



Hans-Jürgen Schacht, Diplom-Ingenieur

Entwurf & Untersuchung eines neuartigen elektrischen Antriebs mit VKM-Unterstützung für ein Zweirad-Stadtfahrzeug

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/in

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

Zweitbetreuer/in

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Brasseur
Instituts für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung
Technische Universität Graz

Graz, August 2019



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des durch die FFG¹-Förderschiene geförderten Forschungskonsortiums ECO-Powerdrive am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Dieses befasst sich in diversen Teilprojekten mit der CO₂- und Emissionsreduktion bei Sport- und Freizeitfahrzeugen sowie handgehaltenen Arbeitsmaschinen. Im Teilprojekte „HyScooter“ wurden Verbesserungspotentiale hinsichtlich CO₂ und gesetzlich limitierter Emissionen durch Hybridisierung von L-Kategorie-Fahrzeugen der Klasse L1eB² untersucht. Der Forschungsumfang und das Ergebnis bilden den Inhalt der vorliegenden Arbeit.

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei Univ. Prof. DI Dr. tech. Helmut Eichseder, als Vorstand des Institutes und als wissenschaftlicher Koordinator des gesamten Forschungskonsortiums für die Übernahme der Doktor-Vaterschaft und dem damit ausgedrückten Vertrauen sowie für seine Vorbildwirkung und Geduld bedanken. Auch ergeht mein Dank an Assoc. Prof. DI Dr. tech. Roland Kirchberger als Leiter des Fachbereichs K&A³ und Key-Researcher für seine Unterstützung durch die Teilhabe an seinem fundierten Wissen auf dem Gebiet der Kleinantriebe, insbesondere des Zweitaktmotors. Weiters, möchte ich DI Dr. tech. Stephan Schmidt, Initiator und Koordinator des Forschungskonsortiums, für die Betrauung mit diesem spannenden und auf meine Interessen zugeschnittenem Thema der Hybridisierung sowie das in mich gesetzte Vertrauen und die motivierende Unterstützung meinen tiefsten Dank ausdrücken.

Den wissenschaftlichen Partnern des Institutes für elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung – EMT in Personae Ass. Prof. DI Dr. tech. Hannes Wegleiter und Dr. tech. Bernhard Schweighofer ergeht mein Dank für die Unterstützung in den Sachthemen Batterie und E-Maschinen sowie ihre Diskussionsbereitschaft zum Thema Elektrotechnik.

Auch richtet sich mein Dank an die Industriepartner, Leeb Zweiradhandel, als Initiator des Teilprojektes- HyScooter sowie an BRP-Rotax, in Persona DI Leiber für sein stets motivierendes Interesse am Projektfortschritt als auch an die Lohnerwerke für die Fortführung des Projektes. Ebenso ist den Fördergebern FFG, SFG⁴ und dem Land Oberösterreich zu danken ohne deren Beitrag ein derartiges Forschungskonsortium nicht vorstellbar wäre.

Nicht unerwähnt lassen möchte ich die Kollegen, welche mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Hier ergeht mein Dank an DI Niko Bretterklieber für die Unterstützung an Motoren- und Rollenprüfstand sowie an DI Reinhard Stelzl, welcher das Vorhaben auf der Messtechnikseite sachkundig gefördert hat. Für die Unterstützung bei der Betreuung der am Projekt beteiligten Studenten gebührt mein Dank Herrn Oliver Schögl, für das Teilen seiner Expertise bezüglich Motorprozessrechnung und Strömungs-Simulation, sowie DI Paul Rieger, für seine fachkundige Hilfestellung auf dem Gebiet der Fahrzeug Längsdynamik Simulation.

Weiters möchte ich den Studenten, welche im Rahmen ihrer Studienarbeiten konstruktiv und mit Begeisterung zum Fortschritt des Projektes beigetragen haben, für die gute Zusammenarbeit danken. Es war mir eine Freude sie auf ihrem Weg zu begleiten und hoffe ihnen ihre Rolle und ihren Anteil am Ganzen vermittelt zu haben.

Einen sehr herzlichen Dank verdient Frau Mag. Claudia Melde für ihre unschätzbare Unterstützung bei allen im Zusammenhang stehenden Publikationen.

¹ FFG Forschungs-Förderungs-Gesellschaft

² L1eB Zwei- und dreirädrige Fahrzeuge mit begrenztem Hubraum (50 cm³) und Höchstgeschwindigkeit (45 km/h)

³ K&A Konstruktion und Auslegung

⁴ SFG Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH

Ganz besondere Anerkennung gebührt meiner Familie. Meiner Mutter und Schwester, für ihre Geduld und unerschütterliche Hoffnung. Meiner lieben Frau Michaela und unseren Söhnen, Felix und Gregor, für ihr Verständnis und ihre Entbehrungen während der schriftlichen Abfassung dieser Arbeit. Großer Dank für den festen Glauben an mich und euren bedingungslosen Rückhalt.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinem seligen Vater Ewald Schacht, welcher mir stets Vorbild war und meinen beiden Söhnen, um ihnen in selber Weise Beispiel zu sein.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS	III
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	I
ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT	II
1 EINLEITUNG	1
1.1 FORSCHUNGSFRAGE	1
1.2 ARBEITSPLAN	1
1.3 MOTIVATION	2
1.4 HISTORISCHE BEDEUTUNG UND ENTWICKLUNG	3
1.5 WELTWEITE SITUATION - HEUTE	5
1.6 PROBLEMSTELLUNG	6
1.7 STAND DER TECHNIK	9
1.7.1 <i>Der konventionelle Scooter als Referenz</i>	9
1.7.2 <i>Alternative - Motorisierung mittels Elektroantrieb - EV</i>	17
1.7.3 <i>Scooter mit Hybrid-Antrieb</i>	20
1.8 VORUNTERSUCHUNG - E-SCOOTER VERSUS KONVENTIONELLER SCOOTER	27
1.9 LÖSUNGSANSATZ FÜR DIE L1E FAHRZEUGKLASSE	29
1.10 ZIELSETZUNG	29
2 METHODIK	31
3 GRUNDLAGEN	34
3.1 GESETZLICHE GRUNDLAGEN DER TYPGENEHMIGUNG	34
3.1.1 <i>Fahrzeugeinstufung</i>	34
3.1.2 <i>Anforderungen</i>	34
3.1.3 <i>Test-Typen</i>	35
3.2 MECHANISCH-ELEKTRISCHE ENERGIEWANDLUNG	39
3.2.1 <i>Wirkungsweise</i>	39
3.2.2 <i>Verluste</i>	42
3.2.3 <i>Maschinen</i>	42
3.3 CHEMISCH-MECHANISCHE ENERGIEWANDLUNG/ VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINE	44
3.3.1 <i>Mitteldruck</i>	44
3.3.2 <i>Leistung</i>	44
3.3.3 <i>Drehmoment</i>	45
3.3.4 <i>Wirkungsgrad</i>	45
3.3.5 <i>Spezifischer Kraftstoffverbrauch be</i>	45
3.3.6 <i>Gemischheizwert</i>	46
3.3.7 <i>Luftaufwand</i>	47
3.3.8 <i>Lastregelung</i>	48
3.3.9 <i>Schadstoffbildung</i>	49
3.3.10 <i>Zündgrenzen des Kraftstoffs</i>	49
3.3.11 <i>Zündung</i>	49
3.3.12 <i>Verbrennungsgeschwindigkeit</i>	51
3.3.13 <i>Verluste</i>	51
3.4 ELEKTROCHEMISCHER ENERGIESPEICHER	53
3.4.1 <i>Begriffsbestimmung</i>	53
3.4.2 <i>Batterie-Modell</i>	55
3.4.3 <i>Batteriebedingte Einflussfaktoren [vgl. 64, 65, 66]</i>	56
3.4.4 <i>Ladeverfahren</i>	57
4 ENTWURFSPROZESS	58
4.1 GESAMTSYSTEM – HYBRIDFAHRZEUG	58
4.1.1 <i>Anforderungen</i>	58
4.1.2 <i>System Entwurf & Auslegung</i>	60

4.1.3	<i>Systemauslegung</i>	61
4.1.4	<i>Wirkungsgradanalyse</i>	63
4.2	SUBSYSTEME.....	69
4.2.1	<i>Elektrischer Antriebsstrang & Fahrzeug</i>	69
4.2.2	<i>Batterie</i>	70
4.2.3	<i>Rein elektrische Fahrzeugbasis</i>	70
4.2.4	<i>Der Range Extender</i>	72
4.3	KOMPONENTENEBENE.....	76
4.3.1	<i>Generator</i>	76
4.3.2	<i>Verbrennungsmotor</i>	89
4.3.3	<i>Mechanische Koppelung und Packaging [76]</i>	106
4.3.4	<i>Steuerung</i>	108
4.3.5	<i>Hybrid-Fahrzeugsystem</i>	113
5	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	122
5.1	INTEGRATIONSTEST.....	122
5.1.1	<i>Versuchsaufbau</i>	122
5.1.2	<i>Durchführung</i>	122
5.1.3	<i>Ergebnis</i>	123
5.2	MODULTEST.....	124
5.2.1	<i>Versuchsanordnung</i>	124
5.2.2	<i>Durchführung</i>	124
5.2.3	<i>Ergebnis</i>	124
5.3	SYSTEMTEST.....	124
5.3.1	<i>Ziel</i>	124
5.3.2	<i>Versuchsaufbau</i>	125
5.3.3	<i>Durchführung</i>	125
5.3.4	<i>Versuchs- Ergebnis - V1</i>	126
5.4	ABNAHMETEST.....	128
5.4.1	<i>Versuchsaufbau</i>	129
5.4.2	<i>Durchführung</i>	129
5.4.3	<i>Zyklus-optimale Betriebsstrategie</i>	129
5.4.4	<i>Experimentelle Ergebnisse – V2</i>	132
5.5	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	134
5.5.1	<i>Rechnerische Implementierung einer virtuellen Abgasnachbehandlung</i>	134
6	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	142
6.1	ERFÜLLUNGSGRAD DER EMISSIONSANFORDERUNGEN.....	142
6.2	CO ₂ REDUKTIONSZIEL.....	142
6.3	KONSEQUENZEN.....	142
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	144
7.1	HYBRIDISIERUNG.....	144
7.2	SERIELLE KONFIGURATION.....	144
7.3	ÜBERTRAGBARKEIT.....	147
7.3.1	<i>Höhere Leistungsklasse</i>	147
7.3.2	<i>Andere Motorkonzepte</i>	147
7.3.3	<i>Li-Ionen Batterie</i>	148
8	AUSBlicKE	149
8.1	KONSTRUKTION.....	149
8.2	WEITERE ANWENDUNGSBEREICHE.....	153
9	WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN UND PUBLIKATIONEN	154
9.1	BACHELOR- UND PROJEKTARBEITEN.....	154
9.2	DIPLOM UND MASTERARBEITEN.....	154
9.3	WISSENSCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN IM ZUSAMMENHANG MIT DIESER ARBEIT.....	154
9.4	MEDIEN PUBLIKATIONEN IM ZUSAMMENHANG MIT DIESER ARBEIT.....	155
9.5	VORTRÄGE.....	155
9.6	PATENT.....	155
10	LITERATURVERZEICHNIS	156

11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	162
	ANHANG	166
	GESETZLICHE GRUNDLAGEN	166

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
b_e	g/kWh	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	m/s	Geschwindigkeit
C	C/V	Kapazität
C	div	Konstante
d	m	Durchmesser
d	–	relative Dichte, bei Gasen: $d = \rho / \rho_{\text{Luft}}$
E	J	Energie; Exergie
E	V	Zellspannung, elektrisches Potential, elektromotorische Kraft
f	s^{-1}	Frequenz
F	N	Kraft
g	m/s^2	örtliche Fallbeschleunigung
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
H_G	MJ/m^3	Gemischheizwert
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (früher: unterer Heizwert)
I	A	Stromstärke
k	m^2/s^2	turbulente kinetische Energie
l	m	Länge
L	kmol L/kmol B oder kg L/kg B	Luftmenge
L_{min}	kmol L/kmol B oder kg L/kg B	Mindestluftbedarf
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M_d	$\text{N}\cdot\text{m}$	Drehmoment
O_2	$\text{kmol O}_2/\text{kmol B}$	Sauerstoffmenge (auch: $\text{kg O}_2/\text{kg B}$)
$O_{2\text{min}}$	$\text{kmol O}_2/\text{kmol B}$	Mindestsauerstoffbedarf (auch: $\text{kg O}_2/\text{kg B}$)
p	bar, Pa	Druck
p^0	bar, atm	Standarddruck / $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ häufig auch $p^0 = 1 \text{ bar}$
p_i	bar	indizierter Mitteldruck
P	$(\text{k})\text{W}$	Leistung
Q	C	elektrische Ladung
R	Ω	elektrischer Widerstand
t	$^\circ\text{C}$	Celsius-Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
U	V	elektrische Spannung
V	m^3	Volumen
W	J	Arbeit

Griechische Formelzeichen

α	W/(m ² ·K)	Wärmeübergangskoeffizient
α	° ; rad	Winkel
ε	–	Leistungszahl; Verdichtungsverhältnis
η	–	Wirkungsgrad
$\eta_e ; \eta_i$	–	effektiver; innerer Wirkungsgrad
η_m	–	mechanischer Wirkungsgrad
η_g	–	Gütegrad
η_{th}	–	thermodynamischer Wirkungsgrad
η_v	–	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors
κ	–	Isentropenexponent
λ	–	Luftverhältnis Lambda
v	–	Geschwindigkeitsfunktion
ρ	kg/m ³	Dichte
τ	s	Zeit, Periodendauer
φ	° KW	Kurbelwinkel
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
$\phi = 1/\lambda$	–	Equivalence Ratio

Weitere Indices und Abkürzungen

1D	Eindimensional
3D	Dreidimensional
abs	Absolut
AGB	äußere Gemischbildung
ASM	Asynchron Maschine
chem	chemisch
CFD	Computational Fluid Dynamics
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
e	elektrisch
engl	Englisch
EB	Einspritzbeginn bzw. Einblasebeginn
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)
EMK	Elektromotorische Kraft
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschafts-Gemeinschaft
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FSM	Fremderregte Synchron Maschine
GB	Gemischbildung
h	Hubraum (des Zylinders)
ISO	International Organization for Standardization
konst	Konstant
LDynRwSim	Längsdynamik-Rückwärts-Simulation
LDynVwSim	Längsdynamik-Vorwärts-Simulation
MBr	Abtriebsdrehmoment

mech	mechanisch
OT	oberer Totpunkt
ÖNORM	Österreichische Norm
PKW	Personenkraftwagen
PMSM	Permanentmagneterregte Synchron Maschine
REX	Range Extender
st	stöchiometrisch; Stoff
t	transportiert, turbulent, technisch
u	untere, Umgebung
UN	United Nations
vol	Volumetrisch
zu	zugeführt(e) (Wärme)
zul	Zulässig

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. Das in TUGRAZ online hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present dissertation.

Hans-Jürgen Schacht

Graz, 28.08.2019

Zusammenfassung

Im Rahmen des FFG-geförderten und der Ökologisierung von Kleinantrieben gewidmeten Forschungskonsortiums ECO-Powerdrive wird im Projekt HyScooter die Hybridisierung des Antriebsstrangs unter den herausfordernden Randbedingungen der sehr kostensensitive Fahrzeugklasse L1eB⁵ behandelt.

Ziel ist es, durch Hybridisierung einen Antriebsstrang zu schaffen, der die Anforderungen, welche sich aus der stetig strenger werdenden Abgasgesetzgebung ergeben, zukunftsfähig erfüllt. Hierzu ist eine geeignete Hybridvariante zu ermitteln, welche die Anforderungen im Rahmen der definierten Randbedingungen erfüllt. Die Evaluierung des Konzeptes mittels Längsdynamik-Rückwärts-Simulation ergibt, dass ein serieller Hybrid mit Range Extender mit reduzierter Batteriegröße und bei bestimmter Betriebsweise das CO₂-Reduktionspotential unter Einhaltung des Kostenkriteriums aufweisen kann. Dieses Hybridsystem wird zum experimentellen Nachweis in einem Demonstrator-Fahrzeug umgesetzt. Das bedingt einen Entwicklungsprozess, welcher mit Hilfe des V-Modells geplant und durchgeführt wird. Es werden für jede Ebene Anforderungen aufgestellt, welche es im nachfolgenden Entwurf zu erfüllen gilt. Hierbei wirkt sich das generell gültige Kostenkriterium sowohl auf die Auswahl der Komponenten als auch auf die Art der Steuerung aus. So werden bestehende Komponenten aus Massenfertigung bevorzugt, welche dennoch die teils sehr spezifischen Anforderungen erfüllen. Als Verbrennungsmotor kommt ein Zweitaktmotor der Emissionsstufe EURO 2 und als Generator eine fremderregte Synchronmaschine – Lichtmaschine zum Einsatz. Da die beabsichtigten Emissions- und CO₂-Vorteile einer bestimmten Betriebsweise des Hybridsystems bedürfen, ist hierfür eine Hybridsteuerung zu entwerfen. Als besondere Herausforderung gilt, dass bei leerer Batterie eine Weiterfahrt in der Ebene ohne Einschränkung der Höchstgeschwindigkeit möglich sein muss.

Der Entwurf der Steuerung erfolgt iterativ in zwei Ansätzen. Der erste Ansatz ist ein selbstregelndes Konzept, das einen minimalen Steuerungsaufwand darstellt. Zur Evaluierung wird eine Längsdynamik-Vorwärts-Simulation eingesetzt, welche die Charakterisierung und Modellierung aller Systemkomponenten – Batterie, Fahrzeug, E-Antriebsmotor – sowie der Komponenten des Range Extenders erfordert. Die Ergebnisse der Evaluierung dienen der Formulierung weiterer Anforderungen.

Der zweite Ansatz ist ein gesteuertes Konzept. Der Entwurf und die Umsetzung unterliegen sowohl den bestehenden Kriterien nach reduzierter Komplexität und Kosten als auch den erweiterten Anforderungen. Unter diesen Randbedingungen wird eine neuartige Hybridsteuerung entwickelt, welche die Funktion des Range Extenders nur anhand der Systemspannung steuert und eine Add-On Lösung für jegliche elektrische Fahrzeugbasis darstellt. Als Besonderheit dieser Steuerung ist der drehzahlkonstante Betrieb des Range Extenders in zwei diskreten Leistungsmodi zu nennen. Dieser erweist sich im Zuge der experimentellen Untersuchung als vorteilhaft, sowohl hinsichtlich Betriebsstabilität und Emissionsverhalten als auch hinsichtlich NVH⁶-Maßnahmen und Optimierungspotential. Beim Abnahmetest kann der Nachweis erbracht werden, dass mit diesem Hybridsystem und einem Oxidation-Katalysator, mit reduzierten Anforderungen an Light-off und Konvertierungsraten, die Emissionsstufe EURO 4 auf Antrieb erfüllt werden kann. Aus einer Vorausberechnung ergibt sich, dass mit höheren, durchaus realisierbaren Anforderungen an die Abgasnachbehandlung das Potential besteht, auch die mit 1.1.2020 inkrafttretende Emissionsstufe EURO 5 erfüllen zu können.

⁵L1eB Zwei- und dreirädrige Fahrzeuge mit begrenztem Hubraum (50 cm³) und Höchstgeschwindigkeit (45 km/h)

⁶ NVH Noise Vibration and Harshness

Abstract

As part of the FFG-funded ECO-Powerdrive research consortium dedicated to the greening of small drives, the HyScooter project will address powertrain hybridization under the challenging conditions of the very cost-sensitive L1eB vehicle class.

The aim is to create a powertrain through hybridization, which meets the requirements resulting from the increasingly stringent emissions legislation in a sustainable way. For this purpose, a suitable hybrid variant is to be determined which meets the requirements within the framework of the defined boundary conditions. The evaluation of the concept by means of longitudinal dynamics-backward simulation shows that a serial hybrid with a range extender with a reduced battery size and, in the case of a certain mode of operation, the CO₂ reduction potential can comply with the cost criterion. This hybrid system is implemented for experimental detection in a demonstrator vehicle. This requires a development process, which is planned and executed with the help of the V-Modell. Requirements are set for each level, which must be fulfilled in the following draft. In this case, the generally valid cost criterion affects both the selection of the components and the type of control. So existing components from mass production are preferred, which nevertheless meet the sometimes very specific requirements. The internal combustion engine is a two-stroke engine with emission level EURO 2 and a generator with a separately excited synchronous machine - alternator. Since the intended emissions and CO₂ benefits require a particular mode of operation of the hybrid system, a hybrid controller should be designed for this purpose. A special challenge is that even when the battery is empty, it must be possible to continue driving on flat track at the limited the maximum speed of 45 km/h.

The design of the control is iterative in two approaches. The first approach is a self-regulating concept that represents minimal control effort. For evaluation, a longitudinal dynamics forward simulation is used, which requires the characterization and modeling of all system components - battery, vehicle, electric drive motor - as well as the components of the range extender. The results of the evaluation serve to formulate further requirements.

The second approach is a controlled concept. The design and implementation are subject to the existing criteria of reduced complexity and cost as well as the extended requirements. Under these constraints, a novel hybrid controller is developed that controls the function of the range extender based solely on the system voltage and provides an add-on solution for any electric vehicle base. A special feature of this control is the speed-constant operation of the range extender in two discrete power modes. This proves advantageous in the course of the experimental investigation, both in terms of operational stability and emission behavior as well as in terms of NVH measures and optimization potential. In the acceptance test, it can be proven that with this hybrid system and an oxidation catalytic converter, with reduced requirements for light-off and conversion rates, the emission level EURO 4 can be fulfilled right away. The results from a pre-calculation show that with higher but feasible requirements for the exhaust aftertreatment the potential persists to meet even with emission level EURO 5 coming into force 1.1.2020.

1 Einleitung

Diese Arbeit wird im Rahmen des Forschungskonsortiums ECO-Powerdrive [1] durchgeführt. Das übergeordnete Ziel des Projektes ECO-Powerdrive ist es, einen signifikanten Beitrag zur Ökologisierung von Kleinmotorenanwendungen in Arbeitsgeräten, 2-Rädern, Freizeitfahrzeugen sowie verwandten Produkten zu leisten. Das Forschungsprogramm konzentriert sich auf die Entwicklung von Technologien zur Minimierung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen sowie auf die Untersuchung von Hybrid-Konzepten.

Die Untersuchung der Hybrid-Konzepte wird im Teilprojekt „HyScooter“ auf Basis der Zweirad-Fahrzeugklasse L1eB behandelt und bildet den Umfang der vorliegenden Arbeit.

1.1 Forschungsfrage

Um die zukünftigen Emissionsvorschriften der Fahrzeugklasse L1e bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit einhalten zu können, müssen neue Lösungen für die Antriebe dieser Klasse gefunden werden. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von elektrischen Antrieben, welche für eine erweiterte Reichweite durch kleine Verbrennungskraftmotoren unterstützt werden. Die Forschungsfrage lautet:

Kann ein solches Hybridsystem unter den für diese Fahrzeugklasse strikten Randbedingungen hinsichtlich Kosten, Bauraum und Gewicht dargestellt werden und sowohl die Zulassungsbedingungen erfüllen als auch einen Beitrag zur CO₂ Reduktion leisten?

1.2 Arbeitsplan

In der vorliegenden Arbeit werden eingangs sowohl die gesetzlichen als auch marktorientierte Rahmenbedingungen zur Formulierung von Anforderungen erhoben. Darauf folgt die Konzeptphase in welcher unterschiedliche Hybridisierungsansätze hinsichtlich dieser Anforderungen evaluiert werden. Eine serielle Plug-in-Hybrid-Konfiguration erweist sich unter Einbeziehung einer besonderen Betriebsstrategie in der Vorausberechnung mittels Längsdynamik Rückwärts Simulation als vielversprechendes Konzept zur CO₂-Reduktion. Zur Validierung des Simulationsergebnisses wird ein solches Hybridsystem entworfen, ausgelegt und in einem Versuchsträger umgesetzt. Im Zuge der Erschaffung dieses Versuchsträgers wird das V-Modell als Produktentwicklungsmethodik angewandt. Als eine vorhandene Eingangskomponente wird ein am Markt verfügbares, rein elektrisches Fahrzeug ausgewählt. Dieses wird jedoch zur Erfüllung des Kostenkriteriums bzw. zur Kompensation der zusätzlichen Aufwände für die Hybridisierung hinsichtlich der Batteriegröße modifiziert.

Der Entwicklungsprozess des Hybridsystems umfasst die Auswahl jeglicher Einzelkomponenten des chemisch-elektrischen Energiewandlers, dessen Auslegung und Aufbau sowie dessen Integration in die rein elektrische Fahrzeugbasis. Der zum Betrieb des Hybridfahrzeuges notwendigen Steuerung kommt besondere Bedeutung zu, da sie im erheblichen Maß für die Systemeffizienz verantwortlich ist. Es werden verschiedene Steuerungsvarianten mit steigender Komplexität zunächst simulatorisch aber auch experimentell untersucht. Hierbei konnte eine neuartige und mittlerweile patentierte Steuerungsvariante entworfen und umgesetzt werden.

Der somit komplettierte Versuchsträger wird experimentell am Fahrzeugrollenprüfstand sowohl zum Zwecke der Modellvalidierung hinsichtlich CO₂-Reduktion als auch zur Überprüfung des Abgasverhaltens untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung dienen dem Nachweis der geforderten EURO 4 Emissionsstufe als auch der Vorausberechnung der zukünftigen EURO 5 Emissionsstufe. Hierzu werden auf Basis der gemessenen verdünnten Rohabgase (ohne Abgasnachbehandlung) Katalysatoreigenschaften für die jeweils notwendige Abgasnachbehandlung abgeleitet.

Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich Zielerfüllung und Konsequenzen, gefolgt von Schlussfolgerungen hinsichtlich relevanter Kriterien sowie der Übertragbarkeit auf andere Fahrzeugkategorien und Batteriesysteme.

Ausblicke beschließen diese Arbeit und nennen weitere mögliche Anwendungsgebiete für das im Zuge der Forschungstätigkeit entstandene System.

1.3 Motivation

Die jüngste rasante Entwicklung der Abgasgesetzgebung, aber besonders die dabei lange unbeachtet gebliebene Kategorie L, welche zwei- drei- und vierrädrige Fahrzeuge bis zu 600 kg Gewicht umfasst, erzeugt heute eine Situation, die befürchten lässt, dass zumindest die untere Klasse L1e dieser Fahrzeugkategorie existentiell bedroht ist. Die Fahrzeugklasse L1e stellt die kleinste Klasse in der Fahrzeugkategorie L dar. Sie ist unterteilt in die Unterklassen L1eA für Motorfahräder und L1eB für Kleinkrafträder mit einem Hubraum von nicht mehr als 50 cm³ und einer Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h sowie einer maximalen Leistung von 4kW. Diese Geschwindigkeits- und Leistungsbegrenzung dieser Fahrzeugklasse bedingen, im Zuge der immer strenger werdenden Abgasgesetzgebung, die Umstellung auf einen rein elektrischen Antrieb. Die Eignung dieser fast geräuschlos und lokal emissionsfreien Fahrzeuge ist für den individuellen urbanen Nahverkehr hervorragend, konterkariert sie doch die auffälligsten negativen Eigenschaften konventioneller Kleinkrafträder, Emissionen und Geräusch. Rein elektrische Varianten haben den Markt bereits erreicht, jedoch fehlt es ihnen durch den vergleichsweise hohen Anschaffungspreis und der Unsicherheit hinsichtlich der begrenzten Reichweite an Akzeptanz beim Kunden. Der Ansatz, der geringen Reichweite mittels Hybridisierung zu begegnen, scheint, besonders in diesem preissensiblen Fahrzeugsegment und angesichts der damit verbundenen zusätzlichen Kosten, widersprüchlich. Es gilt folglich ein Hybridsystem zu definieren, welches zu marktakzeptablen Kosten und in Hinblick auf bevorstehende Emissionsstufen zukunftsfähig ist. Nur durch Marktakzeptanz lässt sich das Verbesserungspotential ausschöpfen, wobei hier die Devise gilt, dass viele kleine Beiträge zur Emissionsreduktion mehr bewirken können als wenige große. Es sei hier exemplarisch das Hybrid-SUV oder das Hybrid-Supersportscar erwähnt, deren Beitrag zur globalen Emissionsreduktion eher untergeordnet ist.

Die besondere Herausforderung besteht darin, einen Mehrwert ohne Mehrkosten zu generieren. Auch die Re-Implantation der in diesem Bereich in Verruf geratenen Verbrennungskraftmaschine in ein als lokal emissionsfrei geltendes Elektrofahrzeug muss mit Bedacht erfolgen. Die zu erfüllenden Anforderungen sind folglich nicht nur rechtlicher und marktwirtschaftlicher Natur, sondern beinhalten auch sozio-ökologische Aspekte.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich die öffentliche und politische Euphorie für die Elektromobilität auf die PKW-Sparte konzentriert. So wird die zum Betrieb notwendige Infrastruktur in Form von zugänglichen Lademöglichkeiten heute von politischer Seite ausschließlich dem PKW zugeordnet. Geförderte autobahnahe Schnellladestationen verfehlen das eigentliche Ziel, die wachsenden Ballungsräume von Verkehrs-, Lärm- und Abgasbelastung zu entlasten. Innerstädtische Durchschnittsgeschwindigkeiten von unter 25 km/h und Fahrzeugbelegungen von durchschnittlich 1,5 Personen je PKW in Deutschland zeigen [2], dass der PKW in diesem Umfeld missbräuchlich verwendet wird. Kleinere Fahrzeuge, die den ohnehin knappen Verkehrs- und Parkraum besser ausnutzen [3] und dabei mehr Nutzmasse im Verhältnis zum Fahrzeuggewicht transportieren, hätten auch ohne alternativen Antrieb Vorteile. Fokussiert man die Möglichkeiten, die sich durch die Fahrzeugklasse L ergeben, wird der Entwicklungsbedarf schnell deutlich. Dabei sind nicht alle Varianten gleichermaßen geeignet. Motoräder sind mit ihrer Auslegung als leistungsstarkes Freizeitmobil weniger geeignet für eine Schadstoff- und CO₂ Minderung als das leistungsbegrenzte und auf den urbanen Einsatz zugeschnittene Kleinkraftrad.

1.4 Historische Bedeutung und Entwicklung

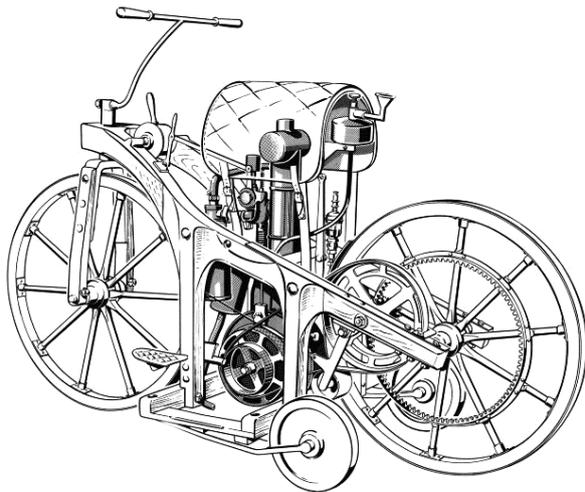


Abbildung 1: Der Reitwagen von Gottlieb Daimler 1885 [4]

Das Zweirad hat wohl die längste Geschichte aller Mobilitätsformen. So begann alles zunächst unmotorisiert mit dem Laufrad. Mit der Anbringung einer achsfesten Kurbel am Vorderrad war das Hochrad geboren. Die Ergänzung um eine Kraftübertragung von der durch den Fahrer betätigten Kurbel auf das Hinterrad brachte das Fahrrad hervor.

Als erstes mit Verbrennungsmotor betriebenes Fahrzeug gilt der 1885 durch Gottlieb Daimler patentierte Reitwagen (Abbildung 1). Er würde heute der Fahrzeugklasse L zugeordnet werden.

Erstmals wird das Kleinkraftrad in §27 des Gesetzes über den Verkehr von Kraftfahrzeugen vom 3. Mai 1909 erwähnt und in der Fassung vom 21. Juli 1923 in § 41 anhand der Radgröße und Motorleistung in Kategorien eingeteilt. Ab 1928 wurde erstmals der Hubraum auf 200 cm³ begrenzt, was im Zuge der Weltwirtschaftskrise ab 1929 keine Nachteile hatte. Man war froh über leistbare Fahrzeuge. Ab 1938 wurde zum Betrieb eine Fahrerlaubnis notwendig. Nach dem Zweiten Weltkrieg war es deutschen Herstellern durch den Beschluss des alliierten Rates nicht erlaubt, Fahrzeuge mit einem Hubraum von mehr als 40 cm³ anzubieten. Diese Hubraumbeschränkung ließ die Entscheidung der Hersteller zugunsten des Zweitaktmotors ausschlagen, welcher selbst aus so geringem Hubraum ausreichend Leistung für den Antrieb eines Zweirads generieren konnte und somit auf lange Sicht dessen dominantes Antriebsaggregat wurde. Abermals war man in der Not der Wiederaufbauphase dankbar für einfache und günstige Fortbewegungsmittel. In der Zeit des darauffolgenden Wirtschaftswunders der 50er Jahre wurden die 40 cm³ Beschränkungen gelockert und die Nachfrage nach Kleinkrafträdern sank zugunsten der in den größeren Klassen beheimateten Motorrädern und Motorrollern mit mehr als 125 cm³. Besonders Letztere brachten Innovationen mit sich. So besaß der von 1954 bis 1957 gebaute Motorroller „DKW Hobby“ bereits ein stufenloses Riemengetriebe (System Uher) [5], wie es sich in ähnlicher Form noch heute in Scooter-Fahrzeugen aller Hubraumklassen großer Beliebtheit erfreut. Dennoch wurde mit Inkrafttreten der neuen Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung und der Straßenverkehrs-Ordnung vom 24. August 1953 [6] erstmals das „Fahrrad mit Hilfsmotor“ gesetzlich als Zweirad mit maximal 50 cm³ Hubraum und maximal 33 kg Gewicht definiert. Die Gewichtsbeschränkung wurde aber durch Hersteller (Kreidler) bewusst missachtet, wodurch sich der Gesetzgeber im Zugzwang sah und in der Folge die fahrerlaubnispflichtige Klasse „Kleinkrafträder“ einführte. Dieser Rechtsakt wurde als „Lex Kreidler“ [7] bekannt. Ab 1960 entbrannte unter den Herstellern der Wettstreit um Motorleistung, was abermals den Zweitaktmotor bevorzugte und zur Klasse der „offenen Kleinkrafträder“ führte. Durch die hohen Rauch- und Schadstoffemissionen dieser gemischgeschmierten leistungsgesteigerten Zweitaktmotoren reagierte der Gesetzgeber. Vorreiter war hierbei Österreich mit der Kraftfahrzeug-Durchführungs-Verordnung KDV 1967 [8] von der sich Passagen noch heute in den europäischen Richtlinien wiederfinden. Die Einführung der KDV kam nicht ganz uneigennützig zum Schutz des österreichischen Herstellers Puch und des heimischen Marktes zustande. Puch hatte sich bereits frühzeitig mit der Emissionsproblematik auseinandergesetzt und konnte Fahrzeuge anbieten, die ein deutlich besseres Emissionsverhalten aufwiesen. Es

wurden am Zweitaktmotor bereits eine asymmetrische Spülung durch Doppelkolbenmotoren sowie Vorläufer des Magerbrennverfahrens umgesetzt. Auch der erste Einsatz eines Katalysators erfolgte 1985 an einem Modell Puch Super Maxi [9], allerdings in einer Phase als die Branche erstmals Konkurrenz aus Japan bekam. Das Puch-Werk musste 1987 seine Pforten schließen, wobei die Fahrrad-Sparte und die Markenrechte durch den italienischen Hersteller Piaggio übernommen wurden. Die Ölkrise in den 70ern hatte zuvor sogar in den USA, einem Markt der wahrlich keine Affinität zu kleinen Motoren hat, für steigende Verkaufszahlen gesorgt. Es konnten 230.000 Fahrzeuge zwischen 1970 und 1977 abgesetzt werden. Nach überwundener Ölkrise war das Interesse wieder auf den PKW gerichtet und die Branche schrumpfte in Europa auf wenige Hersteller. Übrig blieben Piaggio, welche namhafte Hersteller wie Puch, Gilera, Derbi, Aprilia, und weitere unter sich vereinte, sowie Peugeot. [10]

Ab Mitte der 50er hatten asiatische Hersteller Anleihen bei europäischen Fabrikaten genommen und zunächst den eigenen Wirtschaftsraum bedient. In den frühen 70ern waren japanische Hersteller in der Lage, mit Viertakt-Motorrad-Eigenentwicklungen den Re-Import nach Europa zu wagen. In den späten 80ern waren dies leicht zu bedienenden Zweitakt-Scooter-Fahrzeuge mit Durchstieg, Trittbrett und stufenloser Riemenautomatik. Diese trieben die Verkaufszahlen wieder in die Höhe, brachten jedoch keine motorischen Neuerungen und fielen abermals durch schlechtes Emissionsverhalten auf. Die mittlerweile entstandene EWG⁷, welche im Zuge der Marktangleichung mit 45 km/h eine Kompromisslösung für die vormals divergierenden Bestimmungen zur Höchstgeschwindigkeit mit 40km/h in Deutschland und 50 km/h in Frankreich gefunden hatte, erkannte das Problem und verabschiedete Emissionsgesetze, welche das Inverkehrbringen dieser Fahrzeuge in Europa regeln sollte. Die daraus entstandene Regelung 97/24/EG [11] war umfassend und legte neben Konstruktionsmerkmalen auch Grenzwerte für limitierte Abgaskomponenten (CO, HC+NO_x) fest. EURO 1 trat mit Stichtag 17.6.1998 in Kraft. Dabei wurde noch zwischen Zwei- und Viertaktmotoren unterschieden. Mit EURO 2, gültig ab 17.6.2000, verzichtete man auf diese Unterscheidung, was Hersteller zum Schwenk auf emissionsmäßig unproblematischere Viertaktmotoren bewegte, andere jedoch zu Innovationen beim Zweitaktmotor anregte. Die diversen Ausprägungen werden im Kapitel Stand der Technik behandelt.

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass die Fahrzeugklasse der Kleinkrafträder von diversen Faktoren beeinflusst wird. In Zeiten wirtschaftlicher Not oder hoher Benzinpreise wird gerne auf sie zurückgegriffen. Das liegt nicht zuletzt an der Einfachheit ihrer Konstruktion, dem damit verbundenen niedrigen Preis, sowie an ihrer Wirtschaftlichkeit im Betrieb. So wundert es nicht, dass das klein-motorisierte Zweirad noch heute weltweit jedem anderen zahlenmäßig überlegen ist [12]. Nicht im vom Wohlstand verwöhnten Europa oder den USA, sondern in den bevölkerungsreichen Schwellenländern Asiens. Daher gilt es, trotz aktuell sinkender Zulassungszahlen in Europa, vorzuhalten und Lösungen anzubieten auf welche in ähnlichen Situationen zurückgegriffen werden kann. Diese müssen nicht zwingend wirtschaftlicher Natur sein. Der Betrieb und Besitz eines PKW ist für Amerikaner und Europäer heute noch eine Selbstverständlichkeit. Nicht jedoch für den ähnlich wohlhabenden Bewohner einer asiatischen Mega-City wie z.B. Tokio. Für die Zulassung eines PKW ist hier der Nachweis eines eigenen Parkplatzes notwendig [13]. In anderen Metropolen können die Kosten der Zulassung den Wert des Fahrzeugs übersteigen. Bei staatlicher Lenkung (China) nach dem Gleichbehandlungsprinzip erfolgt die Zuteilung der begrenzten Anzahl an verfügbaren Zulassungen fallweise durch Los-Entscheid mit entsprechend langen Wartezeiten. Am Beispiel Vietnam stehen den durch hohe Import-Zölle [14] verteuerten 2 Millionen PKW 44 Millionen Zweiräder gegenüber.

⁷ EWG Europäische Wirtschaftsgemeinschaft

1.5 Weltweite Situation - heute

In Europa finden L1e Fahrzeuge hauptsächlich als Überbrückungsmaßnahme bis zum Erwerb des Pkw-Führerscheins Anwendung. Dabei sind sie für eine Dauer von zwei Jahren in den Händen von jungen Verkehrsteilnehmern, welche damit den Weg zur Ausbildungsstätte oder auch Freizeitwege bewältigen und dabei statistisch 2.300 km pro Jahr und Fahrzeug zurücklegen [15]. Das bedeutet, dass sich die Investition bei Kaufentscheid nach zwei, oder bei Weitergabe längstens nach vier Jahren respektive 5.000-10.000 km amortisiert haben muss. Daher fällt die Wahl bevorzugt auf kostengünstige Import-Modelle aus Asien. Die Verkaufszahlen sind jedoch seit Jahren rückläufig. [16, 17]

Mit dem boomenden E-Bike hat sich ab 2006 eine Alternative ergeben, die ein weit besseres, weil grüneres Image genießt. Das als Fahrrad geltende E-Bike ist europaweit zulassungsfrei und im Rahmen der Haushaltversicherung versichert. Die Unterhaltskosten beschränken sich folglich auf die geringen Stromkosten zum Laden der zu diesem Zweck entnehmbaren Batterien. Ihre auf 25 km/h begrenzte Höchstgeschwindigkeit, bei 250 W limitierter Antriebsleistung, erlaubt es diese Fahrzeuge auf Radwegen zu betreiben. Eine Fahrerlaubnis ist zu deren Betrieb nicht notwendig.

Bezeichnenderweise bestand seit Beginn des E-Bike-Booms rege Nachfrage nach Varianten ohne Geschwindigkeitslimitierung auf 25 km/h. Hersteller boten diese nicht für den Straßenverkehr zugelassenen Varianten gerne an. Ähnlich wie bei der „Lex Kreidler“ von 1953 war nun der Gesetzgeber gefordert, eine Regelung zu schaffen. Diese Regelungen wurden zunächst unabhängig auf nationaler Ebene im Rahmen der Straßen-Verkehrs-Ordnung getroffen und richteten sich nach dem Vorreiter, der Schweiz. Das „schnelle Pedelec“ oder S-Pedelec war damit auf 45 km/h Höchstgeschwindigkeit und maximal 500 W Antriebsleistung im Rahmen der Kraftfahrzeugzulassung erfasst und galt somit nicht mehr als Fahrrad. Die Folgen sind weitläufig. So darf ein S-Pedelec ausschließlich auf der Straße bewegt werden, wobei Helm- und Versicherungspflicht herrscht. Die äußeren Merkmale des Fahrzeugs sind durch die Typisierung erfasst, womit Umbauten an Antrieb, Fahrwerk und Ausstattung unzulässig sind. Die vorgeschriebene Versicherungsprämie erhöht die Unterhaltskosten signifikant und der Anschaffungspreis übersteigt den eines konventionellen Marken-Scooters bei weitem. De Facto handelt es sich beim S-Pedelec um ein Kleinkraftrad oder Moped mit elektrischem Antrieb, dessen Leistung durch die Trittfrequenz bzw. -Leistung des Fahrers gesteuert wird.

Mit der Verordnung 168/2013 [18], für Euro 4 und Euro 5, wurden die Fahrzeugklassen neu definiert. Die Klasse L1e ist damit in L1eA - für Fahrzeuge bis 25 km/h und L1eB - für Fahrzeuge bis 45 km/h unterteilt und hinsichtlich der Anforderungen auf übernationaler Ebene geregelt. Die mit dem Wunsch nach 45 km/h aufgegebenen Vorteile des 25 km/h Pedelecs lassen eine Rückkehr der gasgriffgesteuerten Scooter erhoffen, wobei die Art ihres zukünftigen Antriebs der Fragestellung dieser Arbeit entspricht.

In Amerika ist das bis 50 cm³ motorisierte Kleinkraftrad nahezu bedeutungslos und wurde demzufolge bis 2006 der Kategorie „Non-Road Recreational“ zugeordnet. Erst mit 2006 wurde es als Class I-A in die Regulierung der „Highway Motorcycles Exhaust Emission Standards“ [19] aufgenommen, womit entsprechend §86.410-2006, 12 g/km CO als Emissionslimit gelten. Das ist der 12-fache Wert des mit EURO 2 definierten Grenzwertes, wobei sich der HC+NO_x Grenzwerte mit 1,4 g/km auf ähnlichem Niveau befindet. Angewendet wird diese EPA-Norm in diesem Bereich hauptsächlich zum Schutz des Marktes vor unkontrollierten Importen aus China. Diese finden nun in dem deregulierten E-Bike Sektor statt, denn auch hier boomt der E-Bike Markt, wenn auch verhaltener als in Europa. Der verhältnismäßig geringe Anteil der motorisierten Zweiräder an der hohen Kraftfahrzeuggesamtanzahl in Nordamerika sorgt dafür, dass von dieser Seite kein Interesse an einer weltweit harmonisierten Regelung besteht.

In Asien ist das Kleinkraftrad die dominante Fahrzeugklasse, wenngleich das Merkmal der Hubraumlimitierung auf 50 cm³ nicht allgemein angewendet werden kann. In Indien beträgt es beispielsweise 70 cm³. Im größten Zweiradmarkt, China, hat sich die Situation in den letzten 20 Jahren signifikant verändert. Beginnend mit 1996 wurden in den großen Metropolen, in Folge drastischer Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität, konventionelle Zweiräder weiträumig aus den Stadtzentren verbannt. Die entstandene Lücke wurde schnell durch elektrisch unterstützte bzw. angetriebene Fahrrad-Fahrzeuge geschlossen. Schätzungen gehen von über 200 Millionen produzierten Einheiten bis einschließlich 2016 aus [20]. Außerhalb dieser Ballungsräume und in anderen Staaten Asiens ist das konventionell motorisierte Kleinkraftrad nach wie vor das dominante Verkehrsmittel. Am Beispiel Taiwan lässt sich zeigen, dass das konventionelle Zweirad nicht leicht zu ersetzen ist. Die rege Bemühung der Regierung ab 2006 durch finanzielle Anreize ein ähnliches Umdenken in Richtung elektrischer Zweiradvarianten wie auf dem chinesischen Festland zu erwirken, wurde nach vier Jahren erfolglos aufgegeben.

Eine Verbannung konventioneller Fahrzeuge aus Stadtzentren findet aber mittlerweile auch in Europa statt. So wurden bereits ab 2007 die historischen Altstadtkerne vieler italienischer Städte zu „Zone di traffico limitato“ -zur verkehrsbeschränkten Zone – erklärt [21]. Diese sind, mit Ausnahmen, nur emissionsfrei, also auch elektrisch zu befahren. Dies erklärt vielleicht warum das einzige heute erhältliche Hybridfahrzeug der Kategorie L, die Piaggio MP3, von einem italienischen Hersteller angeboten wird.

1.6 Problemstellung

Die gesamte L-Kategorie

Die allgemein gestiegene Sensibilität gegenüber Abgasen und ihren Folgen hat die Europäische Gesetzgebung veranlasst, stetig strengere Abgasvorschriften mit sinkenden Grenzwerten zu formulieren, wobei die L-Kategorie mit deutlicher Verspätung berücksichtigt wurde. Die Neuformulierung der Emissionsstufen EURO 4 und EURO 5 treffen die Branche deswegen umso härter, sodass der gesamte Zweiradsektor heute vor einem großen Umbruch steht. Dieser betrifft, durch die von der UNECE⁸ vorangetriebenen Harmonisierung der Zulassungsvorschriften, letztlich alle Hersteller von L-Kategorie Fahrzeugen weltweit.

Die Zielsetzung dieser Harmonisierung ist es, die Entwicklung und Zulassung von L-Kategorie-Fahrzeugen in einer globalisierten Welt zu vereinfachen. Die teilweise noch gültigen Zulassungsvorschriften unterscheiden sich sowohl auf kontinentaler (USA und Europa), als auch auf nationaler (Japan und Indien) Ebene und verfolgen dabei ganz offen auch marktpolitische Interessen.

Die Vorschriften unterscheiden sich in Prüfverfahren, Fahrzyklen und Grenzwerten so signifikant voneinander, dass keine Vergleichbarkeit gegeben ist. Das bedeutet, dass ein und dasselbe Fahrzeug für unterschiedliche Märkte mehrfach entwickelt, homologiert und zugelassen werden muss.

Positiv zu bemerken ist, dass sich mittlerweile große asiatische Zweiradmärkte wie China und Indien an den Zulassungsvorschriften der EU orientieren. Damit kommt der Europäischen Abgasgesetzgebung die beabsichtigte Vorreiterrolle zu.

Diese Entwicklung der Vorschriften hat, infolge einer von der Europäischen Kommission beauftragten Studie [22] zur Auswertung des Emissionsbeitrags von L-Kategorie Fahrzeugen in Europa im Jahr 2009, deutlich an Fahrt aufgenommen. Diese Studie beziffert den Anteil der Zweiräder an den Gesamtverkehrsemissionen in Europa mit 20% bei einem

⁸ UNECE United Nations Economic Commission for Europe

Gesamtstreckenanteil von lediglich 2%. Sie kommt weiter zu dem Schluss, dass sich dieser Anteil mit zunehmenden Emissionsverbesserungen auf der PKW-Seite nochmals erhöhen wird. Bis zu diesem Zeitpunkt galten die Emissionen von Zweirädern wegen ihrer geringen Kilometerleistung und ihrem saisonalen Einsatz in Europa als wenig relevant, womit sich auch die weitzurückliegende Einführung der EURO 3 im Jahr 2003 rechtfertigen ließe.

Die seitens der Kommission ergriffene Maßnahme ist eine drastische Neuformulierung der Abgasgesetzgebung mit Einführung der EURO 4 Stufe im Jahr 2017 sowie der voraussichtlichen Einführung der EURO 5 Stufe 2020. EURO 5 ist vorläufig mit dem erklärten Ziel formuliert, die Verfahren und Grenzwerte an jene der PKW-Typgenehmigung anzugleichen. Dieser große Sprung stellt bereits heute Fahrzeughersteller vor vermeintlich unlösbare Probleme, welche auf die besonderen Gegebenheiten ihrer Fahrzeugkategorie zurückzuführen sind. Lösungsansätze aus anderen Fahrzeugklassen können nicht übernommen werden, denn zum einen fehlt auf den meist einspurigen Fahrzeugen der Bauraum, um die aus dem PKW bekannten Komponenten der Abgasnachbehandlung unterzubringen, und zum anderen trägt, besonders im Niedrigpreissegment, der Produkterlös die notwendigen Mehrkosten der zu ergreifenden technischen Maßnahmen nicht.

Die Klasse L1B

Die bereits in der EURO 4 verankerte Forderung nach Haltbarkeit der Abgasnachbehandlung trifft die Kategorie L1e im besonderen Maße. Beliebte Vertreter der L1eB Klasse sind Scooter, welche bereits deutlich unter 1000 Euro erworben werden können. Diese Fahrzeuge sind zwar versicherungspflichtig, aber steuerbefreit und mit Fahrerlaubnis bereits ab 15 Jahren zu betreiben. Sie erfreuen ihre Benutzer durch leichte Bedienbarkeit und sind Dank des stufenlosen CVT-Getriebes beschleunigungsstark, wodurch sie sich im innerstädtischen Einsatz trotz begrenzter Höchstgeschwindigkeit als praktikabel erwiesen haben. Die günstigen Modelle sind überwiegend mit luftgekühlten Zweitaktmotoren, Vergaser und seit EURO 2 mit Oxidationskatalysator ausgestattet. Die in Kombination mit dem Vergaser hohen zweitakt-spezifischen Spülverluste überlasten den Katalysator thermisch und sind für die begrenzte Haltbarkeit der Abgasnachbehandlung von meist nur wenigen hundert Kilometern verantwortlich. Dies war durch die bis August 2014 geltende EURO 2 Norm möglich, welche nur den einmaligen Nachweis der Abgasgrenzwerte forderte und die Kaltstartemissionen unberücksichtigt ließ. Diese wurden in der seit August 2014 gültigen EURO 3 Stufe bereits mit 30% Gewichtung berücksichtigt. EURO 4 verlangt ergänzend den Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte über eine Distanz von 11.000 km. Diese Distanz entspricht in den meisten Fällen der Lebenserwartung dieser Fahrzeuge. Es ist zu erwarten, dass diese Forderung, zumindest mit dem bestehenden Zweitakt-Antriebsstrang, nicht erfüllt werden kann. Spezialisierte Hersteller von Low-Cost-Varianten werden, angesichts der hohen Investitionen im Verhältnis zu den geringen Margen, ihre Produktion einstellen. Damit drohen die günstigen Varianten der konventionellen L-Fahrzeugkategorie vom Markt zu verschwinden.

Als Alternative zum Zweitaktmotor bieten sich Viertaktvarianten zu höherem Preis und, durch die Hubraumbeschränkung auf 50cm³, mit weniger Leistung an. Auch bei diesen Fahrzeugen wird es spätestens mit Inkrafttreten der EURO 5 Stufe zu kostspieligen technischen Veränderungen kommen müssen, da die vorläufig definierten Grenzwerte eine Lambda 1 geregelte Abgasnachbehandlung unumgänglich machen. Unrentable Investitionen in Einspritzsysteme und Lambdaregelung werden wiederum für ein, wenn auch späteres, Verschwinden vom Markt sorgen.

Rein elektrisch angetriebene Scooter-Varianten sind bereits auf dem europäischen Markt angekommen, um die in absehbarer Zeit entstehende Lücke zu füllen. E-Scooter sind ein Produkt, welches als Antwort auf die getroffenen, drastischen Maßnahmen gegen die innerstädtische Luftverschmutzung in chinesischen Mega-Cities entstand.

Das bereits 1996 in Guangzhou eingeführte und seither auf weitere Ballungsgebiete, wie Peking und Shanghai, ausgeweitete Fahrverbot für Zweiräder mit Verbrennungsmotor im Innenstadtbereich, sowie dessen drakonische Durchsetzung zeigten sichtbare Verbesserungen der Luftqualität. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die asiatische Zweiradpopulation im Vergleich zu Europa wesentlich zahlreicher und für mehr Wegstrecke verantwortlich ist. Der bestehende Mobilitätsbedarf wurde in der Folge durch zunächst einfache, elektrisch angetriebene Zweiräder befriedigt. Diese galten als Fahrrad und waren bis 2014 weder zulassungs- noch registrierungspflichtig [23]. Die Produktionszahlen sind jedoch aktuell rückläufig [24]. Ein Grund hierfür kann das zwischenzeitlich signifikant veränderte Einsatzgebiet sein, da beginnend mit 2009, als Maßnahme gegen die zahlreichen Verkehrsunfälle mit Zweiradbeteiligung, motorisierte Zweiräder aller Art aus den Stadtzentren genannter Mega-Cities verbannt wurden [25]. Damit hat sich ihr Einsatz auf die Peripherie der Städte verlagert und aus dem urbanen Kurzstreckenbetrieb wurde deutlich längerer Pendlerbetrieb. Diese Anforderungen kann ein rein elektrisches Fahrzeug bei noch beherrschbarem Gewicht nicht ohne weiteres erfüllen. Tatsächlich gibt es bereits hybride Alternativen, welche Zuwachsraten von 21% pro Jahr aufweisen, jedoch nicht für den Export bestimmt sind. Auch diese werden im Kapitel „Stand der Technik“ näher beschrieben.

1.7 Stand der Technik

Um den Stand der Technik in Bezug auf L1eB Fahrzeuge darzulegen reicht es nicht aus, die für die Problemstellung relevanten Hybrid-Ansätze für diese Fahrzeugkategorie und –klasse zu betrachten. Derer gibt es bis dato zu wenige. Deshalb wird der heutige Stand als Referenz behandelt und Alternativen hinsichtlich ihrer Zukunftsfähigkeit erläutert. Da die Klasse L1eB verschiedenste Fahrzeugvarianten mit unterschiedlichen Antriebssträngen umfasst, muss die Betrachtung auf eine Variante reduziert werden. Dies ist der Motorroller oder auch Scooter, dessen charakteristische Silhouette in Abbildung 2 dargestellt ist.



Abbildung 2 : Charakteristische Silhouette eines Scooters

Dieser kommt in großer Zahl vor und der besondere Aufbau hat sich bereits für unterschiedliche Antriebskonzepte geeignet gezeigt. Unter der Vielfalt existierender Antriebstränge mit Zwei- und Viertakt-Motor, jeweils kombiniert mit manuellem Schaltgetriebe, Ein- und Mehrgang-Automatik oder stufenlosem Variomatik-Getriebe, wird die Variante mit Zweitakt-Motor und stufenlosem Getriebe als Referenz herangezogen. Das durch diese Kombination erzielte Beschleunigungsvermögen hat seine Tauglichkeit im urbanen Einsatz unter Beweis gestellt.

Die bis 2015 noch immer im Handel erhältlichen und noch nach EURO 2 typisierten Zweitaktvarianten mit Vergaser bilden nach wie vor den Status Quo, obwohl sie aus Sicht der mittlerweile mit August 2014 in Kraft getretenen EURO 3 nicht mehr den Stand der Technik darstellen sollten. Deswegen werden in diesem Kapitel auch technologische Innovationen der Zweitaktvarianten sowie motorische Alternativen in Form von Viertakt- und Elektrovarianten behandelt und hinsichtlich Leistung und Emissionsverhalten auf Basis zukünftiger gesetzlicher Anforderungen diskutiert.

Entsprechend dem, dem Projekt zugrundeliegenden, Ansatz den gestellten Herausforderungen durch Hybridisierung zu begegnen, werden sowohl bereits am Markt erhältliche als auch Konzepte von Hybrid-Varianten erörtert und hinsichtlich zukünftiger gesetzlicher Anforderungen und ihrem Potential zur CO₂-Reduktion beurteilt.

1.7.1 Der konventionelle Scooter als Referenz

Das als Scooter bezeichnete Fahrzeug ist weltweit die beliebteste Variante der L1eB Fahrzeugklasse. Der Scooter ist durch einen tiefen Durchstieg gekennzeichnet, welcher ihn für jede Altersgruppe und jedes Geschlecht gleichermaßen geeignet macht. In seiner konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen Ausführung soll er auch als Referenz in Punkto Leistung und Handhabbarkeit dienen. Die einfache Bedienbarkeit wird durch den Einsatz des stufenlosen Getriebes in Form einer Riemen-Variomatik (engl. CVT-Constant Variable Transmission), siehe Abbildung 3, erreicht.

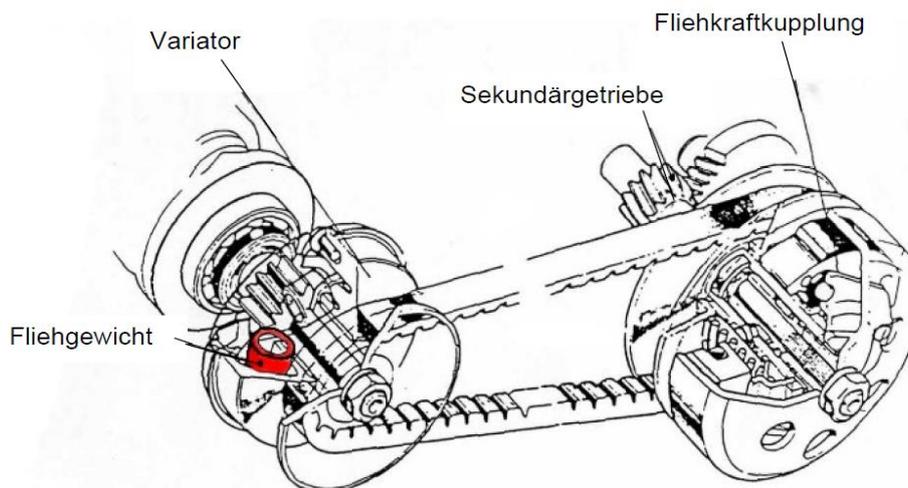


Abbildung 3: Aufbau und Teile der Scooter Riemen-Variomatik, CVT-Getriebe [26]

Diese ist, zusammen mit dem Motor, der Fliehkraftkupplung und dem Sekundärgetriebe, in der Triebssatzschwinge untergebracht. Die Triebssatzschwinge ist gleichzeitig Hinterradträger und mit dem Rahmen über Kniehebel und Federelemente verbunden. Durch die Kniehebelanbindung werden Massenkräfte weitestgehend vom Rahmen und Fahrer entkoppelt. Die Besonderheit dieser Transmission besteht in der unterbrechungsfreien Zugkraftübertragung, welche trotz begrenzter Höchstgeschwindigkeit von 45km/h für ausreichend hohe Beschleunigung und damit für die Praktikabilität im urbanen Verkehrsraum sorgt. Die besondere Funktionsweise der Variomatik sei hier kurz für den Fall der Vollastbeschleunigung erläutert. In der Beschleunigungsphase wird der Motor mittels Fliehkraftkupplung erst bei Erreichen der Drehzahl, bei der das Drehmomentmaximum anliegt, eingekuppelt. Die Variomatik befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einer Stellung, welche dem größten Übersetzungsverhältnis (inklusive Sekundärgetriebe $\sim 26:1$) entspricht. Mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit variiert das Übersetzungsverhältnis, wodurch die Motordrehzahl annähernd auf der Nennleistungsdrehzahl gehalten wird. Erst bei Ende des Verstellbereiches steigt die Motordrehzahl zur Erreichung der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend der kleinsten darstellbaren Übersetzung wieder linear an. Abbildung 4 verdeutlicht dieses Regelverhalten. Die Regelcharakteristik schränkt die Betriebspunkte des Motors auf Bereiche im Kennfeld ein, welche dem maximalen Moment bzw. der Vollastlinie entsprechen.

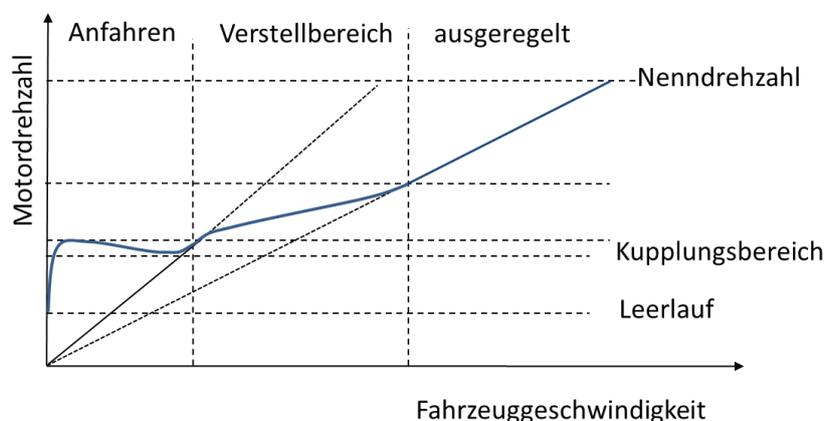


Abbildung 4: Regelverhalten eines CVT-Getriebes mit Fliehkraftkupplungsbedingter Ausblendung des unteren Drehzahlbereichs und Verstellung im Drehzahlbereich maximaler Leistung

Abbildung 5 zeigt die Betriebskennlinie im Verbrauchskennfeld am Beispiel einer Aprilia SR 50. Hierbei fällt auf, dass bei der Beschleunigung hauptsächlich Bereiche mit niedrigem spezifischem Verbrauch abgerufen werden, während weite Bereiche mit hohem spezifischem Verbrauch entweder rasch und bei geringer Last oder gar nicht durchlaufen werden. Die Vollastlinie wird bei niedrigen Drehzahlen gänzlich gemieden. Durch die im Schubetrieb selbsthemmende Fliehkraftkupplung und die durch Zusatzeinrichtungen bewirkte Hysterese werden im Teillastbetrieb auch Kennfeldpunkte im Umfeld der gezeigten Regelkennlinie erreicht.

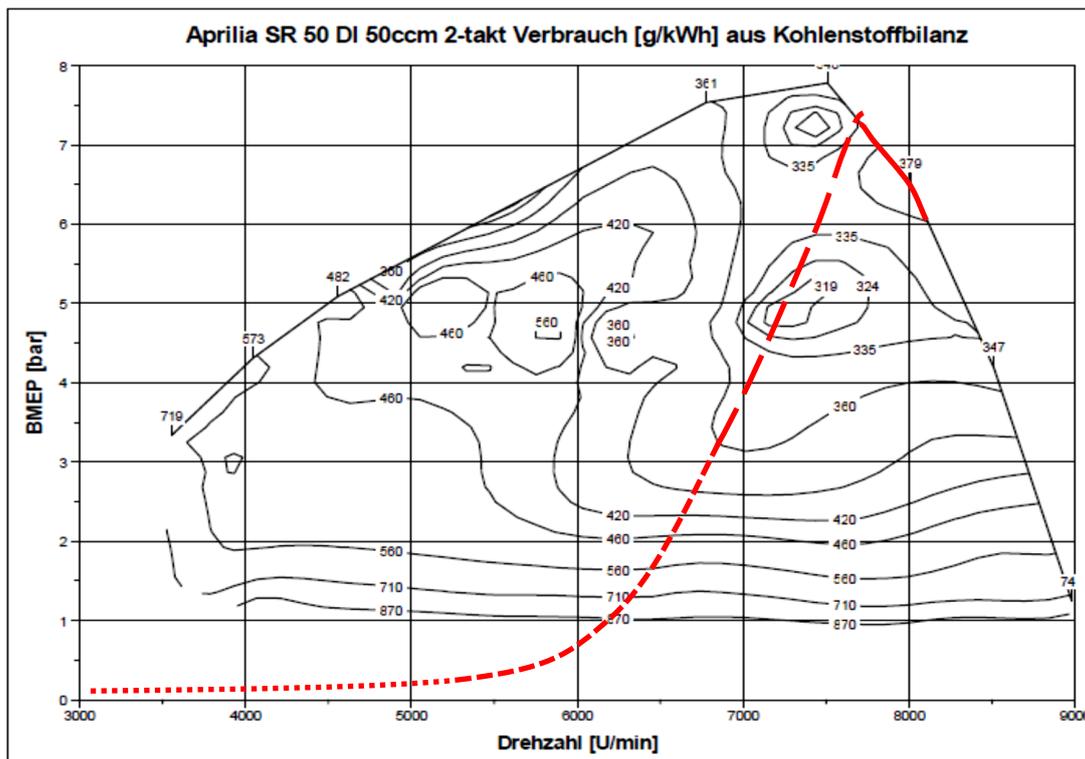


Abbildung 5: Betriebskennlinie während der Beschleunigung im Verbrauchskennfeld und dabei überstrichene Bereiche des spezifischen Verbrauchs[26]

Diese Betriebsweise des Motors unterscheidet sich somit maßgeblich von jener bei Einsatz eines Stufengetriebes wie anhand einer Zwei-Gang-Automatik in Abbildung 6 verdeutlicht. Hier wird der Motor entlang der Vollastlinie in jedem Gang durch das nutzbare Drehzahlband getrieben.

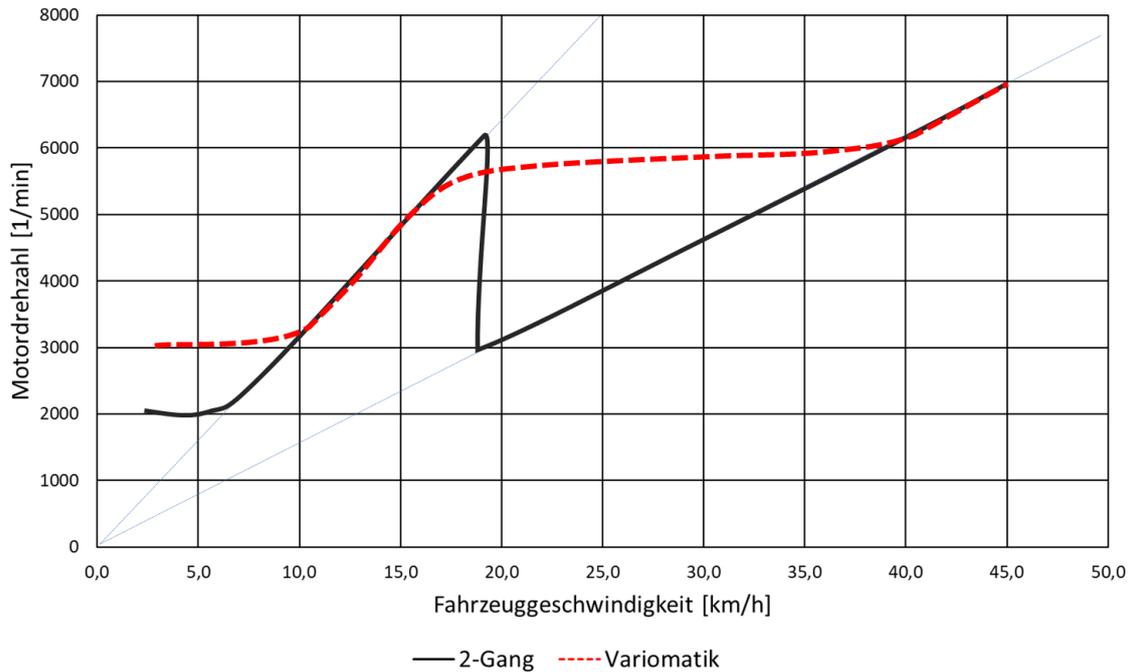


Abbildung 6: Vergleich Zwei-Gang-Automatik- und CVT-Getriebes hinsichtlich transienten Betriebs der Verbrennungskraftmaschine[26]

Den geschilderten Vorteilen des CVT-Getriebes stehen jedoch auch Nachteile gegenüber. Da es sich um eine kraftschlüssige und somit auf Reibung beruhende Kraftübertragung handelt, sind die Verluste deutlich höher als bei formschlüssigen Zahnradgetrieben. Abbildung 7 zeigt den im Versuch ermittelten Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Drehzahlen bei jeweils konstantem Bremsmoment am Ausgang des Sekundärgetriebes.

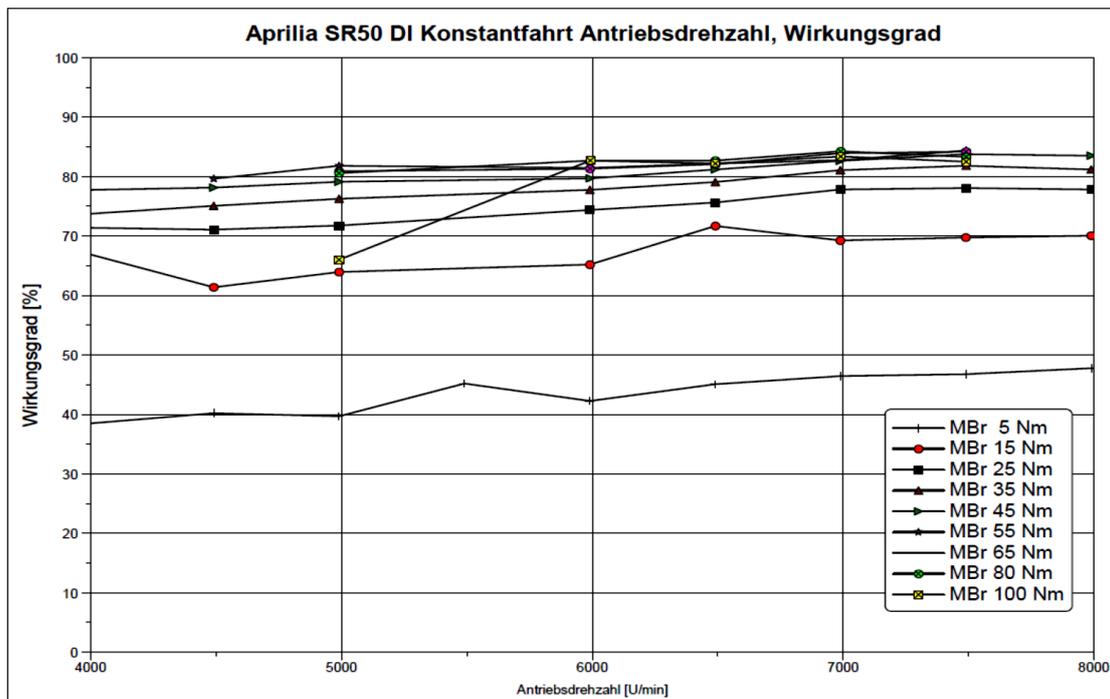


Abbildung 7 : Wirkungsgrad des kraftschlüssigen CVT-Getriebes in Abhängigkeit des Abtriebsdrehmomentes [26]

Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad mit der Drehzahl leicht steigt jedoch mit fallender Last stark abnimmt. Es werden Werte zwischen 83% bei hohem und 40% bei niedrigem Abtriebsdrehmoment (MBr) erreicht. Für die weiteren Betrachtungen und Berechnungen wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad des CVT-Getriebes von 70% angenommen. Das bedeutet, dass bei einem konventionellen Scooter gut 30% der Motorleistung bei der Kraftübertragung verloren gehen. Dieser Umstand trägt nicht unwesentlich zu den hohen Verbräuchen dieser speziellen Variante der L1eB Fahrzeuge bei.

1.7.1.1 Motorisierung mittels Zweitaktmotor

Bedingt durch die hohen Getriebeverluste bei gleichzeitig gefordertem hohem Beschleunigungsvermögen wird die Mehrzahl der günstigen L1e Scooter von Zweitaktmotoren angetrieben. Der Zweitaktmotor hat, bei der für die Klasse geltenden Hubraumbeschränkung auf 50cm³, Leistungsvorteile im Vergleich zum Viertaktmotor. Arbeitsprinzipbedingt durchläuft er bei gleicher Drehzahl doppelt so viele Arbeitsspiele. Auch ist der Zweitaktmotor durch seine geringere Anzahl an Einzelteilen kleiner, leichter und kostengünstiger in der Fertigung. Preisgünstige Scooter-Varianten verwenden Luft- bzw. Gebläse-Luft-gekühlte Motoren. Bei Markenprodukten mit höherer Leistung kommen auch wassergekühlte Aggregate zum Einsatz.

Bei den bis dato noch nach EURO 2 typisierten Fahrzeugen wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch mittels Schieber-Vergaser aufbereitet. In den luftgeköhlten Varianten ist das Gemisch zur Innenkühlung etwas fetter abgestimmt, wobei durch die fehlende Temperatur- und Luftdruckkompensation zusätzlich vorgehalten werden muss. Durch diese fette Abstimmung wird in der Regel ein Oxidationskatalysator, fallweise ergänzt um Sekundär-Luft, als Abgasnachbehandlung eingesetzt. Motoren mit ausreichend dimensionierter Kühlung bzw. Wasserkühlung können, bei entsprechender Gestaltung des Brennraums und der Spülkanäle, mager ($\lambda \geq 1$) betrieben werden. Ein Betrieb bei $\lambda = 1$ macht den Einsatz eines Dreiwege-Katalysators möglich, wenngleich das für dessen korrekte Funktion geforderte Lambda 1 mit Vergaser nicht eingehalten werden kann. Die thermische Katalysatorbelastung ist in diesem Fall wegen der hohen Konvertierungsrate als kritisch zu erachten.

Die für umkehrgespülte Zweitaktmotoren mit externer Gemischbildung typisch hohen Kohlenwasserstoff Rohemissionen stellen den größten Nachteil dar. Zum einen verschlechtern sie den Wirkungsgrad und zum anderen verursachen sie bei der Abgasnachbehandlung Haltbarkeitsprobleme. Um diesen Nachteil zu vermeiden, gib es Ansätze die bereits im Zuge der EURO 2 Einführung auch umgesetzt wurden und im Folgenden erläutert werden.

Ab Mitte der 1990er Jahre mit bevorstehender Einführung von EURO 2, welche für neue Fahrzeugtypen mit 17.6.2000 in Kraft trat und die Grenzwerte drastisch (CO von 6g/km auf 1g/km, HC+NO_x von 3g/km auf 1,2g/km) senkte, haben europäische Hersteller wie Aprilia, Gilera und Peugeot zusammen mit Systemlieferanten (Synerject, Siemens) technologische Maßnahmen ergriffen, um das Abgasverhalten des Zweitaktmotors zu verbessern. Diese Maßnahmen galten der Vermeidung der für leistungsstarke Zweitaktmotoren typischen hohen Spülverluste durch Einsatz einer Benzin-Direkt-Einspritzung. Einer der möglichen Varianten, die auf dem australischen Orbital-System [27] basierende, luftunterstützte Direkteinspritzung, wurde bei Aprilia als Di-Tech, Gilera als Pure-Jet und Peugeot als Jet-Force vermarktet. Die Komplexität dieses Systems ist in Abbildung 8 dargestellt.

