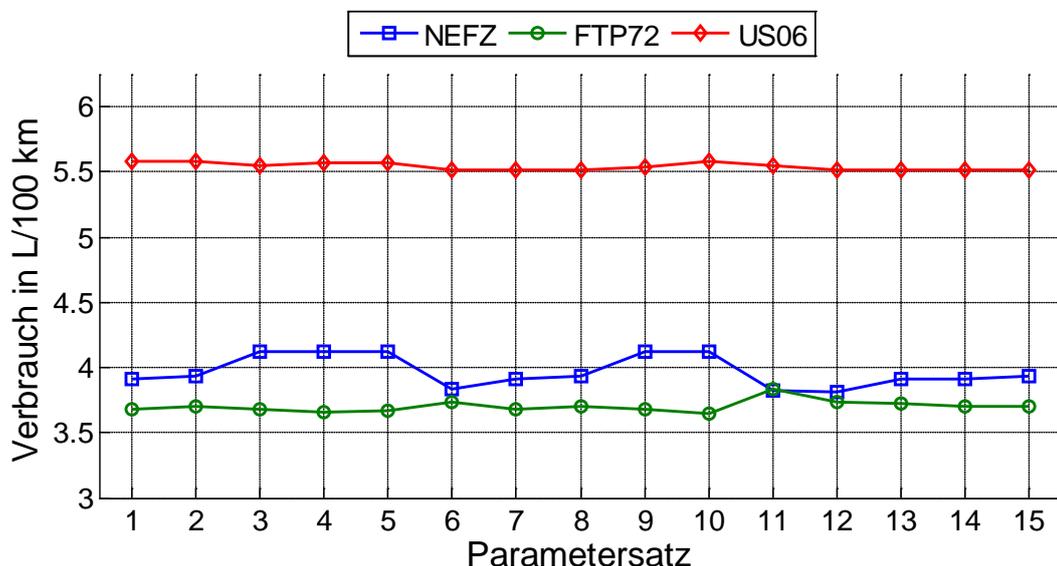


Abbildung 113 – Verbrauchsergebnisse bei Regelparametervariation (DCT2-SIM, VKM2EVO)

Aufgrund des guten Kompromisses zwischen den Verbrauchswerten im NEFZ und FTP72, sowie der Ähnlichkeit zu den bisher verwendeten Parametern nach Kapitel 10.3.11 wird Parametersatz 7 ausgewählt. Die geringen Ergebnisschwankungen erklären auch, warum auch mit den vereinfachten Strategien gute Ergebnisse erzielbar sind. In Abbildung 114 sind die Ergebnisse der untersuchten realen Betriebsstrategien dem Basisverbrauch und dem Potenzial gegenübergestellt.

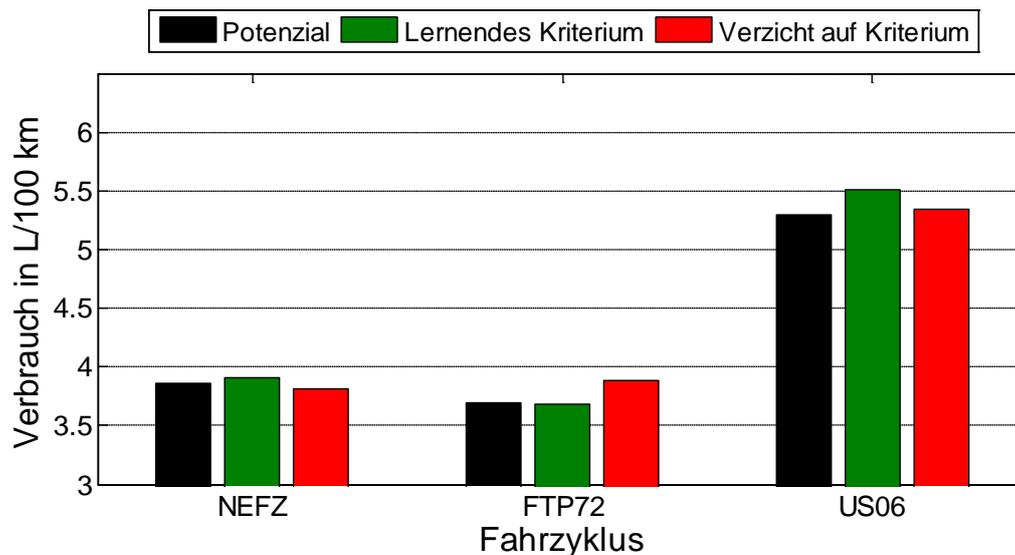


Abbildung 114 – Betriebsstrategievergleich ohne LPM (DCT2-SIM, VKM2EVO)¹⁵⁹

10.5.5 EIL Basis & reale Betriebsstrategien Verbrauch

Die Parameter zur Nachbildung des Betriebs der verbesserten VKM im Hybridfahrzeug am Motorprüfstand werden aufgrund der unveränderten Grundmotorkonfiguration unverändert von der Auslegung für VKM2BAS und AUT-REF aus Kapitel 10.3.12 übernommen (siehe ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter)). Zur Simulation des Hybridbetriebs werden für VKM2EVO und DCT2-SIM nur reale Betriebsstrategien verwendet, weil solche für einen späteren Praxiseinsatz unabdingbar sind und die grundsätzliche Ähnlichkeit zu den Potenzialergebnissen erwartet werden kann.

Die Ergebnisse der EIL-Versuche sind in Abbildung 115 (für NEFZ), Abbildung 116 (für FTP72) und Abbildung 117 (für US06) dargestellt. Auch hier sind die relativen Veränderungen durch die Hybridisierung numerisch eingetragen. Bei der Verbrauchshochrechnung kommt es zu Abweichungen von unter 10% gegenüber dem tatsächlichen Messwert, die dabei nahezu unabhängig von der Hybridisierung sind.

Die NO_x-Emissionen werden unterschiedlich gut abgeschätzt: Im NEFZ werden sie zu niedrig ermittelt. Im FTP72 und US06 sind die Abweichungen größer als im NEFZ, was auf die höheren dynamischen Anforderungen an die Luftmengen- und Ladedruckregelung zurückgeführt werden kann. Da im US06 allgemein höhere Emissionen auftreten und aufgrund der hohen Fahrleistungen nur kurze elektrische Betriebsphasen möglich sind, steigt der relative Fehler bei Anwendung der Hybridisierung nicht an, obwohl die durch elektrisches Fahren ersetzten VKM-Phasen tendenziell weniger stark zum Gesamtbasisergebnis beitragen.

¹⁵⁹ Die ermittelten geringfügigen Unterschreitungen der Potenzialergebnisse sind durch den vergrößerten Berechnungszeitschritt, die veränderte Berechnung im Bereich des ersten Gang und Abweichungen von der ideal ausgeglichenen Energiebilanz möglich.

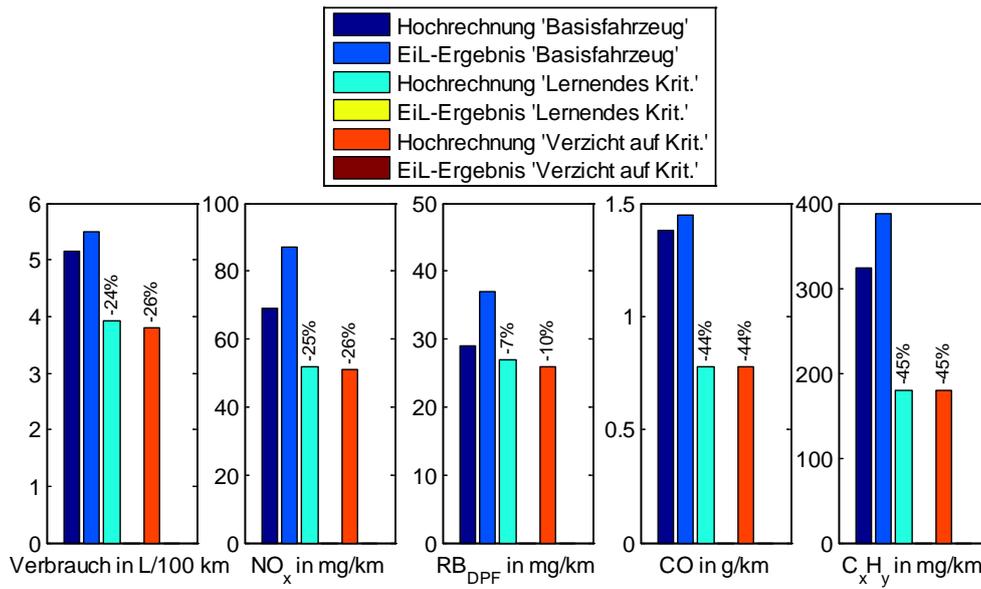


Abbildung 115 – EiL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, NEFZ)

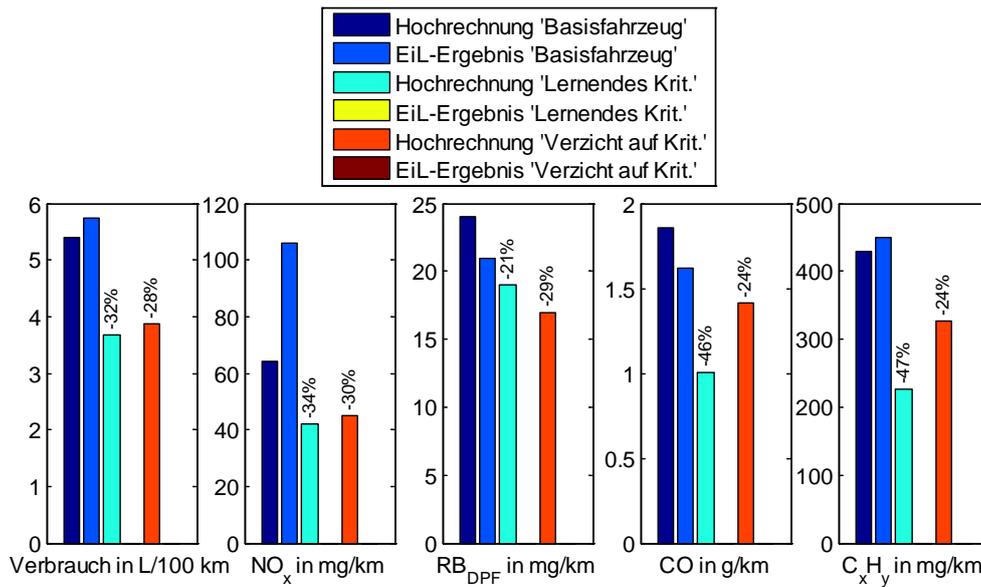


Abbildung 116 – EiL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72)

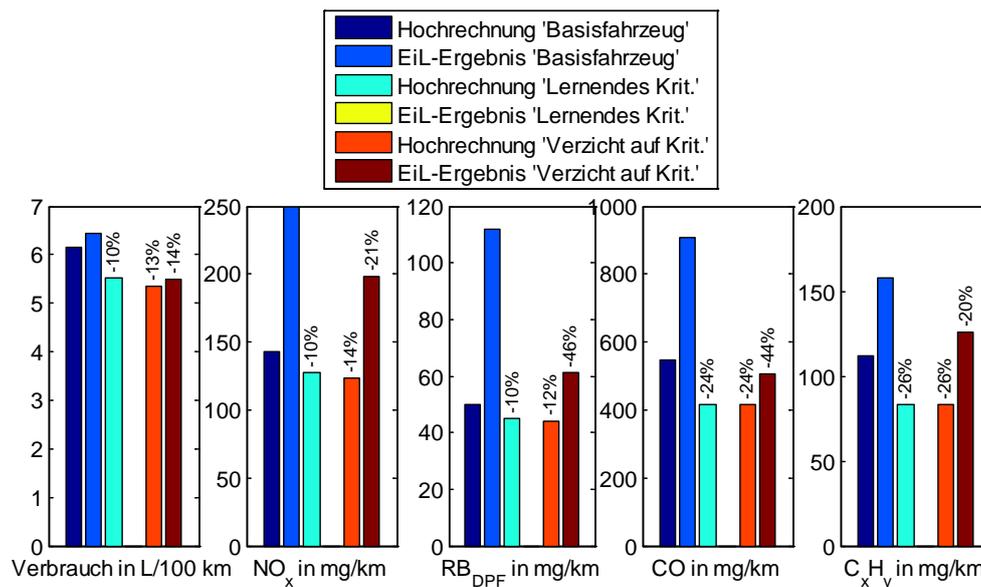


Abbildung 117 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, US06)

Im NEFZ und FTP72, sowie im US06 für die Strategie 'Lernendes Kriterium' fehlen die EIL-Ergebnisse. Bei der Vermessung sind hier fehlerhafte Simulationsergebnisse angewandt worden, bei denen die Rekuperation nicht vollständig berücksichtigt worden ist und die Leistungsanforderungen an die EM beim Losfahren zu hoch berechnet worden sind. Da die Abweichungen der Simulationsergebnisse im Bereich der Messstreuungen liegen, sind diese Ergebnisse in ANHANG K ('Engine in the Loop'-Ergebnisse mit leicht abweichenden Vorgaben) enthalten. Dort ebenfalls dargestellt ist eine Variation des von der VKM abgegebenen Drehmoments bei Starts im FTP72, die zeigt, dass auch bei reduzierten Starteinspritzmengen keine relevanten NO_x-Reduktionen möglich sind. Die ermittelten Zusammenhänge lassen nur geringe Abweichungen der Strategie 'Verzicht auf Kriterium' gegenüber der Strategie 'Lernendes Kriterium' erwarten.

Für das untersuchte System aus DCT2-SIM und VKM2EVO sind Probleme mit dem Luftsystem bzw. dessen Regelung als die wahrscheinlichste Ursache der NO_x-Abweichungen identifiziert. Je dynamischer ein Zyklus für die VKM ist, desto öfter treten diese Effekte auf und desto größer sind ihre Auswirkungen. Im US06 wird teilweise so wenig Ladedruck aufgebaut, dass die Sollluftmenge selbst ohne AGR nicht erreicht wird. Durch den hervorgerufenen Betrieb mit niedrigem Luftverhältnis steigen NO_x und RB an. Diese Abweichungen vom Stationärverhalten treten meistens bei hohen Drehmomenten auf.

Bei der verbrauchsoptimierten Hybridisierung werden Betriebsphasen der VKM mit hohen Drehmomenten bevorzugt, weil diese Vorteile hinsichtlich des effektiven Wirkungsgrades aufweisen. Somit kommt es bezogen auf die gesamte Betriebszeit der VKM und damit auch auf die Gesamtemissionen häufiger zu Abweichungen.

Tendenzen werden hinsichtlich der NO_x-Emissionen richtig wiedergegeben. Daher sind Optimierungsrechnungen auf Basis stationärer Kennfelder möglich, auch wenn die absoluten Ergebnisse nicht richtig vorausberechnet werden.

Da hier Motorrohmissionen gemessen bzw. berechnet werden, ist hinsichtlich der CO, C_xH_y und der RB die Korrelation der Tendenzen ausreichend. Diese ist bei den vorliegenden Ergebnissen auch gegeben. Entscheidend für die Fahrzeuggesamtemissionen sind hier die Funktion der Abgasnachbehandlung und das Temperaturmanagement nach Kaltstarts. Hier ist eine Vorausberechnung aus stationären Kennfeldern nicht ohne zusätzliche Modelle möglich. Die Erstellung und Anwendung solcher Modelle ist bspw. am Oak Ridge Laboratory

demonstriert worden.¹⁶⁰ Alternativ sind auch halbempirische Ansätze inklusive genauerer Temperaturberechnungen möglich.¹⁶¹ Sind VKM und Abgassystem betriebswarm, ergeben sich durch den Hybridbetrieb wie schon bei VKM2BAS und AUT-REF keine erkennbaren Nachteile hinsichtlich der Temperatur am Eintritt in die Nachbehandlungsstrecke. Anforderungen hinsichtlich des Warmlaufverhaltens können bei der Betriebspunktermittlung als zusätzliche Randbedingung verwendet werden.¹⁶²

Zu beachten ist auch, dass die RB des DPF mit unterschiedlichen Verfahren gemessen worden ist. Die Zyklusergebnisse basieren auf dem fotoakustischen Messprinzip, während die Hochrechnung auf Basis der Filterpapiermethode erfolgt ist.¹⁶³ Im Kapitel 4.2.2 werden beide Verfahren beschrieben. Die Ruß- bzw. Partikelbelastung in Systemen mit Niederdruck-AGR ist daneben auch noch von der AGR-Rate abhängig. Je höher die AGR-Rate ist, desto größer ist das Verhältnis des Massenstroms durch den DPF zum gemessenen Luftmassenstrom. Dadurch entsteht eine weitere Unsicherheit, weil die AGR-Rate auf Basis der CO₂-Konzentrationen bestimmt wird, die bedingt durch das Messverfahren bei transienten Vorgängen verzögert ansprechen. Hauptsächlich bei Laststeigerungen, die üblicherweise mit einem Anstieg der Partikelemissionen trotz sinkender AGR-Rate verbunden sind, kann es zur Überbewertung der RB des DPF kommen.

10.6 Leichte Nutzfahrzeuge

Durch Anwendung der Potenzialermittlung im Nutzfahrzeugbereich soll untersucht werden, ob Muster für Potenziale von LPM erkennbar sind. Zusätzlich soll untersucht werden, wie LPM aktiviert werden, wenn das elektrische Fahren (teilweise) eingeschränkt wird.

Ziel ist dabei aufzuzeigen, ob die Ermittlung einer vereinfachten Strategie für die Entscheidung über die Anwendung von LPM und deren Ausprägung möglich ist.

Für diese Untersuchungen wird für die Hybridberechnungen ein Zeitschrittintervall von 0.5 s verwendet.

Weil die Ergebnisse als zusätzliche Entscheidungshilfe für die Strategie bezüglich LPM bei Pkw dienen sollen, werden nur leichte Nutzfahrzeuge (LNFZ) berücksichtigt.

10.6.1 Fahrzeugdaten LNFZ

Die Daten der drei LNFZ für diese Teilaufgabe enthalten Tabelle 22 bis Tabelle 24.

Tabelle 22 – Fahrzeugdaten NFZ A

Masse	Fahrwiderstandsfaktoren			Getriebe	Hubraum	maximales Drehmoment	maximale Leistung
	F ₀	F ₁	F ₂				
kg	N	Ns/m	Ns ² /m ²		L	Nm	kW
2350	270	19.44	13.44	6-Gang AMT ¹⁶⁴	2.3	400 @1765/min	129 @3245/min

¹⁶⁰ siehe Gao Z. et al.: Comparisons of the simulated emissions and fuel efficiencies of diesel and gasoline hybrid electric vehicles (in: Journal of Automobile Engineering, 7/2011) bzw. Gao Z. et al.: A proposed methodology for estimating transient engine-out temperature and emissions from steady-state maps (in: International Journal of Engine Research, 4/2010)

¹⁶¹ siehe bspw. Ansperger F.: Untersuchungen zum transienten thermischen Verhalten von Motorkomponenten der Hochtemperaturabgasseite, 2010 bzw. Schüßler M. et al.: Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene (in: 17. Aachener Kolloquium, 7.-8.10.2008)

¹⁶² Ohne solche Anforderungen und ohne Berücksichtigung der bei niedrigen Temperaturen ebenfalls erhöhten Reibungsverluste im Getriebe sind in parallel zu dieser Arbeit durchgeführten Versuchen auch Zyklen mit Kaltstart vermessen worden. Ausgewählte Ergebnisse dazu enthält ANHANG I (Ausgewählte Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen).

¹⁶³ Dieses Verfahren ist gewählt worden, weil das fotoakustische Messsystem nicht über die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung gestanden ist.

¹⁶⁴ Automatisiertes manuelles Getriebe (engl.: automated manual transmission, AMT)

Tabelle 23 – Fahrzeugdaten NFZ B

Masse	Fahrwiderstandsfaktoren			Getriebe	Hubraum	maximales Drehmoment	maximale Leistung
	F ₀	F ₁	F ₂				
kg	N	Ns/m	Ns ² /m ²		L	Nm	kW
9000	550	0	33.59	9-Gang AMT	5.76	704 @1235/min	151 @2490/min

Tabelle 24 – Fahrzeugdaten NFZ C

Masse	Fahrwiderstandsfaktoren			Getriebe	Hubraum	maximales Drehmoment	maximale Leistung
	F ₀	F ₁	F ₂				
kg	N	Ns/m	Ns ² /m ²		L	Nm	kW
4500	550	0	33.59	9-Gang AMT	5.76	704 @1235/min	151 @2490/min

Es handelt sich dabei um reale Fahrzeuge (NFZ A und NFZ B) bzw. um ein fiktives Fahrzeug mit gegenüber dem Fahrwiderstand deutlich verkleinerter Masse (NFZ C). Da für Nutzfahrzeuge keine Fahrzeugtypprüfungen vorgesehen sind, gibt es keine Einteilung in SMK. Hier wird die Masse als Eingangsparameter verwendet.

10.6.2 Potenzielle Verbrauch

Die Wirkungsgrad- bzw. Vollastdefinitionen der EM werden für NFZ A entsprechend einer konkreten Maschine (siehe Daten in Tabelle 25) und für NFZ B bzw. NFZ C konstant¹⁶⁵ bzw. unbegrenzt modelliert. Der Wirkungsgrad des EES beträgt generell 95%.

Tabelle 25 – Kenndaten der EM für NFZ A

Maximales motorisches Moment	Nm	250
Maximale motorische Leistung	kW	20
Maximaler motorischer Wirkungsgrad	%	93
Maximales generatorisches Moment	Nm	250
Maximale generatorische Leistung	kW	20
Maximaler generatorischer Wirkungsgrad	%	94

Diese Fahrzeuge werden in unterschiedlichen Fahrzyklen getestet, um einen möglichst breiten Ergebnisraum zu erzielen.

NFZ A wird im Zyklus TNOHCV¹⁶⁶ getestet. NFZ B wird in einem speziell abgewandelten ARTEMIS-Zyklus (Testzyklus 1) getestet. Dieser ist aus einem Stadt- und drei Überlandteilen zusammengesetzt und die Beschleunigungen sind reduziert. Da dieser Zyklus längere Rechenzeiten erfordert, wird für den Vergleich mit NFZ C ein kurzer Teil aus dem NEFZ (Testzyklus 2) verwendet.

Für die LNFZ werden unterschiedliche zusätzliche Einschränkungen oder Bedingungen hinsichtlich dem elektrischen Fahren und der Rekuperation getroffen, um die Auswirkungen auf die LPM-Auswahl und LPM-Ausprägung zu untersuchen. Bei diesen eingeschränkten Berechnungen werden die LNFZ immer als PH betrachtet. Alle Berechnungen für die LNFZ

¹⁶⁵ $\eta_{EM}^{motorisch} = 85\%$, $\eta_{EM}^{generatorisch} = 90\%$

¹⁶⁶ Zyklus der Niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung, nld.: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO) für Hybridnutzfahrzeuge, engl.: Hybrid Commercial Vehicle (HCV): nähere Informationen zum Projekt sind unter www.hcv-project.eu/sp6000.shtml (Zugriff: 14.2.2012) verfügbar.

zielen generell nur auf Verbrauchsminimierung ab, weil hier keine Emissionskennfelder verfügbar sind.

Für die Phasen des Anfahrens mit schleifender Kupplung bei den Basisfahrzeugen wird für elektrisches Fahren Betrieb mit abgekuppelter VKM und geschlossener Kupplung zwischen Getriebe und EM vorausgesetzt.¹⁶⁷ Während Schaltphasen wird die Potenzialermittlung nicht eingeschränkt.

Für NFZ A wird bis zu einem bestimmten Gang (wenn die Leistung ausreicht¹⁶⁸) immer elektrisches Fahren aktiviert. In den höheren Gängen wird dann auf Auskuppeln der VKM verzichtet (VKM wird auch bei Rekuperation immer mitgeschleppt, mit Variation der Ganggrenze). Für NFZ B und NFZ C wird auch vollständiger Verzicht auf Auskuppeln in allen Gängen simuliert und für NFZ B außerdem noch eine Variante mit verschlechterter Rekuperation berechnet. Umgesetzt wird dies durch Vorgabe der halben Rekuperationsleistung als zeitabhängigen Bordnetzbedarf.

Zusätzlich wird für NFZ A und NFZ B eine Berechnung durchgeführt, bei der mechanische Zusatz-Verbraucher aus der Längsdynamiksimulation herausgenommen werden und die Leistung virtuell als elektrische Anforderung vorgegeben wird. Um dies auch in Phasen mit Volllastanforderung zu ermöglichen, wird die Volllastvorgabe für die Längsdynamiksimulation entsprechend reduziert.

Da in diesem Kapitel zusätzliche Einschränkungen möglich sind, werden für die Strategien Kurzbezeichnungen eingeführt (Tabelle 26).

Tabelle 26 – Strategiebezeichnungen

Kürzel	aktivierte Hybridfunktionen bei der Strategie
A	nur Basisbetrieb
B	Basisbetrieb + Start-Stopp
C	Basisbetrieb + Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren
D	Basisbetrieb + Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren + PH-LPM
E	Basisbetrieb + Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren + PH-LPM + SH-LPM
F	Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren im 1.Gang + Basisbetrieb ab 2.Gang + PH-LPM ab 2.Gang
G	Start-Stopp + Rekuperation im 1.Gang + Elektrisch Fahren im 1.Gang + Basisbetrieb ab 2.Gang + PH-LPM ab 2.Gang
H	Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren bis 2.Gang + Basisbetrieb ab 3.Gang + PH-LPM ab 3.Gang
I	Start-Stopp + Rekuperation bis 2.Gang + Elektrisch Fahren bis 2.Gang + Basisbetrieb ab 3.Gang PH-LPM ab 3.Gang
J	Start-Stopp + Rekuperation + Elektrisch Fahren bis 3.Gang + Basisbetrieb ab 4.Gang + PH-LPM ab 4.Gang
K	Start-Stopp + Rekuperation bis 3.Gang + Elektrisch Fahren bis 3.Gang + Basisbetrieb ab 4.Gang + PH-LPM ab 4.Gang
L	Basisbetrieb + Start-Stopp + PH-LPM

Die qualitativen Ergebnisse für NFZ A sind den bisherigen Pkw-Ergebnissen ähnlich (Tabelle 27). Die Strategien mit Einschränkung der Betriebsartenwechsel auf die Gangwechsel nutzen dabei dann LPM zum Ausgleich der Energiebilanz. Diese sind in diesem Zusammenhang eher notwendig als optimal, wie der Vergleich mit dem Potenzial ohne LPM zeigt. Die Zusatzpotenziale sind demgegenüber gering.

¹⁶⁷ Das Getriebe wird dabei im zum Anfahren verwendeten Gang simuliert.

¹⁶⁸ Zyklen ohne ausreichende EM-Leistung sind ungültig. Zusätzlich wird dort eine Variante mit erhöhter motorischer EM-Leistung berechnet, die dieses Problem verhindert.

Tabelle 27 – Zyklusergebnisse 'TNOHCV' für NFZ A¹⁶⁹

Strategie	Verbrauch in L/100km
A	8.47
B	7.48
C	5.39
D	5.31
E	5.31
F	6.29
G	6.37
H	6.13
I	6.21
J	(6.30)
K	(6.37)

Für NFZ B zeigen die Ergebnisse in Tabelle 28 bzw. Tabelle 29 gar kein Zusatzpotenzial für LPM. Ohne Auskuppeln der VKM erhält man mit LPM Einsparungen, die jedoch viel geringer ausfallen. Die Potenziale lassen sich jedenfalls nicht einfach kombinieren. Selbst die halbe Rekuperationsleistung reicht aus, um so viele VKM-Betriebspunkte mit schlechtem Wirkungsgrad zu vermeiden, dass LPM kein weiteres Verbesserungspotenzial bieten. Für das in Relation zum Fahrleistungsbedarf stärker motorisierte NFZ C sind hingegen zusätzliche Einsparungen möglich, auch wenn diese gering ausfallen.

Tabelle 28 – Zyklusergebnisse 'Testzyklus 1' für NFZ B

Strategie	Verbrauch in L/100km	
	Standard	'schlechte' Rekuperation
A	16.87	
B	16.72	
C	14.23	15.15
D	14.23	15.15
E	14.23	15.15
L	16.02	

Tabelle 29 – Zyklusergebnisse 'Testzyklus 2' für NFZ B und NFZ C

Strategie	Verbrauch in L/100km	
	NFZ B	NFZ C
A	26.69	20.63
B	23.67	17.71
C	13.59	11.25
D	13.59	10.90
E	13.59	10.90
L	21.32	16.83

Der Gesamtverbrauch ist jedenfalls größer als die Kombination der errechneten Einzeleinsparungspotenziale, weil für die LPM viele VKM-Betriebspunkte als Basis nicht mehr zur Verfügung stehen. Außerdem entstehen die Einsparungen hauptsächlich durch Nutzung der auch ohne Abkuppeln möglichen Rekuperation. Diese wird in diesem Fall als Anhebung des Lastpunktes von der noch negativeren Anforderung auf die Schleppleistung

¹⁶⁹ maximale EM-Leistung 20 kW, maximales EM-Moment 250 Nm, in Klammern die Werte für maximale motorische EM-Leistung 100 kW, maximales motorisches EM-Moment 400 Nm

der VKM im Sinne eines elektrischen Bremsens realisiert (siehe Abbildung 118 und Abbildung 119).

Zusätzlich ist ersichtlich, dass Anhebungen und Absenkungen nicht dazu führen, dass die VKM mit dem bei der jeweiligen Drehzahl wirkungsgradoptimalen Drehmoment betrieben wird. Aufgrund der kleineren elektrischen Verluste sind geringere Drehmomentänderungen sinnvoller. Teilweise wird durch die Absenkungen sogar der effektive VKM-Wirkungsgrad verschlechtert, weil ohne Abkuppeln der VKM die gespeicherte Verzögerungsenergie sonst nicht verwendet werden kann.