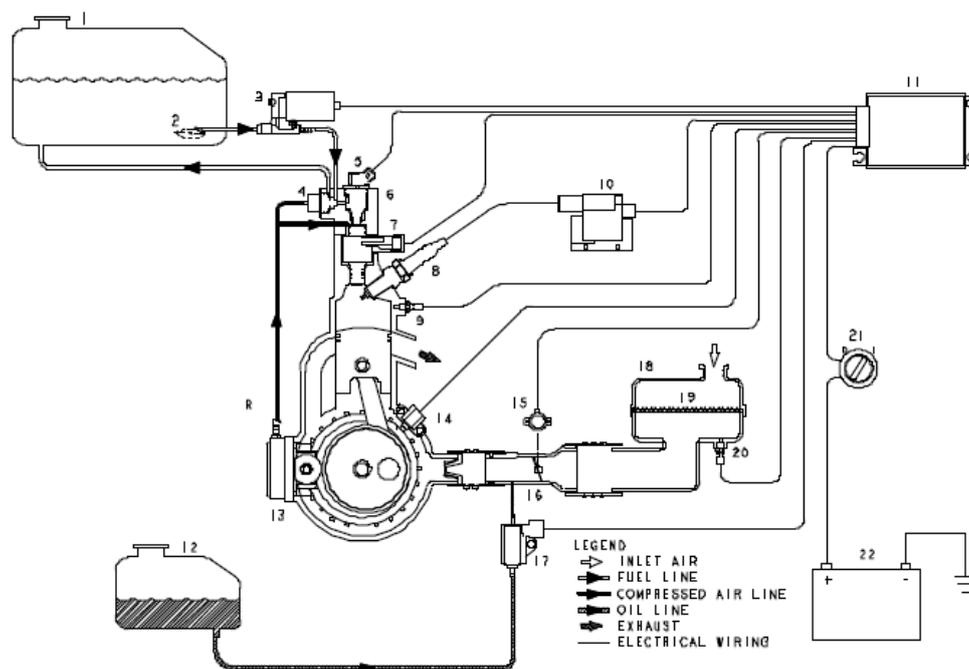


Abbildung 8: Aprilia DiTech System, Luftunterstütztes Direkteinspritzung am Zweitakt-Motor [28]

Das zentrale Steuergerät 11 misst kennfeldgesteuert entsprechend der Stellung des Drosselklappenpositionsgebers 15 und dem Messwert des Ansauglufttemperatursensors 20 die Kraftstoffmenge über die Einspritzdüse 5 zu. Die Einspritzung erfolgt bei geschlossenem Auslasskanal in der Kompressionsphase. Der in der Kompressionsphase steigende Zylinderdruck stellt besondere Anforderungen an das Einspritzsystem. Das luftunterstützte Verfahren verwendet hierzu einen Benzindruck von bis zu 7 bar und einen Luftdruck von bis zu 5,5 bar. Zum Aufbau des Kraftstoffdrucks wird eine elektrische Benzinpumpe 3 eingesetzt, wohingegen die Druckluft durch eine mechanische Membranpumpe 13 bereitgestellt wird. Diese wird durch einen Exzenter auf der Kurbelwelle über Rollenabnehmer angetrieben. Die Ölzumischung erfolgt wiederum gesteuert über eine getaktete Ölpumpe 17 in den Ansaugtrakt.

Da dieses System durch die Druckluftunterstützung zusätzliche Luftmasse einbringt, handelt es sich de facto um eine Form der Kompressor-Aufladung. Die darstellbare Leistung lag mit 4,5kW bei 8000 U/min bereits über dem für die Fahrzeugklasse gültigen Limit von 4kW. Fälschlicherweise wurde nun angenommen, dass Einspritzung der Leistungssteigerung dient, was letztlich den hohen Verkaufspreis rechtfertigte und wohl auch das hauptsächlich Kaufargument darstellte. Der Kunde wurde zusätzlich mit geringerem Verbrauch belohnt. Weniger leistungsorientierte Kunden wichen auf weit kostengünstigere Alternativen aus Fernost aus. Diese Hersteller befriedigten die EURO 2 Abgasvorschrift ohne gravierende Systemänderung mit dem Einsatz eines entsprechenden dimensionierten Katalysators und gegebenenfalls Sekundärluft. Dies war nur möglich, weil für eine positive Typisierung ein einmaliger Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte genügte. Die durch Spülverluste verursachten hohen Kohlenwasserstoff-Emissionen müssen bei diesen Varianten im Katalysator umgesetzt werden. Das überlastete den Katalysator thermisch und führte binnen kurzer Einsatzdauer zu dessen Degeneration und Zerstörung. Übrig bleiben de facto Fahrzeuge ohne funktionstüchtige Abgasnachbehandlung, mit denen sich keine Verbrauchsverbesserungen erzielen ließen. Angesichts des marktwirtschaftlichen Ungleichgewichts waren auch die innovativen europäischen Hersteller gezwungen, in Richtung Vergaser-Modelle zurückzukehren. Es kann vermutet werden, dass dies ursächlich für das

negative Image einer ganzen Fahrzeugklasse und des Zweitaktmotors ist. Dieses Image hätte durch die bereits vorhandenen Ansätze und Lösungen besser ausfallen können.

Mit der seit August 2014 für Neufahrzeuge gültigen EURO 3 Abgasnorm muss der Nachweis nach wie vor nur einmalig erbracht werden. Lediglich die Kaltstartemissionen werden nun im Ergebnis mit 30% gewichtet. Erst mit EURO 4, gültig seit 1.1.2017, welche den Kaltstartanteil bereits mit 50% gewichtet und zusätzlich eine Dauerhaltbarkeit der Abgasnachbehandlung und deren Nachweis fordert, werden Direkt-Einspritzsysteme bei Ergänzung um Kaltstartstrategien für den Zweitaktmotor wieder interessant. Durch niedrigere Kohlenwasserstoff-Rohemissionen, eventuell gepaart mit Magerbetrieb, kann die thermische Belastung des Katalysators soweit verringert werden, dass dessen Lebensdauer auf das geforderte Maß von 11.000 km verlängert werden kann. Die Einhaltung des für Direkt-Einspritzer neu hinzugekommenen Grenzwerts von 4,5 mg/km für die Partikelmasse ist noch zu bewerten.

In Hinblick auf die, voraussichtlich bereits ab 2020 inkrafttretende EURO 5 Abgasnorm, und der darin (vorläufig) definierten PKW-äquivalenten Grenzwerte, stellt sich die Frage nach der Nachhaltigkeit dieser Lösung. Es besteht einhellig die Meinung, dass derart strenge Grenzwerte wohl nur mit Viertaktmotor und geregeltem Lambda 1 Betrieb erfüllbar sind, aber auch weitere Anstrengungen und Maßnahmen erforderlich sind.

1.7.1.2 Alternative - Motorisierung mittels Viertaktmotor

Besonders Lambda 1 Betrieb ist mit einem Viertaktmotor und mit Hilfe entsprechender Sensorik (Lambdasonde) deutlich leichter darstellbar. Viele Hersteller von L1eB Fahrzeugen haben bereits vor oder mit der Einführung von EURO 2 auf den Viertaktmotor gesetzt und hatten durch das Leistungsdefizit und die höheren Herstellkosten bis dato das Nachsehen. Der Viertaktvariante steht jedoch spätestens mit EURO 5 ein mit erheblichen Kosten verbundener Technologiesprung in Richtung geregeltem Lambda 1 Betrieb und gegebenenfalls Direkt-Einspritzung bevor. Für die Übergangszeit stellen andere Hersteller ihren Zweitaktvarianten bereits Viertakt-Alternativen, immer noch mit Vergaser, zur Seite. Andere Zwischenlösungen zur Darstellung des Lambda 1 Betriebs mittels Saugrohreinspritzung ohne geschlossenem Lambdaregelkreis, wie sie in der Kategorie L3e bei EURO 3 Fahrzeugen mit Hubraum kleiner 150cm³ bereits verbreitet eingesetzt werden, lassen sich angesichts des straffen Einführungszeitplans nicht nachhaltig übernehmen.

Der prominenteste Vertreter der Viertakt-Fahrzeuge ist das von 1958 bis einschließlich 2013 mit 60 Millionen Einheiten weltweit am häufigste verkaufte Modell Honda Super Cub 50/100. Es wurde über die Jahre nahezu unverändert gebaut und hauptsächlich im asiatischen Raum vertrieben. Die Kostennachteile gegenüber dem Zweitakter wurden angesichts der hohen Stückzahl offensichtlich durch den Skaleneffekt (economy of scale) kompensiert. Ob dies unter den heutigen Rahmenbedingungen nochmals gelingt, ist fraglich.



Abbildung 9 : Honda Konzepte für den zukünftigen Scooter auf Basis des Cub Modells [29]
rechts – rein elektrisch, *links* – rein verbrennungsmotorisch

Honda präsentierte auf der Tokyo Motor Show 2015 die Nachfolger. Abbildung 9 zeigt das „EV-Cub Concept“ mit rein elektrischem Antrieb als Kurzstrecken- und das „Super Cub Concept“ mit Viertakt und Lambda 1 Betrieb als Langstreckenfahrzeug. Dies zeigt, dass die Forderung nach Reichweite und emissionsfreier Fahrt selbst von einem namhaften und hochtechnologischen Hersteller nicht mit einem konventionellen Antriebsstrang gelöst werden kann.

Resümee

Eine Zusammenfassung der darstellbaren Antriebsleistung und der erreichbaren Emissionslimits und, sowie des Preisniveaus ist für die Motorkonzepte Zwei- und Viertakt unter Berücksichtigung der beschriebenen Gemischaufbereitungen in Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Resümee der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Leistung, Emissionsverhalten und Kosten verbrennungsmotorischer Antriebsstränge.

Motorkonzept	Zweitakt		Viertakt	
	Gemischaufbereitung	Vergaser	DI ⁹	Vergaser
Antriebs-Leistung	3 kW		2 kW	
Emissionslimits	EURO 2	EURO 4	EURO 2	EURO 4
Preis ¹¹	1000 €	>2000 €	>1500 €	> 2000 €

⁹ DI: Direct Injection - engl., Direkt-Einspritzung - deut.

¹⁰ EFI: Electronic Fuel Injection - engl., Saugrohr-Einspritzung - deut.

¹¹ Größenordnung des Endkundenpreises inkl. MwSt. in Österreich, Beobachtungszeitraum 2011-2017

1.7.2 Alternative - Motorisierung mittels Elektroantrieb - EV¹²



Abbildung 10 : Peugeot E-Scooter, links: Scoot'elec 1996-2006 , rechts: E-Vivacity 2011-

Bereits 1996, und wohl als Reaktion auf die bevorstehende Einführung der EURO 2 Abgasnorm, wurde von Peugeot der Scoot'elec als reiner Elektroroller angeboten, wie in Abbildung 10-links zu sehen. Er war mit einem 2,8 kW Gleichstrommotor und einer 18 V/100 Ah Nickel Cadmium Batterie ausgestattet. Reichweiten von 40 km bei 45 km/h Konstantfahrt und einem Fahrzeuggewicht von 115 kg waren darstellbar [30]. Bedingt durch die sehr niedrig gewählte Systemspannung von nur 18 Volt stellte das Schalten des für die Leistung resultierenden Stroms von über 150 A hohe Anforderungen an den Motorcontroller. Das Modell wurde, bis zu seiner vorerst ersatzlosen Einstellung im Jahr 2006 nur 3.600-mal verkauft. Erst 2011 präsentierte Peugeot das Modell E-Vivacity als Nachfolger. Der Aufbau ähnelt dem Vorgänger sehr. Als Energiespeicher kommt nun eine 48 Volt / 3 kWh Lithium-Ionen-Batterie und als Antriebsmotor eine schnelllaufende permanent-magnetisch-erregte Synchron Maschine (PMSM) mit 3 kW Leistung und Riemenübersetzung zum Einsatz. Die Fahrleistungen und Reichweite von bis zu 60 km wurden von der Fachpresse hoch gelobt [30]. Aktuell wird die E-Vivacity aber nur auf der französischen Firmenseite beworben [31]. Die Erklärung hierfür könnte der Verkaufspreis von über 4000 Euro sein, welcher bereits Importeure und Händler verunsichern. Zulassungszahlen lassen sich nicht erheben.

Um etwa den halben Preis werden E-Scooter asiatischer Herkunft angeboten. Diese verwenden wesentlich preiswertere, jedoch schwerere, Bleibatterien mit 48 V und 2kWh als Energiespeicher und eine langsam laufende PMSM als Radnabenmotor mit 2kW Dauer- und bis zu 3kW kurzzeitiger Leistungsabgabe. Vom Hersteller werden Reichweiten von 40-50 km angegeben, welche sich jedoch in Tests des ÖAMTC [32] nicht bestätigen ließen. Es ist anzunehmen, dass durch die Preissensibilität des Marktes diese Varianten dennoch bevorzugt werden.

Der rein elektrische Antrieb eignet sich für die Fahrzeugklasse L1eB als Stadtfahrzeug hervorragend, da das maximale Drehmoment für zügiges Beschleunigen bereits ab 0 km/h anliegt. Durch die auf 45 km/h begrenzte Höchstgeschwindigkeit kann ein Direktantrieb verwendet und auf ein Getriebe verzichtet werden. Der im Hinterrad positionierte bürstenlose Gleichstrom-Radnabenmotoren hat sich als Standard etabliert. Die Verlegung des Antriebsmotors in das Hinterrad schafft dabei mehr Platz zur Unterbringung der Batterie im Fahrzeugrahmen.

¹² EV Electric Vehicle

Zur Darstellung einer verbrennungsmotorisch äquivalenten Fahrleistung bei 3 kW Motorleistung ist im elektrischen Direktantrieb durch Wegfall der Variomatik-Getriebeverluste nur eine Motorleistung von 2 kW (allerdings bei Raddrehzahl) notwendig. Diese Anforderung wird von den meisten in Europa zugelassenen E-Rollern mittels 2 kW Dauerleistung und kurzzeitig aktivierbarer 2,5- 3 kW Boost-Funktion erfüllt. Als Energiespeicher werden in den preisgünstigeren Varianten verschlossene und zyklenfeste Blei-Gel- bzw. AGM¹³ - Bleibatterien installiert. Bei deutlich teureren Modellen werden auch Lithium-Ionen bzw. Lithium-Eisen Phosphat Zellen eingesetzt, wobei die Preisdifferenz eben von dieser Batteriewahl verursacht wird. Auch hier werden Energiespeicher mit 2-3 kWh verbaut, womit sich Reichweiten laut Herstellerangaben von 40-60 km ergeben. Die Reichweitenangaben sind höchst unterschiedlich, da sie keiner gesetzlichen Vorgabe folgen. Sie beruhen zwar durchwegs auf Konstantfahrt in der Ebene jedoch mit unterschiedlichen Bezugsgeschwindigkeiten. Diese unklare Angabe der Reichweite ist, angesichts der nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden Lademöglichkeiten, ein Grund für fehlendes Vertrauen und mangelnde Akzeptanz seitens des Kunden. Der im Zusammenhang mit der Elektromobilität geschaffene Begriff der Reichweitenangst kommt auch hier zum Tragen und drückt sich am besten in den verhaltenen Zulassungszahlen aus [33]. Dabei sind bei dieser Fahrzeugklasse die vom PKW beschriebenen Phänomene der saisonal abhängigen Reichweite nicht im selben Ausmaß zu befürchten. Der Einsatz der L1e Fahrzeuge ist ebenso saisonal und auf positive Temperaturen begrenzt, womit Sicherheits- und Komforteinrichtungen zur Klimatisierung des Innenraums oder zum Abtauen der Scheiben entfallen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Elektro-PKW ist, dass zum Laden weder spezielle Stromanschlüsse noch Steckverbindungen benötigt werden. Eine gewöhnliche Haushalts-Netzsteckdose kann die benötigte Ladeleistung zu Verfügung stellen, wenn diese zugänglich ist. Im dicht besiedelten Gebiet sind Mehrparteienhäuser eher die Regel und öffentliche Anschlüsse werden derzeit nicht oder nur sehr vereinzelt angeboten. Diesen Umstand versuchen neue Konzepte mittels entnehmbarer Batterien zu beantworten. Dazu müssen diese leicht sein, was nur durch den Einsatz von teuren Lithium-Batterien gelingt. Scooter-Verleih und –Sharing Projekte, am Beispiel Gogoro, betrieben unter Mitwirkung der Robert Bosch AG seit 2015 in Berlin [34], setzen bereits auf dieses Konzept und unterhalten an ausgesuchten Tankstellen Batteriewechselstationen für ihre Scooter-Flotte wie in Abbildung 11 zu sehen.

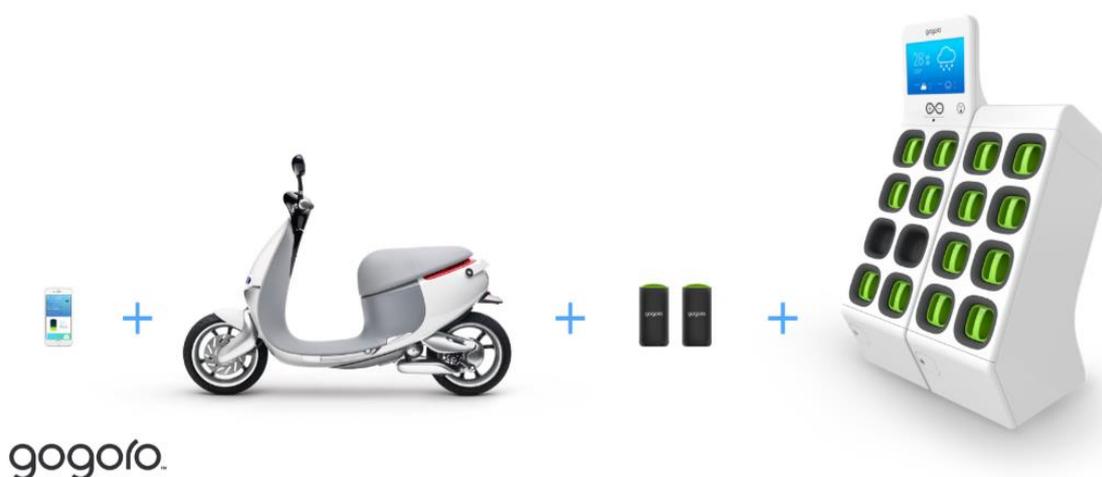


Abbildung 11 : Gogoro Scooter-Sharing- und Batteriewechsel-System [35]

¹³ AGM Absorbent Glass Mat

Der Nachteil ist jedoch, dass sich, wie auch schon vom PKW Sektor bekannt, die Hersteller auf eine Batteriegröße einigen müssten. Die Absicht des Gogoro-Projektes ist es, ihre Batterien als Quasi-Standard zu definieren und auch für andere Anwendungen, z.B. Elektrowerkzeuge oder Gartengeräte, zur Verfügung zu stellen. Die prinzipiell gute Idee setzt jedoch, wie auch schon bei der Ladeinfrastruktur bemängelt, eine gewisse Flächendeckung ähnlich heutiger Tankstellen voraus.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

Bisherige Elektro-Varianten ließen sich nicht gut verkaufen. Das lag und liegt zum einen an dem höheren Preis, der ungewissen Reichweite und den langen Ladedauern und zum anderen daran, dass sie bis dato ihre Vorteile in Ermangelung emissionslimitierter Verkehrszonen in Europa nicht ausspielen konnten. Dies gelang ihnen jedoch am Beispiel China, allerdings nur dank drakonischer Durchsetzung. Ebenso trägt die noch fehlende, flächendeckende und öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur nicht zum Erfolg dieser Varianten bei. Dies ließe sich, wenn auch unwahrscheinlich, durch Batteriewechselsysteme beheben.

Rein elektrische Varianten bieten jedoch auch unschlagbare Vorteile für den innerstädtischen Verkehr. Diese sind der fast geräuschlose und lokal emissionsfreie Elektro-Antrieb und das daraus resultierende, und für diese Klasse sehr wichtige, Beschleunigungsvermögen bei gleichzeitig hohem Tank-to-wheel-Wirkungsgrad. Der Direktantrieb reduziert darüber hinaus den Wartungsaufwand und die –kosten.

1.7.3 Scooter mit Hybrid-Antrieb

1.7.3.1 Parallel Konfiguration

Hybridisierung ist in der Fahrzeugklasse L1e nicht neu. Der spanische Hersteller Moto Vespa SA stellte bereits 1995 die ZIP Bimodale 50, Abbildung 12, für Piaggio in Lizenz her. Nach der Übernahme des Werks durch Piaggio 1998 wurde die Produktion eingestellt.



Abbildung 12 : ZIP 50 Bimodale [36] und Hybrid-Triebsatzschwinge [37]

Es handelte sich um einen Parallel-Hybrid, aufgebaut auf einer konventionellen 50cm³ Zweitakt-Triebsatzschwinge und ergänzt um einen Gleichstrommotor, welcher über einen Riemen mit der Kupplungsglocke der Fliehkraftkupplung, und somit direkt mit der Eingangswelle des Sekundärgetriebes, verbunden ist. Diese Anbindung ermöglichte einen rein elektrischen Antrieb, welcher bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h ausschließlich verwendet wird. Darüber hinaus wird der Verbrennungsmotor für die Beschleunigung auf die Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h zugeschaltet. Bei Konstantfahrten mit weniger Leistungsanspruch wird die Batterie über den generatorischen Betrieb des Gleichstrommotors geladen.

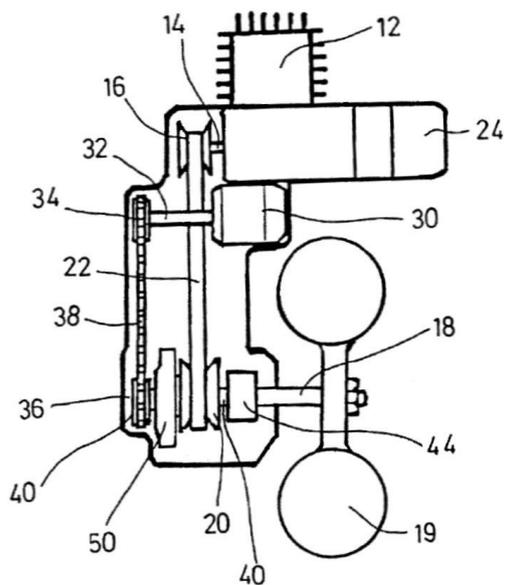


Abbildung 13 : System-Skizze aus Patentschrift US 6155366 [38]

Die Verwendung des Motors als Generator setzt jedoch voraus, dass sich dieser immer mit dem Radantrieb im Eingriff befindet und folglich starr gekoppelt sein muss. Abbildung 13 zeigt die System-Skizze aus einer späteren Patentschriften [38] in welcher ein Freilauf 36 an der glockenseitigen Riemenscheibe vorgeschlagen wird, um die Reibungsverluste zu reduzieren. Dies macht jedoch die zuvor beschriebene Verwendung des Motors als Generator unmöglich. Diese Batterieladefunktion übernimmt bei diesem Vorschlag ein zusätzlicher Generator 24, welcher auf der Kurbelwelle angebracht ist. Die rekuperierbare Bremsenergie ist hierdurch um die Reib- und Pumpverluste des Triebwerks gemindert.

Das Grundkonzept ist seitdem in veränderter Form immer wieder aufgetaucht. In der L1e Klasse am Beispiel der Aspes Vega 50 Hybrid (2010-2015), Abbildung 14 - links, in Kombination mit einem 50 cm³ Viertaktmotor, aber auch in der größeren Klasse L3e mit leicht veränderter Funktionalität, z.B. zur Darstellung eines Rückwärtsbetriebs. Heute ist das Modell Piaggio MP3 Hybrid mit 125 und 300 cm³, Abbildung 14 - rechts, das einzige Hybridmodell der Kategorie L am Europäischen Markt [39].



Abbildung 14 : Hybrid Modelle Aspes Vega 50 Hybrid [40] und Piaggio MP3 125 Hybrid [41]

Statt der ursprünglichen Leistung von 350 W des Gleichstrommotors mit Riementrieb der ZIP Bimodale wird bei dem Aspes 50 Modell eine PMSM mit 500 W im Direktantrieb und beim MP3 in gleicher Weise eine 2,5 kW PMSM verbaut. Abbildung 15 zeigt die dazugehörige System-Skizze aus der MP3 Patentschrift der Universita' di Pisa, Piaggio und C. S.P.A. [42].

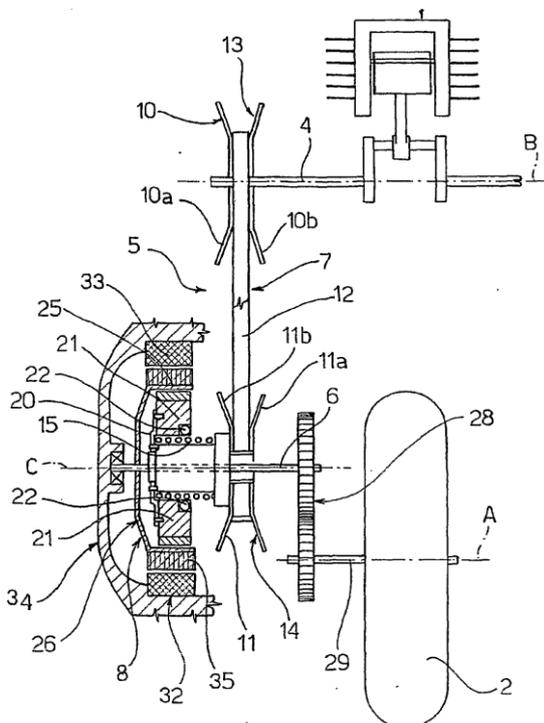


Abbildung 15 : Patentzeichnung EP 1572486 B1 [42]

Die Zielsetzung bei diesem Hybrid-System ist eindeutig die Darstellung eines rein elektrischen Antriebs zur Befahrung emissions- oder verkehrslimitierter Zonen. Diese Art der Hybridisierung verfolgt kaum den Zweck reale Verbrauchswerte zu reduzieren, denn das Fahrzeuggewicht ist durch die zusätzlichen elektrischen Komponenten gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang deutlich gestiegen (MP3: +30kg).

Auch die für Hybride geltende Berechnungsformel für den Verbrauch kann hierfür nicht ausschlaggebend sein, da sich daraus, im Unterschied zum PKW, keine steuerlichen noch zulassungsbezogenen Vorteile ergeben.

Der ursprünglich von Piaggio kommunizierte Plan, dieses System auch in einem einspurigen Fahrzeug anzubieten, wurde bis dato nicht umgesetzt. Offensichtlich bietet nur das dreirädrige Fahrzeug den nötigen Platz für die Zusatzkomponenten Batterie, Kabelstrang,

Ladegerät und Motorregler.

Die wählbaren Betriebsarten des MP3 sind:

- E-Modus: rein elektrischer Antrieb bis 30 km/h
- Lade-Modus: zum Aufladen der Batterie
- Boost-Modus: elektrisch unterstützte Beschleunigung
- Rückwärts-Modus: als Rangierhilfe

Die Auswahl der Betriebsart erfolgt durch den Fahrer. Der kombinierte Betrieb von Verbrennungs- und Elektromotor im Boost-Modus ist auf die Anfahrphase bis zum Erreichen der Grenzgeschwindigkeit von 30km/h limitiert.

Weitere Hybrid Scooter der Klasse L1eB sind derzeit nur am chinesischen Markt erhältlich und nicht für den Export vorgesehen. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Vorbehalt patentrechtliche Gründe hat, da sie auf demselben System aufbauen. In Peking ist bzw. war es einspurigen Fahrzeugen erlaubt, innerstädtische Fahrradwege zu benutzen, wenn sie rein elektrisch angetrieben sind und nicht schneller als 20 km/h fahren. Die Auslegung dieser Fahrzeuge entspricht deshalb genau diesen Anforderungen. Der Betriebsmodus des rein elektrischen Fahrens wird vom Fahrer gewählt, wodurch der 350W-500W starke Elektromotor bis zu eben dieser Höchstgeschwindigkeit den Antrieb übernimmt. Ein unbeabsichtigter Wechsel in einen Betriebsmodus mit Verbrennungsmotor ist somit ausgeschlossen. Das Wiederaufladen der Batterie erfolgt während der Fahrt mit dem Viertakt-Verbrennungsmotor. Eine elektrische Unterstützung während der Beschleunigungsphasen ist der Einfachheit halber nicht vorgesehen. Abbildung 16 zeigt ein solches Fahrzeug und die entsprechende Antriebseinheit.



Abbildung 16 : Asiatische „Parallel-Hybrid“ Variante mit in der Triebwerkschwingen integrierten Elektromotor [43]



Abbildung 17: „Axel-Split“ Variante mit Elektromotor im Vorderrad [44]

Für denselben Zweck, elektrisches Fahren bei reduzierter Geschwindigkeit zu ermöglichen, gibt es auch Fahrzeuge mit einem einfacheren Ansatz. Diese entsprechen der „Axel-Split“ oder „Hybrid through the road“ Hybrid-Architektur und ergänzen das konventionelle Fahrzeug durch ein elektrisch angetriebenes Vorderrad. Dies ist fahrdynamisch, aufgrund der in diesem Beispiel auf 20 km/h begrenzten Geschwindigkeit, unproblematisch und verletzt kein bekanntes Schutzrecht. Dennoch ist diese Variante derzeit nicht verfügbar.

Diese Hybrid-Anordnung lässt sich jedoch als Konzept in einer dreirädrigen Variante eines europäischen Herstellers finden, wie in Abbildung 18 zu sehen. Peugeot stellte 2008 sein Konzeptfahrzeug Hybrid 3 Evolution Concept vor.

Dabei handelt es sich wiederum um ein Fahrzeug der Klasse L3e mit Kompressor aufgeladenem 125 cm³ Viertaktmotor, ergänzt um zwei, in den Vorderrädern platzierten, elektrischen Radnabenmotoren zu je 3kW. Die wählbaren Fahrmodi entsprechen dabei jenen des MP3. Die Elektrifizierung der Vorderachse erlaubt es durch die Achslastverschiebung beim Bremsen mehr Bremsenergie zu rekuperieren. Der fahrdynamische Aspekt des zweirädrigen Vorderradantriebs ist, bedingt durch die Grenzgeschwindigkeit von 30 km/h, im rein elektrischen Fahrmodus hingegen weniger relevant.



Abbildung 18 : Peugeot Hybrid 3 Evolution Concept Dreirad mit Elektromotoren in den Radnaben der Vorderräder und konventionellen Antrieb des Hinterrades [45]

1.7.3.2 Serielle Konfiguration



Abbildung 19 :Malaguti HEM-links und Range Extender Einheit -rechts [46]

Die in Abbildung 19 gezeigte Malaguti HEM ist ein L1e Plug-In Hybrid-Fahrzeug in serieller Konfiguration. Das Modell wurde auf der Eicma 2008 durch den italienischen Hersteller Malaguti präsentiert und war für das darauffolgende Jahr angekündigt. Dazu kam es leider nicht, da Investoren ausblieben und das Werk 2011 schließen musste. Der Prototyp verfügt über einen 1,5 kW Radnabenmotor und einen wassergekühlten 50cm³ Viertaktmotor, welcher im Fall abnehmender Batterieladung zugeschaltet wird. Die angegebene rein elektrische Reichweite beträgt 20 km. Mit Unterstützung der Motor-Generator-Einheit sollten bis zu 150 km möglich sein. Durch die Bleibatterie mit 48 V und 31 Ah sowie den recht schweren Viertaktmotor beträgt das Fahrzeugleergewicht 130 kg.



Abbildung 20: Hero Leap, vorgestellt 2012 [47]

In der Klasse L3e hat der indische Hersteller Hero 2012 ein einspuriges Konzept eines Hybrid-Fahrzeugs mit Range Extender vorgestellt. Die Hero Leap - Abbildung 20 - mit 150cm³ Viertaktmotor und Lithium-Ionen-Batterie sollte laut Hero ab 2014 erhältlich sein. Eine Markteinführung in Indien wurde bis dato immer wieder verschoben, da die Marktfähigkeit durch den mehr als doppelt so hohen Preis gegenüber einem konventionellen Fahrzeug als gering eingestuft wird [47]. Dies macht die Preissensibilität des Scootermarktes abermals deutlich.

In jüngster Zeit lassen sich auch serielle Hybridvarianten in China finden, die zwar nicht den hier gestellten Leistungsanforderungen entsprechen, aber dennoch erwähnt werden sollen. Abbildung 21 stellt ein solches dar. Sie gehören zur Klasse L1eA bis 25 km/h und sind somit als Elektro-Fahrrad eingestuft. Ihre Besonderheit stellt die mitgeführte Stromquelle in Form eines 30 cm³ Verbrennungsmotors dar, welcher mittels Generator 500W elektrische Leistung liefern soll und dies laut Händlerangaben [48] bei Erreichen eines niedrigen Batterieladezustandes selbstständig tut.

Die Hubraumwahl hat keine technische Ursache, sondern zielt abermals auf ein Schlupfloch in der chinesischen Abgasgesetzgebung, wonach diese Motorengröße nicht als Antriebsaggregat zu bewerten ist und somit keiner Abgasprüfung unterliegt. Die Zielsetzung dieser seriellen Hybridkonzepte ist es, Elektromobilität unabhängig von Ladeinfrastruktur zu ermöglichen und unabhängig von der Batteriegröße zusätzliche Reichweiten zur Verfügung zu stellen.



Abbildung 21: L1eA Range Extender Fahrzeug für den chinesischen Markt [48]

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Um den bevorstehenden gesetzlichen Anforderungen EURO 4 und EURO 5 mit einem konventionellen Antriebsstrang zu entsprechen, bedarf es kostenintensiver technologischer Verbesserungen.
- Hierbei hat der Viertaktmotor Vorteile, da er auf bereits bewährte Lösungen aus höheren Fahrzeugklassen oder dem PKW-Sektor zurückgreifen kann.
- Der Zweitaktmotor hingegen kann nur auf Lösungen setzen, welche bereits im Zuge der EURO 2 entwickelt wurden. Durch die erweiterten Anforderungen bedarf es jedoch zusätzlicher Entwicklungsschritte hinsichtlich Kaltstartemissionen und Haltbarkeit der Abgasnachbehandlung.
- Die nötigen Investitionen, seitens der europäischen Innovationsträger in einen rückläufigen heimischen Markt, stellen deren Bereitschaft hierzu jedoch in Frage. Die zuletzt gezeigten Hybrid-Studien dieser Hersteller fokussieren bereits die 125 cm³ Klasse, wobei das Platzproblem für einspurige Varianten noch nicht gelöst scheint. Sie schaffen es jedoch teilweise Elektromobilität auch bei noch nicht vorhandener Ladeinfrastruktur darzustellen.
- Existierende Hybrid-Varianten in paralleler Konfiguration weisen eine Auslegung auf, welche sehr problemorientiert das Durchfahren verkehrsbeschränkter Zonen adressiert. Eine Wirkungsgradsteigerung steht hierbei nicht im Fokus.
- Serielle Hybrid-Varianten werden noch nicht angeboten, obgleich diesen durch ihre Nähe zum rein elektrischen Antrieb höhere Tank-to-wheel Antriebswirkungsgrade zuschreibbar sind. Einfache, asiatische Lösungen schließen sich hinsichtlich der europäischen Abgasgesetzgebung bewusst aus, womit sich die im Kapitel Problemstellung geschilderte EURO 2 Problematik einer nicht nachhaltigen Lösung nicht wiederholen sollte.
- Die Preissensibilität des Marktes ist im Bereich der hubraumschwachen L-Kategorie sehr hoch. Dies gilt in besonderem Maße für die L1eB Klasse am europäischen Markt bedingt durch die allgemein beabsichtigte begrenzte Nutzungsdauer.

Die anzustrebende Lösung muss billig, unkompliziert, effizient, sauber, leise und zumindest über die begrenzte Nutzungsdauer von 2-4 Jahren haltbar sein. Existierende Hybridsysteme sind in Abbildung 22 vereinfacht dargestellt.

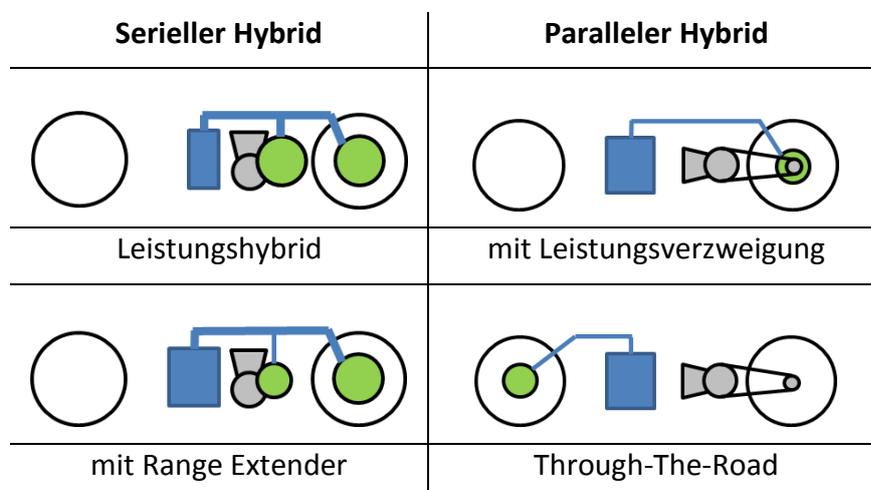


Abbildung 22 : Existierende Typen von Hybridfahrzeugen

1.8 Voruntersuchung - E-Scooter versus konventioneller Scooter

Aus den Betrachtungen zum Stand der Technik leitet sich ab, dass eine serielle Hybrid-Variante unter der gegebenen Randbedingung der Kostenneutralität gegenüber einer rein elektrischen Variante am wahrscheinlichsten umsetzbar ist.

Der serielle Hybrid verfügt über einen rein elektrischen Antrieb ohne mechanischen Durchtrieb. Der sich ergebende Antriebswirkungsgrad hängt dabei in hohem Maße von der Auslegung des Systems und dessen Betriebsweise ab. Unter der Annahme, dass die Systemauslegung einen reinen Batteriebetrieb zulässt, ergibt sich der Systemwirkungsgrad in den Grenzen der Betriebswirkungsgrade für rein elektrischen und rein verbrennungsmotorischen Betrieb. Um diese Grenzen im Zyklus zu beziffern, wird eine vergleichende Untersuchung hinsichtlich des Tank-to-Wheel Wirkungsgrades an einem rein elektrischen und einem konventionellen Antrieb durchgeführt. Als rein elektrische Variante dient das unter 4.2.1 beschriebene Fahrzeug mit 3kWe Spitzenleistung und als konventionelle Variante ein bereits verbrauchsreduzierter Zweitakt-Scooter mit Niederdruck-Direkteinspritzung und CVT-Variomatik wie er in [81] beschrieben ist.

Abbildung 22 stellt die am Rollenprüfstand im Fahrzyklus gemessene mechanische Antriebsleistung, sowie die sich daraus ergebende mechanische Energie kumuliert (in grün) und die gemessene elektrische Leistung sowie die Energie aus dem Energiespeicher Batterie kumuliert (in blau) dar.

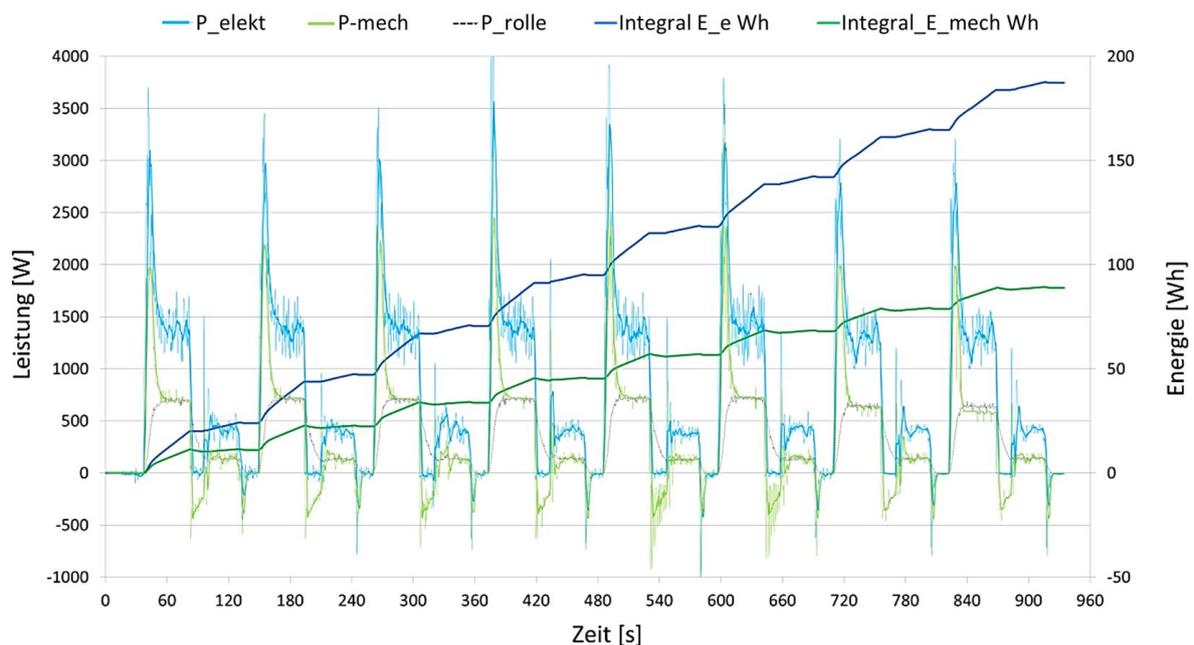


Abbildung 22: Gemessene Leistungen und kumulierter Energieverbrauch eines E-Scooters mit 3kW maximaler Antriebsleistung und Gegenüberstellung mit dem mechanischen Leistungsbedarf im Fahrzyklus ECE R47

In Tabelle 2 werden diese dem Kraftstoffverbrauch eines konventionellen Antriebsstrangs gegenübergestellt, wodurch sich ein Vergleich der im Zyklus erreichbaren Wirkungsgrade ergibt.

Tabelle 2: Tank-to-wheel-Verbrauch und daraus resultierender Wirkungsgrad

	Energieverbrauch [Wh] im Zyklus à 6km	Energieverbrauch [Wh]/100km *(Benzin 8,5 kWh/l)	Wirkungsgrad im Zyklus
Erforderlich mech.	88,9	1481,7	-
Konventionell	1028,2	17.136*	8,7%
Elektro	187	3116,7	47,5%

Der beeindruckende Wirkungsgrad der Elektrovariante von 47,5% resultiert einerseits aus dem hohen Wirkungsgrad des Elektroantriebs selbst und andererseits aus der Rekuperation der Bremsenergie in den Verzögerungsphasen. Die Nutzung der Rekuperation ist beim Systementwurf zwingend zu berücksichtigen, da er sich nach [49], trotz des geringen Fahrzeuggewichts, signifikant mit bis zu 15% weniger Energieverbrauch im Zyklus Common Artemis Driving Cycles (CADC) beziffert.

Der durch Hybridisierung im Zyklus erreichbare Wirkungsgrad ist durch den Wert der Elektrovariante nach oben hin begrenzt. Durch die bei seriellem Hybrid ungünstige Wirkungsgradverkettung von der VKM bis zum Antriebsrad, ist anzunehmen, dass sich ein geringerer Transmissionswirkungsgrad als bei der konventionellen Variante ergeben wird. Ob dies zu einem gesamt schlechteren Antriebswirkungsgrad führt, hängt stark von den Betriebsanteilen der jeweiligen Antriebsart ab. Vorteile gegenüber der konventionellen Variante lassen sich durch die Abwesenheit von Leerlaufanteilen, mit de facto 0% Wirkungsgrad, erzielen. Allgemein gilt es nach einem möglichst hohen rein elektrischen Betriebsanteil zu streben.

1.9 Lösungsansatz für die L1e Fahrzeugklasse

Die im Kapitel Stand der Technik geschilderten Probleme der einzelnen Alternativen und deren Potential hinsichtlich kurzfristiger Erfüllung der bevorstehenden Anforderungen zeigen, dass keine der angeführten Varianten gänzlich entspricht. Die rein elektrische Variante genießt zwar den Vorteil keine Emissionsgrenzwerte erfüllt zu müssen, hat jedoch am Markt Nachteile durch die begrenzte Reichweite und die hohen Anschaffungskosten. Rein verbrennungsmotorische Varianten stehen erhebliche Innovationsschritte unterschiedlichen Grades bevor, wobei durch die enge Abfolge der Einführung der nächsten Emissionsstufe bereits Lösungen für EURO 5 entwickelt werden müssen. Zwischenlösungen für EURO 4 werden sich kaum amortisieren.

Der Lösungsansatz lautet somit Hybridisierung. Für die Forderung nach CO₂ Reduktion gilt es, den hohen Tank-to-wheel-Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs zu nutzen und die Nachteile hinsichtlich Reichweite, Kosten und Gewicht durch den Einsatz einer bewährten Verbrennungskraftmaschine zu reduzieren. Die hierfür gewählte Hybridvariante ist ein Plug-In Hybrid-Elektrisches-System in serieller Konfiguration. Bei diesem Hybridsystem ist der Hauptantrieb rein-elektrisch ausgeführt und der Anteil der durch externes Laden (Plug-In) zugeführten elektrischen Energie bleibt bei der CO₂ Einstufung unberücksichtigt. Die Vernachlässigung des Lade-CO₂ trifft korrekterweise nur zu, wenn die Stromherkunft aus CO₂-neutraler Quelle stammt.

Es wird eine kosten- und bauraumneutrale Lösung angestrebt. Bedingt durch die begrenzte Höchstgeschwindigkeit und Leistung, kann auf einen wirkungsgradgünstigeren mechanischen Durchtrieb zu Gunsten geringerer Komplexität und Kosten verzichtet werden. Da die Reichweite durch den Range Extender sichergestellt wird, kann die Batteriegröße reduziert werden. Die Größenreduktion ist jedoch begrenzt, da die Batterie nach wie vor die Leistung für einen rein elektrischen Antrieb liefern können muss. Das Auslegungskriterium der Batteriegröße ist somit nicht mehr die rein elektrische Reichweite, sondern die abgebbare elektrische Leistung. Es ist weiters zu beachten, dass hohe C-Raten¹⁴ mit Erwärmung der Batterie einhergehen, welche die Zyklenanzahl und somit die Einsatzdauer der Batterie reduziert.

Aus den Voruntersuchungen aus 1.8 resultiert, dass es vorteilhaft ist, wenn zumindest eine durchschnittliche Tagesfahrstrecke als rein elektrische Reichweite sichergestellt wird. Die durch die Batteriereduktion eingesparten Kosten sowie der freigewordene Bauraum stellen die konstruktiven und finanziellen Zielgrößen für die Range Extender Einheit dar. Diese Zielgrößen setzen kleine und kostengünstige Hauptkomponenten der Range Extender-Einheit, Antriebsmotor und Generator, voraus.

Lösungsansatz:

Hybridantrieb, bestehend aus einem elektrischen Hauptantrieb mit einer gegenüber bestehenden E-Fahrzeug Ausführungen deutlich verkleinerten Batterie und mit einer Verbrennungskraftmaschine als Range-Extender

1.10 Zielsetzung

Unter den schwer zu erfüllenden gesetzlichen Anforderungen gilt es die L1eB Klasse in der Form des im urbanen Verkehr bewährten Scooter-Fahrzeugs zu erhalten, um für künftige

¹⁴ C-Rate bezeichnet den auf die Nennkapazität des Akkus in Amperestunden (Ah) bezogenen Lade- oder Entladestrom

Entwicklungen von Ballungsräumen vorbereitet zu sein.

Durch die Entkoppelung des Verbrennungsmotors von den transienten Anforderungen des Antriebs lässt sich beim gewählten seriellen Hybridsystem die Betriebsweise dahingehend optimieren, dass die Rohemissionen und die damit einhergehende Haltbarkeit der Abgasnachbehandlung verbessert werden können. Das übergeordnete Ziel ist es, einen Antriebsstrang zu schaffen, der hinsichtlich Handhabbarkeit, Verbrauch, Emissionen und Geräusch zukunftsfähig ist und überdies eine Übertragbarkeit auf andere Kategorie L Fahrzeuge aufweist. Daher werden Entscheidungen bereits in der Konzeptphase mit Bedacht auf diese Fähigkeiten getroffen. Die Variablen bei einer abschließenden Übertragbarkeitsbetrachtung umfassen die darzustellende Leistung, die Art der Batterie aber auch die Austauschbarkeit der Antriebsquelle selbst.

1.11 Besondere Herausforderung

Die gestellte Aufgabe ist von ihrer Natur her multidisziplinär und umfasst die technischen Sachgebiete elektrochemische Energiespeicher, mechanisch-elektrische und chemisch-mechanische Energiewandlung. Da das resultierende Produkt für die Anwendung in einem Fahrzeug bestimmt ist, sind auch die relevanten gesetzlichen Rahmenbedingungen zu erfassen und zu berücksichtigen. Die Konzeptionierung und die zum Zwecke des experimentellen Nachweises durchzuführende Umsetzung in ein Versuchsfahrzeug stellt bereits eine Produktentwicklungsaufgabe dar. Letztlich ist die Anwendung das eigentlich Nutzbringende, welche aber nur erreicht wird, wenn das Produkt einen Käufer findet. Daher sind soziopolitische und marktwirtschaftliche Aspekte von ebenso hoher Bedeutung.

2 Methodik

Die sich aus dem Lösungsansatz ergebende Aufgabe, eine Komponente zur Verwendung in einem Fahrzeug umzusetzen, erfordert eine präzise Planung und Aufteilung der Arbeitsschritte in Phasen. Die Komplexität der Aufgabe und die Natur des zu entwerfenden Produkts machen es notwendig, sich einer bewährten Entwicklungsmethodik zu bedienen. Das Hybridfahrzeug, aber auch der Range Extender selbst, stellt, durch die Kombination eines mechanischen und eines elektrischen Systems unter Zuhilfenahme von Steuerelektronik, ein mechatronisches System dar. Demzufolge findet die Richtlinie VDI 2206 [50] „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ Anwendung. Sie schreibt das V-Modell als verbindlichen Standard vor. Für den vorliegenden Entwicklungsprozess eines Range Extenders auf Basis eines Elektro-Scooters lässt sich das V-Modell entsprechend Abbildung 23 detaillierter darstellen.

In einem ersten Schritt werden die Einzelkomponenten des Range Extender Fahrzeugs identifiziert und im Kapitel Grundlagen einer näheren Betrachtung unterzogen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen der Vervollständigung der Anforderungen an das Hybridsystem, dem Verständnis der technischen Zusammenhänge und dem Nachvollzug der getroffenen Entscheidungen dienen.

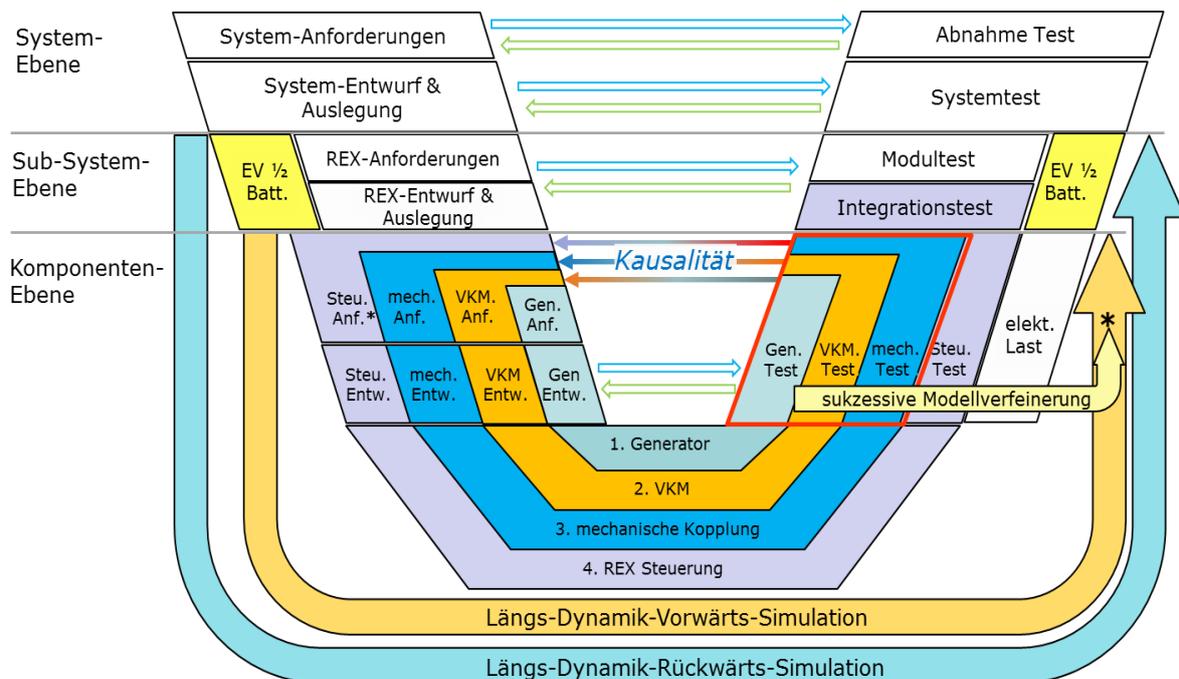


Abbildung 23 : Detailliertes V-Modell – Darstellung der Vorgehensweise im Entwurf- und Integrationsprozess

Die weitere Vorgehensweise erfordert eine präzise Strukturierung. Wie dem Schaubild (Abbildung 23) zu entnehmen, erfolgt eine Aufteilung in System-, Sub-System- und Komponentenebene, welche auch der Gliederung der vorliegenden Arbeit dient.

Auf der **System-Ebene**, werden die **System-Anforderungen** an das Hybridfahrzeug gestellt. Diese leiten sich einerseits aus der bereits formulierten Problemstellung, sowie andererseits aus den im Kapitel 3 Grundlagen dargelegten gesetzlichen Anforderungen für die Fahrzeug-Typgenehmigung ab. Der Nachweis der Erfüllung dieser Anforderungen kann erst durch den, am Ende des Integrationszweiges liegenden, Abnahmetest erbracht werden. Dieser Test erfolgt experimentell und bedingt daher ein real existierendes Versuchsfahrzeug. Somit ergibt sich zusätzlich die Aufgabe, ein solches Hybrid-Fahrzeug umzusetzen und darzustellen.

Hierzu erfolgt, im Abschnitt 4.1.2 System Entwurf & Auslegung, der konzeptionelle Entwurf des Hybridsystems in Form eines seriellen Hybrides mit Range Extender auf Basis eines existierenden rein elektrischen Scooters mit einer um 50% reduzierten Batteriegröße. Die Auslegung erfolgt anhand von Wirkungsgradannahmen für die Hauptkomponenten des Hybrid-Antriebsstrangs und entsprechend der Zielsetzung, eine Reichweitenverlängerung mit unverminderter Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h bei Fahrt in der Ebene und bei leerer Batterie zu erreichen. Eine Vorab-Bewertung des Entwurfs und der Auslegung hinsichtlich der Zielgröße CO₂-Reduktion erfolgt modellbasiert mittels Längs-Dynamik-Rückwärts-Simulation. Zur Modellbildung werden sowohl messtechnisch und experimentell ermittelte Fahrzeugdaten als auch Verbrauchskennfelder des Verbrennungsmotors verwendet. Diese Vorgehensweise lässt die Erprobung und Bewertung unterschiedlicher Betriebsstrategien zu und gibt Aufschluss über die benötigten Eigenschaften des Subsystems -Range Extender- sowie dessen darzustellende Funktionen. Ein positives Simulationsergebnis leitet den Schritt zur nächsten Ebene ein. Die Validierung in Form eines experimentellen Nachweises kann wiederum erst im Abschnitt 5.3 Systemtest des Integrationszweiges erbracht werden. Eine Verifikation der getroffenen Wirkungsgradannahmen erfolgt bereits früher, auf der Komponentenebene, durch die messbaren Wirkungsgrade der ausgewählten Einzelkomponenten.

Auf der **Sub-System-Ebene** erfolgt die Aufteilung des Hybridsystems auf Subsysteme entsprechend dem Lösungsansatz, die Batteriegröße des rein elektrischen Fahrzeugs im Sinn einer vernünftigen elektrischen Reichweite zu reduzieren und den Range Extender als eine eigenständige Einheit darzustellen. Aus den Betrachtungen und Ergebnissen auf Systemebene werden Anforderungen für diese Subsysteme abgeleitet, wobei das ausgewählte EV-Basisfahrzeug (siehe 4.2.1 Elektrischer Antriebsstrang & Fahrzeug) mit einer um 50% reduzierter Batteriegröße von keiner weiteren Veränderung betroffen sein soll. Es überspringt den Entwicklungsprozess und findet sich unverändert im Integrationsteil beim Modultest wieder.

Der Range Extender (REX) stellt das zweite Subsystem dar, welches es auf dieser Ebene zu entwerfen gilt. In einem ersten Schritt werden die REX-Anforderungen an dieses Subsystem formuliert. Diese ergeben sich aus grundsätzlichen Überlegungen hinsichtlich Kosten, Bauraum, Gewicht aber auch hinsichtlich Geräusch und Wirkungsgrad. In der REX-Entwurfs- und Auslegungsphase erfolgen die Konzeption des Subsystems REX sowie die Festlegung der Einzelkomponenten. Mit der Auslegung auf den Betriebsfall, Fahrt bei Höchstgeschwindigkeit bei leerer Batterie, ist diese Phase abgeschlossen.

Eine Längs-Dynamik-Vorwärts-Simulation soll durch zunächst virtuelle Implementierung des Range Extenders klären, ob der Ansatz zielführend und gefahrlos möglich ist. Das hierzu erstellte Hybridfahrzeug-Modell wird zunächst mit Standard-Modellen für die Batterie, den Range Extender-Komponenten – Generator und Verbrennungskraftmaschine, sowie mit den aus der Längs-Dynamik-Rückwärts-Simulation zur Verfügung stehenden Fahrzeugdaten aufgesetzt. Die auf Komponentenebene im Zuge der Komponententests experimentell gewonnenen Daten charakterisieren die Einzelkomponenten und dienen der sukzessiven Verfeinerung des Modells. Diese modellgestützte Voruntersuchung soll helfen, die Systemstabilität zu bewerten und, wenn möglich, selbststeuernde Eigenschaften des Systems zu identifizieren. Diese gilt es zu nutzen, ist es doch nicht beabsichtigt, einen einfachen Systemaufbau mittels eines ausufernden und kostspieligen Steuerungsbedarfs zu verwirklichen.

Die **Komponenten-Ebene** umfasst die Formulierung der Anforderungen an die Einzelkomponenten des Range Extenders sowie deren Auswahl und Charakterisierung. Diese Vorgehensweise folgt dabei dem Kausalitätsprinzip. Dieses ergibt sich aus der Tatsache, dass die Erweiterung eines Systems um eine zusätzliche Komponente das System verändert und somit für jede weitere Komponente geänderte Bedingungen schafft. Die Kausalitätskette

beginnt mit dem Generator als jener Komponente, welche direkt mit dem Fahrzeugsystem verbunden ist. Die Anforderungen an diesen ergeben sich aus den elektrischen Leistungsanforderungen des rein elektrischen Antriebsstrangs bzw. des Fahrzeugsystems. Hierzu werden die experimentell gewonnenen Daten zur Fahrzeugcharakterisierung für die Modellbildung herangezogen. Der Generator, als mechanisch elektrischer Energiewandler, übersetzt die elektrische Lastanforderung entsprechend seiner Eigenschaften in eine mechanische Lastanforderung an der Generatorwelle, welche durch die mechanische Kraftquelle – die Verbrennungskraftmaschine – bereitgestellt werden muss. Die Anforderungen hinsichtlich Last und Lastregelbedarf sind demzufolge durch den Generator und das Fahrzeugsystem beeinflusst. In diesem Abschnitt wird neben der VKM selbst auch deren Lastregelverfahren erarbeitet.

Die Anforderungen an den mechanischen Aufbau ergeben sich aus der Kopplung der beiden Hauptkomponenten und können demzufolge erst nach Kenntnis der Ausprägung und Eigenschaften aufgestellt werden. Für eine wirkungsgradoptimale Konfiguration sind die erforderlichen Eingangsgrößen die Wirkungsgradkennfelder der Hauptkomponenten.

Mit der ausgeführten mechanischen Koppelung entsteht eine Baugruppe, welche einen kombinierten Komponententest zur Klärung des Steuerungsbedarfs zulässt. Die Anforderungen an die Steuerung sind beeinflusst durch die Freiheitsgrade dieser Baugruppe und ergeben sich auch aus den Anforderungen an die Range Extender Einheit auf der Subsystemebene hinsichtlich der darzustellenden Funktionen. Diese sind der automatische Start und Stopp sowie die Leistungsanpassung an den Batteriezustand. Der Steuerungskomponententest erfolgt anhand elektronisch generierter Eingangsgrößen und Überprüfung der Steuerungsantwort.

Der Betrieb im Verbund mit der Baugruppe und gegen eine elektrische Last anstelle der Batterie wird aus Sicherheitsgründen dem Integrationstest vorgezogen, um die korrekte Funktionsweise vor Kopplung an die Batterie sicherzustellen.

Der **Integrationstest** erfolgt bereits gegen die Batterie und dient der Validierung des Entwurfs und der Auslegung der Range Extender Einheit. Es sind die darstellbaren elektrischen Leistungen sowie die sichere Start-/Stopp-Funktion nachzuweisen. Der **Modultest** erfolgt zum Nachweis der Erfüllung aller an die Range Extender Einheit gestellten Anforderungen unter anderen auch hinsichtlich Größe und Gewicht. Der **Systemtest** umfasst das Hybridfahrzeug, wobei der Entwurf und die Auslegung zu validieren sind. Besondere Betriebsbedingungen sind hierbei die Fahrt mit leerer Batterie, der reine Ladebetrieb im Stillstand und die Rekuperationsphase bei laufendem REX.

Der Umfang des **Abnahmetests** ist durch die Systemanforderungen definiert. Die wichtigsten sind der Verbrauch und die Emissionen da sie schlussendlich die Forschung an einem Hybrid motivieren. Die Ergebnisse der hierfür vorgeschriebenen Tests werden im Kapitel 5.5 Interpretation der Ergebnisse zusammengefasst und anschließend hinsichtlich der EURO 4 und EURO 5 Grenzwerte interpretiert. Hieraus ergeben sich die Eigenschaften der jeweils notwendigen Abgasnachbehandlungen, welche im Zuge der Interpretation mittels Simulation implementiert und ausgewertet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden anschließend hinsichtlich des Erfüllungsgrades der Emissionsanforderungen, des CO₂ Reduktionszieles und daraus ableitbarer Konsequenzen diskutiert.

Im Kapitel Schlussfolgerungen wird der Erfüllungsgrad des entstandenen Systems bewertet. Dabei werden die bei der Charakterisierung der Hauptkomponenten identifizierten Optimierungsansätze mitberücksichtigt. Abschließend wird die Frage nach einer Übertragbarkeit auf andere Fahrzeug- bzw. Leistungsklassen, Energiespeicher und Antriebsaggregate geklärt.

3 Grundlagen

Die in diesem Abschnitt dargelegten Grundlagen dienen dem Verständnis der Zusammenhänge der komplexen Aufgabenstellung und der im Zuge dieser Arbeit getroffenen Entscheidungen. Die relevanten Grundlagen sind von äußerst unterschiedlicher Natur und umfassen sowohl rechtliche als auch technische Thematiken. Es wird auf besonders relevante Zusammenhänge, welche sich als Anforderungen formulieren lassen, hingewiesen.

3.1 Gesetzliche Grundlagen der Typgenehmigung

Aus gesetzlicher Sicht werden Fahrzeuge in verschiedene Klassen eingeteilt (3.1.1), aus diesen leiten sich Anforderungen an z.B. Umweltverträglichkeit, funktionale Sicherheit, etc. (3.1.2) sowie Testverfahren (3.1.3) und einzuhaltende Grenzwerte (3.1.3.1) ab. Die genauen Vorschriften finden sich im Anhang unter 10.1 Gesetzliche Grundlagen.

3.1.1 Fahrzeugeinstufung

Verordnung (EU) Nr. 168/2013 enthält in Anhang 1 die Fahrzeugeinstufung laut Tabelle 3. Demzufolge ist die Klasse L1eB auf 50 cm³ Hubvolumen, 4 kW Antriebsleistung und 45km/h Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Die motorbezogene Beschränkung auf 50 cm³ gilt unabhängig davon, ob der Verbrennungsmotor das Fahrzeug direkt antreibt oder indirekt, wie im Falle des Range Extenders, mit Energie versorgt.

Tabelle 3: 168/2013 Anhang I – Fahrzeugeinstufung [18]

Klasse	Bezeichnung der Klasse	Gemeinsame Einstufungskriterien
L1e-L7e	Alle Fahrzeuge der Klasse L	(1) Länge $\leq 4\,000$ mm oder $\leq 3\,000$ mm für ein L6e-B-Fahrzeug oder $\leq 3\,700$ mm für ein L7e-C-Fahrzeug, und (2) Breite: $\leq 2\,000$ mm, oder $\leq 1\,000$ mm für ein L1e-Fahrzeug, oder $\leq 1\,500$ mm für ein L6e-B- oder ein L7e-C-Fahrzeug und (3) Höhe $\leq 2\,500$ mm und
Klasse	Bezeichnung der Klasse	Gemeinsame Einstufungskriterien
L1e	Leichtes zweirädriges Kraftfahrzeug	(4) zwei Räder und eine der unter Artikel 4 Absatz 3 genannten Antriebsformen und (5) ein Hubvolumen von ≤ 50 cm ³ , falls ein PI-Verbrennungsmotor Teil der Antriebskonfiguration des Fahrzeugs ist, und (6) bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs ≤ 45 km/h und (7) maximale Nenndauerleistung oder Nutzleistung (1) $\leq 4\,000$ W und (8) Gesamtmasse = technisch zulässige Masse nach Angabe des Herstellers und
Unterklassen	Bezeichnung der Unterklasse	Zusätzliche Kriterien für die Einstufung hinsichtlich der Unterklasse
L1e-A	Fahrrad mit Antriebssystem	(9) Räder, die für den Pedalantrieb ausgelegt und mit einem Hilfsantrieb ausgerüstet sind dessen Hauptzweck die Unterstützung der Pedalfunktion ist, und (10) die Leistung des Hilfsantriebs wird beim Erreichen einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 25 km/h unterbrochen und (11) maximale Nenndauerleistung oder Nutzleistung (1) $\leq 1\,000$ W und (12) ein drei- oder vierrädriges Fahrrad, das mit den zusätzlichen spezifischen Kriterien 9 bis 11 für die Einstufung als Unterklasse übereinstimmt, gilt als technisch gleichwertig in Bezug auf ein zweirädriges L1e-A-Fahrzeug.
L1e-B	Zweirädriges Kleinkraftfahrzeug	(9) Ein sonstiges Fahrzeug der Klasse L1e, das anhand der Kriterien 9 bis 12 nicht als L1e-A-Fahrzeug eingestuft werden kann.

3.1.2 Anforderungen

In Anhang II werden die Anforderungen für die EU-Typgenehmigung entsprechend der Zielsetzung in A, B und C Anforderungen gruppiert und aufgelistet. Die relevanten Anforderungen sind mit Kennziffer, Kennzahl sowie zugehörigem Artikel herausgegriffen.

A - Umweltverträglichkeit und Antriebsleistung (Artikel 23 & 24)

- 1) Emissionen
- 3) Geräusch

B - Funktionale Sicherheit (Artikel 22)

- 3) elektrische Sicherheit

C - Fahrzeugauslegung und allgemeine Anforderungen für die Typgenehmigung

- 2) Maßnahmen für Typgenehmigungsverfahren - Artikel 25
- 6) Elektromagnetische Verträglichkeit EMV – Artikel 18
- 11) On-Board Diagnosesysteme – Artikel 21

3.1.3 Test-Typen

Zum Nachweis der Erfüllung der Emissionsanforderungen sind unterschiedliche Test-Typen definiert. Tabelle 4 listet die Testtypen und deren Zweck für EURO 4 und EURO 5 für die Klasse L1eB.

Tabelle 4 : Test-Typen zum Nachweis der Emissionsanforderungen [18]

Test Typ	Beschreibung	für L1eB	
		EURO 4 ab 1.1.2017	EURO 5 ab 1.1.2020
I	Verdünnte Abgasmessung auf dem Rollenprüfstand in definiertem Fahrzyklus	Fahrzyklus ECE R47 Bewertung kalt/warm 50%/50% Grenzwerte EURO 4	Fahrzyklus WMTC Phase3 * Bewertung kalt/warm 50%/50% Grenzwerte EURO 5 *
II	Unverdünnte Emissionen im Leerlauf und bei erhöhtem Leerlauf	Nach 2009/40/EG Kein Grenzwert	Zusätzl. freie Beschleunig. Kein Grenzwert
III	Null-Emission aus dem Kurbelgehäuseemissionen	Nach Anhang VI (bei Zweitakt nicht anwendbar)	
IV	Verdunstungsemissionen	Kraftstofftank	SHED-Prüfung und Grenzwerte *
V	Dauerhaltbarkeit emissionsmindernder Einrichtungen	Anhang VI und VII 11.000 km	11.000 km *
VI	Nicht definiert	-	-
VII	Energieeffizienz, Verbrauchsmessung und CO ₂ -Emissionen	Bestimmung und Meldung Kein Grenzwert	
VIII	On-Board Diagnosesysteme	L1eB ist von OBD I ausgenommen	L1eB ist von OBD II ausgenommen
IX	Geräuschmessung	Anhang VI Teil D Grenzwert 71dB	UN-ECE Regelung Nr. 9, 41, 63, 92 Neue Grenzwerte

*) hängen von den Ergebnissen einer durch die Kommission beauftragten Umweltverträglichkeitsprüfung ab

Von besonderer Bedeutung sind Test-Typen I , V,VII und IX.

3.1.3.1 Typ I – Emissionen

Grenzwerte

Die für Test Typ I definierten Grenzwerte sind in untenstehender Tabelle 5 für EURO 4 und EURO 5 gelistet. Hieraus geht hervor, dass mit EURO 5 auch Partikel und Nichtmethankohlenwasserstoffe limitiert werden. Der Partikelgrenzwert findet nur bei direkt einspritzenden Benzin- und Dieselmotoren Anwendung. Die Größe der Werte hat keinen L-Kategorie bezogenen technischen Hintergrund, sondern orientiert sich an den Grenzwerten der PKW Abgasgesetzgebung. Sie sind zum jetzigen Zeitpunkt noch in Diskussion und hängen von den Ergebnissen einer durch die Kommission beauftragten Umweltverträglichkeitsprüfung ab, deren Veröffentlichung sich zusehends verzögert.

Tabelle 5: EURO 4 und EURO 5 Grenzwerte für die Typ I Prüfung [18]

EURO Stufe	Masse des Kohlendioxids (CO)	Masse der Kohlenwasserstoffe (THC)	Masse des Nichtmethan-kohlenwasserstoffs (NMHC)	Masse der Stickoxide (NO _x)	Partikelmasse (PM)
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
EURO 4	1 000	630	-	170	-
EURO 5	1 000	100	68	60	4,5

Bemerkenswert ist der mit EURO 5 stark reduzierte Grenzwert für Kohlenwasserstoffe. Kohlenwasserstoffe werden besonders im Kaltstart, bei noch nicht betriebswarmer Abgasnachbehandlung (Katalysator), emittiert. Diese Anforderung verlangt eine gezielte Kaltstart- und Katalysatorheizstrategie. Als letztes Mittel kann der Einsatz eines elektrisch vorgeheizten Katalysators gesehen werden.

Fahrzyklen

Die Grenzwerte der beiden Euro-Stufen sind nicht direkt vergleichbar, da sich mit EURO 5 auch der Prüfzyklus ändert. Die Zyklen ECE R47 für EURO 4 und der WMTC Phase 2 Part I (ersatzweise*) für EURO 5 sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Phase 3 des WMTC Part I wartet noch auf das Ergebnis der Umweltverträglichkeitsprüfung. Es wird angenommen, dass Phase 2/Part 1 des WMTC Zykluses mit einer Begrenzung auf 45 km/h zur Anwendung kommen wird.

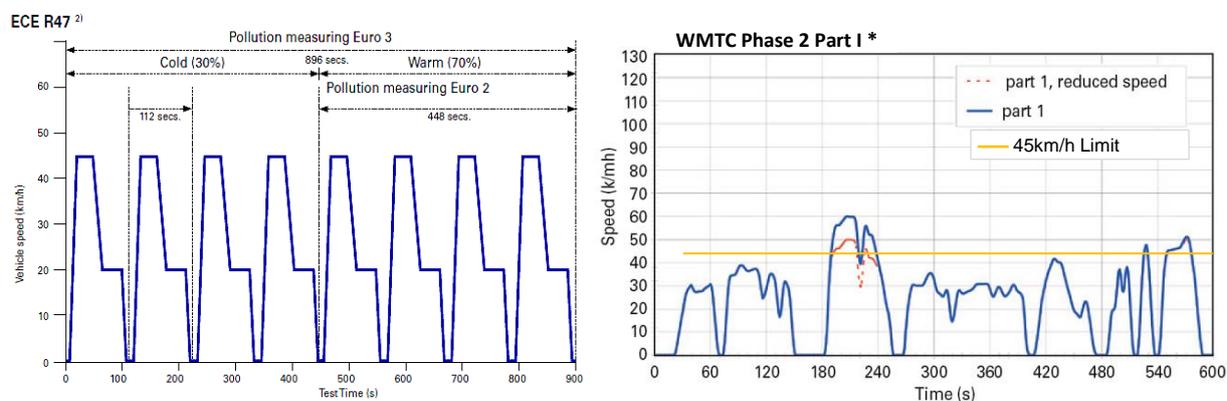


Abbildung 24 : Prüfzyklen ECE R 47 [51] -links und WMTC Phase 2 Part I [52]– rechts

Der WMTC/Part 1 wird nach Kaltstart ein zweites Mal im warmen Zustand durchlaufen, wobei die Beutelwerte beider Durchläufe zu je 50% in das gewichtete Ergebnis eingehen.

Hybrid - Prüf- und Auswerteverfahren - Typ I

Für hybride Antriebstränge gelten dieselben Abgasgrenzwerte, jedoch unterscheiden sich das Messverfahren sowie das Auswerteverfahren. Hierbei wird differenziert, ob das Fahrzeug von außen aufladbar ist und ob es dem Fahrer möglich ist, Einfluss auf die Betriebsweise des Hybridsystems zu nehmen.

Die 134/2014 greift in Anhang II die Anforderungen für die Prüfung Typ I nochmals auf und legt mittels Anlage 11 die Einteilung nach Hybrid-Art laut Tabelle 6 und das jeweilige Verfahren für die Prüfung Typ I von Hybridfahrzeugen der Klasse L fest.

Einteilung der Hybridfahrzeuge

Tabelle 6 Arten von Hybridfahrzeugen laut Anlage 11-2 aus 134/2014 [51]

Aufladung des Fahrzeugs	extern aufladbar (OVC)		nicht extern aufladbar (NOVC)	
	ohne	mit	ohne	mit
Betriebsartenschalter				

Berechnungsformeln für Emission und Verbrauch

Die manchmal unvorstellbar niedrigen Verbrauchs- und Emissionsangaben in Prüfberichten ergeben sich aus der anzuwendenden Prüfvorschrift und der besonderen Berechnungsformel laut 134/2014 Anlage 6 Anhang II [51].

Hierbei wird das extern aufladbare Hybrid-Elektrofahrzeuge in den Zuständen A und B der Typ I Prüfung unterzogen. Zustand A stellt den Fahrzeugzustand mit voller Batterie dar, wohingegen Zustand B das Fahrzeug mit leerer Batterie darstellt.

Der Prüfzyklus ist für jeden der beiden Zustände durchzuführen, wobei sich das ermittelte Prüfergebnis entsprechend Verfahren gemäß 4.2.4.2.1 nach Gleichung 3-1 errechnet. Diese Gleichung wird im Folgendem als „Hybridformel“ bezeichnet.

$$M_i = (D_e \cdot M_{1i} + D_{av} \cdot M_{2i}) / (D_e + D_{av}) \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Hierin steht:

M_i für die gewichtete Masse einer Abgaskomponente i in g

D_e für die rein elektrische Reichweite in km, welche entsprechend Prüfvorschrift experimentell nachzuweisen ist.

D_{av} für eine vorgegebene, fahrzeugabhängige Strecke in km. Für die L1eB Fahrzeugklasse ist diese auf 4 km festgelegt. Damit wird impliziert, dass die Verbrennungskraftmaschine pro Batterieladung für die Wegstrecke von D_{av} in Betrieb ist.

M_{1i} für die Masse der emittierten Komponente i in g während der Prüfung im Zustand A

M_{2i} für die Masse der emittierten Komponente i in g während der Prüfung im Zustand B

3.1.3.2 Typ V - Dauerhaltbarkeit emissionsmindernder Einrichtungen

Die Anforderung hinsichtlich Dauerhaltbarkeit ist durch die Angabe einer Wegstrecke ausgedrückt. Diese beträgt laut Tabelle 4 für EURO 4 11.000 km und entspricht damit bereits der zu erwartenden Lebensdauer-Kilometerleistung der L1eB Klasse. Eine Anpassung dieser Anforderung im Zuge von EURO 5 wird demzufolge nicht erwartet, ist aber nicht gänzlich auszuschließen.

Im Falle des Hybrid mit Range Extender werden der Verbrennungsmotor und dessen Abgasnachbehandlung nur sporadisch eingesetzt. Die Dauerhaltbarkeitsforderung (DH_{gef}) in km reduziert sich damit auf den Anteil der Range Extender Betriebsstrecke zur Gesamtfahrzeugstrecke. Geht man davon aus, dass der Range Extender, wie im Schlüssel für die Emissionsberechnung mit D_{av} angegeben, pro Batterieladung 4 km (RW_{Rex}) in Betrieb ist und die rein elektrische Reichweite pro Batterieladung (RW_{elek}) 20 km beträgt, reduziert sich die darzustellende Dauerhaltbarkeit DH_{soll} von 11.000 km entsprechend Gleichung 3-2 auf 1.833 km.

$$DH_{\text{gef}} * \frac{RW_{\text{Rex}}}{RW_{\text{elek}} + RW_{\text{Rex}}} = DH_{\text{soll}} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

3.1.3.3 Typ VII – Energieeffizienz

Hersteller sind verpflichtet, die Verbrauchs- und CO₂-Emissionsdaten zu erfassen und zu melden. Sie unterliegen auch unter EURO 5 keinem Grenzwert. Es besteht das Bestreben diesen Wert im Sinne der Zielsetzung und aus Gründen der Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung zu reduzieren. Für den Hybrid-Antriebsstrang werden die Werte für CO₂-Emissionen und Benzinverbrauch entsprechend Abschnitt „Hybrid Prüf- und Auswerteverfahren - Typ I“ rechnerisch ermittelt.