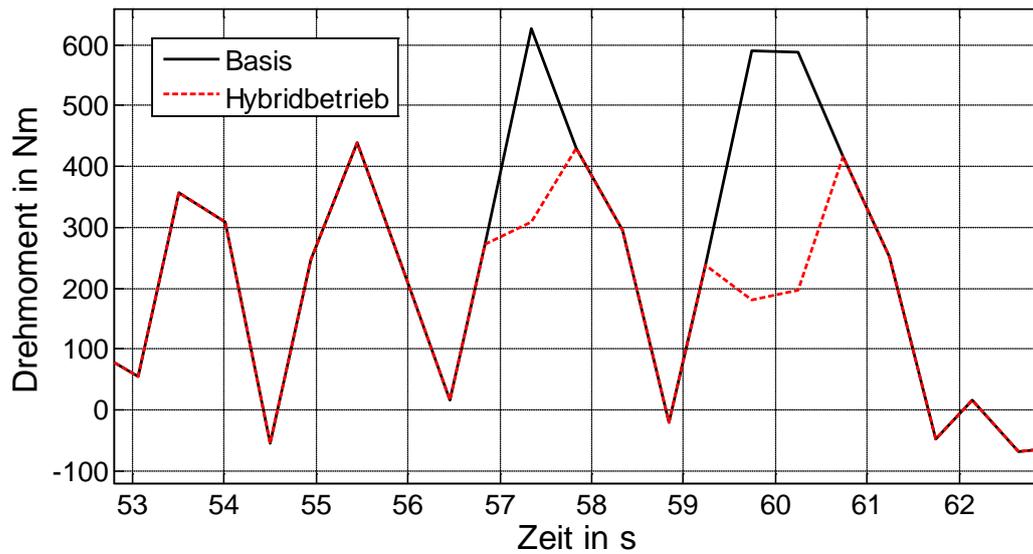


Abbildung 118 – Lastpunktabsenkungen zur Nutzung der Energie (Testzyklus 2, NFZ B, Strategie L)

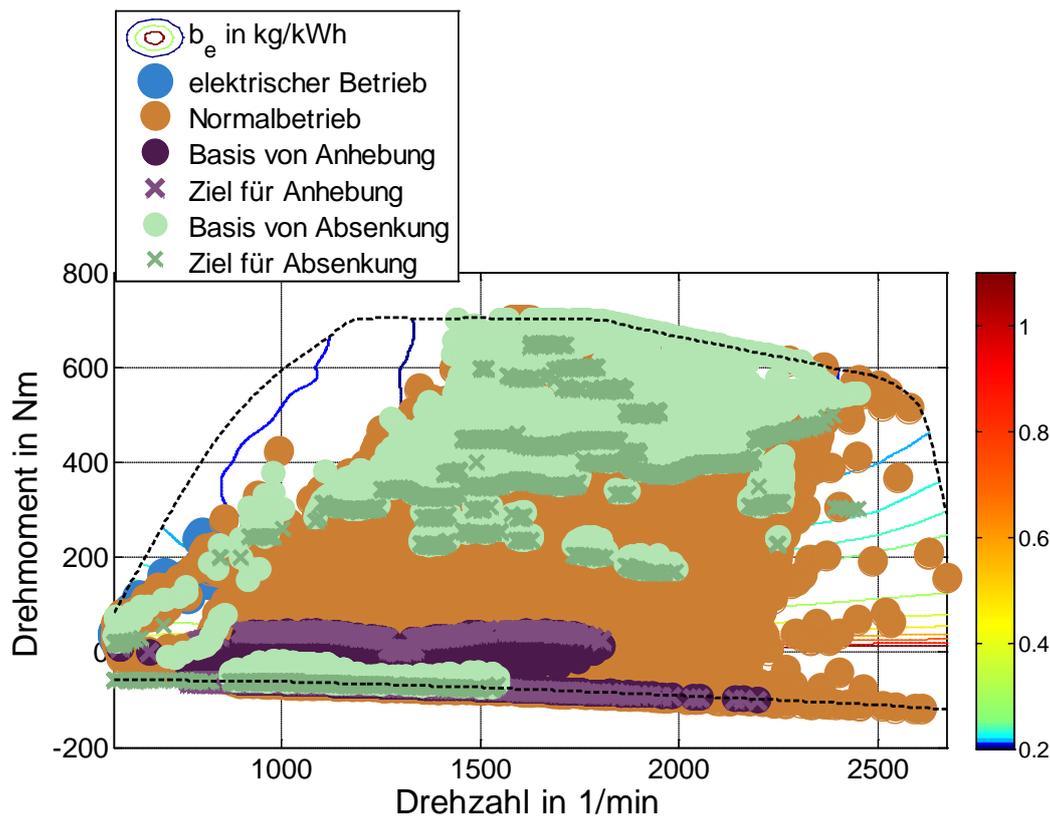


Abbildung 119 – resultierende Betriebspunktverteilung (Testzyklus 1, NFZ B, Strategie L)

Bei den Bordnetzanforderungen wird (anders als in Kapitel 10.2.6) definiert, dass die elektrische Leistung auch ohne echte LPM direkt durch entsprechende Steigerung der VKM-Leistung gegenüber dem Basisergebnis ohne Nebenaggregate bereitgestellt werden kann. Mit möglichen LPM werden bei VKM-Betrieb ohne aktive LPM Betriebspunkte mit betragsmäßig möglichst geringer Speicherleistung eingestellt. Aufgrund des verwendeten Drehmomentrasters ist die Leistungsfreiheit hier nur näherungsweise möglich. Die Potenzialrechnung zeigt aber, dass keine gespeicherte Energie verwendet werden soll, wenn eine direkte Bereitstellung möglich ist.

10.6.3 Schlussfolgerungen aus der Potenzialermittlung für LNFZ

Die Berechnungen demonstrieren, dass die Anwendung der entwickelten Methodik nicht auf den Pkw-Bereich beschränkt ist.

Außerdem ist erkennbar, dass LPM auch bei LNFZ nur unter ganz bestimmten Einschränkungen zusätzliche relevante Einsparungen bieten, wenn die VKM abgekuppelt werden kann. Ist die VKM nicht vom Antriebsstrang trennbar, können LPM eingesetzt werden, um den Verbrauch etwas stärker zu senken, als dies zusätzlich zu einer Strategie möglich ist, die rekuperierte Energie für rein elektrisches Fahren nützt. Aufgrund der elektrischen Verluste wird aber selbst ohne Abkuppeln das Drehmoment der VKM nur in Ausnahmefällen angehoben.

Aufgrund der Ergebnisse wird derzeit von einer Integration von LPM in Regelstrategien für LNFZ und Pkw abgesehen.

11 Quervergleiche der Entwicklungsschritte

In diesem Kapitel werden diejenigen Simulations- bzw. Messergebnisse verglichen, die sich nur durch eine Komponente bei sonst identen Randbedingungen unterscheiden. So wird aufgezeigt, wie sich diese Änderung auf die Potenziale und Ergebnisse der Hybridisierung auswirken.

11.1 *Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Motor- bzw. Getriebevarianten*

Für das Wandler-Automatik-Fahrzeug AUT-REF liegen Simulationsergebnisse zum Grenzpotenzial für die beiden Motorentwicklungsstufen VKM2BAS und VKM2EVO vor. Das zweite Fahrzeug mit Doppelkupplungsgetriebe DCT2-SIM wird auch mit VKM2EVO simuliert.

Da es EiL-Messergebnisse mit VKM2EVO im AUT-REF nur im NEFZ und nur für das Basisfahrzeug gibt, beschränken sich die Vergleiche auf die errechneten Potenziale.

Wenn man diese für die beiden Motorvarianten im AUT-REF vergleicht, wird die Ähnlichkeit offensichtlich (siehe Abbildung 120 und Abbildung 121). LPM bieten unabhängig vom Emissionsniveau praktisch keine Zusatzpotenziale. Die Einsparungen durch die Rekuperation sind nahezu gleich. Durch den Umbau des Motors kann die deutliche Emissionsreduktion damit ohne Verbrauchsnachteile erwartet werden. Da in den dynamischeren Zyklen aber immer noch teilweise Betrieb ohne AGR auftritt, sind diese Schlüsse dort nur eingeschränkt aussagekräftig.

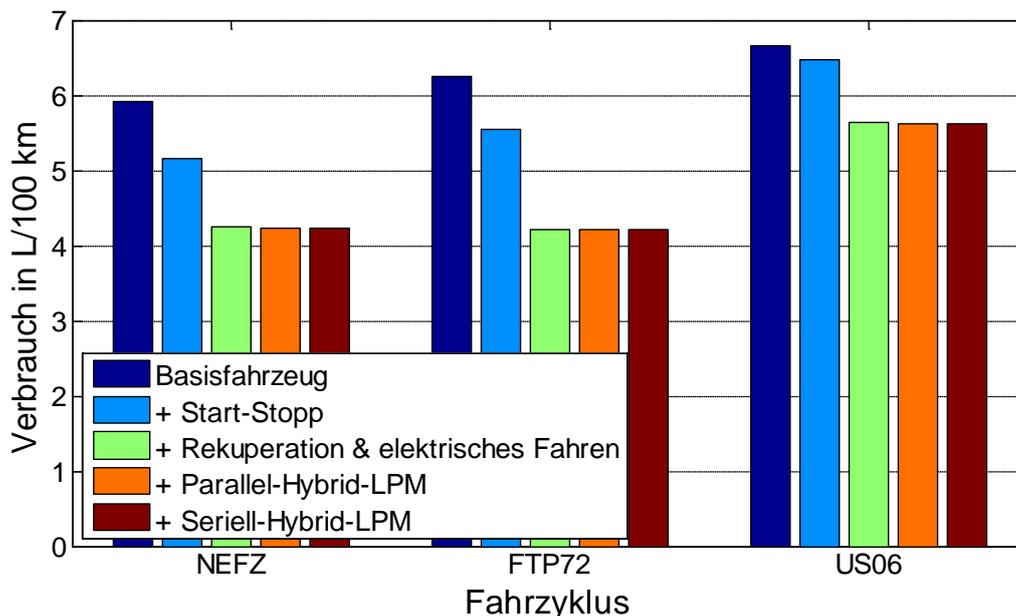


Abbildung 120 – Fahrzyklusvariation (AUT-REF, VKM2BAS)

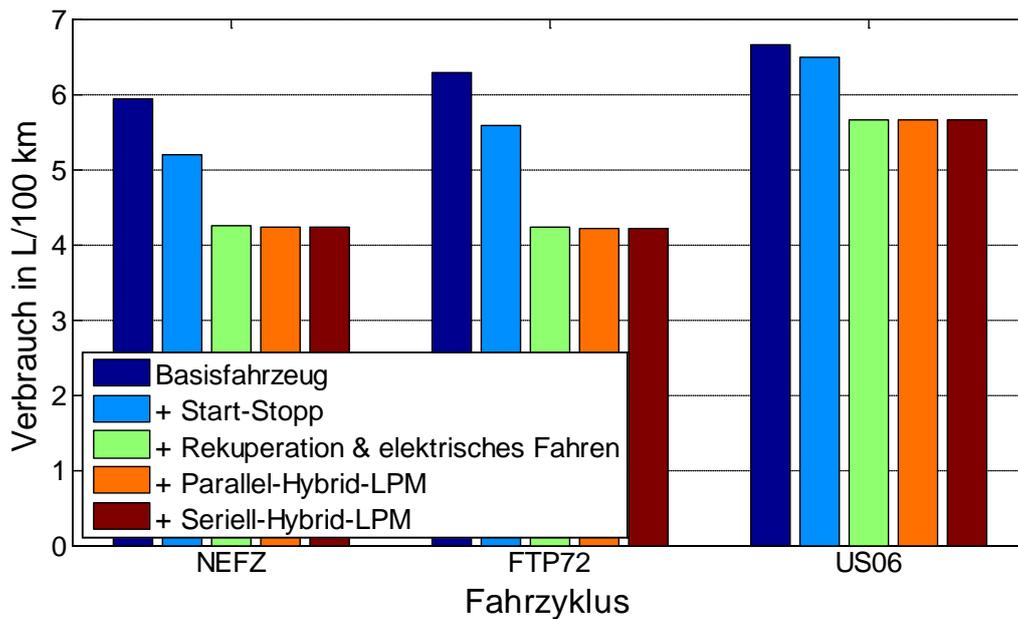


Abbildung 121 – Fahrzyklusvariation (AUT-REF, VKM2EVO)

Die Verbrauchsergebnisse für VKM2EVO in DCT2-SIM generell geringer (Abbildung 122). Die Verbesserungen sind dabei beim Basisfahrzeug größer, weil dort die Wandlerverluste entfallen, die bei den Hybridergebnissen grundsätzlich nicht auftreten. Logischerweise sind die Vorteile des Hybridsystems weniger ausgeprägt, wenn das Basisfahrzeug geringere Leerlaufverbräuche aufweist. Die geringen Vorteile für LPM können auch hier festgestellt werden.

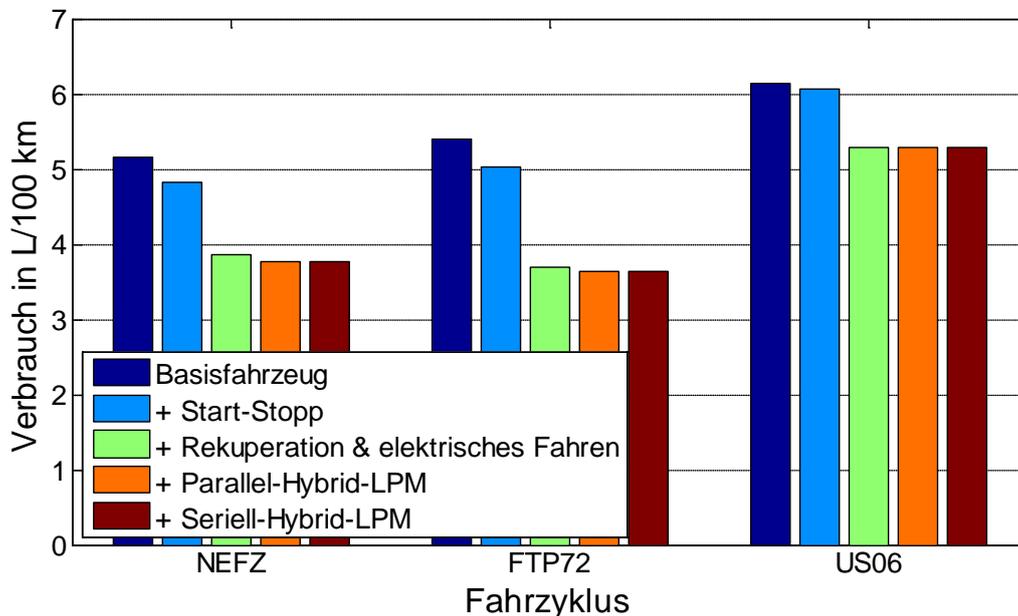


Abbildung 122 – Fahrzyklusvariation (DCT2-SIM, VKM2EVO)

Bei Verwendung realer Betriebsstrategien verändern sich diese Aussagen aufgrund der guten Ausnutzung der Potenziale nicht wesentlich.

Vergleichende Emissionsaussagen sind aufgrund der Betriebsbereiche nur im NEFZ sinnvoll. Die Hochrechnungen ergeben hinsichtlich der NO_x deutliche Unterschiede. Die erwarteten Vorteile für VKM2EVO sind dabei für das Basisfahrzeug und alle Hybridvarianten

größer als das Potenzial für NO_x -Absenkung durch Hybridisierung mit VKM2BAS. Dabei bleibt der Verbrauch auch nahezu konstant.

Somit gilt zusammenfassend, dass auf Basis der stationären Kennfelder die NO_x -Absenkung durch Hybridmaßnahmen verbrauchsungünstig ist.

11.2 'Engine in the Loop'-Ergebnisse mit unterschiedlichen Motor- und Getriebevarianten

Die EiL-Ergebnisse bezüglich des Kraftstoffverbrauchs werden durch die Vorausberechnung für Basisfahrzeug und Hybridvarianten hinreichend genau erfasst. Die Abweichungen sind dabei für VKM2EVO tendenziell etwas größer. Schon das ist ein Indiz für regelungsbedingte Abweichungen. Die Emissionsergebnisse, die generell qualitativ nicht so gut vorausberechnet werden können, weisen ebenfalls für die weiterentwickelte Motorvariante größere Abweichungen auf. Beim DCT2-SIM ergeben sich generell größere Drehzahl- und Drehmomentgradienten, weil das dämpfende Verhalten des Wandlers fehlt. Da schon gezeigt werden konnte, dass die Abweichungen proportional zu der Dynamik des Zyklus sind, wird dies durch das simulierte Getriebe noch verstärkt. Der Vergleich der beiden mittels EiL-Versuchen geprüften Varianten VKM2BAS in AUT-REF gegenüber VKM2EVO in DCT2-SIM ergibt für die bei beiden Varianten absolvierten Tests für die Basisfahrzeugkonfiguration und für die reale Betriebsstrategie 'Lernendes Kriterium' eine Reduktion der NO_x auf ca. 50% der Ausgangswerte in NEFZ und FTP72, bzw. auf ca. ein Drittel im US06. Der Verbrauch verbessert sich dabei hauptsächlich durch die reduzierten Antriebsstrangverluste. CO und C_xH_y steigen deutlich an und müssen durch geeignete angepasste Nachbehandlungssysteme oxidiert werden. Bezüglich der Rußemissionen kann wegen der unterschiedlichen Messverfahren keine Aussage getroffen werden.

12 Umsetzungsvorschläge

In den vorangegangenen Kapiteln der Arbeit ist ein Weg beschrieben, wie sich die Potenziale der Hybridisierung ermitteln und in eine Betriebsstrategie umsetzen lassen. Darin sind Entscheidungen bezüglich der Realisierung bestimmter Funktionen und der Dimensionierung der Komponenten enthalten. Hier wird jetzt noch einmal ausgeführt, an welchen Stellen im Vorentwicklungsprozess diese getroffen werden können. Je früher diese Entscheidungen feststehen, desto früher können andere Aufgaben, wie bspw. die Bauraum- und Einbauplanung oder die Kostenermittlung, auf das Zielsystem beschränkt werden.

Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass die zu entwickelnde Hybridlösung neben bestehenden Fahrzeugvarianten realisiert werden soll. Auch bei Einsatz einer verkleinerten VKM wird von der Verfügbarkeit entsprechender Abgasnachbehandlungssysteme ausgegangen. Wie schon in Kapitel 1.5 ausgeführt, trifft dies auf fast alle bisher eingeführten Hybridfahrzeuge zu.

12.1 *Topologieauswahl*

Die Entscheidung über die Struktur des Hybridsystems soll schon auf Basis einer Potenzialberechnung möglich sein. Stehen die durch SMK und Fahrwiderstände charakterisierte Fahrzeugklasse und mögliche Getriebe- und VKM-Varianten fest, können für alle Kombinationen die Potenziale entsprechend Kapitel 7 ermittelt werden. Es ist vorteilhaft, wenn die VKM so dimensioniert ist, dass alle erwarteten Betriebszustände ohne elektrische Unterstützung und mit aktiven Emissionskontrollmaßnahmen möglich sind. Anderenfalls müssen die Betriebsstrategien später immer auf eine ausreichende Ladungsreserve Rücksicht nehmen, was einerseits die notwendige Kapazität des EES vergrößert und andererseits dazu führt, dass im späteren Realbetrieb nicht sichergestellt ist, dass solche Anforderungen immer erfüllt werden können.

Bei Einsatz drehmoment- bzw. leistungsschwächerer VKM sind diese Nachteile gegenüber den Vorteilen durch die verbesserten Wirkungsgrade abzuwägen.

Zur Wiederherstellung des notwendigen Ladezustands sind dann LPM nötig, die auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit für qualitätsgeregelte VKM als ungünstig zu bewerten sind.

Für die Berechnungen sind realistische Verluste der elektrischen Komponenten jedenfalls näherungsweise zu berücksichtigen, weil teilweise verlustlose Berechnungen zu unrealistischen Schlüssen führen können. Die Leistung muss hingegen noch nicht begrenzt werden.

Jedenfalls können auf Basis der Potenzialberechnung die Entscheidungen über die Sinnhaftigkeit einer zweiten EM für SH-Betrieb bzw. einer Kupplung zum Trennen der VKM vom restlichen Antriebstrang getroffen werden.

12.2 *Komponentenauswahl*

Die Festlegung der Dimension der elektrischen Komponenten ist über weitere Variantenrechnungen möglich. Dabei wird ein Zusammenhang zwischen den möglichen Einsparungen und der dafür notwendigen elektrischen Maximalleistung hergestellt. Die Speicherkapazität kann Anhand des ermittelnden Speicherhubs dimensioniert werden.¹⁷⁰

Wenn die ersten Berechnungen zur Topologieauswahl keine Potenziale für LPM ergeben, können die Leistung der EM und die Kapazität des EES auch anhand der maximal erwarteten Rekuperationsleistung bzw. der maximal eingespeicherten Energie während einer

¹⁷⁰ Zusätzliche Anforderungen, wie bspw. die Forderung nach einer rein elektrischen Mindestreichweite im Stadtbetrieb, können die Ergebnisse hinsichtlich der Dimensionierung von EM und EES beeinflussen. Diese schränken die Potenziale aber immer ein.

Rekuperationsphase festgelegt werden (siehe Kapitel 10.3). Für das elektrische Fahren wird üblicherweise weniger Leistung benötigt.

Sind schließlich die Komponenten vorausgewählt, sollten die Verlustdefinitionen angepasst und die Ergebnisse kontrolliert werden.

12.3 Betriebsstrategieauswahl

Ohne zusätzliche Bedingungen steht am Anfang die endgültige Entscheidung, ob LPM Bestandteil der Betriebsstrategie sind. Werden LPM verwendet, sind diese entweder über einen Schwellwert für ein Kriterium entsprechend Kapitel 7.2.2 auszuwählen, oder es gelingt aus den verschiedensten berücksichtigten Fahrzyklen Anforderungen zu identifizieren, die beim Grenzpotenzialergebnis immer zu einheitlichen LPM führen. Problematisch ist hier vor allem die Regelung der Übergänge, weil bei dynamischen Fahrzyklen auch gleich wieder die Situation eintreten kann, dass LPM aktuell ungünstig sind. Vorteilhaft ist die Aktivierung daher unter Berücksichtigung erwarteter Zustände, wie bspw. auf Basis einer Tempomat-Funktion. Grundsätzlich sind LPM mit geringen elektrischen Leistungen zu bevorzugen, weil damit die elektrischen Verluste minimiert werden und die relativen Wirkungsgradverbesserungen üblicherweise mit steigender VKM-Leistung abnehmen.

Ohne LPM verbleibt die Entscheidung zwischen der Wahl der Vortriebsquelle. Eine Auswahl ist anhand eines objektiven Kriteriums wie in Kapitel 8 ausgeführt möglich.

Immer notwendig ist auch schon für die Untersuchungen im Vorentwicklungsprozess die Berücksichtigung von Einschränkungen durch das Leistungsangebot der EM bzw. die Kapazität des EES, sowie das mögliche transiente Verhalten der VKM. Sollen EiL-Versuche auf Motorprüfständen durchgeführt werden, sind auch deren dynamische Einschränkungen zu beachten.¹⁷¹ Alle bisherigen Untersuchungen zeigen, dass es günstig ist, den EES möglichst leer zu betreiben, um alle möglichen Rekuperationsphasen zum Laden verwenden zu können. Das gilt im Speziellen bei eingeschränkter nutzbarer Kapazität. Durch Variation der nicht systembedingten Parameter des Regelkonzepts erhält man einfach die günstigste Kombination. Der Vergleich mit dem Potenzialergebnis gibt Aufschluss über die erreichte Qualität. Schließlich liefert noch die Gegenüberstellung mit vereinfachten Varianten Hinweise, ob die systembedingten Einschränkungen eine auf einem berechneten Kriterium basierende Strategie möglicherweise obsolet werden lassen.

¹⁷¹ Andere Bedingungen, wie bspw. die Forderung nach gleichen Reaktionen auf gleiche Anforderungen, um dem Fahrer das gleiche Feedback zu geben, schränken die Potenziale ein und sollten daher möglichst vermieden werden.

12.4 Integration in gekoppelte Simulationsmodelle

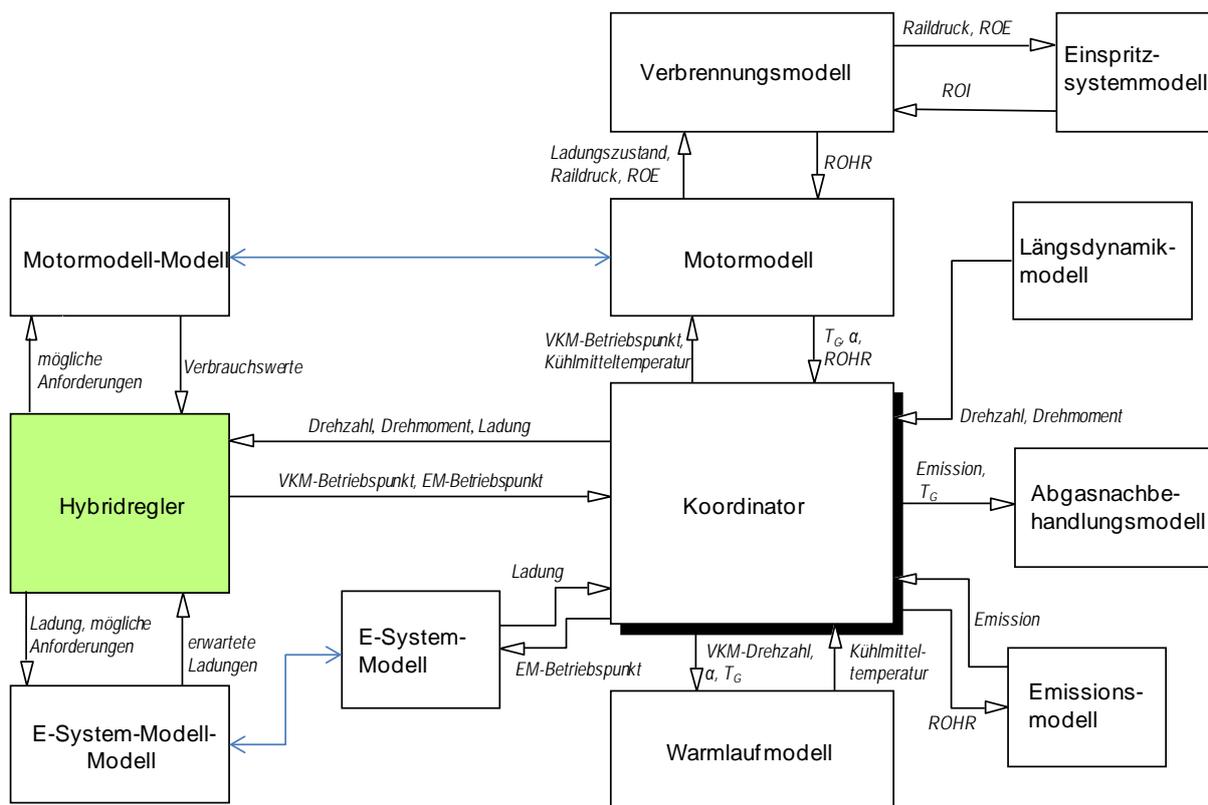


Abbildung 123 – Hybridregler im Kontext eines virtuellen Fahrzeugs

Ein Vorschlag für die Integration der Hybridregler in ein gekoppeltes Simulationsmodell eines Antriebsstrangs ist in Abbildung 123 dargestellt. Entscheidend für das Verständnis ist, dass der Hybridregler, wenn er auf Basis eines objektiven Kriteriums arbeiten soll, selbst Modelle von VKM und Elektrosystem benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit kommen hier Kennfeldmodelle zum Einsatz. Außerdem sind bei allen vorgestellten Ergebnissen keine Reaktionszeiten der Systeme auf Vorgaben berücksichtigt. Vorgeschlagen wird nun, dass diese Einschränkung zumindest für die Entscheidung über die Betriebsmodi weiterhin gelten soll. Somit wäre bei einer Umsetzung eine Option ohne Integration dynamischer Modelle in die ECU vorhanden. Die vom Hybridregler verwendeten Modelle der Modelle können mithilfe der entsprechenden Simulationstools erstellt werden. Möglich sind hier einfache Kennfeldmodelle, die im Unterschied zu dieser Arbeit aber auf Simulationsergebnissen beruhen, aber auch einfache mathematische Modelle, deren Parameter anhand der komplexeren Modelle abgestimmt werden.

13 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation werden wichtige Aspekte der Entwicklung der Teilelektrifizierung dieselmotorischer Kraftfahrzeug-Antriebsstränge ausgeführt. Die Arbeit beschränkt sich dabei auf die Vorentwicklungsphase, deren Schwerpunkte auf der Simulation und Versuchen auf transienten Motorprüfständen liegen.

Hauptziel ist dabei im Kontext des globalen Klimawandels die Erschließung weiterer Einsparungspotenziale auf Basis der verbrauchsgünstigen Pkw-Dieselantriebe. Eine Einführung beschreibt die geschichtlichen Aspekte des Hybridantriebs und dessen Ausprägungen, sowie die ausschlaggebenden Gründe für die Auswahl von Dieselmotoren.

Es wird ein Prozess beschrieben, mit dem die Potenziale hinsichtlich verschiedener Zielgrößen ermittelt werden können. Diese Arbeit listet dafür relevante bzw. adaptierte Vorschriften auf und demonstriert eine Methode zur objektiven Bewertung aller möglichen Betriebsmodi eines Hybridfahrzeugs. Der Vergleich mit vereinfachten Methoden zeigt dabei, dass die vorgestellte, darauf aufgebaute Variante zur Auswahl der Betriebsmodi unter allen untersuchten Bedingungen die besten Gesamtergebnisse ermöglicht. Mithilfe dieser Methode werden anschließend die Grenzpotenziale für vorgegebene Fahrzyklen berechnet und auch experimentell bestätigt. Außerdem wird auf Basis der Erkenntnisse eine Regelungsstrategie aufgebaut, die es ermöglicht, die Potenziale auch in den realen Fahrbetrieb zu übertragen.

Dieser Prozess wird für verschiedene Dieselfahrzeuge in unterschiedlicher Anwendungstiefe durchlaufen. Behandelt werden einerseits verschiedene Entwicklungsstufen eines Pkws der oberen Mittelklasse mit unterschiedlichen, teilweise virtuellen Getrieben und Motorabstimmungen für verschiedene Emissionsziele. Im Rahmen der Simulationen werden dabei auch ein leichteres, kleineres und ein schwereres, größeres Fahrzeugmodell untersucht. Andererseits werden verschieden leichte Nutzfahrzeuge hinsichtlich ihres Hybridisierungspotenzials untersucht. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Anwendungen werden hier noch einmal zusammengefasst.

Die Hybridisierung bietet auch bei Dieselantrieben hohe Potenziale hinsichtlich der Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Es zeigt sich, dass sich die Vorteile einzelner Maßnahmen dabei nicht kumulieren. Das gilt insbesondere für den Einsatz von Lastpunktmanipulationen. Diese bieten praktisch nur dann Vorteile hinsichtlich der Senkung des Gesamtkraftstoffverbrauchs, wenn die Verbrennungskraftmaschine nicht vom restlichen Antriebsstrang abgekoppelt werden kann. Ist das nämlich möglich, ist es schon mit elektrischem Fahren durch Einsatz der rekuperierten Energie möglich alle relevanten ungünstigen Betriebspunkte der Verbrennungskraftmaschine zu ersetzen. Im Gegensatz zum elektrischen Fahren werden durch Lastpunktmanipulationen direkt keine Reibungsverluste verändert. Es tritt nur ein relativer Vorteil auf, der jedoch meistens die zusätzlichen elektrischen Verluste nicht kompensieren kann. Bei qualitätsgeregelten Verbrennungskraftmaschinen und damit auch bei Dieselmotoren verändern sich bei Lastpunktmanipulationen auch die Ladungswechselperluste nicht entscheidend. Wenn das Anheben der Last der Verbrennungskraftmaschine sinnvoll ist, reicht üblicherweise relativ wenig Leistung der Elektromaschine aus. Absenken der Last der Verbrennungskraftmaschine ist nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen vorteilhaft.

Im seriellen Hybrid-Betrieb treten aufgrund der notwendigen zweimaligen Energiewandlung hohe Verluste auf, die die Wirkungsgradvorteile der Verbrennungskraftmaschine, die durch den geänderten Betriebspunkt erzielt werden, gegenüber Antrieben mit mechanischen Durchtrieb meistens übersteigen.

Ist die Leistung der Elektromaschine so begrenzt, dass sie gerade zur Ausschöpfung nahezu des gesamten Grenzpotenzials der Hybridisierung ausreicht, weisen alle durch elektrisches Fahren ersetzbaren Betriebspunkte der Verbrennungskraftmaschine ähnliche Verhältnisse

von elektrischem Leistungsbedarf bei elektrischem Fahrbetrieb zu den dadurch vermeidbaren Schleppverlusten auf. Deshalb führen auch abgewandelte, teilweise stark vereinfachte Betriebsstrategien zu vergleichbar guten Einsparungen. Generell soll zur Ausschöpfung des Rekuperationspotenzials der Ladezustand des elektrischen Energiespeichers möglichst niedrig gehalten werden.

Diese Erkenntnisse sind entsprechend dem Hauptteil der Arbeit auf die Verbrauchsminimierung beschränkt. Potenziale zur Absenkung der Stickoxid-Emissionen können ebenfalls ermittelt werden. Ohne Lastpunktmanipulationen sind die ermittelten resultierenden Betriebsbereiche sehr ähnlich wie beim Verbrauchsminimum. Mit Lastpunktmanipulationen tritt hingegen ein deutlicher Trade-Off auf: Jede weitere Stickoxidabsenkung führt zu erhöhtem Verbrauch. Hier hat ein Vergleich mit alternativen Maßnahmen zur Stickoxidabsenkung keine Vorteile ergeben.

Generell hätte eine Abstimmung auf Emissionsgrenzwerte, die nur durch die Hybridisierung erzielbar ist, auch Nachteile hinsichtlich des Entwicklungsaufwands. Aus Kostengründen kann nur dann, wenn Teilsysteme anderer Fahrzeugvarianten auch für die endgültige Hybridisierung verwendet werden können, auf die Einhaltung der Grenzwerte ohne Hybridmaßnahmen verzichtet werden. So könnte die Hybridvariante bspw. ohne aktive Stickoxidnachbehandlung auskommen. Soll hingegen die gleiche Abgasnachbehandlungstechnik wie bei einem konventionellen Fahrzeug mit gleicher Motorisierung zum Einsatz kommen, ist es besser das Hybridsystem ausschließlich zur Verbrauchsminimierung zu nutzen, damit es sich für den Kunden amortisieren kann. Diese Arbeit zeigt dabei, dass auch bei verbrauchsoptimaler Betriebsweise die Emissionen meistens sinken.

Quantifiziert können sowohl Verbrauchs-, als auch Stickoxid-Reduktionspotenziale im neuen Europäischen Fahrzyklus für Fahrzeuge der oberen Mittelklasse mit circa 30 Prozent angegeben werden. Die Verbrauchseinsparungen in anderen Fahrzyklen sind näherungsweise direkt proportional zur mittleren Fahrgeschwindigkeit und liegen im Bereich von zehn im typischen Autobahnbetrieb erzielbaren bis 40 im Stadtbetrieb möglichen Prozent. Ursache für die Unterschiede sind die abweichenden Stillstandanteile und Rekuperationspotenziale, sowie die beim Referenzfahrzeug unterschiedlichen Wirkungsgrade. Je weniger Energie rekuperiert werden kann und je kleiner die Verluste der Verbrennungskraftmaschine beim Referenzfahrzeug bezogen auf die für elektrisches Fahren benötigte Leistung sind, desto geringer ist das Hybridisierungspotenzial. Die Aussagen hinsichtlich der Stickoxid-Emissionen sind generell schwieriger, weil hier der Dynamikeinfluss ausgeprägter ist. Eine Erhöhung ist jedoch wie erwähnt selbst bei verbrauchsoptimaler Betriebsführung ohne Lastpunktmanipulationen nicht zu erwarten.

Mit dieser Arbeit liegt eine Methode vor, die in verschiedenen Testfällen angewandt worden ist und mit deren Hilfe Potenziale der Hybridisierung schon frühzeitig erkannt werden können. Sie kann ohne komplizierte Kostenfunktionen auch als Basis für Regelungsansätze fungieren.

Angelehnt an diese Methode bietet die Arbeit abschließend auch Vorschläge für die Umsetzung im Rahmen der Vorentwicklung, sowie die Integration in eine Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung.

14 Ausblick

Neben den bei dieser Arbeit behandelten Minimierungsaufgaben in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen sind bei der Hybridsystementwicklung auch Vorteile in Bezug auf Fahrbarkeit und Fahrleistungen erzielbar. Diese hier nicht behandelten Aspekte können allerdings in Widerspruch zu den Verbrauchszielen stehen. Will man bspw. bei Konzepten mit leistungsschwächeren Verbrennungskraftmaschinen (Downsizing) die Nachteile hinsichtlich des Beschleunigungsverhaltens durch das elektrische System ausgleichen, darf man keine Betriebsstrategie wählen, bei der der Ladezustand im elektrischen Energiespeicher möglichst klein gehalten wird.

Ebenfalls wichtig für eine mögliche Umsetzung ist die Bearbeitung des akustischen Verhaltens und des Vibrationsverhaltens. Hauptsächlich durch den intermittierenden Betrieb der Verbrennungskraftmaschine mit vom Fahrer nicht direkt beeinflussten Starts sind hier gesteigerte Anforderungen zu erwarten. Die Akzeptanz von je nach Ladezustand des elektrischen Energiespeichers unterschiedlich ausgewählten Betriebsarten bei gleichen Fahrsituationen ist von deren subjektiver Erkennbarkeit abhängig.

Mit dieser Dissertation ist eine Methode entstanden, mit der der Nutzen einer Hybridisierung dokumentiert werden kann. Ganz entscheidend hinsichtlich der Gesamtbilanz ist jedoch auch der dahinterstehende Aufwand. Dies betrifft einerseits den finanziellen Aspekt mit der Frage, in wie weit sich die sicherlich erhöhten Herstellungskosten auf den Verkaufspreis aufschlagen lassen, wenn den Kunden zusätzlich zur Verbrauchseinsparung auch Vorteile hinsichtlich Fahrverhalten geboten werden können.

Unabhängig davon sind für die Gesamtenergiebilanz neben dem Energieeinsatz beim Betrieb auch der Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung zu bewerten. Gerade in Bezug auf die Batterien müssen hier auch eventuelle Nachnutzungskonzepte evaluiert werden.

Unter Kostengesichtspunkten könnte auch ein Emissionshybrid als eigenständige Entwicklung interessant sein, wenn dadurch eine deutliche Reduktion des Aufwandes in der Abgasnachbehandlungstechnik erzielt werden kann. Das bedingt dann aber auch gesetzlich vorgeschriebene aufwendige Überwachungsfunktionen für das dann emissionsrelevante Hybridsystem zu realisieren.

Zur Beurteilung solcher Maßnahmen ist als Alternative zu gekoppelten Simulationen auch die Zusammenfassung von Teilsystemen zu kombinierten Modellen möglich. So könnte bspw. ein Modell von Verbrennungskraftmaschine und Abgasnachbehandlungssystem direkt die Emissionen des Gesamtsystems wiedergeben.

Zur Analyse der Auswirkungen von Kaltstarts oder anderer Temperatureinflüsse ist die Verwendung der gekoppelten Simulation und von Prüfstandssystemen mit Rückführung von Messwerten in die Steuergeräte angezeigt. Mittels Warmlaufmodellen zur Abbildung des Temperaturverhaltens bzw. Rückführung der entsprechenden Temperaturmesswerte sind dann auch Strategien möglich, die je nach Temperaturniveau auf unterschiedliche Zielwerte optimiert werden. Erwähnt sei hier exemplarisch eine abgestimmte Erhöhung der Abgasenthalpie in Kombination mit einer Begrenzung der Rohemissionen bis zum Erreichen der Konvertierungstemperatur des Katalysators. Zu beachten ist hierbei, dass Messungen zur Erstellung bzw. Verifikation entsprechend genauer Warmlaufmodelle nur mehr auf speziell ausgestatteten Prüfständen mit aufwendigen Konditioniersystemen möglich sind.

Der Einsatz derartiger komplexer Verfahren zur Simulation des Hybridsystems ist aber erst sinnvoll, wenn ein eindeutiges Potenzial mit quasi-stationären Ansätzen erkannt wird. Die Ermittlung genau dieser Potenziale ist mit den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren schnell und mit vertretbarem Aufwand möglich.

Literatur

- Ansperger F.:** Untersuchungen zum transienten thermischen Verhalten von Motorkomponenten der Hochtemperaturabgasseite (Diplomarbeit, TU Graz; 2010)
- AVL List GmbH:** CRUISE v2010 Users Guide (Graz; 2010)
- AVL List GmbH:** Rauchwertmessung mit der Filterpapiermethode (www.avl.com/c/document_library/get_file?p_l_id=10473&folderId=15583&name=DLFE-427.pdf, Zugriff: 27.8.2012)
- Bacher C.:** Validierungsbeispiel für ein Hybridantriebssystem (Diplomarbeit, TU Graz; 2009)
- Back M.:** Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen (Dissertation, Universität Karlsruhe; 2005)
- Bady R., Biermann J.-W.:** Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen in: 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Technische Akademie Esslingen (<http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2000/11.-12.05/by1000d.pdf>, Zugriff: 27.8.2012); 11.-12.5.2000
- Bickerstaffe S.:** Making the right moves in: Professional Engineering Publishing; ISSN 0307-6490; Automotive Engineer; 12/2007
- Bildstein M., Richter B., Aumayer R., Mann K., Fronzek T., Wandt H.-P.:** Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge in: **Reif K. [Hrsg.]:** Bosch Autoelektrik und Autoelektronik (Vieweg & Teubner, Springer Fachmedien; Wiesbaden; ISBN 978-3-8348-1274-2; 6. Auflage 2011)
- Bildstein M., Richter B., Aumayer R., Mann K., Fronzek T., Wandt H.-P.:** Hybridantriebe in: **Reif K. [Hrsg.]:** Bosch Autoelektrik und Autoelektronik (Vieweg & Teubner, Springer Fachmedien; Wiesbaden; ISBN 978-3-8348-1274-2; 6. Auflage 2011)
- Böckl M.:** Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen (Dissertation, TU Wien; 2008)
- Böhle J., Stiebels B.:** Der neue Touareg Hybrid in: SpringerAutomotive Media, Springer Fachmedien; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift extra (Der VW Touareg); 3/2010
- Breitbach H., Schommers J., Ninz R., Lindemann B., Lingens A., Reichel S.:** Brennverfahren und Abgasnachbehandlung im Mercedes-Benz-Bluetec-Konzept in: Vieweg; Wiesbaden; ISSN 0024-8525; Motortechnische Zeitschrift; 6/2007
- Caldevilla A.:** Untersuchung von elektrischen Speichersystemen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen (Dissertation, TU Wien; 2008)
- Chehab C., Le Neindre Y., Deutrich K., Küsell M., Willke C., Barth V., Lichtermann J.:** Der elektrische Achs-Hybrid von PSA und Bosch in: Fortschrittberichte Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12 (Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik), Nr. 735; ISBN 978-3-18-373512-9; 32. Internationales Wiener Motorensymposium; 5.-6.5.2011
- Cipolla G., Sanguedolce A., Boretto G., Peters B.:** Diesel Particulate Filters - Field Experiences with Current Systems and Factors that will define Future Designs in: Fortschrittberichte Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12 (Verkehrstechnik,

Fahrzeugtechnik), Nr. 622; ISBN 3-18-362212-2; 27. Internationales Wiener Motorensymposium; 27.-28.4.2006

Costlow T.: The upside of downsizing in: Society of Automotive Engineers; Warrendale; ISSN 1543-849X; automotive engineering international; 8/2009

Delphi: Worldwide Emission Standards Passenger Cars & Light Duty Vehicles 2011/2012 (delphi.com/pdf/emissions/delphi-passenger-car-light-duty-truck-emissions-brochure-2011-2012.pdf, Zugriff: 28.2.2012)

Eichseder H.: Future of Powertrains - Challenges and Risks for IC Engines in: 9th Hyundai-Kia International Powertrain Conference; Seoul; 17.11.2009

Eichseder H., Hausberger S., Wimmer A.: Zukünftige Otto-DI-Brennverfahren - Thermodynamische Potenziale und Grenzen im Vergleich zu Dieselmotoren in: Motortechnische Zeitschrift-Konferenz Der Antrieb von morgen; Neckarsulm; 22.-23.5.2007

Engel T.: Plug-in Hybrids (Dr. Hut; München; ISBN 978-3-89963-327-6; 2007)

Environmental Protection Agency: Motor Vehicle Emissions Federal Test Procedure (cfr.vlex.com/vid/86-128-79-transmissions-19805567, Zugriff: 8.2.2012)

Europäische Union: Richtlinie 2005/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. September 2005 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel ...
(eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=consleg:2005L0055:20060610:de:pdf, Zugriff: 3.2.2012)

Europäische Union: Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern ... (Rahmenrichtlinie)
(eur-lex.europa.eu/lexuriserv/site/de/oj/2007/l_263/l_26320071009de00010160.pdf, Zugriff: 2.1.2012)

Europäische Union: Richtlinie des Rates vom 16. Dezember 1980 über die Kohlendioxidemissionen und den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen
(eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=consleg:1980L1268:20040219:de:pdf, Zugriff: 7.2.2012)

Europäische Union: Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (70/220/EWG)
(eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=consleg:1970L0220:20070101:de:pdf, Zugriff: 8.2.2011)

Fehrenbach F.: Herausforderungen globaler Zulieferunternehmen in: Fortschrittberichte Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12 (Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik), Nr. 639; ISBN 3-18-363912-2; 29. Internationales Wiener Motorensymposium; 24.-25.4.2008

Gao Z., Chakravarthy V. K., Daw C. S.: Comparisons of the simulated emissions and fuel efficiencies of diesel and gasoline hybrid electric vehicles in: SAGE Publications; Thousand Oaks; eISSN 2041-2991 (ISSN 0954-4070); Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; 7/2011

Gao Z., Conklin J. C., Daw C. S., Chakravarthy V. K.: A proposed methodology for estimating transient engine-out temperature and emissions from steady-state maps in: SAGE Publications; Thousand Oaks; eISSN 2041-3149 (ISSN 1468-0874); International Journal of Engine Research; 4/2010

Gerhard S.: Start-Stopp Betrieb beim Pkw-Dieselmotor (Dissertation, TU Darmstadt; 2009)

Geringer B., Fischer S., Hofmann P., Lauer T., Möltner L., Schneeweiss B., Teiner P.: Neue Ansätze und Entwicklungsmethoden zur Minimierung der NO_x-Emissionen von Dieselmotoren in: Fortschrittberichte Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12 (Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik), Nr. 716; ISBN 978-3-18-371612-8; 31. Internationales Wiener Motorensymposium; 29.-30.4.2010

Grebe U. D.: GM's Voltec Antriebssystem - Elektrifizierung der Fahrzeuge auf neuem Niveau in: Proceedings der AVL Konferenz Motor & Umwelt; Graz; 10.-11.9.2009

Grünweg T.: Porsche Semper Vivus: Das erste Hybridauto der Welt (www.spiegel.de/auto/fahrkultur/0,1518,749168,00.html, Zugriff: 6.2.2012)

Guttenberg P.: Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse (Dissertation, TU München; 2004)

Habersbrunner G., Wachtmeister G.: Methodische Vorgehensweise zur Erstellung von Dieselmotor-Kennfeldern zur Gesamtfahrzeugsimulation in: Verein Deutscher Ingenieure Wissensforum; Düsseldorf; ISBN 978-3-9812881-0-0; 1. Automobiltechnisches Kolloquium; München; 16.-17.4.2009

Helms H., Pehnt M., Lambrecht U., Liebich A.: Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions in: EMPA; Dübendorf; ISBN 978-3-905594-57-7; 18th International Symposium Transport and Air Pollution; 18.-19.5.2010

Hofmann J., Neumann T., Jeworutzken K., M. Schütz: Start-Stopp-System im Porsche Panamera in: SpringerAutomotive Media, Springer Fachmedien; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 3/2010

Hofmann P.: Hybridfahrzeuge (Springer; Wien; ISBN 978-3-211-89190-2; 2010)

Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Synthesis Report (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf, Zugriff: 5.2.2012)

International Monetary Fund: World Economic Outlook (chapter 4) (www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2005/01/pdf/chapter4.pdf, Zugriff: 5.2.2012)

Kässbohrer Geländefahrzeug AG: K info (4/2009) (www.pistenbully.com/uploads/tx_z7simplifiedownloads/k-info0909_de_01.pdf, Zugriff: 6.2.2012)

Keller M., Birke P., Blome F.: Energiespeichersysteme für Hybridfahrzeuge in: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig; Braunschweig; ISBN 3-937655-06-9; 3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement; 15.2.2006

Kelly K. J., Mihalic M., Zolot M.: Batterie Usage and Thermal Performance of the Toyota Prius and Honda Insight for Various Chassis Dynamometer Test Procedures in: Institute of

Electrical and Electronics Engineers; Piscataway; ISBN 0-7803-7132-1; 17th Annual Battery Conference on Application and Advances; Long Beach; 17.-18.1.2002

Kirchner E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben (Springer; Berlin; ISBN 978-3-540-35292-1; 2007)

Klima B., Huss A., Nöst M.: Durchgängige Methodik für Simulation und Messung des Diesel-Hybrid-Potenzials in: SpringerAutomotive Media, Springer Fachmedien; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 11/2010

Klima B., Huss A., Nöst M.: Grenzpotenzialermittlung und Parameterstudie für Diesel-Hybrid-Systeme in: Verein Deutscher Ingenieure Wissensforum; Düsseldorf; ISBN 978-3-9812881-0-0; 1. Automobiltechnisches Kolloquium; München; 16.-17.4.2009

Köhler U.: Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge in: **Naunin D. et al.:** Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (Expert; Renningen; ISBN 978-3-8169-2625-8; 4. Auflage 2007)

Kreschl S.: Der Autarke Hybrid - Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparungspotenzials (Dissertation, TU München; 1998)

Kuhn M.: Kässbohrer testet dieselektrische Antriebe für PistenBully (Interview in K info (4/2009))
(www.pistenbully.com/uploads/tx_z7simplifiedownloads/k-info0909_de_01.pdf, Zugriff: 6.2.2012)

Kurzweil P.: Alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge in: **Tiefel T. [Hrsg.]:** Strategische Aktionsfelder des Patentmanagements (Deutscher Universitätsverlag; Wiesbaden; ISBN 978-3-8244-0823-8; 2006)

Lamm A., Warthmann W., Soczka-Guth T., Kaufmann R., Spier B., Friebe P., Stuis H., Mohrdieck C.: Lithium-Ionen-Batterie in: SpringerAutomotive Media, GWV-Fachverlag; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 07-08/2009

Lehna M.: Audi duo, ein Hybridfahrzeug für die City-Logistik in: Verein Deutscher Ingenieure-Berichte, Nr. 1378; ISBN 3-18-091378-9; VDI Tagung Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, Dresden; 17.-18.2.1998

Leinhos D. C., Quaglia S.: Die Betriebsstrategie und Emissionierung des BMW ActiveHybrid X6 in: Verein Deutscher Ingenieure-Berichte, Nr. 2105; ISBN 978-3-18-092105-1; 7.VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe (Die Vielfalt der Mobilität: Vom Verbrenner bis zum E-Motor); Dresden; 10.-11.11.2010

Mahr B., Warth M., Rückauf J., Elsässer A.: Innovatives Abgasrückführsystem zur kosten- und verbrauchseffizienten Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften in: Fortschrittberichte Verein Deutscher Ingenieure, Reihe 12 (Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik), Nr. 697; ISBN 978-3-18-369712-0; 30. Internationales Wiener Motorensymposium; 7.-8.5.2009

MRCE Dispolok GmbH: Siemens ER20
(www.dispolok.com/fileadmin/documents/english/Einlegebl_ER20.pdf, Zugriff: 6.2.2012)

Nuglisch H., Dupont H., Crenne D., Krebs S., Curtis R., Turner J., Coltmann D.: System Concept Car for CO2 Reduction Measures in: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen;

Aachen; ISBN 978-3-940374-01-1; 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik; 7.-8.10.2008

Odendall B.: Fehlerbetrachtung bei der Messung von Gastemperaturen in: Vieweg; Wiesbaden; ISSN 0024-8525; Motortechnische Zeitschrift; 3/2003

Pischinger R., Klell M., Sams T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine (Springer; Wien; ISBN 978-3-211-99276-0; 3. Auflage 2009)

Pongratz H., Schindler W., Singer W., Striok W., Thaller W.: Messtechnik für transiente Erfassung der Deselemissionen in: Vieweg; Wiesbaden; ISSN 0024-8525; Motortechnische Zeitschrift; 10/2003

Roth H., Wagner U.: Energiespeicher für Fahrzeuge mit Elektroantrieb in: Verein Deutscher Ingenieure Wissensforum; Düsseldorf; ISBN 978-3-9812881-0-0; 1. Automobiltechnisches Kolloquium; München; 16.-17.4.2009

Rücker A., Schleich M., Schubert N.: Einfluss der BMW Auto Start Stop Funktion auf CO₂- und Schadstoffemissionen in: 4. Emission Control; Dresden; 29.-30.5.2008

Sauer C.: Präzise Bestimmung des Drehmoments am Motor im Fahrzeug (Diplomarbeit, Fachhochschule Joaneum Graz; 2009)

Sauer D. U.: Lithium-Ionen Batterien in: **Sirch O. und 46 Mitautoren:** Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen (expert; Renningen; ISBN 978-3-8169-2817-1; 2009)

Schell I., Pentzel C., Tohauser J.: Einhaltung der Emissionsvorschriften bei weltweiter Ausrollung der Auto-Start-Stopp-Funktion in: Verein Deutscher Ingenieure-Berichte, Nr. 2105; ISBN 978-3-18-092105-1; 7.VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe (Die Vielfalt der Mobilität: Vom Verbrenner bis zum E-Motor); Dresden; 10.-11.11.2010

Schindler W., Haisch C., Beck H. A., Niessner R., Jacob E., Rothe D.: A Photoacoustic Sensor System for Time Resolved Quantification of Diesel Soot Emissions (Society of Automotive Engineers 2004-01-0968) (SAE International; 2003)

Schöttle M.: Technik-Portrait Toyota Prius III in: SpringerAutomotive Media, GWV-Fachverlag; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 11/2009

Schüßler M., Allmer I., Hollauf B., Kordon M., Kozlik C., Seewald G., Hülser H.: Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene in: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen; Aachen; ISBN 978-3-940374-01-1; 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik; 7.-8.10.2008

Schweiger H.: Untersuchung des Einflusses von Kohlenwasserstoffen auf den NO_x-Umsatz bei Selektiver Katalytischer Reduktion (Diplomarbeit, TU Graz; 2009)

Seiffert R.: Das Genie und sein Auftrag für eine Technik, die sich nicht durchsetzte in: Frankfurter Allgemeine Zeitung; ISSN 0174-4909; 30.5.2000

Steimel A.: Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung (Oldenburg Industrieverlag; München; ISBN 978-3-8356-3090-1; 2. Auflage 2006)

Stiegeler M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge (Dissertation, Universität Ulm; 2008)

TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik:
Thermodynamik Studienblätter (Graz; 1999)

TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik: Skriptum zur Vorlesung Fahrzeug- und Motorenmesstechnik (Graz; 2003)

United Nations: Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train ... (www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf, S. 3ff, Zugriff: 3.2.2012)

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Strommix in der EU27 (www.etz.de/files/vdma+ps_strommix_ausblick_final.pdf, Zugriff: 5.2.2012)

Vögl R., Bogner E., Ebner T., Dein Dias Terra T., Vitale G.: Innovative Anwendung des Rollenprüfstands für die Fahrbarkeitsabstimmung in: SpringerAutomotive Media, GWV-Fachverlag; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 11/2009

Wagner W.: Wärmeübertragung (Vogel; Würzburg; ISBN 3-8023-0153-6; 3. Auflage 1991)

Wiebelt A., Isermeyer T., Siebrecht T., Heckenberger T.: Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien in: SpringerAutomotive Media, GWV-Fachverlag; Wiesbaden; ISSN 0001-2785; Automobiltechnische Zeitschrift; 07-08/2009

Williams D. R.: Earth Fact Sheet (nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html, Zugriff: 8.2.2011)

Wimmer A., Eichlseder H.: Wirkungsgrad und Leistung von Großgasmotoren in: coJen (GE Jenbacher Gasmotoren); 11/2008

Ziegler A., Habersbrunner G.: Hybridkonzept mit Minimaldiesel (Abschlussbericht zum FVV Vorhaben Nr. 937) (TU München; 2009)

Onlinequellen

www.autorevue.at/best_of_test/fahrberichte/das-andersauto.html (Zugriff: 7.2.2012)

www.graz.at/cms/beitrag/10142527/2766737 (Zugriff: 7.2.2012)

www.graz.at/cms/beitrag/10175531/4110508 (Zugriff: 7.2.2012)

www.hcv-project.eu/sp6000.shtml (Zugriff: 14.2.2012)

www.mathworks.com/help/techdoc/ref/fft.html (Zugriff: 11.29.2010)

www.mathworks.com/help/toolbox/signal/butter.html (Zugriff: 29.11.2010)

www.mathworks.com/help/toolbox/signal/filtfilt.html (Zugriff: 29.11.2010)

www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9622-mdf-import-tool-and-function (Zugriff: 1.3.2001; veröffentlicht von: McGarrity S.)

www.spiegel.de/fotostrecke/fotostrecke-65368-2.html (Zugriff: 6.2.2012)

ANHANG A (Andere Einsatzgebiete für ähnliche Antriebe)

Dieser Abschnitt liefert in Ergänzung zu Kapitel 1 Informationen über Einsatzgebiete von Antrieben, die Pkw-Hybridantrieben ähnlich sind. Dabei liegt der Fokus auf der Analyse möglicher Synergien bei der Entwicklung.

Hybridantrieben vergleichbare Konzepte sind schon seit der Zeit nach dem ersten Weltkrieg in Schienenfahrzeugen im Einsatz. Die Kombination von Dieselmotor und elektrischen Generator und Fahrmotoren bezeichnet man als dieselektrischen Antrieb. Im Unterschied zu Hybridantrieben entsprechend der Definition nach Kapitel 1.1 fehlt diesen jedoch ein EES. Ansonsten entspricht die Anordnung dem SH-Konzept. Ausschlaggebend für die Auswahl gegenüber dem direkten mechanischen Antrieb sind zwei Gründe: einerseits die Probleme des direkten mechanischen Antriebs beim Anfahren, weil die VKM aus dem Stillstand heraus kein Drehmoment abgeben kann. Andererseits treten die verbrauchsgünstigen Betriebspunkte für verschiedene Leistungen bei unterschiedlichen Drehzahlen auf. Bei KFZ vorrangig werden Kupplungen und Stufengetriebe eingesetzt, um diese Probleme zu umgehen, die allerdings aufgrund der hohen Leistungen in Schienenfahrzeugen nur bedingt geeignet sind.¹⁷²



Abbildung 124 – Dieselektrische Universallokomotive¹⁷³

Gegenüber Straßenfahrzeugen werden Schienenfahrzeuge außer im Nahverkehr im Verhältnis zur Fahrzeit und Fahrstrecke häufig bei konstanter Geschwindigkeit betrieben. Daher könnte verhältnismäßig wenig Energie rekuperiert werden, was den Einsatz eines EES unwirtschaftlich macht. Im schienengebundenen städtischen Nahverkehr setzen die Bahnverwaltungen wiederum vorwiegend elektrische Triebfahrzeuge ein, die ihre Energie aus der Fahrleitung beziehen und auch ohne EES in dieses System rückspeisen können.