3.1.3.4 Typ VIII –On-Board Diagnose

Die Klasse L1eB wurde, aufgrund der von Herstellern und deren Verband ACME eingebrachten Bedenken um die Finanzierbarkeit eines OBD Systems in dieser Klasse, von der Pflicht einer On-Board Diagnose ausgenommen. Mit EURO 5 gilt die Befreiung nur für OBD II, womit verstanden werden kann, dass eine OBD I-Pflicht auch für die L1e-Klasse eingeführt wird.

3.1.3.5 Typ IX – Geräusch

Die Ermittlung des Geräuschpegels erfolgt in einer Messprozedur entsprechend 134/2014 Anhang VI Absatz D [51] im Zuge einer beschleunigten Vorbeifahrt bei konstanter Annäherungsgeschwindigkeit unter Volllast. Diese Fahrsituation ist mit einem Hybridfahrzeug zwar darstellbar, hat aber nicht dieselben Folgen. Es ist keine alternative Messprozedur für diesen Fall beschrieben.

Der Grenzwert liegt bei 71dB und wird von konventionellen Fahrzeugen im Neuzustand in der Regel eingehalten.

3.2 Mechanisch-elektrische Energiewandlung

Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf induktive Verfahren zur mechanisch-elektrischen sowie zur elektrisch-mechanischen Energiewandlung, da dies das häufigste und effizienteste Verfahren darstellt. Es folgt eine Begriffsbestimmung, wobei auf die relevanten Größen und Abhängigkeiten hingewiesen wird.

3.2.1 Wirkungsweise

3.2.1.1 Induktionsspannung

Grundlage jeder induktiven Energiewandlung ist die Anwesenheit eines Magnetfeldes und eines elektrischen Leiters. Wird dieser Leiter der Länge L im homogenen Magnetfeld mit der Flussdichte B mit der Geschwindigkeit v mechanisch normal zu den Magnetfeldlinien bewegt, kommt es durch die Bewegung der im Leiter enthaltenen elektrischen Ladungen – der Elektronen – zu einer Ladungsverschiebung entlang des Leiters entsprechend Abbildung 25. Diese Ladungsverschiebung verursacht eine als Induktionsspannung U_i messbare Potentialdifferenz an den Leiterenden, welche sich aus dem Gleichgewichtszustand elektrischer F_e und magnetischer F_L Kräfte auf eine Ladung q berechnen lässt.

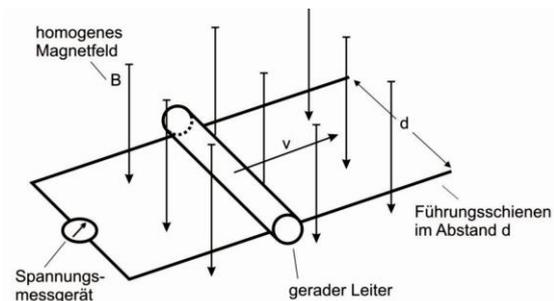


Abbildung 25: Elektromagnetische Induktion

$$F_e = -F_L \quad \text{Gleichung 3-3}$$

$$q \cdot E = q \cdot v \times B \quad \text{Gleichung 3-4}$$

$$E = v \times B \quad \text{Gleichung 3-5}$$

$$U/L = v \times B \quad \text{Gleichung 3-6}$$

$$U_i = B \perp L \perp v \quad \text{Gleichung 3-7}$$

Die Induktionsspannung U_i ist laut Gleichung 3-7 abhängig von der magnetischen Flussdichte B des Magnetfeldes, der Länge L und der Geschwindigkeit v des Leiters. Alle Größen sind jeweils rechtwinkelig zueinander ausgerichtet, was durch das Kreuzprodukt bzw. das Orthogonalitätssymbol in den Gleichungen der Herleitung zum Ausdruck gebracht wird.

In Generatoren ist der Leiter in Form von Spulen ausgeführt. Betrachtet man eine Leiterschleife der Spule mit der Fläche A , der wirksamen Kantenlänge L und dem Umlaufradius s , kann die Gleichung umgeformt werden.

$$U_i = B \times L \times \frac{ds}{dt} = B \times \frac{dA}{dt} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Die Induktionsspannung ist zufolge Gleichung 3-8 von der zeitlichen Änderung der durchfluteten Fläche einer Leiterschleife abhängig. Die durch Rotation der Leiterschleife hervorgerufene Flächenänderung dA/dt ergibt sich aus Gleichung 3-11.

$$A(\alpha) = A * \cos(\alpha) \quad \text{Gleichung 3-9}$$

$$A(t) = A * \cos(\omega t) \quad \text{Gleichung 3-10}$$

$$dA/dt = d(A \cos \omega t)/dt = -A * \omega * \sin \omega t \quad \text{Gleichung 3-11}$$

Erweitert man die Betrachtung auf eine Spule mit n Wicklungen, wie sie in ausgeführten Generatoren vorkommt, ergibt sich die Induktionsspannung entsprechend Gleichung 3-12.

$$U_i = n * B * dA/dt = n * B * A \omega \sin \omega t \quad \text{Gleichung 3-12}$$

Diese Gleichung besagt, dass sich nur Wechselspannung generieren lässt, wobei die Induktionsspannung bei konstanter Flussdichte B von der Windungszahl n der Spule und der durch sie umschlossenen Fläche A abhängt. Die Spulenfläche und die Windungszahl sind jedoch meist unveränderliche Merkmale eines ausgeführten Generators. Die verbleibenden Einflussgrößen sind die Drehzahl - ω , sowie die Flussdichte - B , welche die Erregung des Generators beschreibt. Hierbei ist zu beachten, dass diese durch Maximalwerte begrenzt sind. Die durch den Rotor ertragbare Fliehkraft stellt die Drehzahlgrenze und die Sättigung des Eisens die Erregungsgrenze dar.

Zusammenfassend ergibt sich folgender Schluss:

- Es kann nur Wechselspannung generiert werden.
- Die Spannung eines Generators steigt bei konstanter Erregung linear mit der Drehzahl an.
- Die Spannung eines Generators steigt bei konstanter Drehzahl linear mit der Erregung (unterhalb des Sättigungsbereichs des Eisens) an.
- Die Erregung ist durch die Sättigung des Eisens begrenzt.

3.2.1.2 Der Laststrom

Die Spannungsberechnung, entsprechend Gleichung 3-12, gilt nur für den unbelasteten Generator, also bei offenem Stromkreis. Bei geschlossenem Stromkreis und einem Stromfluss zufolge rein Ohmscher Last R , folgt der Betrag des Stromflusses I_i entsprechend Gleichung 3-14 aus dem Ohm'schen Gesetz - Gleichung 3-13.

$$I_i = \frac{U_i}{R} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

$$I(t) = n * B * A \omega \sin \omega t / R \quad \text{Gleichung 3-14}$$

Der Laststrom I_i ist entsprechend der Lenz'schen Regel so gerichtet, dass er seinerseits ein Magnetfeld in der Spule induziert, welches dem auslösenden Magnetfeld entgegengerichtet ist. Hierdurch entsteht eine Kraft, die gegen die Bewegungsrichtung des Leiters wirkt.

Diese Kraft wird als Lorenzkraft bezeichnet und ist wie folgt definiert [52]:

„Wird ein Leiter der Länge L im Magnetfeld der Flussdichte B von einem Strom I durchflossen, so wirkt auf ihn die Kraft F_L .“

Der Betrag der Kraft F_L lässt sich aus der Gleichung 3-15 berechnen wobei der Umstand einer rechtwinkligen Anordnung von Leiter L und Magnetfeldlinien B durch das Kreuzprodukt verdeutlicht wird.

$$F_L = L \cdot I \times B \quad \text{Gleichung 3-15}$$

wobei $I(t) = I \sin(\omega t)$

3.2.1.3 Drehmoment

Das wirksame Leiterstück der Länge L einer Leiterschleife bewegt sich im Generator auf einer Kreisbahn mit dem Radius r und ist entsprechend dem Strom I der Kraft F_L ausgesetzt. Das zu überwindende Drehmoment je Leiterstück ergibt sich aus Gleichung 3-16

$$M = F_L \cdot r \quad \text{Gleichung 3-16}$$

Die Drehmomentcharakteristik einer Maschine hängt somit von der Anzahl der wirksamen Leiterstücke, der Wicklung, und dem Stromfluss durch diese ab. Man bezeichnet diese Kenngröße einer Maschine als Amperewindungen, da beide Größen den selben Einfluss auf die Drehmomentgenerierung haben.

3.2.1.4 Leistung

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega = F_L \cdot r \cdot \omega \quad \text{Gleichung 3-17}$$

Setzt man nun die Leistungsgleichung unter Voraussetzung eines Wirkungsgrades von 100% mit $P_e = U \cdot I$ und $P_{\text{mech}} = M \cdot \omega$ an, ergibt sich die elektrische Leistung aus dem Produkt von Spannung und Strom, wohingegen sich die mechanische Leistung aus Drehmoment und Drehzahl ergibt.

3.2.2 Verluste

Jede Energiewandlung ist nach dem zweiten Hauptsatz verlustbehaftet [vgl. 54,55,56]. Die Leistungsgleichung lautet je nach Anwendungsfall:

$$\text{für die Motoranwendung} \quad P_m = P_e - P_v \quad \text{Gleichung 3-18}$$

$$\text{für die Generatoranwendung} \quad P_e = P_m - P_v \quad \text{Gleichung 3-19}$$

Die Verluste lassen sich in beiden Fällen wie folgt gliedern:

- Mechanische Verluste durch Lagerreibung $P_R \sim \omega$
- Ventilationsverluste (drehenden Teile) $P_{\text{vent}} \sim \omega^2$
- Kupferverluste durch Wicklungswiderstände $P_{\text{cu}} = I^2 R_w$
- Eisenverluste durch Ummagnetisierung (Hysterese) $P_{\text{Fe_Hys}} \sim \omega$
- Eisenverluste durch Wirbelströme $P_{\text{Fe_W}} \sim \omega^2$

Die Verlustleistungen verursachen eine Erwärmung der Maschine, wodurch besonders die Kupferverluste durch thermisch bedingten höheren Leitungswiderstand zusätzlich steigen. Die Leistung einer Maschine ist durch die zulässige Höchsttemperatur begrenzt. Das heißt, dass die Leistung bei gleicher Baugröße nur durch Verringerung von Verlusten oder erhöhter Kühlung gesteigert werden kann.

3.2.3 Maschinen

Die vorangegangenen Betrachtungen haben dargelegt, dass die generierte Spannung bei konstanter Erregung eine Funktion der Drehzahl ist, wohingegen das Drehmoment ausschließlich vom Strom bestimmt wird.

Daraus leiten sich folgende Maschinengleichungen ab.

$$\text{Für die Spannung} \quad U = K_v \Phi \omega \quad \text{Gleichung 3-20}$$

$$\text{Für das Drehmoment} \quad M = K_t \Phi I \quad \text{Gleichung 3-21}$$

Die Terme dieser einfachen Gleichung sind aber über die Wandlungsgrenze nicht gänzlich unabhängig, sondern durch die Ausführung der Maschine festgelegt.

Bei Permanentmagneterregten Synchron Maschinen (PMSM) stellt das Produkt $K_v \Phi$ eine Maschinengröße KV^{15} dar, welche im Falle der Generatoranwendung Auskunft über die Leerlauf-Ausgangsspannung bei einer bestimmten Drehzahl gibt, bzw. im Falle der Motoranwendung die mit einer Spannung erreichbare Drehzahl beziffert. Durch diesen festen Zusammenhang ist auch der Quotient aus Drehmoment und Strom festgelegt. Die einzig mögliche Variabilität in der Maschinencharakteristik ergibt sich durch Umschalten der Wicklungsanzahl, womit sich der Wert K_v in Gleichung 3-20 und K_t in Gleichung 3-21 verändern.

¹⁵ Der KV-Wert beschreibt die Leerlauf-Drehzahl des Motors pro 1 V angelegter Spannung bzw. im Generatorbetrieb jene Drehzahl in 1/min die ohne Belastung ($I=0$) notwendig ist um 1 V zu generieren.

Fremderregte Synchron Maschinen (FSM) lassen durch den variabel gestalteten magnetischen Fluss - Φ eine Beeinflussung der Generatorcharakteristik zu. Sie bieten somit einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Diese Maschinen werden verbreitet im Kraftfahrzeug als Lichtmaschine zum Laden der Starterbatterie eingesetzt. Die hierfür nötige Regelung der Ladespannung erfolgt über den Erregerstrom, welcher dem Rotor über Bürsten und Schleifringe zugeführt wird.

Asynchrongeneratoren unterscheiden sich im Aufbau nicht von Asynchronmotoren und stellen, als Kurzschlussläufer dank des einfachen und robusten Aufbaus, die Mehrzahl der Generatoren kleiner Leistung dar. Der Betrieb am Netz ist sowohl als Motor als auch als Generator unkompliziert, da die zur Erregung notwendige Blindleistung vom Netz bezogen werden kann. Im Inselbetrieb sind sie für die Eigenerrregung mit leistungsbemessenen Kondensatoren zu belasten und benötigen für einen zuverlässigen Start zusätzlich Dauermagneten oder zumindest Restmagnetisierung im Läufer. Nachteilig ist ihre Sensibilität gegenüber kapazitiven Lasten, welche sich über die Erregung auf die Höhe der Ausgangsspannung auswirkt.

Gleichstromgeneratoren, ob permanent- oder fremderregt, benötigen einen Kommutator (Stromwender) zur Abnahme und Gleichrichtung der im Anker generierten Spannung. Dieser ist als geteilter Kollektor ausgeführt und verwendet Schleifbürsten, welche die gesamte erzeugte elektrische Leistung übertragen müssen. Diese sind folglich hoch belastet und unterliegen zusätzlich dem Verschleiß. Darüber hinaus, sind elektromagnetische Störungen, durch die bei der Stromwendung im Zusammenhang mit der Wicklungsinduktivität entstehenden Spannungsspitzen und daraus resultierendem Bürstenfeuer, unvermeidlich. Diese erfordern zusätzliche Entstörungsmaßnahmen. Allgemein bauen Gleichstrommaschinen, bedingt durch den Platzbedarf für Kollektor und Bürsten länger als leistungsgleiche bürstenloser Maschinen. Der Wartungsbedarf für Bürsten und Kollektor, sowie der größere Bedarf an Kupfer und Eisen mit den dazugehörigen Nachteilen bei Kosten, Gewicht und Bauraum sind verantwortlich dafür, dass dieser Maschinentyp heute nicht mehr als Generator eingesetzt wird.

Zum Erhalt einer Gleichspannung aus Wechselstromgeneratoren werden nachgeschaltete gesteuerte oder ungesteuerte Gleichrichter eingesetzt. Die passive Variante besteht lediglich aus Gleichrichterioden und ist entsprechend kostengünstig. Aktive Varianten enthalten Leistungstransistoren (MOSFet, IGBT) bzw. bei sehr hohen Leistungen auch Thyristoren und eine dafür notwendige Ansteuerungselektronik, welche sich in höheren Kosten niederschlägt jedoch zusätzliche Steuereingriffe ermöglicht.

3.3 Chemisch-mechanische Energiewandlung/ Verbrennungskraftmaschine

Die Verbrennungskraftmaschine ist der chemisch-mechanische Energiewandler im Hybridsystem. Die Umwandlung der im Kraftstoff, in Form des Heizwertes, gebundenen chemischen Energie in mechanische Energie erfolgt über den Umweg der thermischen Energie, welche durch die exotherme Oxidationsreaktion der Kohlenwasserstoffe freigesetzt wird.

Die weitere Betrachtung schränkt sich auf die Hubkolbenmaschine ein. Diese ist gekennzeichnet durch einen zylindrischen Raum, welcher an der einen Seite durch das Brennraumdach und auf der anderen Seite durch einen beweglichen Kolben abgeschlossen ist. Der Kolben ist über eine Pleuelstange mit einer Kurbelwelle derart verbunden, dass seine Linearbewegung in eine Drehbewegung übersetzt wird. Die mechanische Energie liegt folglich als Rotations-Energie vor, womit die Größen Drehzahl und Drehmoment zu Kenngrößen der mechanischen Leistungsabgabe werden.

Die Umwandlung der thermischen Energie in mechanische Energie erfolgt über den Druck, welcher durch die exotherme Oxidationsreaktion des Kraftstoffs im Brennraum entsteht. Deshalb werden die Kenngrößen und Zusammenhänge des motorischen Arbeitsprozesses mit Bezug auf den Druck beschrieben.

3.3.1 Mitteldruck

Es ist üblich, die über ein Arbeitsspiel abgegebene Arbeit W auf das Hubvolumen V_h zu beziehen, wobei die dadurch beschriebene spezifische Größe des Mitteldrucks p_m die Dimension eines Drucks annimmt. Die SI-Einheit des Mitteldrucks ist J/m^3 bzw. N/m^2 , er wird jedoch gemeinhin in bar angegeben. Für außer- und innermotorische Größen unterscheidet man zwischen effektivem und indiziertem Mitteldruck.

$$\text{Mitteldruck allgemein} \quad p_m = \frac{W}{V_h}$$

$$\text{effektiver Mitteldruck} \quad p_e = \frac{W_e}{V_h}$$

$$\text{indizierter Mitteldruck} \quad p_i = \frac{W_i}{V_h}$$

3.3.2 Leistung

Die mechanische Leistungsabgabe lässt sich aus dem Mitteldruck wie folgt berechnen, wobei nach dem jeweiligem Arbeitsverfahren - Zweitakt oder Viertakt – zu unterscheiden ist.

$$\text{Zweitaktmotor} \quad P = n V_H p_m \quad P = \frac{n V_H p_m}{600}$$

$$\text{Viertaktmotor} \quad P = \frac{n}{2} V_H p_m \quad P = \frac{n V_H p_m}{1200}$$

3.3.3 Drehmoment

Auf vergleichbare Weise lässt sich auch das Drehmoment aus dem Mitteldruck berechnen. Im Umkehrschluss lässt sich der Mitteldruck nur aus der messbaren Größe Drehmoment ableiten.

$$\text{Zweitaktmotor} \quad M_d = \frac{V_H p_m}{2\pi} \quad p_m = \frac{2\pi M_d}{V_H}$$

$$\text{Viertaktmotor} \quad M_d = \frac{V_H p_m}{4\pi} \quad p_m = \frac{4\pi M_d}{V_H}$$

3.3.4 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus dem Verhältnis der gewonnenen Arbeit W zur zugeführten Brennstoffenergie $Q_B = H_u m_B$ an. Die Indexe kennzeichnen wiederum die außer- bzw. innermotorische Betrachtung.

$$\text{effektiver Wirkungsgrad} \quad \eta_e = \frac{W_e}{Q_B}$$

$$\text{indizierter Wirkungsgrad} \quad \eta_i = \frac{W_i}{Q_B}$$

Wobei W_e die effektive gewonnene Arbeit und $W_i = \int p dV$ die innere Arbeit je Zyklus beschreibt. Aus dem Quotienten dieser beiden Größen lässt sich der mechanische Wirkungsgrad bestimmen.

$$\text{mechanischer Wirkungsgrad} \quad \eta_m = \frac{W_e}{W_i} = \frac{P_e}{P_i} = \frac{p_e}{p_i}$$

3.3.5 Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e

Der spezifische Kraftstoffverbrauch b_e stellt die äquivalente Größe für den effektiven Wirkungsgrad dar. Diese Größe b_e ist mittels Messung des momentanen Kraftstoffverbrauchs in g/s und der effektiven Leistung P_e experimentell bestimmbar und ist indirekt proportional zum effektiven Wirkungsgrad und zum unteren Heizwert H_u , wie aus Gleichung 3-22 hervorgeht.

	$b_e = \frac{\dot{m}_B}{P_e} = \frac{1}{\eta_e H_u}$	Gleichung 3-22
in der Form und mit H_u in kJ/kg	$b = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta H_u}$	ergibt sich b in g/kWh

Fischhakenkurve

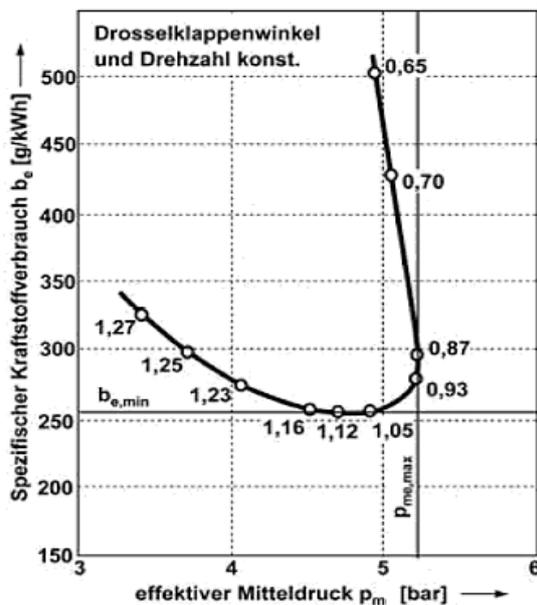


Abbildung 26: Fischhakenkurve [58]

Die Fischhakenkurve, Abbildung 26, stellt den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] eines Verbrennungsmotors über dem effektiven Mitteldruck p_m [bar] bei konstanter Drosselklappenstellung und konstanter Drehzahl für unterschiedliche Lambdawerte dar.

Demnach wird im Bereich von Lambda 0,9 der höchste Mitteldruck und rund um Lambda 1,1 der niedrigste spezifische Verbrauch erreicht.

Ein Anfeuchten des Gemisches über $\lambda=0,87$ verschlechtert den spezifischen Verbrauch überproportional, wohingegen ein Abmagern den effektiven Mitteldruck, und damit die Leistung, überproportional sinken lässt.

Diese Darstellung ist idealisiert und ist in Realität unter anderem von der Bauart des Verbrennungsraumes und der Art der Gemischaufbereitung beeinflusst.

3.3.6 Gemischheizwert

Wie schon die Fischhakenkurve gezeigt hat, ist die in den Zylinder eingebrachte Brennstoffenergie entscheidend für den mittleren effektiven Druck p_e und in weiterer Folge für das Drehmoment. Zur Berechnung dieser Energie wird der Gemischheizwert H_G definiert. Es wird zwischen gemischansaugenden und luftansaugenden Motoren unterschieden, wobei der Gemischheizwert jeweils die Energiemenge pro 1 m³ Frischladung bei Außenzustand beschreibt.

Für gemischansaugende Motoren bzw. mit externer Gemischbildung gilt nach [57]

$$H_G = \frac{Q_B}{V_G} = \frac{m_B H_U}{V_G}$$

$$\text{mit } V_G = \frac{m_L + m_B}{\rho_G}$$

$$\text{und } m_L = \lambda L_{St} + 1$$

$$H_G = \frac{H_U \rho_G}{\lambda L_{St} + 1}$$

worin ρ_G die Dichte des Gemisches,

$$\rho_G = \frac{m_L + m_B}{\frac{m_L}{\rho_L} + \frac{m_B}{\rho_B}}$$

λ das Luftverhältnis,

$$\lambda = \frac{m_L}{L_{St} m_B}$$

und L_{St} der stöchiometrische Luftbedarf des Kraftstoffs ist.

Der stöchiometrische Luftbedarf eines Kraftstoffs kann aus dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf und der Zusammensetzung der Luft ($N_2 : O_2 = 79\% : 21\%$) errechnet werden,

$$L_{St} = \frac{1}{0,21} O_{2st}$$

wobei O_{2st} den stöchiometrischen Sauerstoffbedarf in kmol O_2 je kg Brennstoff angibt.

Für den Kraftstoff Benzin beträgt der stöchiometrische Sauerstoffbedarf $3,045 \text{ kg}_{O_2}/\text{kg}_B$, womit sich ein stöchiometrischer Luftbedarf L_{St} von $14,5 \text{ kg}_L/\text{kg}_B$ ergibt.

Für luftansaugende Motoren mit interner Gemischbildung nach [57]

$$\overline{H_G} = \frac{H_U \rho_L}{\lambda L_{St}}$$

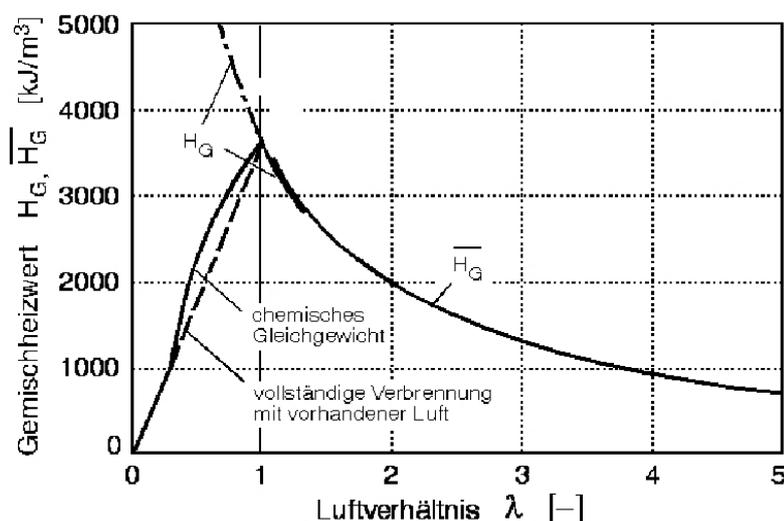


Abbildung 27 : Volumetrischer Gemischheizwert H_G über Luftverhältnis λ [57]

Abbildung 27 zeigt den starken Einfluss des Luftverhältnisses auf den Gemischheizwert und somit auf die dem Verbrennungsprozess zugeführte Brennstoffenergie je Volumeneinheit. Für den Ottomotor mit äußerer Gemischbildung sind nur Luftverhältnisse innerhalb der Zündgrenzen relevant.

Mit dem Gemischheizwert ist die volumetrische Energiedichte definiert, jedoch ist das tatsächlich im Brennraum vorliegende Gemisch- bzw. Frischgasvolumen von weiteren Faktoren abhängig.

3.3.7 Luftaufwand

Die bisherige Betrachtung setzt voraus, dass der Hubraum zum Zeitpunkt des Kompressionsbeginns vollständig mit Frischgasladung gefüllt ist. Dies gelingt jedoch äußerst selten, sodass eine weitere Kenngröße zur Beschreibung der tatsächlichen Frischgasmasse benötigt wird.

Der Luftaufwand λ_a stellt das Verhältnis der gesamt zugeführten Frischgasmasse m_E zur theoretisch möglichen Frischgasmasse m_{th} bei Außenzustand dar,

$$\lambda_a = \frac{m_E}{m_{th}}$$

wobei sich die effektive Frischgasmasse aus der im Zylinder verbleibende Frischgasmasse m_{Fr} und der durch Überspülen verloren gegangenen Masse m_{Sp} zusammensetzt.

$$m_E = m_{Fr} + m_{Sp}$$

Damit lässt sich die dem Hubvolumen real zugeführte Brennstoffmasse Q_B aus:

$$Q_B = \lambda_a V_h H_G$$

und schlussendlich der effektive Mitteldruck p_{me} errechnen

$$p_{me} = \lambda_a H_G \eta_e$$

3.3.8 Lastregelung

Anhand der hergeleiteten Beziehungen für den effektiven Mitteldruck

$$p_{me} = \lambda_a H_G \eta_e$$

und der effektiven Leistung

$$P_e = n V_H p_{me}$$

lassen sich bereits mögliche Stellgrößen für die Lastregelung einer Verbrennungskraftmaschine identifizieren.

Füllungsregelung

Die Leistung wird durch Variation des Liefergrades λ_a eingestellt. Dies geschieht durch Drosselung der zugeführten Gemischmasse bei gleichbleibendem Gemischheizwert H_G , weshalb diese Methode auch als „Quantitätsregelung“ bezeichnet wird. Als Drosselorgane werden Drosselschieber oder Drosselklappen im Ansaugkanal eingesetzt.

Gemischregelung

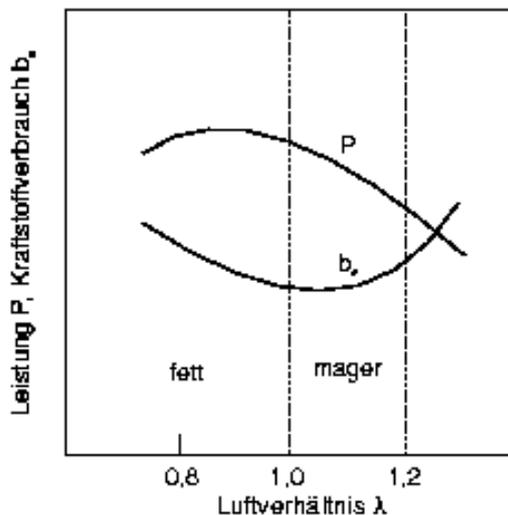


Abbildung 28 : Einfluss des Luftverhältnisses λ auf Leistung P und spez. Kraftstoffverbrauch b_e [58]

Die Leistung wird durch Variation des Gemischheizwertes H_G eingestellt, wobei die Kraftstoffmasse bei unveränderter Luftmasse variiert wird. Damit ändert sich das Luftverhältnis λ und damit die Qualität des Gemisches, weshalb für diese Methode auch der Begriff „Qualitätsregelung“ verwendet wird. Abbildung 28 zeigt den Einfluss des Luftverhältnisses auf die Leistung und den spezifischen Kraftstoffverbrauch. Die Leistung erreicht ihr Maximum bei $\lambda=0,9$ und fällt mit steigendem Lambda moderat. Der spezifische Kraftstoffverbrauch, stellvertretend für den Wirkungsgrad erreicht bei $\lambda=1,05$ ein Minimum und steigt bei abweichenden Lambdawerten an. Die Änderung der Gemisch-Qualität ist einerseits durch die Zündgrenzen des Kraftstoffs begrenzt und hat andererseits Einfluss auf die Verbrennung und die damit verbundene Schadstoffbildung.

3.3.9 Schadstoffbildung

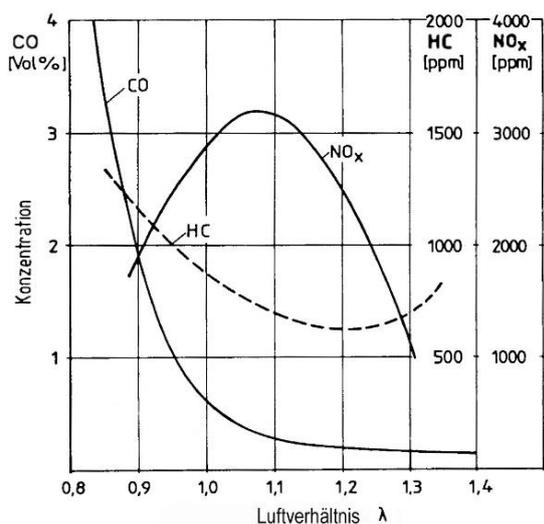


Abbildung 29 : Schadstoffkonzentration infolge des Luftverhältnisses [57]

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoff-Luft-Gemischen entstehen Abgase, deren Zusammensetzung entscheidend vom Luftverhältnis λ abhängt. Abbildung 29 zeigt die Konzentration der limitierten Komponenten: Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) über dem Luftverhältnis λ zwischen 0,8 und 1,3. Die Kohlenmonoxidkonzentration fällt stark mit steigendem Lambda und bleibt ab 1,1 auf niedrigem Niveau. Die Kohlenwasserstoffkonzentration erreicht bei 1,2 ihr Minimum und steigt bei weiterer Abmagerung wieder an. Die Stickoxidkonzentration erreicht bei Lambda 1,05 ihr Maximum und fällt in beide Richtungen stark ab.

Diese unterschiedlichen Konzentrationsverläufe erklären sich aus chemischer Sicht. So entsteht CO bei Sauerstoffmangel durch den Reaktionsabbruch von Kohlenstoff zu Kohlendioxid. Bei Sauerstoffüberschuss, ab Lambda 1 aufwärts, verläuft diese Reaktion nahezu vollständig.

Die Kohlenwasserstoff-Oxidation wird bei höheren Lambdawerten, bis $\lambda=1,2$, durch die höhere Sauerstoffaffinität des Kohlenmonoxids behindert. In Richtung höherer Lambdawerte steigt die Kohlenwasserstoffkonzentration infolge unvollständiger Verbrennung. Hierbei wirkt sich das Verlöschen der Flamme an der Brennräumwand durch das ungünstigere Oberflächen zu Volumen-Verhältnis kleinerer Hubräume zusätzlich negativ aus. Weiters leisten Spülverluste einen in dieser Darstellung nicht erfassten Beitrag zu den HC Emissionen.

Die NO_x-Konzentration ist stark temperaturabhängig [59], weshalb sie infolge höherer Verbrennungstemperaturen bei wirkungsgradoptimalem Lambda von 1,05 ihr Maximum erreicht. Maßnahmen, welche die Verbrennungstemperatur senken, wirken sich konzentrationsmindernd aus. Hier seien der reduzierende Einfluss eines späteren Zündzeitpunktes und die temperaturverringende Wirkung eines steigenden Restgasgehaltes im Brennräum exemplarisch genannt.

3.3.10 Zündgrenzen des Kraftstoffs

Die Zündung ist eine infolge thermischer und chemischer Vorgänge beschleunigte Kettenreaktion [57]. Für Benzin liegen die Zündgrenzen bei ruhendem Gemisch und ISO-Normalbedingungen zwischen Lambda 0,4 und 1,4. Bei anderen Druck- und Temperaturbedingungen lassen sich die Zündgrenzen jedoch erweitern, wobei auch das umgebende Geschwindigkeitsfeld für die Zündung und die darauffolgende Flammenausbreitung von Bedeutung ist.

3.3.11 Zündung

Bei Fremdzündung durch eine externe Zündquelle, wie sie für Ottomotoren in Form der Zündkerze einsetzt wird, ist eine temperatur- und druckabhängige Zündverzugszeit zu beobachten. Der zeitliche Verzug ergibt sich aus den Kettenverzweigungsreaktionen zur Bildung von Radikalen, welche für den Start der Kettenreaktion notwendig sind. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist stark temperaturabhängig, was demzufolge auch auf die

Zündverzugszeit zutrifft. Für eine wirkungsgradoptimale Verbrennung ist die Gleichraumverbrennung in der Nähe des oberen Totpunktes anzustreben, weshalb die Zündung stets vor diesem erfolgt. Der wirkungsgradoptimale Abstand des Zündzeitpunktes zum oberen Totpunkt in $^{\circ}\text{KW}$ richtet sich nach der Zündverzugszeit und wächst zusätzlich mit steigender Drehzahl.

Weiteren Einfluss auf die Flammenausbreitung und Umsetzungsrate hat die Qualität des Gemisches. Dies ist besonders bei einer Qualitätsregelung von Bedeutung. Abbildung 30 stellt den Einfluss der Zündungsparameter - Zündstrom und Funkendauer auf den spezifischen Verbrauch, die HC-Emission sowie die Lage des wirkungsgradoptimalen Zündzeitpunktes am Beispiel eines 2,8 l Sechszylinders Viertaktmotors für den Lastpunkt 2000/min 3bar über dem Luftverhältnis Lambda λ dar.

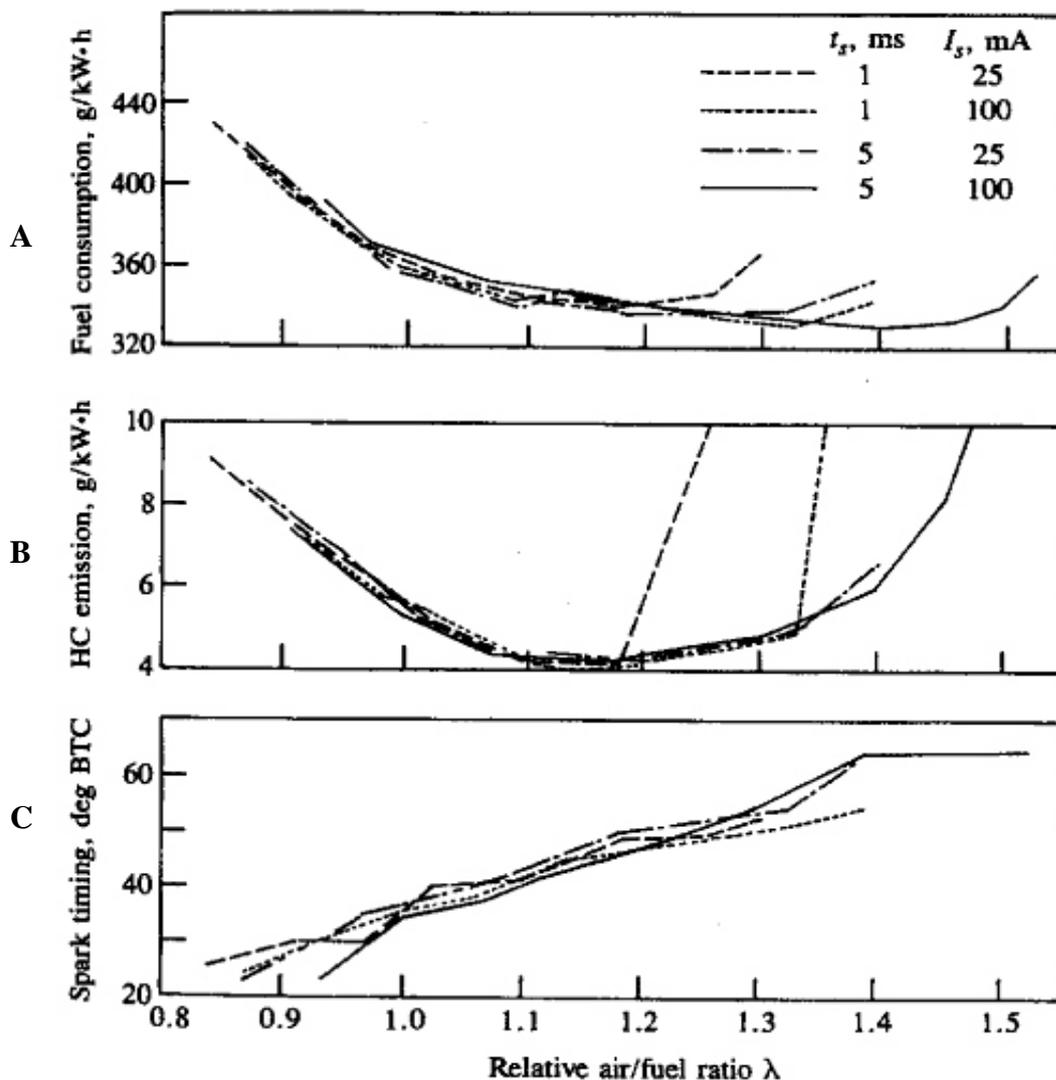


Abbildung 30 : Einfluss des Zündstroms und der Funkendauer auf HC-Emission, spezifischen Kraftstoffverbrauch und Vorzündbedarf des Otto-Motors über Lambda [60]

Aus Diagramm A ist abzulesen, dass ein mageres Gemisch mit $\lambda > 1,3$ einen erheblich besseren spezifischen Verbrauch aufweist, jedoch dazu einen deutlich höheren Zündstrom und Funkendauer erfordert. Anderenfalls kommt es zu Zündaussetzern mit entsprechend hohen HC-Emissionen, was aus Diagramm B hervorgeht. Mit steigendem Lambda steigen auch der Zündverzugsbedarf und die Brenndauer, weshalb ein größerer Vorzündwinkel für einen wirkungsgradoptimalen Betrieb erforderlich wird.

3.3.12 Verbrennungsgeschwindigkeit

Die Betrachtung wird auf die vorgemischte Verbrennung beschränkt, da von einem Einsatz einer externen Gemischbildung auszugehen ist.

Die Geschwindigkeit, mit der der Kraftstoff umgesetzt wird, hat Bedeutung für den erzielbaren Wirkungsgrad. Dies wird aus den vereinfachten Gleichraum- und Gleichdruck-Vergleichsprozessen für den motorischen Arbeitsprozess sowie aus den Erkenntnissen bezüglich des vollkommenen Motors nach DIN 1940 deutlich.

Idealerweise sollte die Verbrennung möglichst spontan in einem Gleichraumprozess erfolgen. Die Verbrennung nimmt jedoch durch die räumliche Gestalt des Brennraums eine endliche Zeit in Anspruch, in der die Flammenfront, ausgehend von der Zündquelle, diesen Raum durchläuft.

Die Geschwindigkeit mit der sich eine derartige Flammenfront in stehender Atmosphäre ausbreitet, wird laminare Flammgeschwindigkeit genannt und beträgt für die meisten Kohlenwasserstoff-Luft-Gemische bei Normalbedingung um 40 cm/s. Sie steigt mit zunehmender Temperatur und nimmt mit zunehmendem Druck ab. Im Brennraum eines Verbrennungsmotors kann jedoch nicht von einer stehenden Atmosphäre ausgegangen werden. In diesem lässt sich die Verbrennungsgeschwindigkeit durch Ladungsbewegung in Form von Turbulenz beschleunigen und somit die Brenndauer reduzieren. Es ist zu beobachten, dass die Verbrennung mit steigender Drehzahl und damit einhergehender steigender Turbulenz nahezu konstante Kurbelwinkelbereiche beansprucht. Das bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme mit steigender Turbulenz zunimmt.

3.3.13 Verluste

Jeder reale Prozess ist von Verlusten gekennzeichnet. Im Falle der ottomotorischen Verbrennung sind dies:

- Verlust durch reale Ladung Verlust durch den Einfluss des Ladungszustandes
- Umsetzungsverlust Verlust durch unvollkommene Verbrennung
- Verbrennungsverlust Verlust durch realen Verbrennungsablauf
- Wandwärmeverlust Wärmeübergang an Brennraumwände
- Leckageverlust Leckagen an Kolbengruppe und Ventilen
- Ladungswechselverlust Realer Ladungswechsel
- Mechanische Verluste Mechanische Reibung
- Spülverluste Verlorene Frischgasmasse während des Spülvorgangs

Hier von Interesse sind:

- Ladungswechselverluste beinhalten alle zur Beatmung des Brennraums nötigen Aufwände. Diese sind der für das Ansaugen aufzubringende Unterdruck sowie der Überdruck zum Ausschleiben des Restgases. Besonders im quantitativ geregelten Niedriglastbetrieb steigt dieser stark an.
- Mechanische Verluste ergeben sich aus der Summe der Reibungsverluste aller bewegten Teile eines Motors. Dabei ist neben der Anzahl der Teile auch deren Lagerung von Bedeutung. Bedingt durch die zusätzlichen anzutreibenden Teile für den Steuertrieb der Ventile hat der Viertaktmotor hier Nachteile gegenüber dem Zweitaktmotor.

- Spülverluste umfassen jene Verluste, welche sich durch verlorene Frischgasmasse während des Spülprozesses ergeben. Hierbei unterscheiden sich die Arbeitsprinzipien – Zweitakt und Viertakt – grundlegend. Bei Viertaktmotoren kann Frischgasmasse nur während der Ventilüberschneidungsphase im Ladungswechsel in den Auslass entweichen. Bei umkehrgespülten Zweitaktmotoren hingegen umfasst die Phase, in der Ein- und Auslasskanäle gleichzeitig geöffnet sind, praktisch die gesamte Dauer des Ladungswechsels. Der höhere Verlust an Frischgasmasse des Zweitaktmotors wirkt sich signifikant auf dessen Wirkungsgrad aus, da sich die Brennstoffmasse auf der Aufwandseite nicht jedoch auf der Nutzenseite zu Buche schlägt.

Für weitere Zusammenhänge sei an dieser Stelle auf die Literaturstellen [58] und [89] verwiesen.

3.4 Elektrochemischer Energiespeicher

Die Batterie spielt im elektrischen Antriebstrang eine zentrale Rolle und verdient daher besondere Betrachtung. Ihre Eigenschaften und Größe bestimmen die Merkmale des Fahrzeugs - Leistung und Reichweite - entscheidend. Um den weiteren Ausführungen folgen zu können, bedarf es einer kurzen Begriffsbestimmung.

3.4.1 Begriffsbestimmung

Das galvanische Element ist Grundlage jedes elektrochemischen Speichers. Es besteht aus den Elektroden – Anode und Kathode - und dem Elektrolyten. Abbildung 31 zeigt ein solches am Beispiel der Bleibatterie mit den dazugehörigen Reaktionsgleichungen für den Entlade- und Ladevorgang. Aus den Produkten der Entladungsreaktion geht hervor, dass hierbei Bleisulfat $PbSO_4$ entsteht welches folglich im Teilladungsbereich der Bleibatterie mit der Sulfatierung einhergeht. Diese behindern mit zunehmender Konzentration und Ablagerung die Stromentnahme, weshalb sich Bleibatterien für Traktionsaufgaben als ungeeignet erweisen. Dennoch kommen sie besonders in Low-Cost Traktionsanwendungen wie dem als Basisfahrzeug ausgewählten und in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Elektro-Scooter verbreitet vor.

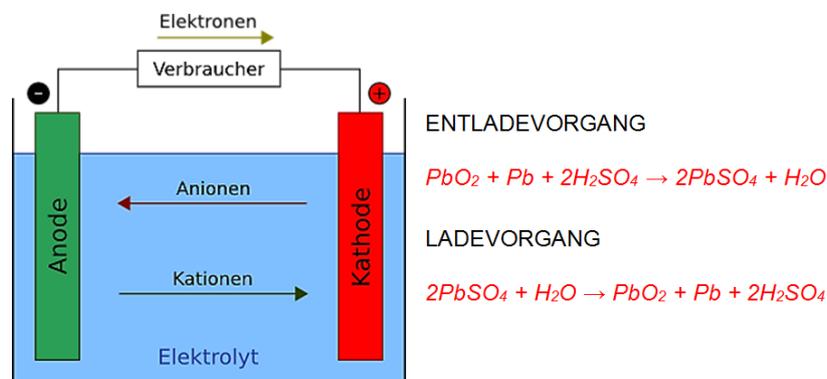


Abbildung 31: Bestandteile des galvanischen Elements und Reaktionsgleichung

Die Spannung wird durch die unterschiedlichen Materialien der Elektroden, entsprechend ihrer Differenz in der elektrochemischen Spannungsreihe, bestimmt.

Die Kapazität hingegen ist massebezogen. Je mehr Ionen während des Ladevorganges aus den Elektroden erzeugt und im Elektrolyten vorgehalten werden können, desto höher ist die Speicherfähigkeit der Zelle.

Die entnehmbare bzw. zufühbare Stromstärke wird durch die Oberfläche und den Abstand der Elektroden sowie durch die Diffusionsgeschwindigkeit der Ionen im Elektrolyten begrenzt. Während der Entladung sinkt die Konzentration der schwefeligen Säure (H_2SO_4) und es bildet sich Bleisulfat unter Abgabe von Elektronen an die Anode. Bei einer hohen Entladungsrate lagert sich das Bleisulfat an der Elektrode ab und blockiert diese teilweise, wodurch der Übergangswiderstand steigt. Diese Anhaftung kann erst wieder im Ladevorgang abgelöst werden.

Während des Ladevorgangs wird das Bleisulfat in Bleioxid und Blei zurückgeführt, wobei wieder schwefelige Säure entsteht. Wird der Ladevorgang mit Strom durchgeführt, welcher von dem Element nicht aufgenommen werden kann, kommt es zu einem Spannungsanstieg. Überschreitet diese Spannung den Wert von 2,35V (für Blei-Säure-Element), findet zunehmend eine unerwünschte Nebenreaktion statt. Es wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, womit Knallgas entsteht. Bei offenen Zellen können die Gase entweichen, wobei für ausreichend Lüftung zu sorgen ist. Bei geschlossenen Zellen, wie sie als Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen angewendet werden, erhöht das Gasen den Druck in der Zelle.

Der Begriff Zelle beschreibt eine Einheit eines galvanischen Elements. Man unterscheidet zwischen Primär - nicht aufladbaren - und Sekundär-Zellen, welche eine Wiederaufladung dank der Reversibilität ihrer inneren Prozesse zulässt. Primärzellen sind uns als Batterien bekannt, wohingegen aufladbare Sekundärzellen als Akkumulator bezeichnet werden.

Der Begriff Batterie bezeichnet aber auch den Verband von jedweden Zellen und wird in der Folge für den aufladbaren elektrochemischen Energiespeicher verwendet.

Die Batteriespannung ergibt sich aus der Addition der in Reihe geschalteten Zellspannungen.

Die Batteriekapazität ergibt sich als Summe der parallel geschalteten Einzel-Zellkapazitäten.

Durch die Parallelschaltung von Einzelzellen ergibt sich die Strombelastbarkeit der Batterie aus der Summe der Strombelastbarkeiten der parallel geschalteten Zellen, wenn diese von gleichem Typ sind und identische Ladung aufweisen.

Die Angabe der Zellanordnung erfolgt nach dem Muster $X_s Y_p$, wobei X die Anzahl der in Serie, und Y die Anzahl der parallel geschalteten Zellen im Batterieverband angibt.

Die Einzel-Kapazität ist ein Maß für die Strom-Speicherfähigkeit der Zelle und wird vom Zellhersteller als Nennkapazität in Ampere-Stunden (Ah) angegeben. Der Wert wird für Blei-Traktionsbatterien entsprechend der Norm DIN EN 60254-1 [61] in einem zehnstündigen Entladeprozess ermittelt.

Die Nennspannung gibt die mittlere Höhe der Entladespannung bei geringer Entladerate ($<0,2$ C) an. Sie ist in Normen wie der EN 60285 erfasst und dient als Richtwert für die Dimensionierung der Batterie im elektrischen System.

Die Ruhespannung ergibt sich im Leerlauf, ohne Stromentnahmen, aus dem zugrundeliegenden galvanischen Element und dem Ladezustand. Eine weitere Einflussgröße stellt die Temperatur dar, welche sich auf die Diffusions- und Reaktionsprozesse auswirkt. Bei voller Batterie liegt die Ruhespannung stets über der Nennspannung.

Die Entladespannung resultiert bei Stromentnahme aus der Ruhespannung abzüglich der am Innenwiderstand abfallenden Spannung. Dieser Spannungsabfall errechnet sich aus dem Produkt aus Entladestrom und Innenwiderstand. Derselbe Zusammenhang gilt mit umgekehrten Vorzeichen auch für die Ladespannung.

Der Innenwiderstand R_i ist eine fiktive Größe, welche sich aus dem Zusammenhang ergibt, dass die Batteriespannung bei Stromentnahme I proportional um ΔU abnimmt bzw. bei Stromzufuhr proportional zunimmt. Der Wert des Innenwiderstands stellt somit den Proportionalitätsfaktor zwischen Strom und Spannung der Batterie dar und errechnet sich nach dem Ohm'schen Gesetz wie folgt:

$$R_i = \Delta U / I$$

Im Innenwiderstand verbergen sich annähernd konstante Größen, wie die Leitungswiderstände der Zellenverbinder und der zellinternen Verdrahtung der Elektroden, aber auch von diversen Faktoren abhängige Größen mit Bezug auf die Zellchemie und die Reaktionskinetik. Diese Faktoren sind unter anderen die Temperatur, der Ladezustand und der vorerlebensabhängige Zustand der Zellkomponenten, die Alterung.

Der Innenwiderstand ist abschnittsweise ein geeignetes Maß für die Bewertung der Strombelastbarkeit und somit der Leistungsfähigkeit einer Batterie.

Mit Hilfe des Innenwiderstandes lässt sich die leistungsbegrenzende Verlustleistung in der Zelle berechnen. Diese ist das Produkt aus dem Strom zum Quadrat und dem Innenwiderstand.

$$P = I^2 \cdot R_i$$

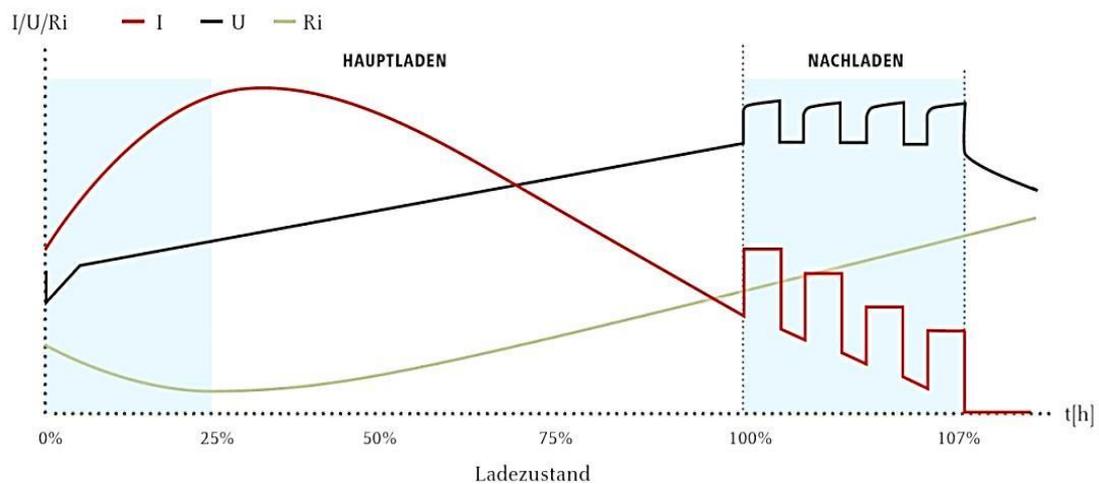


Abbildung 32 : Abhängigkeit des Innenwiderstandes R_i einer AGM-Bleibatterie vom Ladezustand während der Ladung [62]

Abbildung 32 zeigt den Verlauf des Innenwiderstandes einer AGM- Bleibatterie über dem Ladezustand. Hierbei fällt auf, dass dieser mit dem Ladezustand variiert und im Bereich einer Restladung um 30% ein Minimum aufweist. In diesem Bereich kann die Batterie folglich höhere Ströme bei gleicher Verlustleistung aufnehmen oder allgemein verlustfreier geladen werden. Es erweist sich folglich als vorteilhaft, diesen Bereich für die Zufuhr elektrischer Energie zu nutzen und bei der Definition der Betriebsstrategie des Range Extenders zu implementieren.

3.4.2 Batterie-Modell

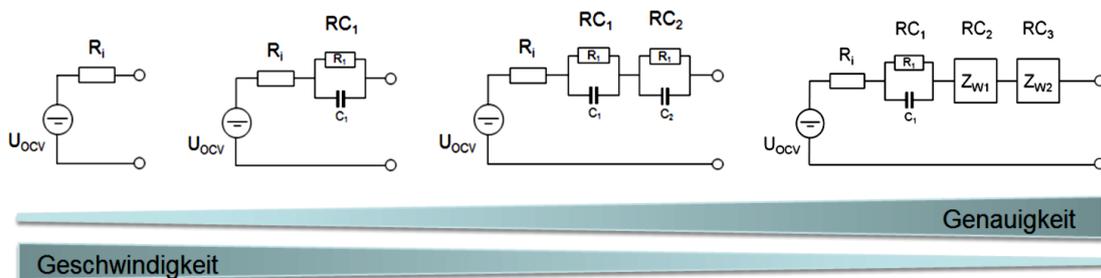


Abbildung 33 : Batteriemodelle [63]

Für ein einfaches Batteriemodell, entsprechend Abbildung 33, ohne Berücksichtigung von Temperatur und Alterung, ist die Charakterisierung der Batterie durch den Innenwiderstand und die Kapazität hinreichend genau [63].

Der Ladezustand wird in Prozent der Maximalladung angegeben. Die Maximalladung errechnet sich als Produkt aus der Nennkapazität in Ampere-Stunden und der Nennspannung in Volt und stellt somit eine Energiegröße in Watt-Stunden dar. Für die Angabe des Ladezustandes hat sich die anglistische Größenbezeichnung State of Charge (SoC) durchgesetzt.

Die Entladungstiefe, Englisch Depth of Discharge (DoD), ist ein für den jeweiligen Zyklus festgelegtes Maß. Bei Zugrundelegung eines SoC von 100% als Entladestart stellt der DoD-Wert den Komplementärwert des SoC dar und gibt somit den Ausnutzungsgrad einer Vollladung an. Dieser Wert wird im Zusammenhang mit der Bewertung der Zyklusfestigkeit einer Batterie

verwendet, da diese in erheblichen Maß von der Entladungstiefe abhängt. Eine in Zyklenanzahl ausgedrückte Lebenserwartung einer Bleibatterie erreicht bis $\text{DoD} < 30\%$ ein Maximum und nimmt dann mit zunehmender DoD exponentiell ab. Ein DoD von 100%, gleichbedeutend mit einer Tiefentladung, ist bei Bleibatterien zu vermeiden.

3.4.3 Batteriebedingte Einflussfaktoren [vgl. 64, 65, 66]

Der Ladezustand

Die Bestimmung des Ladezustandes einer teilentladenen Zelle / Batterie gestaltet sich selbst im Ruhezustand schwierig, da der Zusammenhang zwischen Ladezustand und Ruhespannung von mehreren Faktoren abhängt und somit nicht eindeutig ist. Diese Faktoren sind von äußerst diverser Natur, wobei die bestimmtesten inneren Faktoren die Zell-Chemie selbst, der Grad der vorangegangenen End- bzw. Aufladung und die Alterung sind. Den relevantesten äußeren Faktor stellt die Temperatur dar. Der Zusammenhang zwischen Ruhespannung und Ladezustand ist nur bei Bleibatterien nach längerer Ruhephase trotz Temperaturabhängigkeit hinreichend genau. Andere, auf Lithium basierende Zellen (mit Ausnahme von LiFePO_4) zeigen einen ähnlichen Zusammenhang jedoch mit deutlich niedrigeren Gradienten der Ruhespannung bei Ladungsänderung. Hierdurch kann diese Art der Ladungsbestimmung wesentlich erschwert werden. Deshalb wird bei Lithium-Chemie üblicherweise eine Ladungszählung der entnommenen bzw. zugeführten Ampere-Stunden zur Ermittlung des SoC durchgeführt.

Die Batteriepflege

Bei Lithium basierten Batterien ist eine Vorrichtung zum Ausgleich der Ladung der in Reihe geschalteten Zellen auf gleiches Ladungsniveau (Balancen) notwendig, um sicherzustellen, dass keine Einzelzelle aus dem für den Zelltyp erlaubten Spannungsfenster driftet. Diese Vorrichtung ist als Batterie Managemet System BMS bekannt und kann unterschiedlich komplex aufgebaut sein. Die einfachste Methode zum Ladungsausgleich ist das „Bleeding“. Hierbei werden jene Zellen, welche im Ladeprozess als erste voll sind selektiv über einen parallel angeordneten Widerstand entladen. Die Methode ist somit verlustbehaftet aber in Anbetracht des Einsatzes im Low-Cost-Bereich die wahrscheinlichste Art der Umsetzung. Andere, verlustsparende aber komplexere Methoden zum Ladungsausgleich speichern die aus den vollen Zellen entnommene Energie kapazitiv bzw. induktiv und transferieren diese auf die leereren Zellen.

Bei Bleibatterien geschieht der Ladungsausgleich bei andauernder Vollladung bzw. geringer Überladung mit geringem Strom quasi automatisch. Die vollen Zellen geraten dabei auf Spannungen oberhalb der Gasungsspannung von 2,35V pro Zelle und bauen die überschüssige Ladung durch Erwärmung und Gasung ab, während die übrigen Zellen weiter geladen werden. Dieser Vorgang ist dem Bleeding, also der verlustbehafteten Methode bei Lithiumbatterien, ähnlich, benötigt aber keine batterieseitige Zusatzeinrichtung.

In beiden Fällen bedingt der notwendige Ladungsniveaueausgleich eine periodisch wiederkehrende Vollladung der Batterie mit sehr geringer Leistung. Ein stark gedrosselter Range Extender-Betrieb erscheint hierfür nicht zweckmäßig, weshalb diese Prozedur während des Ladevorgangs am Netz mit einem entsprechenden Ladegerät durchzuführen ist.

3.4.4 Ladeverfahren

Bei Lithium-Batterien werden das Ladeverfahren sowie die Grenzwerte für die Ladeparameter – Strom und Spannung vom Hersteller vorgegeben. Meist wird das I/U Ladeverfahren empfohlen, welches auch bei Blei-Batterien Anwendung findet. Für Bleibatterien existieren weitere nach DIN 41 772-4 [67] genormte Ladeverfahren.

Diese sind:

Das W-Verfahren

Dieses Ladeverfahren begrenzt die Ladeleistung auf ein für die Batterie erträgliches Maß. Im einfachsten Fall wird diese Leistungsbeschränkung durch entsprechend dimensionierte Ladegeräte realisiert. Das W-Verfahren erkennt eine volle Batterie nicht und erfordert deshalb einen Eingriff, um eine Überladung zu vermeiden. Die Ladeleistung ist entsprechend niedrig und mit langer Ladedauer verbunden.

Das Wa-Verfahren

Dieses Verfahren entspricht dem W-Verfahren mit der Erweiterung um eine automatische Abschaltvorrichtung.

Das W0Wa-Verfahren

Dieses Verfahren ist bereits deutlich komplexer, da es zwei Ladephasen mit unterschiedlich hoher Leistung und einer automatischen Um- bzw. Abschaltung umfasst. Die erste Ladephase mit höherer Leistung nutzt den geringeren Innenwiderstand der teilentleerten Batterie zu Gunsten einer verkürzten Ladezeit aus. Die zweite Ladephase mit reduzierter Leistung kann zum Ladungsausgleich der in Serie geschalteten Zellen genutzt werden. Dieses Verfahren bedingt eine Spannungsmessung zur Bestimmung des Umschalt- und des Abschaltzeitpunktes.

I/U Verfahren

Die Ladung erfolgt mit begrenztem Strom bis die Ladeschlussspannung erreicht ist. Alsdann wird das Laden bei konstanter Spannung fortgesetzt. Der Strom nimmt mit fortschreitender Ladung ab und erreicht nach endlich langer Zeit einen Wert, welcher als Abschaltkriterium herabgezogen wird. Dies ist meist 1/100 der Nennkapazität in Ampere. Dieses Verfahren gewährleistet in der strombegrenzten Anfangsphase sehr kurze Ladezeiten bis ca. 80% SoC. Die spannungsbegrenzte Phase nimmt ein Vielfaches der Zeit in Anspruch, dient jedoch der Nutzung der vollen Kapazität und dem regelmäßig notwendigen Ladungsausgleich der in Serie verbundenen Zellen.

Aus den genormten Ladeverfahren lässt sich ableiten, dass mit einer höheren Ladestromakzeptanz der Batterie bei niedrigem Ladezustand gerechnet werden kann. Dies hat wiederum Einfluss auf die Auslegung und den Betrieb eines Range Extenders.

4 Entwurfsprozess

4.1 Gesamtsystem – Hybridfahrzeug

4.1.1 Anforderungen

Das System umfasst das Hybrid-Fahrzeug als Ganzes. Deshalb sind die Systemanforderungen mit den Anforderungen an das Fahrzeug identisch. Die Systemanforderungen ergeben sich zunächst aus der **Zieldefinition**, zu den Kosten eines rein elektrischen Scooters der unteren Preisklasse einen leistungsmäßig gleichwertigen Ersatz für einen konventionellen Scooter mittels Hybridisierung zu schaffen, wobei eine signifikante CO₂-Reduktion zu erreichen ist.

Weiters wird die Fähigkeit rein elektrischer Fortbewegung als entscheidend für die Kundenakzeptanz erachtet. Ebenso wird hiermit für etwaige installierte verkehrsbeschränkte Zonen, welche ausschließlich elektrisch befahren werden dürfen, vorgehalten. Daraus lassen sich folgende Anforderungen an die Hybridvariante formulieren:

- **CO₂-Reduktion:**

Verbrauchsverbesserungen im Zyklus muss erreicht werden. Hieraus leitet sich für den Systemtest die nachzuweisende Größe „Verbrauch im Zyklus“ ab.

- **Leistungsgleichheit:**

Bei einer zugrunde gelegten Motorleistung von 3kW und einem Getriebewirkungsgrad von 70% der konventionellen Variante mit Zweitakt-Verbrennungsmotor und CVT-Getriebe, bedeutet das, dass durch die Hybridvariante eine Hinterradleistung von mindestens 2 kW darzustellen ist. Es ist darüber hinaus eine gewichtsneutrale Lösung anzustreben, um vergleichbare Beschleunigungswerte zu erreichen. Das Fahrzeuggewicht und das Beschleunigungsvermögen sind im Zuge des Systemtests zu überprüfen.

- **Kosten:**

Es ist eine kostenneutrale Lösung zu einem rein elektrischen Scooter der unteren Preisklasse anzustreben. Weiters ist eine bauraumneutrale Lösung anzustreben, um Zusatzkosten zu vermeiden.

- **Kundenakzeptanz /Nutzen:**

Um der ökologischen Haltung der Kunden von Elektrofahrzeugen Rechnung zu tragen, soll der rein elektrische Betrieb ohne Verbrennungsmotorunterstützung für die Mehrzahl aller Einzelfahrten gewährleistet sein. Daraus ergibt sich, dass eine rein elektrische Reichweite von 20 km darzustellen ist. Diese wird in Anlehnung an [68] als ausreichend für 90% der täglich zurückgelegten Fahrstrecken erachtet. Weiters dürfen dem Nutzer keine erheblichen Nachteile im Fall einer entleerten Batterie entstehen. Deshalb soll, bei leerer Batterie und nur mittels Range Extender-Unterstützung, eine Fahrgeschwindigkeit entsprechend der Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h zumindest in der Ebene erreicht werden können.

- **Gesetzlichen Rahmenbedingungen:**

Zusätzliche Systemanforderungen leiten sich aus den gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Typgenehmigung von Fahrzeugen dieser Art ab. Diese wurden bereits in 3.1 Gesetzliche Grundlagen der Typgenehmigung erläutert und werden hier, hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Hybridvariante, nochmals aufgegriffen.

Anforderungen A – Umweltverträglichkeit:

Zum Nachweis der Erfüllung dieser Anforderungen sind in der Verordnung eigene Test-Typen definiert. Die relevantesten Test-Typen seien hier herausgegriffen, da sie einerseits von Bedeutung für den Systementwurf sind und andererseits der Definition des Systemtests, also der experimentellen Überprüfung im Integrationspfad zur Validierung des Systementwurfs, dienen.

Typ I - Verdünnte Abgasmessung auf dem Rollenprüfstand in definiertem Fahrzyklus: Abgaskennwerte sind einzuhalten für EURO 4 und Abschätzung für EURO 5

Typ V - Dauerhaltbarkeit emissionsmindernder Einrichtungen: Maßnahmen zur Erfüllung der Dauerhaltbarkeitskriterien sind zu treffen.

Typ VII - Energieeffizienz, Verbrauchsmessung und CO₂-Emissionen: Deutliches CO₂-Reduktionspotential gegenüber einer konventionellen Variante muss gegeben sein, wengleich kein Grenzwert für die Typgenehmigung festgelegt ist.

Typ IX – Geräuschmessung: Es wird davon ausgegangen, dass der Vorteile des elektrischen Antriebs, eine nahezu geräuschlose Fahrt zu ermöglichen, zusätzliche Sensibilität beim Nutzer schafft. Es gilt folglich die Geräuschgrenzwerte deutlich zu unterschreiten.

Anforderungen B - Funktionale Sicherheit

Elektrische Sicherheit bedeutet, dass Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit und des Lebens getroffen werden müssen. Im Zusammenhang mit einem elektrischen Antriebsstrang wird hierbei die Gefahr durch elektrischen Schlag hervorgehoben, wobei Maßnahmen ab einer Spannung von > 60 V zu treffen sind. Um aufwändige Isolationsmaßnahmen und damit Kosten zu vermeiden, bedeutet dies für das Hybridfahrzeug, dass in keinem Betriebszustand höhere Spannungen als 60 V auftreten dürfen.

Anforderungen C - Fahrzeugauslegung und allgemeine Anforderungen für die Typgenehmigung

Die Forderung nach Elektromagnetischer Verträglichkeit EMV bedeutet, dass das Fahrzeug weder andere elektromagnetische Systeme stört noch von solchen gestört wird. Es ist folglich bereits bei Entwurf und Auslegung dafür Sorge zu tragen, dass diese Anforderung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt werden kann.

Dem Lösungsansatz entsprechend, soll eine für Hersteller leicht umzusetzende Add-On-Hybridvariante in Form eines Range Extender Elektrischen Fahrzeugs - REEV entstehen.

Damit ist die Art der Hybridvariante bereits auf eine serielle Konfiguration festgelegt. Weiters setzt dies eine selbstständige Range Extender-Einheit voraus, welche keine fahrzeug- noch fahrerseitigen Eingriffe benötigt. Die formulierte Anforderung nach selbstständiger bzw. automatischer Funktion beeinflusst zwar das System maßgeblich, ist jedoch keine Anforderung, die es auf Systemebene, sondern auf Subsystemebene mit Bezug auf die Range Extender-Einheit zu stellen und zu überprüfen gilt.

4.1.2 System Entwurf & Auslegung

Der Systementwurf folgt der Konfiguration eines seriellen Hybrid. Beim seriellen Hybrid wird die mechanische Energie des Verbrennungsmotors einem Generator zugeführt und in elektrische Energie umgewandelt. Diese wird dann entweder dem Elektromotor zum Zwecke des Antriebs zugeführt oder in dem elektro-chemischen Speicher (Batterien) zwischengespeichert. Es werden Varianten des seriellen Hybridantriebes anhand ihrer Leistung im Verhältnis zur Antriebsleistung differenziert.

- Der **Leistungshybrid, oder „Eins-zu-Eins-Hybrid“** kombiniert drei ähnlich große Maschinen (Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor). Das Fahrzeug kann dauerhaft ohne jegliche Einschränkungen mit Höchstgeschwindigkeit betrieben werden. Die rein elektrische Fahrzeugreichweite wird durch die Batteriegröße bestimmt.
- Beim **Range Extender-Hybrid** haben Verbrennungsmotor und Generator eine geringere Leistung als der Elektromotor, der das Fahrzeug antreibt. Sie besitzen lediglich eine Hilfsfunktion, um bei niedrigem Batterieladestand die Reichweite dennoch zu verlängern.

Durch die Anforderung, in jedem Fall die Höchstgeschwindigkeit von 45km/h in der Ebene darzustellen, ergibt sich eigentlich die Variante des Leistungshybrid. Andererseits ist die hierfür notwendige Antriebsleistung auf ca. 1kW begrenzt. Daher kann auch die REX Ausgangsleistung niedriger als die maximale E-Motorleistung ausfallen, was wiederum der Definition der Range Extender-Variante entspricht. Im Weiteren wird der Begriff Range Extender für das Add-on Subsystem verwendet. Damit ergibt sich das System, wie in Abbildung 34 dargestellt.

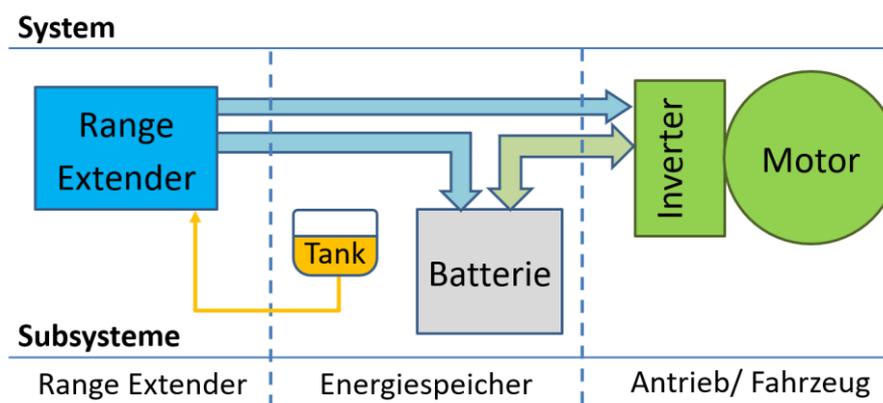


Abbildung 34 : Einteilung des Systems auf Sub-Systeme

Das System lässt sich in drei Subsysteme aufteilen - die Range Extender-Einheit, den Energiespeicher -Batterie-, welcher bereits eine Subeinheit des Fahrzeugs darstellt und den Antrieb, welcher für das elektrische Basisfahrzeug steht.

- Die Anforderung nach CO₂-Reduktion stellt die Motivation zum Hybridentwurf dar.

- Der Anforderung nach Leistungsgleichheit gegenüber einem konventionellen Fahrzeug kann auf einfache Weise durch die Dimensionierung bzw. Auswahl eines entsprechenden elektrischen Antriebsmotors oder Fahrzeugbasis entsprochen werden.
- Die Anforderungen nach Kosten- und Bauraumneutralität können nur durch Reduktion der Batteriegröße erfüllt werden. Daraus ergeben sich finanzielle, volumetrische und gravimetrische Zielgrößen für die Range Extender-Einheit, welche jenen des eingesparten Batterieteils entsprechen. Im Falle von Bleibatterien fallen diese zugunsten des Gewichts und des Bauraumes, jedoch nicht zugunsten der Kosten aus. Bei der Reduktion von Lithiumbatterien würde es sich entgegengesetzt verhalten.

4.1.3 Systemauslegung

Die folgende Systemvorauslegung beruht auf einer Wirkungsgradannahme für die elektrischen Antriebskomponenten -Motor inklusive Leistungselektronik - in der Höhe von 65 %. Diese hat sich im Zuge experimenteller Voruntersuchungen an einem rein elektrischen Fahrzeug mit einem 1,1 kW Antriebsmotor ergeben, wobei die mechanische Antriebsleistung auf dem Rollenprüfstand als Nutzen und die elektrische Leistung aus der Batterie als Aufwand für die Wirkungsgradberechnung herangezogen wurde. [69]. Abbildung 35 stellt das Wirkungsgradkennfeld dar.

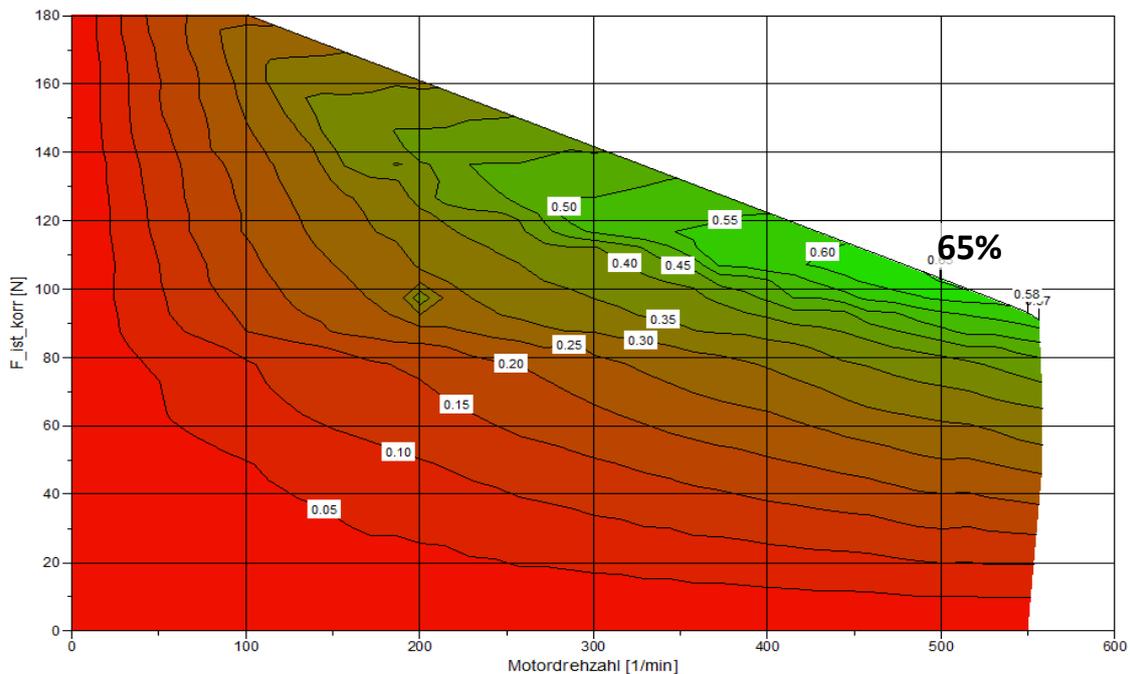


Abbildung 35 : Wirkungsgradkennfeld eines 1,1 kW Radnabenmotors [69]

Die Anforderung nach Leistungsgleichheit gegenüber der konventionellen Referenz verlangt, dass der Antriebsmotor eine mechanische Dauer-Leistung von 2 kW und vorteilhafterweise für kurze Beschleunigungsphasen bis zu 3 kW kurzzeitig abgeben kann. Entsprechend dem Motorwirkungsgrad ergibt sich daraus eine elektrische Leistungsanforderung, welche bei rein elektrischem Antrieb wiederum von der Batterie beantwortet werden muss. Daraus lässt sich die benötigte Leistungsfähigkeit der Batterie ableiten. Im Falle einer Bleibatterie, wie sie in den preisgünstigeren Elektrovarianten Verwendung findet, sind Entladeraten in der Höhe von 3 C unproblematisch, womit sich eine Batteriegröße von 1 kWh Speicherkapazität ergibt. Diese Art der Batteriedimensionierung unterscheidet sich von der herkömmlichen Weise, bei welcher die Batteriegröße aus der Reichweitenanforderung abgeleitet wird, gibt jedoch Aufschluss über die kleinstmögliche Batterie.

Die Folge einer kleineren Batterie ist eine geringere rein elektrische Reichweite. Die Gesamtreichweite wird in der Hybridvariante jedoch primär durch das Fassungsvermögen des Kraftstofftanks bestimmt, wodurch sich dessen Größe aus der geforderten Gesamtreichweite ergibt. Dennoch ist die rein elektrische Reichweite relevant, da sie über den Berechnungsfaktor D_e maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Emissions- und Verbrauchsberechnung im Prüfzyklus hat. Ein Wert von 20 km wird als ausreichend für 90% aller Tagesfahrtstrecken dieser Fahrzeugklasse erachtet. Diese rein elektrische Reichweite gilt es im Zuge des Systemtests nachzuweisen.