Dieselektrisch angetriebene Triebfahrzeuge sind die bevorzugte Alternative für Nebenbahnen (Abbildung 124 zeigt ein ausgeführtes Modell). Synergien für die KFZ-Entwicklung sind hier bspw. bei Betriebsstrategien für SH-Fahrzeuge und bei Regelungssystemen möglich. Nicht denkbar ist das hingegen aufgrund der großen Leistungsunterschiede bei den Antriebsmaschinen. Diese Lokomotiven erreichen Spitzenleistungen von 2000 kW.¹⁷⁴

Reduktionen von Bauraum und Gewicht der elektrischen Komponenten, die auch den Einsatz in Hybridstraßenfahrzeugen erst möglich machen, führen auch in anderen Fahrzeugen zu Entwicklungen, die kombinierte Diesel-elektrische Antriebe verwenden.

¹⁷² Steimel A.: Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung, 2. Auflage 2006, S. 165ff

¹⁷³ MRCE Dispolok GmbH: Siemens ER20, S. 2

¹⁷⁴ siehe bspw. MRCE Dispolok GmbH: Siemens ER20, S. 2

Angeführt werden kann exemplarisch die Hybridisierung eines Pistengeräts als Verbrauchssenkungsmaßnahme. In diesem speziellen Einsatzfall ersetzt der elektrische Antrieb einen hydrostatischen. Die hier eingesetzten Motoren mit Leistungen von 295 kW entsprechen größenordnungsmäßig schon eher den Pkw-Anforderungen. Eine Integration diverser Nebenantriebe ist möglich (Abbildung 125).¹⁷⁵

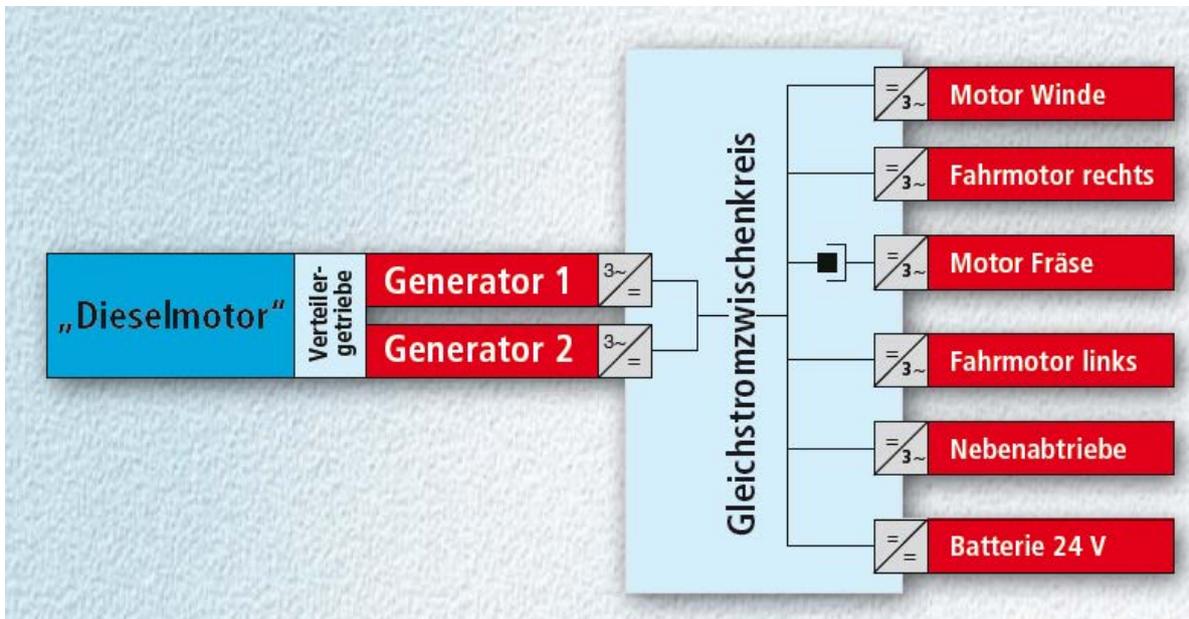


Abbildung 125 – Dieselelektrisches Antriebsstrangmodell für ein Pistengerät¹⁷⁶

Ähnliches gilt für Hybridanwendungen im schweren Nutzfahrzeugsbereich. Speziell für den innerstädtischen Verteilerverkehr und Linienbusbetrieb mit häufigen Stopps an Haltestellen werden Lkw bzw. Busse mit Hybridantrieb entwickelt. Seit 2010 wird ein solcher Bus (Volvo V7700, Abbildung 126) in Graz auf seine Alltagstauglichkeit getestet.¹⁷⁷



Abbildung 126 – Hybridbus im Testbetrieb der Holding Graz Linien¹⁷⁸

Allgemein nicht den Hybridantrieben zugeordnet werden verschiedene Antriebssysteme mit Zweittrieb als Ausfall-System, obwohl diese grundsätzlich ähnlich aufgebaut sind. Im Unterschied zu den klassischen Hybridantrieben werden diese Zweit-Antriebe aber nur im Anlassfall genutzt, sind sonst mechanisch vom Hauptantrieb abgekoppelt und haben meistens eine geringere Leistungsfähigkeit. Da hier nie beide Antriebe gleichzeitig arbeiten, können sie getrennt voneinander ausgelegt werden und brauchen auch keine Betriebsstrategie.

¹⁷⁵ Kuhn M.: Kässbohrer testet dieselelektrische Antriebe für PistenBully, S. 5

¹⁷⁶ Kässbohrer Geländefahrzeug AG: K info (4/2009), S. 5

¹⁷⁷ www.graz.at/cms/beitrag/10142527/2766737 (Zugriff: 7.2.2012)

¹⁷⁸ www.graz.at/cms/beitrag/10175531/4110508 (Zugriff: 7.2.2012)

ANHANG B (Drehmomentmesswelle)¹⁷⁹

Dieser Teil des Anhangs beschreibt Probleme mit dem im Rahmen dieser Arbeit getestete System zur Messung des Drehmoments im Fahrzeug (siehe Kapitel 3.2.1).

Vom Hersteller des Messsystems wird der Messbereich mit ± 2000 Nm und die Genauigkeit mit 0.1% des Messbereichs im Kalibrierbereich von ± 500 Nm angegeben. Das entspricht somit einer absoluten Genauigkeit von ± 2 Nm, die den Ansprüchen an ein Messsystem im Fahrzeugeinsatz jedenfalls genügt. Dieser Wert ist jedoch statisch, ohne Drehzahleinfluss und Walkbewegung ermittelt worden. Auch ist die Flexplate statisch nur bis 500 Nm belastet worden, obwohl das Nennmoment 2000 Nm beträgt. Laut Herstellerinformationen kann allerdings von einem Fehler ausgegangen werden, der kleiner als ± 20 Nm ist.

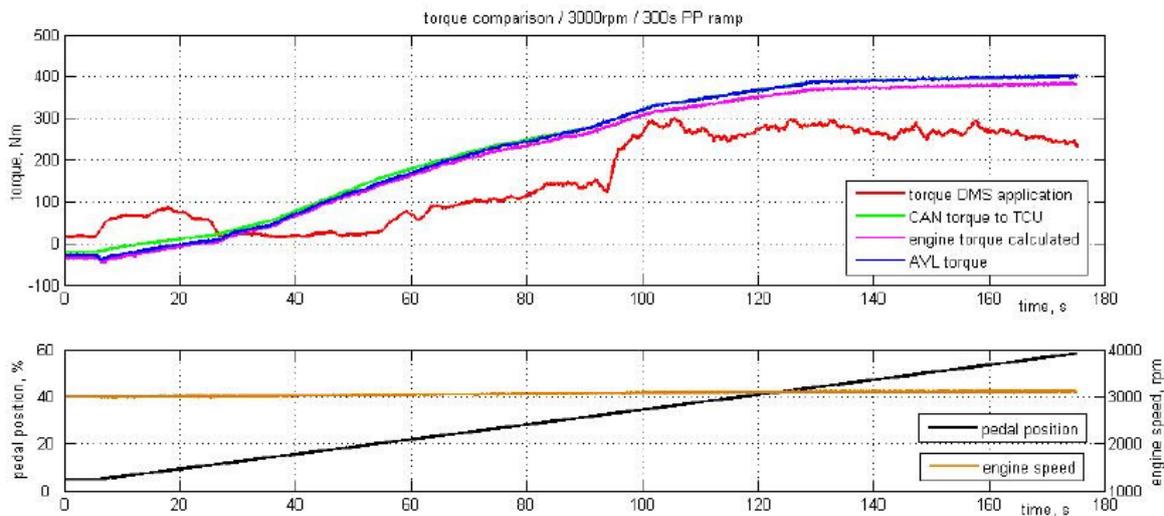


Abbildung 127 – Ergebnisse GIF-Messsystem im Auslieferungszustand

Abbildung 127 zeigt jedoch, dass weder die erwarteten Genauigkeiten, noch eine qualitativ zufriedenstellende Übereinstimmung mit anderen Drehmomentsignalen erzielt werden kann. Die hier eingezeichneten anderen Daten sind einerseits aus den Signalen der ECU, andererseits aus dem Indiziersystem errechnet. Auch wenn diese Daten keine exakte Drehmomentmessung darstellen, kann aus der qualitativen Übereinstimmung untereinander und der klaren Abweichung des Signals der Dehnmessstreifen (DMS) auf die Fehlfunktion des Systems geschlossen werden.

Dieses ist anschließend hinsichtlich Axialkraft- und Biegeverhalten überarbeitet worden.

Die Ergebnisse der anschließenden Anwendung werden hier anhand einer Zyklusvermessung (NEFZ) dargestellt. Aufgrund der hohen Dynamik des Messsignals muss eine Filterung vorgenommen werden, um ein über das Arbeitsspiel gemittelt Drehmomentsignal zu erhalten. Das Messsystem liefert 2000 Werte pro Sekunde. Hier ist eine Mittelung über jeweils zwei Werte eingestellt, wodurch eine Anpassung an die maximale Übertragungsrate über das Controller Area Network (CAN) von 1000 Werten je Sekunde erreicht wird. Die Frequenz der Verbrennungen (5 Events je 2 Umdrehungen) liegt (bei Drehzahlen unter 4800/min) unterhalb von 200 Hz, womit das Abtasttheorem von Nyquist im Sinne von sinnvollen Ergebnissen klar übererfüllt ist.¹⁸⁰

¹⁷⁹ Dieses System ist von Christian Sauer organisiert und in Betrieb genommen worden. Die Informationen in diesem Kapitel sind teilweise übernommen aus Sauer C.: Präzise Bestimmung des Drehmoments am Motor im Fahrzeug, 2009. Diese Arbeit enthält auch weiterführende Informationen.

¹⁸⁰ vgl. TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik: Skriptum zur Vorlesung Fahrzeug- und Motorenmesstechnik, 2003, S. 196

Für das gemittelte Drehmomentsignal wird eine Butterworth-Filterung¹⁸¹ mit sieben Polstellen angewandt. Um Phasenfehler zu vermeiden, kommt ein Verfahren zur Anwendung, dass die Filterung in Vorwärts- und Rückwärtsrechnung durchführt.¹⁸² Die Grenzfrequenz beträgt 10 Hz. Das Drehmomentsignal kann also auch bei Drehzahlen von 600/min pro Umdrehung eine Änderung erfahren.

Die Fast Fourier Transformation-Analyse (FFT-Analyse)¹⁸³ aus dem Bereich nach einem Start (Leerlauf mit Drehzahl bei ca. 700/min) zeigt, dass alle ermittelten Frequenzen, die entscheidend zum Ergebnis beitragen, näherungsweise Vielfache der Verbrennungsfrequenz sind.

Die Signalerfassung ist also in der Lage das Messsignal ausreichend schnell zu erfassen. Eine Online-Auswertung ist aber aufgrund der hohen Signalfrequenz nicht möglich.

Um einen möglichen Temperaturdrift des Messsystems zu kompensieren, wird die Messung schon vor dem Motorstart begonnen und nach Motorstopp weiter fortgesetzt. So erhält man zwei Phasen, für die kein Drehmoment anliegen kann und kann eine Driftkompensation vornehmen.

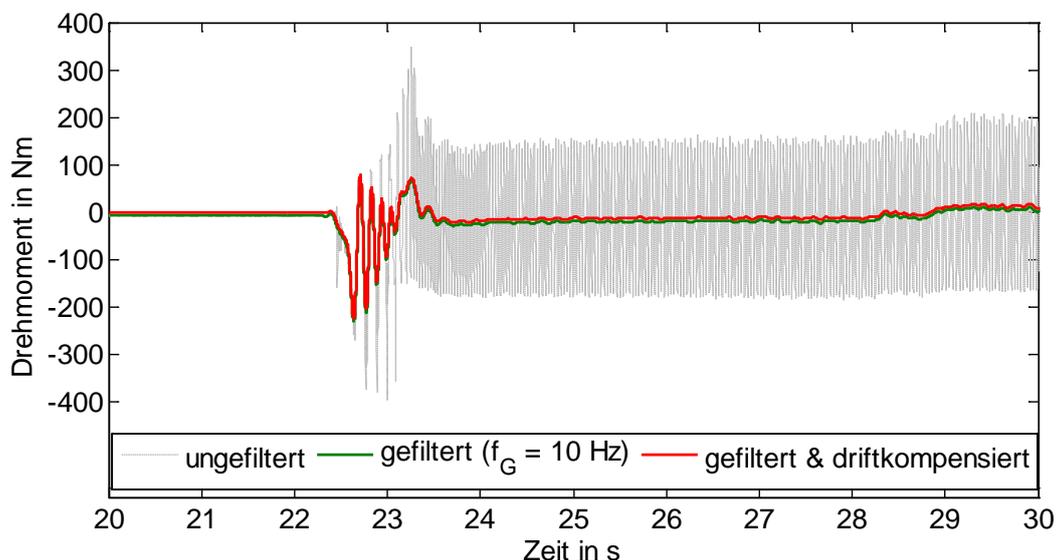


Abbildung 128 – Negatives DMS-Drehmomentsignal im Leerlauf nach Motorstart

Schon nach dem Start des Motors fällt auf, dass während der ersten Leerlaufphase ein negatives Drehmoment ermittelt wird (Abbildung 128). Unter Beachtung der Genauigkeitserwartung von zumindest ± 20 Nm kann noch nicht von einem darüber hinausgehenden Messfehler ausgegangen werden.

Eindeutige Hinweise auf ein Fehlverhalten liefert jedoch die Betrachtung der Konstantfahrt mit ca. 70 km/h. Wieder zeigt die FFT-Analyse, dass das Übertragungsverhalten in Ordnung ist: Unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände ergibt sich für die 70 km/h-Konstantfahrt unter Vernachlässigung der Verluste im Antriebsstrang ein Leistungsbedarf von 7,25 kW. Das entspricht bei einer Drehzahl von 1329/min einem Drehmoment von 52 Nm. Das gefilterte Signal des Systems ergibt aber nur ca. 16 Nm (Abbildung 129). Die Differenz von somit mindestens 32 Nm erfüllt die erwartete Genauigkeit keinesfalls.

¹⁸¹ www.mathworks.com/help/toolbox/signal/butter.html (Zugriff: 29.11.2010)

¹⁸² siehe www.mathworks.com/help/toolbox/signal/filtfilt.html (Zugriff: 29.11.2010)

¹⁸³ Informationen zum Verfahren unter www.mathworks.com/help/techdoc/ref/fft.html (Zugriff: 11.29.2010)

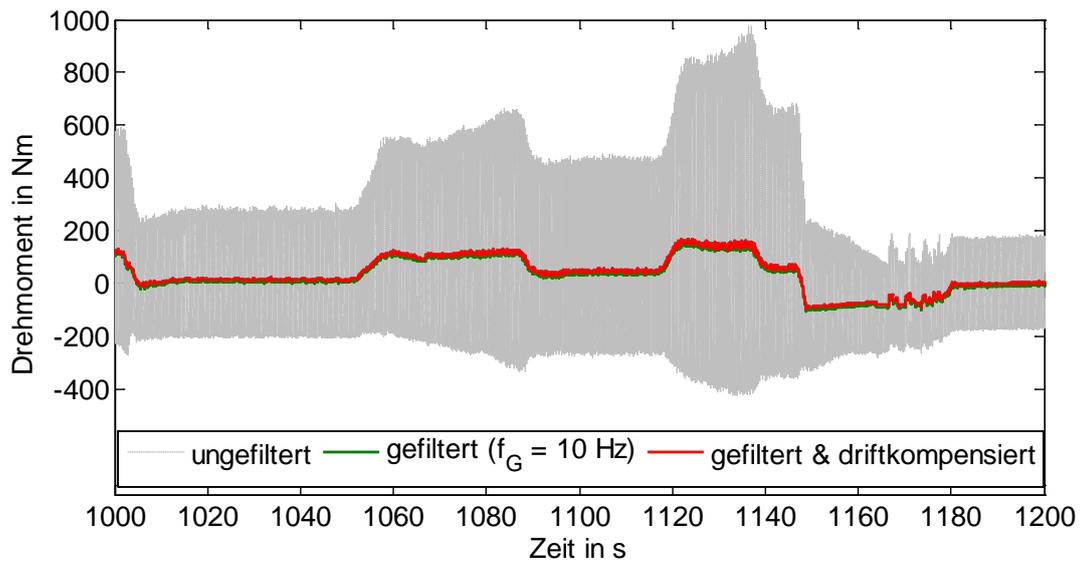


Abbildung 129 – DMS-Drehmomentsignal (mit 70 km/h-Konstantfahrt um $t=1025$ s)

Auch der indizierte Mitteldruck von ca. 390 kPa lässt in Verbindung mit den Ergebnissen der stationären Kennfeldvermessung auf ein deutlich höheres Drehmoment schließen. Der Hersteller schlägt eine Drehzahlkompensation vor, die im Leerlauf durch Variation der Drehzahl ermittelt werden soll. Da in diesem Fall die VKM jedoch gegen den Wandler arbeitet, kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Drehmoment konstant und bekannt ist.

ANHANG C (Glättungsmethode für die Geschwindigkeit)

In diesem Abschnitt wird eine Methode beschrieben, die bei Verwendung von gemessenen Geschwindigkeitssignalen eingesetzt wird, um bei der Längsdynamikberechnung realistischere Drehmomentverläufe zu erhalten.

Ziel der hier beschriebenen Glättungsmethode ist es Sprünge in errechneten Drehmomentverläufen aufgrund von diskreten Sprüngen in gemessenen Geschwindigkeitsverläufen zu vermeiden, ohne jedoch die qualitativen Verläufe der Geschwindigkeit wesentlich zu verändern. Vor allem im Bereich der Gangwechsel darf das Profil nicht zu stark verschliffen werden, um bspw. unrealistische Zunahmen der Sollgeschwindigkeit während des eigentlichen Schaltvorgangs zu verhindern. Diskrete Sprünge entstehen bspw. durch Digitalisierung der Daten oder Erfassung mit beschränkter Auflösung.

Daher wird eine selektive Glättung angewandt, bei der der Grad der Glättung in Abhängigkeit der Dynamik des Geschwindigkeitsverlaufs variiert wird. Diese Variation wird folgendermaßen bewerkstelligt: Zuerst werden zwei Glättungsvarianten unabhängig voneinander berechnet und anschließend wird in Abhängigkeit von der Differenz der beiden unterschiedlich geglätteten Werte ein Gewichtungsfaktor gebildet. Über diesen Gewichtungsfaktor wird für jeden Zeitschritt individuell eine Glättungsvariante gewählt, die zwischen den beiden Grenzdefinitionen liegt und analog berechnet wird. Um Unstetigkeit zu vermeiden, wird auch dieser Gewichtungsfaktor einer Glättung unterworfen.

Im Detail liegt der Glättung folgender Algorithmus zugrunde: Als erstes wird für jeden Zeitschritt die momentane Beschleunigung, wie sie sich auf Basis der Messdaten ergibt, berechnet. Dabei erfolgt eine Mittelwertbildung aus dem vergangenen und dem zukünftigen Zeitschritt (Formel 32).

$$a_i = \frac{\frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t} + \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t}}{2} = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 \times \Delta t}$$

Formel 32 – Beschleunigung (aus Messdaten)

Diese Beschleunigungswerte werden dann durch Mittelung über zwei definierte Anzahlen von Zeitschritten geglättet und zu den jeweiligen Geschwindigkeitswerten numerisch aufintegriert (Formel 33 bzw. Formel 34). Solange am Beginn eines Zyklus die vorhergehenden Zeitschritte nicht existieren, kann der Wert des ersten Zeitschrittes verwendet werden.

$${}^{gg}v_i = {}^{gg}v_{i-1} + \Delta t \times \frac{\sum_{j=-\beta}^{\beta} a_{i+j}}{2 \times \beta + 1}$$

Formel 33 – Geschwindigkeit (gering geglättet)

$${}^{sg}v_i = {}^{sg}v_{i-1} + \Delta t \times \frac{\sum_{j=-\gamma}^{\gamma} a_{i+j}}{2 \times \gamma + 1}$$

Formel 34 – Geschwindigkeit (stark geglättet)

$$b_i = \begin{cases} 1 & \forall^{gg}v_i = {}^{sg}v_i \\ \text{undefiniert} & \forall^{gg}v_i \neq {}^{sg}v_i \wedge \left\{ \frac{\Delta v}{|{}^{gg}v_i - {}^{sg}v_i|} \geq 1 \vee \exists j [|j| < \mu \wedge \text{sign}({}^{gg}v_{i-j}) \neq \text{sign}({}^{sg}v_{i-j})] \right\} \\ \frac{\Delta v}{|{}^{gg}v_i - {}^{sg}v_i|} & \forall^{gg}v_i \neq {}^{sg}v_i \wedge \frac{\Delta v}{|{}^{gg}v_i - {}^{sg}v_i|} < 1 \wedge \nexists j [|j| < \mu \wedge \text{sign}({}^{gg}v_{i-j}) \neq \text{sign}({}^{sg}v_{i-j})] \end{cases}$$

Formel 35 – Gewichtungsfaktor (Rohwert)

Der Gewichtungsfaktor für die Anteile wird nach Formel 35 gebildet und anschließend für die undefinierten Abschnitte linear interpoliert. Ziel dieser Maßnahmen ist, dass alle Geschwindigkeitssprünge, die auf Digitalisierungs- bzw. Auflösungsprobleme zurückgehen, verschliffen werden, die qualitativen Verläufe während der Schaltphasen aber möglichst unverändert erhalten bleiben.

$${}^g b_i = \max\left(0, \frac{\sum_{j=-\delta}^{\delta} b_{i+j}}{2 \times \delta + 1} - \Delta b\right)$$

Formel 36 – Gewichtungsfaktor (geglättet)

Die Glättung und Umrechnung des Gewichtungsfaktors nach Formel 36 verhindert, dass es durch den indirekt proportionalen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und Faktor am Übergang zur stark geglätteten Variante (Faktor rasch gegen 1) zu einem Knick im Geschwindigkeitsverlauf kommt und dass beim Verlassen der stark geglätteten Variante (Faktor wird ausgehend von 0 rasch größer) ein Vorzeichenwechsel im Beschleunigungsverlauf auftritt, der nur aufgrund dieses Übergangs entsteht.

$$g_i = [{}^g b_i \times \beta + (1 - {}^g b_i) \times \gamma]$$

Formel 37 – Individueller Glättungsfaktor¹⁸⁴

Das endgültige Geschwindigkeitssignal wird schließlich aus den individuellen zusammengesetzt (Formel 37).

Je nach Auflösung des Geschwindigkeitssignals werden dann die Werte der Parameter Δb , β , γ , δ , Δv und μ bestimmt.¹⁸⁵

Einen Vergleich der Profile, die sich durch Anwendung von Formel 33 und Formel 34 ergeben, mit den Rohdaten und dem endgültigen Geschwindigkeitssignal zeigt Abbildung 130. Deutlich zu erkennen ist, dass die starke Glättung im eher dynamischen linken Diagramm zu extrem wäre und dementsprechend auch weniger Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Im rechten Diagramm sieht man, dass ab ca. $t=907$ s die starke Glättungsvariante notwendig ist und deshalb davor auch ein sanfter Übergang auf diese erfolgt.

¹⁸⁴ Dieser Wert wird analog zum Faktor c in Formel 34 verwendet. Der Operator $[z]$ beschreibt, dass z auf die nächste ganze Zahl gerundet wird.

¹⁸⁵ bei einer Auflösung von 1 km/h und 0.1 s bspw. $\Delta b = 0.45$, $\beta = 1$, $\gamma = 19$, $\delta = 39$, $\Delta v = 0.05$ km/h, $\mu = 19$; bei 0.01 km/h und 0.1 s wie beim im Rahmen dieser Arbeit bei den Versuchen mit AUT-REF als Referenz verwendeten ECU-Signal genügt hingegen $\Delta b = 0.15$, $\beta = 1$, $\gamma = 4$, $\delta = 2$, $\Delta v = 0.05$ km/h, $\mu = 2$

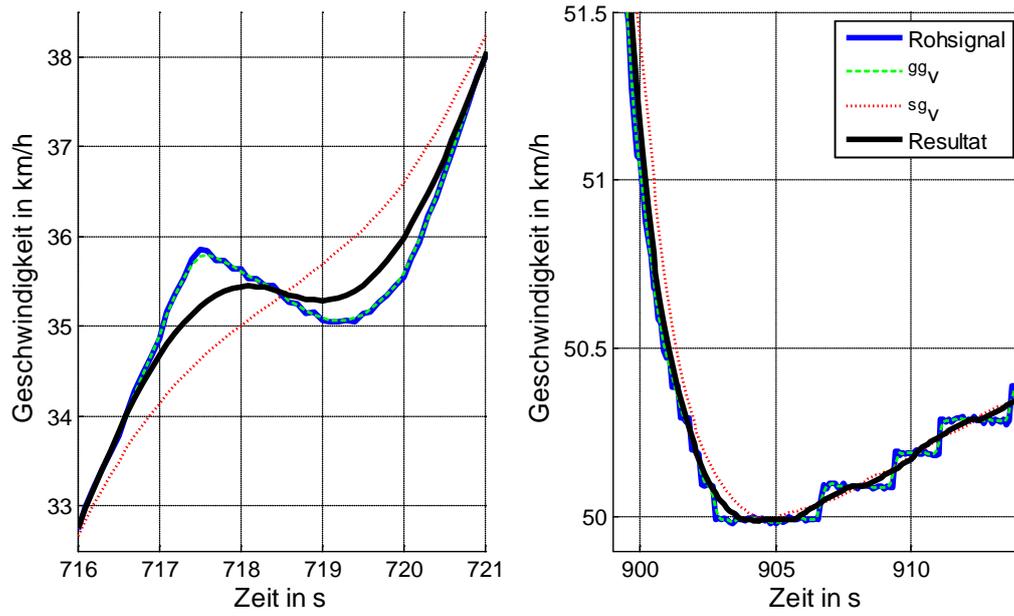


Abbildung 130 – Selektive Glättung

ANHANG D (Information zum Programmcode)

Der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Programmcode und die Zuordnung der Darin verwendeten Variablen zu den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen sind auf Anfrage zugänglich.¹⁸⁶ Die Anführung des gesamten Codes ist im Rahmen dieser Arbeit wäre nicht sinnvoll möglich. Der Programmcode ist in englischer Sprache verfasst, um ihn einem weiteren Benutzerkreis zu erschließen.

Als Programm wird Matlab verwendet. Der Code ist in Version 2012a lauffähig. Teilweise sind die gespeicherten Ergebnisse nicht mit der endgültigen Version des Codes bzw. auch in früheren Programmversionen erstellt worden. Bis auf vereinheitlichte Rundungsmethoden und veränderte Reihenfolgen bei manchen Befehlen gibt es jedoch keine relevanten Unterschiede, sodass alle Ergebnisse trotz möglicher kleinerer Abweichungen als grundsätzlich gleichwertig gültig anzusehen sind.

¹⁸⁶ Meine Kontaktdaten können am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz angefordert werden.

ANHANG E (Detaillierter Vergleich der Kriteriumsermittlung für verschiedene Vortriebsanforderungen)

In diesem Teil des Anhangs wird für unterschiedliche Anforderungen die Ermittlung der Kriterien für alle selektierbaren Modi demonstriert. Die Theorie zur Bewertung ist in Kapitel 7.2.2 beschrieben. Hier werden die erhaltenen Werte verglichen und mögliche Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse für Fahrzyklen erörtert. Alle Unterkapitel enthalten am Beginn eine grafische Darstellung. Darin ist jeweils das Kriterium des ersten selektierbaren VKM-Betriebs angegeben.

Drehzahl: 1250/min, Drehmoment: 65 Nm (Referenzanforderung)

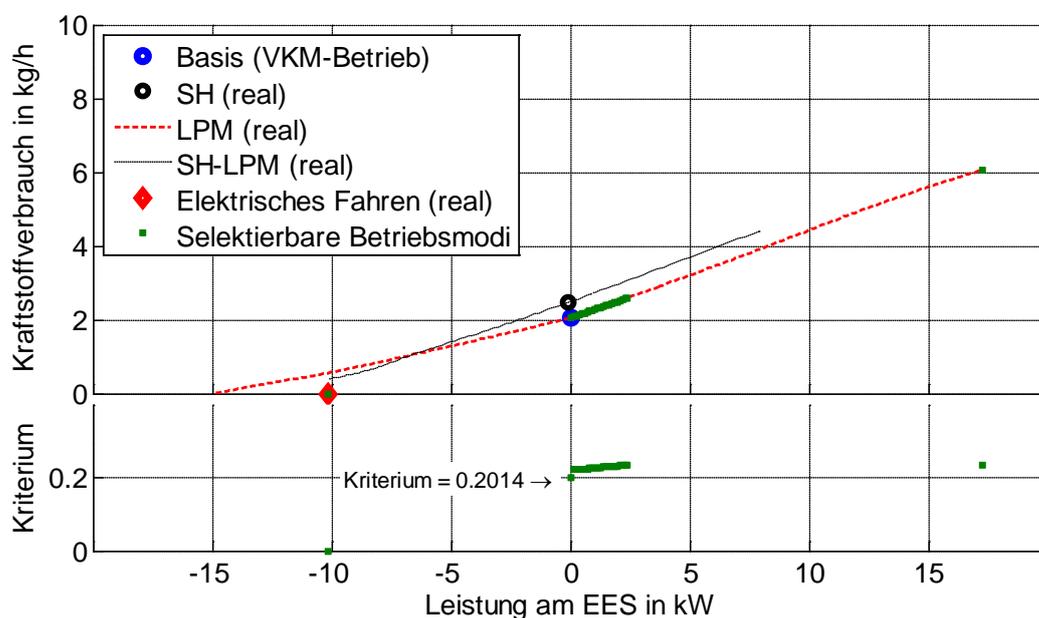


Abbildung 131 – Referenzanforderung aus Kapitel 7.2.2 ($n = 1250/min, \sum md = 65Nm$, Ergebnis mit SH)

Die Basis für alle Vergleiche bildet die Referenzanforderung aus Kapitel 7.2.2. Der erste bei dieser für den NEFZ typischen Anforderung selektierbare Modus mit aktiver VKM ist VKM-Betrieb ohne Leistungsfluss am EES. Das zugeordnete Kriterium beträgt 0.2014.

Drehzahl: 1200/min, Drehmoment: 50 Nm

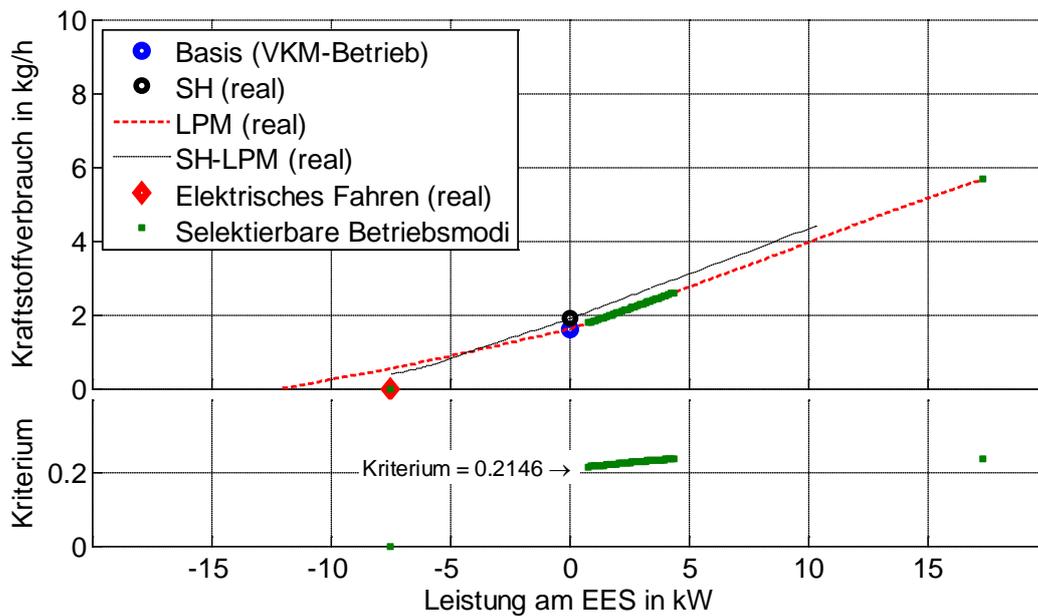


Abbildung 132 – Niedriglastanforderung ($n = 1200/\text{min}$, $\Sigma md = 50\text{Nm}$, Ergebnis mit SH)

Diese Anforderung ist eine typische aus dem Niedriglastbereich des NEFZ. Es zeigt sich, dass hier der Basisbetrieb nicht mehr selektierbar ist, sondern stattdessen eine Lastanhebung die beste Alternative zum elektrischen Fahren ist.

Der Wert für das Kriterium für diesen besten VKM-Betrieb ist aber deutlich höher als im mittleren Drehzahl- und Lastbereich (siehe Referenzanforderung).

Drehzahl: 2000/min, Drehmoment: 125 Nm

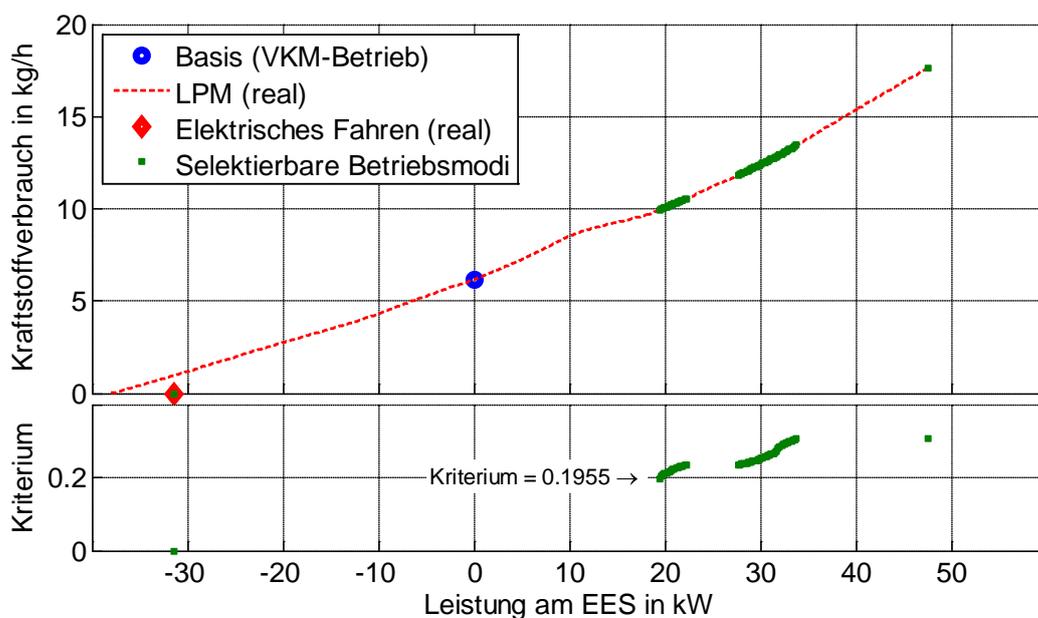


Abbildung 133 – Anforderung aus dem höheren Drehzahlbereich ($n = 2000/\text{min}$, $\Sigma md = 125\text{Nm}$, VKM1BAS, DCT1-SIM)

Zur Demonstration, dass Lastanhebungen auch mit niedrigen Kriterien bewertet werden können, wird ein Beispiel mit anderen Vorgaben (entsprechend Kapitel 10.2.1) verwendet.

Diese Anforderung ist dabei typisch für den höheren Drehzahlbereich des NEFZ. Es zeigt sich, dass hier der Basisbetrieb nicht mehr selektierbar ist. Das ist hier aber auch einem Wirkungsgradvorteil bei höheren Lasten zuzurechnen, der aufgrund der nicht aktivierten AGR auftritt.

Der Wert für das Kriterium für diesen besten VKM-Betrieb ist dabei ähnlich wie beim Basisbetrieb bei Anforderungen, bei denen dieser der beste VKM-Betrieb ist.

Drehzahl: 1400/min, Drehmoment: 310 Nm

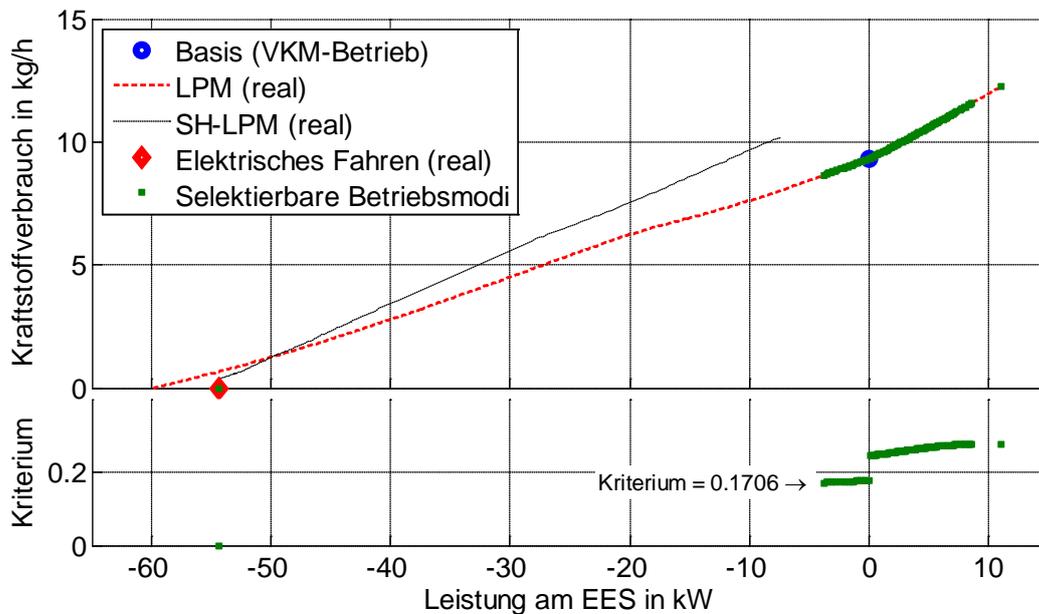


Abbildung 134 – Anforderung in der Nähe der Volllast ($n = 1400/min$, $\sum md = 310Nm$, Ergebnis mit SH, 50 kW-EM)

Diese Anforderung ist für die Darstellung gewählt, um zu demonstrieren, dass bei Betrieb nahe der Volllast eine Lastabsenkung der günstigste VKM-Betriebsmodus wäre. Solche Betriebspunkte kommen im NEFZ zwar nicht vor, die Darstellung ist aber für das grundlegende Verständnis wichtig. Dazu ist auch die maximale EM-Leistung auf 50 kW angehoben worden. Trotzdem ist SH-Betrieb ohne Leistungsfluss aus dem EES aufgrund der zu geringen Generatorleistung nicht möglich.

Der Wert für das Kriterium für diesen besten VKM-Betrieb ist hier deutlich geringer als im mittleren Drehzahl- und Lastbereich (Referenzbetriebspunkt). Sollte es in einem Zyklus zu Anforderungen in den beiden hier relevanten Kennfeldbereichen kommen, kann deshalb erwartet werden, dass beim höherlastigen Punkt der Basisbetrieb aktiviert würde, bevor die VKM auch im mittleren Drehzahl- und Lastbereich eingesetzt würde.

Drehzahl: 1000/min, Drehmoment: -28 Nm

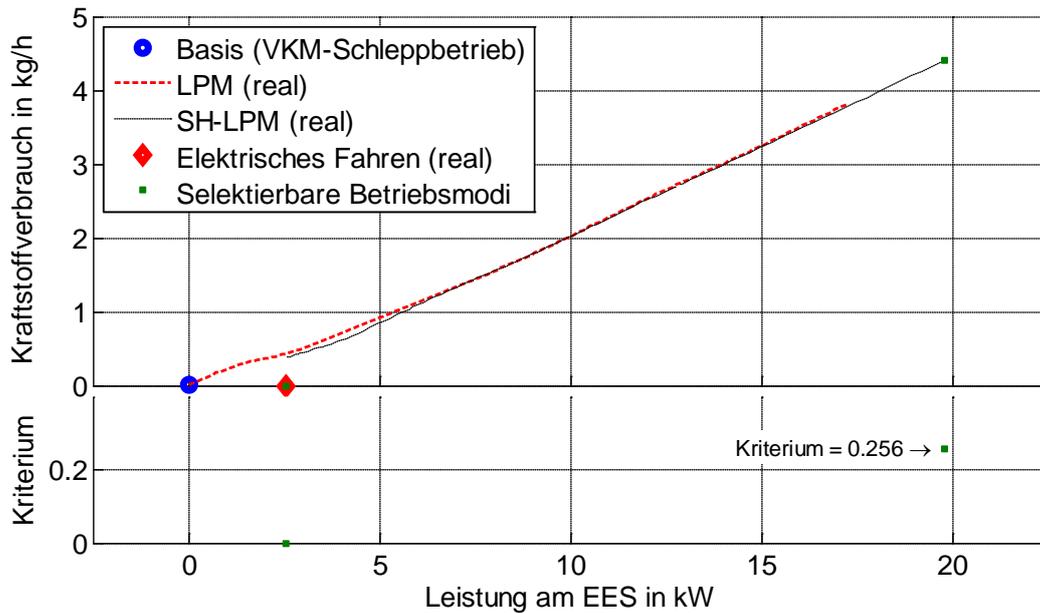


Abbildung 135 – Anforderung auf der Schlepplinie ($n = 1000/\text{min}$, $\Sigma md = -28\text{Nm}$, Ergebnis mit SH)

Hier handelt es sich um eine Anforderung entsprechend der Schlepplinie. Das elektrische Fahren entspricht hier einer Rekuperation (positive Leistung in Abbildung 135). Auch hier können durch Auskuppeln der VKM die Schleppverluste vermieden werden. Nur dadurch wird Rekuperation überhaupt möglich, wenn der Basisbetrieb auf der Schleppkurve liegt.

Durch die entfallenden Umwandlungsverluste hat hier der SH-Betrieb keinen Nachteil und würde als erster VKM-Betriebsmodus in Frage kommen. Dabei würden dann beide EM generatorisch arbeiten.

Der Wert für das Kriterium für diesen besten VKM-Betrieb ist aber extrem hoch und im NEFZ kommt hier daher ausschließlich elektrisches Fahren (im Sinne von Rekuperation) vor.

Hiermit ist gezeigt, dass sich die Rekuperation somit ohne Zusatzaufwand durch dieselbe Methodik abdecken lässt.

Für Vortriebsanforderung unterhalb der Schleppkurve kommt es im Normalbetrieb zum Bremsengriff der mechanischen Bremsen. Daher ist die rekuperierbare Leistung höher. Sogar bei mitlaufender VKM könnte hier noch rekuperiert werden. Basis-VKM-Betrieb im Sinne der Leistungsfreiheit am EES kann nur, wie beim Basisfahrzeug durch einen mechanischen Bremsengriff erreicht werden, der aber im Sinne der Ermittlung des Grenzpotenzials vermieden wird, solange die generatorische EM-Leistung ausreicht.

Bezüglich der Aussagen zum SH-Betrieb gilt dasselbe wie beim Schleppbetrieb. Es handelt sich ja nur um eine Leistungsverschiebung durch die erhöhte Rekuperationsleistung.

ANHANG F (Regelstrategie- und 'Engine in the loop'-Parameter)

Hier sind die für diese Arbeit ermittelten Einstellungen für die Betriebsstrategie und die Umsetzung der Ergebnisse von Potenzialermittlung und realen Betriebsstrategien zusammenfassend angeführt.

Alle Parameter in diesem Abschnitt sind empirisch auf die eingesetzte VKM und den verwendeten Motorprüfstand abgestimmt, können aber als Richtwerte für zukünftige ähnliche Aufgaben verwendet werden. Für die Betriebsstrategie hängen sie auch vom Fahrzeug und den Fahrzyklen ab. Exemplarisch dargestellt sind auch die erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich des Start- und Stoppverhalten der VKM.

Tabelle 30 – Parameter für reale Betriebsstrategie (AUT-REF, VKM2BAS)

Parameter	Wert / Vorschrift	Einheit
t_{VKM}^{min}	8	s
t_{Start}^1	1	s
t_{Start}^2	1	s
t_{Start}^3	1	s
t_{EM}^{min}	6	s
t_{EM}^{min2}	9	s
$n_{Schwelle}^{Stopp}$	2010	1/min
t_{Stopp}^1	0.5	s
Q_{Res}	$100 \cdot \left(1 + \left\lfloor \frac{P_{EM} - 25kW}{10kW} \right\rfloor\right)$ mit $[P_{EM}] = kW^{187}$	kJ
Q_{Res2}	180	kJ
$v_{Schwelle2}$	91	km/h
$a_{Schwelle2}$	0.2	m/s ²
Q_{Res2b}	140	kJ
ZA_u	0.41±0.05	-
Q_u	225	kJ

Für die Untersuchungen mit Betriebsstrategien entsprechend Kapitel 10.3.11 sind für die Parameter aus Kapitel 8 die Werte aus Tabelle 30 eingesetzt.

¹⁸⁷ Der Operator $\lfloor z \rfloor$ beschreibt, dass z auf die nächste ganze Zahl abgerundet wird.

Tabelle 31 – Parameter für EIL-Umsetzung (AUT-REF, VKM2BAS)

Parameter	Wert	Einheit
$P_{t_{VKM}^{min}}$	3.2	s
$P_{t_{Start}^1}$	1	s
$P_{n_{Start}^1}$	600	1/min
$P_{PED_{Start}^1}$	1	%
$P_{t_{Start}^2}$	1	s
$P_{PED_{Start}^2}$	10	%
$P_{t_{Start}^3}$	0.9	s
$P_{t_{EM}^{min}}$	6	s
$P_{t_{EM}^{min2}}$	9	s
$P_{n_{Schwelle}^{Stopp}}$	2010	1/min
$P_{t_{Stopp}^1}$	0.6	s
$P_{t_{BAW}}$	60	s
$P_{ZA_{BAW}}$	30	%
$P_{t_{LPM}}$	5.5	s
$P_{ZA_{LPM}}$	25	%
$P_{ZA_{LPM2}}$	77	%
$P_{t_{LPM}^{\ddot{U}}}$	1	s
$P_{PED_{Start}^1}$	1	%
$P_{PED_{Start}^2}$	10	%
n_{Start}^{COM}	450	1/min
$n_{Stillstand}^{PUMA}$	200	1/min
md_{Stopp}^{PUMA}	120	Nm

Tabelle 31 listet die Werte der Parameter für die EIL-Umsetzung des simulierten Grenzpotenzials aufgelistet. Außerdem enthält sie auch die Start- bzw. Stoppparameter für die Nachbildung der realen Betriebsstrategien am Motorprüfstand. Aufgelistet sind die Werte der Parameter nach Kapitel 9 für die EIL-Versuche entsprechend den Kapiteln 10.3.12, 10.4.5 und 10.5.5.

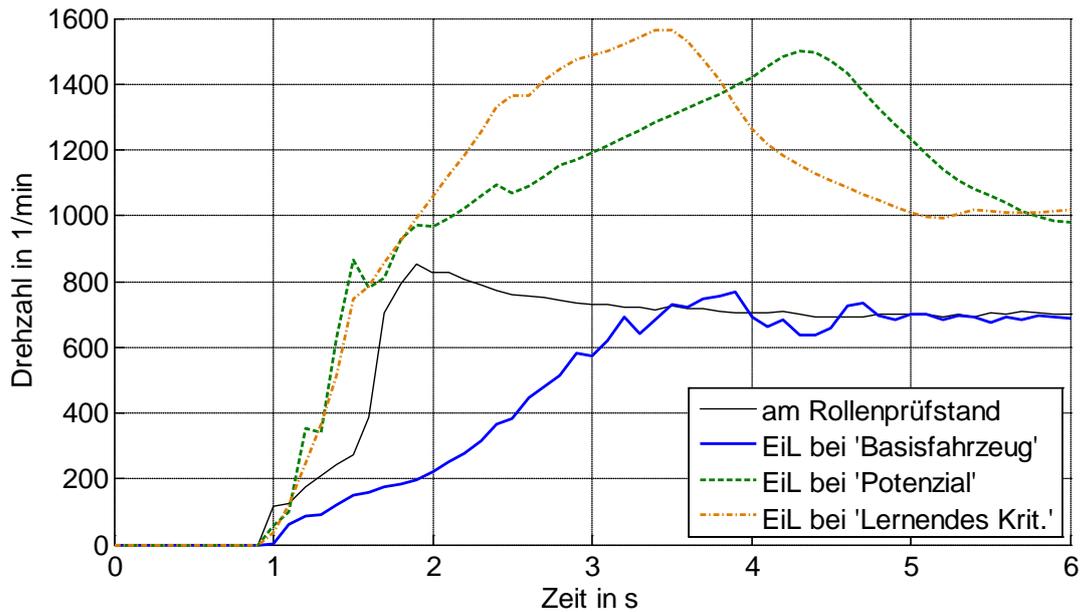


Abbildung 136 – Drehzahl während Startphase

Zur Beurteilung der Starts werden die Parameter Drehzahl und Einspritzmenge herangezogen. In Abbildung 136 und Abbildung 137 sind Beispiele für die drei EiL-Startsituationen und die Startsituation am Rollenprüfstand dargestellt, wobei die Gleichstellung zum Zeitpunkt der ersten erfassten Drehzahl der VKM erfolgt.

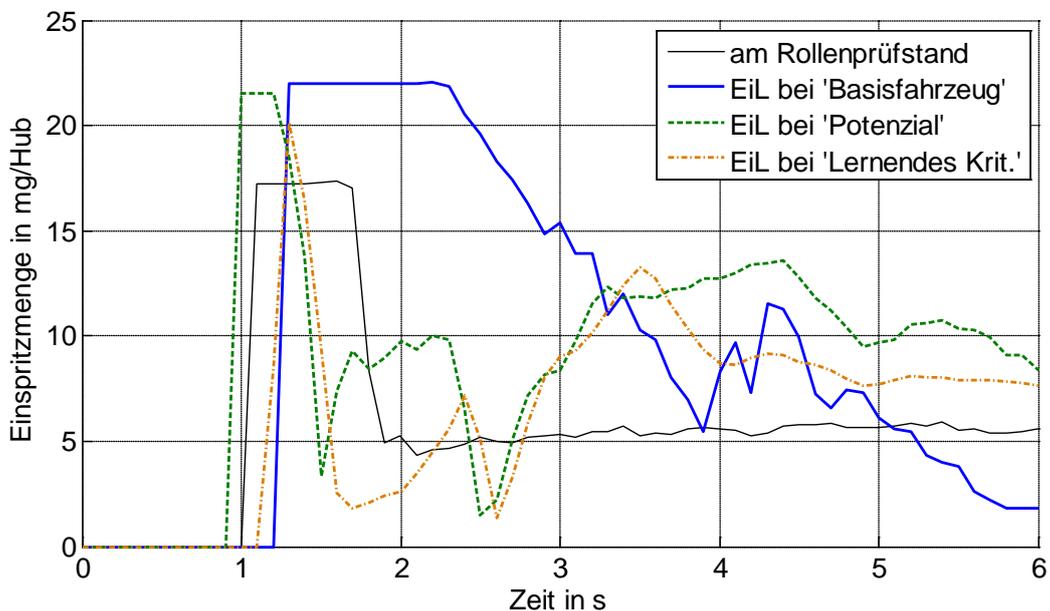


Abbildung 137 – Einspritzmenge während Startphase

Beim Drehzahlverlauf konnte die Forderung nach einem gegenüber der Referenz etwas schnelleren Anstieg realisiert werden. Deutlich erkennbar ist die bei der Basis (Start über Anlasser¹⁸⁸) verlängerte Drehzahlrampe und erhöhte Einspritzmenge. Die Startmenge unterscheidet sich zwischen den Versuchen am Motorprüfstand und am Rollenprüfstand.

¹⁸⁸ Aufgrund dieser Ergebnisse wird der Start ab den Versuchen mit der verbesserten VKM (siehe Kapitel 10.4) auch für die EiL-Basisfahrzeugabbildung über die aktive Bremse realisiert.

Woher dieser Unterschied kommt, kann nicht festgestellt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass entweder die Datenstände der ECU nicht exakt gleich sind (siehe auch Kapitel 10.3.7), oder die ECU Zusatzinformationen aus der am Prüfstand fehlenden Kommunikation mit den anderen Steuergeräten im Fahrzeugverbund erhält.

Bezüglich des angestrebten drehmomentfreien Hochlaufs zeigt Abbildung 138, dass es gelungen ist mit der Strategie aus Kapitel 9 und den gewählten Parametern die Drehmomente unabhängig von der Zieldrehzahl betragsmäßig abzusenken. Die exakte Einregelung ist mit der eingesetzten Prüfstandtechnik nicht möglich, aber im Rahmen dieser Gesamtzyklusuntersuchungen auch nicht zwingend erforderlich. Die in der ersten Startphase abweichend von der Basis (Start mit Anlasser) deutlich negativen Drehmomente ergeben sich durch das Anschleppen der VKM mit der aktiven Bremse. Das positive Drehmoment bei der Basis wird in dieser Phase hauptsächlich vom Anlasser aufgebracht.

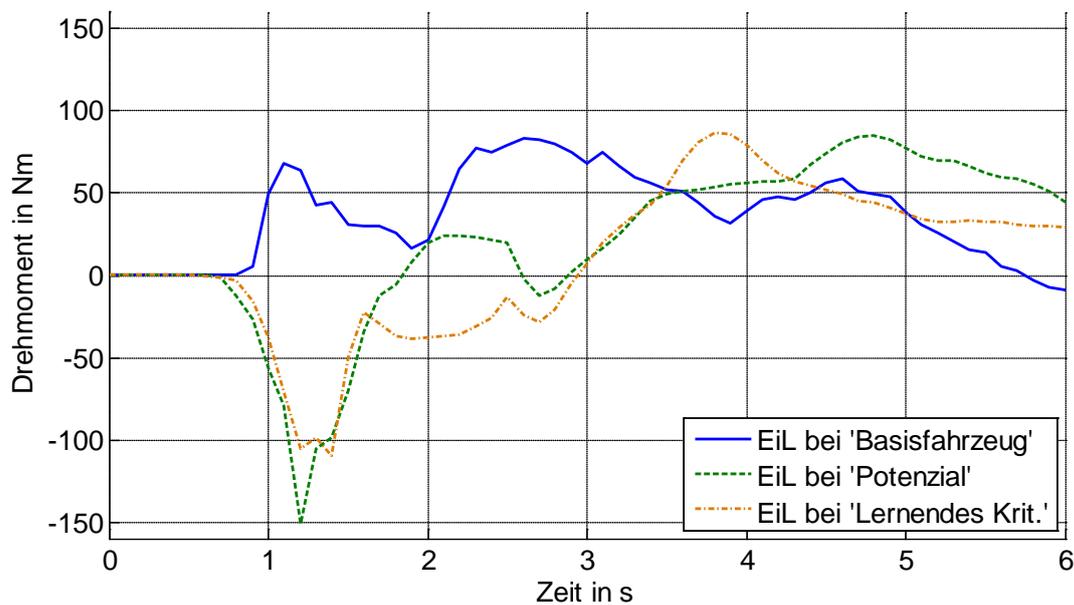


Abbildung 138 – Drehmoment während Startphase

Für die Stopps gibt es keine echte Referenz, weil ein Auslaufen ohne zusätzliches Drehmoment im Basisfahrzeug ohne Hybridisierung nicht möglich ist. Durch das Ausschalten der Zündung beeinflusst der Auslaufprozess Verbrauch und Emissionen nicht mehr, sondern nur noch über den zeitlichen Verlauf des Abgasmassenstroms die Randbedingungen für die Abgasnachbehandlung.

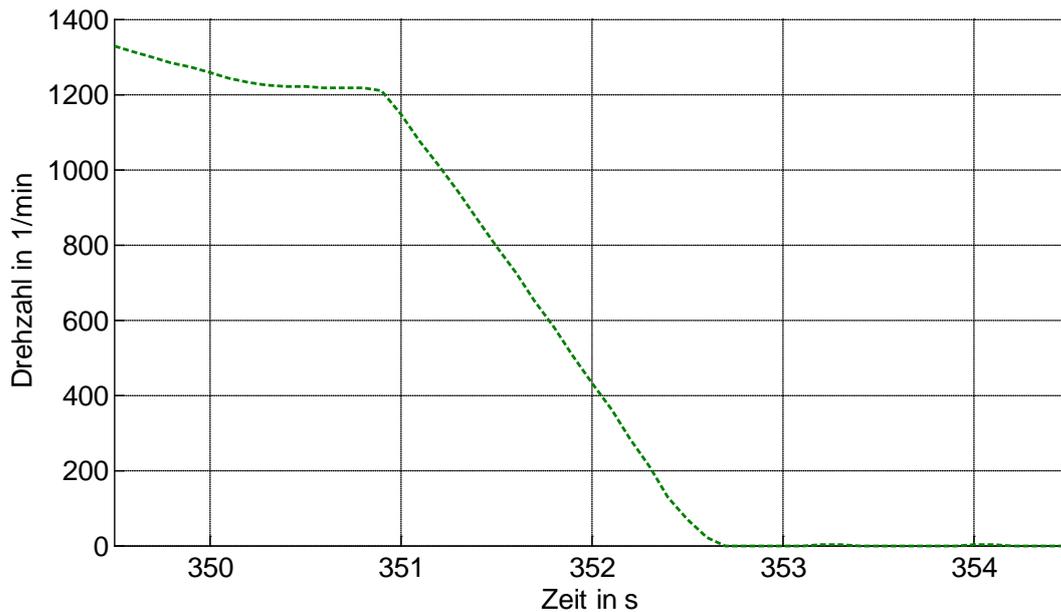


Abbildung 139 – Drehzahl während Stoppphase

Die Anforderung eines möglichst drehmomentfreien Austrudelns der VKM kann mit den gewählten Parametern zufriedenstellend genau erfüllt werden (siehe Beispiel aus der Grenzpotenzialsimulation in einem NEFZ in Abbildung 139 und Abbildung 140). Die erkennbare Verzögerung beim Unterschreiten der Stillstanderkennungsdrehzahl ($n_{\text{Stillstand}}^{\text{PUMA}} = 200/\text{min}$) hat aufgrund der niedrigen Wahl dieses Parameters und des somit niedrigen Abgasmassenstrom nur geringe Auswirkungen.