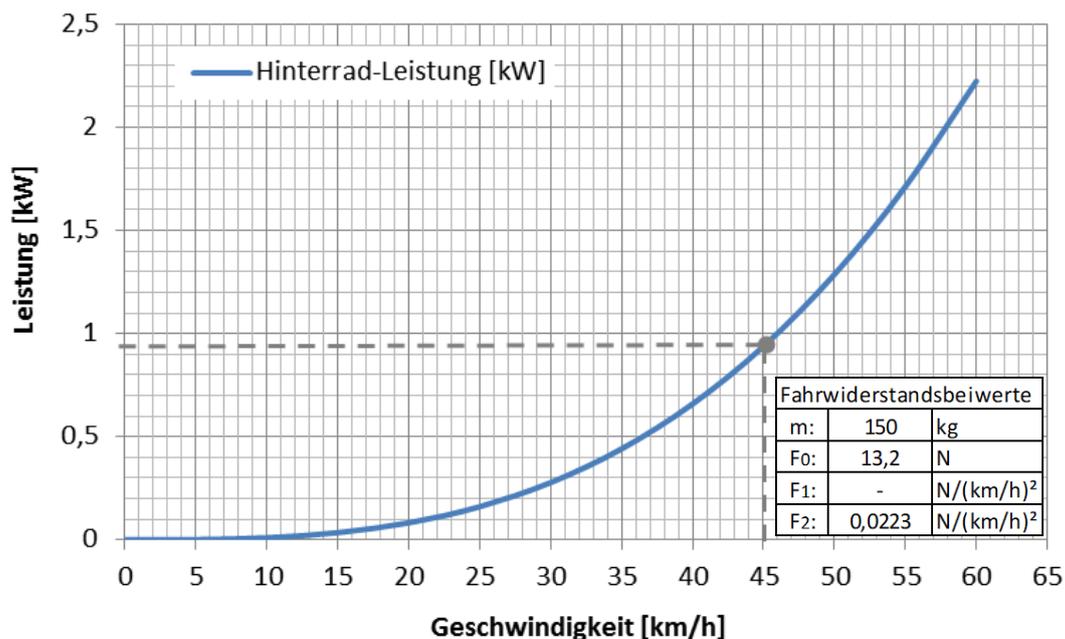


Abbildung 36 : Typischer Leistungsbedarf eines L1e Scooters in der Ebene infolge des Fahrwiderstandes

Es wird davon ausgegangen, dass eine Leistung, welche das Fahrzeug in der Ebene mit der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h trotz leerer Batterie weiterfahren lässt, für die Kundenzufriedenheit ausreichend ist. Diese Geschwindigkeit verlangt zur Überwindung der Fahrwiderstände eine mechanische Antriebsleistung in der Höhe von ca. 1 kW am Hinterrad wie aus der Darstellung des Fahrwiderstandes, Abbildung 36, hervorgeht. In Abbildung 37 ist dieser Fall mit leerer und deswegen unbeteiligter Batterie dargestellt. Diese mechanische Leistungsanforderung wird, bedingt durch den Wirkungsgrad des Motors von 65%, in eine elektrische Leistungsanforderung von 1,54 kW übersetzt. Diese elektrische Leistung ist bei leerer Batterie vom Range Extender alleine zu erbringen, womit auch dessen maximale elektrische Ausgangsleistung definiert ist.

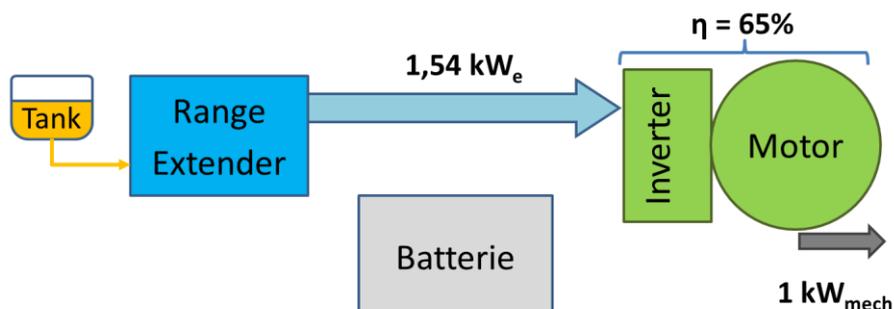


Abbildung 37 : Leistungsfluss für den Fall einer leeren Batterie

Damit ist die Systemauslegung im Groben abgeschlossen und die Anforderungen an die Subsysteme formuliert. Eine Wirkungsgradanalyse soll klären, in welchem Ausmaß sich mit diesem System Vorteile gegenüber dem konventionellen Antrieb erzielen lassen.

4.1.4 Wirkungsgradanalyse

Es werden die Fälle stationär und transient unterschieden. Stationär bezieht sich auf einen Lastpunkt während einer Fahrt mit konstanter Maximalgeschwindigkeit und leerer Batterie. Der transiente Fall hingegen umfasst variable Lastpunkte, wie sie bei Fahrzuständen in ausgewählten Fahrzyklen vorkommen. Hierbei werden die Batterielade- und -entlade Verluste mitberücksichtigt.

Stationäre Analyse

Es wird angenommen, dass es im stationären Fall gelingt, die Komponenten des Range Extenders jeweils in Betriebspunkten mit bestem Wirkungsgrad zu betreiben. Dabei wird ein Wirkungsgrad von 23% für die Verbrennungskraftmaschine und 80% für den Generator angenommen. Die Wirkungsgradannahme für die elektrische Maschine erscheint gering, verglichen mit bekannten Literaturangaben für elektrische Maschinen jenseits von 95%. Sie ist aber der Tatsache geschuldet, dass hierbei Komponenten zum Einsatz kommen, die vergleichsweise klein sind. Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine, ebenso wie der eines Verbrennungsmotors, steigt mit der Baugröße.

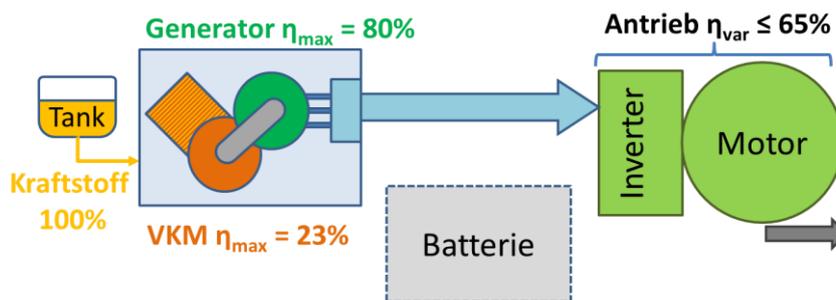


Abbildung 38 : Wirkungsgradkette für den Lastfall 1 kW am Hinterrad ohne Batterie

Entsprechend Abbildung 38 ergibt sich der Systemwirkungsgrad η_{Sys} aus folgender Wirkungsgradverkettung:

$$\eta_{Sys} = \eta_{VKM} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{Antr}$$

$$\eta_{Sys} = 0,23 \cdot 0,8 \cdot 0,65 = 0,092$$

Für den vorliegenden Fall ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 9,2%. Fasst man die Terme für den Generator- η_{Gen} und den Antriebwirkungsgrad η_{Antr} zusammen, ergibt sich ein Transmissionswirkungsgrad von 52%. Dieser ist, im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang mit CVT-Getriebe und 70% Wirkungsgrad, deutlich schlechter. Einzig vorteilhaft ist, dass der Verbrennungsmotor wirkungsgradoptimal betrieben werden kann.

Weicht ein stationärer Lastzustand vom gezeigten ab, sind die Lade- bzw. Entladeverluste der Batterie mitzubedenken, wie dies in Abbildung 39 dargestellt ist.

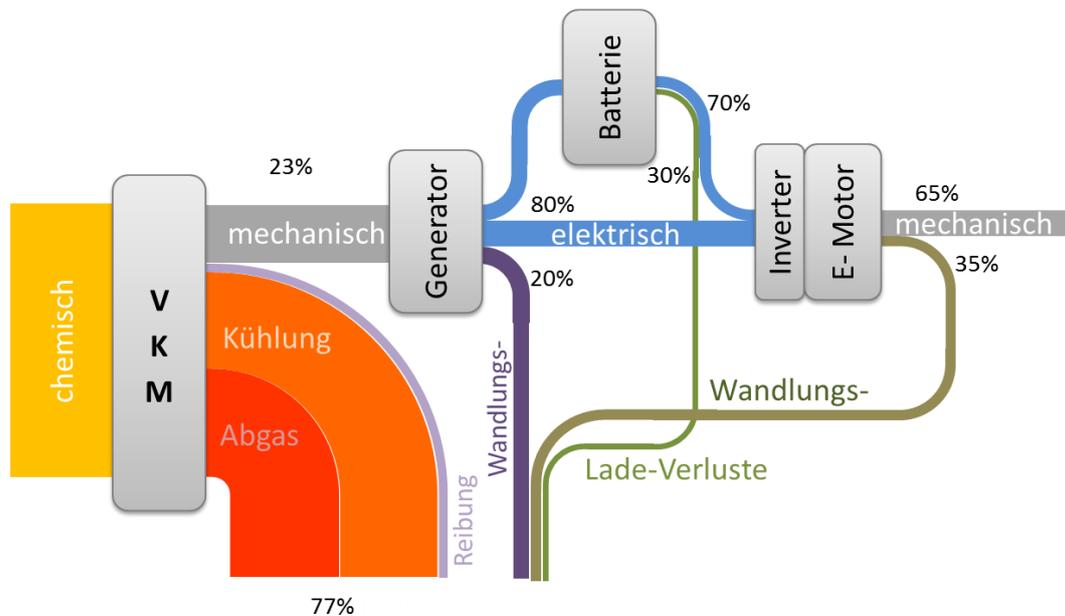


Abbildung 39 : Momentaufnahme der Wirkungsgradverkettung des Gesamtsystems

Es bedarf folglich einer transienten Analyse, um den Wirkungsgrad des Gesamtsystems in weiteren Betriebsfällen zu erfassen.

Transiente Analyse

Der transiente Betrieb ist deutlich komplexer und mit einfachen Wirkungsgradbetrachtungen nicht zu erfassen. Deshalb muss die Frage nach dem Systemwirkungsgrad im Fahrzyklus mithilfe einer Längsdynamik-Simulation beantwortet werden, welche die komplexen Energieflüsse abbildet. Hierbei wird für jeden Zeitschritt die benötigte Antriebsleistung aus der Geschwindigkeitsvorgabe des Fahrzyklus errechnet und über die Wirkungsgradkennfelder der beteiligten Komponenten auf den Energieverbrauch zurückgerechnet. Es handelt sich somit um eine Rückwärts-Simulation. Diese Art der Berechnung erfordert die Eingabe von fahrzeugspezifischen Größen und Wirkungsgradkennfeldern für die Energiewandler im System. Diese wurden im Zuge einer Studie [49] experimentell ermittelt. Als Simulationsplattform dient das institutseigene Längsdynamik-Programm PHEM – Passenger car and Heavy duty Emission Model [70].

Die Besonderheiten des Hybridsystems, und der Umstand, dass die Ausgangsleistung des REX anhand der gewünschten Fahrleistung bei leerer Batterie und nicht anhand der von der Batterie ertragbaren Leistung ausgelegt wurde, machen Anpassungen notwendig. Die Leistungsanpassung wird auf zwei Leistungsstufen beschränkt. Die niedrige Leistungsstufe definiert sich anhand der Aufnahmefähigkeit der Batterie, wenn diese die einzige Last im System darstellt. Die hohe Leistungsstufe hat sich aus der Auslegung für den Fall der leeren Batterie bei der hierbei gewünschten Fahrleistung zu 1,6 kW elektrisch ergeben. Die verwendete Software PHEM war zur Abbildung des Hybridsystems um ein Modul zur Implementierung der Steuerungsparameter für die Start- und Stopp-Bedingungen sowie für die Anpassung der Leistungsstufen zu erweitern. Abbildung 40 stellt den Flow-Code dieses Moduls dar.

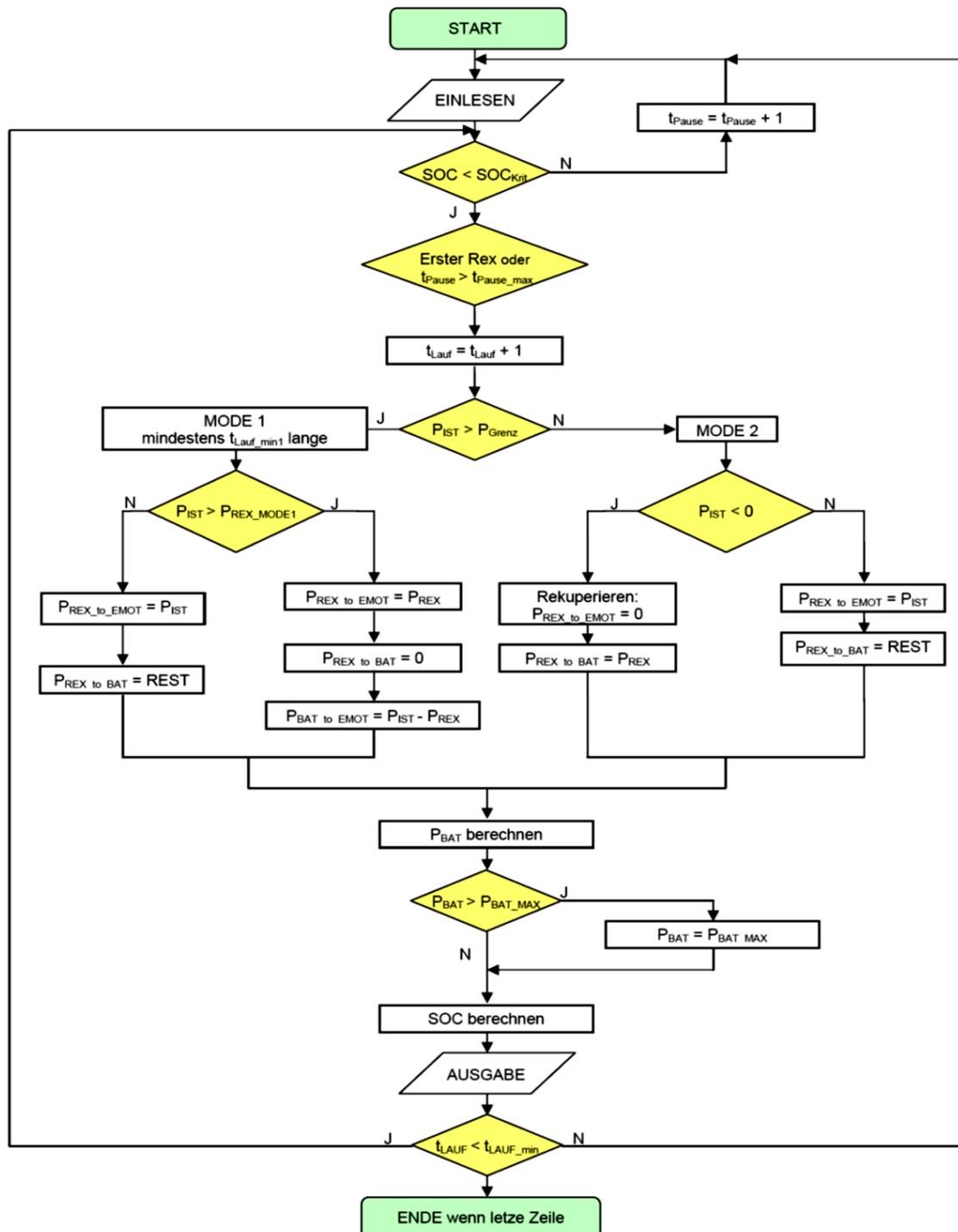


Abbildung 40 : Flussdiagramm des Hybrid-Zusatzmodul für PHEM [49]

Der Batterieladezustand SoC stellt die Bedingung für den Range Extender Start und Stopp sowie die Steuergröße für eine Leistungsanpassung (MODE 1 und MODE 2) des Range Extenders dar. Für die Leistungsanpassung zum Schutz der Batterie wird von einer zulässigen Maximal-Laderate von 0,8 C, respektive 800 W elektrischer Leistung, ausgegangen. Somit ergibt sich eine notwendige Drosselung der Range Extender-Ausgangsleistung auf 50 %. Weiters lassen sich zeitliche Verzögerungen (t_{Lauf}) für die Umschaltpunkte festlegen, um sehr kurze Betriebszeiten des Range Extenders auszuschließen.

Somit erhält man folgende Steuerparameter für die Simulation:

- 2 Betriebspunkte
 - Mode 1 mit hoher Leistung – 1,6 kWe
 - Mode 2 mit geringer Leistung – 0,8 kWe
- Kritischer Ladezustand bei X % der Nennkapazität des Akkus
- Ladezustand bis zu dem geladen werden soll – Y % der Nennkapazität der Akkus
- Mindestlaufzeit (um z.B. den Katalysator auf Betriebstemperatur zu bringen)

Daraus ergibt sich bereits eine ladungserhaltende Betriebsstrategie, wie in Abbildung 41 dargestellt. Die Range Extender-Unterstützung startet bei Unterschreitung einer vorgegebenen Einschaltsschwelle X und dauert an bis diese wieder einen vordefinierten Wert Y erreicht hat. Ist dieser Wert Y erreicht, wird der Range-Extender ausgeschaltet. In ausgezeichneten Betriebszuständen des Fahrzeugs, wie etwa Stillstand oder Rekuperation, ist eine Leistungsanpassung entsprechend der Ladestromgrenze der Batterie vorzusehen. Der Start erfolgt dennoch immer mit hoher Leistung im Mode 1 und eine Leistungsanpassung im Mode 2 erfolgt sobald eine Laderate von 0,8 C überschritten wird. Das Mindestlaufzeitkriterium ist dominant gegenüber dem Abschaltkriterium Y.

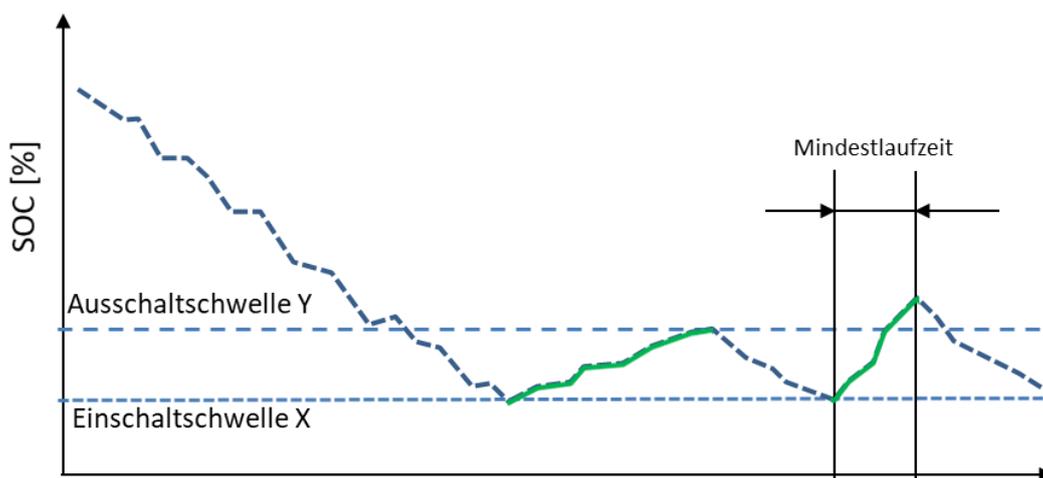


Abbildung 41 : Parameter der REX-Betriebsstrategie

Mit Hilfe der Längsdynamik Simulation kann nun der Einfluss der Steuergrößen X und Y untersucht und hinsichtlich Systemwirkungsgrad optimiert werden. Die Bewertung erfolgt anhand des Kraftstoffverbrauchs im Zyklus, wobei eine Energiebilanz über diesen erstellt wird. Hierbei werden Ladezustandsabweichungen zwischen Testbeginn und -ende berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass der Systemwirkungsgrad steigt, wenn der Range Extender erst bei einem möglichst niedrigen Batterieladezustand X zugeschaltet wird, wobei die Ladung der Batterie lediglich erhalten wird. Diese Betriebsweise ist aus der Literatur [71,72] unter den Begriff „charge sustaining“, also Ladungserhaltung, bekannt. Um ein allzu häufiges Ein- und Ausschalten zu verhindern, ist eine hinreichende Hysterese mittels Steuerparameter Y darzustellen.

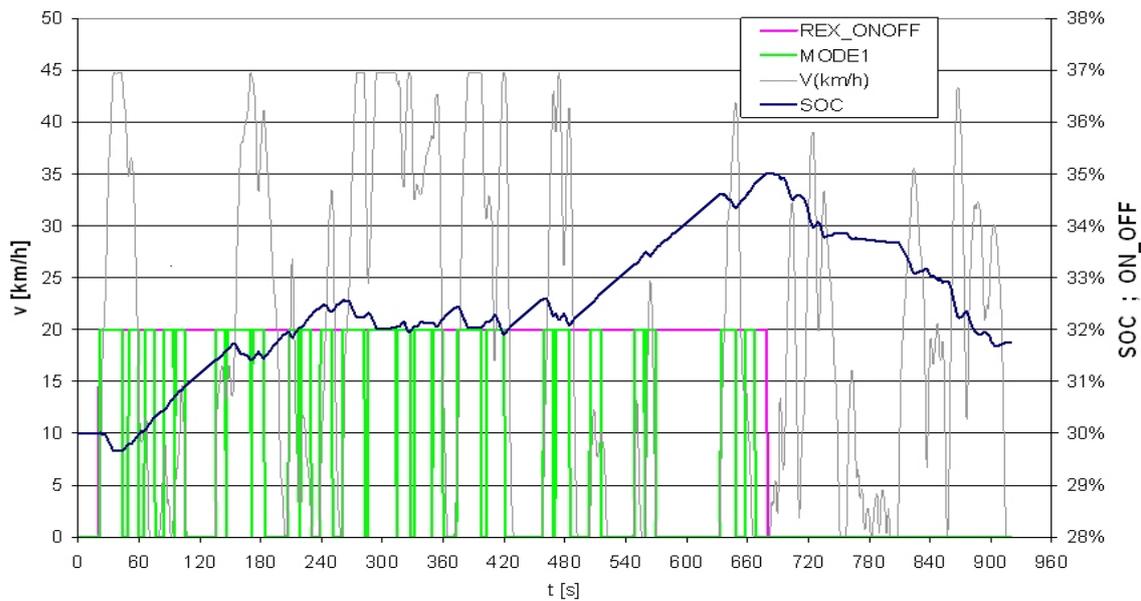


Abbildung 42 : Simulationsergebnis für den Fahrzyklus CADC –Urban

Abbildung 42 zeigt das Simulationsergebnis für den hoch transienten und realitätsnahen Fahrzyklus CADC bzw. den urbanen Anteil des Artemis-Zyklus. Hierbei wurde 30 % SoC als Einschalt- und 35 % SoC als Ausschaltkriterium gewählt. Der Range Extender Betrieb ist durch die violette Linie und der jeweilig aktive Leistungsmodus durch die grüne Linie dargestellt. In diesem Zyklus ergibt sich ein CO₂-Reduktionspotential von 43 % gegenüber einem Scooter mit VKM und CVT.

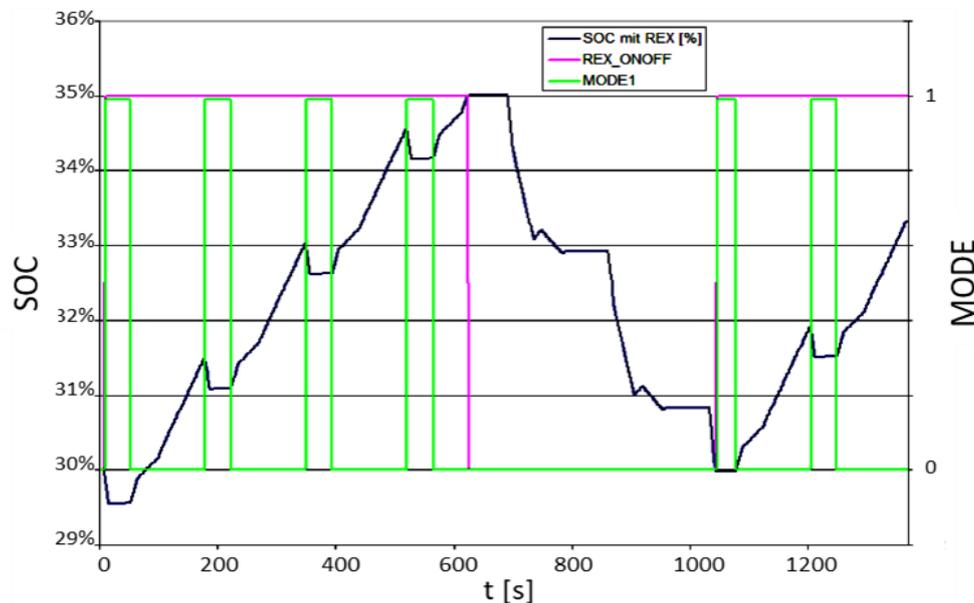


Abbildung 43 : Simulationsergebnis für den Fahrzyklus ECE-R47

Für den weniger transienten aber für EURO 4 emissionsrelevanten Fahrzyklus ECE-R47, Abbildung 43, beziffert sich das Reduktionspotential bei gleicher Betriebsstrategie mit 39 %.

Interpretation der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich mit einer sehr einfachen Betriebsstrategie bereits beachtliche Wirkungsgradvorteil gegenüber der konventionellen (VKM mit CVT) Variante erzielen lassen. Bemerkenswert ist auch, dass dies trotz einheitlicher Betriebsstrategie in unterschiedlichen Fahrzyklen zutrifft. Es zeigt sich auch, dass der Wirkungsgradvorteil der Hybridvariante zunimmt, je transienter sich der Fahrzyklus darstellt. Dieses Ergebnis ist in Anbetracht der untersuchten Fahrzeugklasse L1eB äußerst positiv, werden diese Fahrzeuge doch hauptsächlich innerstädtisch und somit hoch transient bewegt.

Das Einsparpotential ergibt sich einerseits aus der durch Rekuperation nutzbaren Bremsenergie und andererseits aus dem im Bestpunkt betriebenen Verbrennungsmotor ohne Leerlaufanteile. Eine Fortführung des Projektes ist somit trotz des geringeren Transmissionswirkungsgrades (zumindest im Hochlastbereich, siehe Abbildung 7 Seite 12) gerechtfertigt.

4.2 Subsysteme

Wie bereits im Abschnitt - Systementwurf festgelegt, besteht das System aus den Subsystemen elektrischer Antriebsstrang bzw. Fahrzeug, Batterie und Range Extender-Einheit. Für diese gilt es nun Anforderungen zu formulieren. Zu diesem Zweck werden die Subsysteme Antriebsstrang und Batterie zunächst separat betrachtet, aber in der Folge wieder zu einem Subsystem, der „rein elektrischen Fahrzeugbasis“, zusammengefasst

4.2.1 Elektrischer Antriebsstrang & Fahrzeug



Abbildung 44 : E-one Capri im Originalzustand [73]

Die Anforderung der darzustellenden Antriebsleistung ist ausschließlich an die rein elektrische Fahrzeugbasis gerichtet. Dieser Anforderung kann folglich durch Wahl eines geeigneten E-Scooters entsprochen werden. Die Fahrzeugauswahl berücksichtigt den Ansatz preisgünstige Vertreter dieser Variante zu adressieren. Demzufolge handelt es sich bei der ausgewählten Fahrzeugbasis um ein mit Bleibatterien ausgerüstetes Fahrzeug, welches der gestellten Leistungsanforderung entspricht. Abbildung 44 stellt dieses im Originalzustand dar. Es ist am europäischen Markt erhältlich und erfüllt somit die europäische Zulassungsverordnung für rein elektrische Fahrzeuge. Die technischen Daten sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Daten des Fahrzeuges im Originalzustand [73]

Technische Daten /Preis	
Preis	€ 2.300
Motor	3.000 Watt Radnabenmotor
Batterie	48 V / 40 Ah , AGM-Bleiakkumulator
Ladezeit	~ 6 Stunden
Geschwindigkeit	~ 45 km/h
Reichweite	~ 60 km *
Nettogewicht	140 kg

* abhängig vom Gesamtgewicht des Fahrzeuges, Straßenbeschaffenheit und Topographie

Beachtenswert liegt die Bordspannung mit 48 V unter der Grenze für den Kleinspannungsbereich von 60 V [74], wodurch die Anforderung nach elektrischer Sicherheit bereits erfüllt wird. Die Reichweitenangabe von 60 km erfolgt ohne Bezug auf die Messmethode und ist daher kritisch zu betrachten. Mehr Aufschluss über den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs gewähren die Angaben des Radnabenmotorherstellers, welche in Abbildung 45 grafisch dargestellt sind.

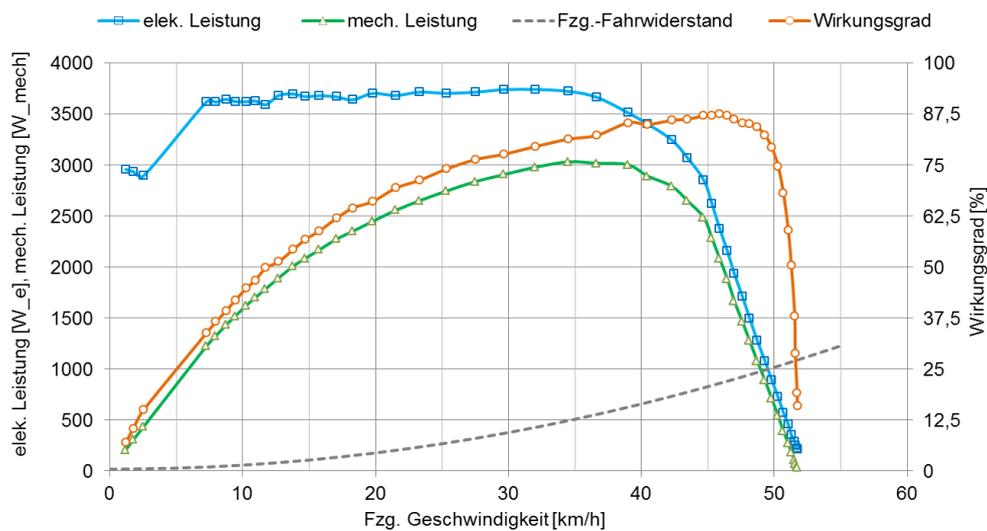


Abbildung 45 : Herstellerangaben zu Motorleistung und -Wirkungsgrad [75]

Zufolge dieser Angaben, erreicht der Wirkungsgrad bei Vollast Werte bis zu 87%. Das heißt, dass der ursprünglich mit 65% angesetzte Wirkungsgrad für den Antriebsmotor bei der CO₂-Potentialberechnung das Ergebnis keinesfalls zu gut dargestellt hat. Der in Kapitel 4.14 Wirkungsgradanalyse ermittelte Transmissionswirkungsgrad bei 45 km/h Konstantfahrt mit leerer Batterie verbessert sich hiermit von 52% auf 69,6 %.

4.2.2 Batterie

Im vorhergehenden Abschnitt - Systemauslegung – wurde die Batteriegröße bereits mit 1kWh festgelegt. Da die Bordspannung durch die Elektro-Antriebskomponenten des Fahrzeugs fixiert ist, kann eine Reduktion der Energiespeicherkapazität nur über die Kapazität erfolgen. Dementsprechend wird die 40Ah Originalbatterie durch eine 22Ah Batterie gleicher Bauart ersetzt, womit sich rechnerisch mit einer Nennspannung von 48 Volt die geforderten 1kWh ergeben. Der Formfaktor dieser Batterien lässt deren Einbau in dem halben Bauraum zu. Die tatsächlich verwendbare Energiemenge wird einerseits durch die zulässige und lebensdauerrelevante Entladungstiefe sowie andererseits durch Verluste bei höherer Entladerate bestimmt. Durch die Reduktion der Batteriegröße hat sich, bei gleichbleibender Belastung durch den Antrieb, die kapazitätsspezifische Belastung erhöht. Inwieweit dies Einfluss auf die Reichweite und das Systemverhalten hat, wird experimentell ermittelt. Zu diesem Zweck wird der gewählte E-Scooter mit der größenreduzierten Batterie ausgestattet, wodurch die „rein elektrische Fahrzeugbasis“ als Subsystem entsteht.

4.2.3 Rein elektrische Fahrzeugbasis

Das ausgewählte Fahrzeug bildet, in Kombination mit der reduzierten Batterie, die rein elektrische Fahrzeugbasis. Die Anforderung nach mindestens 20 km rein elektrischer Reichweite kann hierdurch bereits in diesem frühen Stadium experimentell nachgewiesen werden. Abbildung 46 zeigt das Ergebnis des, entsprechend Vorschrift 134/2014, durchgeführten Verfahrens zur Ermittlung der rein elektrischen Reichweite. Es werden 21,4 km erreicht, wodurch der Anforderung nach 20 km rein elektrischer Reichweite entsprochen wird.

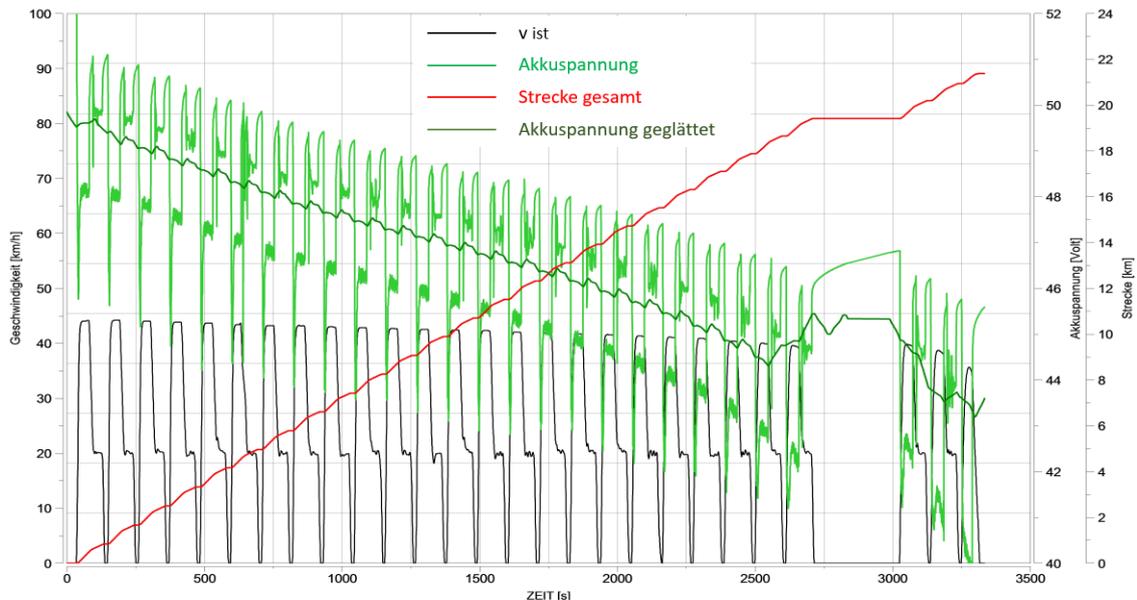


Abbildung 46 : Rein elektrische Reichweite mit 48V 22Ah Batterie [76]

Die im Zuge der Untersuchung aufgezeichnete Systemspannung und Fahrzeuggeschwindigkeit zeigen, dass sich eine entleerte Batterie, gekennzeichnet durch eine mittlere Systemspannung von unter 42V, auf die erreichbare Höchstgeschwindigkeit auswirkt. Der Reichweitentest war, bedingt durch diese Geschwindigkeitsreduktion, abzubrechen.

Für das System und die Auslegung des Range Extenders bedeutende Daten liefert zusätzlich der Vergleich der reduzierten und der originalen Batterie im Fahrzyklus. Abbildung 47 zeigt die gemessenen Systemspannungsverläufe für beide Fälle.

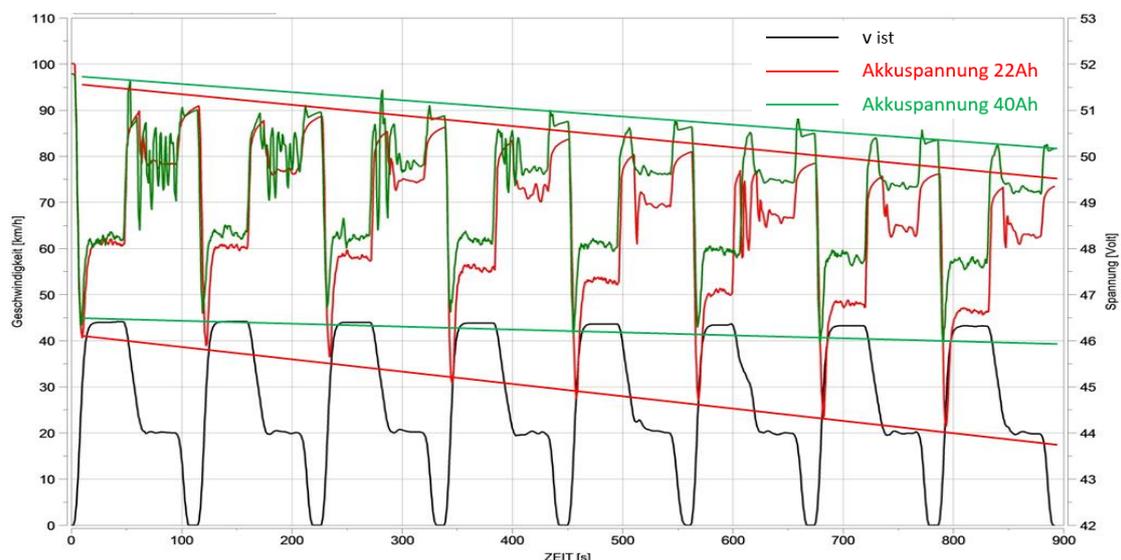


Abbildung 47 : Verlauf der Systemspannung für unterschiedliche Batteriegrößen im ECE-R47 Fahrzyklus [76]

Der stärkere Abfall der mittleren Spannungslage resultiert nachvollziehbar aus der geringeren Energiespeicherfähigkeit. Es ist aber auch eine deutlich höhere Spannungsfluktuation in Folge Leistungsentnahme bzw. -zufuhr im Fall der kleineren Batterie zu erkennen. Diese ist für den Betrieb des Range Extenders von Bedeutung, da sie die Randbedingung für dessen Auslegung darstellt und der Formulierung zusätzlicher Anforderungen an diesen dient.

4.2.4 Der Range Extender

Das Subsystem Range Extender stellt selbst ein mechatronisches System dar und könnte demzufolge in einem eigenen V-Modell erfasst werden. Die Anforderungen ergeben sich jedoch aus dem Hybridfahrzeug-Kontext, welches auch die Randbedingungen festlegt. Deshalb wird der Range Extender als Subsystem eines Hybridfahrzeugs behandelt.

4.2.4.1 Range Extender Anforderungen

Die aus den Systemanforderungen übertragbaren Anforderungen an den Range Extender sind:

- Kosten-, Bauraum- und Gewichtsneutralität (Zielgröße $\frac{1}{2}$ Batterie)
- Hoher Wirkungsgrad – CO₂-Reduktion

Aus den Erkenntnissen der durchgeführten Längsdynamik-Rückwärts-Simulation und den dafür definierten Steuerparametern leiten sich folgende, durch den Range Extender darzustellende Funktionen als Anforderungen ab:

- Automatische Start / Stopp Funktion
- Lade- bzw. Batteriezustandserkennung (Parameter X und Y)
- Mindestlaufzeit
- Zwei Leistungsstufen
 - 100 % - 1,6 kWe und
 - 50 % - 0,8 kWe

Aus den mit reduzierter Batterie durchgeführten Fahrversuchen leitet sich ein Spannungsfenster für den Betrieb des Range Extenders ab.

- Spannungsfenster 41 V und 52 V

Um den häufig beworbenen Vorteil der Wartungsfreiheit eines rein elektrischen Scooters zu wahren, sei eine weitere Anforderung formuliert.

- Wartungsfreiheit

4.2.4.2 Diskussion der Anforderungen und Randbedingungen

Wie in der Einleitung erwähnt, herrscht besonders in dieser Fahrzeugklasse eine hohe Kostensensibilität seitens der Käufer, aber auch der Hersteller. Eine erfolgreiche Umsetzung und die Nutzung der sich durch Hybridisierung ergebenden Vorteile gelingen nur, wenn der Entwurf diesem Kriterium untergeordnet ist. Die Kostenanforderung erweist sich somit als dominant und wirkt in der Folge stark limitierend auf das Ergebnis. So verbietet sich eine Neuentwicklung einzelner Komponenten ebenso wie umfangreiche Adaptierungen. Der Kostenanforderung wird dadurch entsprochen, dass die Komponenten des Range Extenders vorteilhaft aus bereits bestehenden und vorzüglich aus Massenproduktion stammenden Komponenten ausgewählt werden. Geringe Modifikationen seien im Interesse der Wirkungsgradsteigerung erlaubt. Optimierungsmaßnahmen werden im Rahmen dieser Arbeit identifiziert und quantifiziert. Sie dienen der Abschätzung des noch vorhandenen CO₂-Potentials, da sich im Zuge des Projektes keine Komponenten-Prototypen erstellen ließen.

Diese Einschränkung bewirkt, dass für den chemisch-elektrischen Energiewandler eine bestehende Verbrennungskraftmaschine mit nicht mehr als 50 cm³, entsprechend den gesetzlichen Anforderungen, auszuwählen ist. Ebenso ist die Wahl des mechanisch-elektrischen Energiewandlers auf verfügbare Maschinentypen, welche der Leistungsanforderung genügen, beschränkt. Bei der Entscheidungsfindung wird stets darauf geachtet, dass die zum Betrieb notwendige Steuerung den derart erlangten Kostenvorteil nicht

kompensiert. Es gilt den Steuerungsaufwand, das heißt die zur Steuerung notwendigen Einrichtungen, in Form von Sensoren und Aktuatoren ebenso gering zu halten wie den Applikationsaufwand. Es wird eine möglichst einfache und robuste Lösung angestrebt.

Die Anforderung nach Gewichts- und Bauraumneutralität beeinflusst die Auswahl der Hauptkomponenten dahingehend, dass kleinere Komponenten mitunter bevorzugt werden müssen, wenngleich damit Wirkungsgradeinbußen einhergehen. Bauraum bestimmend sind auch Maßnahmen zu Einhaltung der Geräuschanforderung, da diese zweckmäßig mittels Dämmung und Kapselung erreichbar scheint.

Die Anforderungen, der durch den Range Extender darzustellenden Funktionen

- Automatisch Start-Stopp Funktion
- Lade- bzw. Batteriezustandserkennung (Parameter X und Y)
- Leistungsanpassung
- Mindestlaufzeit

werden an dieser Stelle als Anforderungen an die Komponente -Steuerung übertragen und im entsprechenden Kapitel 4.4 Steuerung vertieft.

Die Start-Funktion bedingt jedoch einen startwilligen Verbrennungsmotor, sodass diese Eigenschaft als Anforderung an den auszuwählenden Verbrennungsmotor formuliert werden kann.

Die Anforderung, zwei konkrete Leistungsstufen bereit zu stellen, bedingt eine Lastregelung der Verbrennungskraftmaschine. Daraus ergibt sich wiederum die Aufgabe eine solche mit Rücksicht auf Systemkomplexität und Wirkungsgrad zu bestimmen und zu entwerfen.

Das durch Versuch ermittelte Spannungsfenster von 41 V bis 52 V betrifft in erster Linie die elektrische Komponente Generator, beeinflusst aber über dessen Eigenschaften auch die Betriebsstabilität des Verbrennungsmotors. Somit kann die Anforderung nach einem stabilen Betriebsverhalten im Spannungsfenster und Lastbereich allgemein an die Range Extender-Einheit gestellt werden.

4.2.4.3 Range Extender Entwurf

Der Range Extender umfasst als Hauptkomponenten eine Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine und einen, an diese mechanisch gekoppelten fremderregte SM¹⁶, als Generator. Der Generator ist wiederum elektrisch über einen ungesteuerten Gleichrichter, an das Batterie-Gleichstromsystem des Fahrzeugs gekoppelt. Die Wahl eines ungesteuerten Stromrichters dient der Vermeidung von Kosten und unterscheidet den Entwurf von einer klassischen Konfiguration, welche bedingt durch die Verwendung einer mit PMSM¹⁷ als Generator, einen nachgeschalteten Inverter zur Spannungsanpassung an das Bordnetz benötigt.

Die Systemauslegung sieht den Range Extender im Fall einer leeren Batterie als einzige Antriebsquelle bis zur Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs vor. Diese Auslegung entspricht im eigentlichen Sinn nicht mehr der Definition eines Range Extenders, dessen Leistung im Verhältnis zur Antriebsleistung des Fahrzeugs klein ist, sondern jener eines seriellen Hybrid. Demzufolge unterscheidet sich auch die Betriebsweise, welche wiederum besondere Anforderungen an die Steuerung stellt. Aus der Konzeption des Range Extenders als Add-on ergibt sich, dass diese Steuerung zusätzlich batteriebezogene Funktionen übernehmen muss, da mangels Kommunikation kein Einfluss auf das Fahrzeugsystem ausgeübt werden kann. Abbildung 46 stellt den Aufbau schematisch dar.

¹⁶ SM Synchronmaschine

¹⁷ PMSM Permanent Magnetische Synchron Maschine

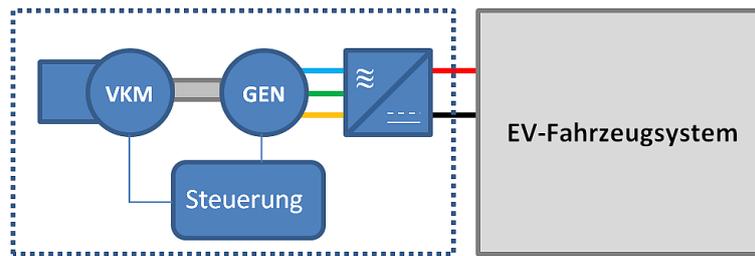


Abbildung 48 : Add-On Range Extender Entwurf mit geringst möglicher Schnittstelle zum EV-Fahrzeugsystem

Im Folgenden sind die Einzelkomponenten der REX-Einheit entsprechend der formulierten Anforderungen festzulegen. Die Reihenfolge der Festlegung erfolgt entsprechend nachfolgender Kausalitätsbetrachtung.

Kausalitätsbetrachtung für die Auslegungsreihenfolge

Alle Systeme, die aus Subsystemen oder mehreren Einzelkomponenten bestehen, weisen Abhängigkeiten unter diesen auf. Diese Abhängigkeiten gilt es beim Systementwurf von Beginn an zu beachten, da sich so der spätere Steuer- und Regelaufwand reduzieren, wenn nicht sogar vermeiden lässt. Zu diesem Zweck wird eine Kausalitätskette erstellt, welche auch die Range Extender Umgebung einschließt.

Am Anfang dieser Kette stehen die Systemkomponenten des rein elektrischen Fahrzeugs. Diese sind die Batterie, der Umrichter und der Elektromotor. Die Betrachtung geht von der Stelle der äußeren Lasteinbringung, also dem Antriebsrad, aus. Der Elektromotor stellt somit das erste Glied dieser Kette dar. Er kann als elektrisch-mechanischer Energiewandler im Falle des Antriebs und als mechanisch-elektrischer Energiewandler im Falle der Rekuperation aufgefasst und durch Wirkungsgradkennfelder charakterisiert werden. Das durch den Fahrzyklus aufgebrauchte mechanische Lastkollektiv wird durch den Antriebsmotor über den Umrichter in ein elektrisches Lastkollektiv übersetzt, welches in der Folge die Batterie beansprucht. Die Charakteristik der Batterie ist maßgeblich für den Spannungsverlauf im elektrischen System verantwortlich. Hierbei kommen Batteriekenngrößen wie Kapazität, Innenwiderstand und Ladungsniveau zum Tragen. Wird nun, wie beabsichtigt, ein Range Extender als elektrische Zusatzkomponente an dieses batterie-elektrische Fahrzeugsystem angeschlossen, ergibt sich für diesen eine erste Randbedingung in Form des zu bedienenden Spannungsbereichs. Die Spannungsdifferenz zwischen der Batterie und dem Range Extender ist die treibende Kraft für den Ausgangsstrom des Range Extenders. Damit ergibt sich die vom Range Extender abgegebene elektrische Leistung als Produkt aus Momentan-Strom und -Spannung.

Auf der Range Extender-Seite setzt sich die Kette mit dem Generator fort, da dieser über den Gleichrichter im elektrischen Kontakt mit dem Fahrzeugsystem steht. Der Generator kann wiederum als mechanisch-elektrischer Energiewandler betrachtet werden, welcher das elektrische Lastkollektiv entsprechend dem Generatorwirkungsgradkennfeld wieder in ein mechanisches Lastkollektiv übersetzt. Dieses mechanische Lastkollektiv muss von der Antriebsmaschine aufgebracht werden. In diesem Zusammenspiel fließt die Leistung, abgesehen vom Startprozess, nur in Richtung Fahrzeugsystem.

Entsprechend der beschriebenen Kausalitätskette werden die Komponenten der Reihe nach ausgewählt und ihre Eigenschaften experimentell charakterisiert. Auf die für die jeweils nächste Komponente relevanten Größen wird besonders eingegangen.

Die Ergebnisse der experimentellen Charakterisierung dienen im Weiteren der Modellbildung der Einzelkomponenten für eine Längsdynamik-Vorwärts-Simulation. Diese wird zur Abschätzung des Steueraufwandes sowie zur gefahrlosen Erprobung unterschiedlicher

Steuerungskonzepte in MatLab-Simulink begleitend aufgebaut. Eine genauere Beschreibung dieses Hilfsmittels erfolgt deshalb im Kapitel 4.3.4 Steuerung.

Die hier geschilderten Abhängigkeiten und Kausalitätsbetrachtungen sind ursächlich für die sequenzielle Anordnung auf Komponentenebene im Entwicklungsprozess. Dies kommt auch im Kapitel 2 Methodik gezeigten V-Diagramm zum Ausdruck und sei an dieser Stelle in Abbildung 49 nochmals dargestellt.

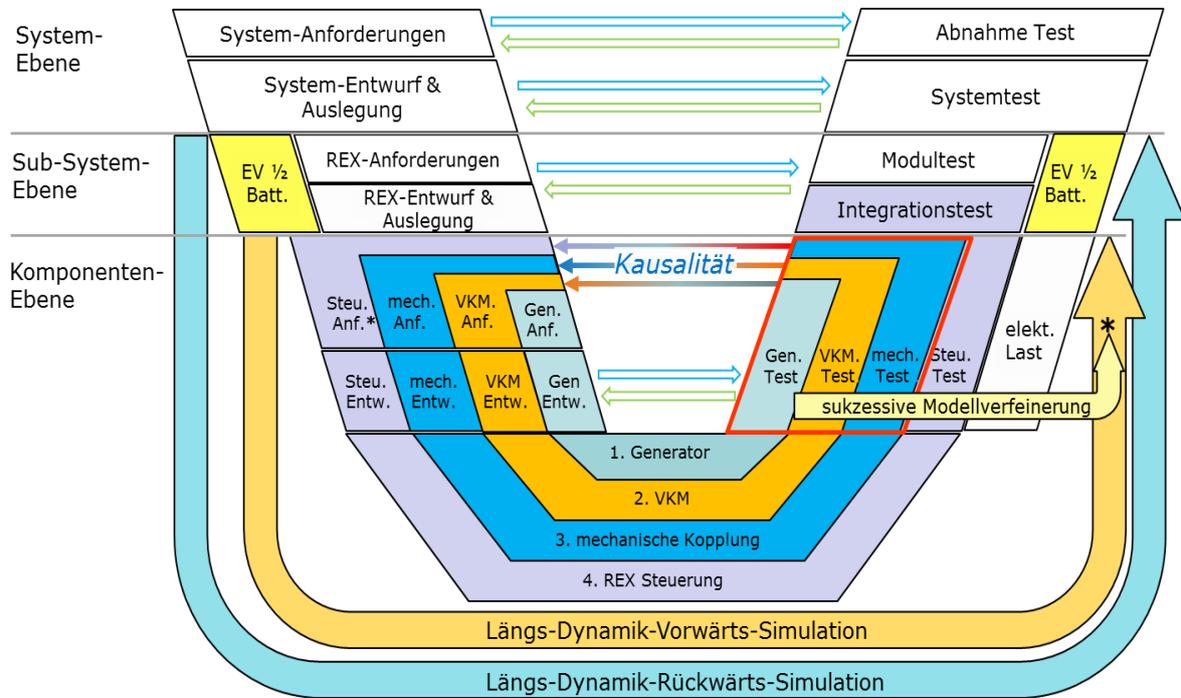


Abbildung 49 : Kausalitätsbedingte Anordnung der Komponentenebene im V-Modell

4.3 Komponentenebene

4.3.1 Generator

Der Generator bildet entsprechend der Kausalitätsbetrachtung die erste Ergänzung des rein elektrischen Fahrzeugsystems. Geht man in erster Näherung davon aus, dass die Generatorausgangsspannung konstant ist, ergibt sich die Strombelastung aus der Differenz zwischen der Ausgangsspannung und der Bordspannung. Der sich einstellende Stromfluss ins System verändert jedoch die Belastungssituation der Batterie, wodurch sich eine abweichende Batterie- bzw. Bordspannung einstellt. Dieser Effekt ist von der Batterie-, aber auch von der Generatorcharakteristik abhängig und bedarf zu dessen Erfassung der Modellbildung und Simulation. Die Abhängigkeiten haben entscheidenden Einfluss auf die folgende Komponente, den Verbrennungsmotor, da der Generator, wie im Kapitel 3.2 Grundlagen beschrieben, ein stromproportionales Antriebsmoment fordert. Die akribische Beschreibung seiner Charakteristik ist folglich Grundlage für die Ableitung der technischen Anforderungen an die folgende Komponente, den Verbrennungsmotor.

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an den mechanisch elektrischen Energiewandler formuliert, anhand welcher ein verfügbarer Generator ausgewählt wird. Dieser Generator wird im Zuge des Komponententests vermessen und für die Modellbildung charakterisiert.

4.3.1.1 Anforderungen an den Generator

Die Anforderungen an den mechanisch-elektrischen Energiewandler lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die allgemeinen Anforderungen leiten sich aus den Systemanforderungen ab, wohingegen sich technische Anforderungen aus der Systemauslegung ergeben.

Allgemeine Anforderungen

Kosten

Um den Kostenanforderungen zu entsprechen, wird auf eine maßgeschneiderte Konstruktion, wie sie bei automotiven Lösungen üblich ist, verzichtet. Stattdessen wird die Auswahl auf verfügbare Generatortypen, wie sie bereits in der L-Fahrzeugkategorie vorkommen, beschränkt. Die verfügbaren Typen gilt es zu erheben und hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten.

Bauraum

Der Bauraum für den Range Extender ist auf den Bauraum der zu ersetzenden Batterie beschränkt. Diese Beschränkung wirkt sich auf die Einzelkomponenten des Range Extenders und somit auch auf den Generator aus. Das bedeutet, dass ein möglichst kleiner Generator bevorzugt werden muss, wenngleich damit Wirkungsgradeinbußen einhergehen.

Verfügbarkeit

Die Anforderung nach Verfügbarkeit beschreibt den Umstand, dass der gewählte Generator durch verschiedene Zulieferfirmen beigestellt werden kann. Eine Abhängigkeit von einem Hersteller wirkt kostentreibend.

Technische Anforderungen

Wirkungsgrad

Der Generator stellt als mechanisch-elektrischer Energiewandler eine der Hauptkomponenten des Range Extenders dar. Sein Wirkungsgrad wirkt sich direkt auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems aus. Dennoch bedingen die allgemeinen Anforderungen - Kosten, Gewicht und Bauraum-, dass der Wirkungsgrad nicht das primäre Auswahlkriterium sein kann. Es ist demzufolge der beste Wirkungsgrad pro Kosten- und Baueinheit zu bestimmen. Dabei sind die Initial- und Folgeaufwände der Generatorauswahl mit zu berücksichtigen. Ausschließlich im Sinne einer Wirkungsgradoptimierung seien geringfügige Modifikationen in Form von Spezifikationsänderungen erlaubt. Diese Maßnahmen gilt es zu identifizieren und das Optimierungspotential zu quantifizieren.

Leistung

Die Leistungsanforderung ergibt sich aus der Systemauslegung. Hierbei wurde eine elektrische Ausgangsleistung des Generators von 0,8 – 1,6 kW im Spannungsbereich von 42 V – 54 V definiert.

Spannungsbereich

Der Spannungsbereich von 42 V – 54 V ist zum Zeitpunkt des Entwurfs noch kein verbreiteter automotiver Standard. Daher wird die Suche nach einer passenden Komponente aus Serienfertigung erschwert. Zusatzkomponenten, z.B. in Form eines DC-DC Spannungswandlers, sind in Anbetracht der damit verbundenen Kosten zu vermeiden.

Starterfunktion

Der Generator soll auch als Starter für den Verbrennungsmotor dienen. Da jede elektrische Maschine bei entsprechender Steuerung sowohl als Generator als auch als Motor genutzt werden kann, ist diese Anforderung erfüllbar. Welchen Aufwand es bedeutet, den motorischen Betrieb darzustellen, wird im Zuge der Definition der Komponente Steuerung behandelt.

4.3.1.2 Auswahl

Die Auswahl ist, entsprechend des Ansatzes zur Erfüllung der Kostenanforderung, auf jene Energiewandler beschränkt, welche bereits in dieser Fahrzeugkategorie vorkommen und verfügbar sind.

Diese sind:

- Gleichstrom Starter-Generator
- Ferro-permanentmagnetisch erregte 1-, 2- und 3-phasige Generatoren
- Fremderregte Synchron Generator – Lichtmaschine

Gleichstrom Starter-Generator

Beim Gleichstrom-Starter Generator werden geteilte Kollektoren und Bürsten zur Kommutierung, dem Gleichrichten des erzeugten Wechselstroms bzw. Wechselrichten des zugeführten Gleichstroms, eingesetzt. Hierbei entsteht unter Belastung Bürstenfeuer, dessen Auswirkungen hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) problematisch ist. Obwohl diese Variante die einfachste Art darstellt den Generator als Starter zu verwenden, scheidet sie bedingt durch höheren Bauraumbedarf und höheres Gewicht bedauerlicherweise aus.

Ferro-permanentmagnetisch erregte 1-, 2- und 3-phasige Synchrongeneratoren

Die häufigste Generatorart stellt die permanenterregte Synchronmaschine dar. Sie kommt je nach Leistungsklasse in unterschiedlicher Bauform vor. Die einphasige Ausführung findet sich

ausschließlich bei batterielosen Fahrzeugen und dient lediglich der Erzeugung des für die Beleuchtung nötigen Stroms. Zweiphasige Varianten verwenden eine Phase für die Beleuchtung und die andere Phase zum Laden der Batterie. Der Ladezweig ist zum Schutz der Batterie mit einem spannungsbegrenzenden Regler ausgestattet. Dreiphasige Generatoren nutzen alle Phasenströme. Diese werden mittels Brückengleichrichter zum Laden der Batterie und zur Versorgung etwaiger Verbraucher gleichgerichtet. Die Spannungsbegrenzung erfolgt durch Ausblendung bzw. Kurzschluss einzelner Phasen. Abbildung 50 zeigt verschiedene Bauformen ein- bis dreiphasiger Statorn für die Außenläufer-Variante dieses Generatortyps.

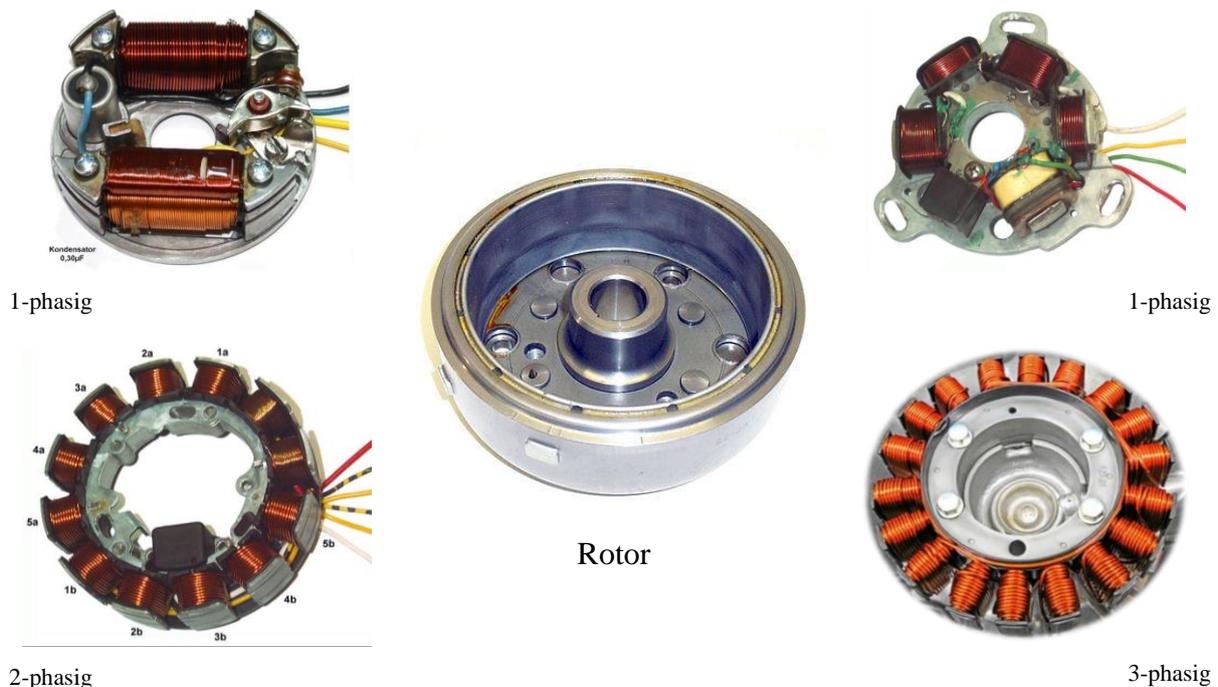


Abbildung 50 : 1-, 2- und 3-phasige Generator-Statorn für Außenläufer-Rotor

Die 1- und 2-phasigen Varianten scheiden wegen ihrer Leistungsbeschränkung auf < 100 W aus. Dreiphasige Varianten kommen in der Klasse L3e im Leistungsbereich zwischen 100 W-350 W vor. Ihr Wirkungsgrad ist allgemein mäßig. Das liegt zum einen an dem verwendeten, preisgünstigeren ferromagnetischen Material für die magnetische Erregung und zum anderen an den größeren Luftspalten zwischen Stator und Läufer. Der größere Spalt ist bei kurbelwellenfester Montage des Läufers notwendig, da die Kurbelwelle nicht unbeachtlichen Biegeschwingungen ausgesetzt ist.

Generatorleistungen in der Größenordnung von 500 W sind nur bei üppig ausgestatteten Tourenmotorrädern zu finden. In dieser Leistungsklasse kommen vorwiegend fremderregte Synchrongeneratoren zum Einsatz. Der Grund hierfür ist, dass die Spannungsregelung verlustleistungsbedingt nicht mehr mittels Kurzschlusses einzelner Phasen erfolgen kann. Stattdessen wird der Zusammenhang zwischen magnetischer Erregung und induzierter Spannung genutzt. Die Fremderregung erfordert jedoch eine andere Bauart. Der Stator liegt, mit radial nach innen gerichteten Startorpolen, außen und der elektromagnetische Rotor dreht sich im Inneren. Diese Bauart wird Innenläufer genannt. Sie ist in der Herstellung aufwendiger, lässt jedoch alternativ zur Permanentenerregung, eine Fremderregung zu, wie aus Abbildung 51 anhand der dargestellten Rotoren hervorgeht. Der Erregerstrom wird dem Rotor mittels Bürsten und ungeteilter Schleifringe zugeführt. Die Bürsten sind Verschleißteile. Es zeigt sich bei ihrem Einsatz im PKW-Sektor, dass die Wartungsintervalle ausreichend lang sind, um im vorliegenden Anwendungsfall und über die Einsatzdauer als wartungsfrei zu gelten.

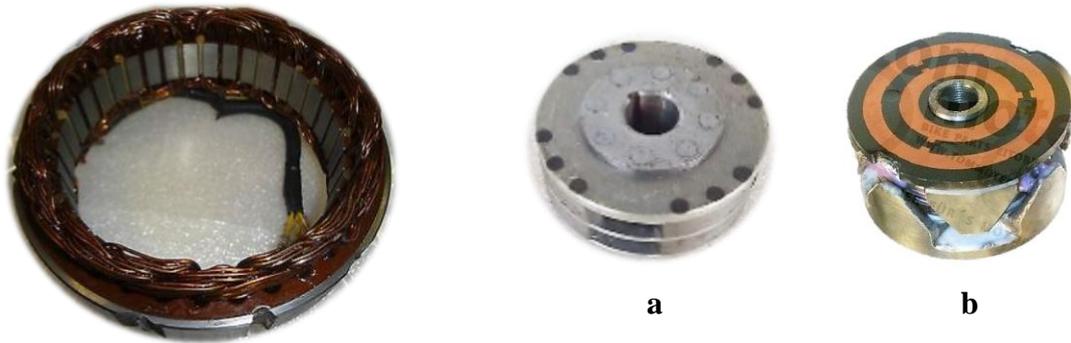


Abbildung 51 : Stator eines Innenläufers neben a) permanentmagnetischem und b) elektromagnetischem Läufer

Fremderregte Synchron Generator (FSG)– Lichtmaschine

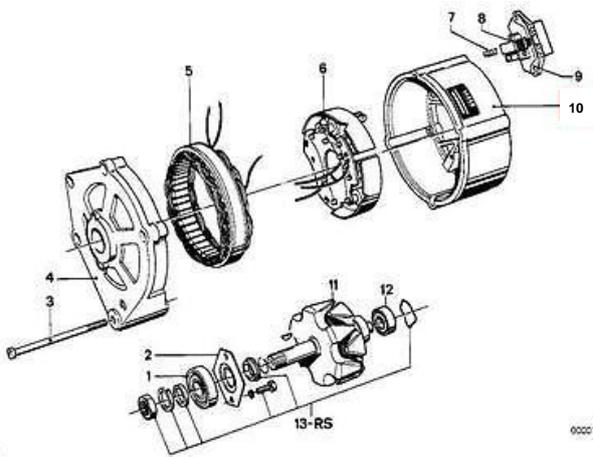


Abbildung 52 : Klauenpol Lichtmaschine
[BOSCH]

Dieser Generatortyp, dessen Aufbau Abbildung 52 zeigt, stellt im PKW Bereich den Standard dar und ist gemeinhin als Lichtmaschine bekannt. In dieser Eigenschaft ist der Generator als Massenprodukt in unterschiedlichen Leistungsklassen leicht und kostengünstig erhältlich. Nachteilig ist, dass dies nur für die gängigen Bordspannungen 12 und 24 Volt gilt. Dennoch kann eine Standard 12 V-Version in einem 48 V System verwendet werden. Die 12 V - Spezifikation einer Lichtmaschine bedeutet, dass diese in einem 12 V System bei Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors bereits Ladestrom abgegeben kann. Aus dem direkten

Zusammenhang zwischen Drehzahl und Spannung (konstante Erregung vorausgesetzt) ergibt sich, dass zum Einsatz in einem 48 V System lediglich die Drehzahl um den Faktor 4 erhöht werden muss. Die spezifizierte Leistungsangabe bzw. Leistungsbegrenzung beruht auf der abführbaren Verlustleistung in Form von Wärme. Die Erwärmung wird hauptsächlich durch Kupferverluste und infolge Strombelastung verursacht. Das heißt, dass bei identischer Verlustleistung derselbe Strom bei 48 V wie bei 12 V entnommen werden kann. Demzufolge wird aus einer 500 W Leistungsangabe bei 12 V eine 2 kW Leistungsbegrenzung bei 48 V. Dies entspricht zu Genüge der Leistungsanforderung von 1,6 kW elektrischer Leistung. Gleichzeitig wird der Wirkungsgradanforderung dadurch entsprochen, dass sich bei gleichbleibender Verlustleistung eine höhere Nutzleistung ergibt. Diese Betrachtung gilt es im Zuge des Komponententests zu bestätigen.

Dennoch ist der Wirkungsgrad dieser Maschine gegenüber der permanenterregten Synchronmaschine, wie sie bei PKW Range Extendern eingesetzt wird, um die Erregerleistung gemindert. Die Fremderregung bietet jedoch den Vorteil eines zusätzlichen Freiheitsgrades, welcher im Zuge der experimentellen Untersuchungen für die Darstellung unterschiedlicher permanenterregter Synchronmaschinen ohne anfallende Prototypen- oder Variantenkosten genutzt werden kann. Tabelle 8 enthält die Spezifikation des ausgewählten Generators.

Tabelle 8: Generator Spezifikation

Hersteller	Nippon Denso
Bauart	Fremderregter Dreiphasen Wechselstromgenerator
Höchstleistung	530 W bei 13,3 V
Höchststrom	42 A bei 5600 1/min
Nennstrom	13,5 A bei 1400 1/min
Maximaldrehzahl	18000 1/min

Anhand des angegebenen Höchststroms von 42A lässt sich eine maximale Leistung bei 48 V von 2016 W errechnen, obwohl diese als Höchstleistung mit 530 W bei 13,3 V angegeben ist. Die Spannung von 13,3 V wird unter Nennstrom-Last bei einer Drehzahl von 1400 1/min erreicht. Mit dem angesetzten Drehzahlfaktor von 4 ergibt sich somit eine Drehzahl von 5600 Umdrehungen pro Minute. Die Auslegungsdrehzahl liegt deutlich unter der spezifizierten Maximaldrehzahl von 18000, sodass dieser Ansatz darstellbar ist.

Diese grobe Vorauslegung gilt es im Zuge des Komponententests experimentell zu bestätigen. Weiters ist der Wirkungsgrad des Generators zu ermitteln, da dieser in seinem Bestpunkt zu betreiben ist, um der Wirkungsgradanforderung bestmöglich Genüge zu tun. Das Wirkungsgradkennfeld des Generators wird auch zur Ergänzung der Systemmodellierung im Rahmen der Längsdynamik-Vorwärts-Simulation benötigt.

4.3.1.3 Komponententest

Der Komponententest dient eigentlich dem Nachweis der Eignung des ausgewählten Generators, wird jedoch erweitert, um den Generator zu charakterisieren. Die notwendigen Versuche erfolgen auf einem Motorprüfstand. Hierbei werden die mechanischen Größen – Drehzahl und Drehmoment - und die elektrischen Größen -Spannung und Strom -durch den Prüfstand erfasst. Der Erregerstrom wird durch ein einstellbares Netzteil bereitgestellt. Die vom Generator abgegebene elektrische Leistung wird mit Hilfe einer einstellbaren elektrischen Last abgenommen. Abbildung 53 zeigt den Versuchsaufbau und die elektrischen Zusatzeinrichtungen Netzteil und elektrische Last.

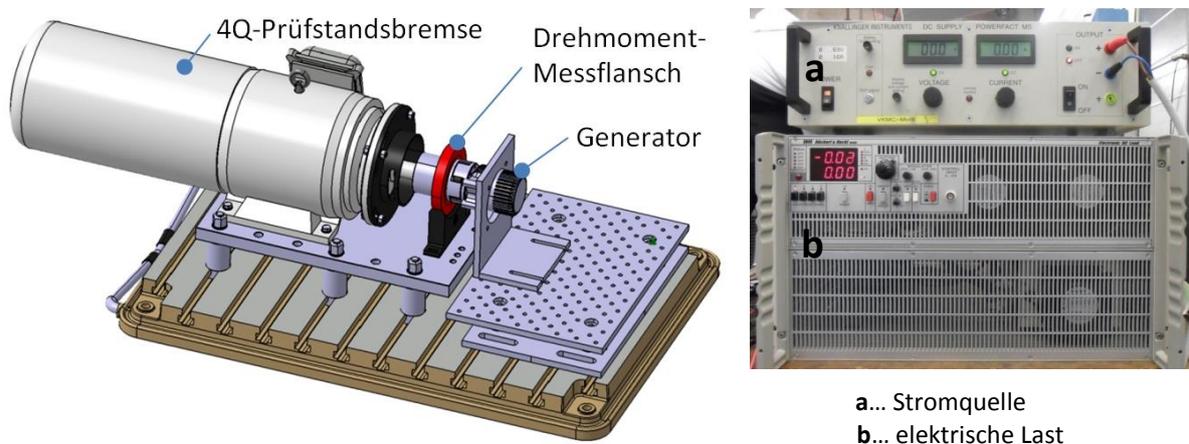


Abbildung 53 : Versuchsaufbau am Prüfstand und elektrische Zusatzeinrichtungen

In dieser Versuchsanordnung werden auch die für die Modellbildung notwendigen Aufgaben zur Charakterisierung des Generators realisiert. Diese wurde im Rahmen einer Studie [77] durchgeführt, wobei einfache Versuchsaufbauten die relevanten Modellparameter liefern.

Ein charakteristischer Wert, welcher eine elektrische Maschine beschreibt, ist das Drehzahl-Spannungsverhältnis. Bei permanenterrregten Maschinen ist dieser Wert durch Auslegung fixiert. Bei fremderregten Maschinen kann er durch die variable Erregung beeinflusst werden. Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse für das Drehzahl-/Spannungsverhältnis bei unterschiedlichen Erregerströmen sowie den schematischen Versuchsaufbau. Die Messung der Spannung erfolgt an den offenen Generator клемmen bei veränderlicher Drehzahl, wobei für jeden Durchlauf der Erregerstrom mittels Netzteil variiert wird.

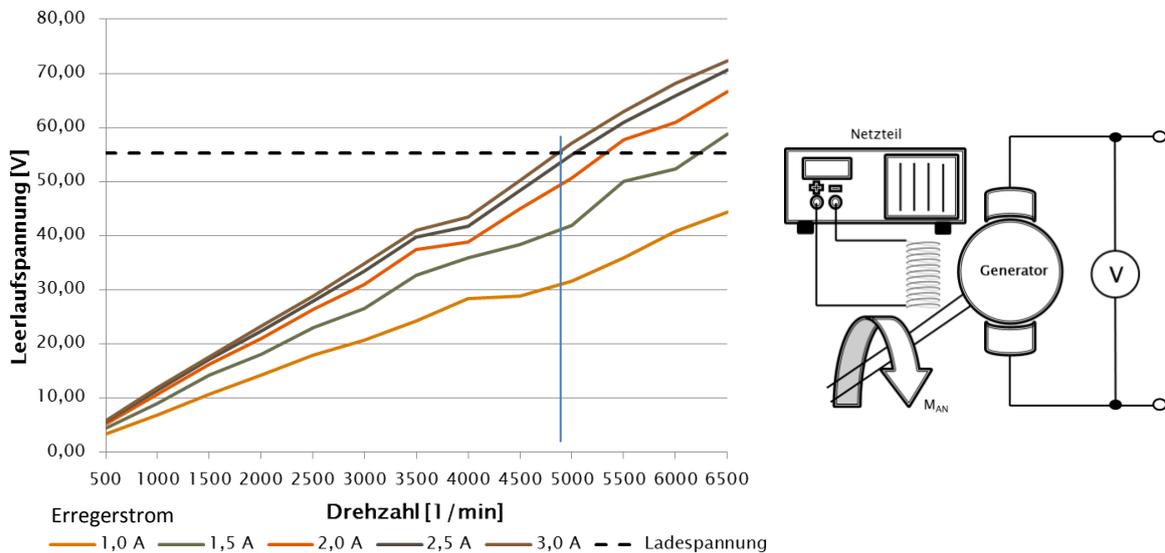


Abbildung 54 : Spannungskennlinien im Leeraufbetrieb und Versuchsaufbau

Es zeigt sich, dass Variationen der Erregung bei einer Drehzahl unterschiedliche Spannungen darstellen können. Durch das variable Drehzahl-Spannungsverhältnis kann der relevante Spannungsbereich von 42 V-55 V bei einer Drehzahl von 5000 1/min mit Hilfe von Erregerströmen zwischen 1,5 A und 2,5 A abgedeckt werden. Ebenso ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Erregerstroms über 3A kaum noch Wirkung zeigt. In dieser Betrachtung wird zwar die Batteriespannung erreicht, jedoch bewirkt dies noch keinen Stromfluss. Erst eine positive Spannungsdifferenz hat einen Stromfluss zur Folge. Dieser verursacht jedoch zusätzliche Spannungsverluste. Deswegen ist der Versuch unter Last zu wiederholen.

Der Versuch unter Last wird mit einem Ohm'schen Widerstand zwischen den Generator клемmen ausgeführt, wobei sich die Leistung aus dem Widerstandswert von 2 Ohm und der gemessenen Klemmenspannung entsprechend $P=U^2/R$ ergibt. Der Versuchsaufbau und die Klemmenspannung über der Drehzahl für unterschiedliche Erregungen sind in Abbildung 55 dargestellt.