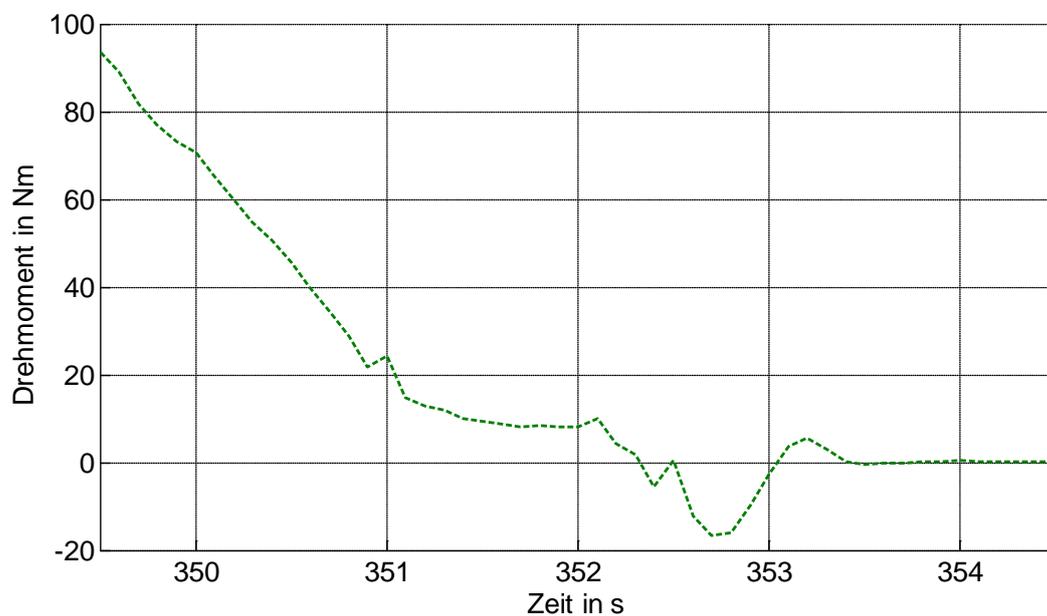


Abbildung 140 – Drehmoment während Stoppphase

ANHANG G (Zusätzliche Eingangsdaten und CRUISE-Simulationseinstellungen)

Dieser Anhang listet Informationen zu zusätzlich notwendigen Daten zur Längsdynamiksimulation entsprechend den Aufgabenstellungen in dieser Arbeit auf. Die Simulationsergebnisse dieser Arbeit sind mit der Programmversionen CRUISE v3.1, CRUISE 2009 bzw. CRUISE 2010 erstellt worden. Da die vollständige Auflistung der konkreten Mess- bzw. Eingangsdaten keinen Mehrwert hinsichtlich der Aussagen dieser Arbeit bietet, wird hier stattdessen erklärt, welche Daten verfügbar sein bzw. abgeschätzt werden müssen, um vergleichbare Aufgaben abzuarbeiten. Außerdem werden Einstellungen Auswahlvorschläge für CRUISE-Einstellungen für ebensolche Aufgaben angeführt.¹⁸⁹

Für die Simulation mit CRUISE werden folgende Informationen benötigt:

- Volllast-, Schleppkurve und Leerlaufdrehzahl der VKM
- Getriebeübersetzungen und –verlustdefinitionen¹⁹⁰
- Trägheiten der Elemente im Antriebsstrang (translatorisch bzw. rotatorisch)
- Vorgabegeschwindigkeitsprofile mit
 - Schaltpunktdefinitionen für Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe bzw.
 - Schaltprogrammen für alle anderen Fahrzeuge
- Fahrerparameter
- andere Einstellungen für die Simulation mit CRUISE (Rechenschrittweite, Auswahl des Gleichungslösers)¹⁹¹

Zur Berechnung auf Basis von Rollenprüfstandmessungen sind notwendig (Informationen in geschwungenen Klammern werden nur für die Berechnung der Rekuperation benötigt.¹⁹²):

- {Getriebeübersetzungen und –verlustdefinitionen}
- {Trägheiten der Elemente im Antriebsstrang (translatorisch bzw. rotatorisch)}
- gemessene Geschwindigkeitsprofile (zur Berechnung der zurückgelegten Strecke)
- Vorgabegeschwindigkeitsprofilen (zur Kontrolle der Übereinstimmung)
- {Ganginformationen der ECU}
- Drehzahlinformationen der ECU
- gemessene Verläufe des indizierten Mitteldrucks
- das zur Drehmomentberechnung verwendete Kennfeld (indizierter Mitteldruck in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment)

Volllast- bzw. Schleppkurve werden bei Verwendung von Messergebnissen nur zur Begrenzung des Variationsraumes für die LPM beim Berechnen der Hybrid-Funktionen benötigt.

Zur Hochrechnung immer notwendig sind Simulations- bzw. Messwertkennfelder der zu berücksichtigenden Größen (bspw. Kraftstoffverbrauch und Emissionen). Beim vorgestellten Ansatz der Realisierung der Hybridsimulation als quasi-stationäres Post-Processing sind für die Längsdynamikberechnung keine Daten bezüglich der elektrischen Komponenten erforderlich. Die entsprechenden Systeme (EM und EES) müssen also nicht in CRUISE modelliert werden und es sind auch keine Regelungssysteme dafür abzubilden.

¹⁸⁹ Eingangsdaten, Zwischenergebnisse und CRUISE-Einstellungen zu den Aufgaben aus Kapitel 10 dieser Arbeit sind auf Anfrage verfügbar. Meine Kontaktdaten können am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz angefordert werden.

¹⁹⁰ CRUISE ermittelt bei Eingabe der Übersetzungen auf Wunsch automatisch passende Zahnzahlpaarungen.

¹⁹¹ Die Bedeutung und Auswirkungen einzelner Parameter ist aus AVL List GmbH: CRUISE v2010 Users Guide, 2010 ersichtlich.

¹⁹² Die Genauigkeitsanforderung kann daher möglicherweise geringer ausfallen.

Um die Anwendung von Post-Processing-Programmen entsprechend dieser Arbeit zu erleichtern, empfiehlt es sich, schon bei der Speicherung auf das verwendete Programm Rücksicht zu nehmen.¹⁹³

Tabelle 32 – Einstellungen für die Zyklusberechnung (cycle run)

Einstellungsparameter	Bezeichnung in CRUISE	Wert	Beschreibung
Warmlauf		Hot Start – steady state	
Fahrwiderstand	Driving Resistance	Function without Reference Vehicle	
Gleichungslöser		Simulation 1: VSS Bulirsch/Stoer +	
Berechnungsaufgabe		Chassis Dynamometer	
Kurvenfahrt		without Cornering	für Nachbildung von Zertifizierungszyklen nicht notwendig
Schlupfberücksichtigung		without Slip	
Gangwahl beim Hinaufschalten	Gear Selection Upshifting	According to Profile	wirkt nur für Handschaltgetriebe
Gangwahl beim Zurückschalten	Gear Selection Downshifting	According to Profile	wirkt nur für Handschaltgetriebe
Gangwahl für Automatikgetriebe		Gear Shifting Program	wirkt nur für Automatikgetriebe
Losfahrverhalten	Starting from Rest	customerlike	
Auswahl der SMK		Use Existing Inertia Weight	

Die wichtigsten allgemeinen CRUISE-Einstellungen für diese Arbeit gehen aus Tabelle 32 hervor. Der maximale Zeitschritt ist entsprechend der Aufgabenstellung zu wählen. Es empfiehlt sich vor allem dann ein Wert um ca. 0.1 s, wenn auch die Schaltphasen analysiert werden sollen. Alternativ zum Vorschlag aus Tabelle 32 kann auch ein anderer Gleichungslöser gewählt werden. Die Verwendung von quasistationären Berechnungsmethoden ist dabei nicht empfehlenswert.

Für die untersuchten Pkw hat sich gezeigt, dass bei den rotatorischen Trägheiten der Einfluss der VKM und der Räder überwiegt. Die anderen Elemente des Antriebsstrangs können näherungsweise mit niedrigen Werten beschrieben werden, wenn keine Detailuntersuchungen hinsichtlich des Schaltverhaltens geplant sind. Die Verwendung von 0 als Trägheitswert kann zu numerischen Problemen führen und ist deshalb zu vermeiden.

¹⁹³ Informationen zur Verfügbarkeit des Programms sind in ANHANG D (Information zum Programmcode) angeführt.

ANHANG H (Details Basisfahrzeugabbildung)

Dieser Teil des Anhangs beinhaltet die Untersuchung der Hintergründe der unterschiedlichen NO_x -Werte am Rollenprüfstand (in den folgenden Diagrammen als 'Referenz' bezeichnet) im Vergleich mit den EiL-Versuchen. Die in den Diagrammen als 'angepasst' bezeichneten Ergebnisse sind unter Adaption des Datenstandes mit dem Ziel der NO_x -Anpassung erzielt worden (siehe Kapitel 10.3.7).

Eine genauere Analyse der NO_x -Bildung im NEFZ (Abbildung 141) zeigt, dass mit der Anpassung des Datenstands zur Angleichung der Ergebnisse nur die Unterschiede, nicht jedoch deren Ursache beseitigt werden. Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen vor allem in der ersten Phase nach dem Start entstehen.

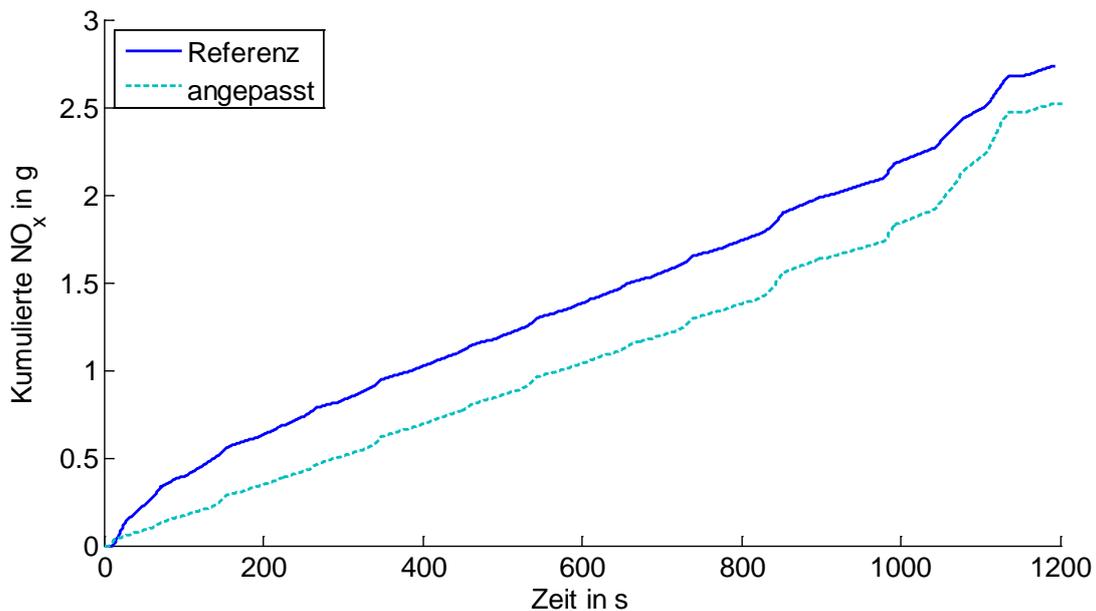


Abbildung 141 – NO_x -Unterschied (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Hier sind die NO_x -Massenströme am Motorenprüfstand unabhängig vom Datenstand deutlich niedriger (Abbildung 142).

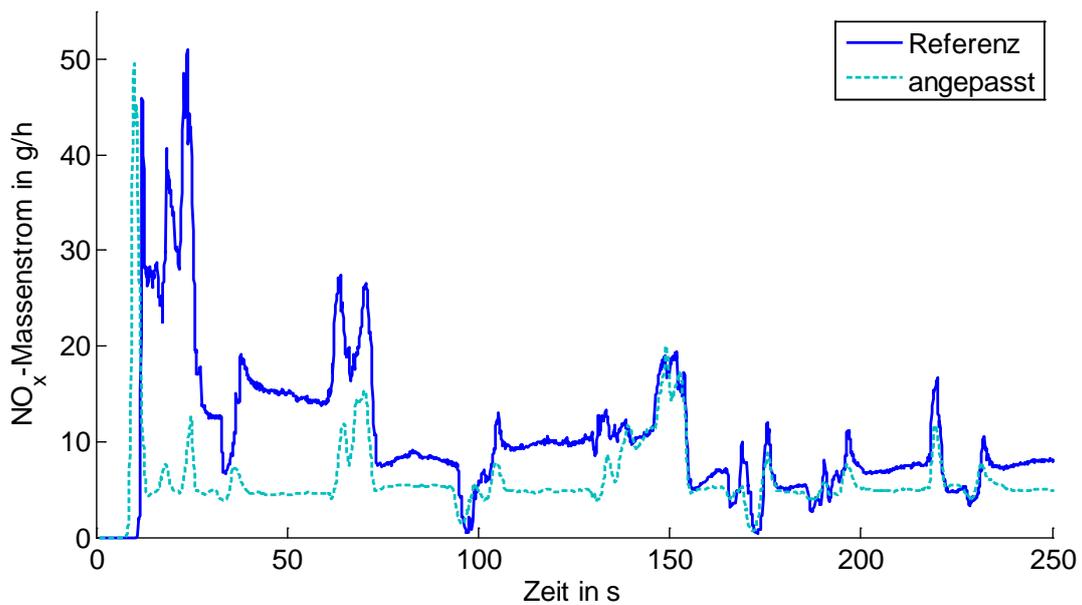


Abbildung 142 – Entstehung des NO_x-Unterschieds (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

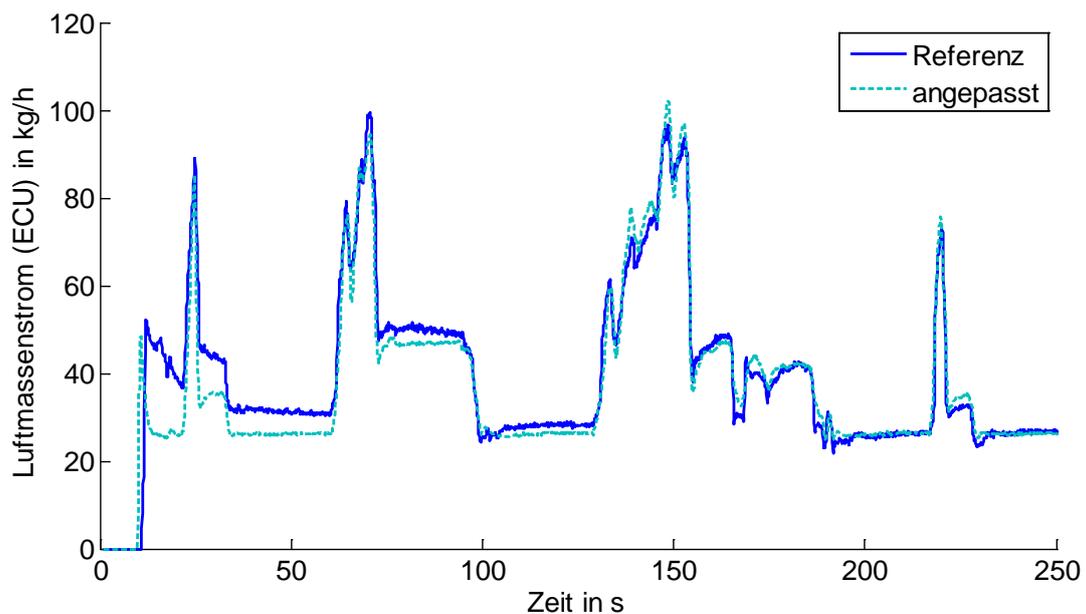


Abbildung 143 – Ursache des NO_x-Unterschieds (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Die Ursache sind deutlich unterschiedliche Luftmassenströme (Abbildung 143 zeigt die Messwerte der ECU, weil bei der Referenz kein anderes Messsystem verfügbar ist.). Diese entstehen durch abweichende Sollwerte, die aber nicht auf das Basiskennfeld für die Sollluftmenge zurückgeführt werden können. Man kann erkennen, dass die Unterschiede gegen Ende des Ausschnitts auch praktisch verschwinden. Eine motortemperaturabhängige Korrektur kann ebenfalls ausgeschlossen werden, weil diese Zyklen alle mit betriebswarmer VKM gestartet worden sind.

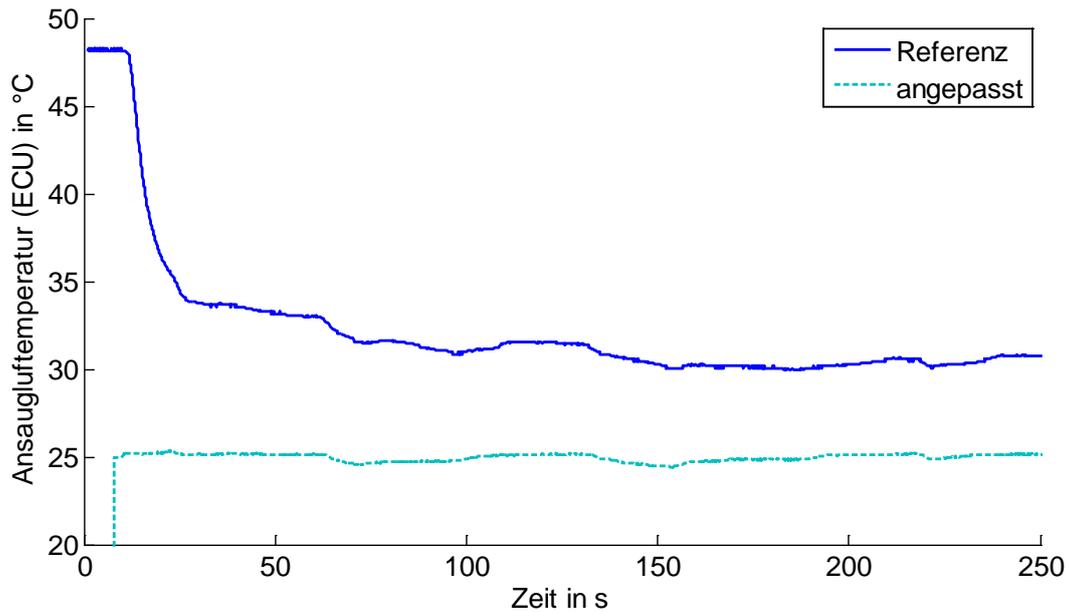


Abbildung 144 – Zu Korrektur führender Temperaturunterschied (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Die genaue Ursache für diese Korrektur ist in Abbildung 144 ersichtlich. Durch den Stillstand vor der Messung erwärmt sich am Rollenprüfstand die Luft im Motorraum und Einlasssystem, was zu einer anfangs erhöhten Ansauglufttemperatur führt. Die ECU verwendet diese Temperatur als Eingangsparameter für eine Korrektur der Sollluftmenge.

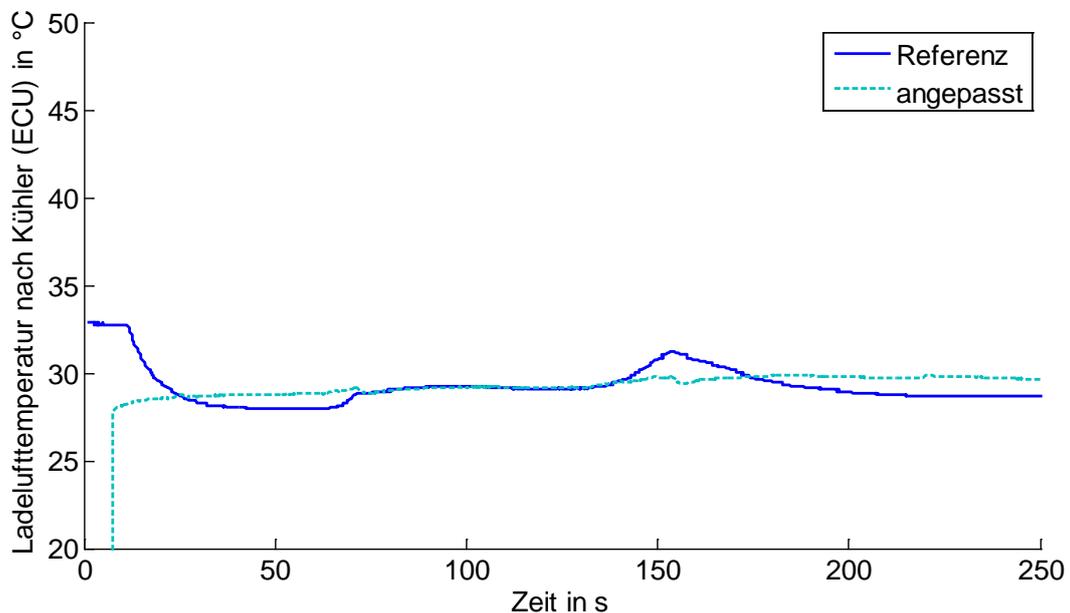


Abbildung 145 – Temperaturen nach Ladeluftkühler (NEFZ, AUT-REF, VKM2BAS)

Nach dem Ladeluftkühler gibt es praktisch keine Auswirkungen (Abbildung 145). Die niedrigere Dynamik am Prüfstand ist auf den eingesetzten Kühler (Abbildung 146) als Ersatz des Luft-Luft-Ladeluftkühlers des Fahrzeugs zurückzuführen.

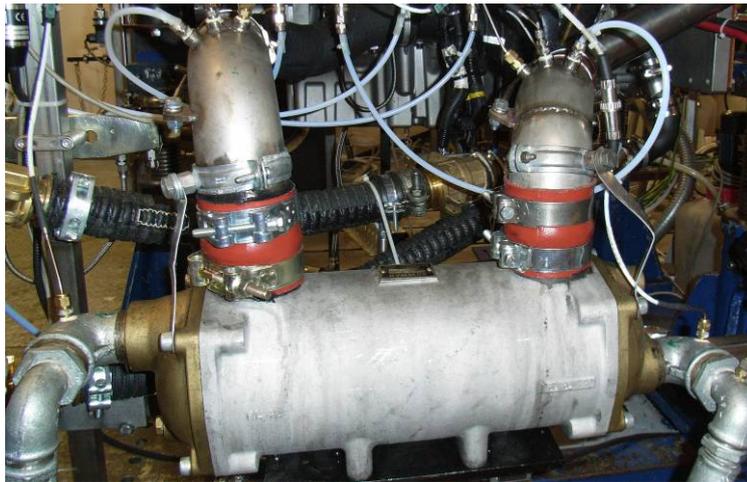


Abbildung 146 – Industriekühler

Anhand von Tabelle 33 sind die Korrelationen zwischen Rollen- und Motorprüfstand ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass die Teile des ARTEMIS-Zyklus (Stadt, Überland und Autobahn) am Rollenprüfstand ohne Unterbrechung vermessen worden sind und daher die beschriebenen Temperatureffekte nur im ersten Teil auftreten. Bei den dynamischeren Zyklen hingegen sind die Auswirkungen nicht so ausgeprägt, weil dort AGR nicht vollständig aktiviert ist und daher auch die Korrekturfunktion nicht eingreift. Der von dieser Abweichung betroffene Bereich hat außerdem nur einen verhältnismäßig geringen Anteil an den Gesamtemissionen.

Tabelle 33 – Ergebnisse mit Vergleich zum Rollenprüfstand (AUT-REF, VKM2BAS)

Zyklus	Datenstand	NO _x	RRW	CO	C _x H _y	Waage _k $\frac{V_{\Delta A}}{V_{Kr}}$	ECU _V $\frac{\Delta A}{Kr}$
		mg/km		mg/km	mg/km	L/100km	L/100km
NEFZ	Referenz	249	104	526	171	6.06	6.22
	Basis	171	126	659	169	6.04	6.14
	angepasst	230	79	493	156	6.00	6.02
FTP72	Referenz	318	136	614	204	6.43	6.51
	Basis	238	191	855	179	6.37	6.49
	angepasst	297	100	584	168	6.36	6.30
US06	Referenz	677	230	626	189	6.92	6.49
	Basis	726	316	1106	93	6.90	6.80
	angepasst	778	222	836	89	6.90	6.61
Stadt	Referenz	580	87	816	228	9.81	9.75
	Basis	425	196	1680	248	9.81	9.91
	angepasst	558	82	913	242	9.73	9.62
Überland	Referenz	376	259	738	111	5.40	5.11
	Basis	396	370	1108	136	5.40	5.38
	angepasst	443	194	653	122	5.38	5.16
Autobahn	Referenz	318	513	465	93	6.26	5.88
	Basis	403	714	621	86	6.10	6.08
	angepasst	426	360	354	83	6.05	5.88

Zusammenfassend kann somit darauf geschlossen werden, dass ohne die identifizierte Korrektur die Übereinstimmung auch ohne die beschriebene Anpassung der Sollluftabstimmung wahrscheinlich ist. Diese wird daher für alle weiteren Untersuchungen nicht angewandt.

ANHANG I (Ausgewählte Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen)

In diesem Abschnitt des Anhangs werden Ergebnisse vorgestellt, die auf Basis von dieser Arbeit entsprechenden, leicht modifizierten EIL-Vorgaben ermittelt worden sind. Die Hybrid-Ergebnisse basieren auch auf nicht exakten Vorgaben entsprechend ANHANG K ('Engine in the Loop'-Ergebnisse mit leicht abweichenden Vorgaben). Modifiziert worden sind lediglich für die Basisfahrzeugsimulation mit Kaltstart die Leerlaufdrehzahl und die entsprechende Losfahrstrategie für DCT2-SIM. Die Leerlaufdrehzahl ist dabei in weiten Bereichen erhöht worden, um typische Warmlaufstrategien nachzubilden.¹⁹⁴

Nicht berücksichtigt ist die zu erwartende erhöhte Leistungsanforderung aufgrund des nicht betriebswarmen Getriebes. Eine Leistungserhöhung verursacht aber allgemein keinen erweiterten Bedarf an Wärmemanagementmaßnahmen. Somit kann näherungsweise angenommen werden, dass die Funktion der Abgasnachbehandlung auch im Fahrzeug gegeben wäre, wenn sie bei den durchgeführten Tests demonstriert werden kann.

Eine Beschreibung der konkreten Wärmemanagementmaßnahmen durch Veränderungen in der Steuerungssoftware und der eingesetzten Hardware entfällt hier aus folgenden Gründen: Erstens entsprechen die im Rahmen dieser Versuche eingesetzten Maßnahmen zur Beeinflussung des Temperaturverhaltens noch keiner endgültigen Lösung. Zweitens ist die Entwicklung dieser Maßnahmen Thema anderer noch nicht abgeschlossener wissenschaftlicher Arbeiten. Eine vorzeitige Veröffentlichung ist daher aus Rücksicht auf die Verfasser nicht möglich. Schließlich würde die Anführung außerdem den Umfang unvertretbar erweitern.

Folgende Ergebnisse werden ausgewählt, um den Einfluss der Hybridisierung unter Berücksichtigung von Wärmemanagementmaßnahmen zu erläutern: FTP72-Versuche mit Start bei Raumtemperatur bzw. mit betriebswarm gestarteter VKM für die Basisfahrzeugnachbildung und mit der Hybridstrategie 'Lernendes Kriterium'. Bei allen Versuchen kommt dieselbe Hard- und Software zum Einsatz. Somit werden bei Bedarf auch bei den betriebswarm gestarteten Versuchen Wärmemanagementmaßnahmen aktiviert. Da das VKM-Verhalten dabei dann vom stationären Verhalten abweicht, sind einfache Hochrechnungen aus den Stationärkennfeldern nicht sinnvoll möglich. Nur durch die Ermittlung stationärer Kennfelder mit aktiven Wärmemanagementmaßnahmen und den Einsatz von Simulationsmodellen mit Nachbildung der Temperaturen im Abgasstrang wäre eine Vorausberechnung denkbar.

Die gemessenen EIL-Ergebnisse (Abbildung 147) zeigen, dass die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Nachbehandlung der Schadstoffe auch mit Hybridisierung gegeben sind. Bei CO und C_xH_y bewirken die niedrigeren Rohemissionen auch niedrigere Gesamtemissionen. Die Bedingungen für eine Oxidation werden also durch den intermittierenden VKM-Betrieb bei geeigneten Wärmemanagementmaßnahmen nicht entscheidend verschlechtert. Diese Aussage gilt sowohl für die betriebswarmen Ergebnisse, als auch für die Ergebnisse, bei denen der erste Start bei Raumtemperatur erfolgt ist.

¹⁹⁴ Diese Abweichung ist nur für die Referenzzyklen ohne Hybrid-Simulation relevant.

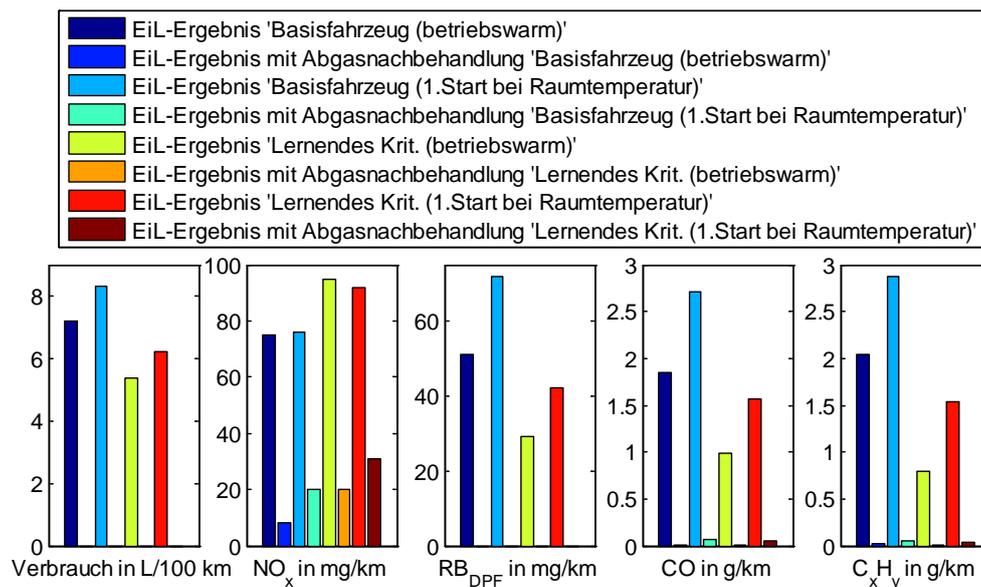


Abbildung 147 – Ergebnisse mit Wärmemanagementmaßnahmen (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72, Strategie Verzicht auf Kriterium, keine Umrechnung zur Korrektur der nicht exakten EiL-Vorgaben)

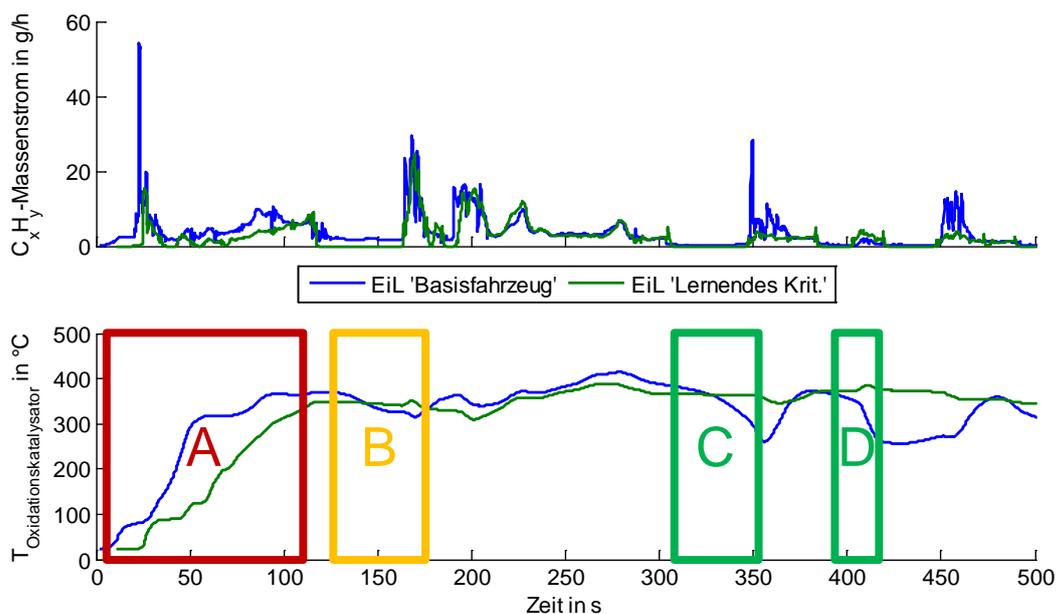


Abbildung 148 – Auswirkung der Hybridisierung auf Temperaturverlauf im Oxidationskatalysator und C_xH_y-Emissionen mit Abgasnachbehandlung bei Anwendung von Wärmemanagementmaßnahmen (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72, Strategie Verzicht auf Kriterium, 1.Start bei Raumtemperatur, keine Umrechnung zur Korrektur der nicht exakten EiL-Vorgaben)

Anhand von Abbildung 148 sind Details der veränderten Randbedingungen für die Abgasnachbehandlung durch die Hybridisierung am Beispiel der C_xH_y erkennbar.¹⁹⁵ In Abschnitt A kommt es zu niedrigeren Temperaturen. Diese sind jedoch auf den verzögerten VKM-Start zurückzuführen und gehen daher auch mit verringerten Rohemissionen einher. Abschnitt B ist eine Phase mit Fahrzeugstillstand. Die Temperatur im Katalysator wird hier

¹⁹⁵ C_xH_y sind hier als Beispiel gewählt, weil CO generell schon bei etwas niedrigeren Temperaturen in Oxidationskatalysatoren vollständig verbrennen als für die Oxidation von C_xH_y notwendig sind.

beim Hybridfahrzeug gleich gut aufrecht erhalten, obwohl die VKM abgeschaltet wird. Die Abschnitte C und D sind Phasen mit Fahrzeugverzögerung. Beim konventionellen Fahrzeug kommt es hier zu Schubbetrieb und anschließendem Leerlaufbetrieb der VKM. Beim Hybridfahrzeug kühlt der Oxidationskatalysator hier weniger stark aus, weil die VKM abgeschaltet wird und daher keine Strömung von relativ kaltem Gas durch diesen auftritt. Das Ergebnis zeigt hier für die C_xH_y in den direkt auf diese Abschnitte folgenden Bereichen deutliche Vorteile für das Hybridfahrzeug.

Auch die RB des DPF kann gesenkt werden. Es könnte also entweder das Regenerationsintervall verlängert werden, oder ein kleinerer DPF zum Einsatz kommen.

Bei den NO_x zeigen diese Ergebnisse noch einem leichten Anstieg der Gesamtemissionen. Einerseits liegt das an den hier erhöhten Rohemissionen. Die Ursachenanalyse dafür findet sich in ANHANG K ('Engine in the Loop'-Ergebnisse mit leicht abweichenden Vorgaben).¹⁹⁶ Andererseits ist hier die Rohrlänge vom Austritt aus dem DPF bis zur NO_x -Nachbehandlung bedingt durch den Prototypeneinsatz relativ lang. Bei Verkürzung sind auch hier noch geringere Effekte durch den intermittierenden VKM-Betrieb zu erwarten.

Die Auswirkungen von LPM auf das Temperaturniveau im Abgasstrang sind bisher nicht untersucht worden. LPM bieten bspw. eine Möglichkeit durch Laden des EES die Abgasenthalpie weiter zu erhöhen und so das Aufwärmen der Abgasnachbehandlungssysteme zu unterstützen.

¹⁹⁶ Eine weitere Reduktion ist außerdem bei Wiederholung der Versuche mit den korrigierten EiL-Vorgaben zu erwarten.

ANHANG J (Korrektur transienter Gastemperaturmessungen)

Die Ergebnisse von Gastemperaturmessungen mit Messsonden (Widerstandsthermometer, Thermoelemente) werden immer von der thermischen Trägheit des Messsystems und dem Wärmeübergang auf dieses beeinflusst. Diese Effekte erschweren den Vergleich mit Ergebnissen aus Simulationsrechnungen vor allem im dynamischen Verhalten. Es ist jedoch möglich sie zu quantifizieren und daher rechnerisch zu berücksichtigen. Ein Verfahren dazu und seine Anwendung wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Aus dynamischen Testläufen am Motorenprüfstand ist ersichtlich, dass der Durchmesser der eingesetzten Temperaturfühler deutlichen Einfluss auf die Messdynamik hat. Ein idealer Fühler müsste keine thermische Trägheit und vollständigen Wärmeübergang besitzen. Weil ein solcher Fühler aber nicht herstellbar ist, wird eine Methode zur Korrektur der erwähnten Einflüsse angewandt, um die Gastemperatur zu ermitteln. Wenn Messungen mit mehreren Sensoren unterschiedlicher Durchmesser an derselben Messstelle verfügbar sind, ist es möglich durch Vergleich der Ergebnisse das Modell zu evaluieren. Wird der Anspruch auf allgemeine Gültigkeit gestellt, darf die errechnete Temperatur nicht von der betrachteten Messfühlerart abhängen. Die Messungen, die zur Demonstration der Korrektur verwendet werden, sind mit VKM1BAS am Motorprüfstand durchgeführt worden, wobei Drehzahl- und Drehmomentspuren in Anlehnung an einen FTP72-Versuch eines älteren Referenzfahrzeugs verwendet worden sind.

Theorie und Festlegungen

Die aktuelle Gastemperatur wird nach der Theorie von Odendall errechnet.¹⁹⁷ Formel 38 gibt den Zusammenhang unter Vernachlässigung der axialen Wärmeleitung wieder.

$$\alpha \times A_{O_{10.EI}} \times (T_{Gas} - T_{10.EI}) = m_{10.EI} \times c_p^{10.EI} \times \frac{dT_{10.EI}}{dt} + \sigma \times \varepsilon \times A_{O_{10.EI}} \times (T_{Gas}^4 - T_{10.EI}^4)$$

Formel 38 – Temperaturgleichung

Um daraus die aktuelle Gastemperatur ermitteln zu können, muss der Wärmeübergangskoeffizient am Temperaturfühler ermittelt werden. Der Fühler verhält sich wie ein quer angeströmter Kreiszyylinder. Der Wärmeübergang wird daher auf Basis einer Nusselt-Beziehung für die Konvektion an einem quer angeströmten Kreiszyylinder abgebildet (Formel 39). Daraus erhält man dann den Wärmeübergangskoeffizienten.

$$Nu_L = \alpha \times \frac{L}{\lambda} \text{ mit } L = d \times \frac{\pi}{2}$$

Formel 39 – Nusselt-Beziehung für den quer angeströmten Kreiszyylinder¹⁹⁸

Die Nusselt-Zahl berechnet sich laut Formel 40. Für die Stoffwerte (Prandtl-Zahl und dynamische Viskosität) werden in erster Näherung die Werte für Luft bei der entsprechenden Temperatur (Mittelwert aus Gas- und Sensortemperatur, daher iterative Ermittlung) verwendet. Es wird aber auch eine Variante mit konstanten Stoffwerten (bei einer geschätzten mittleren Abgastemperatur) getestet. Die Anströmgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Abgasmassenstrom, der Dichte des Abgases und der Querschnittsfläche. Die Dichte ermittelt man aus der idealen Gasgleichung unter Verwendung einer Druckmessung und einer entsprechenden Temperatur.¹⁹⁹

¹⁹⁷ siehe Odendall B.: Fehlerbetrachtung bei der Messung von Gastemperaturen (in: MTZ, 3/2003), S. 196ff

¹⁹⁸ Herleitung siehe Wagner W.: Wärmeübertragung, 3. Auflage 1991, S. 75f

¹⁹⁹ Zur Bestimmung der Dichte wird dabei näherungsweise der Wert der Sensortemperatur eingesetzt, um eine weitere Iterationsschleife zu vermeiden.

$$Nu_L = 0.3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}$$

$$\text{mit } Nu_{lam} = 0.664 \times \sqrt{Re_L} \times \sqrt[3]{Pr} \text{ und } Nu_{turb} = \frac{0.037 \times Re_L^{0.8} \times Pr}{1 + 2.443 \times Re_L^{-0.1} \times \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$\text{mit } Re_L = \frac{v_\infty \times L}{\nu}$$

Formel 40 – Ermittlung der Nusselt-Zahl²⁰⁰

Für Stoffwerte des Temperaturfühlers können näherungsweise die Werte von Stahl verwendet werden. Der Durchmesser wird entsprechend dem verwendeten Sensorelement eingesetzt und die Spitzenhöhe (für Oberflächen- und Massenberechnung) wird mit 5 mm festgelegt. Da aber nur das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Temperaturfühlers eingeht, hat die gewählte Höhe nur sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis.

Für den Strahlungsterm wird der 0.29 als Emissionszahl gewählt und für die Wandtemperatur zwei Drittel der verzögerten, sehr stark geglätteten Sensortemperatur angesetzt.²⁰¹

Stoffwerte und Strahlung

Insgesamt zeigt sich, dass die Strahlung und die Stoffwerte eher geringen Einfluss auf das Ergebnis haben (siehe Abbildung 149 bis Abbildung 151).

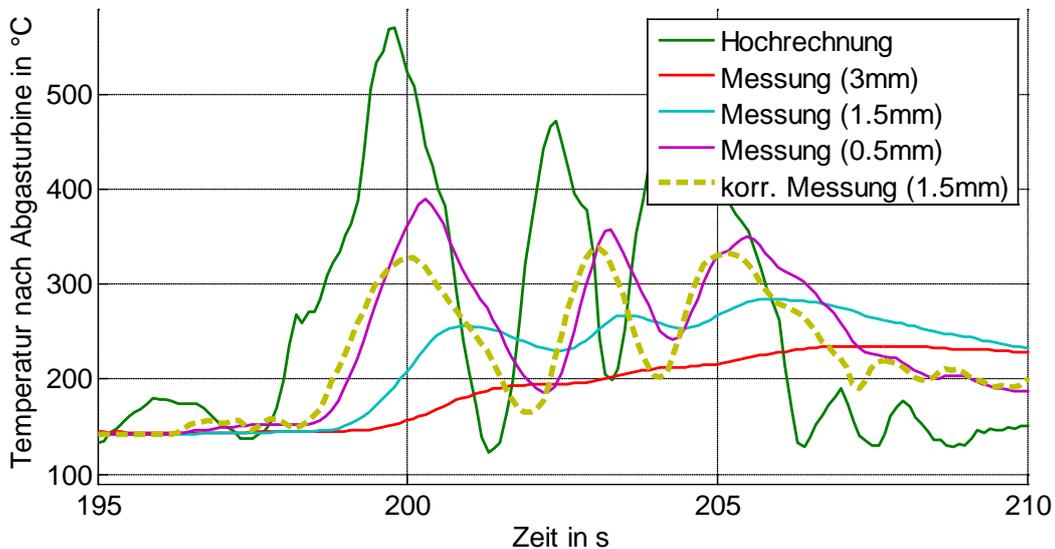


Abbildung 149 – Temperatursensorvergleich ohne Berücksichtigung der Strahlung und ohne temperaturabhängige Stoffwerte²⁰²

²⁰⁰ Herleitung siehe Wagner W.: Wärmeübertragung, 3. Auflage 1991, S. 76ff

²⁰¹ i.A.a. Odendall B.: Fehlerbetrachtung bei der Messung von Gastemperaturen (in: MTZ, 3/2003), S. 199

²⁰² Hier und in den folgenden Diagrammen werden die Durchmesser der eingesetzten Temperaturfühler in den Legenden in Klammern angegeben.

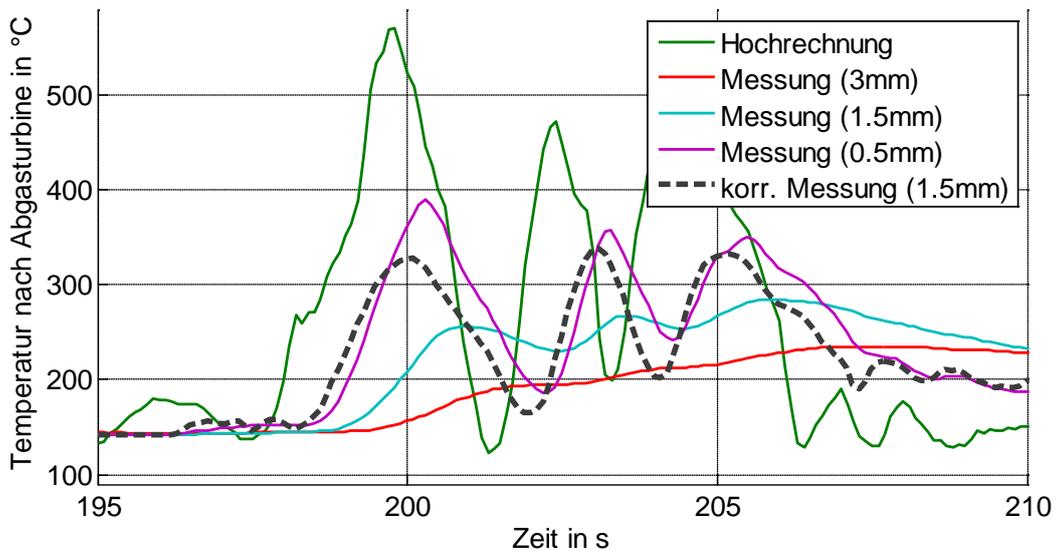


Abbildung 150 – Temperatursensorvergleich mit Berücksichtigung der Strahlung, jedoch ohne temperaturabhängige Stoffwerte

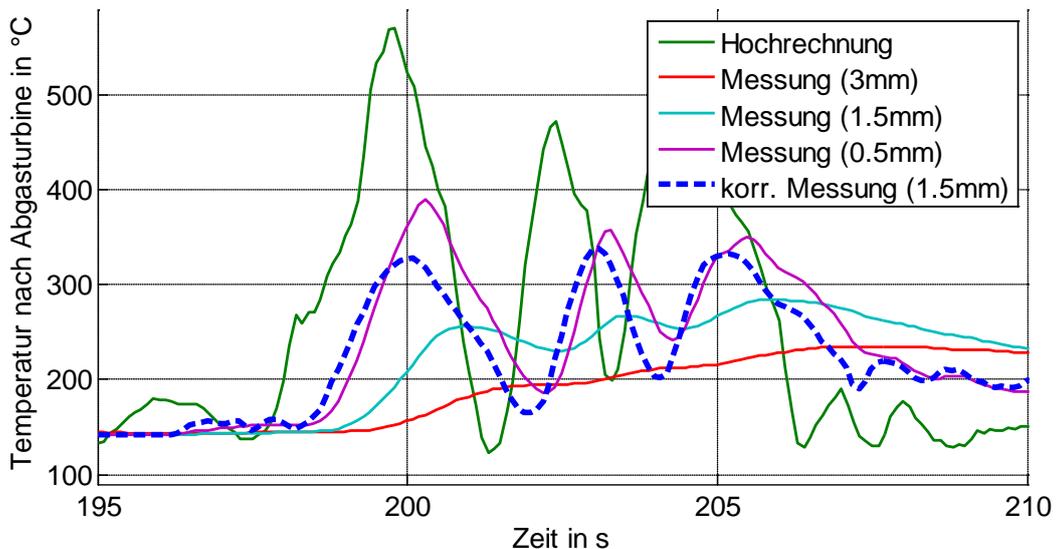


Abbildung 151 – Temperatursensorvergleich mit Berücksichtigung der Strahlung und mit temperaturabhängigen Stoffwerten

In Abbildungen ist die Anwendung der Methode auf die Rohdaten eines Thermoelements mit 1.5 mm Durchmesser und zusätzlich jeweils die Messwerte eines Thermoelements mit 0.5 mm Durchmesser, das an derselben Stelle im Abgasrohr nach dem Turbinenausritt appliziert ist (als Referenz einer schnellen, aber nicht sehr robusten Messmethodik), und zum Vergleich die aus Stationärkennfeldern für die jeweiligen Betriebspunkte erhaltene Temperatur ('Hochrechnung') dargestellt. Das Diagramm zeigt dabei einen Bereich mit großer Dynamik aus der Messung der Abgastemperatur während eines Versuchs am Motorenprüfstand.

Filterung der Messdaten

Da auch bei dieser Berechnung Messdaten und deren Ableitungen als Eingangsgrößen verwendet werden, ergeben sich ähnliche Probleme wie schon bei der Verwendung gemessener Geschwindigkeitsprofile bei der Längsdynamiksimulation.

Und auch der Lösungsansatz ist der gleiche wie für die Geschwindigkeitsdaten (siehe ANHANG C (Glättungsmethode für die Geschwindigkeit)), nur werden andere Parameter verwendet.²⁰³

Die Verbesserung durch die Anwendung der beschriebenen Glättung zeigt Abbildung 152. Deutlich zu erkennen ist, dass es mit der entwickelten Filterung gelingt keine unrealistischen hochfrequenten Temperaturschwankungen zu erhalten, ohne das Instationärverhalten negativ zu beeinflussen.

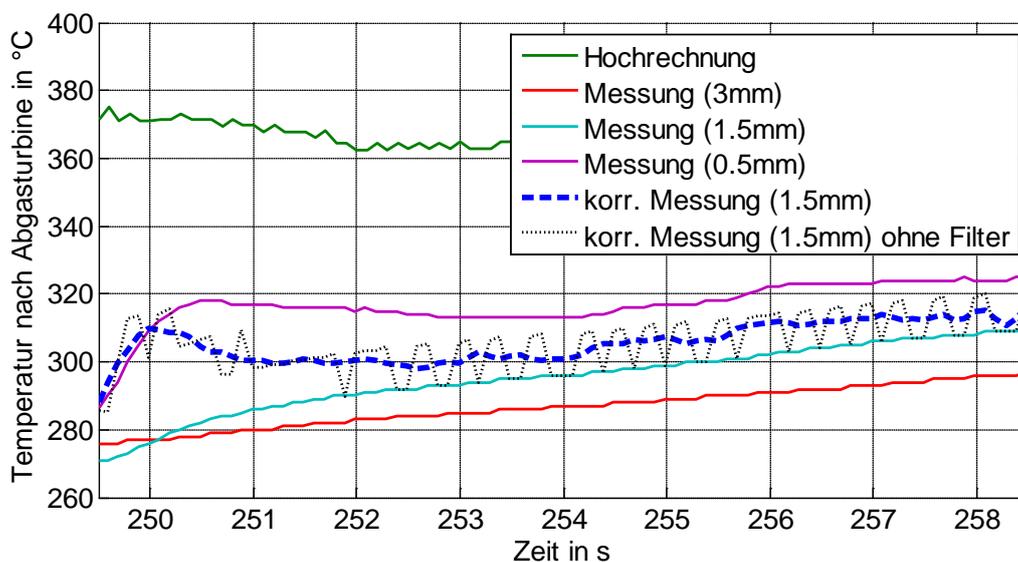


Abbildung 152 – Anwendung der Filterung auf den Temperatursensorvergleich

Vergleich verschiedener Temperaturfühler

Grundsätzlich erkennt man anhand Abbildung 153 (Ausschnitt aus einem FTP72-Versuch mit dynamischen und weniger dynamischen Anteilen), dass es gelingt, die durch die Messsignale nicht erfasste Dynamik der Temperatur rechnerisch zumindest teilweise zu berücksichtigen. Es ist möglich durch Anwendung der beschriebenen Methodik aus dem Messsignal eines Thermoelements mit 1.5 mm Durchmesser gleich dynamische Ergebnisse zu erhalten, wie sie die Messung mit einem Thermoelement mit 0.5 mm Durchmesser ergibt. Die Anwendung auf das dünnste eingesetzte Thermoelement (0.5 mm Durchmesser) zeigte außerdem, dass dieses relativ gut in der Lage ist, schnelle Temperaturänderungen ohne Korrekturen wiederzugeben. In diesem Fall ergeben sich durch die Korrekturen nämlich nur geringe Veränderungen. Die Ergebnisse der Anwendung auf das stärkste Thermoelement (3 mm Durchmesser) zeigen ebenfalls eine verbesserte Dynamik, jedoch kann hier das Niveau der dünneren Temperaturfühler nicht ganz erreicht werden. Mögliche Ursachen für diese Abweichungen können bspw. die etwas andere Einbau- und Anströmsituation, oder eine Rußschicht auf den Temperaturfühlern sein.

²⁰³ Dazu ersetzt man in Formel 33 bis Formel 38 v durch T bzw. a durch ΔT und verwendet folgende Parameter: $\beta = 0$, $\gamma = 3$, $\delta = 14$, $\Delta T = 0.025 K$, $\mu = 2$

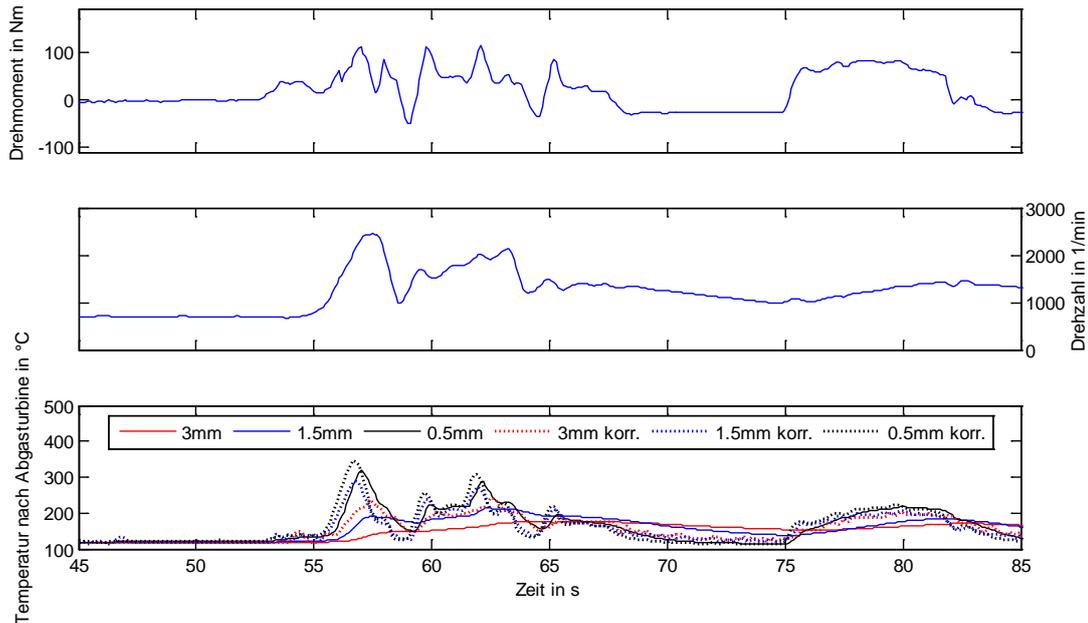


Abbildung 153 – Vergleich der Ergebnisse der Korrektur der Temperatursensoren

Vergleich mit Werten aus Stationärkennfeldern

Abweichungen der aus dem Stationärkennfeld erhaltenen Temperaturen (Simulation) von den Messwerten sind nur zum Teil auf die Trägheit der Temperaturfühler zurückzuführen.

Zusammenfassung Gastemperaturkorrektur

Die Abbildung des Wärmeübergangs am Temperaturmessfühler ermöglicht auf Basis vorhandener Messdaten bessere Informationen über das instationäre Temperaturverhalten.

Dabei spielen die eingesetzte Stoffwerte und die Wärmestrahlung eine eher geringe Rolle.

Wichtig ist der Einsatz einer geeigneten Filterung des Messsignals, weil es sonst zu unrealistischen Ergebnissen kommt. Eine einfache Glättung kann nicht eingesetzt werden, weil sonst wichtige Informationen über die dynamischen Vorgänge verloren gehen. Ein entwickelter Filter ermöglicht Messrauschen zu unterdrücken ohne die Dynamik negativ zu beeinflussen.

Die Verwendung von Temperaturfühlern mit kleinem Durchmesser ermöglicht auch ohne Korrekturen den Erhalt guter Informationen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese nicht sehr robust sind und daher bspw. beim Langzeiteinsatz in Versuchsfahrzeugen Probleme mit der Standfestigkeit auftreten könnten. Hier bietet die Anwendung dieser Methode in Kombination mit stärkeren Temperaturfühlern eine Alternative.

Für die Beurteilung der Ergebnisse von Berechnungen auf Basis von Stationärkennfeldern sind die korrigierten Temperaturen jedenfalls besser geeignet, da die Dynamik ähnlich abgebildet wird. Das gilt analog auch für den Vergleich mit Ergebnissen erweiterter Simulationsmodelle.

Die Niveau-Abweichungen zwischen dynamischen Messungen und aus einem Stationärkennfeld erhaltenen Werten erklären sich jedoch nur zum Teil durch die Sensorträgheit.

ANHANG K ('Engine in the Loop'-Ergebnisse mit leicht abweichenden Vorgaben)

Dieser Teil des Anhangs enthält EiL-Prüfstandergebnisse für das Fahrzeug DCT2-SIM, die Kapitel 10.5.5 zuzuordnen wären. Aufgrund einer falschen Einstellung im Simulationscode liegt jedoch eine Abweichung vor, die eine verringerte rekuperierte Energiemenge und einen erhöhten Leistungsbedarf für das elektrische Anfahren ergibt. Abbildung 154 zeigt beispielhaft die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der VKM. Generell kommt es zu verfrühten Starts und etwas verlängerten VKM-Betrieb.