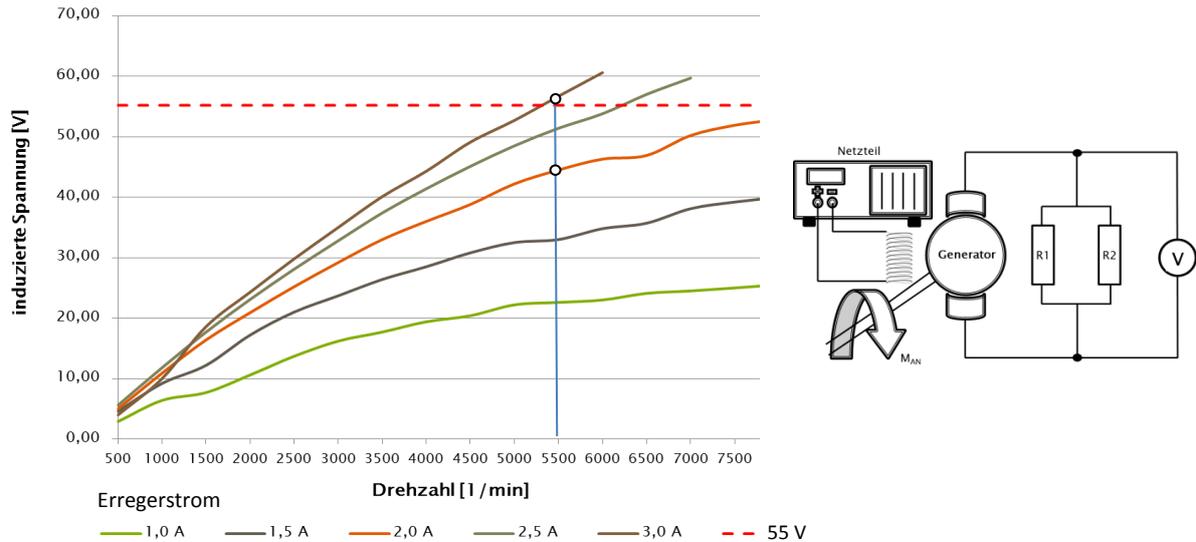


Abbildung 55 : Spannungskennlinien im Lastfall 1,6 kW und Versuchsaufbau

Es zeigt sich, dass der laststrombedingte Spannungsabfall an der Generatorwicklung Auswirkungen auf das Drehzahl-Spannungsverhältnis hat. Die Abdeckung des Spannungsfensters von 42 V-55 V erfordert nun eine Drehzahl von mindestens 5500 1/min bei Erregerströmen zwischen 2 A und 3 A. Der Erregerstrom hat überdies Einfluss auf den Wirkungsgrad des Generators. Für die Betriebsdrehzahl von 5500 1/min ergibt sich bei höherem Erregerstrom auch ein höherer Wirkungsgrad in der Größenordnung von 78%, wie aus Abbildung 56 für den Fall mit 3 A Erregung hervorgeht. Dies bestätigt annähernd die zur Vorauslegung getroffene Annahme für den Generatorwirkungsgrad von 80%. Der Wirkungsgrad errechnet sich hierbei aus der mechanischen Antriebsleistung als Aufwand und der elektrischen Leistung als Nutzen.

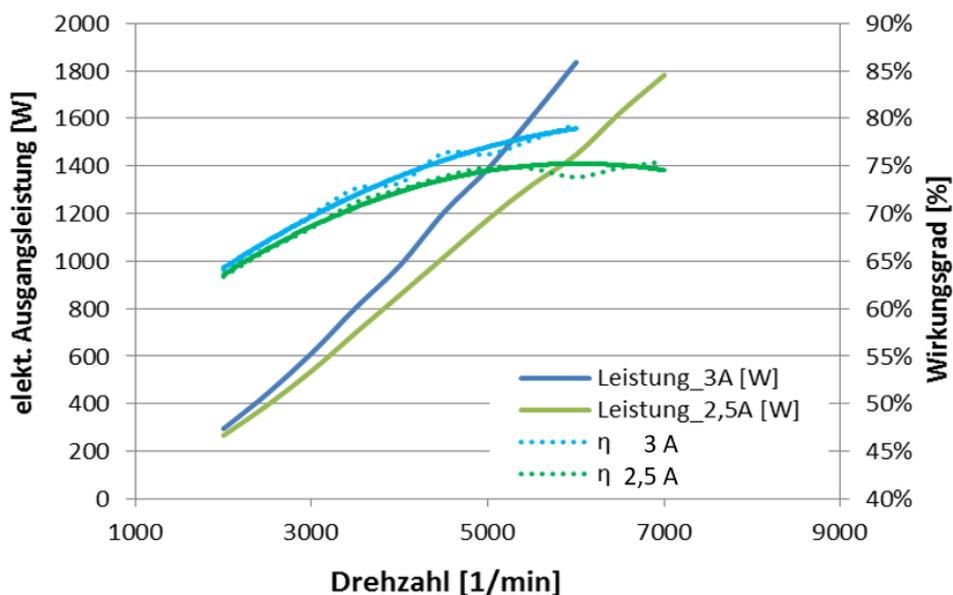


Abbildung 56 : Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Erregerstroms

Aus den Verläufen der Wirkungsgrade und der unterschiedlichen Lage der Maxima lässt sich ableiten, dass neben der Erregung weitere Größen wirkungsgradbestimmend sind. Dies ist die Last, welche in der einfachen Versuchsanordnung mit zunehmender Drehzahl und Erregung

steigt. Der gezeigte Wirkungsgradverlauf hat somit nur für den betrachteten Fall Gültigkeit. Ein Wirkungsgradkennfeld würde sich folglich über der Drehzahl, der Last und der Erregung aufspannen und kann nicht mehr sinnvoll auf experimentellem Wege erhoben werden. Die komplexen Zusammenhänge können nur mittels Modellbildung und Simulation erarbeitet werden. Dazu bedarf es der Charakterisierung des Generators.

4.3.1.4 Charakterisierung und Modellbildung

Die Charakterisierung des Generators erfolgt anhand seiner Verluste. Es wird zwischen den in Abbildung 57 dargestellten Verlusten unterschieden.

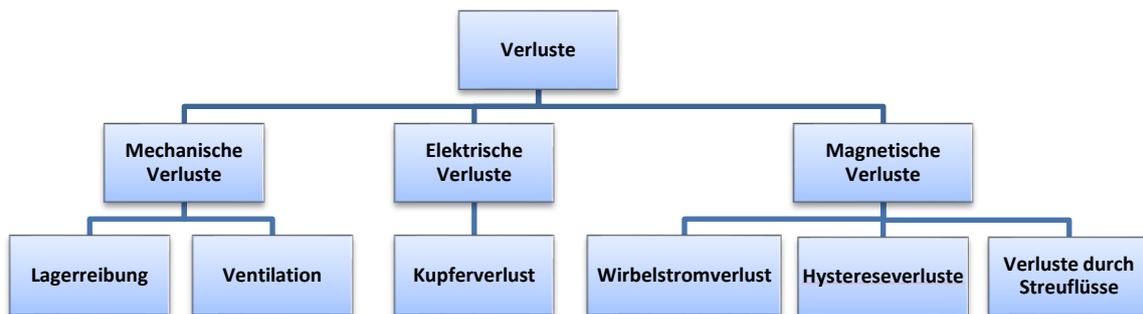


Abbildung 57 : Verlustarten der elektrischen Maschine

Alle stromabhängigen elektrischen Verluste werden den Kupferverlusten zugeordnet. Magnetische Verluste beinhalten jene Verluste, die durch Wirbelströme, Hysterese und Streuflüsse entstehen. Diese sind abhängig von Drehzahl und Stärke der elektromagnetischen Erregung. Ventilationsverluste manifestieren sich neben Reibungsverlusten bei der unerregten und unbelasteten Maschine und werden unter den mechanischen Verlusten zusammengefasst. Sie können dennoch voneinander unterschieden werden, da angenommen werden kann, dass Reibungsverluste drehzahlunabhängig sind, wohingegen Ventilationsverluste mit dem Quadrat der Drehzahl steigen.

Die Verluste lassen sich also anhand einfacher Versuchsaufbauten einzeln bestimmen.

Bestimmung der mechanischen Verluste

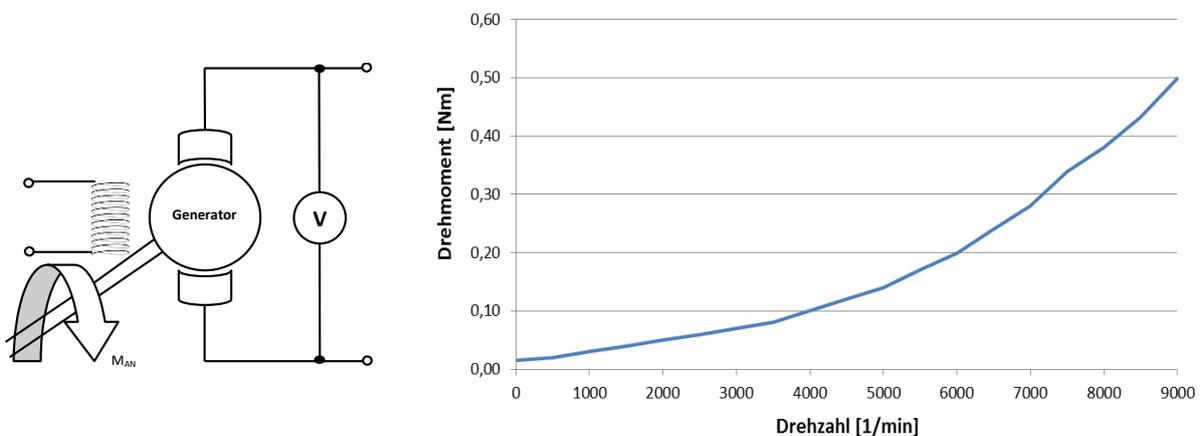


Abbildung 58 : Versuchsaufbau und Ergebnis - Mechanische Verlustmoment des Generators mit offenen Klemmen

Der Versuch wird ohne Erregung und ohne elektrische Last entsprechend der Versuchsanordnung in Abbildung 58 durchgeführt. Demzufolge treten weder magnetische noch elektrische Verluste auf. Das Diagramm zeigt den Drehmomentbedarf über der Drehzahl. Der exponentielle Anstieg mit der Drehzahl ist eindeutig den Ventilationsverlusten zuzuordnen.

Bestimmung der magnetischen Verluste

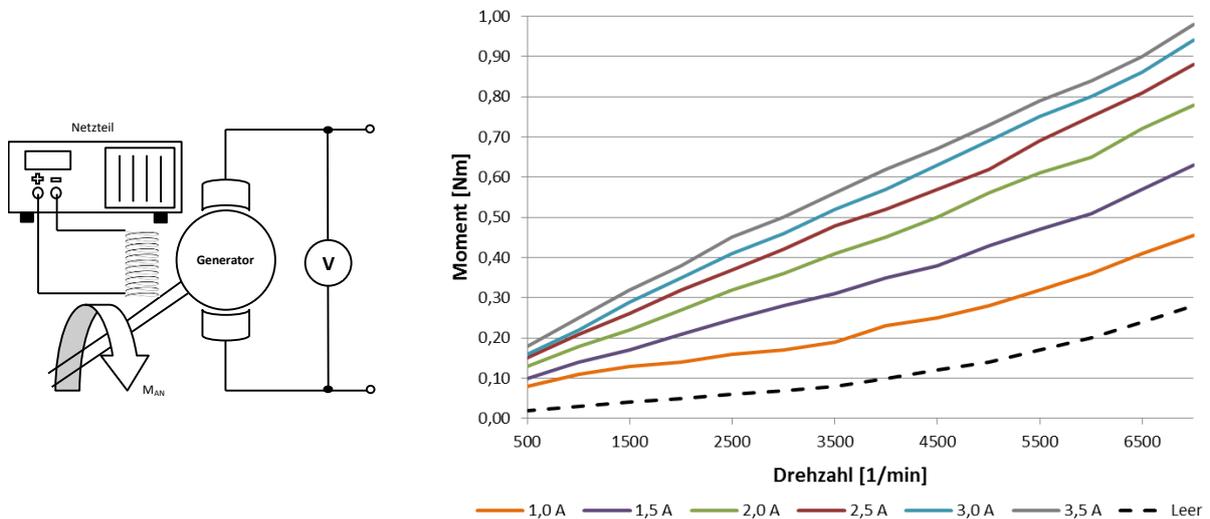


Abbildung 59 : Versuchsaufbau und Ergebnis - Mechanische und magnetische Verlustmomente für unterschiedliche Erregerströme

Der Versuch zur Ermittlung der magnetischen Verluste wird mit variabler Erregung aber ohne elektrische Last entsprechend der Versuchsanordnung in Abbildung 59 durchgeführt. Dabei ergeben sich die jeweiligen Eisenverluste aus dem Drehmomentbedarf abzüglich des im ersten Versuch ermittelten mechanischen Verlustes, welche durch die strichlierte Linie - Leer im Diagramm dargestellt ist. Erwartungsgemäß steigen die magnetischen Verluste mit zunehmender Erregung. Der geringer werdende Drehmomentbedarf ab 2,5 A Erregerstrom deutet auf zunehmende Sättigung des Eisens hin. Damit ist auch die Erregerstromgrenze erfasst ab welcher mit keiner Wirkungsgradverbesserung mehr zu rechnen ist.

Bestimmung der elektrischen Verluste

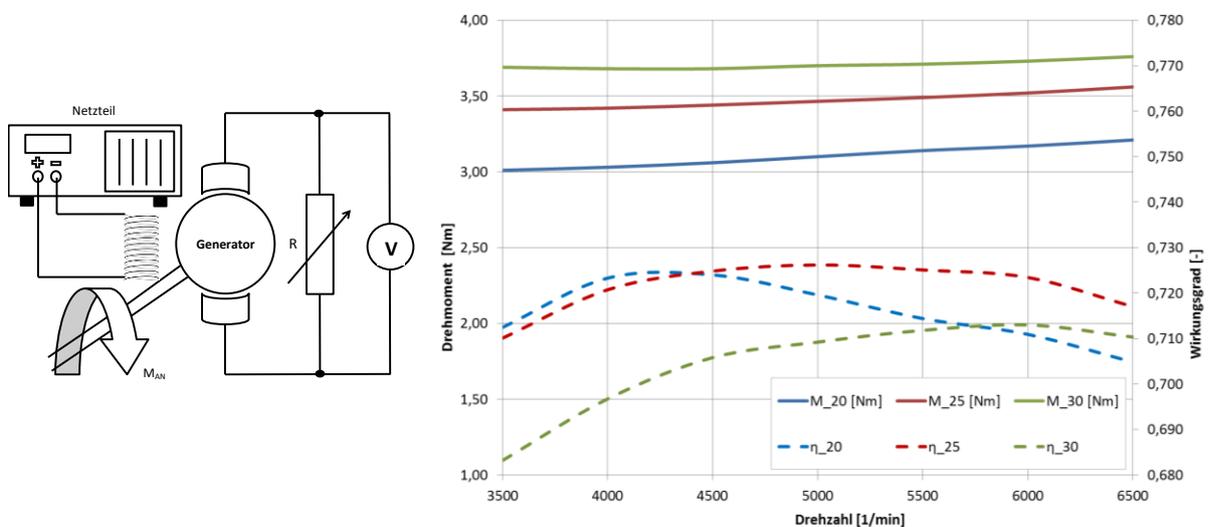


Abbildung 60 : Versuchsaufbau und Ergebnis – Mechanische, magnetische und elektrische bei 20, 25, 30 A Laststrom

Der Versuch zur Erfassung der elektrischen bzw. der Kupferverluste benötigt zusätzlich eine gesteuerte Stromsenke, wie sie in Abbildung 60 durch den einstellbaren Widerstand R dargestellt ist. Das Diagramm zeigt die Antriebsmomente für die Lastströme 20, 25 und 30 A sowie die Wirkungsgradverläufe über der Drehzahl bei einer konstanten Erregung von 3 A. In dieser Versuchsanordnung zeigt sich ein Gesamtwirkungsgrad von ca. 70%. Die gezeigten Ergebnisse beinhalten jedoch auch die mechanischen und magnetischen Verluste. Diese sind aus den vorangegangenen Versuchen bekannt und in Abzug zu bringen. Auffällig ist, dass die Wirkungsgradmaxima bei unterschiedlichen Drehzahlen zu liegen kommen. Als Erklärung hierfür können nur die variablen Größen bei diesem Versuch, Klemmenspannung und Drehzahl, genannt werden. Es besteht folglich eine Abhängigkeit des Wirkungsgrades von Spannung und Drehzahl, welche es durch den Modellansatz abzubilden und zu bestätigen gilt.

Bestimmung generatorspezifischer Größen

Die kennzeichnenden Größen eines Generators mit permanenter oder, wie in diesem Fall, mit konstanter Erregung, sind das Drehzahl-Spannungsverhältnis und das Drehmoment-Strom-Verhältnis. Dies ergibt sich aus der Lenz'schen Regel und der Definition der Lorenzkraft. Demnach ist die Kraft auf einen Leiter in einem homogenen Magnetfeld proportional zum Stromfluss im Leiter, wohingegen die Spannung proportional zur Geschwindigkeit des Leiters im homogenen Magnetfeld ist. Das bedeutet, dass der Laststrom das Antriebs-Drehmoment vorgibt, und die Spannung durch die Antriebs-Drehzahl bestimmt ist. Demnach existieren, konstante Erregung vorausgesetzt, Proportionalitätsfaktoren, welche den Energiewandler beschreiben. Diese werden experimentell bestimmt.

Der Versuchsaufbau entspricht jenem zur Bestimmung der elektrischen Verluste aus Abbildung 60. Es werden die Größen Klemmenspannung, Drehmoment und Strom über der Drehzahl erfasst. Die Ergebnisse der Untersuchung mit konstant 3 A Erregung und Lastströmen von 20, 25 und 30 A sind Abbildung 61 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass die Kennwerte stark von der Last und in geringerem Maß von der Drehzahl beeinflusst werden.

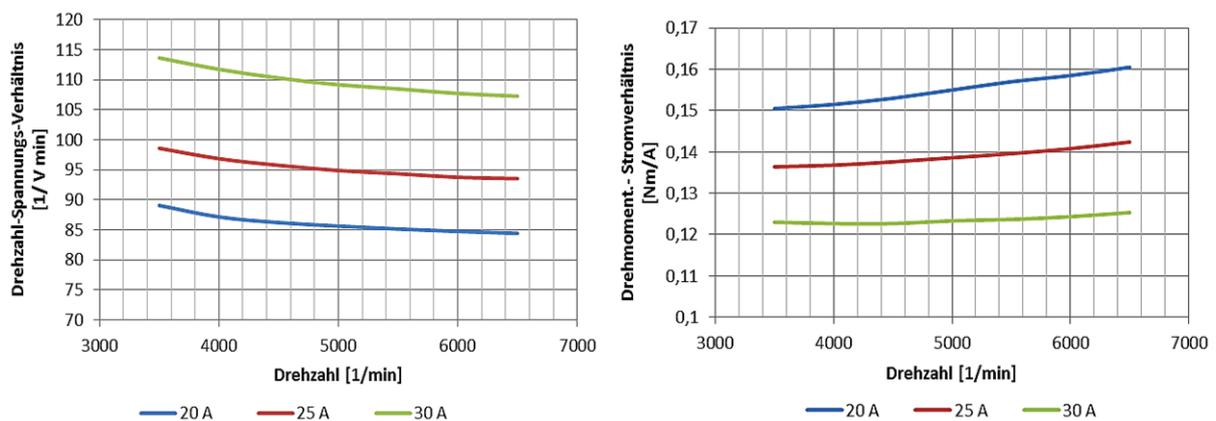


Abbildung 61 : Generator-Kennwerteverlauf für unterschiedliche Lastströme bei konstanten Erregerstrom 3 A

All die hier gezeigten Charakteristika und Abhängigkeiten ließen sich physikalisch beschreiben, würden aber der Erhebung der dafür relevanten physikalischen Größen – Induktivität, Permeabilität, etc.- bedürfen. Auf die Erhebung dieser wird verzichtet und stattdessen ein phänomenologischer Ansatz zur Modellbildung gewählt.

Modellbildung

Das Modell des Generators wird in MatLab Simulink [78] erstellt, um es in die Längsdynamik-Simulation übernehmen zu können. Abbildung 62 zeigt das MatLab-Modell des Generators.

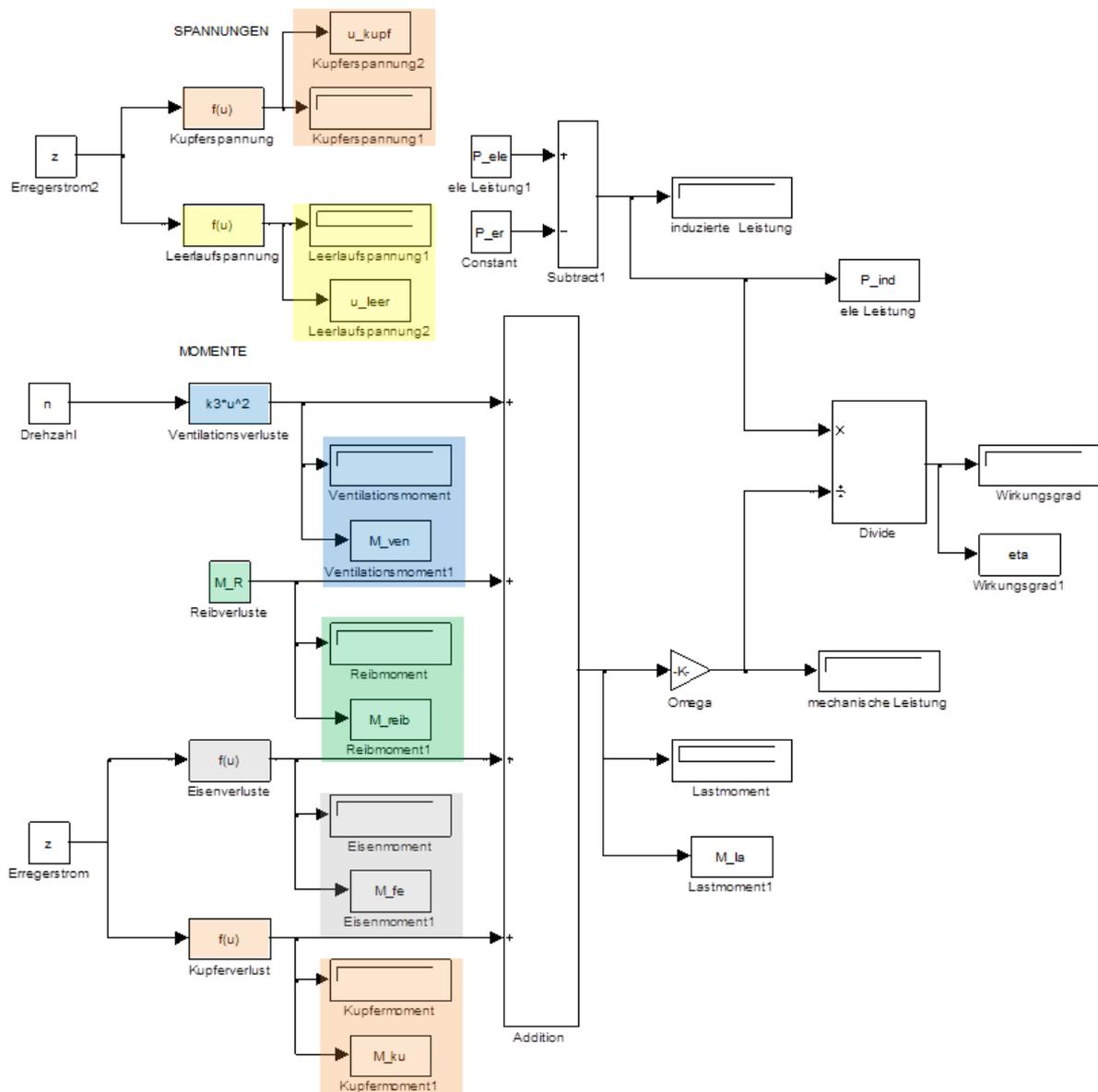


Abbildung 62 : MatLab-Modell des fremderregten Generators - Erstellt anhand der erhobenen Einzelverluste

Der phänomenologische Ansatz bedeutet, dass der Generator entsprechend seines Verhaltens gegenüber den veränderlichen Größen Drehzahl, Last, Erregung und Klemmenspannung beschrieben wird. Dazu wird der jeweilige Drehmomentbedarf der einzelnen Verlustgrößen separat durch Gleichungen bzw. Gleichungsparameter beschrieben. Die Einzel-Drehmomente werden entsprechend Drehzahl und Erregung zu einer mechanischen Leistungsanforderung mittels Addition zusammengefasst und der elektrischen Leistung zur Berechnung des Wirkungsgrades gegenübergestellt.

Anhand dieses Modells können nun die Einflüsse und die Anteile der Einzelverluste mit Hilfe von Parametervariation in der beschreibenden Gleichung erforscht werden. Somit lässt sich das Modell zur Identifizierung und Quantifizierung des Optimierungspotentials nutzen.

4.3.1.5 Optimierungspotential

Die Suche nach möglichen Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung wird auf jene beschränkt, welche, entsprechend der formulierten Anforderung, durch vertretbare Modifikationen realisierbar sind. Dies ist zum Beispiel eine Neu-Spezifikation der Wicklungsdaten des Generators. Hierbei kann die Wicklungsanzahl und der Leiterquerschnitt jeweils in den Grenzen des vorhandenen Wicklungsraums verändert werden. Als Optimierungspunkt wird der hohe Leistungsmodus bei einer mittleren Spannung im Spannungsbereich von 42 V-55 V gewählt. Abbildung 63 stellt die notwendige mechanische Leistung zur Generierung einer elektrischen Leistung von 1,5 kW bei 48 V über der Generator Drehzahl dar.

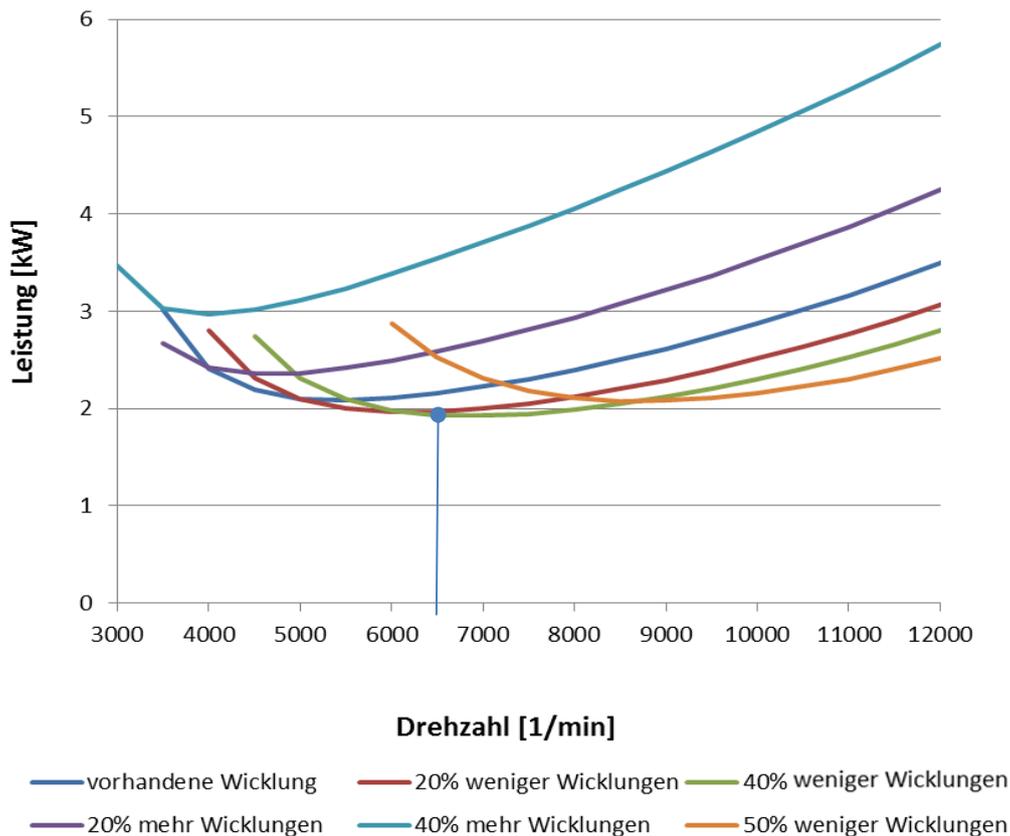


Abbildung 63 : Einfluss der Wicklung auf den mechanischen Leistungsbedarf bei 1,5kW elektrischer Leistung

Es ist zu erkennen, dass sich ein Optimum für diesen Lastfall bei einer 40%igen Reduktion der Wicklungsanzahl und der dadurch zulässigen Erhöhung des Leiterquerschnitts bei einer Drehzahl von 6500 1/min finden lässt. Ein Vergleich der Wirkungsgradkennfelder des vorhandenen und des virtuell optimierten Generators zeigt Abbildung 64.

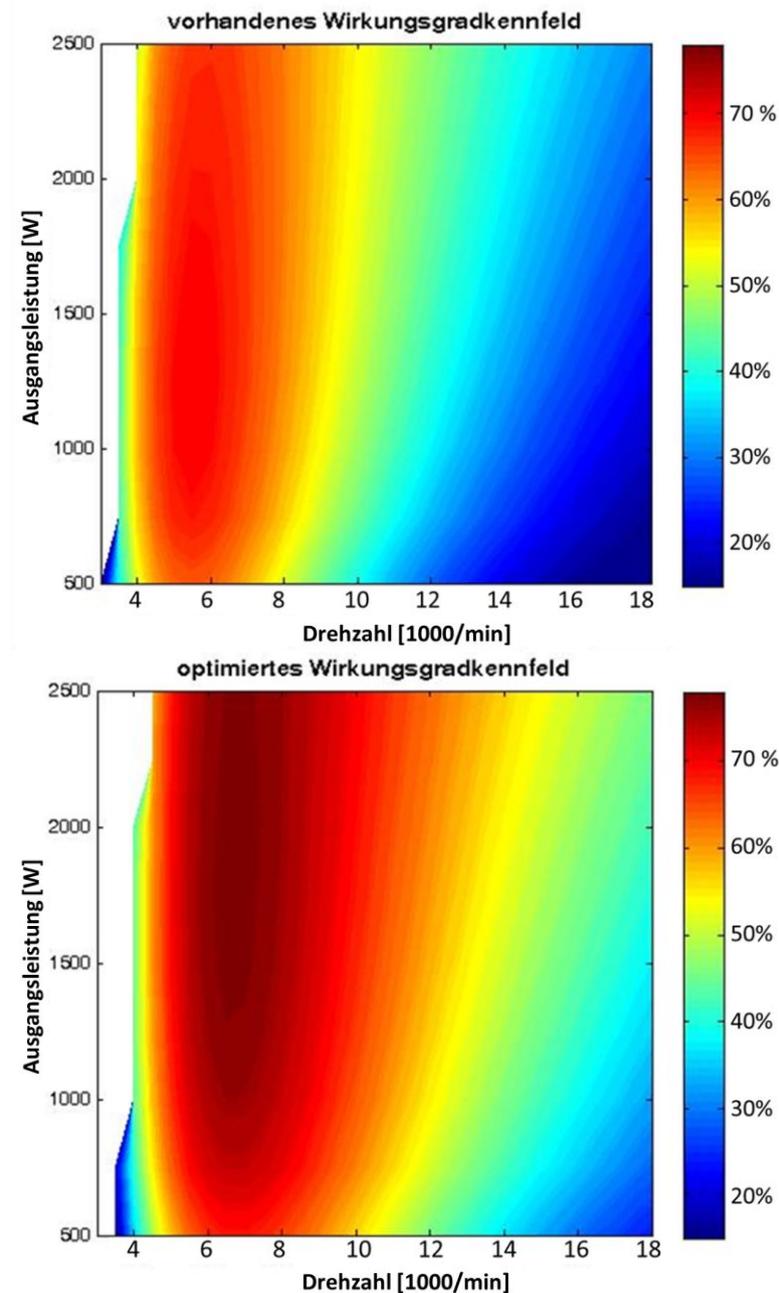


Abbildung 64 : Vergleich der Generator-Wirkungsgradkennfelder

Ein Vergleich der Wirkungsgradkennfelder zeigt, dass durch Änderung der Wicklungsdaten eine Wirkungsgradsteigerung von 70% auf gut 80% möglich ist. Weiters lässt sich erkennen, dass sich Bereiche mit hohem Wirkungsgrad über einer konstanten Drehzahl abzeichnen. Das bedeutet, dass die wirkungsgradbeeinflussende Größe primär die Drehzahl und in deutlich geringerem Maße die Last ist. Der Betrieb des Generators bei möglichst hohem Wirkungsgrad setzt somit ein drehzahlkonstantes System voraus. Dies hat Folgen für die Auswahl und Auslegung der weiteren Range Extender Komponenten. Diese Anforderung nach invarianter Drehzahl lässt sich direkt auf den Verbrennungsmotor übertragen, da sich aus Kostengründen variable Übertragungsglieder ohnehin verbieten.

Für den weiteren Verlauf des Entwicklungs- und Integrationsprozesses wird, bedingt durch die Vermeidung von Prototypenkosten, der nicht-optimierte Generator verwendet. Auf die hier identifizierten und quantifizierten Optimierungsmaßnahmen wird jedoch im Zuge der Ergebnisdiskussion und dem abschließenden Kapitel 7 Schlussfolgerungen nochmals eingegangen.

4.3.2 Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor stellt den chemisch-elektrischen Energiewandler im System dar. Über seinen Wirkungsgrad hinaus sind seine Eigenschaften zur Erfüllung der Umweltaanforderungen maßgeblich. Als Hauptkomponente, aber auch durch alle zu seinem Betrieb notwendigen Zusatzkomponenten, bildet er einen nicht unwesentlichen Anteil an den Systemkosten ab. Daraus ergeben sich zahlreiche und herausfordernde Anforderungen.

4.3.2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an den chemisch-mechanischen Energiewandler lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die allgemeinen Anforderungen leiten sich aus den Systemanforderungen ab, wohingegen sich technische Anforderungen aus der Systemauslegung sowie aus den Eigenschaften der vorangegangenen Komponente Generator ergeben.

Allgemeine Anforderungen

Kosten

Um den Kostenanforderungen zu entsprechen, wird auf eine Neukonstruktion verzichtet und stattdessen ein verfügbarer und geeigneter Verbrennungsmotor gesucht. Diese Anforderung bezieht sich nicht nur auf das Aggregat selbst, sondern erstreckt sich auf alle zu seinem Betrieb notwendigen Zusatzkomponenten. Diese sind zum Beispiel die Einrichtungen zur Lastregelung sowie die Komponenten der Abgasnachbehandlung.

Verfügbarkeit

Die Anforderung nach Verfügbarkeit ergibt sich implizit aus den Kostenanforderungen und dem gewählten Ansatz auch Entwicklungskosten zu vermeiden. Verfügbarkeit bedeutet, dass der gewählte Verbrennungsmotor in der gewünschten Form existiert. Eine Forderung nach verschiedenen Zulieferfirmen, wie im Falle des Generators, kann hier nicht gestellt werden, da Motorenhersteller nach ihrem Verständnis eine Hauptkomponente und keine Zusatzkomponente herstellen. Jedoch lässt sich die Versorgungssicherheit durch eine Anforderung nach Austauschbarkeit des Verbrennungsmotors formulieren.

Bauraum und Gewicht

Der Bauraum für den Range Extender ist vom Konzept her auf den Bauraum der zu ersetzenden Batterie beschränkt. Diese Beschränkung wirkt sich auf die Einzelkomponenten des Range Extenders und somit auch auf den Verbrennungsmotor aus. Die Gewichtsanforderung gilt in besonderem Maß für den Verbrennungsmotor, da angenommen werden kann, dass dieser die schwerste Komponente im Range Extender Verband darstellt.

Technische Anforderungen

Wirkungsgrad

Als chemisch-mechanischer Energiewandler stellt der Verbrennungsmotor eine der Hauptkomponenten des Range Extenders dar. Sein Wirkungsgrad wirkt sich direkt auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems aus und ist maßgeblich für die Erfüllung der CO₂ – Reduktions- und Emissionsanforderung. Ausschließlich im Sinne einer Wirkungsgradoptimierung seien geringfügige Modifikationen erlaubt. Diese Maßnahmen gilt es zu identifizieren und das Optimierungspotential zu quantifizieren.

Leistung

Die Leistungsanforderung ergibt sich aus der Systemauslegung. Aus der geforderten elektrischen Ausgangsleistung von 0,8 – 1,6 kW des Generators und dessen Wirkungsgrad von 80% ergibt sich eine mechanische Leistungsanforderung von 1 – 2 kW für den Verbrennungsmotor.

Drehzahlkonstanz

Der durch den Generator vorgegebene drehzahlkonstante Betrieb bedeutet, dass der geforderte Leistungsbereich bei einer invarianten Drehzahl darstellbar sein muss.

Geräusch

Der Verbrennungsmotor ist die Hauptgeräuschquelle in einer elektrisch leisen Umgebung. Es sind Maßnahmen zu treffen, welche die Geräuschentwicklung deutlich unter den definierten Grenzwerten von 71 dB_A halten. Die Maßnahmen schließen bereits die Auswahl aber auch die Auslegung, den Betrieb sowie weitere passive Maßnahmen zu Geräuschminderung ein. Diese sind z.B. Körperschallisolation durch weiche Aufhängung, Kapselung und Dämmung.

Wartungsfreiheit

Durch die vermeintliche Wartungsfreiheit des elektrischen Basisfahrzeugs ist es nur schwer möglich, den Kunden mit Wartungsaufgaben zu belasten. Deswegen muss eine Wartungsfreiheit dahingehend angestrebt werden, dass eine Nutzungsdauer von 4 Jahren oder eine Reichweite von 10,000 km ohne Wartung erreicht werden kann.

Startwilligkeit

In einer Range Extender Anwendung hat die Zuverlässigkeit höchste Priorität. Das bedeutet, dass ein sicherer Start jederzeit zu gewährleistet ist. Diese Anforderung umfasst Kaltstart, Warmstart und Start nach längerem (mehrere Monate) Stillstand.

Emissionen

Das Emissionsverhalten des Verbrennungsmotors ist zur Erfüllung der auf Systemebene gestellten Emissionsanforderung von besonderer Bedeutung. Dies lässt sich jedoch nicht direkt auf den Motor übertragen, da die Verfahren zur Ermittlung der Systememissionen auch rein elektrische Betriebsanteile berücksichtigen. Für den Verbrennungsmotor als einzig emittierende Komponente gilt es, neben dem allgemeinen Emissionsverhalten des Motors auch dessen Kaltstart- und Warmlaufverhalten zu berücksichtigen.

4.3.2.2 Auswahl der Verbrennungskraftmaschine

Die Entscheidung für einen Zweitaktmotor ist zunächst durch die allgemeinen Anforderungen gerechtfertigt, ein kostengünstiges Aggregat mit geringem Bauraumbedarf und Gewicht zu bevorzugen. Die für L1e-Fahrzeuge unabhängig vom Arbeitsprinzip gültige Hubraumbegrenzung auf kleiner 50 cm³ sorgt dafür, dass das Zweitakt- gegenüber dem Viertakt-Arbeitsprinzip wesentliche Vorteile aufweist. Ein Zweitaktmotor kann zur Darstellung der geforderten Leistung bei niedrigerer Drehzahl als ein Viertaktmotor betrieben werden. Eine niedrigere Drehzahl hilft der Geräuschanforderung dadurch zu entsprechen, dass die Anregung in Folge der Massenkräfte kleingehalten wird. Ein weiterer Vorteil des Zweitaktmotors ist die geringere Anzahl bewegter Teile, welche im Unterschied zum Viertaktmotor zusätzlich wälzgelagert sind. Damit geht, neben einer niedrigeren Reibleistung, auch ein reduzierter Schmieraufwand in Form von nicht-benötigten Zusatzeinrichtungen einher. Bei Gemisch-Schmierung kann auf eine Ölpumpe gänzlich verzichtet werden. Bei einer heute eher gebräuchlichen Getrenntschmierung, wobei Kraftstoff und Öl separat zugeführt werden, ist ein druckloses Dosierventil ausreichend. Durch die Frischölschmierung (oder auch Verlustschmierung) fallen keine Wartungsarbeiten in Form von Öl- und Ölfilterwechsel an. Dies entspricht der Anforderung nach Wartungsfreiheit. Die geschilderten Vorteile ergeben sich aus der einfachen Konstruktion und sind Gründe für den Kosten- Gewichts- und Bauraumvorteil des Zweitaktmotors.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der guten Startwilligkeit des Zweitaktmotors. Diese verdankt der Zweitaktmotor seiner geringeren Reibung und der damit einhergehenden höheren Kompressionsgeschwindigkeit bei gleicher Starterleistung. Eine erste erfolgreiche Zündung sorgt in der Folge für hohe Restgasanteile und entsprechend hohe Temperaturen im Brennraum womit sich die Bedingungen für jede weitere Zündung verbessern.

Im Betrieb weist der Zweitaktmotor jedoch allgemeinbekannte Nachteile hinsichtlich Wirkungsgrad und Emissionen auf. Diese sind aber bei der beabsichtigten Anwendung in einem Range Extender und der damit einhergehenden differenzierten Betriebsweise im Zuge dieser Arbeit neu zu bewerten. Diese Bewertung schließt, neben stationären Betriebspunkten, auch die Betriebszustände Kaltstart und Warmlauf ein. Diese Betriebszustände sind hinsichtlich Emissionen im Zyklus besonders relevant, da sie ab Emissionsstufe EURO 4 mit 30% gewichtet und mit EURO 5 zur Gänze in das Prüfergebnis eingehen. So kann besonders in der Warmlaufphase ein Vorteil genutzt werden, welcher sich aus dem Gewichtsvorteil und der damit verbundenen geringeren thermischen Masse des Zweitaktmotors ergibt.

Die Wirkungsgradnachteile gegenüber einem Viertaktmotor, welche sich aus dem geringeren effektiven Verdichtungsverhältnis aber vor allem auch aus den höheren Spülverlusten ergeben, stellen die besondere Herausforderung hinsichtlich der beabsichtigten CO₂-Reduktion dar und sind ebenso Gegenstand dieser Arbeit.

4.3.2.3 Ausgewählter Motor

Die Vielfalt an verfügbaren Zweitaktmotoren in der L1e-Fahrzeugklasse ist noch sehr groß. Dies wird sich aber in absehbarer Zeit und spätestens mit EURO 5 dramatisch ändern, weshalb Eile geboten ist. Zur Auswahl stehen nach Kosten gestaffelt fahrtluff-, gebläse-, und wassergekühlte Varianten. Für die Auswahl entscheidend ist die Leistungsanforderung unter Berücksichtigung der Geräusch- und Emissionsanforderung. Es gilt den Leistungsbereich von 1 kW bis 2 kW mit geringen Emissionen und, im Sinne der Geräuschanforderung, bei möglichst niedriger Drehzahl darzustellen. Aus den Eigenschaften des Generators abgeleitet, sollte dies bei einer konstanten Drehzahl möglich sein.

Der zu diesem Zweck ausgesuchte Motor ist in Abbildung 65 dargestellt. Die Spezifikation geht aus Tabelle 9 hervor.

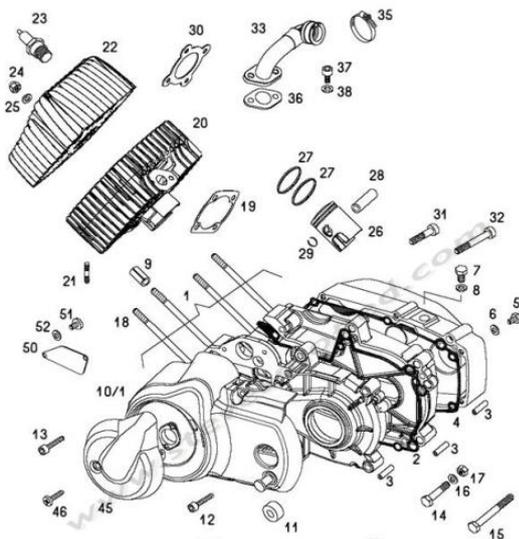


Abbildung 65 : gewählter Basismotor - Tomos [79]

Tabelle 9 : Spezifikation [80]

Basisdaten	
Typ	luftgekühlter 1 Zylinder, 2-Takt Motor
Kolbendurchmesser	38 mm
Kolbenhub	43 mm
Hubvolumen	48,8 cm ³
Verdichtungsverhältnis	9,6
Max. Leistung	2,36 kW bei 5720 1/min
Max. Drehmoment	4,78 Nm bei 3710 1/min
Steuerzeiten	
Überströmkanäle	102,8 °KW
Auslasskanal	139,7 °KW
Einlasskanal	124 °KW

Wie Abbildung 65 und der Spezifikation in Tabelle 9 zu entnehmen ist, handelt es sich um einen Zweitaktmotor einfachster Bauart. Er stammt von der Firma Tomos, wo er als Antriebseinheit für ein EURO 2 Moped mit 2-Gang-Automatik eingesetzt wird. Er ist in dieser Anwendung durch den Fahrtwind luftgekühlt und verfügt deshalb über entsprechend dimensionierte Kühlrippen. Wie bei der Mehrheit aller Zweitaktmotoren, weist er eine Schnürle-Umkehrspülung auf. Dazu verfügt er über vier Überströmkanäle. Die Strömungsrichtung der größeren, auslassnahen Kanäle verläuft tangential zur Zylinderwand in Richtung Zylinderrückwand, wohingegen die kleineren, auslassfernen unter einem Winkel zur Horizontalen in Richtung Zylinderkopf weisen. Diese Ausrichtung dient dem Aufrichten und Umleiten des Frischgasstroms in Richtung Zündkerze.

Die Steuerzeiten werden mittels Schlitzsteuerung mit dem Kolben als Steuerorgan dargestellt und sind deshalb symmetrisch. Dieser Motor verzichtet auf die weitverbreiteten Membranventile am Einlass zum Kurbelgehäuse. Diese dienen gemeinhin zur Darstellung eines weiten Drehzahlbereichs, wobei sie die Rückströmung des Frischgases verhindern. Wird der Motor jedoch, wie im vorliegenden Anwendungsfall beabsichtigt, drehzahlkonstant betrieben, kann die Gasdynamik der Einlassstrecke zur Füllungssteigerung genutzt werden. Die

Leistungs- und Drehmomentkurve ist in Abbildung 66 dargestellt. Diese gilt für den Betrieb mit Schiebervergaser in EURO 2-Abstimmung.

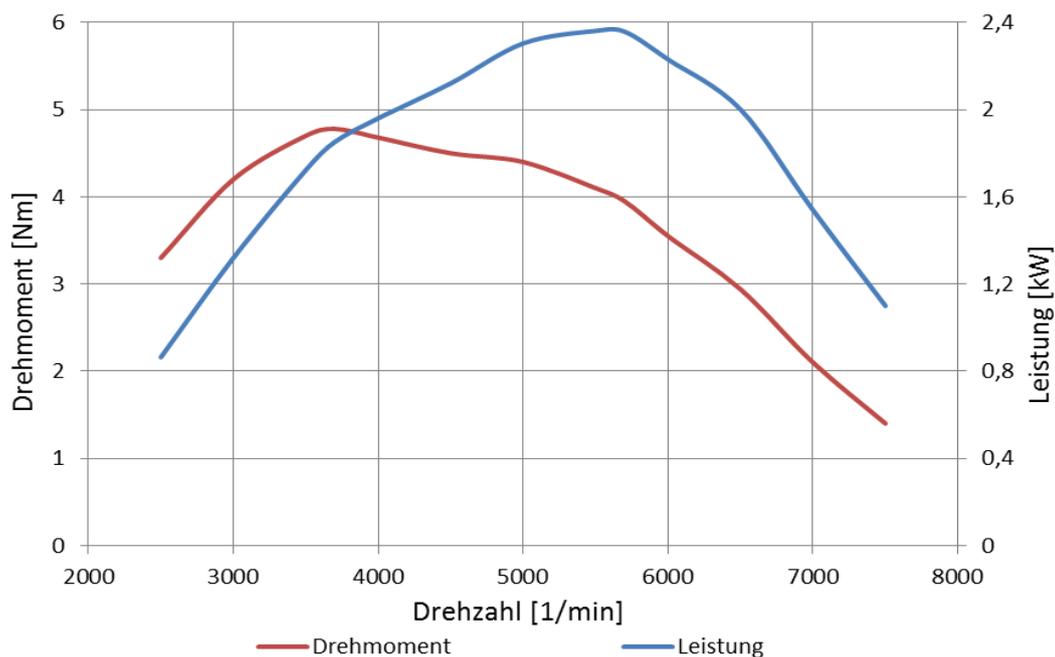


Abbildung 66 : Drehmoment und Leistungskurve in originaler Abstimmung [80]

Das ausschlaggebende Merkmal für die Auswahl dieses Motors ist das Drehmomentmaximum bei niedrigen 3710 1/min. Das Drehmomentmaximum ist zugleich ein Indikator für die Lage des Bestpunktes. Bei einem Zweitaktmotor bedeutet es überdies, dass in diesem Bereich die beste Füllung dank des Rückladeeffekts durch die Gasdynamik des Abgassystems zu erwarten ist. Diese Eigenschaft ist für die Spülverluste, den Wirkungsgrad und die Kohlenwasserstoffemissionen von Bedeutung.

Die Wahl der Auslegungsdrehzahl von 4000 1/min, geringfügig rechts des Drehmomentmaximums, stellt einem Kompromiss zwischen möglichst niedriger Drehzahl und Stabilitätsreserve dar. Die Leistungsanforderung von 2 kW wird bei dieser Drehzahl nicht auf Anhieb erfüllt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass geringe Auslegungs- und Abstimmungsmaßnahmen ausreichen, um das Leistungsziel zu erreichen. Die damit einhergehenden Arbeiten umfassen die Auslegung der leistungsrelevanten Gasdynamik der Abgasstrecke sowie die Abstimmung der Betriebsparameter Gemisch und Zündung. Auf diese Weise sollte ein Mitteldruck von 6 bar darstellbar sein, wie Erfahrungswerte des IVT¹⁸ [81] zeigen. Aus diesem errechnet sich wiederum die Auslegungsdrehzahl für das Leistungsziel 2 kW entsprechend der Leistungsformel für Zweitaktmotoren zu 4000 1/min.

Der Betrieb eines Verbrennungsmotors bedarf noch weitere Einrichtungen, welche im Folgenden behandelt werden.

Dies sind:

- Gemischbildungseinrichtung
- Lastregelungseinrichtung
- Zündeinrichtung

¹⁸ IVT Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

4.3.2.4 Gemischbildungseinrichtung

Der Betrieb des Motors erfordert ein passendes Kraftstoff-Luft-Gemisch, welches durch eine Einrichtung zur Gemischbildung zur Verfügung zu stellen ist. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten, welche in Abbildung 67 schematisch dargestellt sind.

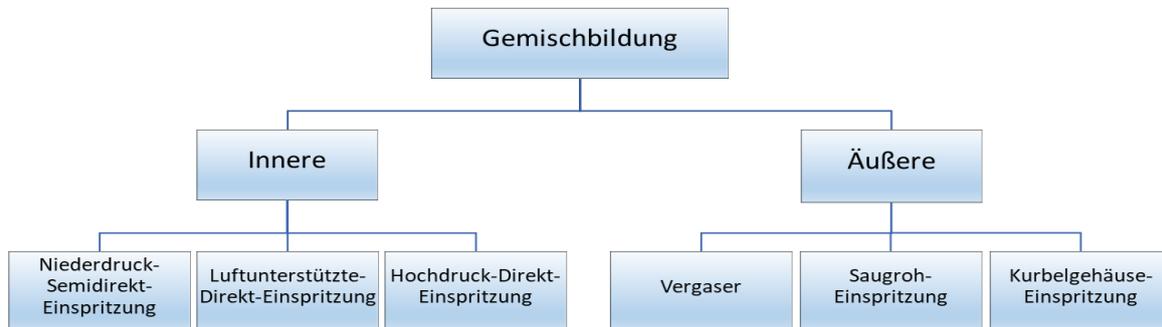


Abbildung 67 : Varianten der Gemischbildung

Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Gemischbildung.

Innere Gemischbildung bezeichnet den Umstand, dass der Motor Luft ansaugt und der Kraftstoff erst im Brennraum mittels Direkt- oder Semidirekteinspritzung zugeführt wird. Erfolgt die Kraftstoffzufuhr vor oder zu Beginn des Kompressionstakts, so reicht dazu ein Kraftstoffdruck von 1-10 bar aus; man spricht von Niederdruck-, sonst von Hochdruck-Direkteinspritzung. Die Direkteinspritzung stellt hohe Ansprüche an das Einspritz-Timing, den Einspritzdruck, die Charakteristik der Einspritzdüse und deren thermische Belastbarkeit. Sie bietet zwar das höchste Potential zur Vermeidung von Spülverlusten und kann unter Umständen auch Magerbetrieb durch Ladungsschichtung darstellen, scheidet aber bereits an dieser Stelle auf Grund der damit verbundenen Komplexität und Kosten aus. Die Niederdruck-Einspritzung kann jedoch als Ansatz für zukünftig notwendige Verbesserungen vorgehalten werden. Zur Realisierung dieser kann auf verfügbare Standardkomponenten, wie in Einspritzdüsen und Kraftstoffpumpen aus dem PKW Sektor zurückgegriffen werden [81]. Die Anwendung einer Direkteinspritzung hat jedoch auch Auswirkungen auf die Typgenehmigung. Mit EURO 5 wird ein Grenzwert für die Partikelmasse definiert, welcher sowohl auf Diesel- als auch auf Ottomotoren mit Direkt-Einspritzungen anzuwenden ist.

Bei äußerer Gemischbildung saugt der Motor zuvor aufbereitetes Gemisch an. Dieses kann durch verschiedene Einrichtungen bereitgestellt werden. In der L1e Fahrzeugklasse ist der Vergaser die verbreitete Gemischbildungseinrichtung. Der Vergaser ist im Saugrohr vor dem Einlasskanal positioniert und verfügt zur Drosselung der Luftmasse über einen Schieber oder eine Klappe, welche(r) vom Fahrer entsprechend seinem Drehmomentwunsch bedient wird. Die Zumessung der Kraftstoffmasse, entsprechend dem gewünschten Luftverhältnis, erfolgt mittels kalibrierter Düsen aus der Schwimmerkammer. In dieser wird eine Kraftstoffmenge auf konstantem Niveau vorgehalten und stetig durch das Schwimmerventil ergänzt. Die Schwimmerkammer verfügt über eine Bohrung zum Druckausgleich gegenüber der Umgebung. Dadurch ist das Kraftstoffsystem nicht abgeschlossen, wie es jedoch in den Zulassungsverordnungen durch den definierten Grenzwert für die Verdunstungsemissionen indirekt gefordert wird. Ebenso entbehrt der Vergaser in seiner einfachen Form jeglicher Einrichtung zur Kompensation von Druck und Temperatur, weshalb die Einhaltung eines vorgegebenen Luftverhältnisses nur unter konstanten atmosphärischen Bedingungen möglich ist. Trotz des Kostenvorteils ist ein Vergaser ohne weitere elektronische Einrichtungen nicht in der Lage, zukünftigen Emissionsrichtlinien gerecht zu werden und scheidet demzufolge aus. Der Elektronische Vergaser kann zwar eine Kompensation darstellen, stellt jedoch durch die

Schwimmerkammer ebenso ein offenes Kraftstoffsystem dar.

Zur äußeren Gemischbildung zählt auch die Saugrohr-Einspritzung. Diese umfasst ein Drosselorgan zur Steuerung der zugeführten Luftmasse und ein Niederdruck-Einspritzventil zur Einbringung des Kraftstoffs ins Saugrohr. Dabei findet ein Teil der Kraftstoffverdampfung bereits im Saugrohr, der Hauptanteil jedoch im Brennraum, bzw. bei Zweitaktmotoren im Kurbelgehäuse, statt. Durch das stromlos geschlossene Einspritzventil gilt das Kraftstoffsystem als abgeschlossen, wodurch die Verdunstungsemissionen eingehalten werden können. Im Falle des Zweitaktmotors, ist auch eine Position des Einspritzventils im Kurbelgehäuse denkbar. Untersuchungen hierzu sind in diversen Publikationen [81, 82] zu finden. Entsprechend dem Ansatz, möglichst wenige Modifikationen zuzulassen, wird die Positionierung des Einspritzventils im Saugrohr bevorzugt. Diese ist an bestehenden Motoren am einfachsten darzustellen. Durch die brennraumferne Einbringung des Kraftstoffs verlängern sich überdies die Zeit und die Strecke zur Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Vergleich zur Kurbelgehäuse-Einspritzung.

Somit ist die Art der Gemischbildung auf eine Saugrohr-Einspritzung festgelegt. Diese benötigt ein Niederdruck-Einspritzventil und eine Kraftstoffpumpe, welche sich als Zweirad- oder PKW-Standardteile finden lassen. Die Mehrkosten dieser beiden Komponenten gegenüber einem Vergaser sind vernachlässigbar, jedoch ist zur Steuerung der Einspritzung ein Steuergerät notwendig. Die zusätzlichen Kosten für ein solches hängen stark vom notwendigen Funktionsumfang für den vorliegenden Anwendungsfall ab. Die zum Betrieb und Regelung eines Motors notwendigen Funktionen sind die Lastregelung und Zündung sowie erweiterte Funktionen zur Kompensation von Umgebungsbedingungen und Anpassungen für ausgezeichnete Betriebsphasen. Zu letzteren zählt beispielsweise der emissionsrelevante Kaltstart. In der Folge wird auf all diese Funktionen eingegangen. Primär funktionsumfangsbestimmend zeigt sich die Art der Lastregelung, welche es nun festzulegen gilt.

4.3.2.5 Lastregelungseinrichtung

Die Anforderung, einen Lastbereich von 1 kW -2 kW darzustellen, bedingt eine Einrichtung zur Lastregelung des Verbrennungsmotors. Hierzu gibt es, wie im Kapitel 3 Grundlagen erwähnt, zwei Möglichkeiten. Diese sind die Quantitäts- und die Qualitätsregelung.

Die Quantitätsregelung kommt bei Ottomotoren, wegen der engen Zündgrenzen und der Auswirkung eines von Lambda 1 verschiedenen Gemisches auf die Zusammensetzung des Rohabgases fast ausschließlich zum Einsatz.

Eine Qualitätsregelung ist bei Ottomotoren, unter Vernachlässigung der Emissionen, nur bei ausgezeichneter Magerlauffähigkeit anwendbar. Die Magerlauffähigkeit eines Motors bezeichnet die Eigenschaft, ein Kraftstoff-Luft-Gemische in der Nähe der Zündgrenzen sicher entflammen zu können, wobei als Kriterium der Variationskoeffizient (oder COV-Coefficient of Variation) gilt. Dieser beschreibt die Varianz einer Größe in Form eines Koeffizienten aus der Abweichung zum Mittelwert und stellt bei Verwendung des Mitteldrucks ein Maß für die Verbrennungsstabilität dar.

Die Wahl des Lastregelverfahrens hat in dieser Anwendung, bedingt durch die damit verbundenen Stellglieder, Auswirkungen auf die Systemkosten. Im Falle der Quantitätsregelung ist die zugeführte Frischgasmasse die zu bedienende Stellgröße. Die Quantitätsregelung erfordert einen Aktuator zur Betätigung des Luft-Drosselorgans im Einlasstrakt, da dieses nicht mehr vom Fahrer bedient wird, sowie die Ansteuerung des Einspritzventils zur Darstellung des gewünschten Luftverhältnisses. Eine Regelung zur Einhaltung eines emissionsgünstigen Luftverhältnisses in Form eines Lambdaregelkreises mit Lambdasonde ist an einem Zweitaktmotor wegen der permanent vorhandenen Luftpülverluste

nicht einfach umsetzbar und verbietet sich auch aus Kostengründen. Somit kommen die Vorteile der Quantitätsregelung hinsichtlich Emissionen nicht deutlich genug zum Tragen.

Die Qualitätsregelung basiert auf der Veränderung des Gemisch-Heizwertes durch Variation des Kraftstoffanteils bzw. des Luftverhältnisses λ . Dazu ist lediglich eine Kraftstoffdosiereinrichtung notwendig. Es kann auf ein Luft-Drosselorgan und auf einen zu dessen Betätigung notwendigen Aktuator verzichtet werden. Unter Berücksichtigung der mit der Wahl der Lastregelung einhergehenden Kosten, ist die Qualitätsregelung zu bevorzugen. Der Einsatz dieser bedingt, dass der Motor eine Magerlauffähigkeit aufweist, um dem geforderten Leistungsbereich zwischen 1 und 2 kW entsprechen zu können. Zur Untersuchung wurde der Motor im Zuge des Komponententests auf einem Motorprüfstand betrieben, wobei die Quantitätsregelung mit Hilfe des Original-Vergasers und die Qualitätsregelung mittels Einspritzventil und ohne Drosselorgan dargestellt wurden. Ausgangspunkt der Messung ist jeweils Volllast bei $\lambda = 1$ bzw. 1% CO im Rohabgas. Diese Art der λ -Referenzierung über den CO-Gehalt wurde gewählt, da eine alternative λ -Bestimmung mittels λ -Sonde am Zeitaktmotor wegen der unvermeidlichen Luft- bzw. O₂-Spülverluste nicht anwendbar war.

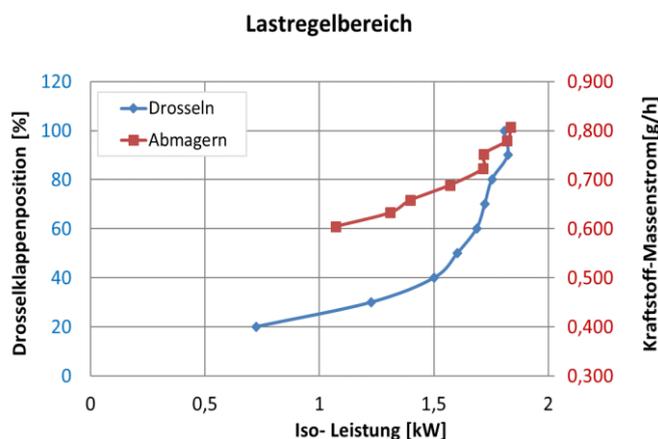


Abbildung 68 : Vergleich-Quantitäts- und Qualitätsregelung im Lastregelbereich

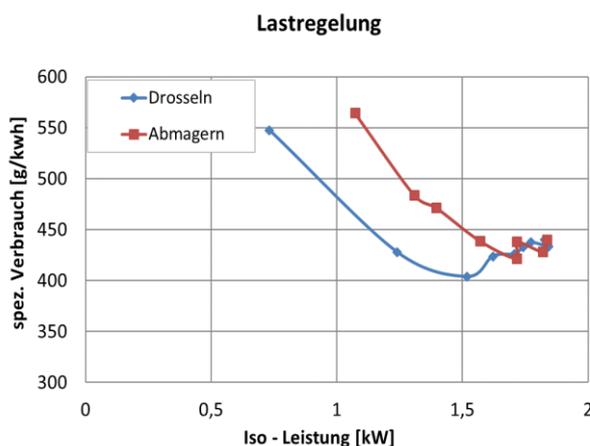


Abbildung 69 : Vergleich-Wirkungsgrad der Quantitäts- und Qualitätsregelung im Lastregelbereich

Abbildung 68 zeigt, dass die Darstellung des geforderten Leistungsbereichs in beiden Fällen gelingt. Bei der Qualitätsregelung stellen sich bei Leistungen unter 1 kW bereits Verbrennungsunstabilitäten ein, welche eine weitere Leistungsreduktion nicht zulassen.

Weiters zeigt sich in Abbildung 69, dass der spezifische Verbrauch bei Qualitätsregelung mit zunehmender Leistungsreduktion steigt. Es ist anzumerken, dass die Zündung nicht angepasst wurde. Eine Verstellung des Zündzeitpunktes in Richtung früh, um den Zündverzug eines mageren Gemisches zu kompensieren und die Schwerpunktlage der Verbrennung in einen wirkungsgradoptimalen Bereich zu verschieben mag hinsichtlich des Verbrauchs angeraten sein. Es ist jedoch Sinn der Abmagerung die Ausgangsleistung zu reduzieren. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades wäre also kontraproduktiv. Der späte Zündzeitpunkt bringt hingegen im niedrigsten Lastpunkt den Vorteil, dass die dabei sinkende Abgastemperatur durch späte Verbrennung kompensiert wird und somit der Katalysator auf Temperatur gehalten wird. Die abnehmende Verbrennungstemperatur manifestiert sich in diesem Punkt durch die niedrigen NO_x-Emissionen, wie in Abbildung 70 zu sehen.

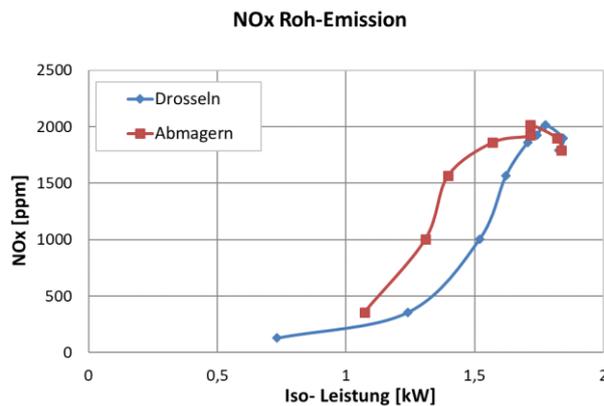


Abbildung 70: Vergleich der Quantitäts- und Qualitätsregelung bezüglich unverdünnter NO_x-Rohemissionen

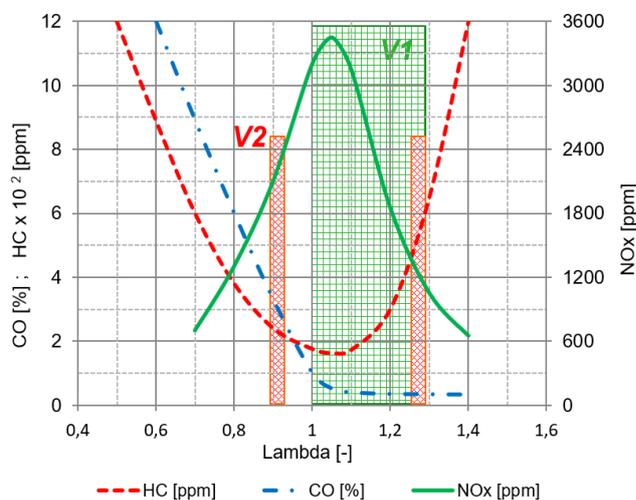


Abbildung 71 : Betriebsbereiche der Varianten V1 und V2 im Schadstoffkonzentrations-Kennfeld

sich eine Anforderung für die Steuerung, welche diesen 1 kW Lastpunkt vorhalten aber einen andauernden Betrieb in diesem vermeidet muss.

Die begrenzte Möglichkeit zur Leistungsreduktion mittels Abmagerung bedeutet weiters, dass der Range Extender die Aufgabe, eine Batterie vollständig aufzuladen, nicht erfüllen kann. Das ist jedoch kein Nachteil im Sinne einer wirkungsgradoptimalen Betriebsweise. Die Vollladung charakterisiert sich durch eine sehr niedrige Laderate am Ende des Ladezykluses, was wiederum bedeutet, dass die Motorlast nur sehr gering über Leerlauf zu liegen kommt. In dieser Betriebsphase ist ein entsprechend niedriger Wirkungsgrad zu erwarten. Die periodisch notwendige Vollladung hat durch das Ladegerät aus dem Stromnetz zu erfolgen.

Es ist zu erwarten, dass sich dieser Nachteil in der Praxis nicht manifestieren wird, da die Ladung am Stromnetz um den Faktor 4 geringere Kosten verursacht und deshalb vom Kunden bevorzugt und überwiegend genutzt werden wird.

Eine weitere Folge der Abmagerung ist eine deutlich höhere NO_x-Emission im Verstellbereich. Die in Abbildung 70 dargestellte Konzentrationsvergleich des Rohabgases berücksichtigt den zunehmend höheren Luftmassendurchsatz der ungedrosselten Abmager-Variante unter dem Ausgangspunkt von 1,8kW nicht. Das bedeutet, dass die NO_x-Massenemission um den Faktor des Massendurchsatzes höher liegen.

Das legt den Schluss nahe, dass die kostengünstiger darstellbare Qualitätsregelung nur in den Endpunkten des Leistungsbereichs mit entsprechend niedrigerer NO_x Rohemission betrieben werden sollte. Abbildung 71 zeigt den während des Versuchs überstrichenen Bereich als V1 und den zweckmäßigeren Betriebsbereich V2 im typischen Schadstoffkonzentrationskennfeld eines Verbrennungsmotors über Lambda. Der Hochlastpunkt mit 2kW wird bei einem für die Leistung günstigen $\lambda=0,9$ und der Niedriglastpunkt mit 1kW an der Magerlaufgrenze bei $\lambda > 1,2$ erreicht. Beide Betriebszustände zeichnen sich durch reduzierte NO_x-Produktion aus. Der NO_x-Massenemissionsnachteil und der deutlich schlechtere spezifische Verbrauch im Niedriglastpunkt erfordern, dass dieser Lastpunkt nur zum Schutz der Batterie und für kurze Dauer angefahren werden sollte. Daraus ergibt

4.3.2.6 Zündung

Der Betrieb eines Motors an der Zündgrenze, also im Grenzbereich des sehr mageren bzw. sehr fetten Gemisches, stellt besondere Anforderungen an die Zündung. So kann eine höhere Zündenergie und Funkendauer der limitierenden Verbrennungsinstabilität entgegenwirken. Dies bedingt die Wahl eines dementsprechenden Zündsystems. Lange Funkendauern werden bei Magnet und Spulenzündung erreicht, wobei die Zündenergie durch die Ladungsdauer (Dwell-Zeit) der Zündspule beeinflusst werden kann. Aus diesen Gründen ist die Spulenzündung einer in dieser Fahrzeugklasse gebräuchlichen Kondensator-Entlade-Zündung (CDI- Capacitor Discharge Ignition) vorzuziehen.

Wie bereits ausgeführt, ist eine Zündverstellung für die unterschiedlichen Lastpunkte nicht zielführend. Dennoch sollte eine solche vorgesehen werden, da sich damit im Kaltstart Katalysatorheiz- und Warmlaufstrategien umsetzen lassen. Diese Absicht setzt jedoch ein Steuergerät mit entsprechender Funktionalität und Sensorik zur Erfassung der Motortemperatur voraus. Damit ergibt sich eine weitere Anforderung an das Motorsteuergerät.

4.3.2.7 Motorsteuergerät

Der minimal notwendige Funktionsumfang des Steuergerätes leitet sich aus den bisher betrachteten Funktionen ab. Die bisher definierten Aufgaben des Motorsteuergerätes sind die Bedienung der Gemischbildungs-, der Lastregelungs- und der Zündeinrichtung.

Gemischbildungseinrichtung

Als Gemischbildungseinrichtung wurde die Saugrohreinspritzung gewählt. Damit ergeben sich folgende Stellgrößen:

- Einspritzbeginn SOI

Der Einspritzbeginn kann im Gegensatz zu drehzahltransient betriebenen Motoren invariant erfolgen, sollte jedoch in einer Kurbelwellen- bzw. Kolbenposition stattfinden, um ein Benetzen des Kolbens als Einlasssteuerorgan während der gesamten Einspritzdauer zu vermeiden. Anhaftende Kohlenwasserstoffe könnten andernfalls im Kurzschluss über das Kolbenhemd und den Kolbenringnuten in den Abgastrakt gelangen.

- Einspritzdauern DOI

Die Einspritzdauer stellt für die beabsichtigte Qualitätsregelung das Stellglied dar. Zur Steuerung der Gemischqualität muss diese kalibriert und in einem Kennfeld über Last und Drehzahl hinterlegt werden. Etwaig erforderliche Korrekturen in Folge der Umgebungsbedingungen - Druck und Temperatur - wirken auf eben diese Werte. Hierbei ist anzumerken, dass sich durch den drehzahlkonstanten Betrieb der Aufwand zur Bedatung des Kennfeldes erheblich reduziert.

Weiteren Einfluss auf die Einspritzdauer haben Sonderfunktionen für den Kaltstart und den Warmlauf des Motors. Diese sind notwendig, da sich bei Kaltstart zunächst die Oberflächen der gemischführenden Kanäle infolge Kondensation mit Kraftstoff benetzen. Es ist also die hierzu benötigte Kraftstoffmasse zusätzlich einzubringen, um die gewünschte Gemischqualität im Brennraum darzustellen. Man spricht in diesem Zusammenhang von Wandfilmkompensation. Die Gemischanreicherung wird im Zuge des Motorwarmlaufs sukzessive und entsprechend der Motortemperatur zurückgenommen. Diese Funktion ist als Warmlaufanreicherung bekannt.

Zündung

- Zündzeitpunkt

Der Zündzeitpunkt erfolgt hier invariant bei einem festen Kurbelwellenwinkel. Eine Verschiebung des Zündzeitpunktes während der Kaltstartphase in Richtung spät ist ein probates Mittel für ein schnelles Aufwärmen des Katalysators. Die Funktion ist als Kat-Heizstrategie bekannt.

- Zündenergie

Besonders in leistungsreduziertem Magerbetrieb ist eine ausreichende Zündenergie und Brenndauer des Funkens wichtig. Da für den Hochleistungsbetrieb keine Nachteile, außer einer erhöhten Energieaufnahme des Zündsystems, zu befürchten sind, kann die Dwell-Zeit ebenso auf den notwendigen Wert für den Magerbetrieb invariant fixiert werden. Eine gegebenenfalls reduzierte Lebensdauer der Zündkerze stellt bei der zu erwartenden Einsatzdauer kein Problem dar.

Lastanforderung

Im Normalfall erfolgt die Erfassung der Lastanforderung durch das Signal eines Gasgriff- oder Drosselklappen-Potentiometers. Dieses ist aber nun Teil des elektrischen Fahrzeugsystems und steht dem REX, durch die Konzeption als Add-On, nicht zur Verfügung. Das Lastsignal ist für den angestrebten drehzahlkonstanten Betrieb, bei gleichzeitig erwünschter Leistungsvariabilität, zwingend notwendig, da sich die im Steuergerät hinterlegten Einspritz- und Zündkennfelder über Drehzahl und Last aufspannen. Dieser entsprechende Steuereingang ist folglich durch eine noch zu bestimmende Zusatzeinrichtung, welche die jeweils benötigte Leistungsstufe vorgibt, zu bedienen.

Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen Druck und Temperatur sind bestimmende Größen für die Luftdichte und haben somit maßgeblichen Einfluss auf die angesaugte Luftmasse. Um die Gemischqualität sicher zu stellen, bedarf es einer Korrektur der einzubringenden Kraftstoffmasse.

Da der Motor aus Geräuschgründen innerhalb einer akustischen Kapsel betrieben werden soll, ist es zweckmäßig, die hierfür benötigten Druck- und Temperatursensoren innerhalb des durch den drossellosen Betrieb offenen Saugrohres zu platzieren. Dadurch werden sowohl die druckmindernde und temperaturerhöhende Wirkung der Kapselung sowie etwaige Servicezustände, wie zum Beispiel ein verschmutzter Luftfilter, kompensiert.

Für die bevorstehende Umsetzung zum Zwecke der Erprobung, wird auf ein offenes Motorsteuergerät der Firma Megasquirt [84] zurückgegriffen. Die Microsquirt 3 stellt die kleinste Variante der verfügbaren Opensource Motorsteuergeräte dar. Neben den zahlreichen Ein- und Ausgängen, wie in der Komplettbeschaltung in Abbildung 72 dargestellt, bietet es einen mehr als ausreichenden Funktionsumfang. Die Bedienung des Steuergerätes mit den notwendigen Betriebsparametern erfolgt in der freien Applikationsumgebung „Tuner-Studio“ [85].

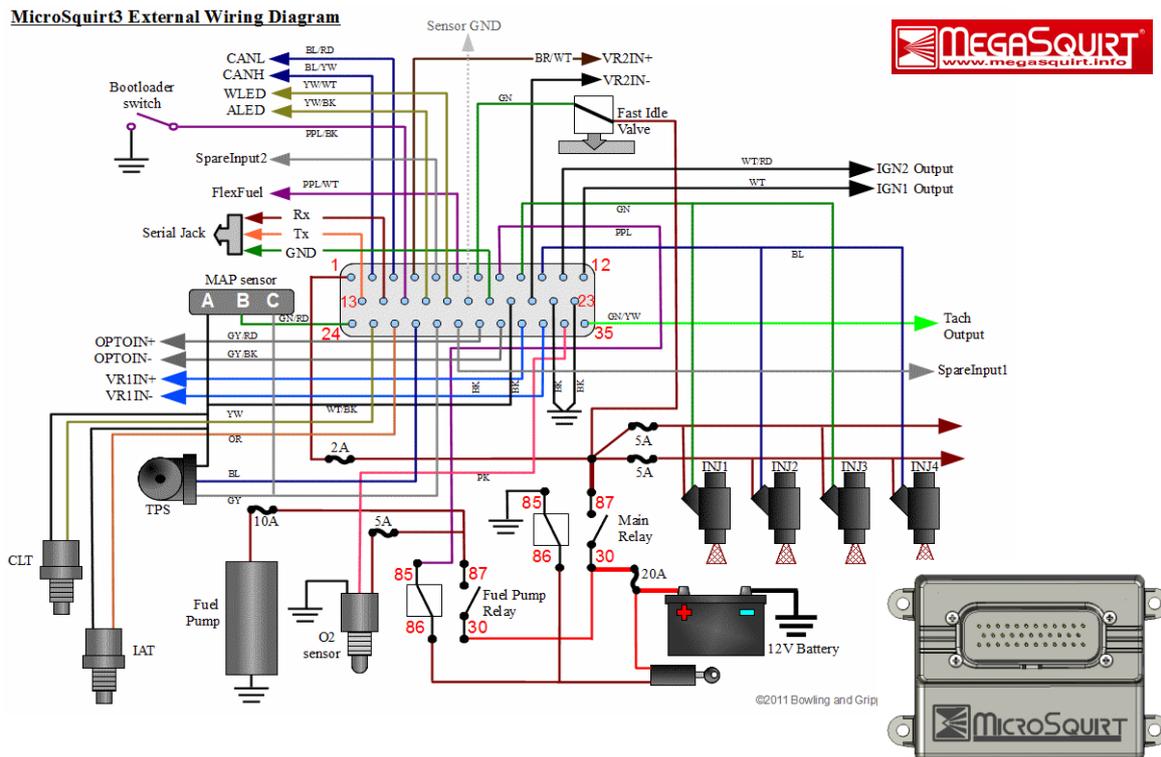


Abbildung 72 : Komplettbeschtung der Microsquirt 3 [86]

Von den zur Verfügung stehenden Sensoreingängen und Aktuatorausgängen werden die folgenden genutzt:

Eingänge:

- CLT-Coolant Temperature - Motortemperatursensor
Die aktuelle Motortemperatur wird für die Kaltstarterkennung und die Warmlauffunktion benötigt.
- MAP- Manifold Air Pressure - Saugrohr-Drucksensor
Der Saugrohrdruck wird im vorliegenden Fall nicht zur Last erfassung, sondern zur Umgebungsdruckkompensation genutzt.
- TPS- (Throttle Position Sensor) - Drossel-Klappen-Positions-Sensor
Dieser dient bei Quantitätsregelung der Last erfassung, da dessen Position proportional zur zugeführten Menge Luft bzw. Gemischmenge ist. Bei drosselloser Qualitätsregelung bleibt dieser Anschluss frei und kann als Steuereingang für das Hybridsteuergerät zur Leistungseinstellung genutzt werden.