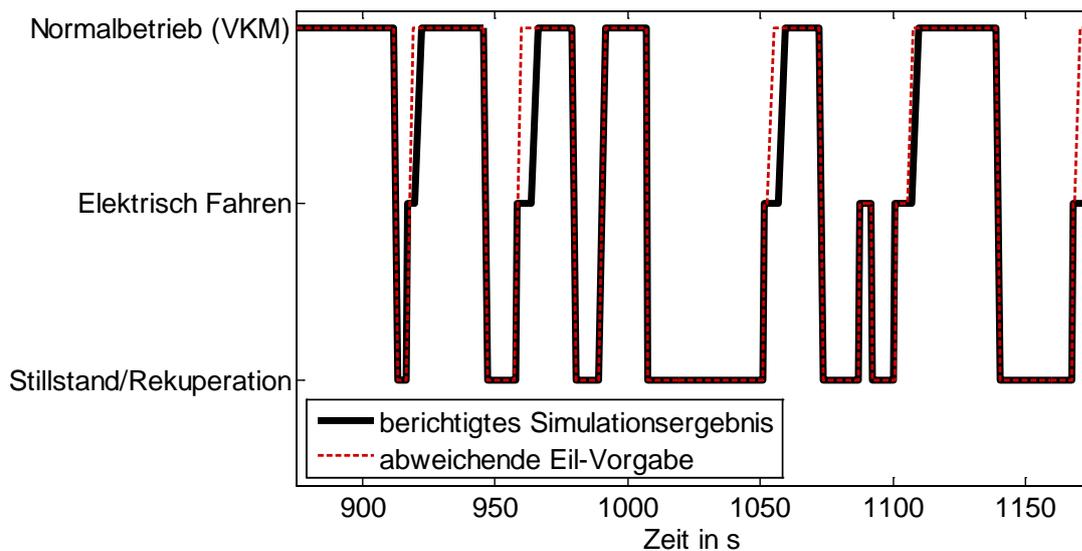


Abbildung 154 – Abweichende Betriebsarten durch Berechnungsfehler (DCT2-SIM, VKM2EVO, Ausschnitt aus FTP72, Strategie Verzicht auf Kriterium)

Hinsichtlich der Ergebnisse kann analysiert werden, ob Abweichungen zu erwarten sind, deren Größenordnungen größer als die der Streuung der Messergebnisse sind. Trifft das nicht zu, können die Messergebnisse für den Vergleich mit der Hochrechnung trotz der Abweichungen verwendet werden.²⁰⁴ Dabei wird die relative Abweichung der Ergebnisse der Hochrechnung aufgrund der gegebenen Ähnlichkeit als repräsentativ für die erwartete Änderung der Messergebnisse bei Verwendung der korrigierten Vorgaben angesehen. Dieses Vorgehen soll nur in Ausnahmefällen angewandt werden, wenn eine Neuvermessung nicht möglich ist und es muss beachtet werden, dass die Ergebnisse dann weniger aussagekräftig sind, wenn sich die Anzahl der Starts der VKM stark ändert. Bei den hier vorgestellten Ergebnissen sind die Abweichungen hinreichend klein.

Außerdem werden in diesem Abschnitt eine Startmomentvorgabenvariation beschrieben und die Abweichungen zwischen den Hochrechnungen und den Messwerten hinsichtlich der Emissionsergebnisse bei den untersuchten Zyklen detailliert analysiert. Diese Analyse wird ebenfalls mit Zyklen auf Basis leicht abweichender Vorgaben durchgeführt.

²⁰⁴ Für die Verbrauchswerte wird die Vergleichbarkeit aufgrund der bisher bei allen Untersuchungen ausgezeichneten Korrelation unabhängig von dieser Bedingung vorausgesetzt.

Ergebnisse entsprechend Kapitel 10.5.5

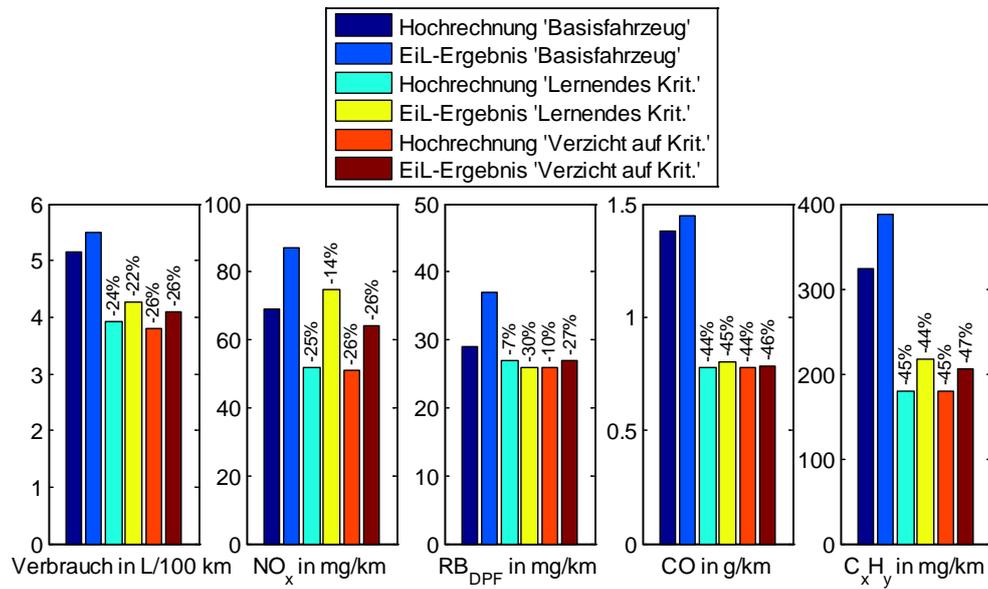


Abbildung 155 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, NEFZ, teilweise näherungsweise umgerechnet)

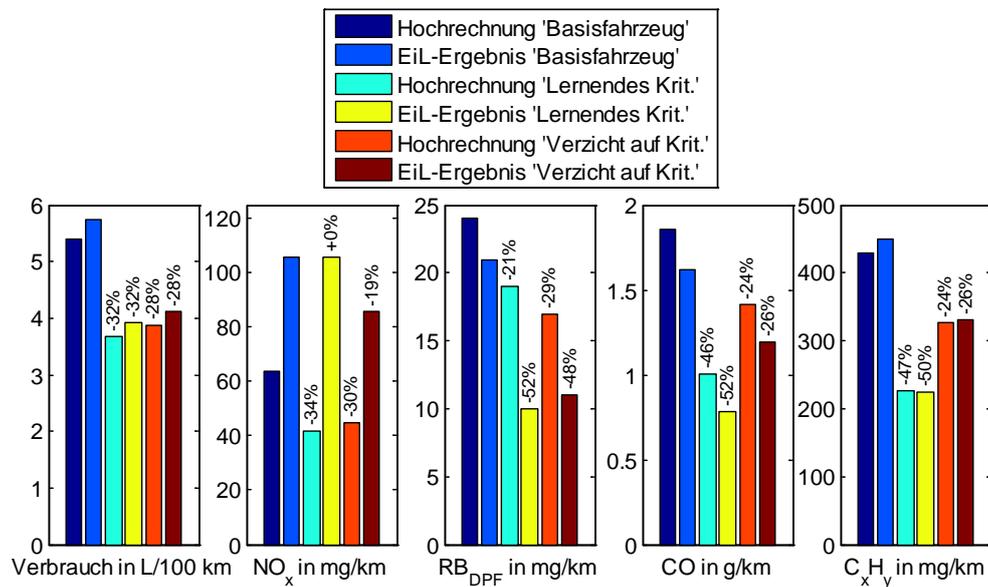


Abbildung 156 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72, teilweise näherungsweise umgerechnet)

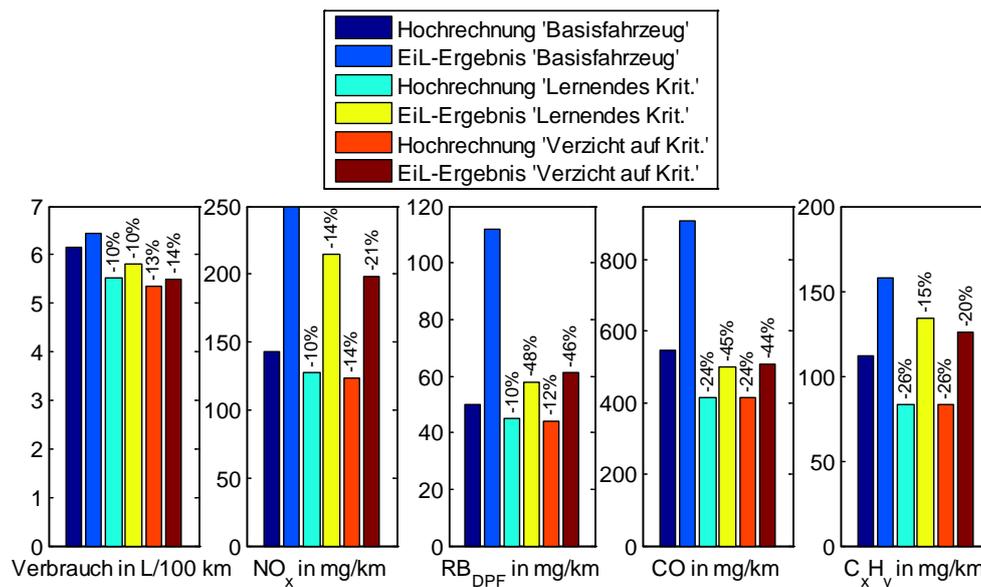


Abbildung 157 – EIL- und Hochrechnungsergebnisse (DCT2-SIM, VKM2EVO, US06, teilweise näherungsweise umgerechnet)

In Abbildung 155 bis Abbildung 157 sind nur die Ergebnisse unter Berücksichtigung der näherungsweise Umrechnungen gemeinsam mit den wiederholten Basisergebnissen enthalten. Für den US06 ist auch das Ergebnis für die Strategie 'Verzicht auf Kriterium' der Vollständigkeit halber wiederholt eingefügt. Die hier als 'Hochrechnung' bezeichneten Ergebnisse beziehen sich auf den berichtigten simulierten Zyklus.

Variation der Startmomentvorgabe

Generell sind die NO_x-Messergebnisse in den dynamischeren Zyklen wie schon bei der Basiszyklusnachbildung teilweise viel höher als die vorausberechneten, wobei sich dieser Effekt noch verstärkt. Eine mögliche Ursache sind die Starts.

Da Relativvergleiche unterschiedlicher Applikationen auch ohne Umrechnungen sinnvoll möglich sind, kann für die Ursachenermittlung darauf verzichtet werden.

Abbildung 158 zeigt, dass die NO_x für drei kurz hintereinander auftretende Beschleunigungen auch abhängig von der Hybridstrategie sind. Dabei sind die Emissionen aber nicht nur beim Start selbst, sondern auch in der anschließenden VKM-Betriebsphase unterschiedlich.

Um zu analysieren, welchen Einfluss die Starteinspritzmenge dabei hat, wird eine Variation der Startmomentvorgabe zur Beeinflussung der Einspritzmenge beim Start durchgeführt.

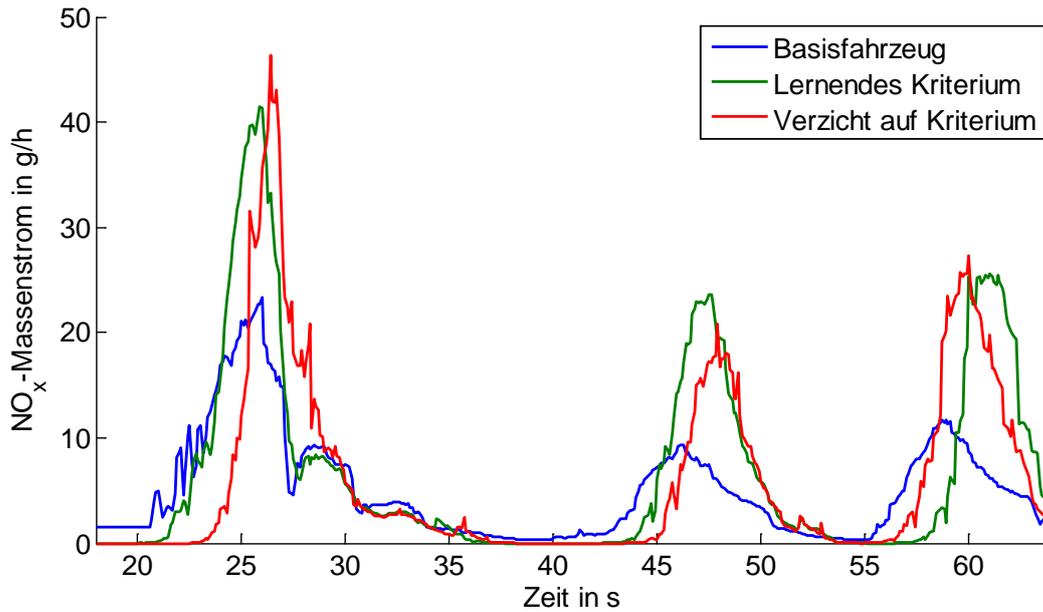


Abbildung 158 – Vergleich der NO_x während Beschleunigungen (DCT2-SIM, VKM2EVO, Ausschnitt aus FTP72)

Die festgestellten Unterschiede sind nicht entscheidend größer als typische Streuungen der Messdaten (Tabelle 34).

Tabelle 34 – EIL-Ergebnisse Startvariation (DCT2-SIM, VKM2EVO, FTP72, Strategie Verzicht auf Kriterium, keine Umrechnung zur Korrektur der nicht exakten EIL-Vorgaben)²⁰⁵

Zyklus	Hybridstrategie	Ergebnisart	NO_x	RB_{DPF}	CO	C_xH_y	Verbrauch
			mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	L/100km
FTP72	Verzicht auf Kriterium	EiL mit Standardstartmoment	97	13	1296	366	4.82
	Verzicht auf Kriterium	EiL mit halbiertem Standardstartmoment	84	-	1243	359	4.74
	Verzicht auf Kriterium	EiL ohne Startmoment	80	-	1212	-	4.72
	Verzicht auf Kriterium	halbiertes Standardstartmoment / Standardstartmoment	86%	-	96%	98%	98%
	Verzicht auf Kriterium	ohne Startmoment / Standardstartmoment	82%	-	94%	-	98%

²⁰⁵ Die fehlenden Ergebnisse für RB und C_xH_y beruhen auf Messsystemausfällen. Aufgrund der geringen Unterschiede bei den anderen Daten und den teilweise verfügbaren zeitaufgelösten Messwerten sind aber keine großen Unterschiede zu erwarten.

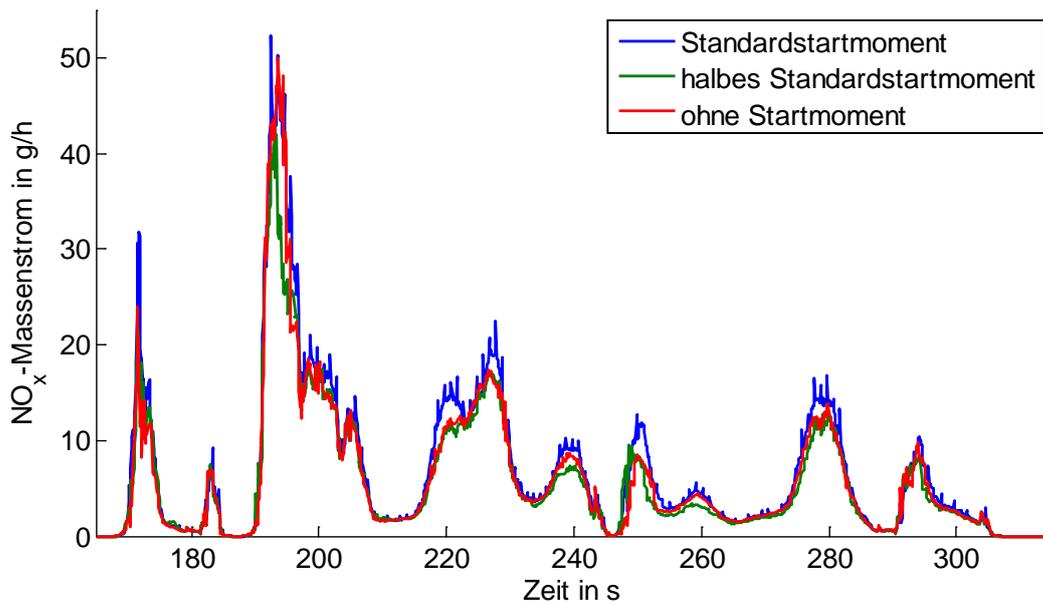


Abbildung 159 – NO_x bei Startmomentvariation (DCT2-SIM, VKM2EVO, Ausschnitt aus FTP72, Strategie Verzicht auf Kriterium)

Die Unterschiede in den NO_x können auch nicht direkt den Startphasen (erkennbar nach den Stillstandphasen ohne Massenstrom) zugeordnet werden, sondern treten unabhängig davon auf (Abbildung 159). Auf eine Änderung der Starteinstellungen wird daher verzichtet, weil sonst auch die vergrößerte Leistungsanforderung an die Starteinrichtung möglicherweise auch näherungsweise nicht mehr vernachlässigt werden dürfte.

Abweichungsanalyse

Die Analyse der NO_x-Abweichungen wird anhand des Basiszyklus durchgeführt, da sie unabhängig von der Hybridisierung mit derselben Größenordnung auftreten. Große Abweichungen (Abbildung 160) können Beschleunigungsphasen mit steigenden Drehzahlen (Abbildung 161) und hohen Drehmomenten (Abbildung 162) zugeordnet werden. Hier könnten sich verschiedene Vereinfachungen negativ auf die Vorhersagegenauigkeit auswirken. Deshalb wird exemplarisch analysiert, wie sich das Ergebnis verändert, wenn man die Trägheit des Antriebsstrangs, die am Prüfstand wirkt, bei der Drehmomenthochrechnung berücksichtigt. Die Trägheit der Konfiguration am Prüfstand kann durch lastfreie Drehzahlrampen mit unterschiedlichen Gradienten näherungsweise bestimmt werden, indem man vom gemessenen Drehmoment den Verlauf des stationären Schleppmoments abzieht und das verbleibende Drehmoment durch die Drehbeschleunigung teilt. Für VKM2EVO ergibt sich ein Trägheitsmoment von 0.4637 kgm². Außerdem können Abweichungen durch die nicht exakte Regelung des Drehmoments am Prüfstand berücksichtigt werden. Abbildung 163 zeigt jedoch, dass diese bewusst in Kauf genommenen Fehler im Verhältnis zu den beobachteten Abweichungen klein sind und daher als Hauptursache ausgeschlossen werden können.

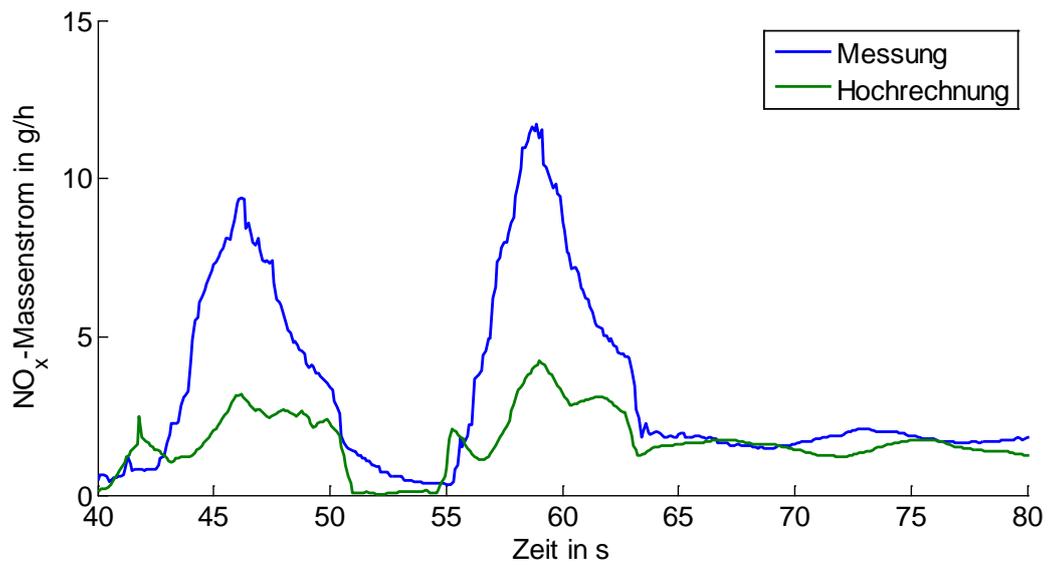


Abbildung 160 – Beurteilung der NO_x-Hochrechnung (DCT2-SIM, VKM2EVO, Ausschnitt aus FTP72, Basisfahrzeug)

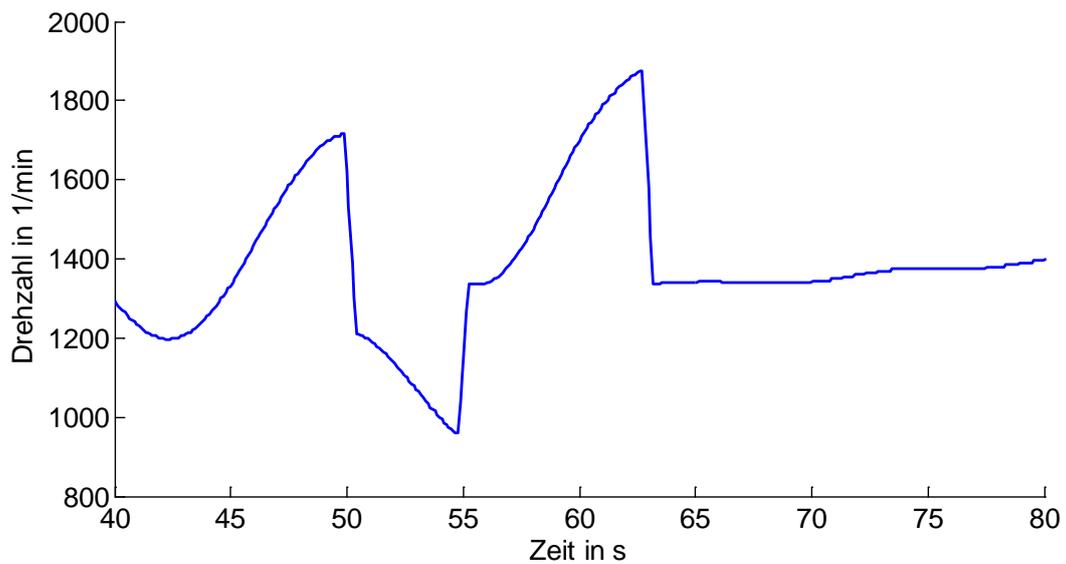


Abbildung 161 – Drehzahlverlauf im Ausschnitt von Abbildung 160

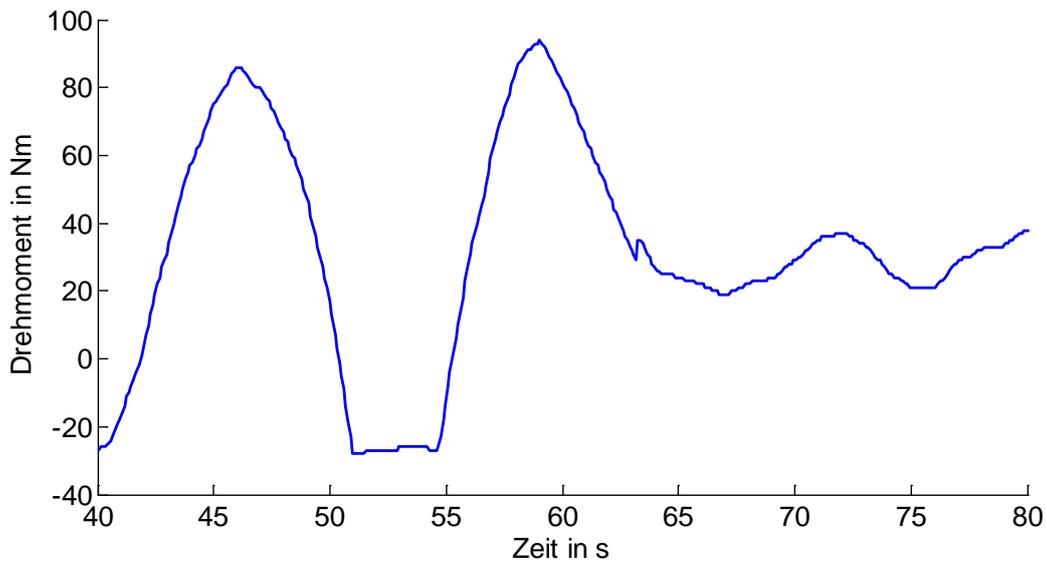


Abbildung 162 – Drehmomentverlauf im Ausschnitt von Abbildung 160

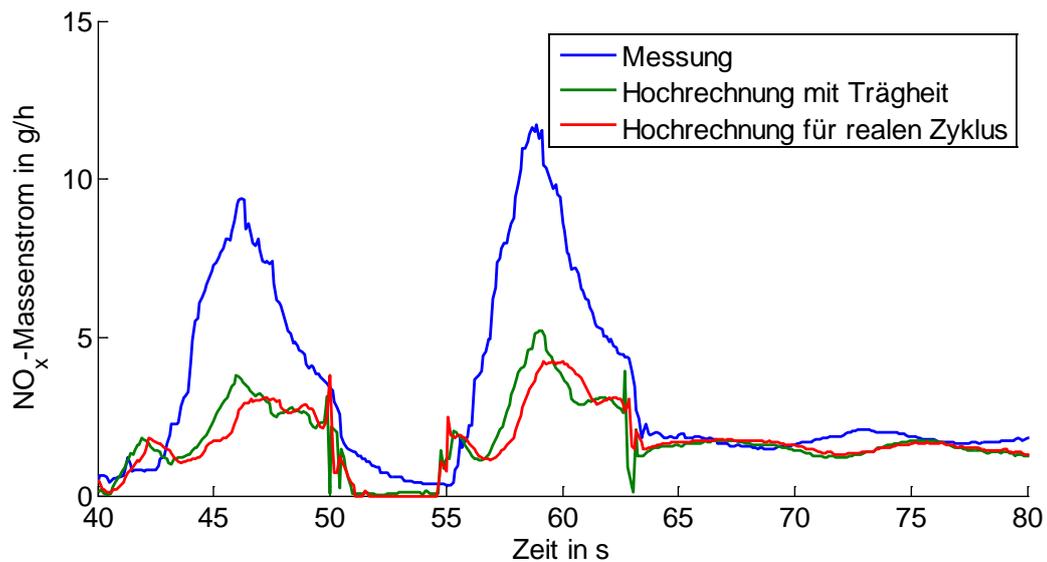


Abbildung 163 – NO_x-Hochrechnung ohne die ursprünglichen Vereinfachungen im Ausschnitt von Abbildung 160

Die wahrscheinlichste Ursache für die Abweichungen liegt in einer Regelabweichung im Luftsystem. Abbildung 164 zeigt, dass der Ladedruck dabei verzögert aufgebaut wird. Anders als bei Systemen mit Hochdruck-AGR ergibt sich dadurch, wenn die Luftmenge richtig eingeregelt wird, eine verringerte AGR-Rate. Bei den hier durchgeführten Messungen wird die Luftmenge ausreichend genau geregelt.

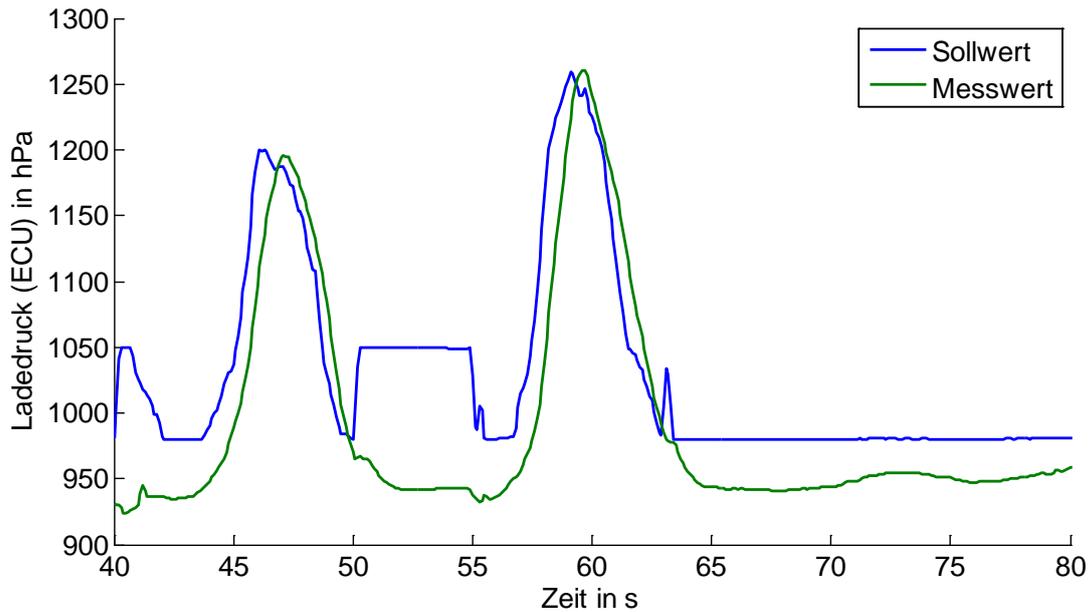


Abbildung 164 – Ladedruckregelung im Ausschnitt von Abbildung 160²⁰⁶

Beim noch dynamischeren US06-Zyklus kommt es sogar dazu, dass aufgrund des Ladedruckdefizits nicht mehr ausreichend Luft zugeführt wird, was auch die dort erhöhten Rußemissionen erklärt. Diese Abweichungen treten bei VKM2EVO verstärkt auf, weil die stationäre Auslegung und Abstimmung sehr stark auf niedrige Emissionen gerichtet ist.

*Fazit zu den Ergebnissen mit leicht abweichenden *EiL*-Vorgaben*

Zusammenfassend gilt, dass die hier vorgestellten Zyklen trotz der abweichenden Simulationsergebnisse Vorhersagen über die erwarteten Emissionen erlauben. Die Starteinspritzmenge ist dabei nicht die Hauptursache für die vermehrten NO_x -Emissionen.

Es kann gezeigt werden, dass die Abweichungen gegenüber der Hochrechnung nahezu unabhängig von der Hybridisierung sind und nur aufgrund des zeitlich relativ häufigeren Instationärbetriebs der VKM bei Hybridfahrzeugen überproportionale Auswirkungen auf die Zyklusergebnisse haben. Als Ursache für die Abweichungen werden Probleme mit der Regelung identifiziert.

²⁰⁶ In den Phasen mit konstanten Sollwerten sind diese und die Abweichungen nicht relevant, weil dort die Regelung nicht aktiv ist.