Ausgänge:

- Fuel Pump-Ausgang zum Ein-/Ausschalten der Kraftstoffpumpe
- INJ 1- Ausgang zur Ansteuerung des Einspritzventils
- ING 1-Ausgang zur Ansteuerung der Zündspule

Der Funktionsumfang eines Steuergeräts ist kostenrelevant und definiert sich anhand der Art und Anzahl der Ein- und Ausgänge sowie der Rechenleistung und Speichergröße. Bereits durch diese Reduktion der verwendeten Steuergeräteanschlüsse ergeben sich Kosteneinsparungen. Eine Aussage bezüglich der tatsächlichen benötigten Rechenleistung und Speichergröße kann

erst später, im Zuge des Systemtests, gemacht werden.

4.3.2.8 Optimierungspotential

Einige wirkungsgradrelevante Aspekte wurden bereits durch die Wahl eines geeigneten Verbrennungsmotors abgedeckt. Diese beziehen sich auf die Lage des Drehmomentmaximums, welches mit der besten Füllung bzw. dem höchsten Frischgasgehalt im Brennraum einhergeht. Der Frischgasgehalt steht wiederum mit dem Fanggrad¹⁹, dem Spülaufwand und somit auch mit den Spülverlusten in Zusammenhang. Dennoch besteht noch Optimierungsbedarf, dessen Potential es an dieser Stelle abzuschätzen gilt.

Zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Verbrennungskraftmaschinen gilt allgemein, dass dieser mit dem Verdichtungsverhältnis steigt. Hier hat der Zweitaktmotor bedingt durch die niedrigere Klopfgrenze [87] unvermeidliche Nachteile.

Andere Nachteile erwachsen dem Zweitaktmotor durch die nicht unerheblichen Spülverluste. Die dabei verlorene Kraftstoffmasse verlässt den Brennraum ungenutzt, was sich im schlechteren spezifischen Verbrauch von Zweitaktmotoren manifestiert. Darüber hinaus sorgt das hohe Kohlenwasserstoff-Gehalt des Abgases für ein problematisches Emissionsverhalten. Durch das drehzahlkonstante Konzept kann sich eine Verbesserung des Fanggrades einstellen, da die Abgasanlage auf die gewählte Drehzahl gasdynamisch optimal abgestimmt werden kann. Bei einem drehzahltransient betriebenen Motor hingegen ist diese Abstimmung stets kompromissbehaftet, da eher eine breite Drehmomentencharakteristik angestrebt wird.

Zur weiteren Minderung der Spülverluste sind diverse passive und aktive Maßnahmen bekannt.

Spülverlustmindernde Maßnahmen

Eine bekannte passive Maßnahme zur Vermeidung von Spülverlusten, die sich bei zulässiger Modifizierbarkeit der Kanäle anbietet, ist das „delayed scavenging“ [82,83,88]. Hierbei wird der Auslass relativ spät geöffnet, wodurch der erhöhte Druck im Brennraum zu Spülbeginn zunächst Restgas in die Überströmkanäle drückt. Der eigentliche Spülvorgang setzt somit verspätet und mit dem in den Kanälen vorgelagerten Restgas ein. Hierdurch sollen Kurzschlussverluste sowie Spülverluste verringert werden. Allerdings wirkt sich diese Maßnahme durch den höheren Restgasgehalt der Frischladung negativ auf die Leistung aus, weshalb sie in diesem Fall auf Grund der Hubraumbegrenzung nicht weiterverfolgt werden kann. Bei Übertragung auf andere, nicht hubraumbegrenzte L-Kategorie Fahrzeuge oder Anwendungen, sollte sie jedoch berücksichtigt werden.

Eine weitere passive Maßnahme ist die „Spülvorlage“ [83]. Hierbei wird über separate, luftführende Kanäle in Kolbentaschen Luft vorgehalten. Diese Luft wird beim Überstreichen der Spülkanäle dem aus dem Kurbelgehäuse kommenden Gemisch vorgelagert und bildet bei einsetzendem Spülvorgang eine Trennschicht zwischen dem im Zylinder befindlichen Restgas und der Frischladung. Ein Überspülen erfolgt somit vorwiegend mit Luft statt Gemisch. Die dafür notwendigen Zusatzkanäle sowie die Kolbentaschen würden eine Neukonstruktion und Abstimmung des Verbrennungsmotors zur Folge haben. Die Spülvorlage ist deshalb nicht Umfang dieser Studie. Als zukünftige Maßnahmen wird sie im Schluss-Kapitel nochmals aufgegriffen.

Auch bewährte aktive Maßnahmen, wie Semidirekt- bzw. Direkt-Einspritzung, sind, bedingt durch die im Zuge der Gemischbildung erörterte Entscheidung gegen Applikationsaufwand, Steuergerät-Komplexität und Kosten, nicht anwendbar. Bei entsprechend sinkenden Kosten für derartige Systeme sollten sie als zukünftige Maßnahmen nicht ausgeschlossen werden.

¹⁹ Fanggrad: Anteil des Frischgases welches nach Ladungswechsel im Brennraum verbleibt

Quantifizierung des Optimierungspotentials möglicher Maßnahmen

Da im Rahmen des Projektes die Fertigung von Prototypen der Verbrennungskraftmaschine nicht vorgesehen war, erfolgt die Quantifizierung des Optimierungspotentials im Zuge einer Studie [89] mittels 1D-Motorprozessrechnung (AVL-BOOST [90]) und 3D CFD (AVL-FIRE [91]).

Hierbei bleiben die zulässigen Maßnahmen auf solche beschränkt, die ohnehin im Zuge einer notwendigen Neukonstruktion von Einzelkomponenten (z.B. der Abgasanlage aus Packaginggründen) anfallen oder zumindest mit geringen Kosten einhergehen. Als kostengünstig durchführbare Modifikation am schlitzgesteuerten Zweitaktmotor gelten dessen Steuerzeiten. Zur Darstellung verschiedener Steuerzeiten begrenzt sich die Änderung auf die Formen zur Herstellung der verlorenen Kerne für die betroffenen Kanäle.

Zielsetzung der Studie ist es Motorkenngrößen, welche auf das Magerbrennverfahren und die Leistung Einfluss haben, zu verbessern bzw. zumindest zu erhalten und Spülverluste bestmöglich zu verringern. Da die Leistung des Motors in Verbindung mit der angestrebten niedrigen Drehzahl ohnehin kritisch ist, darf durch diese Maßnahmen kein Leistungsverlust in Kauf genommen werden.

Hierbei grenzt sich der Betrachtungsraum der Simulation durch den bereits definierten drehzahlkonstanten und drosselfreien Betrieb derart ein, dass Variationsrechnungen möglich sind.

Variation der Steuerzeiten und Kanalgeometrie

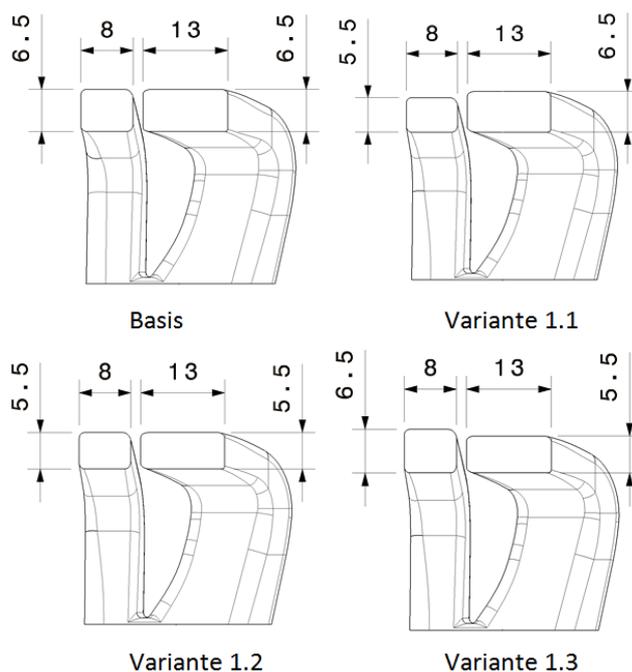


Abbildung 73 : Kanalhöhen-Variationen der - Haupt- und Neben-Überströmer

Als zielführend Variation der Steuerzeiten hat sich eine Verringerung der Zeitquerschnitte der Haupt- und Neben-Überströmkanäle gezeigt. In unterschiedlichen Varianten, wie in Abbildung 73 dargestellt, wird ausgehend von der Originalauslegung (Basis) der Zeitquerschnitt der Kanäle zunächst separat (Variante 1.1 und 1.3) und im Anschluss gemeinsam (Variante 1.2) verringert. Durch die, aus Platzmangel am Zylinderumfang, unveränderliche Kanalbreite resultiert diese Modifikation auch in einer Reduktion der Kanalquerschnitts-flächen mit entsprechender Erhöhung der Strömungswiderstände. Die Geschwindigkeit des Frischgasstrahls steigt dennoch infolge der durch das verspätete Öffnen der Überströmkanäle gestiegenen

Druckdifferenz zwischen Brennraum- und Spüldruck im Kurbelgehäuse. In Verbindung mit den nicht geänderten Kanalwinkeln der hinteren Nebenüberströmkanäle und deren Funktion als Aufrichter, ergibt sich eine höhere Ladungsbewegung. Somit ist die gezeigte Magerlauffähigkeit des Originalmotors nicht beeinträchtigt bzw. möglicherweise sogar verbessert. Abbildung 74 stellt dieses wichtige Ergebnis der 1D Motorprozessrechnung dar.

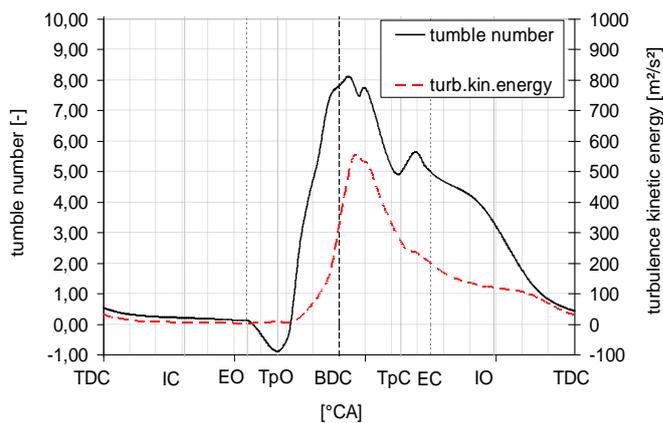


Abbildung 74 : Kenngrößen zur Ladungsbewegung

Es zeigt die durch diese Modifikation erzielte Tumble-Zahl als Voraussetzung für die ebenfalls dargestellte turbulente kinetische Energie. Diese gibt Aufschluss über die im Brennraum vorhandene Intensität der Ladungsbewegung, welche wiederum eine Bedingung für die Magerlauffähigkeit darstellt. Der Vergleich zu einem mit Tumble-Kanälen ausgestatteten Viertaktmotor, welcher eine Tumble-Zahl von etwa 2 erreicht, verdeutlicht und erklärt die hervorragende Magerlauffähigkeit des umkehrgespülten Zweitaktmotors.

Abbildung 75 zeigt die Ergebnisse der 3D-CFD Simulation in wichtigen Phasen des Ladungswechsels. Diese sind zum einen die Kolbenposition im unteren Totpunkt, wobei der Auslass und die Überströmkanäle zur Gänze offen sind (A), und zum anderen der Zeitpunkt, in welchem der Kolben den Auslass wieder verschließt (B) und der Ladungswechsel abgeschlossen ist. Blau stellt reines Gemisch und Rot reines Abgas dar.

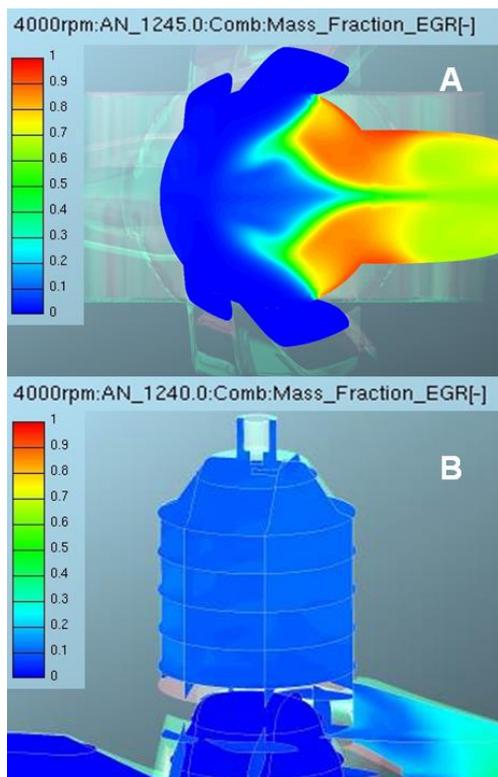


Abbildung 75 : 3D-CFD Ergebnisse in kritischen Phasen des Ladungswechsels –
 A - Ladungswechsel 30° vor UT
 B - Auslass-Schließt 62° nach UT

In Bild A zeigt einen lotrechten Schnitt durch die Zylinderachse auf halber Höhe des Auslasskanals bei 62°KW vor UT. Es ist zu erkennen, dass sich die einströmende Frischladung (blau) im Grenzbereich mit dem Abgas (rot) vermischt und als solches im Kurzschluss in den Auslasskanal mitgerissen wird. Das spätere Einsetzen des Spülvorgangs der modifizierten Variante V 1.2 (siehe Abbildung 73) bewirkt, dass weniger Frischgas durch das ansonsten schnell ausströmende Restgas im Kurzschluss mitgerissen wird. Dieser Kurzschluss-Verlust kann nicht rekuperiert werden und ist deshalb durch die Kanalanordnung und deren Ausrichtung sowie dem zum Zeitpunkt des Ladungswechsels herrschenden Druckverhältnis zu minimieren. Während sich der Kolben in Richtung oberer Totpunkt bewegt, entweicht jedoch auch reines Frischgas in den Auslasskanal. Auch diesen Anteil der Spülverluste gilt es zu minimieren.

Bild B zeigt eine durch Schnittflächen aufgespannte Seitenansicht zum Zeitpunkt Auslass-schließt AS und den Anteil an Frischladung, welcher durch Überspülen am Ende des Ladungswechsels im Auslasskanal verbleibt. Dieser Verlust kann durch die Gasdynamik der Abgasanlage in Form einer rückladenden Druckwelle verringert werden. An der

Färbung der Zylinderfüllung ist zu erkennen, dass diese nicht aus reiner Frischladung, sondern auch zu ca. 15% aus Restgas besteht. Der Restgasanteil ist im Zusammenhang mit dem Emissionsverhalten, im Besonderen NO_x -Emissionen, von entscheidender Bedeutung.

Das Optimierungspotential der Steuerzeitenvariation beziffert die Studie mit 16,3% weniger Spülverlustmasse bei 2,5% niedrigerer Frischgasmasse. Die geringfügige Reduktion der Frischgasmasse ergibt sich aus der drosselnden Wirkung der engeren Kanalquerschnitte.

Auslegung der Abgasanlage

Weitere Potentiale zur Spülverlustvermeidung können durch Auslegung der Abgasanlage erschlossen werden. Durch eine zeitlich korrekt eintreffende rückladende Welle wird nicht nur der Druck im Brennraum zu Auslass-schließt erhöht, was einer leistungssteigernden Aufladung gleichkommt, sondern auch die in den Krümmer geratene Frischgasmasse zumindest teilweise in den Brennraum zurückgeführt. Deshalb wird in einem nächsten Schritt der Einfluss der Gasdynamik der Abgasanlage anhand Variante 1.2 (siehe Abbildung 73) wiederum durch Variationsrechnung untersucht. Als variable Größe wird hierbei die Länge des Krümmers definiert. Die Berechnung erfolgt mittels 1D Motorprozessrechnung-AVL BOOST. Der Beitrag der Abgasanlage bildet sich am Ende des Spülprozesses ab. Entscheidend für die Leistung sind hierbei der Druck im Brennraum bei Auslass-Schließt sowie der Restgasgehalt im Brennraum.

Abbildung 76 zeigt die Ergebnisse der untersuchten Varianten 1 bis 3. Auf der Abszisse findet sich der Luftaufwand λ_a , als Verhältniszahl der eingesetzten Frischgasmasse zur theoretisch möglichen, und auf der Ordinate ist der Spülgrad λ_s , wiederum als Verhältniszahl aufgetragen. Das Diagramm stellt den Bereich am Ende des Spülvorgangs, kurz vor Auslass-schließt, dar. In dieser Phase ist die Wirkung der Gasdynamik der Abgasanlage deutlich sichtbar. Der Basis-Auspuff erreicht demnach durch 30% Überspülen einen Spülerfolg von 91,4%. Als beste Variante schneidet in dieser Untersuchung Variation 3 ab. Diese erreicht einen Spülerfolg von 89% bei lediglich 18% Überspülen.

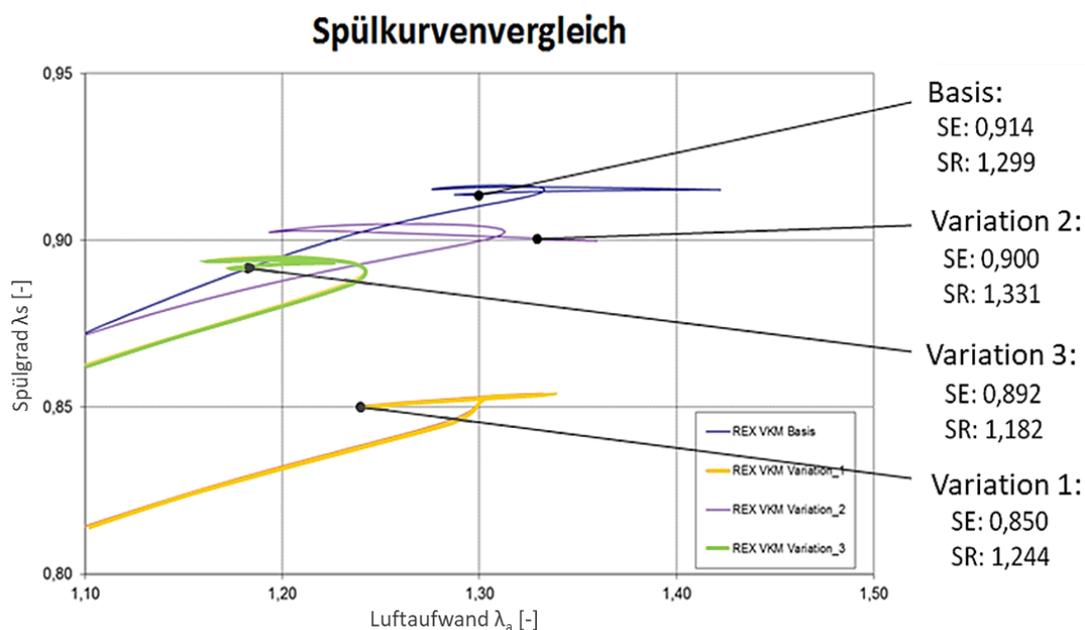


Abbildung 76 : Spülkurvenvergleich hinsichtlich Gasdynamik der Abgasanlage [89]

Nimmt man die beschriebenen Maßnahmen, Überströmkanal- und Abgasanlagenoptimierung, in die Berechnung des Optimierungspotentials auf, so zeigt sich, dass die Spülverlustmasse um 25% verringert werden kann.

Diskussion der Simulationsergebnisse

Die Optimierung mittels Simulation wurde unter den Randbedingungen einer Qualitätsregelung und eines Drehzahl-Konstant-Konzeptes durchgeführt. Mit den Auslegungsgrößen bei der Motorkonstruktion, wie Steuerzeiten und Gasdynamik der Abgasanlage, gelingt es, eine signifikante Spülverlustreduktion bei einer festen Drehzahl darzustellen. Bei den Ergebnissen zeigte sich jedoch, dass neben den geometrischen Größen auch Effekte der Gasdynamik, wie die Temperatur des Abgases und der davon bestimmten Schallgeschwindigkeit, die Spülverlustreduktion beeinflussen. Es gilt weitere Maßnahmen zu identifizieren, welche die verbliebenen Einflussgröße Temperatur, unabhängig von Lastpunkt und Betriebsdauer, vergleichmäßigen.

Diesen Untersuchungen um das Potential eines solchen Konzeptes folgt eine Machbarkeitsstudie. Diese umfasst sowohl das Packaging der notwendigen Komponenten für den REX als auch dessen physische Integration in das Fahrzeug. Die funktionale Integration wird in den darauffolgenden Kapiteln behandelt.

4.3.3 Mechanische Koppelung und Packaging [76]

Die unterschiedliche Zielsetzung bei der Auswahl der Komponenten Generator und Verbrennungsmotor macht es hinsichtlich des dabei entstehenden Drehzahlkonflikts notwendig, eine mechanische Koppelung mit Übersetzung zwischen diesen Komponenten zu entwerfen. Die effizientere Lösung dieser Drehzahlkonflikts wäre die Auswahl eines Generators mit höherer Polpaarzahl und dessen direkte Kopplung an die Motorwelle. Da nur Generatoren aus Massenfertigung zur Auswahl standen und diese im beabsichtigten Leistungsbereich und Baugröße stets mit einer Polpaarzahl von drei ausgeführt sind.

Die Anforderungen an mechanische Koppelung sind die Drehzulanpassung in Form einer möglichst verlustfreien Leistungsübertragung bei gleichzeitig geringem Beitrag zur Geräuschentwicklung. Die Auswahl einer entsprechenden Übertragung legt die Anordnung der Komponenten fest. Abbildung 77 zeigt die Anordnung bei Verwendung eines Zahnriemens als Koppellement.

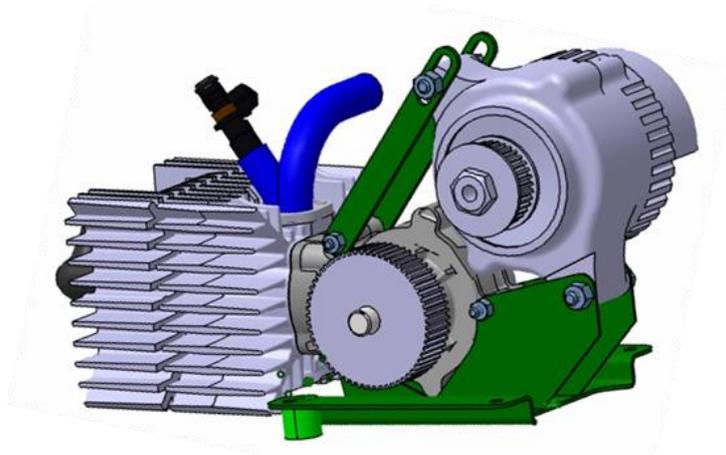


Abbildung 77 : Anordnung der Hauptkomponenten bei Koppelung mittels Riemen

Das Ergebnis der Packaging-Untersuchung zeigt Abbildung 78, dass der Range Extender in dem durch die Reduktion der Batterie freigewordenen Raum (Bauraumkriterium) untergebracht werden kann.

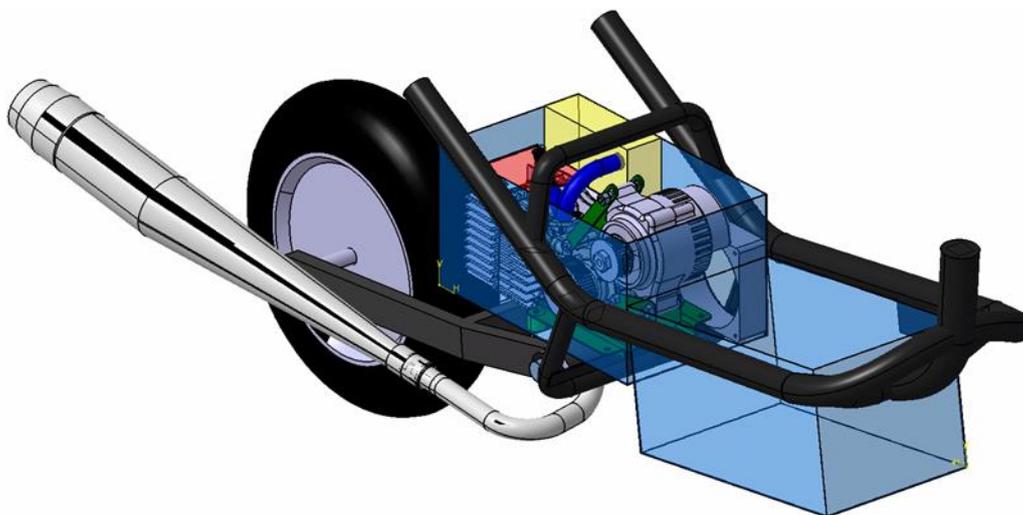


Abbildung 78 : Range Extender Bauraumuntersuchung

Die schlussendlich ausgewählte Kraftübertragung mittels Poly-V Riemen ist der geringeren Geräusentwicklung gegenüber einem schlupffreien Zahnriemenantrieb geschuldet. Ein weiteres Ergebnis der Packaging-Untersuchung ist, dass die Befestigung der Baugruppe elastisch erfolgen kann, da es keinerlei mechanischer Verbindung zum Antriebsstrang bedarf. Die Leistungsabgabe erfolgt über flexible Kabel. Durch die hiermit erzielte Entkoppelung der Motorvibrationen vom Fahrzeugrahmen ist eine signifikante Geräusminderung erzielbar.

Die Unterbringung in der ursprünglichen Batteriewanne gestattet es, diese zur weiteren Geräusdämmung als akustische Kapsel zu nutzen. Es ist lediglich dafür zu sorgen, dass es im Inneren nicht zu Wärmestau kommt. Dies wird durch einen elektrischen Lüfter gelöst, welcher durch einen Thermoschalter anhand der Kühlrippentemperatur des Motors aktiviert wird. Hierdurch wird erwirkt, dass der Motor bei Kaltstart vorübergehend ungekühlt betrieben und nach dem Abstellen weiter gekühlt wird. Die Schalttemperatur wurde hierzu auf 60°C festgelegt. Im Falle eines wassergekühlten Motors wäre diese Funktion durch eine elektrische Wasserpumpe ebenso darstellbar.

Eine Konstruktion, welche die identifizierten Optimierungsmaßnahmen beinhaltet sowie das Thema Packaging nochmals aufgreift, wird im abschließenden Kapitel 8 Ausblicke präsentiert.

4.3.4 Steuerung

Da die Hauptkomponenten, deren Zusammenschluss und deren bevorzugten Betriebsweisen in den vorangegangenen Entwicklungsschritten festgelegt wurden, kann in diesem Kapitel der Entwurf der Steuerung erfolgen. Die Steuerung stellt die wesentliche Komponente im Hybridsystem dar, welche die Freiheitsgrade des Systems zur Darstellung des gewünschten Betriebsverhaltens nutzen kann. Sie ist maßgeblich am Ergebnis beteiligt und verdient deshalb besondere Beachtung. In Anbetracht der beabsichtigten Übertragbarkeit auf größere Hubraumklassen ist sie die einzige Konstante.

Begriffsbestimmung

Der Begriff Steuerung bedarf einer Differenzierung, da dieser sowohl die Beeinflussung eines Systems durch Steuereingriffe, als auch andererseits die dafür notwendige elektronische Komponente bezeichnet. Daher wird im Weiteren der Begriff „Steuergerät“ für die elektronische Komponente und der Begriff „Systemsteuerung“ für den Funktionsumfang und die Aufgaben der Steuerung verwendet. Diese Unterscheidung ist bereits hinsichtlich der zu formulierenden Anforderungen wichtig. Es ist die Besonderheit angemerkt, dass sich das steuernde System auf den beeinflussbaren Bereich des Subsystems - Range Extenders begrenzt und das rein elektrische Fahrzeugsystem nicht einschließt.

Anforderungen

Das Steuergerät ist als Systemkomponente kostenwirksam. Die Kosten eines Steuergerätes steigen mit den Anforderungen nach Anzahl und Art der Ein- und Ausgänge sowie auch mit der Rechen- und Speicherleistung. Die Betriebsstrategie wurde hinsichtlich des CO₂-Reduktionspotentials auf der Systemebene im Zuge der Vorausberechnung mittels Längsdynamik-Rückwärts-Simulation bestimmt.

Demzufolge muss der Range Extender bei Erkennung eines niedrigen Batterieladezustandes selbständig starten. Im Betrieb müssen batteriekritische Zustände erkannt und die entsprechende Leistungsanpassung durchgeführt werden, wobei dies zum wirkungsgradoptimalen Betrieb der Komponenten bei konstanter Drehzahl erfolgen muss. Bei Erreichen eines als ausreichend definierten Batterieladezustands ist der Range Extender abzuschalten. Da zu diesem Zweck kein Datenaustausch mit dem batterie-elektrischen Fahrzeugsystem vorgesehen ist, muss der Batteriezustand durch die Systemsteuerung bzw. das Steuergerät erfasst werden.

Die Anforderungen an die Systemsteuerung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erkennung des Batteriezustandes
- Automatischer Start des Range Extender– wenn Start-Bedingung erfüllt ist
- Steuerung der Range Extender Ausgangsleistung
 - in Abhängigkeit des Systemzustandes
 - zum Schutz der Batterie
 - bei konstanter Drehzahl
- Automatischer Range Extender Stopp – wenn Stopp-Bedingung erfüllt ist
- Sicherheit - Behandlung von Fehlfunktionen und gegebenenfalls Anzeige

Die Anforderungen an das Steuergerät lassen sich erst anhand der schlussendlichen Ausprägung der Systemsteuerung formulieren, weshalb diese vorrangig zu entwerfen ist. Hierbei lautet die Zielsetzung, dies mit möglichst geringem Aufwand und Komplexität umzusetzen.

Entwurf der Steuerung / Steuerungskonzepte

Die Steuerung stellt selbst eine Hauptkomponente des Systems dar und muss dem allgemeinen Kosten und Komplexitätskriterium folgen. Deshalb erfolgt der Entwurf entsprechend folgender systematischer Vorgehensweise.

Zunächst wird das System auf selbstregelnde Mechanismen untersucht, um den Steuerungsaufwand auf ein Minimum zu reduzieren. Es stehen die Freiheitsgrade, Einspritzmenge zur Qualitätsregelung der VKM sowie die Erregung des Generators zur Verfügung.

Die als V1 bezeichnete Variante nutzt nur den Freiheitsgrad der Einspritzmenge in Kombination mit der Charakteristik des konstanterregten Generators. Die Fremderregung gestattet es die Charakteristik des Generators abzustimmen. Für die Untersuchung bleibt sie jedoch unverändert, womit sich die Eigenschaft eines permanenterragten Generators ergibt. Es wird eine selbstregelnde Betriebsweise angestrebt, welche ein Minimum an Steuerungsbedarf darstellt.

Die experimentelle Erprobung erfolgt zunächst außerhalb des Fahrzeugs. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden zur Modellbildung und zur virtuellen Implementierung der REX-Einheit in das Fahrzeug genutzt. Das resultierende Betriebsverhalten im Verbund mit dem batterieelektrischen Fahrzeug wird mit Hilfe einer Längs-Dynamik-Vorwärts-Simulation untersucht. Aus dem Ergebnis dieser Untersuchung bzw. aus dem hierbei gezeigten Betriebsverhalten, leiten sich weitere Anforderungen für eine Variante V2 ab. Diese muss alle als unerwünscht identifizierte Eigenschaften der Variante V1 beheben. Variante V2 nutzt hierzu zusätzlich den Freiheitsgrad der Generatorerregung und stellt bereits eine Steuerung/Regelung dar. Dieser Prozess sowie die Ableitung der schlussendlichen Systemsteuerung und das dazu gehörigen Steuergerätes werden im Rahmen dieses Kapitels beschrieben.

Selbstregelndes Konzept - V1

Ein erster Ansatz geht davon aus, dass es durch gezielte Einstellung der jeweiligen Betriebskennlinien der Hauptkomponenten - Generator und Verbrennungsmotor – gelingt, einen Arbeitspunkt festzulegen und somit eine Selbstregelung des Systems hinsichtlich Drehzahlkonstanz darzustellen. Abbildung 79 stellt die Arbeitskennlinien der Komponenten bzw. deren Drehmomentverlauf über der Drehzahl dar.

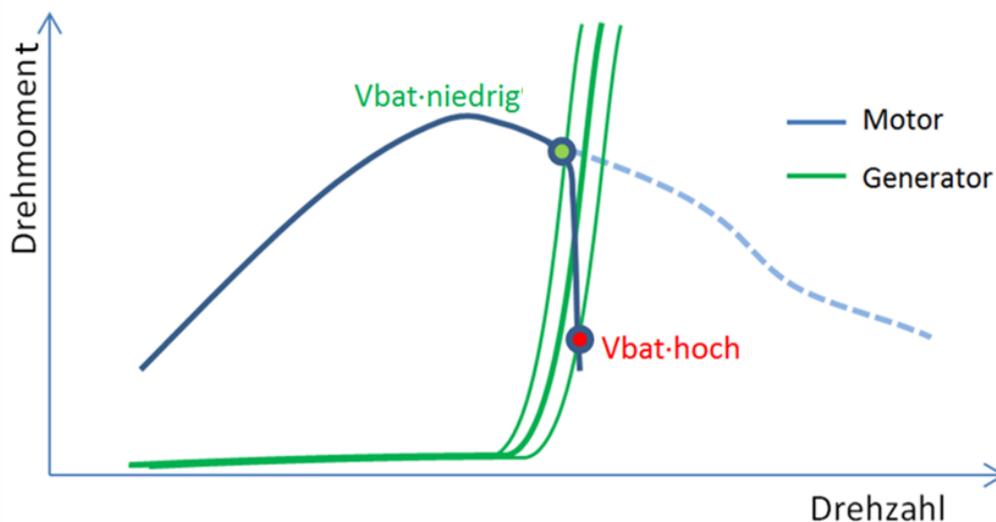


Abbildung 79 : Arbeitskennlinien des Generators und der Verbrennungskraftmaschine zur Bestimmung möglicher Arbeitspunkte mit Fokus auf drehzahlkonstanten Betrieb

Der Generator wird zu diesem Zweck mit einem konstanten Erregerstrom betrieben, womit seine Charakteristik jener eines permanent-magnetisch-erregten Generators entspricht. Dadurch ergibt sich, dass eine zunehmende Generatordrehzahl mit einer proportionalen Spannungserhöhung einhergeht. Solange die induzierte Spannung niedriger als die Batteriespannung ist, kann kein Strom fließen und folglich kein Bremsmoment durch den Generator erzeugt werden. Eine geringe Spannungserhöhung hat, durch den niedrigen Innenwiderstand der Batterie, einen stark ansteigenden Strom zur Folge. Die höhere Strombelastung verursacht wiederum ein höheres Bremsmoment des Generators, wodurch sich die steile Arbeitskennlinie des Generators ergibt. Diese Kennlinie verschiebt sich bei steigender Batteriespannung in Richtung höherer Drehzahl und bei sinkender Batteriespannung in Richtung niedriger Drehzahl.

Der Antriebsmotor wird jedoch mittels Einspritzkennfeld so abgestimmt, dass oberhalb der Auslegungsdrehzahl eine gezielte Abmagerung des Gemisches erfolgt. Die damit einhergehende Abnahme des Drehmomentes verhindert einen weiteren Anstieg der Drehzahl. Im umgekehrten Fall, also bei sinkender Drehzahl infolge hoher Strombelastung, wird das Gemisch entsprechend angereichert, wodurch das Motordrehmoment steigt und sich abermals ein Drehmomentgleichgewicht einstellt. Diese Art der Regelung hat zwangsläufig geringe Drehzahlabweichungen zur Folge, da diese die Voraussetzung für den Regeleingriff darstellen. Hinsichtlich des Generatorwirkungsgrades ist hierdurch kein Nachteil zu befürchten, da sich der wirkungsgradoptimale Drehzahlbereich des Generators im Kennfeld hinreichend breit abgezeichnet hat.

Abbildung 80 zeigt den Versuchsaufbau und verdeutlicht den geringen Steuerungsaufwand anhand der schematischen Darstellung. Die Steuerung besteht lediglich aus dem Motorsteuergerät und einer Konstant-Stromquelle für die Erregung des Generators. Die Darstellung der unterschiedlichen Systemspannungen und der daraus resultierenden Lasten erfolgt mit Hilfe eines Batteriesimulators, bestehend aus einem Netzteil und einer elektrischen Last. Dieser einfache Steuerungsansatz wird mit Hilfe der Längsdynamik-Vorwärts-Simulation überprüft.

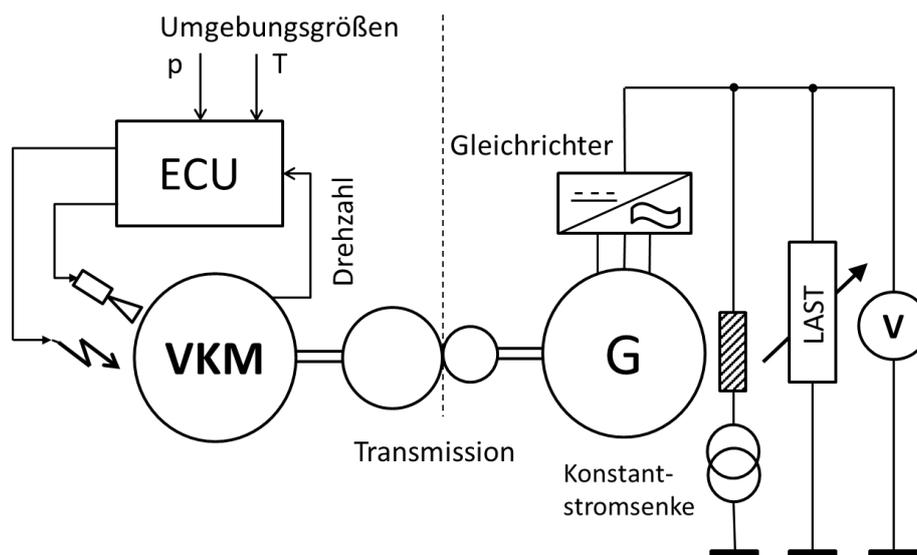


Abbildung 80 : Versuchsaufbau und schematische Darstellung der Steuerungsvariante V1

V1-Evaluierung mittels Längsdynamik-Vorwärts-Simulation

Mittels Simulation kann die Frage geklärt werden, ob es gelingt die fluktuierende Lastanforderung, welche sich aus dem transienten Fahrzeugbetrieb ergibt, von der mit konstanter Drehzahl laufenden Verbrennungskraftmaschine zu entkoppeln. Dies ist angesichts der Leistungsdiskrepanz zwischen dem REX-Ausgang von 1,6 kW-elektrisch und dem maximalen Leistungsbedarf des Antriebsmotors von 3 kW-elektrisch relevant, da sich bei spontaner Maximal-Leistungsabfrage oder spontanem Lastabwurf bei gleichzeitiger Rekuperation, Phasen ergeben können, welche eine besondere Herausforderung an die Steuerung der REX-Einheit bzw. des Gesamtsystems darstellen. Zum einen wäre mit batterieschädigenden Stromspitzen während des Lastabwurfs mit Rekuperation und zum andern mit Lastdurchschlag bis auf die Verbrennungskraftmaschine zu rechnen. Es ist folglich zu klären, welcher Steuerungsaufwand hierfür notwendig ist bzw. an welcher Stelle der Steuerungseingriff in Hinblick auf möglichst niedrige Komplexität am zielführendsten erfolgen sollte. Zu diesem Zweck wird im Rahmen einer Studie [92] eine Längsdynamik-Vorwärts-Simulation (LDynVwSim) aufgesetzt.

Die LDynVwSim unterscheidet sich von der vorangegangenen Längsdynamik-Rückwärts-Simulation (LDynRwSim) aus Kapitel 4.1.4 Wirkungsgradanalyse dadurch, dass sie für dynamische Problemstellungen wie die Steuerung eines transient beanspruchten mechatronischen Systems, durch die Implementierung eines Fahrer-Modells besser geeignet ist. Als Eingangsdaten dienen die zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsvorgaben des jeweils untersuchten Fahrzyklus (ECE-R47, WMTC, etc.). Die Ausgangsdaten geben Aufschluss über die jeweiligen mechanischen und elektrischen Lasten so wie die Energieflüsse im System und lassen eine Aussage bezüglich Systemstabilität zu.

Rein elektrische Fahrzeugbasis

Der Aufbau des Hybrid-Fahrzeug-Modells erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das rein elektrische Fahrzeug modelliert. Die Simulationsergebnisse dieses Teilmodells werden mit Hilfe von am Rollenprüfstand gewonnener Messdaten der rein elektrischen Fahrzeugbasis validiert. Abbildung 81 zeigt den modularen Aufbau des rein elektrischen Fahrzeugmodells in MatLab Simulink.

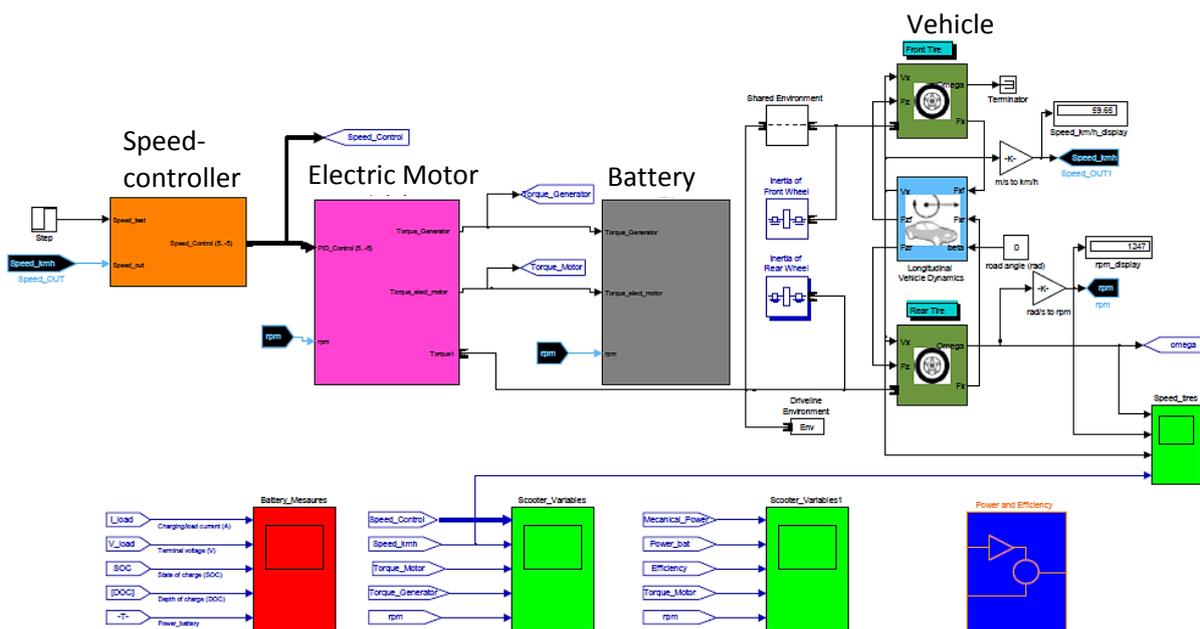


Abbildung 81: Simulink-Modell der elektrischen Fahrzeugbasis [92]

Die Geschwindigkeitsvorgabe wird dem Speed-controller Modul zugeführt, welches entsprechend seiner Parameter versucht die Geschwindigkeitsdifferenz aus der Vorgabe und der errechneten Fahrzeuggeschwindigkeit durch Lastanpassung auszuregeln. Die Lastanfrage richtet sich im Falle der Beschleunigung an das Modul Electric Motor und im Falle der Verzögerung sowohl an den Antriebsmotor, zum Zwecke der Rekuperation, als auch an das Modul - mechanische Bremse. Dieses Modul wurde im Zuge der Erweiterung des Modells, wie in Abbildung 82 zu sehen, herausgehoben. Die Drehmomentausgänge dieser beiden Module addieren sich zum Drehmomenteingang des Fahrzeug-Moduls Vehicle und werden hierin dem jeweiligen Reifenmodell zugewiesen.

Der sich aus der Charakteristik des Antriebsmotors ergebende Strombedarf bzw. -überschuss richtet sich an das Modul Batterie. Das Batterie-Modul liefert die Systemspannung, entsprechend der positiven oder negativen Stromlast und der Batteriecharakteristik, als Ausgangsgröße.

Dieses Modell wurde mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung am rein elektrischen Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand validiert und dient in weiterer Folge als verifizierte Basis für das Hybrid-Fahrzeugmodell.

4.3.5 Hybrid-Fahrzeugsystem

Das Hybrid-Fahrzeugsystem ergibt durch die Ergänzung des rein elektrischen Fahrzeugsystems um den virtuellen Range Extender. Hierzu werden die Einzelkomponenten, entsprechend ihrer im Zuge der Komponententests experimentell ermittelten Charakteristika modelliert und dem Fahrzeugmodell zugeführt. Im Sinne der Systemüberschaubarkeit werden diese wiederum in Modulen zusammengefasst. Abbildung 82 zeigt diesen modularen Aufbau des Hybrid-Fahrzeug-Modells in MatLab Simulink, wobei die Module Range Extender Einheit, Fahrzeug, Batterie, elektrischer Antriebsstrang, Fahrer und Zyklus als Subsysteme markiert sind. Eine detaillierte Darstellung findet sich im Anhang.

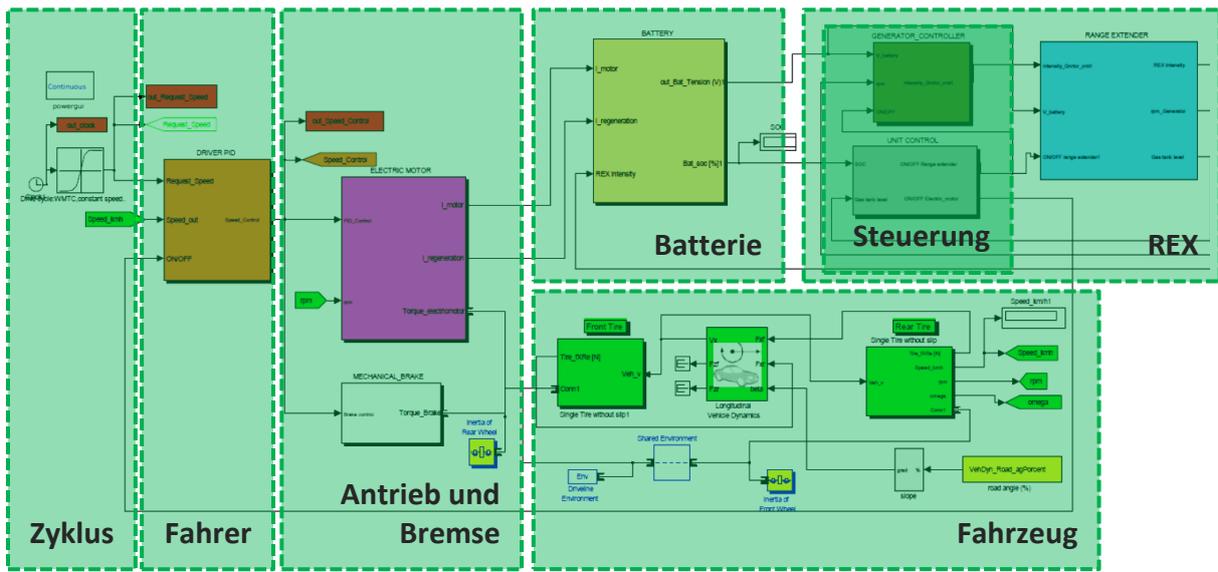


Abbildung 82: Simulink-Modell des Hybrid-Fahrzeugsystems [92]

Das Subsystem REX besteht aus den Modulen Generator-Controller, Unit-Control und Range Extender.

Die Unit-Control ist, ebenso wie das Modul Generator-Controller, aus dem Modul Range Extender herausgehoben, da sich mit deren Hilfe unterschiedliche Steuerungsmöglichkeiten simulatorisch erproben lassen.

Der Generator-Controller bildet die Schnittstelle zur Batterie und ermöglicht unter anderem eine Regelung des Generators unter Berücksichtigung der momentanen Batteriespannung. Der durch den Generator-Controller vorgegebene Erregerstrom kann sowohl invariant, zur Darstellung unterschiedlicher PMS-Generatoren, als auch variant, zur Darstellung eines fremderregten Generators dienen. Er wird zur Untersuchung unterschiedlicher Generatorcharakteristika genutzt und stellt effektiv einen Freiheitsgrad im Steuerungssystem dar.

Die Unit-Control ist für die Erkennung und Verarbeitung der Start- und Stoppbedingung sowie für die Auswahl des jeweils benötigten Leistungs-Modes zuständig. Sie ist zu diesem Zweck sowohl mit dem Generator-Controller als auch mit dem Range Extender-Modul verbunden und stellt den Hybridregler dar.

Das Range Extender-Modul umfasst das Generator- und das Verbrennungsmotormodell sowie deren mechanische Kopplung.

Nachbildung der Betriebsstrategie aus Längsdynamik Rückwärts Simulation

In einem ersten Schritt wird die im Zuge der Wirkungsgradanalyse mittels LDynRwSim als optimal identifizierte Betriebsstrategie hinsichtlich des CO₂ Reduktionspotentials nachgebildet. Bei dieser wurden zwei Betriebspunkte noch ohne Einbeziehung der Systemrückwirkungen festgelegt. Durch die genauere Abbildung des Gesamtsystems ist nun zu klären, ob sich diese in einfacher Weise darstellen lassen. In der LDynVwSim wird die Rückwirkung des batterieelektrischen Fahrzeugsystems durch die Kopplung der Batterie- und der REX-Spannung zu einer Systemspannung erreicht. Im Gesamtsystem-Modell wird die Systemspannung als Ausgangsgröße des fahrzeugseitigen Batterie-Moduls dem Modul Generator-Controller und dem Modul Range Extender als Eingangsgröße zugeführt. Aus der Bilanz des der Batterie zu- und abgeführten Stroms errechnet sich der Batterieladezustand - SOC. Der SOC wird dem Modul – Unit-Control – übergeben, welches diesen als Einschaltkriterium für die Range Extender Einheit heranzieht. Die Control-Unit dient somit der An/Aus-Steuerung der REX-Einheit sowie der Leistungsmodi-Einstellung und nutzt im ersten Ansatz den in der Regel schwer zu bestimmenden SOC. Es ist beabsichtigt, diese Steuergröße in weiterer Folge durch eine alternative Steuergröße zu ersetzen.

Mit Hilfe dieses Modells und seiner Freiheitsgrade, welche sich aus der Qualitätsregelung der VKM und der beeinflussbaren Generatorcharakteristik ergeben, lässt sich nun die Drehzahlstabilität der REX-Einheit im Rahmen des Gesamtsystems in unterschiedlichen Fahrzyklen untersuchen und bewerten.

Ergebnis

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die beabsichtigte Leistungsreduktion zum Schutz der Batterie selbstregelnd darstellt. Allerdings zeigt sich auch, dass eine Drehzahlstabilisierung bei hoher Systemlast und gleichzeitig niedrigem Batterieladezustand misslingt. Bei einer (entsprechend der Systemauslegung zulässigen) Leistungsanforderung über dem Leistungsvermögen des Range Extenders kommt es dabei zu starken Drehzahleinbrüchen. Dieses Durchschlagen der Last auf den Verbrennungsmotor wird durch die ausbleibende Pufferfunktion der entleerten Batterie verursacht. In Folge dessen, wird der Verbrennungsmotor über sein Drehmomentmaximum beansprucht und es kommt zum einem weiteren Drehzahlverlust. Erreicht dieser die Grenze des Applikationsbereichs für den Motorstart unter 2000 U/min, kommt es, bedingt durch die hierfür vorgesehene zusätzliche Anreicherung des Gemisches zum Überschreiten der fetten Zündgrenze, zum Ausfall des Motors.

Bei hinreichender Ladung und damit gewährleisteter Pufferfunktion der Batterie kann ein Durchschlagen der Last gemildert werden. Dies widerspricht jedoch einerseits der Absicht den Range Extender ausschließlich bei niedriger Batterieladung einzusetzen und hat andererseits zur Folge, dass der Motor zur Beantwortung der diversen unkritischen Lasten bei Luftverhältnissen betrieben wird, welche hinsichtlich NO_x-Roh-Emissionen und Abgasnachbehandlung problematisch sind.

Diese Betriebszustände konnten im Zuge des Systemtests nachgestellt und bestätigt werden. Sie werden im Kapitel 5 Experimentelle Untersuchungen unter Variante V1 präsentiert.

Abgeleitete Anforderungen

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weitere Anforderungen an die Steuerung formulieren. So ist selbst eine geringe Drehzahlfluktuation, z.B. aus Geräuschgründen, zu vermeiden. Hierzu ist das Durchschlagen der Systemlast, ob hoch oder niedrig, auf die Drehzahl als kritisch zu betrachten und durch Steuerungseingriff zu unterbinden. Der lasttransiente Betrieb des Verbrennungsmotors ist besonders bei Qualitätsregelung hinsichtlich NO_x-Emissionen problematisch. In einem neuen Steuerkonzeptansatz gilt es also, den Motor in diskreten Lastpunkten zu betreiben. Diese sollten möglichst außerhalb der für NO_x Bildung

kritischen Bereiche liegen. Aus den kritischen Betriebsphasen leitet sich zusätzlich die Aufgabe ab, eine Steuerung zu entwerfen, welche die zwei Leistungsstufen sicher darstellen kann. Hierbei seien Lösungen ausgeschlossen, welche die überschüssige Leistung vernichten oder die Range Extender Einheit, z.B. durch Abkoppeln der Last, im Leerlauf betreiben.

Gesteuerter Betrieb –V2

Der neue Steuerungsansatz stellt die Drehzahlstabilität an erste Stelle und nutzt dafür den zusätzlichen Freiheitsgrad, welcher sich durch die, mittels Erregung gesteuerte, variable Charakteristik des Generators ergibt. Dieser Freiheitsgrad kann zur Vermeidung des beschriebenen Lastdurchschlags Verwendung finden. Abbildung 83 stellt die Anordnung dieser Steuerungsvariante-V2 schematisch dar. Die darin gezeigten Komponenten werden anhand ihrer Aufgabe beschrieben.

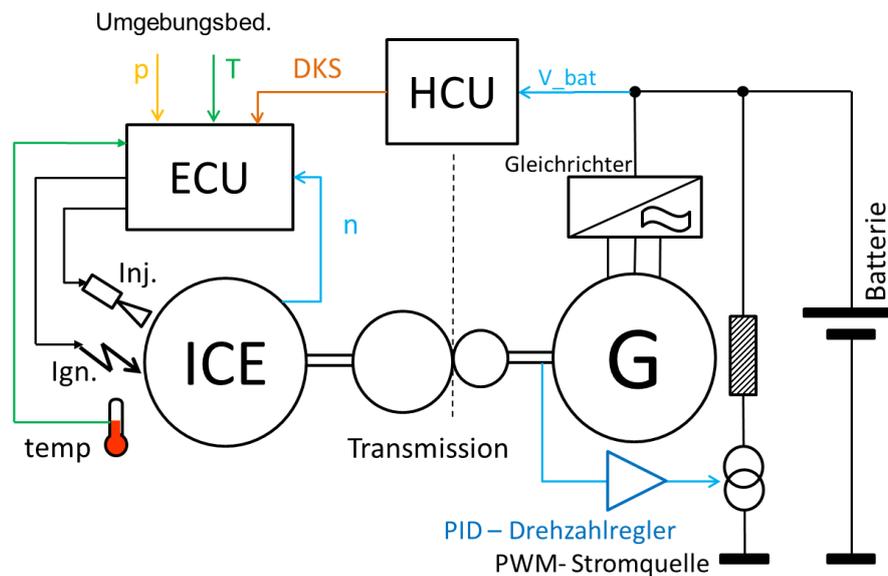


Abbildung 83 : Schematische Darstellung der Steuerungsvariante – V2

Diese Vorrichtung, Anordnung und Steuerung konnten im Rahmen dieser Arbeit zum Patent [93] angemeldet werden, welches am 1.4.2016 erteilt wurde.

Zusammenfassung von AT516418 (B1) [93]

Es wird ein Verfahren zum Betreiben einer Vorrichtung zur Energieversorgung eines elektrischen Verbrauchers (1) in einem Inselbetrieb mit einem über seinen Erregerstrom (I_e) steuerbaren Synchrongenerator (2) und mit einem Antrieb (3) für den Synchrongenerator (2) beschrieben, wobei die Vorrichtung in Abhängigkeit vom Energiebedarf des Verbrauchers (1) gesteuert wird. Um einen vorteilhaften Wirkungsgrad bei einfachen Steuerungsbedingungen zu erreichen, wird vorgeschlagen, dass die Drehzahl (n) des Synchrongenerators (2) durch eine Steuerung des Erregerstroms (I_e) konstant gehalten wird und dass der Antrieb (3) in Abhängigkeit von der am Verbraucher (1) anliegenden elektrischen Spannung (U_v) angesteuert wird.

Drehzahlregelung über den Generator

Durch Variation des Erregerstroms lässt sich die Charakteristik des Generators dahingehend beeinflussen, dass eine geringere Spannung bei gleicher Drehzahl induziert wird und sich in der Folge das Übersetzungsverhältnis zwischen elektrischer Stromlast und mechanischer Drehmomentanforderung verändert. Zu diesem Zweck wird der Erregerstrom durch einen PID-Drehzahlregler im Maß der Drehzahldifferenz zur Auslegungsdrehzahl eingestellt. Bei

positiver Abweichung der Drehzahl wird die Erregung erhöht. In der Folge steigt die generierte Spannung, wodurch sich die Spannungsdifferenz zur Batteriespannung erhöht. Die höhere Differenzspannung verursacht einen höheren Ausgangsstrom, durch welchen sich das Bremsmoment des Generators stromproportional erhöht. Dieses wirkt der Drehzahlerhöhung entgegen. Bei Drehzahlabfall wird die Erregerspannung gesenkt, wodurch sich das Bremsmoment des Generators in gleicher Weise verringert und sich die Drehzahl wieder erhöht. Diese Regelung ist dank der gesteuerten Stromquelle unabhängig von der Systemspannung. Aus dieser Entkoppelung und dem beschriebenen Zusammenhang zwischen Systemspannung und Last resultiert, dass die Drehzahlkonstanz, wie zur Vermeidung von Lastdurchschlägen gefordert, lastunabhängig ist.

Die Ausgabe der Drehzahlregelung ist somit dem Generator übertragen, was jedoch bedeutet, dass dieser nicht mehr zur Einhaltung der Spannungsgrenzen zum Schutz der Batterie gesteuert werden kann.

Diese Aufgabe ist folglich dem Verbrennungsmotor zu übertragen. Dessen Last wird nicht mehr transient im Ausmaß einer Drehzahlabweichung, sondern diskret auf einen von zwei Lastpunkten entsprechend den Erfordernissen des Systems eingestellt. Die Festlegung dieser diskreten Lastpunkte folgt den Betrachtungen im Zuge der Systemauslegung. Es gilt somit zwei elektrische Leistungen darzustellen. Diese sind 1,6 kW – Mode 1, wenn das Fahrzeug in Betrieb ist und 0,8 kW – Mode 2, wenn das Laden der Batterie die einzige Last darstellt. Die Einstellung des entsprechenden Leistungsmodus verlangt zwingend eine Erfassung der Systemlast.

Systemlasterkennung anhand der Systemspannung

Bedingt durch den Ansatz, den Range Extender als eigenständige, ergänzende Einheit einer rein elektrischen Fahrzeugbasis auszulegen, stehen keine fahrzeugseitigen Lastinformationen zur Verfügung. Die einzige Größe zur Ableitung der momentan anliegenden Last stellt die System- bzw. Batteriespannung dar. Diese stellte sich beim ersten Steuerungsansatz noch als Störgröße dar. Sie kann auf einfache Weise an den Anschlussleitungen des Range Extenders abgegriffen und erfasst werden. Durch die besondere Eigenschaft der Batterie, ihre Klemmenspannung nicht nur entsprechend ihres Ladezustandes, sondern auch entsprechend der Strombelastung, in die eine, sowie in die andere Richtung, zu ändern, bietet sich mit der Klemmenspannung eine einfach zu messende Größe an, welche für die Steuerung herangezogen werden kann.

Üblicherweise wird die Notwendigkeit einer REX-Unterstützung aus dem Ladezustand der Batterie (SOC) abgeleitet. Der SOC wird anhand einer Energiebilanz der entnommenen Kilowattstunden bestimmt. Dieses Verfahren macht die Messung des Stroms sowie der Systemspannung notwendig. Zum Abfedern von Lastspitzen durch den REX steht diesen Systemen das Lastsignal, in Form des Fahrerwunsches, zu Verfügung.

Das vorgeschlagene System erkennt die Notwendigkeit einer REX-Unterstützung undifferenziert anhand der Systemspannung. Dabei ist es irrelevant, ob ein Spannungsabfall durch einen niedrigen Ladezustand oder durch hohe Last verursacht wird. Eine steigende Klemmenspannung deutet hingegen auf eine ausreichend aufgeladene Batterie oder sogar negative Systemlast, infolge Rekuperation, hin. Somit wird auch dieser, unter Umständen kritische, Betriebszustand für die Batterie zuverlässig erkannt.

Weitere Vorteile dieser undifferenzierten Lasterkennung mittels Spannungsauswertung ergeben sich aus der Tatsache, dass Alterungserscheinungen der Batterie, wie Kapazitätsverlust oder höherer Innenwiderstand über die Spannungsantwort detektiert und somit mitberücksichtigt werden können.

Die Hybrid Steuereinheit -HCU

Wie diese nun in der Hybrid Control Unit - HCU zur Steuerung der Rang Extender-Betriebszustände und Leistungsmodi genutzt werden, verdeutlicht Abbildung 84.

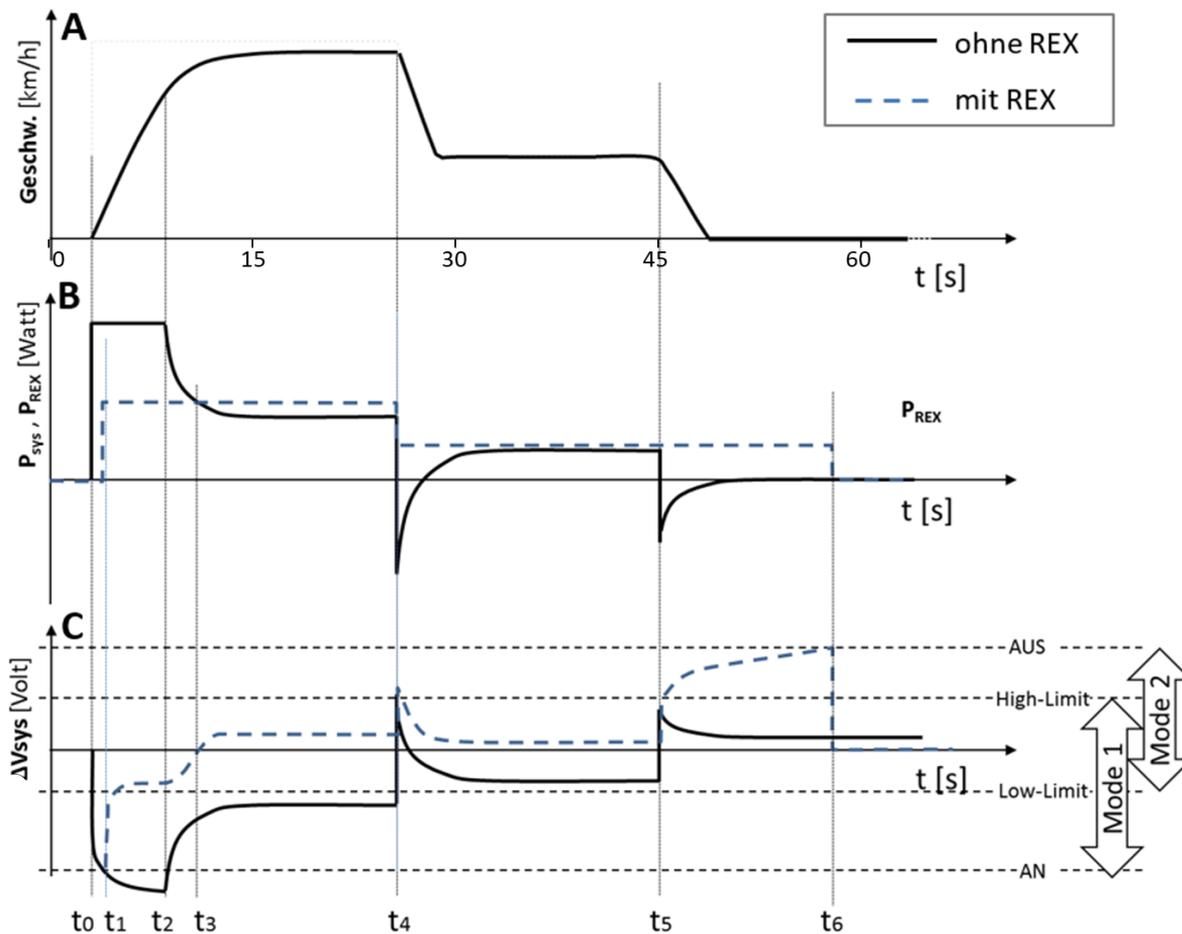


Abbildung 84 : Geschwindigkeit-, Leistungs- und Spannungsverlauf mit und ohne REX [93]

Aus dem in A gezeigten exemplarischen Geschwindigkeitsverlauf für das Fahrzeug resultiert der in B gezeigte Verlauf der Leistungsanforderung an den elektrischen Antriebsstrang, bzw. an das elektrische System. Dieser Leistungsverlauf verursacht den in C gezeigte Spannungsverlauf. Es sind die jeweiligen Verläufe ohne REX und mit REX dargestellt.

Die Beschleunigung zum Zeitpunkt t_0 erfordert die Maximalleistung, welche sich bei der Systemspannung U_{sys} durch einen starken Einbruch bemerkbar macht. Unterschreitet die U_{sys} bei t_1 die Spannungsschwelle -AN wird der REX gestartet und eine hohe Leistung P_{REX} wird an das System abgegeben. Die zeitliche Startverzögerung zwischen t_0 und t_1 vermeidet das Anspringen des REX bei kurzen Lastspitzen, welche sich trotz hinreichend geladener Batterie durch Unterschreiten der Einschaltsschwelle manifestieren können. Nach dem Start des REX im hohen Leistungsmodus – Mode 1 steigt die Spannung im System wieder an. Mode 1 wird beibehalten, wobei die Batterie in Hochlastphasen entlastet und ab t_3 geladen wird. Die U_{sys} steigt entsprechend dem Überschuss nur langsam an. Zum Zeitpunkt t_4 setzt durch Verlangsamung des Fahrzeugs spontan die Rekuperation als zusätzliche Leistungsquelle ein. Hierdurch erhöht sich die U_{sys} kurzfristig entsprechend der durch die Rekuperation dargestellten Leistung. Kommt es dabei, wie hier gezeigt, zur Überschreitung der Spannungsschwelle –High-Limit, erfolgt der Wechsel in den niedrigen Leistungsmodus –Mode 2. Da es ab t_4 zu keiner höheren Last kommt, verharrt der REX im Mode 2. Zum Zeitpunkt t_5 findet abermals eine

Rückspeisung durch Rekuperation statt, welche nicht ausreicht um die Spannungsschwelle-AUS zu erreichen. Diese wird erst bei t_6 durch fortdauernde Ladeleistung des REX erreicht, was schließlich zu dessen Ausschalten führt.

Bei wiedereinsetzender Last im Mode 2 Betrieb, welche hinreichend groß ist um die U_{sys} unter die Spannungsschwelle -Low-Limit zu senken, erfolgt ein Wechsel in den Mode 1. Der Überschneidungsbereich der zwei Leistungsmodi bildet eine Hysterese, um im lasttransienten Betrieb allzu häufige Mode-Wechsel zu vermeiden. Die Bestimmung der jeweiligen Spannungswerte erfolgt nicht willkürlich, sondern gemäß nachstehenden Überlegungen.

Automatischer START/STOPP und Leistungsanpassung

Es gilt für Bleibatterie geeignete Spannungsschwellen für Start und Stopp, sowie für den Wechsel der Leistungsmodi festzulegen.

START

Die Festlegung der Startbedingung hat entscheidenden Einfluss auf die rein elektrische Reichweite und die Emissionen. Die elektrische Reichweite wird, entsprechend Verordnung 134/2014 für Hybridfahrzeuge dieser Art, anhand einer mit voller Batterie gestarteten Fahrt im Emissionsfahrzyklus bis zum Anspringen des Range Extenders ermittelt. Durch die Berücksichtigung der elektrischen Reichweite als Faktor D_e in der Berechnungsformel für die Emissionsbestimmung wirkt sie sich folglich auf das Emissionstestergebnis aus. Der Schwellwert für den Start ist somit hinreichend tief anzusetzen, ohne jedoch eine Tiefentladung der Batterie zu riskieren. Der Schwellwert wird mit 1,75 V/Zelle oder entsprechend 42 V festgelegt.

STOPP

Im Zuge der Vorauswertung mittels Längsdynamik-Rückwärts-Simulation hat sich gezeigt, dass es für den Systemwirkungsgrad vorteilhaft ist, den Range Extender lediglich zum Erhalt der Batterieladung einzusetzen. Demzufolge ist die Spannungsschwelle als Stoppbedingung nicht an die maximal zulässige Spannung der Batterie gebunden, sondern ist vorteilhaft anhand der emissionsoptimalen Laufzeit im Zyklus zu bestimmen.

MODE 1

Der Leistungsmodus 1 mit hoher Leistung wird zweckmäßigerweise im Bereich hoher Systemlast eingesetzt. Er kann jedoch auch bei niedrigem Batterieladezustand (siehe 3.4.1, Abbildung 32) beibehalten werden, da die Batterie hier einen niedrigen Innenwiderstand aufweist, wodurch die Spannungserhöhung niedriger und die Ladeverluste kleiner ausfallen. Im Falle einer gleichzeitigen Rekuperation muss die Batterie vor einem zu hohen Ladestrom geschützt werden. Um in diesem zeitlich begrenzten Fall den Range Extender nicht abschalten zu müssen, wird ab einem definierten Spannungsschwellwert in den leistungsreduzierten Mode 2 umgeschaltet.

MODE 2

Der Leistungsmodus 2 mit reduzierter Leistung wird immer dann eingesetzt, wenn die Spannungserhöhung darauf hindeutet, dass der zugeführte Strom von der Batterie nicht aufgenommen werden kann, ein Abschalten des Range Extenders aber noch nicht zweckmäßig wäre. Bedingt durch den höheren spezifischen Verbrauch des Verbrennungsmotors in diesem Betriebspunkt, ist ein Betrieb im Mode 2 anteilmäßig klein zu halten. Abbildung 84 stellt diesen Umstand durch die unterschiedlich großen Spannungsfenster für Mode 1 und Mode 2 grafisch dar. Alternativ könnte auch eine programmierbare zeitliche Begrenzung des Mode 2 Betriebes realisiert werden.

Erweiterte Funktionalitäten der Steuerung

Range Extender (Motor) Start

Eine zusätzliche Aufgabe der Steuerung ist das Anlassen des Motors, wenn die Bedingungen für einen Range Extender-Start gegeben sind. Dabei gilt es gewisse betriebs- und sicherheitsrelevante Größen abzufragen, welche einen erfolgreichen Motorstart verhindern könnten. Für den Zweitakt-Motorbetrieb ist dies zum Beispiel sowohl der Öl- als auch der Kraftstoffstand. Ebenso ist ein Motorstartversuch automatisch abubrechen, wenn dieser aus anderen Gründen nicht innerhalb einer definierten Frist gelingt. Diese Fehler sind anzuzeigen und zur Vermeidung weiterer Versuche abzuspeichern. Die Systemsteuerung setzt sich für diese Aufgaben aus Einzel-Steuergeräten zusammen, wie in Abbildung 85 schematisch dargestellt.

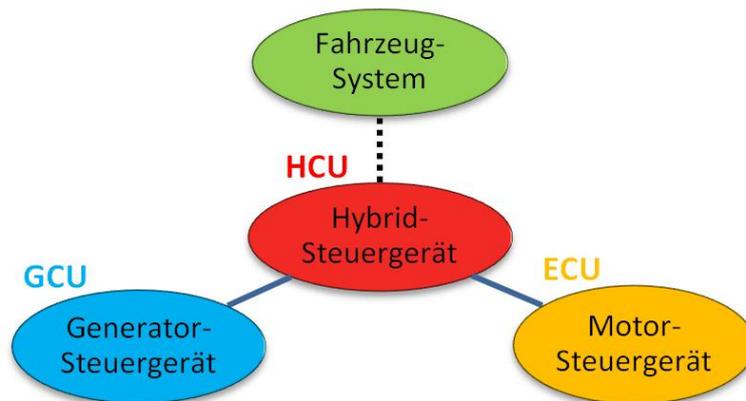


Abbildung 85 : Einzelsteuergeräte der Systemsteuerung

Zentrale Komponente bildet das Hybridsteuergerät (HCU-Hybrid Control Unit), welches auf das Motor- (ECU-Engine Control Unit) und Generatorsteuergerät (GCU-Generator Control Unit) zugreifen kann. Das Fahrzeugsystem stellt lediglich die zuvor beschriebene Systemspannung als Eingangsgröße zur Verfügung. Aus diesen Überlegungen leitet sich der in Abbildung 86 dargestellte Systemaufbau ab.

Aufgabe des Motorsteuergerätes (ECU)²⁰ ist es, dem Verbrennungsmotor die Gemischzusammensetzung für den jeweiligen, durch das Hybridsteuergerät vorgegebenen, Leistungsmodus bereitzustellen. Die Vorgabe des gewünschten Leistungsmodus erfolgt durch die HCU über den ECU-Eingang für das Drosselklappensignal – DKS. Die weiteren Eingänge der ECU belegen der Motorpositionssensor zur Ermittlung der Motordrehzahl n , die Sensoren zur Bestimmung der Umgebungsbedingungen Druck p und Temperatur T sowie ein Thermofühlen für die Motortemperatur T_{mot} . Mit Hilfe der Umgebungsgrößen p und T werden die Temperatur- und Höhenkompensation durchgeführt. Die Erfassung der Motortemperatur dient der Erkennung der besonderen Betriebsphasen - Kaltstart und Warmlauf. Als Ausgänge sind das Zünd- und das Einspritzsignal vorgesehen.

Das Generatorsteuergerät (GCU)²¹ besteht aus einem PID Drehzahlregler und einem Inverter für Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC-Controller) zum Betrieb des Generators als Startermotor. Der Drehzahlregler stellt den Erregerstrom entsprechend der Drehzahlabweichung von der Drehzahlvorgabe ein, wodurch die Funktion des Generators einer drehzahlregelten Bremse entspricht. Der BLDC-Controller dient ausschließlich der

²⁰ ECU Engine Control Unit

²¹ GCU Generator Control Unit

Starterfunktion des Generators und seine Leistung kann, wie in Versuchen ermittelt, auf 500 W begrenzt werden.

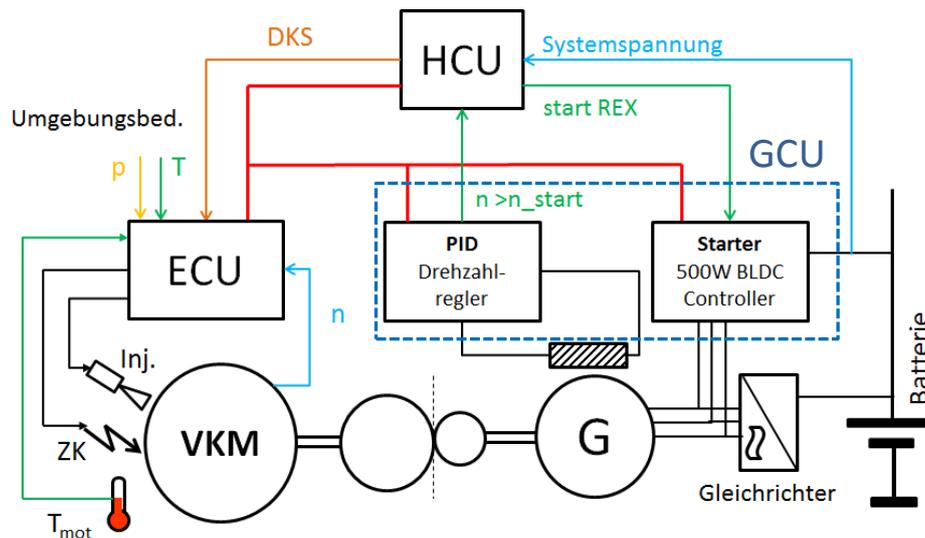


Abbildung 86 : Schematische Darstellung der Steuerungsvariante – V2 mit erweiterten Funktionalitäten

Das Hybridsteuergerät (HCU)²² koordiniert sämtliche Betriebsphasen des Range Extenders. Diese lassen sich in Systemzustände einteilen, wie in Abbildung 87 dargestellt und nachfolgend beschreiben.

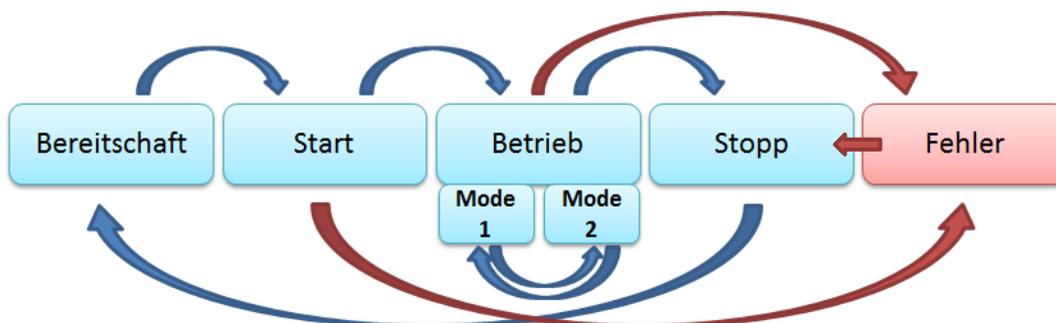


Abbildung 87 : Systemzustände des Range Extenders

Im Bereitschaftszustand wird die Systemspannung durch die HCU überwacht, während alle anderen Steuergeräte abgeschaltet sind. Wird die als Startbedingung definierte Spannungsschwelle länger als definiert unterschritten, werden ECU und GCU aktiviert und der Start des Range Extenders eingeleitet.

Im Start-Zustand erfolgt zunächst die Überprüfung der Betriebsstoffstände. Ein hierbei detektierter Fehler führt zum Verlassen des Startzustandes in Richtung Fehlerzustand. Tritt kein Betriebsstofffehler auf, wird die Startprozedur fortgesetzt. Der Generator wird als Startermotor betrieben, wobei dessen Drehzahl erfasst wird. Erreicht diese nicht innerhalb einer definierten Zeitspanne einen vorbestimmten Wert, gilt der Start als misslungen und der Startzustand wird wiederum Richtung Fehlerzustand verlassen.

²² HCU Hybrid Control Unit

Der Betriebszustand wird folglich erst nach erfolgreichem Start erreicht. In diesem Zustand wird der Generator mit Hilfe des PID-Drehzahlreglers als drehzahlgesteuerte Bremse eingesetzt. Die HCU erfasst weiterhin die Systemspannung und stellt anhand dieser den Leistungsmodus mit Hilfe der ECU ein. Der Betriebszustand wird bei Fehlerfreiheit und Erreichen der Stopp-Bedingung in Richtung Stopp-Zustand verlassen.

Im Stopp-Zustand werden alle Steuergeräte und Nebenaggregate mit Ausnahme der HCU abgeschaltet, womit wieder die Bedingungen für den Bereitschaftszustand hergestellt sind.

Der Fehlerzustand wird im Fehlerfall erreicht und kann erst nach einem Systemneustart verlassen werden. Dies verhindert die automatische Wiederholung nicht erfolgversprechender Startversuche bis zur Behebung des verursachenden Fehlers. Im einfachsten Fall erfolgt dies beispielsweise durch das Nachfüllen von Kraftstoff.

Dieser Umfang der Fehlerbehandlung wird für den Versuchsträger und die weiteren Untersuchungen als ausreichend erachtet, dennoch wird aus Sicherheitsgründen ein Notausschalter ergänzt. Im Zuge einer Produktentwicklung ist es unerlässlich eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) durchzuführen. So ist das System, welche die Spannungsantwort der Batterie und somit die Batterie als Sensor benutzt anfällig auf Unregelmäßigkeiten in Bezug auf eben diese. Der Bruch einzelner Zellen im Batterieverbund und die damit einhergehende Spannungsverschiebung würden beispielsweise adaptive Spannungsschwellen zur Steuerung sowie eine Batterie-Diagnosefunktion erfordern.

Die Bestimmung und Behandlung weiterer Fehlerbilder und Modi, wie sie für eine Serienumsetzung unerlässlich sind, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit behandelt.

5 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Versuchsaufbauten und die Durchführung der im Integrationspfad geplanten Tests beschrieben, sowie die dabei erlangten Ergebnisse präsentiert. Die Ergebnisse der Komponententests wurden bereits im Zuge der Komponentenauswahl gezeigt, da diese für die Auswahl der jeweils nächsten Komponente von Bedeutung waren. Deshalb beginnt dieses Kapitel mit dem Integrationstest.

5.1 Integrationstest

Der Integrationstest dient dem Nachweis der korrekten Auslegung und des Zusammenspiels der Komponenten im Rahmen der Range Extender-Einheit. Bei dieser Gelegenheit wird die im Zuge der Längsdynamik-Vorwärts-Simulation identifizierte selbststeuernde Variante V1 verifiziert und hinsichtlich des darüberhinausgehenden Steueraufwandes untersucht. Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen werden weitere Anforderungen für die Variante V2 abgeleitet.

5.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau, dargestellt in Abbildung 88, umfasst die mechanisch gekoppelten Hauptkomponenten (0) Verbrennungsmotor und Generator und den Batteriesimulator (1, 2), und entspricht jenem des Komponententests der Steuerung.

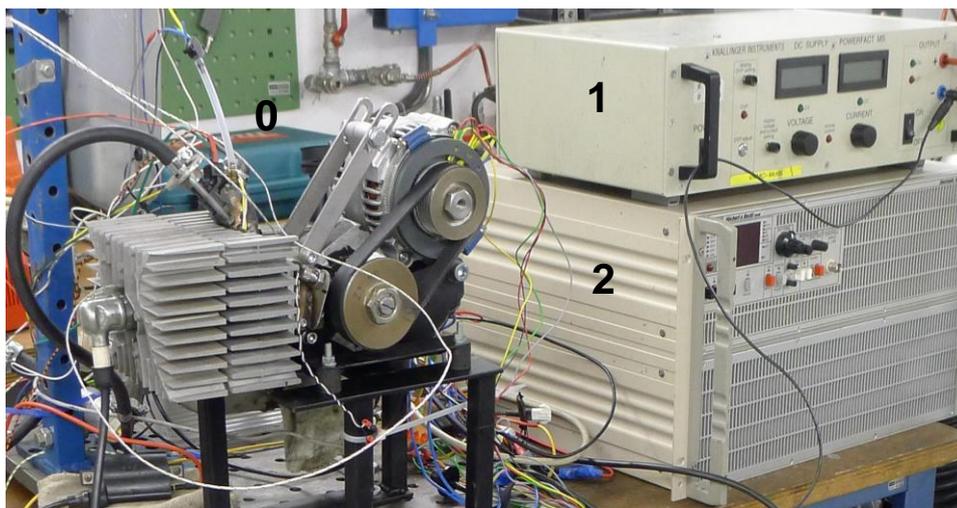


Abbildung 88 : Versuchsaufbau für den Integrationstest

5.1.2 Durchführung

Zur Durchführung wird die Batterie aus Sicherheitsgründen durch einen Batteriesimulator, bestehend aus einem Netzteil 1, als Strom und Spannungsquelle, und einer elektrischen Last 2, als Stromsenke, ersetzt. Hierdurch kann der geforderte Spannungsbereich dargestellt werden. Die Last ergibt sich als Resultierende aus der Spannungsdifferenz der Generatorspannung zur eingestellten Spannung an der Stromsenke. Das Motorsteuergerät ist entsprechend der jeweiligen Variante bedatet.

Im Falle der selbstregelnden Variante V1 ist nachzuweisen, dass der mittels Erregerstrom eingestellte Arbeitspunkt unter variierender Spannung stabil gehalten werden kann. Der Generator wird zu diesem Zweck mit Hilfe einer externen Stromquelle konstant erregt, womit seine Charakteristik fixiert ist. Der Verbrennungsmotor bildet das mittels Qualitätsregelung variable, leistungsbestimmende Stellglied.

5.1.3 Ergebnis

Abbildung 89 zeigt den Drehzahl-, Strom- und Leistungsverlauf über der Spannung für die selbstregelnde Variante V1. Es ist zu erkennen, dass der abgegebene Strom mit zunehmender Spannung sinkt. Hierdurch sinkt auch der Drehmomentbedarf des Generators, weshalb die Drehzahl um ca. 100 U/min steigt. Diese Drehzahländerung ist akustisch wahrnehmbar und verdeutlicht das unerwünschte Durchschlagen der elektrischen Last auf den mechanischen Antrieb.

Die abgegebene elektrische Leistung, als Produkt aus steigender Spannung und sinkendem Strom, variiert dabei nur um ca. 100 W, bleibt jedoch ansonsten auf einer Höhe von 1 kW. Es handelt sich somit nicht um die beabsichtigte Leistungsanpassung wenngleich der Ladestrom eine signifikante Reduktion auf etwa 2/3 erfährt.

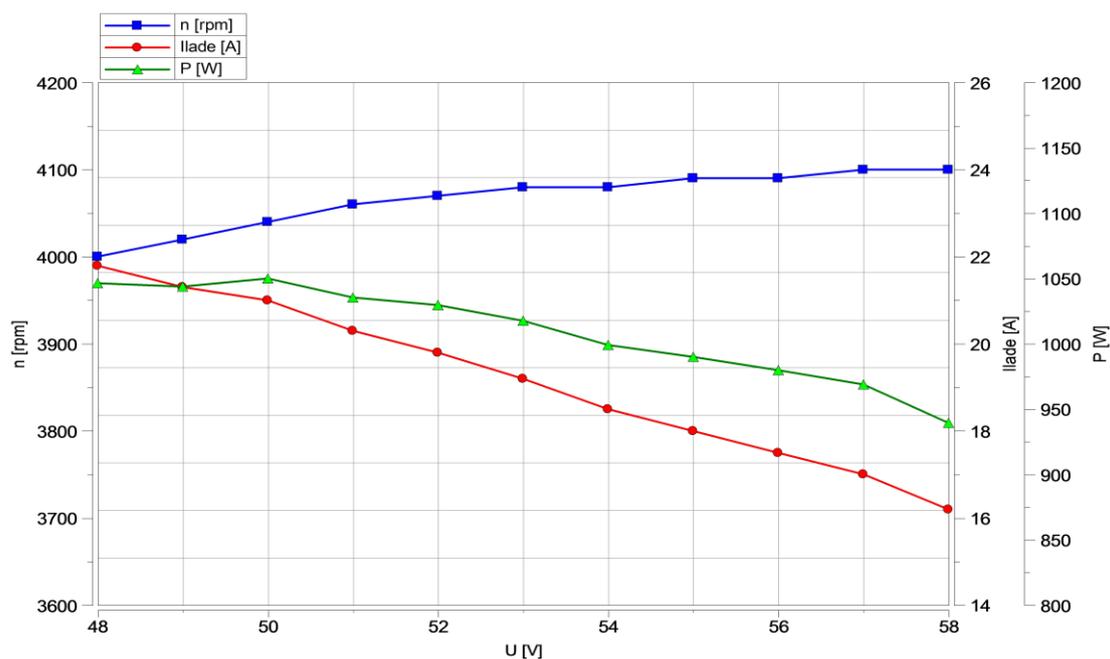


Abbildung 89 : Drehzahl-, Strom- und Leistungsverlauf über der Spannung –V1

Die selbstregelnde Variante V1 erfüllt die Leistungsanforderung 1-2kW nicht. Das Ergebnis zeigt auch was im Falle der Auswahl eines permanent erregten Generators (fixe Charakteristik) in Kombination mit der drehzahlabhängigen Lastregelung des Motors zu erwarten gewesen wäre. Weiters erklärt sich daraus warum Range Extender mit PSMS Generatoren zur Darstellung unterschiedlicher Ausgangsleistungen variierende Drehzahlen anfahren müssen.

Im Falle der gesteuerten Variante V2 kann ein Nachweis der Drehzahlstabilität entfallen, da diese durch einen Regler stabil gehalten wird. Es gilt jedoch sicherzustellen, dass der Regelbereich für die zu erwartenden Störgrößen hinreichend groß und nicht durch Sättigungserscheinungen beeinträchtigt ist. Dies ist in der beschriebenen Versuchsanordnung jedoch nur bis zur Leistungsgrenze der verwendeten elektrischen Last von 2 kW möglich, weshalb die experimentelle Überprüfung im Zuge des Systemtests in Verbindung mit der Batterie und dem Antriebsmotor durchgeführt wird.

5.2 Modultest

Der Modultest dient dem Nachweis aller an das Range Extender Modul gestellten Anforderungen, Diese umfassen den selbstständigen Start und Stopp sowie die Leistungsanpassung anhand der Klemmenspannung. Der Test erfolgt ausschließlich mit Variante V2, da nur diese über die nötigen Steuerungseinrichtungen verfügt.

5.2.1 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung entspricht wieder jener des Integrationstests, jedoch erweitert um einen Inverter, welcher zusammen mit dem Generator die Starteinrichtung bildet. Der verwendete Inverter stammt aus einer 48V E-Bike Anwendung und ist demzufolge gut und kostengünstig verfügbar. Die Spannungslage wird aus Sicherheitsgründen abermals durch den Batteriesimulator vorgegeben.

5.2.2 Durchführung

Um die einzelnen Spannungsschwellwerte für Start und Stopp sowie für die Leistungsmodiwechsel anzufahren, wird die Spannungslage an der elektrischen Last variiert und der sich jeweils einstellende Betriebszustand erfasst. Hierbei gilt es besonders die Stopp-Bedingung sowie die Fehlerfälle vorab abzusichern.

5.2.3 Ergebnis

Bei Unterschreitung des Startschwellwertes erfolgt der Start durch die Starteinrichtung, wobei sich zeigt, dass der Generator den Motor sicher beschleunigt und dabei maximal 350 W elektrische Leistung aufnimmt. Der Motorstart gelingt deutlich innerhalb der von der Steuerung festgelegten Frist von 3 Sekunden.

Der Leistungsmodus-Wechsel gelingt in beide Richtungen und bei Erreichen der als Stopp-Bedingung festgelegten Spannung erfolgt der Range Extender Stopp. Dieser tritt auch bei beabsichtigt ausgelöstem Fehler, wie dies durch eine lose Anschlussklemme nachgestellt wurde, ein. Damit sind alle sicherheitsrelevanten Funktionen positiv überprüft, sodass eine Verbindung mit dem Fahrzeugsystem bzw. der Batterie zur Durchführung des Systemtests gefahrlos möglich ist.

5.3 Systemtest

Der Systemtest dient der Validierung des Systementwurfs und der Auslegung. Der Systementwurf umfasst das gesamte Hybridfahrzeug, weshalb diesem Test der Einbau der Range Extender-Einheit in die rein elektrische Fahrzeugbasis sowie die Hard- und Softwareumsetzung der beschriebenen Steuerungskomponenten GCU und HCU vorausgehen muss.

5.3.1 Ziel

Es gilt die beabsichtigte Funktionsweise in stationären als auch transienten Betriebszuständen des Fahrzeugs zu überprüfen. Von besonderem Interesse sind die als kritisch identifizierten Betriebszustände, Lastschlag bei leerer Batterie sowie Rekuperation während des Range Extender-Betriebs. Diese Betriebszustände werden im Fahrzyklus ECE-R47 besonders gut abgebildet, weshalb dieser für den Systemtest herangezogen wird.

5.3.2 Versuchsaufbau

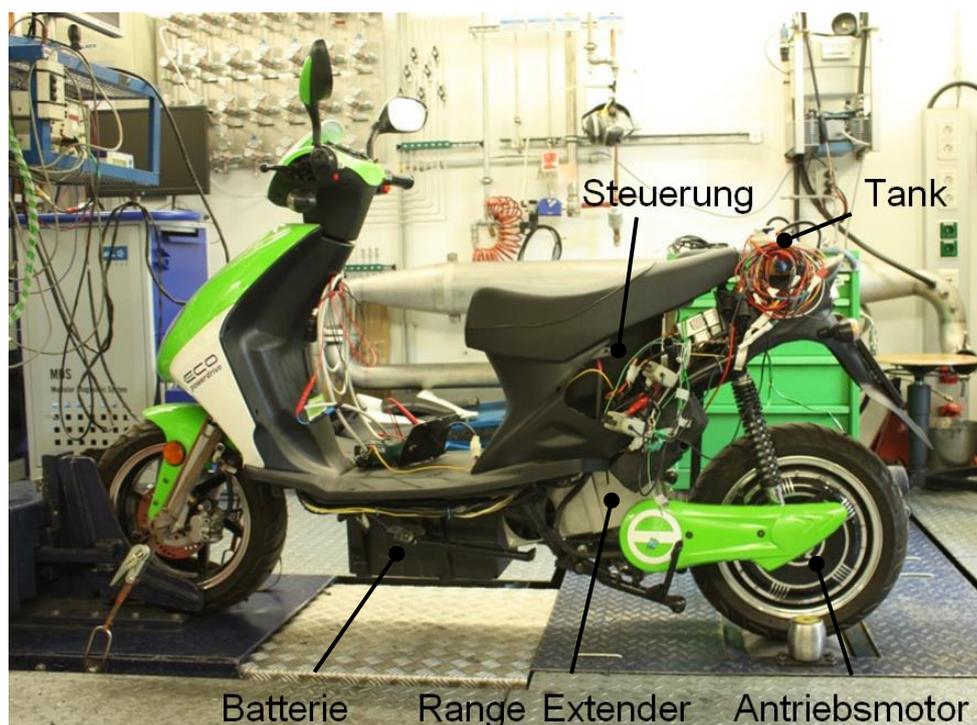


Abbildung 90 : Versuchsfahrzeug am Zweirad-Rollen-Prüfstand [76]

Der Systemtest des Hybrid-Fahrzeugs erfolgt auf einem Zweirad-Rollenprüfstand, wie in Abbildung 90 zu sehen. Dieser stellt sowohl den straßenäquivalenten Fahrwiderstand als auch die fahrzeugäquivalente Trägheit am Hinterrad (bzw. Antriebsmotor) dar. Es ist somit möglich, einen Lastschlag bis zur Höchstleistung des Fahrzeugs von 3 kW in Beschleunigungsphasen und die Auswirkung der Rekuperation in Verzögerungsphasen zu untersuchen. Zur Bestimmung der elektrischen REX-Ausgangsleistung werden Spannungs- und Gleichstrommessstellen ergänzt.

5.3.3 Durchführung

Der Test erfolgt mit zuvor entleerter Batterie und entspricht somit dem Prüfabschnitt B der Typgenehmigungsprüfung Typ I für extern aufladbare Hybridfahrzeuge ohne Wahlschalter. Demzufolge startet der Test mit dem Kaltstart der Verbrennungskraftmaschine infolge des niedrigen Batterieladezustandes. Das Fahrzeug wird ohne Abgasnachbehandlung betrieben, wobei die Abgase dennoch durch ein CVS Anlage verdünnt gemessen werden.

Trotz der bereits evidenten Verfehlung einzelner Anforderungen der Variante V1 im Modultest, wird sie wegen ihrer Einfachheit im Zuge des Systemtests erneut untersucht. Dies soll einerseits der Validierung der Simulation dienen, als auch andererseits Aufschluss über die Unzulänglichkeiten und deren Einfluss auf das System sowie den zusätzlichen Steuerungs- oder Regelungsbedarf geben.

5.3.4 Versuchs- Ergebnis - V1

Ergänzend zu den dem Regelprinzip geschuldeten Drehzahlschwankungen der V1 kommt hier die Phase der Kaltstartanreicherung und des Warmlaufs hinzu. In diesen Phasen ist eine Drehzahlstabilisierung mittels Qualitätsregelung nicht anwendbar, da die Gemischzusammensetzung primär von den Kaltstart-Parametern bestimmt wird. Abbildung 91 zeigt dies deutlich anhand des stark fluktuierenden Momentanwertes der Drehzahl sowie am gleitenden Mittelwert der Drehzahl in der Warmlaufphase. Erst nach dieser Phase, ab ca. Sekunde 200, stellt sich der zu erwartende, lastabhängige Drehzahlverlauf ein. Trotz der nur geringen verbleibenden Drehzahlvariation von ca. 50 U/min ist diese im Test akustisch wahrnehmbar. Der Drehzahlverlust unter hoher und der Drehzahlanstieg unter niedriger Last widersprechen der Fahrererwartung zusätzlich.

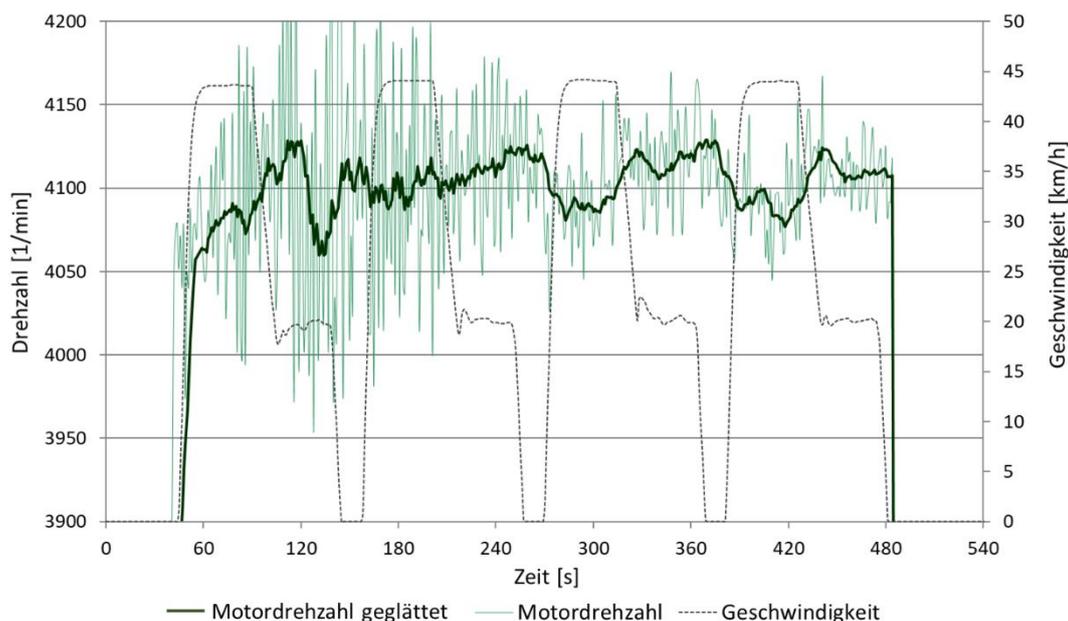


Abbildung 91 : Drehzahlverlauf der Variante V1 im Fahrzyklus ECE-R47

Die mit 50 U/min geringe Drehzahlfluktuation ist Folge des sich einstellenden Arbeitspunktes bei ca. 4100 U/min. In diesem Bereich ist das Gemisch bereits sehr mager, wodurch sich eine steile Leistungscharakteristik des Verbrennungsmotors ergibt. Diese ist verantwortlich für die relativ gute Stabilität der Drehzahlregelung. Nachteilig ist jedoch die zu geringe elektrische Ausgangsleistung des REX, wie in Abbildung 92 zu sehen. Sie schwankt zwischen 1,1 und 1,2 kW und verfehlt somit die Zielgröße von 1,54 kW deutlich.

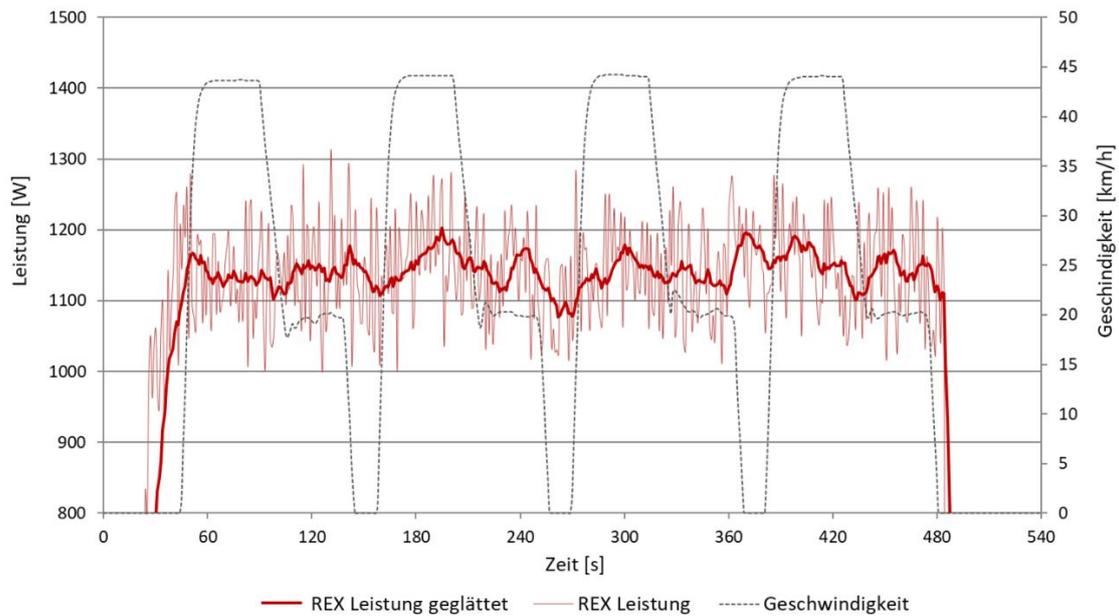


Abbildung 92 : Elektrische Ausgangsleistung der Variante V1

Für die ganzheitliche Bewertung der Variante V1 wird bezüglich Emissionsverhalten auf den Abnahmetest vorgegriffen. Hierbei erweist sich das Emissionsverhalten dieser mager laufenden Abstimmung hinsichtlich CO-Emissionen als hervorragend, wie aus Abbildung 93 hervorgeht. Nachteilig zeigen sich die NO_x -Emissionen, welche mit zunehmender Laufzeit stetig steigen. Dieses, von der Laufzeit abhängige und damit nicht prädiktive Emissionsverhalten erschwert die Auslegung einer geeigneten Abgasnachbehandlung bzw. die Auswahl eines geeigneten Katalysators. Die Ursachen für dieses Verhalten sind divers. Es kann sowohl die steigende Betriebstemperatur des Verbrennungsmotors als auch die von der Temperatur beeinflusste Charakteristik des Generators mit entsprechender Verschiebung der Arbeitslinie für dieses Verhalten verantwortlich gemacht werden. Das bedeutet, dass diese Art der Regelung eine hohe Sensibilität gegenüber Umgebungsbedingungen und Toleranzen aufweist. Diese gilt es durch den neuen Steuerungsansatz zu vermeiden.

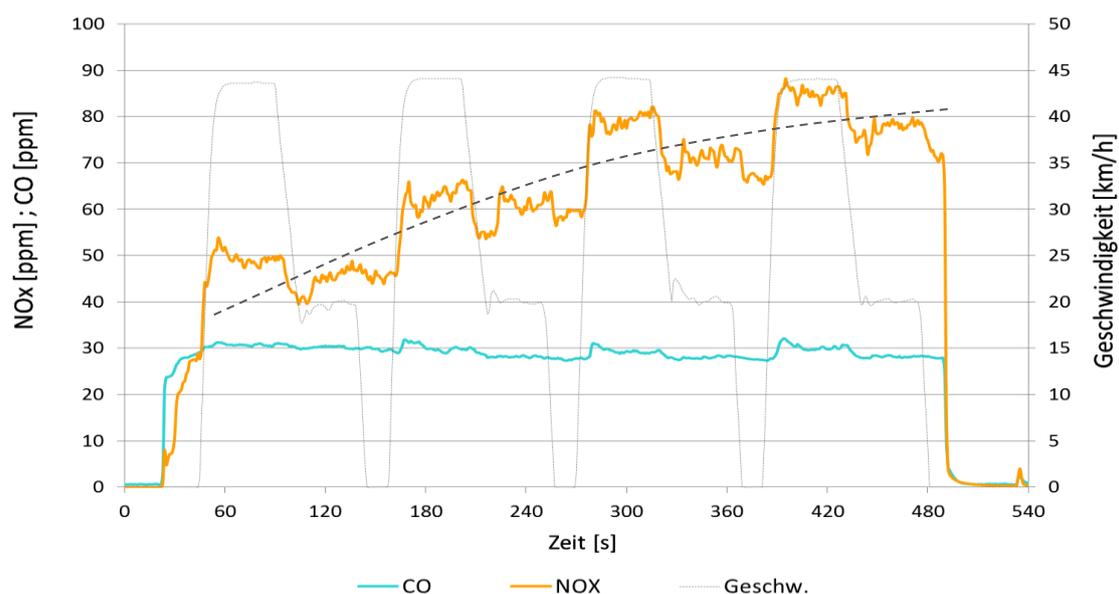


Abbildung 93 : Emissionsverhalten der Variante V1

Zusammengefasst, leiten sich aus den V1-Ergebnissen folgende zu bewertende Merkmale für die Variante V2 ab:

- Drehzahlstabilität auch in ausgezeichneten Betriebszuständen Kaltstart und Warmlauf
- reproduzierbares Emissionsverhalten über die Zyklusdauer
- Geringe NO_x Konzentration
- Leistungsabgabe entsprechend der Auslegung.
- Stabil gegenüber Umgebungsbedingungen und Toleranzen

Für die Variante V2 wurden die Merkmale der Drehzahlstabilität und der Erfüllung der Leistungsanforderung bereits im Entwurf der Steuerung berücksichtigt, weshalb diese als erfüllt gelten können. Das Emissionsverhalten hinsichtlich NO_x-Emission wird im Abnahmetest überprüft, wobei auch die aus dem Systemtest ausstehenden Ergebnisse erfasst und präsentiert werden.

5.4 Abnahmetest

Der Abnahmetest dient dem Nachweis der Erfüllung aller an das System gestellten Anforderungen.

Diese wurden in Kapitel 3.1.1 System Anforderungen wie folgt formuliert:

- CO₂-Reduktion / Wirkungsgrad
- Leistungsgleichheit
- Niedrige Kosten
- Bestmögliche Kundenakzeptanz / -Nutzen
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
 - A- Umweltverträglichkeit (Abgas- und Geräuschemissionen)
 - B- Funktionale Sicherheit
 - C- Allgemeine Anforderungen an die Typgenehmigung

Ergänzend zu diesen haben sich im Zuge der Untersuchungen weitere zu bewertende Merkmale ergeben:

- Absolute Drehzahlstabilität (aus Wirkungsgrad- und Geräuschgründen)
- Prädiktives Emissionsverhalten
- Verminderung von NO_x-Emissionen
- Leistung entsprechend Auslegung

Die Erfüllung dieser Anforderungen können nicht, oder nicht direkt, auf experimentellem Wege nachgewiesen werden. Dies sind neben Kosten und Kundenakzeptanz bedauerlicherweise auch die Umweltverträglichkeitsanforderungen. Letztere setzen einen Auslegungsprozess der Abgasnachbehandlung voraus, welcher nicht im Rahmen dieser Studie durchgeführt werden konnte. Eine Messung mit nicht entsprechender Katalysatorformulierung würde anderenfalls das Ergebnis maßgeblich beeinflussen und eine Aussage des Potentials erschweren.

Der Katalysator ist das aktive Element der Abgasnachbehandlung, welches sich auf das besondere Betriebs- und Abgasverhalten des Verbrennungsmotors auslegen lässt [94]. Zur Auslegung wird das verdünnte Rohabgas im Test modal erfasst und ausgewertet, um daraus die Eigenschaften des zu ergänzenden Katalysators abzuleiten. Durch die virtuelle Implementierung des derart ausgelegten Katalysators können die Emissionen mit Abgasnachbehandlung in einer Nachberechnung ermittelt und die Frage nach der Erfüllung der Umweltverträglichkeitsanforderung zumindest indirekt beantwortet werden. Die Überlegungen

hierzu werden im Abschnitt (5.5 Interpretation der Ergebnisse) beschrieben. Die Diskussion der Kosten und der Kundenakzeptanz bzw. des -nutzens wird hingegen einen Teil des Kapitels Schlussfolgerungen einnehmen.

5.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entspricht den Vorschriften zur Emissionsmessung entsprechend 134/2013 ergänzt um Messmittel zur Erfassung der elektrischen Ausgangsleistung der REX-Einheit und der Batterie.

5.4.2 Durchführung

Der Abnahmetest erfolgt ausschließlich mit Variante V2 entsprechend der Test-Typ I Prüfvorschrift für EURO 4, also im Fahrzyklus ECE R47. Dieser Fahrzyklus bildet den Einsatz dieser Fahrzeugkategorie im verkehrsreichen urbanen Raum durch seine Lastanteile gut ab und wird daher für den Realbetrieb als relevant erachtet. So beginnen die Teilphasen mit einer Vollastbeschleunigung (Ampelstart) gefolgt von einer Teillastphase (Annäherung an ein Stauende) und enden jeweils mit einer Leerlaufphase (Wartezeit). Es werden die Prüfbedingungen für Teilprüfung B mit kaltem Verbrennungsmotor und entleerter Batterie hergestellt. Da die Betriebsstrategie eines Hybrid-Antriebsstrangs erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Prüfung haben kann, sind Überlegungen hinsichtlich der Einflussfaktoren anzustellen und entsprechende Vorbereitungen zu treffen.

5.4.3 Zyklus-optimale Betriebsstrategie

Eine Einflussgröße, welche unter dem Begriff „Betriebsstrategie“ verstanden werden kann ist die Laufzeit der REX-Einheit im Zyklus. Beschränkt man diese so, dass nach Ende des Zyklus eine ausgeglichene Energiebilanz herrscht bzw. ein Wiederstart kurz bevorstünde, lässt sich ein Optimum erzielen. Durch den hierbei einmaligen Start im Zyklus können Wiederstartemissionen gänzlich vermieden werden. Hierzu sind im vorliegenden Fall die Um- und Ausschaltswellen entsprechend einer Energiebilanz zu bestimmen.

Abbildung 94 zeigt das Ergebnis einer zu diesem Zweck durchgeführten Strommessung im Fahrzyklus ECE-R47, bei der der REX-Betrieb durch die Steuerung nach sechs von acht Teilzyklen abgebrochen wird.

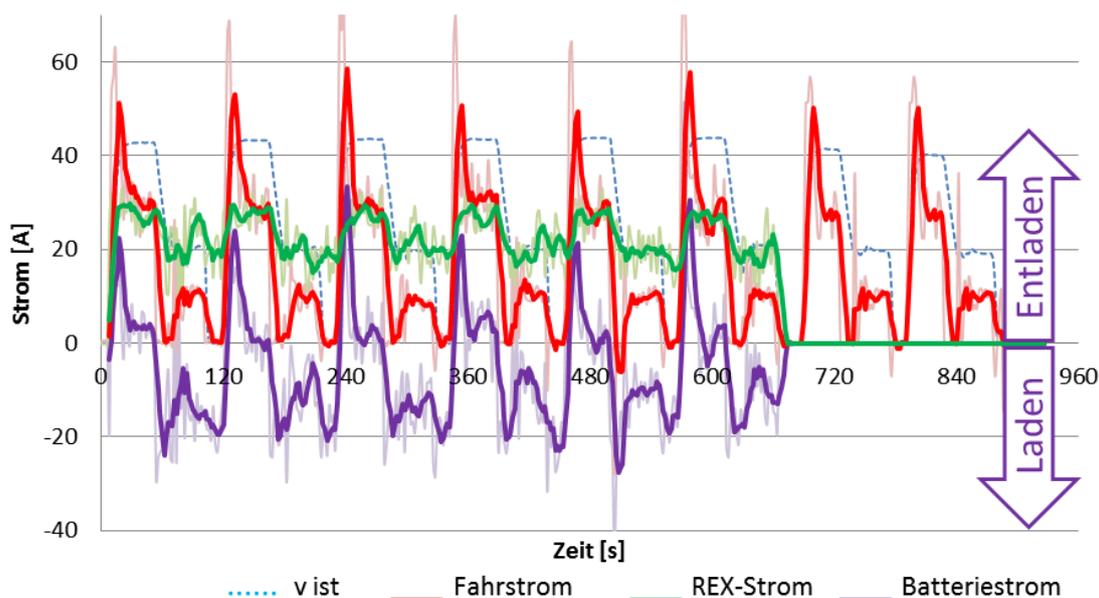


Abbildung 94: Zeitaufgelöster Verlauf des Fahr-, REX- und Batteriestroms im Zyklus–V2

Die rote Linie stellt den Stromverbrauch durch das Fahrzeug –Fahrstrom- dar, welche bei REX-Betrieb überwiegend durch den REX-Strom -in Grün- gedeckt wird. Der Differenzbetrag stellt sich als Lade- bzw. Entladestrom der Batterie –Batteriestrom -in Blau- dar. Hieraus lässt sich eine Ladebilanz in Amperestunden ableiten wie in Abbildung 95 dargestellt.

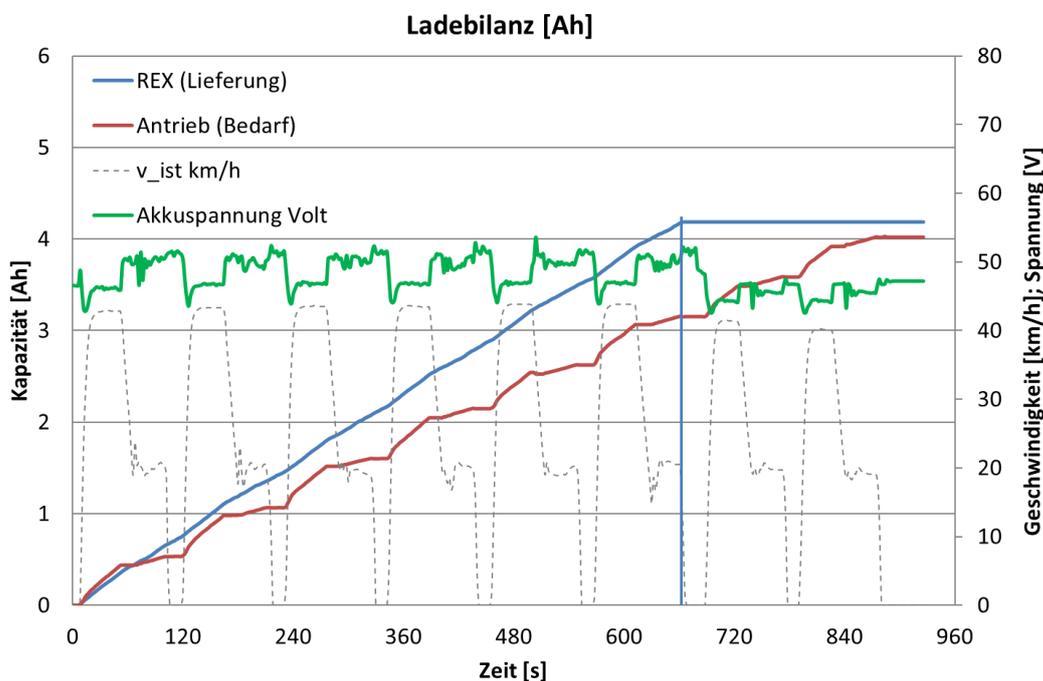


Abbildung 95: Ladebilanz im Zyklus ECE-R47 bei Abschaltung nach 6 Teilzyklen

Aus der Darstellung geht hervor, dass die Ladebilanz während des REX-Betriebs positiv ist. Der Abbruch des REX-Betriebs erfolgt nach dem sechsten Teilzyklus (Sekunde 670) infolge der zusätzlich durch Rekuperation erreichten Spannungsgrenze für das Ausschalten des REX. Diese Rekuperationsphasen scheinen sich für das Abschalten des REX auszuzeichnen, was wiederum für den Realbetrieb bedeutet, dass ein REX-Betrieb im Stillstand des Fahrzeugs nur dann beibehalten wird, wenn dies für den Ladezustand der Batterie zwingend erforderlich ist.

Der bei Abbruch erzielte Ladungsüberschuss reicht für die Bewältigung des restlichen Fahrzykluses aus. Das Ausbleiben eines neuerlichen REX-Starts sowie die ausgeglichene Ladebilanz belegen bereits die optimale Wahl der Ein- und Ausschaltsschwelle sowie der festgelegten Größe der Umschalthyserese zwischen den Leistungsmodi.

Schlussendlichens Aufschluss gibt eine Energiebilanz, Abbildung 96, welche durch Einbeziehung der Spannungslage den Wirkungsgrad des Energiespeichers mitberücksichtigt.

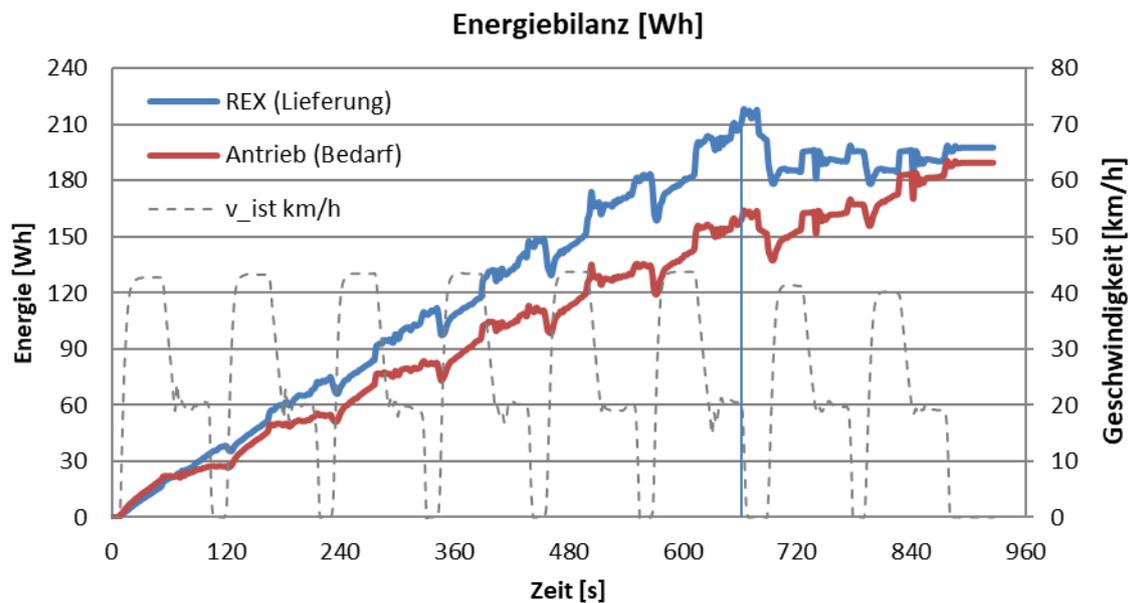


Abbildung 96: Energiebilanz im Zyklus ECE-R47 bei Abschaltung nach 6 Teilzyklen

Die Darstellung zeigt, dass auch die Energiebilanz am Ende geringfügig positiv ausfällt. Kurzzeitige Unterschreitungen (bei Sekunde 840) wirken sich dank der Steuerung nicht mit einem Wiederstart des REX aus. Der einmalige Start und die ausgeglichene Energiebilanz am Ende des Zyklus bestätigen abermals eine optimal definierte Betriebsstrategie.

Für die folgenden Emissionsmessungen bedeutet es, dass das Verbesserungspotential durch Betriebsstrategie bereits ausgeschöpft ist und somit nicht als Optimierungsmaßnahme berücksichtigt werden kann. Einzig das Leistungsniveau des REX kann als Optimierungsmaßnahme geltend gemacht werden. Bedingt durch die Spannungssteuerung und der damit einhergehende bevorzugte REX-Abbruch in Rekuperationsphasen, würden dies jedoch eine mindestens 15%ige Leistungsverbesserung verlangen, wie aus Abbildung 97 hervorgeht. Damit ließe sich die Laufzeit um einen Teilzyklus reduzieren. Das geforderte Leistungsplus ist in Hinblick auf die Emissionen nur durch emissionsneutrale Maßnahmen, wie die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, realisierbar.

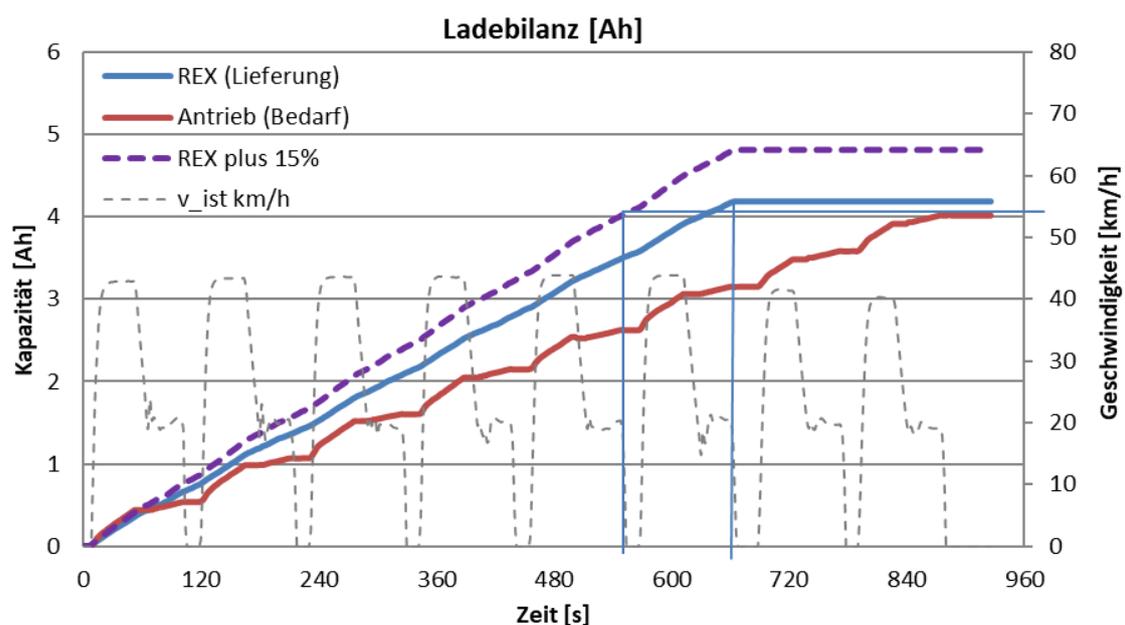


Abbildung 97: Laufzeitverkürzung um einen Teilzyklus durch um 15% leistungsgesteigerte Variante

5.4.4 Experimentelle Ergebnisse – V2

Abbildung 98 zeigt die Drehzahl-, Leistungs- und Spannungsverläufe sowie das Geschwindigkeitsprofil des ECE-R47 Prüfzyklus. Hierbei fällt die erzielte Drehzahlstabilität bereits ab Start auf. Diese zeigt sich trotz Qualitätsregelung unbeeinflusst von Kaltstart und Warmlaufanreicherung. Sie wird über die gesamte Betriebsphase, trotz des transienten Lastverlaufs und unter stark fluktuierender Systemspannung, auf dem Sollwert von 4000 U/min gehalten. Dies macht sich akustisch als unveränderliche Geräuschentwicklung, welche selbst eine Differenzierung der Leistungsmodi nicht wahrnehmbar macht, bemerkbar. Die hervorragende Drehzahlstabilität erleichtert in weiterer Folge die Auslegung der luft- und körperschalldämmenden Maßnahmen und kann somit zur Erfüllung der Geräuschanforderung beitragen.

Die Leistungsmodiwechsel gehen aus dem Leistungsverlauf -REX Leistung- hervor. Dieser lässt auf den komplexen Zusammenhang zwischen der mechanischen Leistungsanforderung des Fahrzyklus und dem batteriebedingten Leistungsfluss im Hybridsystem schließen. Mit zunehmender Batterieladung nehmen die Anteile des leistungsreduzierten Modes 2 zu, was hinsichtlich dessen höheren spezifischen Verbrauchs zu vermeiden ist. Es erweist sich folglich als zweckmäßig, den REX-Betrieb auf die Phasen mit niedriger Batteriespannung zu beschränken.

Weiters zeigt sich auch, dass die geforderte Leistung von 1,6 kW nicht erreicht wird. Dies ist einerseits durch den Einsatz des nicht optimierten Generators mit 70%, statt der angenommenen 80% Wirkungsgrad erklärbar und andererseits dem noch bestehenden Leistungsdefizit auf 2 kW des verwendeten Verbrennungsmotors zuzuschreiben.

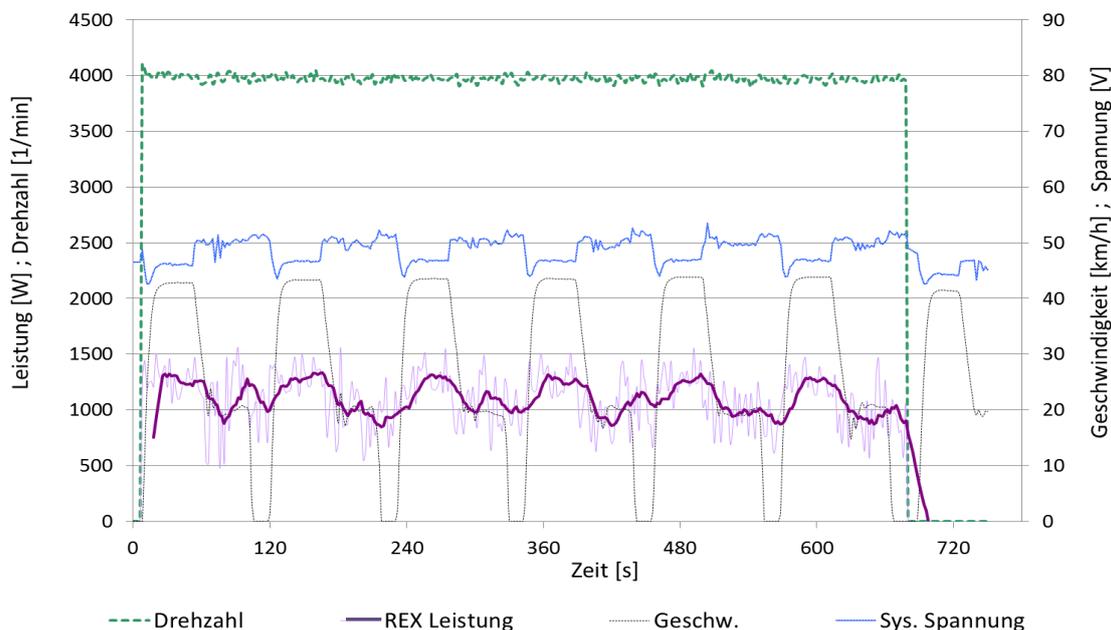


Abbildung 98: Drehzahl-, Leistungs- und Spannungsverlauf im Zyklus ECE-R47

Abbildung 99 stellt den modalen Verlauf der limitierten Abgaskomponenten HC, CO und NO_x des verdünnten Rohabgases dar. Die jeweiligen Leistungsmodi sind an den Emissionsniveaus deutlich identifizierbar und nehmen trotz veränderlicher Betriebsbedingungen, z.B. durch steigende Temperatur, wiederholbare Werte an. Die nur geringfügig abweichenden Werte in der Anfangsphase bis Sekunde 100 zeigen, dass die Applikation der Kaltstart- und Warmlaufphase hinreichend gut gelungen ist.

Ab Sekunde 540 zeigt sich eine zeitliche Anteilszunahme des Mode 2-Betriebs, welcher das Erreichen des oberen Spannungsschwellwertes andeutet und schlussendlich zum Ausschalten des REX führt. Die HC-Emissionen sind, mit Konzentrationen um 2500 ppm im Mode 1 und ca. 1800 ppm im Mode 2, zweitaktspezifisch hoch, was in erster Linie den Spülverlusten zuzuschreiben ist. Die identifizierten Optimierungsmaßnahmen (4.3.2.8 Optimierungspotential) und die dadurch möglich erscheinende Reduktion der Spülverluste um 16 – 25 % bleiben bei dieser Messung unberücksichtigt.

Die geforderte niedrige NO_x Konzentration beziffert sich je nach Leistungsmodus mit stabilen 25 ppm für Mode 1, respektive <15 ppm für Mode 2.

Die CO-Konzentration ist im mageren Mode 2 erwartungsgemäß verschwindend gering. Im fett abgestimmten Mode 1 werden hingegen Werte um 1200 ppm erreicht.

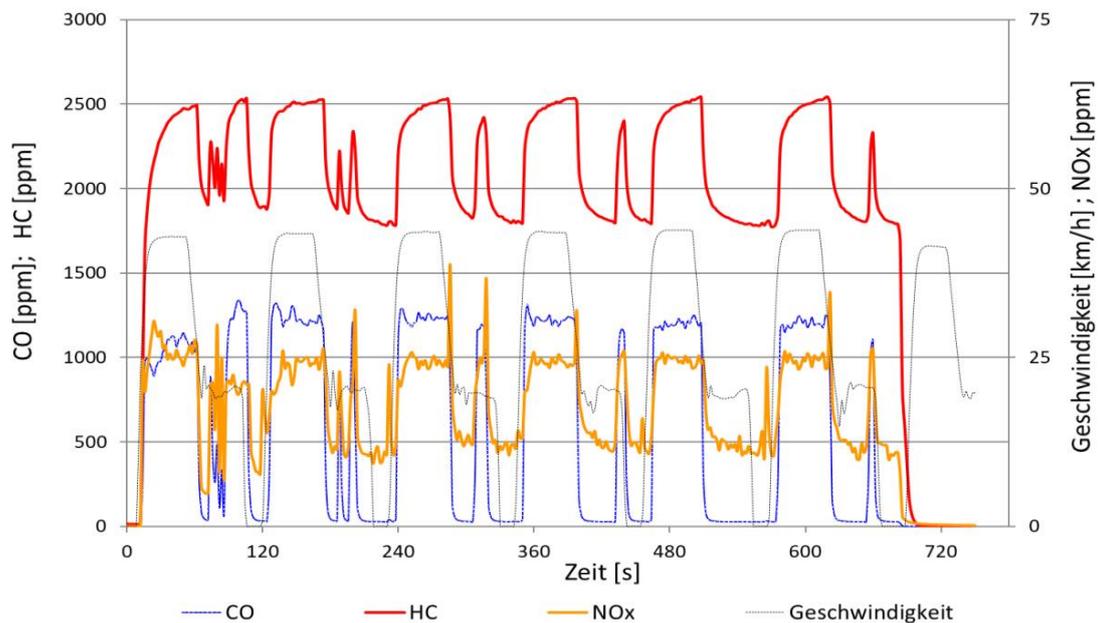


Abbildung 99 : Verlauf der gemessenen Abgaskomponenten HC, CO, NO_x im Fahrzyklus ECE-R47

Das Ergebnis der Zyklusauswertung dieser Variante ohne Abgasnachbehandlung ist in Tabelle 10 zusammengefasst. In der Rohwert-Spalte sind die Ergebnisse der Auswertung nach Verordnung und in der Hybrid-Spalte jene nach der Anwendung der für Hybride geltenden Berechnungsformel, jeweils in Prozent vom geltenden Grenzwert für die Einzelkomponenten gelistet.

Tabelle 10 : Ergebnis der Auswertung ohne Abgasnachbehandlung für EURO 4 Grenzwerte

% vom Grenzwert	Rohwert	Hybrid
HC	1328%	209%
CO	446%	121%
NO _x	115%	47%
Verbrauch		
gCO ₂ /km	61,7	9,72
l/100km	2,66	0,419

Der Verbrauch im Zyklus liegt mit 2,66 l/100km, respektive 61,7 gCO₂/km, trotz vergleichbarer Betriebsstrategie deutlich über dem Ergebnis der LDRwSim (4.1.4 Wirkungsgradanalyse) mit 1,57 l/100km. Eine Erklärung hierfür wird im Zuge der Ergebnisdiskussion gegeben.

5.5 Interpretation der Ergebnisse

Die bisher gezeigten Ergebnisse bilden die Charakteristik des Systems und seiner Einzelkomponenten - Motor, Generator und Hybridsteuerung - ab, lassen jedoch noch keinen Schluss über den Erfüllungsgrad der hinsichtlich CO₂ und Emissionen gestellten Anforderungen zu. Deshalb wird auf Basis dieser Ergebnisse eine virtuelle Abgasnachbehandlung implementiert. Hierzu sind die weiteren ergebnisbeeinflussenden Faktoren festzulegen bzw. zu berücksichtigen.

Dies sind:

- Das Verhalten der Abgasnachbehandlung hinsichtlich Kat-Light-off und Konvertierungsrate
- Die Auswirkung des bestehenden Wirkungsgrad- und Leistungsdefizits

5.5.1 Rechnerische Implementierung einer virtuellen Abgasnachbehandlung

Die in beiden Betriebspunkten wiederholbaren Emissionsergebnisse verdeutlichen die Stabilität des Emissionsverhaltens dieser Steuerungsvariante. Diese ist wiederum Voraussetzung für die Auslegung der Abgasnachbehandlung bzw. der Formulierung der Eigenschaften eines geeigneten Katalysators. Das gleichzeitige Auftreten von NO_x und CO Emissionen im Mode 1-Betrieb legt die Verwendung eines 1-Bettkatalysators nahe. Dieser ist dank der Reduktions- und Oxidations-Reaktion in der Lage, beide Komponenten zu verringern. Der hohen Kohlenwasserstoff-Emission in beiden Betriebsmodi ist hingegen zweckmäßigerweise mit einem reinen Oxidationskatalysator und gegebenenfalls mit einem Sekundärluftsystem zu begegnen.

Der Katalysator muss daher hauptsächlich oxidierende aber auch in geringerem Maße reduzierende Wirkung haben. Die hohen umzusetzenden HC-Emissionen und die damit entstehende Wärme fordern einen hinreichend großen Katalysator oder entsprechend gute Wärmeabfuhr, wofür durch dessen Anordnung im Abgassystem zu sorgen ist. Beides ist jedoch nachteilig für eine kurze Light-off- Zeit. Hier muss ein Kompromiss aus thermischer Stabilität und kurzer Aufheizzeit gefunden werden.

Für die weitere Berechnung der Zyklusemissionen mit Abgasnachbehandlung wird eine, aus EURO 3 Fahrzeugvermessungen abgeleitete, praxisnahe Katalysator-Light-off-Zeit von 100 Sekunden angenommen. Nach dieser inaktiven Zeitspanne nähert sich die Konvertierungsrate asymptotisch ihrem Maximalwert, wobei ein hyperbolischer Verlauf mit $1/t^3$ angenommen wird. Entsprechend der vorhergehenden Überlegungen werden die maximalen Konvertierungsraten für die Komponenten HC und CO mit 80% und für NO_x mit 20% begrenzt. Der virtuelle Katalysator sei im Folgenden nach der Light-off-Zeit, der HC und CO sowie der NO_x Konvertierungsrate mit 100-80-20 bezeichnet. Abbildung 100 stellt die angenommenen Verläufe grafisch dar. Die Durchschlagsrate stellt als Kehrwert der Konvertierungsrate jenen Massenanteil der limitierten Abgaskomponente dar, welcher nicht katalytisch nachbehandelt werden.

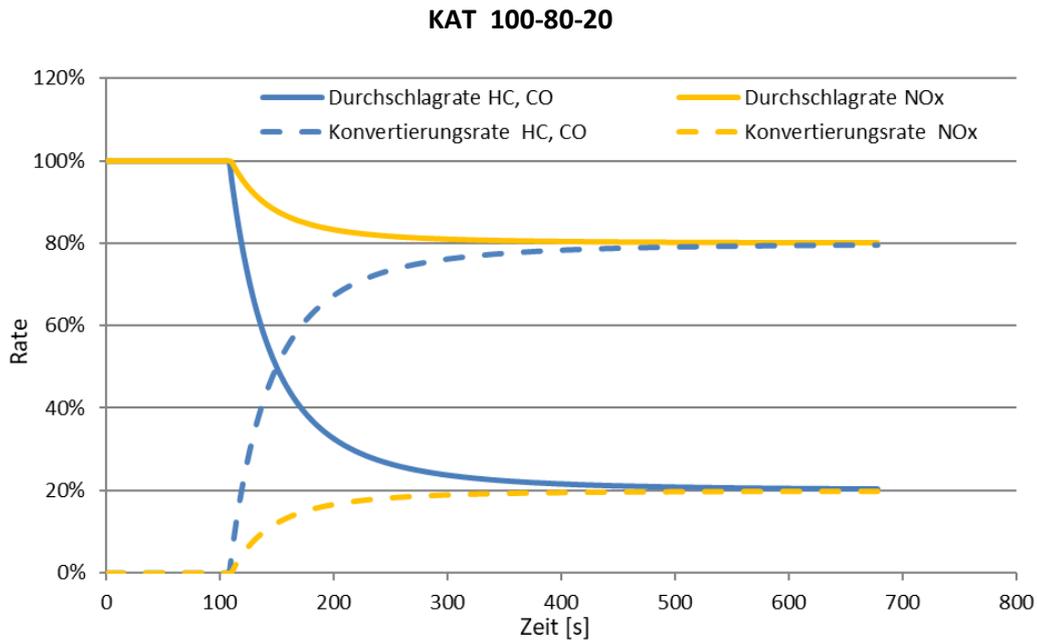


Abbildung 100 : Verlauf der angenommenen Konvertierungs- bzw. Durchschlagrate für eine Abgasnachbehandlung mit 100-80-20 Eigenschaft

Ableitung eines Prüfergebnisses für EURO 4

Das mit einer derartigen Abgasnachbehandlung zu erwartende Emissionsverhalten wird auf Basis der zeitlich aufgelösten Messwerte rechnerisch ermittelt. Hierzu werden die Emissionswerte durch Multiplikation mit der Durchschlagrate ebenso modal errechnet. Abbildung 101 zeigt den sich hierdurch ergebenden Verlauf für die Einzelkomponenten.

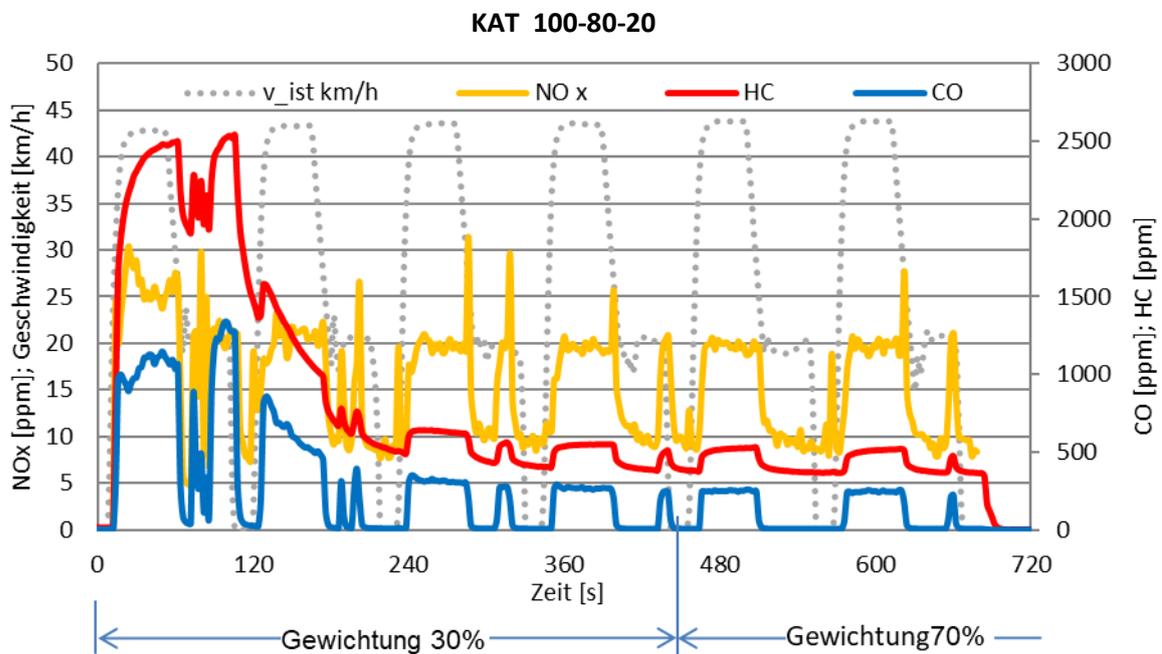


Abbildung 101 : Verlauf der HC-, CO-, und NO_x-Emissionen mit virtueller Abgasnachbehandlung 100-80-20 im Fahrzyklus ECE-R47

Erwartungsgemäß wird der Hauptteil der Emissionen in den ersten 100 Sekunden vor Kat-Light-off generiert. Die Auswertung entsprechend EURO 4 Abgasnorm ergibt, unter Berücksichtigung der Gewichtung 30% Kaltstartphase und 70% Warmbetriebsphase, der

Hybridbewertungsformel und der bei Anwendung einer Abgasnachbehandlung zu berücksichtigenden Verschlechterungsfaktoren - DF (Deterioration Factor), die in Tabelle 11 zusammengefassten Ergebnisse. Die mit „Rohwert“ bezeichnete Spalte enthält das Ergebnis der Teilprüfung B (mit leerer Batterie) nach dem Verfahren gültig für konventionelle Fahrzeugvariante mit rein verbrennungsmotorischem Antrieb. Die Hybrid-Spalte enthält das Ergebnis nach Anwendung der Hybridformel für die Hybridvariante. Für diese Werte wird die emissionslose Wegstrecke aus Teilprüfung A (rein elektrisch) mitberücksichtigt. Da das EURO 4 Regulatorisch bereits Dauerhaltbarkeitsanforderungen durch festgelegte Deteriorationsfaktoren (DF) stellt, sind diese in der DF-Spalte ausgewiesen und in der „mit DF“ bezeichneten Spalte als Ergebnis der Prüfung enthalten.

Tabelle 11 : Ergebnis der Emissionsnachberechnung für EURO 4 mit Kat 100-80-20

% vom Grenzwert	Rohwert	Hybrid	DF	mit DF
HC	391,8%	61,7%	1,2	74,0%
CO	147%	23,2%	1,3	30,1%
NO _x	87,7%	13,8%	1,2	16,6%

Es zeigt sich, dass die EURO 4 Grenzwerte bereits mit einem Katalysator mit moderater Konvertierungsrate und geringem Anspruch an Aufheizdauer deutlich unterschritten werden können. Im Falle der NO_x Komponente kann entgegen der Annahme sogar auf eine reduzierende Maßnahme verzichtet werden, womit ein reiner Oxidations-Katalysator, eventuell kombiniert mit einem einfachen Sekundärluftsystem, eingesetzt werden kann.

Die Auswertung hinsichtlich des Verbrauchs ergibt die in Tabelle 12 gezeigten Werte für den betrachteten Zyklus und für die Hybridbewertung in g CO₂/km bzw. in l/100km. Der in der Zyklus-Spalte stehende Wert entspricht jenem der Messung ohne Abgasnachbehandlung, wiederum unter der Annahme, dass durch Ergänzung einer solchen keine Verbrauchsnachteile entstehen.

Die sich durch die EURO 4 Gewichtung 30/70 und die Hybridformel ergebenden Werte sind in der Hybrid-Spalte zu finden.

Tabelle 12 : Verbrauch EURO 4

Verbrauch in	Zyklus	Hybrid
gCO ₂ /km	61,7	9,72
l/100km	2,66	0,419

Der Zyklus-Verbrauchswert unterscheidet sich beträchtlich vom Ergebnis der LDRwSim mit 1,57 l/100km. Die Gründe hierfür werden später im Zuge der Diskussion der Ergebnisse erörtert.

Ableitung eines Prüfergebnisses für EURO 5 auf Basis ECE-R47²³

Für die zukünftige EURO 5 Abgasnorm wird neben deutlich reduzierten Grenzwerten auch ein neuer Prüfzyklus WMTC Phase 3 festgelegt. Da dieser bis dato 2017 noch einer Ratifizierung durch den Rat der Europäischen Kommission auf Basis des noch ausstehenden Berichts bedarf, werden zunächst die bisherigen Zyklusergebnisse des Fahrzyklus ECE-R47 hinsichtlich der vorgeschlagenen EURO 5 Grenzwerte untersucht. Die dafür erlaubten Maßnahmen werden auf die Abgasnachbehandlung begrenzt, wobei sich die notwendigen Konvertierungsraten bei Annahme einer realisierbaren Light-off-Zeit ergeben. Als realisierbare Katalysator-Light-off-

²³ ECE-R47 vorgeschriebener Prüfzyklus für EURO 4

Zeit wird, bei Annahme einer motornahen Positionierung, der Anwendung einer Heizstrategie und dem Umstand, dass der Start im hohen Leistungsmodus erfolgt, 20 Sekunden angenommen.

Tabelle 13 stellt die Ergebnisse der Berechnung, ausgehend von dem für EURO 4 bestimmten Katalysator, dar. Es gilt wiederum die festgelegte Nomenklatur für die Bezeichnung des Katalysators.

Tabelle 13 : Emissionsergebnis für EURO 5 anhand ECE-R47 Fahrzyklus

Kat. Typ	100-80-20		20-97-00			
	Rohwert	Hybrid	Rohwert	Hybrid	DF	mit DF
HC	2468%	388,7%	497%	78%	1,2	93,6%
CO	147%	23,15%	70%	11%	1,3	14,3%
NO _x	248%	39,1%	377%	59%	1,2	70,8%

Das Ergebnis zeigt, dass eine Einhaltung der EURO 5 Grenzwerte selbst unter Einbeziehung der Verschlechterungsfaktoren bei einer durchaus realisierbaren HC-, CO-Konvertierungsrate von max. 97% gelingen kann. Unsicherheiten ergeben sich durch den für EURO 5 geänderten Fahrzyklus WMTC Phase 3 und bezüglich des nicht unerheblichen Einflusses der Betriebsstrategie, welche im Vorfeld für den Prüfzyklus ECE-R47 optimiert wurde.

Ableitung eines Prüfergebnisses für EURO 5 und WMTC Phase 3

Die Betriebsweise der REX-Einheit wird vom Lastkollektiv des Fahrzyklus beeinflusst. Dies erfordert einige Festlegungen. Das Rechenmodell für die Vorhersage der sich ergebenden Betriebsweise enthält folgende den Subsystemen zugeordnete Parameter:

Hybridsteuerung

- Die Betriebsstrategie, bestimmt durch die Spannungsniveaus für Ein- und Ausschalten sowie für das Umschalten zwischen den Leistungsniveaus
- Als Ergänzung die Zeitfaktoren (T_EIN und T_AUS) im Fall der Unterschreitung des Einschalt- bzw. der Überschreitung des Ausschaltkriteriums. Diese sind entsprechend des untersuchten Batteriesystems (Pb oder Li) auf zeitliche und betragliche Zulässigkeit zu bestimmen

Batterie

- Lade-/Entladekennlinie zur Bestimmung des Ladungsniveaus für den unbelasteten Fall.
- Batterieinnenwiderstand zur Charakterisierung der Spannungsantwort auf die Last
- Der Lade-/Entladewirkungsgrad (70% für Blei-Batterie, 90% für Li-Ionen)

REX Einheit

- Die elektrische Ausgangsleistung im jeweiligen Leistungsmodus (1400 W für Mode 1 und 800 W für Mode 2) bestimmt durch Motorleistung (1,8 kW und 1 kW) und Übertragungswirkungsgrad

Verbrennungsmotor

- Der spezifische Verbrauch im jeweiligen Leistungsmodus (470g/kWh bei 1,8 kW für Mode 1 und 600g/kWh bei 1 kW für Mode 2)
- Die Emissionen im jeweiligen Leistungsmodus entsprechend Messung ohne Abgasnachbehandlung

Fahrzeug im Fahrzyklus

- Fahrzeuggewicht und die sich daraus ergebenden Fahrwiderstandsbeiwerte sowie die Massenträgheit für den Leistungsbedarf bei Be- und Entschleunigung
- Rekuperationswirkungsgrad (15%), bestimmt durch den Fahrzyklus, den Wirkungsgrad des Antriebs im Generatorbetrieb und den Ladewirkungsgrad der Batterie als Zwischenspeicher

Unter der Annahme einer unveränderten Betriebsstrategie (in Form der Spannungsniveaus) und unter Berücksichtigung aller oben bezifferter Einflussfaktoren ergibt sich das in Abbildung 102 gezeigte Betriebsverhalten. Das Diagramm zeigt in der oberen Hälfte die zur Steuerung festgelegten Spannungsniveaus und den Verlauf der spontanen und der geglätteten Batteriespannung. Im unteren Abschnitt sind der Geschwindigkeitsverlauf des WMTC Phase 3 und die Betriebszustände des REX anhand der Ausgangsleistung aufgetragen.

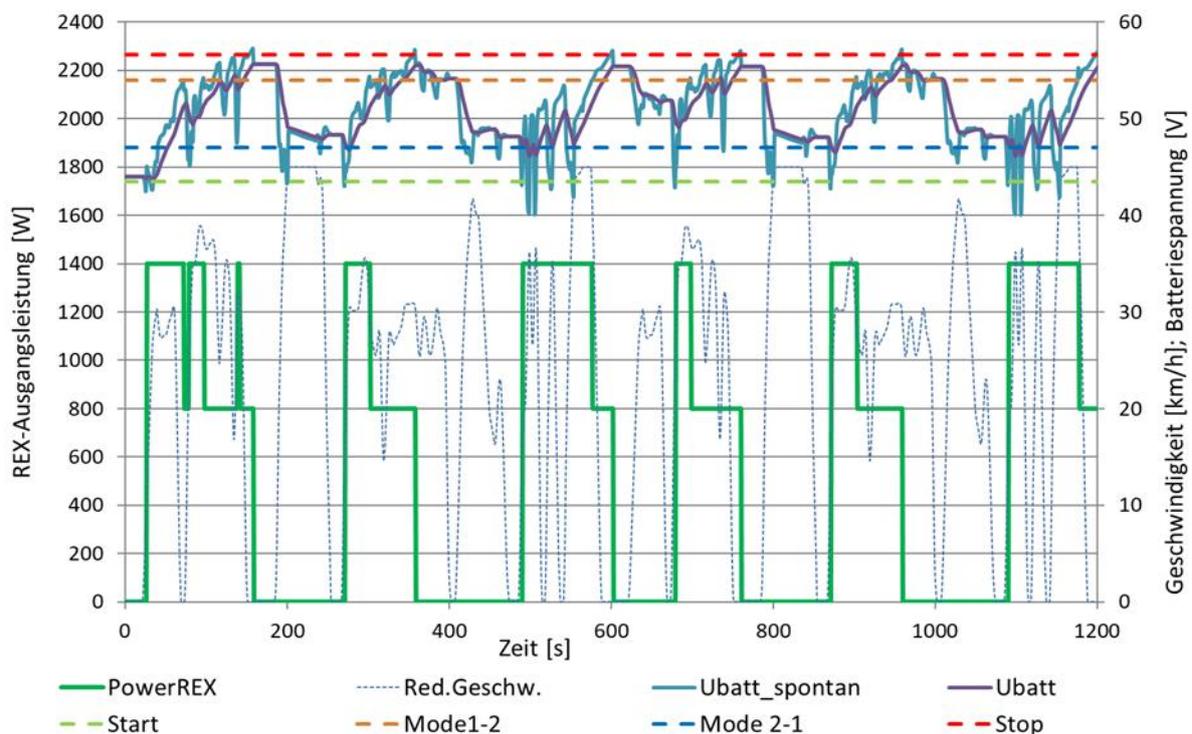


Abbildung 102 : Steuerspannungsverlauf und Schwellwerte und daraus resultierendes Betriebsverhalten im Fahrzyklus WMTC Phase 3 Zyklus

Der WMTC Fahrzyklus ist mit 1200 Sekunden deutlich länger als der ECE-R47 mit 896 Sekunden und durch höhere Transienz im Teillastbereich sowie häufiger auftretende Leerlauf- und Beschleunigungsphasen gekennzeichnet. Daher kommt es bei gleicher Betriebsstrategie zu mehrmalig Starts und Stopps im Zyklus. Diese werden stets durch die lastabhängige spontane Batteriespannung (Ubatt_spontan) ausgelöst. Die der Batterieladung entsprechende Spannung -Ubatt - bleibt dabei auf batterieverträglichem Niveau.

Für dieses Betriebsverhalten lässt sich wiederum die Energiebilanz aufstellen. Die Energieverläufe sind für den Verbrauch durch das Fahrzeug (E-Fahrzeug), die Produktion durch den REX (E-Rex) und die Speicherung durch die Batterie (E-Batterie) in Abbildung 103 dargestellt.

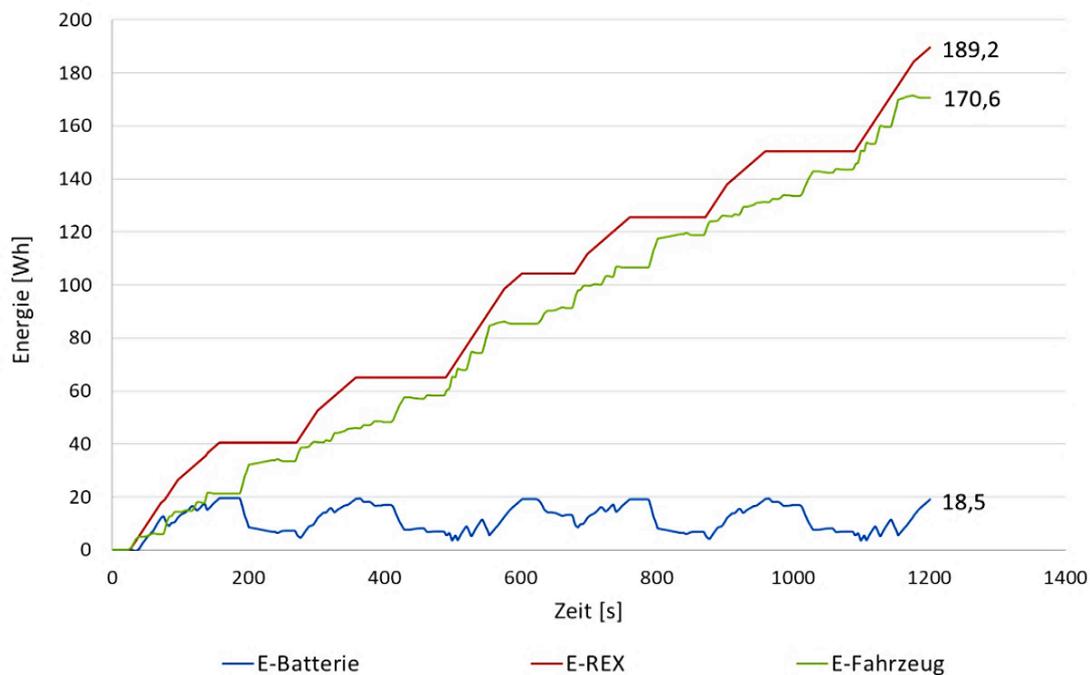


Abbildung 103 :Energiebilanz des Gesamtsystems für den Fahrzyklus WMTC Phase 3

Hier zeigt sich der mehrmalige kurze Betrieb als vorteilhaft, da die in der Batterie vorgehaltenen Energiemengen kleiner ausfallen. Hierdurch werden Ladeverluste vermieden. Dies kann sich für den realen Betrieb (z.B. bei bereits erreichter Lademöglichkeit) als Vorteil erweisen. Der Intervallbetrieb stellt jedoch besondere Anforderungen an das Thermomanagement, um im Fall des Wiederstarts einen Warmstart des Motors und der Abgasnachbehandlung sicherzustellen. Das heißt, Wärmeretention im Falle einer fortgesetzten Fahrt und Kühlung, wenn diese nicht fortgesetzt wird. Dies kann jedoch nur mit elektrischen Nebenaggregaten, Gebläse und/oder Wasserpumpe, realisiert werden.

Dank des stabilen Emissionsverhaltens und der Zuordenbarkeit zu den Leistungsmodi kann der Verlauf der verdünnten Rohemissionen und eine Vorausberechnung des Emissionsverhaltens bzw. des EURO 5 Emissionsergebnisses gewagt werden. Abbildung 104 stellt die Verläufe der Einzelkomponenten des verdünnten Rohabgases über den Zyklusverlauf dar.

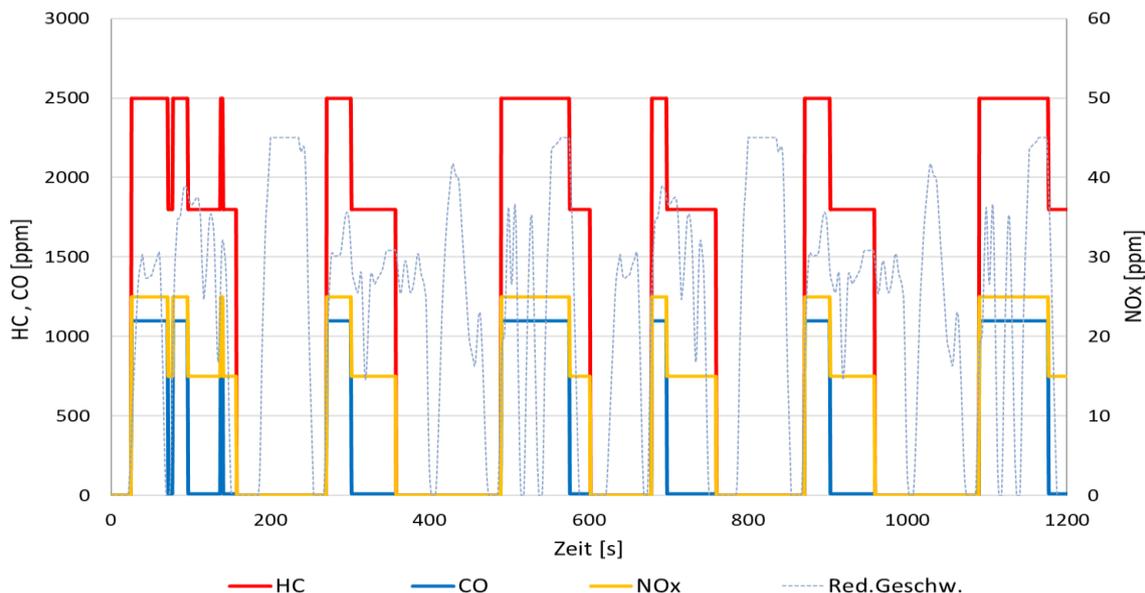


Abbildung 104 : Errechneter Verlauf der verdünnten Rohemissionen HC, CO, NO_x im Fahrzyklus WMTC Phase 3

Für die Berechnung eines EURO 5 Emissionsergebnisses sind weitere Annahmen zum Verhalten der Abgasnachbehandlung zu treffen.

Das sind:

- Katalysator Light-off Zeit bei Kalt- bzw. Warmstart
- Verlauf der Konvertierungsrate bei Kalt- bzw. Warmstart
- Maximale Konvertierungsrate für die Einzelkomponenten

Die Berechnung erfolgt mit dem zuvor bestimmten Katalysator 20-97-00²⁴ (siehe Tabelle 13) und unter der Annahme, dass ein Warmstart ohne Light-off-Verzug bei einer mittleren Konvertierungsrate erfolgt. Um Nachteile durch wiederholte Startphasen zu vermeiden sind der Motor und der Katalysator auf hinreichender Temperatur zu halten. Dies erfordert eine einfache Form von Thermomanagement und gegebenenfalls ein aktiv beeinflussbares Kühlsystem.

Dieses ist im Demonstrator-Fahrzeug in Form eines elektrischen Lüfters verbaut, welcher sich mittels eines ECU-unabhängigen Thermoschalters bei ca. 60°C zu bzw. abschaltet. Bei der Berechnung mit Abgasnachbehandlung wird dies durch Warmstartannahmen im Falle des Wiederstarts berücksichtigt. Abbildung 105 zeigt den Verlauf der Emissionen sowie die über den Zyklus kumulierten Werte als Emissionsergebnis für die nachfolgende Auswertung.

²⁴ 20-97-00: 20 Sekunden Light-off / 97% maximale Konvertierungsrate für HC und CO / 0% Konvertierungsrate für NO_x

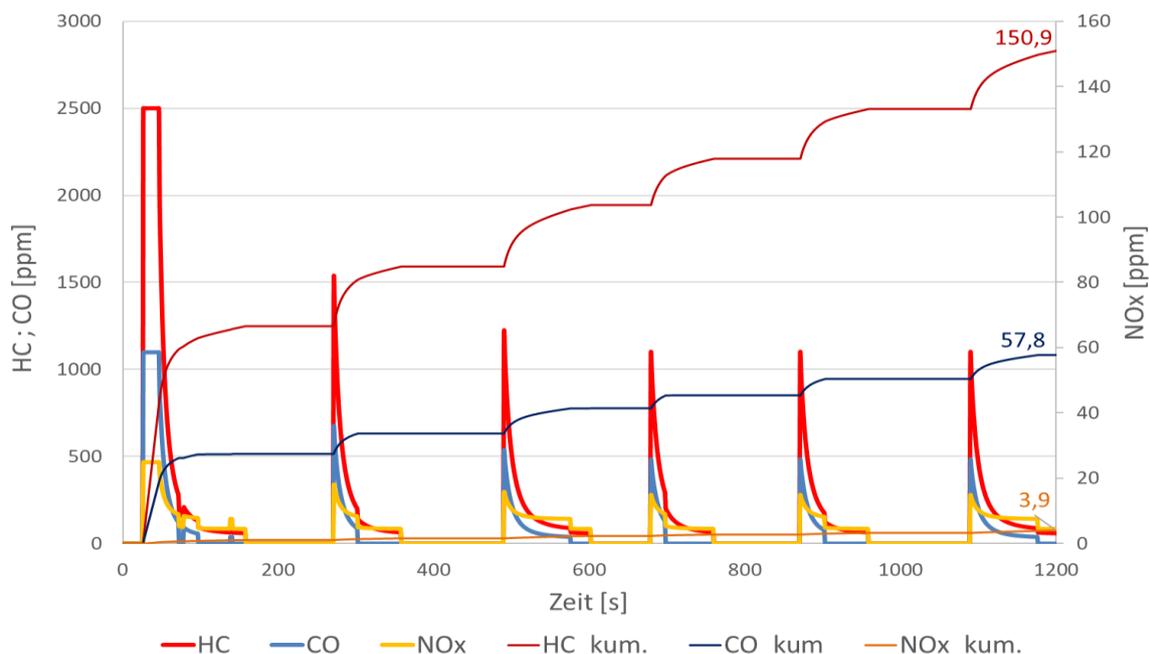


Abbildung 105 : Verlauf der errechneten Emissionen – zeitlich aufgelöst und kumulierte im Fahrzyklus WMTC Phase3

Die Auswertung des Emissionsergebnisses ergibt die in Tabelle 13 gelisteten Werte. Die Standard-Spalte enthält das Ergebnis ohne und die Hybrid-Spalte die Ergebnisse mit Berücksichtigung der Hybridformel. Die mit DF-Spalte enthält die schlussendlichen Ergebnisse unter Einberechnung der mit EURO 5 geänderten Verschlechterungsfaktoren DF.

Tabelle 14 : Ergebnis der EURO 5 Emissionsauswertung

Kat. Typ	20-97-00			
	Standard	Hybrid	DF	mit DF
% vom Grenzwert				
HC	501%	79%	1,3	102,7%
CO	38%	6%	1,3	7,8%
NO _x	157%	24,7%	1,3	32%

Das Emissionsergebnis verfehlt den Grenzwert für HC nur knapp, was angesichts der hohen HC-Rohemissionen des Zweitaktmotors so nicht zu erwarten war. Die Werte von 501% in der Standard-Spalte zeigen jedoch, dass dieses Ergebnis einer Diskussion bedarf.

Der Verbrauch im Zyklus ist durch die mit EURO 5 eingeführte 50/50 Gewichtung neu zu berechnen. Der Verbrauch im betrachteten Teilzyklus B wird anhand des dem jeweiligen Leistungsmodus zuordenbaren spezifischen Verbrauchs errechnet. Daraus ergibt sich der Verbrauch in l/100km im REX-Betrieb. Der Hybrid-Verbrauch errechnet sich wiederum aus der Hybridformel. Tabelle 14 listet die Ergebnisse für beide Betrachtungen sowohl in l/100km als auch in g CO₂/km.

Tabelle 15 : Verbrauch EURO 5

Verbrauch in	Zyklus	Hybrid
g CO ₂ /km	58,4	9,28
l/100km	2,52	0,40

Da beide Werte von einem Realbetrieb abweichen, ist auch hierzu eine Diskussion angebracht.

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Erfüllungsgrad der Emissionsanforderungen

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Emissionsanforderungen für EURO 4 mit diesem Low-Cost-Hybridsystem selbst mit einem Zweitaktmotor der Emissionsstufe EURO 2 und einfacher Abgasnachbehandlung mittels Oxidations-Katalysators sehr gut erfüllt werden können. Die, für konventionelle Zweitaktantriebe schwer zu erfüllende Dauerhaltbarkeitsanforderung an die Abgasnachbehandlung von 11.000 km ist durch dieses Antriebskonzept entschärft. Die Plug-in Fähigkeit in Kombination mit der gewählten Betriebsstrategie, welche den Verbrennungsmotoreinsatz auf ein Minimum begrenzt, sorgt dafür, dass diese Strecke hauptsächlich rein elektrisch zurückgelegt wird. Die Dauerhaltbarkeitsanforderung reduziert sich bei Anwendung des Hybridschlüssels, welcher für diese Fahrzeugklasse 4 km Betriebsdauer des Verbrennungsmotors pro Batterievollladung vorsieht, auf ca. 1900 km. Hinzu kommt, dass die Betriebsweise in diskreten Lastpunkten katalysatorschädliche Betriebszustände, wie z.B. den hoch transienten Wechsel von Vollast in den Schubbetrieb, ausschließt.

Ebenso positiv für ein frühes Kat-Light-off erweist sich der vorgesehene Start im hohen Leistungsmodus, wird doch der Hauptteil der Emissionen in eben dieser Kaltstartphase emittiert. Deshalb gilt die für die Berechnung des EURO 5 Emissionsergebnisses im WMTC Phase3 getroffene Annahme einer Light-off Phase von 20 Sekunden als realisierbar. Demzufolge sind auch die Ergebnisse hinsichtlich der EURO 5 Fähigkeit dieses Konzeptes positiv.

Die im Zuge dieser Berechnung mit Bedacht getroffenen Annahmen bezüglich Thermomanagement und Betriebsstrategie können bei Weiterentwicklung oder zukünftiger Umsetzung als Entwicklungsziele formuliert werden.

6.2 CO₂ Reduktionsziel

Das Hybridkonzept nutzt den hohen Tank-to-Wheel Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs dank der Betriebsstrategie bestmöglich aus. Ebenso ergeben sich CO₂-Vorteile aus dem drehzahlkonstanten Betrieb, da hierdurch Beschleunigungsverluste, welche durch den Generator nur im Ausmaß seines Wirkungsgrades rekuperiert werden können, gänzlich vermieden werden.

Der gemessene Verbrauch im Teilzyklus B liegt trotz des schlechteren Transmissionswirkungsgrades auf dem Niveau eines konventionellen Scooters [95]. Die Abweichung vom vorausberechneten CO₂-Reduktionspotential mittels LDyRwSim lässt sich durch die identifizierten und am Versuchsträger bestehenden Wirkungsgraddefizite erklären. Diese setzen sich aus den differierenden Wirkungsgraden für den Generator (- 10 Prozentpunkte) und der Verbrennungskraftmaschine (-5 bis -9 Prozentpunkte je nach Leistungsmodus) gegenüber den Annahmen für die Simulation zusammen. Die Untersuchung der Optimierungspotentiale (Kapitel 4.3.1.5 und 4.3.2.) dieser Komponenten zeigt, dass besonders bei der Verbrennungskraftmaschine eine deutliche Verbesserung möglich ist.

6.3 Konsequenzen

Verbrennungsmotor

Auf der Motorseite sind Wirkungsradverbesserungen nötig und möglich, da sich ein spezifischer Verbrauch von 470g/kWh respektive 600g/kWh keinesfalls als ein Optimum darstellt. Möglich werden sie bei Beibehalt des Zweitaktprinzips durch spülverlust- und damit verbrauchsminimierende Maßnahmen im Rahmen des Kostenkriteriums.

Hierzu bieten sich für zukünftige Emissionsstufen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen an. Als passive Maßnahme sei hier die Spülvorlage, welche sich bei Drehzahlkonstanz gut abstimmen lässt [83], genannt. Als aktive Maßnahmen lässt sich die mit niedrigeren Kosten verbundene Niederdruck-Direkt-Einspritzung [81] nennen. Letztere ließe sich auf dem bestehenden Motor relativ kostenneutral durch Positionierung der ohnehin vorhandenen Einspritzdüse Richtung Brennraum realisieren. Hierbei kann die drosselfreie Qualitätsregelung weiterhin angewendet werden.

Der Wechsel auf einen allgemein wirkungsgradhöheren Viertaktmotor war durch die Hubraumbegrenzung und die für Leistungsgleichheit notwendige höhere Drehzahl sowie den höheren Platzbedarf und Gewicht bei der Wahl der Antriebsmaschine ausgefallen. Für abermals verschärfte Emissions- und eventuell CO₂-stufen kann er jedoch in Betracht kommen. Von Seiten der vorgeschlagenen Hybridsystemsteuerung ist die Art der Kraftquelle irrelevant, solange sich diese auf zwei diskrete Lastpunkte einstellen lässt. Dies ist beim Viertaktmotor allerdings nicht mit Qualitäts- sondern nur durch Quantitätsregelung möglich. Dank der auf zwei Lastpunkte reduzierten Anforderung kann dies auch gut mit einem auf zwei Positionen schaltbaren Drosselorgan im Kostenrahmen realisiert werden.

Generator

Auch auf Generatorseite lassen sich dank des drehzahlkonstanten Konzeptes Verbesserungen, über die bisher genannten, erzielen. Der für die Untersuchung verwendete Generator hat einen Klauenpolläufer als Rotor, welcher laut Herstellerangaben bis zu einer Höchstdrehzahl von 18.000 U/min betrieben werden kann. Er weist deshalb einen größeren Luftspalt für die Ausdehnung des Rotors infolge Fliehkraft auf. Durch die Reduktion bzw. Optimierung dieses Luftspalts für die Betriebsdrehzahl von 6500 U/min ließe sich zusätzlich eine Wirkungsgradverbesserung erzielen. Ein Ersatz der Fremderregung, welche sich auf ca. 36 W, beziffert, bietet sich hingegen nicht an, da diese das für die Steuerung genutzte Stellglied darstellt.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Hybridisierung

Mit dem neuen Hybrid-Steuerungssystem wurde eine Möglichkeit geschaffen auch im preissensiblen Segment der kleinen Fahrzeugklassen die Vorteile der Hybridisierung nutzbar zu machen. Damit ergibt sich eine Lösung den anstehenden Herausforderungen hinsichtlich Emissionen marktgerecht zu begegnen. Als Alternative zum rein elektrischen Fahrzeug bietet diese Lösung die vom Kunden stets nachgefragte Reichweite und ein gewisses Maß an Unabhängigkeit von der noch sehr dünnen Ladeinfrastruktur. Damit wird den wichtigsten Kaufinhibitoren: Kosten, Reichweitenangst und Abhängigkeit von der schleppend verfügbaren Ladeinfrastruktur begegnet.

Die Emissionsziele sind mit dem Low-Cost-Hybridsystem selbst bei Verwendung eines EURO 2 Zweitaktmotors erfüllbar, da hierdurch die mit der Hybridformel einhergehende Gewichtung und Berücksichtigung der rein elektrischen Reichweite anwendbar ist.

Die Aussage: „Ein Hybridsystem verursacht Mehrkosten durch den doppelten Antriebsstrang“ ist zu relativieren. Geht man vom konventionellen Fahrzeug als Basis aus, mag dies durch die zu ergänzenden elektrischen Komponenten zutreffen. Kann ein konventionelles Fahrzeug die vorgegebenen Verbrauchs- und Emissionsziele nur mehr mit kostenintensiver Komplexität (Steuerung, Variabilitäten und Abgasnachbehandlung) erreichen, ist eine differenzierte Aussage zutreffend. „Ein Hybridsystem senkt die Kosten der Elektrifizierung des Antriebsstrangs“. Dies trifft in besonderem Maße auf das vorliegende Hybridsystem in serieller Konfiguration zu, welches keine zusätzlichen Anforderungen an die rein elektrische Fahrzeugbasis stellt.

7.2 Serielle Konfiguration

Die serielle Anordnung der Energiewandler im Antriebsstrang birgt allgemein Wirkungsgradnachteile gegenüber der parallelen Anordnung. Diese Aussage ist jedoch innerhalb der Randbedingungen unter den gestellten Anforderungen sowie in Hinblick auf den Realbetrieb zu bewerten.

Dies sind:

- Kosten
- drehzahlkonstanter Betrieb
- Steuerungsaufwand
- Wirkungsgrad im Betrieb
- Masse
- Emissionen

KOSTEN

Das in der Konzept- und Entwurfsphase stets beachtete Kostenkriterium hat ein Low-Cost-Hybridsystem hervorgebracht. Die Kosten konnten durch die Verwendung von Komponenten aus der Massenfertigung, sowie durch reduzierte Komplexität niedrig gehalten werden. Durch die Reduktion der Batterie kann sich die geforderte kostenneutrale Lösung gegenüber einem rein elektrischen Scooter ergeben. Ebenfalls kostendämmend hat sich der Verzicht auf einen mechanischen Durchtrieb erwiesen, welcher überdies die vollständige Entkoppelung des Verbrennungsmotorbetriebs vom transienten Fahrzeugbetrieb ermöglicht.

DREHZAHLKONSTANTER BETRIEB

Die mechanische Entkoppelung gestattet es, die Betriebsdrehzahl des Verbrennungsmotors frei zu wählen. In bekannten seriellen Hybridsystemen [96, 97] werden zur Darstellung der benötigten unterschiedlichen Leistungsniveaus unterschiedliche Drehzahlen angefahren. Dies stellt jedoch allgemein ein NVH Problem dar. Ein derart genutzter Drehzahl-Freiheitsgrad erweist sich hinsichtlich der Nutzererwartung und der durch seinen Fahrerwunsch geglaubten Einfluss auf das System als verwirrend. Hierzu kommen Betriebsstrategien zum Einsatz, welche diesem Effekt auch zu Lasten der Systemeffizienz entgegenwirken [98]. Der vorgeschlagene drehzahlkonstante Betrieb vermeidet dies bereits im Ansatz und ermöglicht zusätzlich eine NVH-Optimierung durch Auslegung der vibrations- und schallübertragenden Teile. Eine auf das Anregungsspektrum optimierte Auslegung der Aufhängung und Anbindung sowie eine abgestimmte akustische Kapselung sollte helfen das NVH Verhalten drastisch zu verbessern. Überdies reduziert der drehzahlkonstante Betrieb den Applikationsaufwand auf zwei ausgezeichnete Lastpunkte und ermöglicht eine kompromisslose und hoch optimierte Auslegung der leistungsbestimmenden Gasdynamik (Ansaug- und Abgastrakt sowie Steuerzeiten) auf die gewählte Drehzahl.

STEUERUNG

Die neuartige Steuerung stellt die Drehzahlkonstanz durch die Umkehr des Regelprinzips unter allen Motorbetriebszuständen sicher. Dadurch werden sowohl Produktionstoleranzen als auch atmosphärisch- oder sogar laufzeitbedingte Veränderungen der Motorleistung für den Kunden nicht wahrnehmbar ausgeglichen. Als veränderlich erweist sich die vom Kunden schwer registrierbare Leistungsabgabe.

Das Steuerungskonzept bindet die Batterie aktiv in den Regelkreis mit ein, wodurch es auch auf batteriebezogene Phänomene, wie z.B. Alterung, reagiert. Die zur Steuerung notwendige Hardware beschränkt sich auf einen Drehzahlregler, welcher mittels PWM und elektrischen Stellgliedern (ein Transistor) auf die Erregung des Generators wirkt und zwei Fensterkomparatoren, welche als Hybrid-Steuergerät HCU den Betriebsmodus bestimmen. Die Komplexität ist ebenso wie der Applikationsaufwand auf ein Minimum reduziert. Dennoch bietet die Steuerung Flexibilität. So sind beide Arten der Lastregelung bzw. -einstellung, Qualitäts- oder Quantitätsregelung umsetzbar, womit keine Bindung an eine bestimmte Arbeitsmaschine oder an ein bestimmtes Arbeitsprinzip existiert. Diese Eigenschaft erfüllt das Kriterium der Übertragbarkeit.

WIRKUNGSGRAD

Die serielle Konfiguration geht durch die Verkettung der Wandlungswirkungsgrade naturgemäß mit einem schlechteren Antriebswirkungsgrad einher. Dies gilt jedoch nur im Falle des REX-Betriebs. Deshalb ist die Hybrid-Betriebsstrategie derart konzeptioniert, dass der Verbrennungsmotorbetrieb nur zur Ladungserhaltung genutzt und somit auf ein Minimum reduziert wird. Im Fahrbetrieb soll der erzeugte Strom nicht zum Laden der Batterie, sondern vorteilhaft direkt durch den Antriebsmotor verwendet werden. Der REX-Betrieb bei Fahrzeugstillstand dient nur der Überbrückung kurzer Stopps und zur Vermeidung eines Wiederstarts. Zusätzlich ist der Betrieb des REX durch die Steuerung auf den unteren Bereich des Batterieladezustandes beschränkt, in welchem die höhere Stromakzeptanz bzw. die geringeren Ladeverluste der Batterie genutzt werden. Ein Betrieb ohne Nutzung der externen Lademöglichkeit aus dem Netz ist zwar eingeschränkt möglich, jedoch aus Sicht der Betriebskosten (20 ¢/kWh Energiekosten aus dem Netz gegenüber 80 ¢/kWh bei 1.15 €/l Kraftstoffkosten) nicht zu empfehlen. Der Benutzer wird aus diesem Grund, wenn immer möglich, die externe Lademöglichkeit bevorzugen. Diese beabsichtigte Betriebsweise wird auch durch den Entwurf ohne manuelle Starteinrichtung (z.B. Seilzugstarter) bewusst zum Ausdruck gebracht.

REAL-BETRIEB

Eine Wirkungsgradverbesserung stellt sich im Rahmen des Gesamtsystems bei bevorzugter Nutzung des wirkungsgradhöheren rein elektrischen Fahrbetriebs ein. Dies setzt eine aus dem Netz vollgeladene Batterie voraus. Der REX Betrieb ist für die Erreichung der nächsten Lademöglichkeit (vorhanden und nicht besetzt) vorgesehen und wird nicht zum äußerst verlustbehafteten Aufladen der Batterie genutzt. Der vom Kunden im Realbetrieb erlebte Verbrauch wird deutlich niedriger als die Angaben von ~ 2,6 Liter/100km aus dem Teilzyklus B ausfallen. Im Falle, dass die Verwendung des Fahrzeugs den Betrachtungen der Hybridformel entspricht (4 km Fahrstrecke mit REX je Batterievollladung bzw. 21,4 km rein elektrische Reichweite), ergibt sich der erlebte Verbrauch tatsächlich zu den angegebenen 0,4 l/100km bzw. 9,7g CO₂/km.

Die Angabe von 9,7g CO₂/km vernachlässigen jedoch die CO₂ Emission der Stromerzeugung. Bei einer rein elektrischen Reichweite von 21,4 km je kWh errechnet sich die vernachlässigte CO₂ Emission in g/km auf Basis vom Strommix abhängigen gCO₂/kWh. Bei Energiebezug aus dem heutigen deutschen Stromnetz mit 528 gCO₂/kWh (2015) [99], und unter Berücksichtigung des Ladewirkungsgrades der Batterie von 70%, würde sich dieser mit zusätzlich 35,3 gCO₂/km zu 45 gCO₂/km ergeben. Dies entspricht wiederum einem Benzin-Äquivalent von rund 2 l/100km, einem Wert der auch von Scootern mit 4-Takt und Saugrohreinspritzung EFI²⁵ laut [95] erreicht wird. Wie die Rechnung zeigt, macht der Anteil aus dem Stromnetz den Löwenanteil der CO₂-Bilanz aus, weshalb sich bereits bei rein elektrischer Fahrt eine CO₂-Emission von zuvor berechneten 35,3 gCO₂/km ergibt.

MASSE

Das vorgeschlagene System ist bis zum Erreichen eines niedrigen Batterieladezustands ein reines Elektrofahrzeug mit allen Vorteilen, die diesem zugeschrieben werden. Die zusätzliche Masse durch den REX ist ein allgemein genannter Nachteil eines Hybridfahrzeugs. Diese Zusatzmasse wurde durch die Wahl eines Zweitakt-Motorkonzeptes mit hoher Leistungsdichte und möglichst kleinem, schnelldrehenden Generator so gering wie möglich gehalten und kann bei Einsatz von Bleibatterien (Energiedichte etwa 40 kWh/kg) durch die Reduktion der Batterie kompensiert werden. Bei Lithium-Batterien (Energiedichte etwa 170 kWh/kg) ist hingegen mit Mehrgewicht und Bauraum zu rechnen. Es ist jedoch eine signifikante Kostenüberkompensation zu erwarten.

Die Konzeptionierung der REX-Einheit als Add-on würde eine wahlweise Mitnahme des REX nur bei Bedarf ermöglichen. Dies könnte wenigstens zur gelegentlichen Massenreduktion genutzt werden. Ein wahlweiser Betrieb als rein elektrisches Fahrzeug oder als Hybridfahrzeuge ist in aktuellen Fahrzeugtypisierungs- und Zulassungsvorschriften noch nicht vorgesehen.

EMISSIONEN

Das Hybridsystem betreibt den Verbrennungsmotor mittels Qualitätsregelung gezielt in Bereichen die hinsichtlich NO_x-Bildung unproblematisch sind. Daher genügt ein reiner Oxi-Kat zur Abgasnachbehandlung. Der Start im hohen Leistungsmodus verkürzt die Aufwärmphase und den Light-off, wodurch bereits die wichtigsten Maßnahmen umgesetzt sind. Vorstellbar sind darüber hinaus für zukünftige Emissionsstufen noch eine erweiterte Kaltstartstrategie und, ultima ratio, eine elektrische Vorheizung des Katalysators. Die Batterie ist hierzu ja bereits vorhanden.

²⁵ EFI: Electronic Fuel Injection

7.3 Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeitsbetrachtung umfassen die darzustellende Leistung zur Verwendung in Fahrzeugen höherer Leistungsklassen, die Art der Batterie, aber auch die Austauschbarkeit der Antriebsquelle selbst.

7.3.1 Höhere Leistungsklasse

Das Hybridsystem (-Konzept) war in seiner Funktion in keiner Weise durch die Größe seiner Hauptkomponenten beeinflusst und wäre demzufolge auf andere Leistungsklassen übertragbar. Es ist jedoch zu beachten, dass das Leistungsverhältnis zwischen Antriebsmaschine und Generator stets so zu wählen ist, dass der Generator die Bremsleistung zur Einhaltung der Drehzahlkonstanz erbringen kann. Dies kann bei höherer Leistung zu deutlich größeren und schwereren Komponenten führen. Weiters hat sich die serielle Anordnung hinsichtlich des Transmissionswirkungsgrades, bedingt durch den fehlenden mechanischen Durchtrieb, als nachteilig erwiesen. Bei kleinen Leistungen kann das zur Vermeidung mechanischer Komplexität und Kosten toleriert werden. Eine Auslegung mit höherer Leistung hätte eine ebenso höhere Verlustleistung im Ausmaß des sich ergebenden Wirkungsgrades zur Folge, welche unter Umständen nicht mehr einfach zu kühlen ist. Beschränkt man den Einsatz jedoch auf eine Limp-home-Funktion bis zu einer Geschwindigkeit von 50-60 km/h, so kann mit 2-3 kW elektrischer Ausgangsleistung das Auslangen gefunden werden. Hiermit wäre die Funktion des reinen Range Extenders beschrieben, dessen Ausgangsleistung im Verhältnis zur Antriebsleistung des Fahrzeugs klein ist. Wenn die Batterie die derart begrenzte Leistung aufnehmen kann, könnte sogar auf einen zweiten, reduzierten Leistungsmodus verzichtet werden.

Ein klassischer Range Extender Betrieb, welcher bereits bei hoher Batterieladung für eine Erweiterung der Reichweite sorgt, wird hinsichtlich der gewonnenen Erkenntnisse bezüglich vorgehaltener Batterieladung kritisch gesehen. Dieses Vorhalten geht mit Emissionen einher, die unter Umständen, z.B. bei abgebrochener Fahrt, nicht nötig gewesen wären.

Ebenso erweist sich die Verwendung des REX zur Abfederung von Lastspitzen als nachteilig, da hiermit die Vorteile der Hybridbewertung durch Emissionsanteile in beiden Teilzyklen aufgegeben werden.

Das beschränkt eine sinnvolle Anwendung des Systems auf Fahrzeugklassen, welche vorwiegend im innerstädtischen Bereich und nur äußerst selten oder/und für kurze Strecken auf Schnellstraßen oder Stadtautobahnabschnitten bewegt werden.

Die Nutzung eines Zweitaktmotors wird der Fahrzeugkategorie L, insbesondere der Hubraumklasse unter 150cm³ mit einer Höchstgeschwindigkeit unter 100km/h vorbehalten bleiben. Diese Klasse profitiert vom anzuwendenden Fahrzyklus (nur innerstädtisch) ebenso wie von den geringeren Anforderungen (z.B. OBD 2²⁶) im Vergleich zur PKW-Abgasgesetzgebung.

7.3.2 Andere Motorkonzepte

Der Zweitaktmotor hat trotz seiner beschriebenen Vorteile, hinsichtlich Kosten, Gewicht, und Magerlauffähigkeit, Emissionsnachteile. Diese haben dazu geführt, dass er heute auf dem chinesischen und indischen Markt einem generellen bzw. regionalen Zulassungsverbot unterliegt. Die einzig sinnvolle Alternative stellt auf diesen Märkten der Viertaktmotor dar. Der Viertaktmotor wurde im Zuge dieser Arbeit unter anderem aufgrund der geltenden Hubraumbegrenzung in der untersuchten Fahrzeugklasse L_{e1} ausgeschlossen. Durch den Wegfall dieser Begrenzung in andere Fahrzeugklassen ist die Auswahl, auch im Sinne der

²⁶ OBD 2: On-Board-Diagnosis - Stufe 2

Verfügbarkeit, zu überdenken. Hier kann der Viertaktmotor durch Lambda 1 Betrieb klare Emissionsvorteile generieren. Die hierfür notwendige Quantitätsregelung lässt sich aufgrund der motorseitig vorgegebenen diskreten Leistungsstufen durch Schaltklappen im Luftpfad auf einfacher Weise herstellen. Auf ein vollwertiges E-Gas-System, wie es bei anderen Hybridsystemen Verwendung findet, kann zu Gunsten geringerer Komplexität und Kosten verzichtet werden.

7.3.3 Li-Ionen Batterie

Die Batterie stellt mit ihren Eigenschaften eine Komponente der Steuerung dar. Der untersuchte Hybrid-Scooter war aus erwähnten Kostengründen mit Bleibatterien ausgestattet, weshalb sämtliche Spannungsschwellen anhand dieser bestimmt wurden. Mittlerweile sind selbst in diesen kleinen Fahrzeugen immer häufiger Li-Ionen Batterien verbaut. In leistungsstärkeren Fahrzeugklassen sind sie ausschließlich anzutreffen. Deshalb ist die Eignung der Hybridsteuerung hinsichtlich Li-Ionen Batterien an dieser Stelle zu erörtern.

Eine allgemeine Aussage ist bedingt durch die Vielzahl unterschiedlicher Li-Ionen Batterien schwierig, weshalb die Frage mit Anforderungen an eine solche beantwortet werden muss. Manche Li-Ionen Batterietypen unterscheiden sich in ihrem Lade- und Entladekurven nur unwesentlich von Bleibatterien. Sie weisen eine dem Ladezustand proportionale Ruhespannung auf und zeigen, wenn auch in geringerem Maße, lastbedingte Spannungsreaktionen. Diese eignen sich bei entsprechender Anpassung der Spannungsschwellen und Vorsichtsmaßnahmen, bedingt durch die höhere Sensibilität und engeren Betriebsgrenzen dieser Technologie, für das Steuerungskonzept. Andere Arten von Li-Ionen Batterien z.B. Li-FePO₄, weisen sehr flache Entladungskurven und sehr niedrige Innenwiderstände auf. Dadurch wird eine Detektion des Ladezustandes aus dem Spannungssignal erschwert. Die Li-FePO₄ Batteriechemie erweist sich als weniger geeignet für das vorgeschlagene Regelverfahren.

8 Ausblicke

8.1 Konstruktion

Die im Zuge des Forschungsprojektes, bedingt durch die nicht vorgesehene Verwendung von Prototypen für den Demonstrator, gemachten Kompromisse bei der Auswahl der Einzelkomponenten sowie deren Anordnung wirken sich hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Geräuschemission nachteilig aus. Um die gewonnenen Erkenntnisse und identifizierten Verbesserungspotentiale zu veranschaulichen ergab sich projektbegleitend die Möglichkeit dies für ein Ausstellungsobjekt anlässlich der GreenExpo 2013 [100] in Wien für den Projektpartner Lohnerwerke GmbH durchzuführen.



Abbildung 106 : Einheit aus Motor, Transmission und Generator

Abbildung 106 zeigt die in einem Gehäuse integrierten Hauptkomponenten - Motor, Transmission und Generator. Diese Art der Anordnung erlaubt es den geschilderten Drehzahlkonflikt zwischen Motor und Generator zu lösen und zeichnet sich dennoch durch Kompaktheit aus. Die Kraftübertragung erfolgt formschlüssig mittels Zahnradübersetzung. Diese weist gegenüber der Poly-V Riemen-Übersetzung einen besseren Wirkungsgrad auf und verursacht eine beabsichtigte Drehrichtungsumkehr zwischen Motor und Generator. Durch diese Drehrichtungsumkehr können nach [101] sowohl die durch Drehbewegungsunförmigkeit der Antriebsmaschine hervorgerufenen Drehschwingungen als auch der bei Anlassen und Abstellen entstehende Drehimpuls intern kompensiert bzw. verringert werden. Der

Generator wirkt somit als Ausgleichswelle für Drehschwingungen und verringert die Amplitude der rotatorischen Komponenten der Anregungsquelle für den Körperschall.

Dem Umstand einer für eine Zahnradübersetzung notwendige Schmierung und damit erforderlichen separaten Getriebegehäuse wird in dieser Konstruktion Rechnung getragen. Die Kraftübertragung nimmt einen Teil des Kurbelgehäuses ein und wird platzsparend durch eine verzahnte Kurbelwange und ein Ritzel an der Generatorwelle realisiert. Die Schmierung erfolgt mit dem an entsprechender Stelle dem Kurbelgehäuse zugeführten Zweitakt-Öl.

Die Anordnung der Hauptkomponenten in einem Gehäuse erlaubt weiters einen kommunizierenden Kühlkreislauf für Generator und Motor. Durch die mit 60°C deutlich niedrigere Betriebstemperatur des Zweitaktmotors kann der Temperaturbereich für elektrische Maschinen eingehalten werden. Eine Anordnung der Komponenten im Kühlkreislauf ist in Abbildung 107 dargestellt. Bei Verwendung einer elektrischen Wasserpumpe, welche entsprechend der Motortemperatur geregelt wird, können sowohl die in Kapitel 4.3.3 und 5.5.1 beschriebenen Thermomanagementfunktionen für die Warmlaufphase als auch ein Nachlauf nach Abstellen realisiert werden.

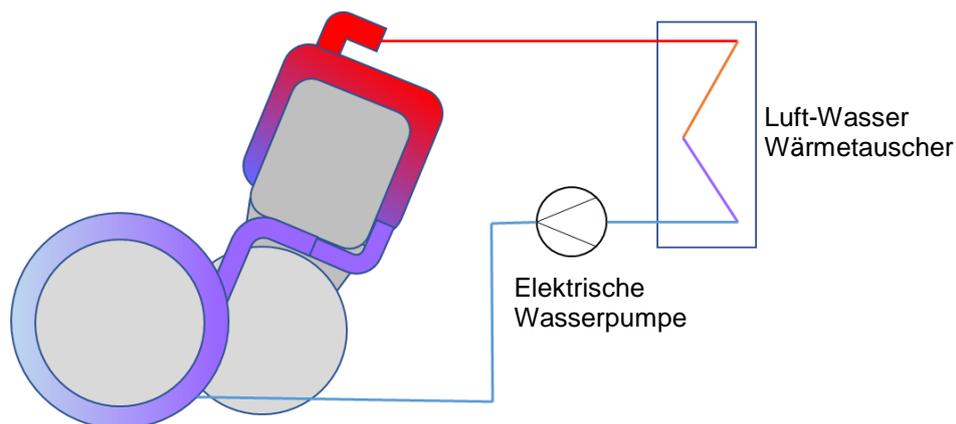


Abbildung 107 : Kühlkreislauf

Der Einsatz einer Wasserkühlung gewährleistet durch die damit erzielbare geringere Temperaturschwankung die thermische Stabilität der Komponenten und wirkt sich darüber hinaus vorteilhaft auf die Geräuschentwicklung aus. Der Wassermantel um den Brennraum dämpft das Verbrennungsgeräusch bereits am Ort der Entstehung und reduziert dadurch die ansonsten zu treffenden Maßnahmen zur Minderung der Luft- und Körperschallübertragung.

Die Kühlung des rotierenden Generator-Rotors, in welchem sowohl elektrische Verluste, verursacht durch die Fremderregung, als auch Eisenverluste, infolge Hysterese und Wirbelstrom, auftreten, kann dank der vorgesehenen Ventilation der Kapsel durch Luftkühlung erfolgen.

Abbildung 108-links zeigt die zum Betrieb notwendigen Anschlüsse der Einheit für Kühlung und Strom sowie die Nebenaggregate Zündspule, Wasser- und Benzinpumpe. Wenn die Anschlüsse hinreichend flexibel ausgeführt werden, kann auch die Einheit elastisch in einer umgebenden Kapsel, Abbildung 108 -rechts, aufgehängt werden.

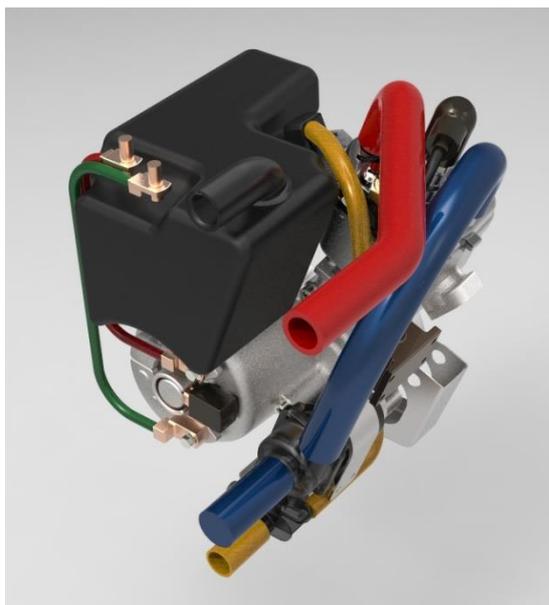


Abbildung 108 : Einheit inklusive Anschlüsse – links
und Einhausung mit Durchführungen – rechts

Hin- und hergehende Massenkräfte werden durch eine möglichst weich gefedert und gedämpfte Aufhängung von der umgebenden Kapsel entkoppelt. Wie aus Abbildung 109 und zugrundeliegender Literatur [102] hervorgeht, ist eine bestmögliche Wirkung durch eine doppelte Kapselung und Lagerung in Kombination mit Dämmmaterialien zu erzielen.

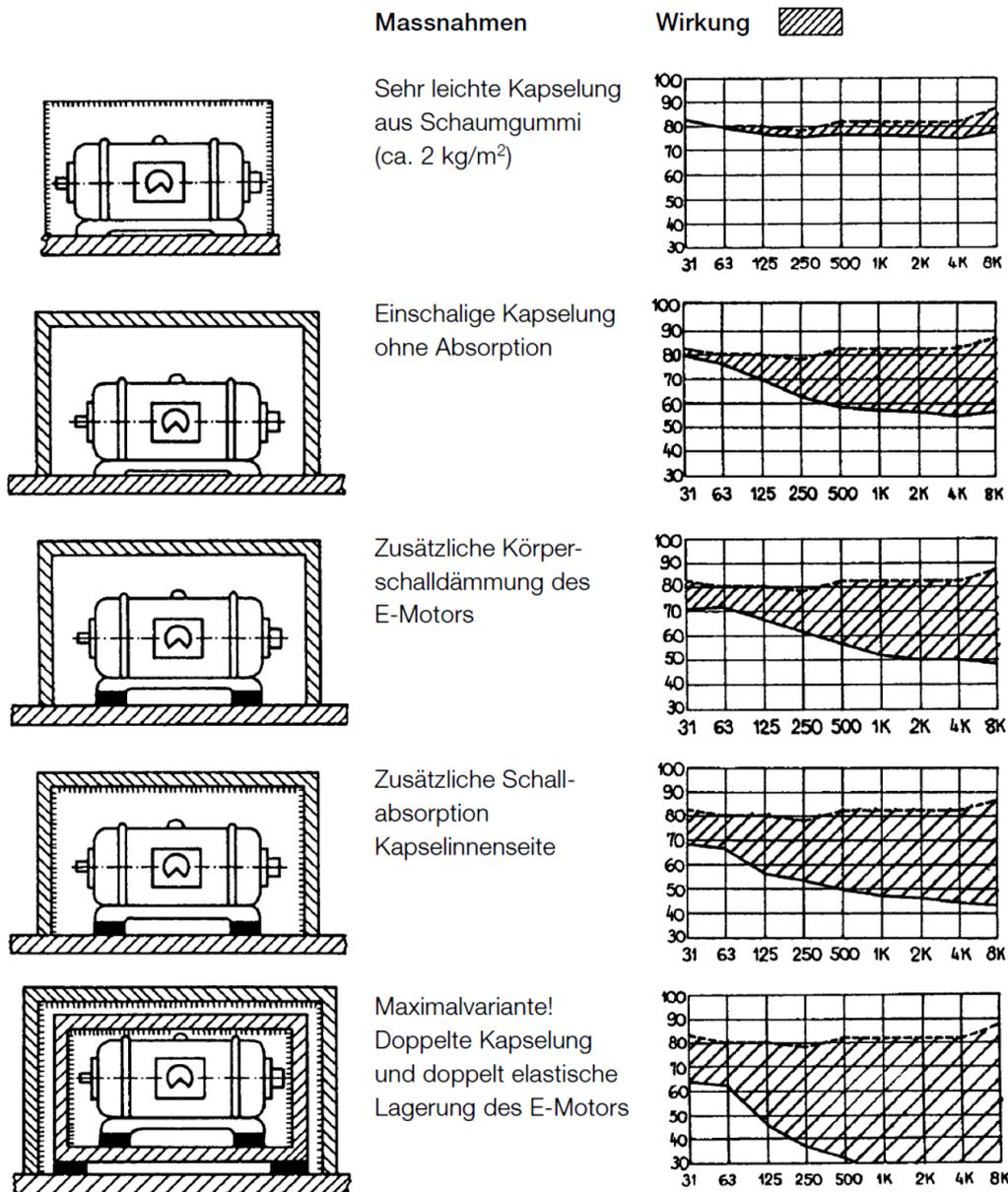


Abbildung 109 : Verschiedene Arten von Kapselkonstruktionen und deren Wirkung am Beispiel eines Elektromotors [102]

Eine ähnliche Konfiguration wird mit vorliegender Konstruktion (Kapitel 4.3.3) erreicht. Hierbei ist der REX elastisch in der Kapsel (Einhausung) und die Kapsel wiederum elastisch auf dem Fundament, in diesem Fall dem Fahrzeugrahmen, befestigt. Die zweite Kapsel wird durch die Fahrzeugverkleidung gebildet. Die Auslegung der elastischen und dämpfenden Elemente kann mittels Mehrkörper-Simulation MKS erfolgen, wenn die Massen und das Anregungsspektrum bekannt sind. Eine abschließende Feinabstimmung muss experimentell erfolgen.

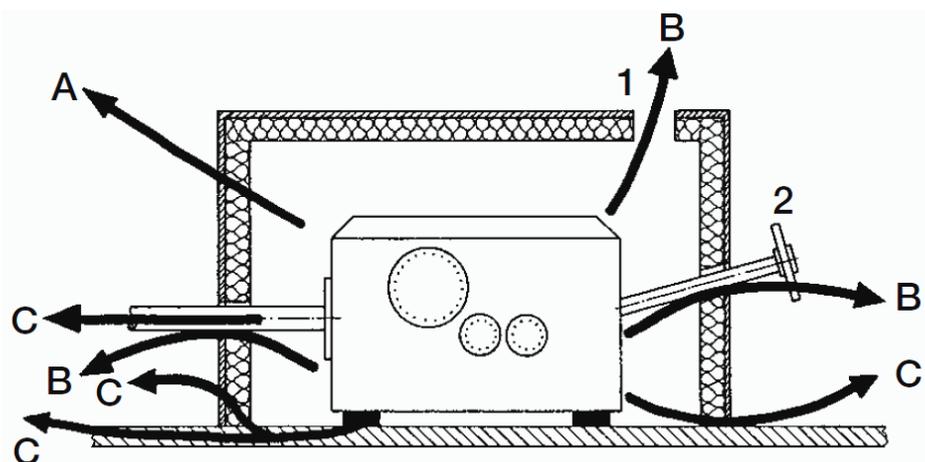


Abbildung 110 : Beispiel für die Schallübertragungswege einer Kapselung [102].

Weitere Schallübertragungswege ergeben sich entsprechend Abbildung 110 durch

Weg A: Luftschallübertragung über die Kapselwand

Weg B: Luftschallübertragung über Undichtigkeiten und Öffnungen

1: Lüftungsöffnung

2: Bedienungselemente

Weg C: Körperschallübertragung und Abstrahlung als Luftschall

Weg A kann durch die auf der Innenseite der jeweiligen Kapselwandung aufgetragenen Materialien und Strukturen wirkungsvoll behindert werden.

Weg B ist hinsichtlich der zu Belüftung des Kapselinnenraums und der Durchführung der Anschlussleitungen notwendigen Öffnungen von Belang. Abbildung 111 stellt den betroffenen Bereich der REX-Einheit inklusive Gebläse, Wärmetauscher, Tank und oberer Abdeckung dar.



Abbildung 111 : REX-Einheit

Die Zuluft wird als Teilstrom der Kühlerventilation durch das Radialgebläses in die Kapsel befördert. Die dafür vorgesehene Öffnung wird dabei vom Gebläsekasten verdeckt. Der das Gebläse umschließende Tank schirmt diesen Bereich, ebenso wie die Öffnung des innenliegenden Ansaugeräuschkämpfers, zusätzliche ab.

Die Abluft strömt über den heißesten Teil, den Auslasskrümmer, und durch die zu dessen Freigang notwendige Öffnung aus. Der Abluftstrom kann durch eine hitzeabschirmende Krümmerummantelung geleitet werden und entweicht am freien Ende in die Umgebung. Die Mündung ist durch die anschließende Abgasanlage verdeckt.

8.2 Weitere Anwendungsbereiche

Der im Zuge des Schutzrechtsverfahrens angefertigte Bericht [102] des Austria Wirtschaft Service AWS beurteilt im Zuge einer Marktanalyse das Potential des erfindungsgemäßen Systems hinsichtlich weiterer Anwendungsbereiche und nennt:

„Batterie-Energiesysteme im Freizeitbereich (Camping, Segeln, ...) oder bei netzfernen Anwendungen wie Berghütten und Verkehrstechnik. Bei diesen Anwendungen ist es wichtig autark, effizient und zuverlässig Strom für den netzfernen Bedarf zu erzeugen.“ [103]

Abbildung 112 stellt diese und weitere Anwendungsbereiche dar und weist die jeweils üblichen Spannungslagen aus.



Abbildung 112 : Anwendungsbereiche und übliche Spannungslagen

Ergänzend zu den Betrachtungen des AWS findet sich in Abbildung 112 sowohl die Anwendung als Ladestation für immer populärer werdende Akku-Werkzeuge mit 36V bzw. 48V als auch der Einsatz als Stromversorgung von LKWs im Stillstand. Hier wird dem Problem einer leerwerdenden Batterie oder dem Bedarf nach Heizungswärme üblicherweise durch den Start der Antriebsmaschine und Laufenlassen im Leerlauf begegnet. Welche Geräusch- und besonders Abgasemission dies global verursacht, müsste wissenschaftlich erhoben und dem REX-Einsatz als Alternative für diesen Zweck gegenübergestellt werden.

Die unterschiedlichen Spannungsbereiche deuten an, dass es einer Anpassung der REX-Einheit für diese bedarf. Die Anpassung hierfür beschränken sich jedoch ausschließlich auf die Höhe der Ausgangsspannung, welche nur von der Charakteristik des Generators bzw. seiner Wickeldaten abhängt. Relevant für die Größe der Einheit ist hingegen die geforderte Leistung. Eine Serie an Leistungsvarianten (z.B. 1kW, 2kW, 5kW) mit jeweils angepassten Motoren und Generatoren ist hierfür nötig und möglich. Es ist zu erwarten, dass dieses System zuerst in diesen Bereichen zum Einsatz kommt, da die Mobilitätsindustrie, ob PKW, LKW oder Zweirad, stets versucht, bewährte Lösungen bis zum letztmöglichen Tag zu amortisieren.

9 Wissenschaftliche Arbeiten und Publikationen

9.1 Bachelor- und Projektarbeiten

- Hans Peter Schnöll, „Untersuchung des Wirkungsgrades eines Elektroantriebs von Batterie zu Straße am Beispiel eines Elektrorollers“, Projektarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2009
- Hannes Wippel, „Energiebedarfsermittlung eines elektrisch betriebenen Kleinkrafttrades“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, BA, TU Graz, 2010
- Martin Kirsten, Roman Proebster, „Potenzialabschätzung eines Range Extenders in einem Rollerfahrzeug“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, BA, TU Graz, 2009
- Florian Sprenger, Daniel Stix, „Auswahl und Auslegung eines Generators sowie eine Modelentwicklung in MATLAB-Simulink für eine Rangeextenderapplikation an einem Hybridscooter“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, BA, TU Graz, 2011

9.2 Diplom und Masterarbeiten

- Stephan Stocker-Reicher, „Auslegung eines Zweitakt-Brennverfahrens für einen kleinen Scooter Range Extender“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2013
- Carlos Tutosaus Gómez, „Simulator of a Hybrid Scooter Range Extender with Matlab/Simulink“, Masterarbeit an der Universidad de Huelva, 2013
- Gernot Prüller, „Packaging und experimentelle Untersuchungen eines 2-Takt Range Extenders in einem L1e City Scooter“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2014

9.3 Wissenschaftliche Publikationen im Zusammenhang mit dieser Arbeit

- Ebner, A., Winkler, F., Abart, M., Luz, R. et al., "Study of Possible Range Extender Concepts with Respect to Future Emission Limits" SAE Technical Paper 2010-32-0129, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-32-0129>.
- Schacht H-J., Kirchberger R., Winkler F., Schmidt S.P., "Concept Study of Range Extender Applications in Electric Scooters", SAE Technical Paper 2011-32-0592, 2011, <https://doi.org/10.4271/2011-32-0592>
- Schacht, H., Schögl, O., Bretterklierer, N., Kirchberger, R. et al., "Low Cost Range Extender Technology for Hybrid Electric City Scooters" SAE Technical Paper 2012-32-0083, 2012, <https://doi.org/10.4271/2012-32-0083>.
- Kirchberger R., Schacht H-J., Eichlseder H., „Potenzial eines REX Konzeptes für Stadtscooter“, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 749 (2012), VDI Verlag GmbH, ISBN 978-3-18-374912-6, Band 2, pp.297 bis 312
- Schacht H-J., Kirchberger R., Winkler F., Schmidt S., „Range Extender for Two-Wheeler Applications“, Development Trends of Motorcycles, Bologna 2012

- Schacht H.-J., Kirchberger R., Winkler F., Schmidt S.: „Range Extender for Two-Wheeler Applications“, Presentation and paper, Proceedings, ISBN 978-3-8169-3160-7, pp. 61 bis 77, Haus der Technik "Development Trends of Motorcycles", Budrio/Bologna/IT, 18.-19.10.2012
- Schacht, H., Leibetseder, M., Bretterklierer, N., Schmidt, S. et al., "Control of a Low Cost Range Extender for L1e Class PHEV Two-Wheelers" SAE Technical Paper 2014-32-0014, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-32-0014>.

9.4 Medien Publikationen im Zusammenhang mit dieser Arbeit

- „HY-SCOOTER: Elektro-CITY-SCOOTER mit großer Reichweite als Wegbereiter für die individuelle, urbane Elektromobilität!“ Mit 6. März 2012 online auf: <https://www.greentech.at/blog/hy-scooter-elektro-city-scooter-mit-grosser-reichweite-als-wegbereiter-fuer-die-individuelle-urbane-elektromobilitaet/>

9.5 Vorträge

- HTL-Steyr, “Potential of a Range Extender Concept for Inner City Scooters – An Alternative to Pure Electric Mobility”, Steyr, 2012
- ÖVK, „Lohner ein Start Up – Entwicklung und Fertigung eines motorisierten Zweirades“, Graz, 2015

9.6 Patent

- „Verfahren zum Betreiben einer Vorrichtung zur Energieversorgung eines elektrischen Verbrauchers in einem Inselbetrieb“
Österreichische Patentanmeldung: A 50824/2014, eingereicht am 10.11.2014, erteilt am 1.4.2016 unter Patentnummer: AT 516418 B1, Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 2016/074008 A1

10 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.ecopowerdrive.at>
- [2] MiD2008 Mobilität in Deutschland 2008 Ergebnisbericht; Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Infas und DLR; Februar 2010
- [3] Umweltfreundliches Parkraummanagement Leitfaden für Länder, Städte, Gemeinden, Betriebe und Bauträger; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft; Wien, 2015
- [4] <https://media.daimler.com>; Ablagenummer 94230
- [5] <http://www.dkw-motorraeder.de/motorrad/dkw+hobby.html>
- [6] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung StVZO in der Fassung vom 24. August 1953
- [7] Hrachowy, Frank O.; Kleinkrafträder in Deutschland: Die 50-Kubik-Klasse bis 1980; Motorbuch Verlag; Auflage: 1 (26. Februar 2014); ISBN-13: ISBN: 978-3-613-03642-0
- [8] 308. Verordnung, 46. Novelle zur Kraftfahrzeug-Durchführungs-Verordnung KDV 1967, 7. September 1999
- [9] Ehn, Friedrich F.; Das grosse Puch-Buch: Die Zweiräder von 1890-1987; Weishaupt, H; Auflage: 8 (1. März 2013); ISBN-13: 978-3900310493
- [10] <http://www.piaggiogroup.com/en/brands/two-wheelers>
- [11] RICHTLINIE 97/24/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Juni 1997 über bestimmte Bauteile und Merkmale von zweirädrigen oder dreirädrigen Kraftfahrzeugen geändert durch Richtlinie 2009/108/EG der Kommission vom 17. August 2009
- [12] Law, T.H., Hamid, H., & Goh, C.N. (2015). The motorcycle to passenger car ownership ratio and economic growth: a cross-country analysis. *Journal of Transport Geography*, 46, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.06.007>
- [13] <https://www2.kek.jp/rso/eng/Living/shakoshomei.html>; abgerufen 10.06.2016
- [14] Essays, UK. (November 2013). The impact of import tariff on Vietnam's automobile sector. <https://www.ukessays.com/essays/marketing/the-impact-of-import-tariff-on-vietnams-automobile-sector-marketing-essay.php>, abgerufen 10.2015
- [15] Durchschnittliche Fahrleistung von Mofas, Mokicks und Mopeds in Deutschland von 1998 bis 2012; Statistisches Bundesamt; DIW Berlin; KBA
- [16] <https://www.sueddeutsche.de/auto/muehsamer-start-fuer-elektroroller-darum-sind-e-scooter-noch-nicht-konkurrenzfaehig-1.1619606>; März 2013;
- [17] <http://www.coram-research.com/2016/03/11/europe-2015-two-wheelers/>
- [18] VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen

- [19] <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2004/wp29grpe/TRANS-WP29-GRPE-47-inf13e.pdf>
- [20] <https://www.sixthtone.com/news/1001569/china-to-roll-out-strict-standards-for-electric-bikes>
- [21] <http://de.urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/italy-mainmenu-81>
- [22] L. Ntziachristos, S. Geivanidis, Z. Samaras, A. Xanthopoulos, H. Steven, B. Bugsel; Study on possible new measures concerning motorcycle emissions; Thessaloniki (Greece) 11.2008
- [23] <https://www.sixthtone.com/news/1001569/china-to-roll-out-strict-standards-for-electric-bikes>
- [24] <http://www.coram-research.com/wp-content/uploads/2016/03/707-Two-Wheelers-China-2015.pdf>
- [25] Li Ruohan: Beijing to partially ban motorbikes; Global Times; Published: 2016-4-6
- [26] Ziegler R.; "Aufbau eines Prüfstandes für stufenlose Umschlingungsgetriebe und Erprobung anhand aktueller Scooter CVT"; Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der Technischen Universität Graz; 2004
- [27] www.orbitalcorp.com.au
- [28] M. Ambler: Development of the Aprilia DITECH 50 engine; SAE Paper No. 2001-01-1781; SETC-Small Engine Technology Conference 2001; Pisa (Italy)
- [29] 2015 Tokyo Motor Show - Honda Super Cub Concept & EV-Cub Concept - <https://www.carlist.my/news/tokyo-2015-honda-reinvents-its-iconic-super-cub-and-unveils-ev-cub-concept/34926/amp/>
- [30] <https://motomobil.at/test-technik/roller/238-peugeot-e-vivacity-elektroroller-test-2011-e-bike-news>
- [31] <https://www.scooter-system.fr/dossiers/147-1-essai-e-vivacity.html>, abgerufen am 05.11.2015
- [32] <https://tv.oeamtc.at/themen/motorrad/peugeot-e-vivacity.html>, abgerufen am 05.11.2015
- [33] <https://www.sueddeutsche.de/auto/muehsamer-start-fuer-elektroroller-darum-sind-e-scooter-noch-nicht-konkurrenzfaehig-1.1619606>; März 2013;
- [34] <https://www.electrive.net/2016/08/02/bosch-startet-elektro-scooter-sharing-namens-coup-in-berlin/>, abgerufen 15.09.2016
- [35] <http://cdn.autotrade.com.my/news/wp-content/uploads/2016/01/06181343/Gogoro-charge.png>
- [36] <http://lawebdelvespino.webcindario.com/vespi/vespino1.htm>, abgerufen 12.05.2015
- [37] <http://www.sfera-haiza.de/wbblite2/index.php?page=Thread&threadID=13239>; abgerufen 12.05.2015
- [38] Patent, Yu Tsai Lin (2000). Auxiliary Electric Driving System for Vehicle, (Patent Nr. US 6155366)

- [39] Schadstoff-Typprüfwerte von zwei-, drei- und leichten vierrädri- gen Kraftfahrzeugen (Klasse L: Klein-, Leicht- und Krafträder, Trikes und Quads) SV 2.1.1, Stand: 15. September 2017; Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg: Internet: www.kba.de
- [40] ASPES Hybrid; <https://www.moto.it/listino/aspes/vega-hybrid-50/vega-hybrid-50-2010-15/lv0VU5>; abgerufen 20.09.2015
- [41] <https://www.motorradonline.de/test/test-piaggio-mp3-hybrid.306444.html>
- [42] Patent, "Hybrid drive assembly for a vehicle, in particular a scooter", International publication number: WO 2004054836 B1
- [43] http://www.saferwholesale.ca/50cc-500-Watt-Gas-Electric-Hybrid-Moped-Scooter-p/50cc-500-watt-hybrid_50a.htm
- [44] <https://auto.pege.org/2006-ever-monaco-2-rad/moped-vorderradantrieb.htm>
- [45] <http://www.autobild.de/bilder/peugeot-hybrid3-evolution-concept-1007884.html#bild7>
- [46] <https://www.caradisiac.com/salon-de-milan-2008-en-direct-malaguti-hem-125907.htm>
- [47] <http://www.ondrive.in/hero-leap.html>
- [48] <http://www.onmywaymotor.com/mwh101-wholesale-hybrid-scooters.html> am 16.10.2016
- [49] Wippel H., "Energiebedarfsermittlung eines elektrisch betriebenen Kleinkraftrades", Bachelorarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2010
- [50] VDI-Richtlinie, "VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme", Beuth Verlag GmbH, Fassung Juni 2004
- [51] Richtlinie 2013/60/EU Der Kommission vom 27. November 2013 zur Änderung der Richtlinie 97/24/EG
- [52] DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 134/2014 DER KOMMISSION vom 16. Dezember 2013 zur Ergänzung der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die Leistung der Antriebseinheit sowie zur Änderung ihres Anhangs V
- [53] J.B. Metzler, Physik - Gesamtband, 1982 ISBN 3-476-50043-8
- [54] Zdeno Neuschl, "Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisenverluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionallem Axialfluss" Dissertation, Technischen Universität Cottbus, 2007
- [55] Brix W., Hempel K.A., "Anomalous rotational eddy current loss in electrical steel sheets", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 38 (1983), North Holland publishing company
- [56] Birkfeld M., Hempel K.A.; "Eddy current loss and dynamic hysteresis loss in electrical steel sheet under two-dimensional measuring conditions"

- [57] Pischinger, R., Klell, M., Sams, T., "Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine – Der Fahrzeugantrieb," 3. Auflage, Springer-Verlag 2009, ISBN: 978-3211992760
- [58] Eifler, W. and Schlücker, E. and Spicher, U. and Will, G., "Küttner Kolbenmaschinen: Kolbenpumpen, Kolbenverdichter, Brennkraftmaschine", Springer-Verlag 2009, ISBN 9783834893024
- [59] Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.: Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. 3. Auflage. B.G.Teubner Verlag, Wiesbaden 2006, ISBN 978-3-8351-0080-0
- [60] Heywood, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, ISBN 978-0071004992, 1988.
- [61] DIN EN 60254-1 Blei-Antriebsbatterien - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen (IEC 60254-1:2005); Deutsche Fassung EN 60254-1:2005
- [62] <http://www.fronius.com/>
- [63] Keil P., Jossen A., "Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen", Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik, Technische Universität München, 2011
- [64] <https://www.maurelma.ch/batterien.htm>
- [65] <http://www.basytec.de/ladung/ladung.html>
- [66] <https://batteryuniversity.com/learn/>
- [67] DIN 41 772, Stromrichter; Halbleiter-Gleichrichtergeräte, Formen und Kurzzeichen der Kennlinien Beiblatt 1; 02/1979; Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin
- [68] <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/mid2008-publikationen.html>
- [69] Schnöll H.P., "Untersuchung des Wirkungsgrades eines Elektroantriebs von Batterie zu Straße am Beispiel eines Elektrorollers", PV, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2010
- [70] Hausberger S., Raphael Luz R.: "Handbuch zum Emissionsmodell PHEM"
- [71] Peter Hofmann, Hybridfahrzeuge- Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft, 2. Auflage, ISBN 978-3-7091-1779-8, Springer-Verlag Wien 2010, 2014
- [72] Fraidl G. K., Hubmann Ch., Kunzemann R. ; Sifferlinger B.; Benda V.; „Range Extender - Was kommt nach Hybrid?“ ATZ-MTZ-Konferenz_
- [73] „E-One,“ [Online]. <http://www.eone-online.at/e-roller-1/capri/#cc-m-product-7746702395>. abgerufen am 12 04 2014
- [74] Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb Amtsblatt der Europäischen Union 2.3.2011
- [75] <http://kellycontroller.com/hub-motor-48v3kw-high-speeddisc-brake-p-135.html>, abgerufen 02.04.2014

- [76] Prüller G., "Packaging und experimentelle Untersuchungen eines 2-Takt Range Extenders in einem L1e City Scooter", Masterarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2014
- [77] Sprenger F., Stix D., "Auswahl und Auslegung eines Generators sowie eine Modelentwicklung in MATLAB-Simulink für eine Rangeextenderapplikation an einem Hybridscooter", Bachelorarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2011
- [78] <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>
- [79] http://www.tomos-ersatzteile.de/shop/catalog/default.php?cPath=153_221
- [80] Korman M., Koller G., Michal L. : Conversion of the Tomos Revival 50 cc Two Stroke Engine for EURO 2 Homologation with different Speed Versions; Bericht Nr. FVT-35/03/KM K&A 02/4430; 2004
- [81] Winkler, F., "Untersuchungen zur Reduktion von Spülverlusten bei kleinvolumigen Zweitaktmotoren", Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2009
- [82] Trattner A., "Future Two-Stroke Engine Technology in Hand-Held Power Tools"; Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2016
- [83] Gegg T.: Analyse und Optimierung der Gemischbildung und Abgasemissionen kleinvolumiger Zweitakt-Ottomotoren, Dissertation – Ph.D.thesis, ISBN 978-3-8325-1723-6, Germany 2006.
- [84] <http://megasquirt.info/products/pro-controllers/microsquirt/>
- [85] <http://www.tunerstudio.com/index.php/tuner-studio>
- [86] http://www.useasydocs.com/details/ew3_hires.gif
- [87] Schumann F. et al. (2018) Image-producing knocking investigations in a two-stroke SI engine. In: Bargende M., Reuss HC., Wiedemann J. (eds), 18. Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden
- [88] Meyer S. et al. (2016) Analysis of working processes and efficiency assessment of hand-held power tools. In: Bargende M., Reuss HC., Wiedemann J. (eds) 16. Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings. Springer, Wiesbaden
- [89] Stocker-Reicher S. , "Auslegung eines Zweitakt-Brennverfahrens für einen kleinen Scooter Range Extender", Diplomarbeit, , Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2013
- [90] AVL-BOOST, <https://www.avl.com/boost>
- [91] AVL-FIRE; <https://www.avl.com/fire>
- [92] Carlos Tutosaus Gómez; Simulador de un Scooter Híbrido de Rango Extendido con Matlab/Simulink; Master Thesis; Ingeniería Minera, Mecánica y Energética; Universidad de Huelva; 12.2012
- [93] Schacht, H-J. (2016). „Verfahren zum Betreiben einer Vorrichtung zur Energieversorgung eines elektrischen Verbrauchers in einem Inselbetrieb“, (Patent Nr. AT 516418 B1.)
- [94] Marcus Bonifer, HERAEUS, Interview 09.2015

- [95] Favre C., Tromayer J., et al., "Regulated and Non-Regulated Emissions of Selected State-of-the-Art European Mopeds", SIA Congress 2011
- [96] Genender, P.; Speckens, F.; Schürmann, G.: Akustikentwicklung von Range Extendern für Elektrofahrzeuge. In: MTZ 72 (2011), Nr. 3, S. 192-197
- [97] Schürmann G., Eisele G., Genender P., Wolff K., "Geräuscharme Range Extender für Elektrofahrzeuge", ATZ Automobiltech Z (2012) 114: 910. <https://doi.org/10.1007/s35148-012-0510-0>
- [98] Johannes von Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus, "Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung", Dissertation, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, TU MÜNCHEN, 2010, <https://books.google.at/books?id=XfAVngEACAAJ>
- [99] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>
- [100] Green Expo 2013, Wien, 19.-21.4.2013, <https://www.vienna.at/greenexpo-europe-von-19-bis-21-april-2013-in-der-messe-wien/3495589>
- [101] Pischinger M., Tomazic D., FEV Inc.; Wittek K., FEV GmbH; Esch H-J., Köhler E., KSPG AG; Baehr M., RWTH Aachen University "A Low NVH Range-Extender Application with a Small V-2 Engine -Based on a New Vibration Compensation System"; VKA, RWTH; SAE: 2012-32-0081; 2012 Small Engine Technology Conference; Madison 2012
- [102] Walter Lips, "Lärmbekämpfung durch Kapselungen";Suva Arbeitssicherheit, 9. Auflage – August 2008, www.suva.ch/waswo,Suva-Best.-Nr.:66026.d
- [103] AWS-Austrian-Wirtschaftsservice Bericht, Erfindungsbewertung und Empfehlung zur Erfindungsmeldung P1405548, 18.11.2014

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Reitwagen von Gottlieb Daimler 1885 [4].....	3
Abbildung 2 : Charakteristische Silhouette eines Scooters.....	9
Abbildung 3: Aufbau und Teile der Scooter Riemen-Variomatik, CVT-Getriebe [26]	10
Abbildung 4: Regelverhalten eines CVT-Getriebes mit Fliehkraftkupplungsbedingter Ausblendung des unteren Drehzahlbereichs und Verstellung im Drehzahlbereich maximaler Leistung.....	10
Abbildung 5: Betriebskennlinie während der Beschleunigung im Verbrauchskennfeld und dabei überstrichene Bereiche des spezifischen Verbrauchs[26].....	11
Abbildung 6: Vergleich Zwei-Gang-Automatik- und CVT-Getriebes hinsichtlich transienten Betriebs der Verbrennungskraftmaschine[26]	12
Abbildung 7 : Wirkungsgrad des kraftschlüssigen CVT-Getriebes in Abhängigkeit des Abtriebsdrehmomentes [26].....	12
Abbildung 8: Aprilia DiTech System, Luftunterstütztes Direkteinspritzung am Zweitakt-Motor [28].....	14
Abbildung 9 : Honda Konzepte für den zukünftigen Scooter auf Basis des Cub Modells [29] <i>rechts</i> – rein elektrisch, <i>links</i> – rein verbrennungsmotorisch.....	16
Abbildung 10 : Peugeot E-Scooter, links: Scoot'elec 1996-2006 , rechts: E-Vivacity 2011-..	17
Abbildung 11 : Gogoro Scooter-Sharing- und Batteriewechsel-System [35].....	18
Abbildung 12 : ZIP 50 Bimodale [36] und Hybrid-Triebsatzschwinge [37]	20
Abbildung 13 : System-Skizze aus Patentschrift US 6155366 [38].....	20
Abbildung 14 : Hybrid Modelle Aspes Vega 50 Hybrid [40] und Piaggio MP3 125 Hybrid [41]	21
Abbildung 15 : Patentzeichnung EP 1572486 B1 [42]	21
Abbildung 16 : Asiatische „Parallel-Hybrid“ Variante mit in der Triebsatzschwinge integrierten Elektromotor [43].....	22
Abbildung 17: „Axel-Split“ Variante mit Elektromotor im Vorderrad [44].....	23
Abbildung 18 : Peugeot Hybrid 3 Evolution Concept Dreirad mit Elektromotoren in den Radnaben der Vorderräder und konventionellen Antrieb des Hinterrades [45]	23
Abbildung 19 :Malaguti HEM-links und Range Extender Einheit -rechts [46]	24
Abbildung 20: Hero Leap, vorgestellt 2012 [47]	24
Abbildung 21: L1eA Range Extender Fahrzeug für den chinesischen Markt [48].....	25
Abbildung 22 : Existierende Typen von Hybridfahrzeugen	26
Abbildung 23 : Detailliertes V-Modell – Darstellung der Vorgehensweise im Entwurf- und Integrationsprozess.....	31
Abbildung 24 : Prüfzyklen ECE R 47 [51] - <i>links</i> und WMTC Phase 2 Part I [52]– <i>rechts</i> .	36
Abbildung 25: Elektromagnetische Induktion	39
Abbildung 26: Fischhakenkurve [58].....	46
Abbildung 27 : Volumetrischer Gemischheizwert H_G über Luftverhältnis λ [57].....	47

Abbildung 28 : Einfluss des Luftverhältnisses λ auf Leistung P und spez. Kraftstoffverbrauch b_e [58].....	48
Abbildung 29 : Schadstoffkonzentration infolge des Luftverhältnisses [57].....	49
Abbildung 30 : Einfluss des Zündstroms und der Funkendauer auf HC-Emission, spezifischen Kraftstoffverbrauch und Vorzündbedarf des Otto-Motors über Lambda [60]	50
Abbildung 31: Bestandteile des galvanischen Elements und Reaktionsgleichung	53
Abbildung 32 : Abhängigkeit des Innenwiderstandes R_i einer AGM-Bleibatterie vom Ladezustand während der Ladung [62].....	55
Abbildung 33 : Batteriemodelle [63]	55
Abbildung 34 : Einteilung des Systems auf Sub-Systeme	60
Abbildung 35 : Wirkungsgradkennfeld eines 1,1 kW Radnabenmotors [69]	61
Abbildung 36 : Typischer Leistungsbedarf eines L1e Scooters in der Ebene infolge des Fahrwiderstandes	62
Abbildung 37 : Leistungsfluss für den Fall einer leeren Batterie	63
Abbildung 38 : Wirkungsgradkette für den Lastfall 1 kW am Hinterrad ohne Batterie	63
Abbildung 39 : Momentaufnahme der Wirkungsgradverkettung des Gesamtsystems	64
Abbildung 40 : Flussdiagramm des Hybrid-Zusatzmodules für PHEM [49]	65
Abbildung 41 : Parameter der REX-Betriebsstrategie	66
Abbildung 42 : Simulationsergebnis für den Fahrzyklus CADC –Urban.....	67
Abbildung 43 : Simulationsergebnis für den Fahrzyklus ECE-R47	67
Abbildung 44 : E-one Capri im Originalzustand [73].....	69
Abbildung 45 : Herstellerangaben zu Motorleistung und -Wirkungsgrad [75]	70
Abbildung 46 : Rein elektrische Reichweite mit 48V 22Ah Batterie [76]	71
Abbildung 47 : Verlauf der Systemspannung für unterschiedliche Batteriegrößen im ECE-R47 Fahrzyklus [76]	71
Abbildung 48 : Add-On Range Extender Entwurf mit geringst möglicher Schnittstelle zum EV-Fahrzeugsystem.....	74
Abbildung 49 : Kausalitätsbedingte Anordnung der Komponentenebene im V-Modell.....	75
Abbildung 50 : 1-, 2- und 3-phasige Generator-Statoren für Außenläufer-Rotor.....	78
Abbildung 51 : Stator eines Innenläufers neben a) permanentmagnetischem und b) elektromagnetischem Läufer	79
Abbildung 52 : Klauenpol Lichtmaschine [BOSCH]	79
Abbildung 53 : Versuchsaufbau am Prüfstand und elektrische Zusatzeinrichtungen.....	80
Abbildung 54 : Spannungskennlinien im Leeraufbetrieb und Versuchsaufbau.....	81
Abbildung 55 : Spannungskennlinien im Lastfall 1,6 kW und Versuchsaufbau	82
Abbildung 56 : Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Erregerstroms	82
Abbildung 57 : Verlustarten der elektrischen Maschine	83
Abbildung 58 : Versuchsaufbau und Ergebnis - Mechanische Verlustmoment des Generators	

mit offenen Klemmen	83
Abbildung 59 : Versuchsaufbau und Ergebnis - Mechanische und magnetische Verlustmomente für unterschiedliche Erregerströme	84
Abbildung 60 : Versuchsaufbau und Ergebnis – Mechanische, magnetische und elektrische bei 20, 25, 30 A Laststrom.....	84
Abbildung 61 : Generator-Kennwerteverlauf für unterschiedliche Lastströme bei konstanten Erregerstrom 3 A.....	85
Abbildung 62 : MatLab-Modell des fremderregten Generators - Erstellt anhand der erhobenen Einzelverluste.....	86
Abbildung 63 : Einfluss der Wicklung auf den mechanischen Leistungsbedarf bei 1,5kW elektrischer Leistung	87
Abbildung 64 : Vergleich der Generator-Wirkungsgradkennfelder	88
Abbildung 65 : gewählter Basismotor -Tomos [79].....	92
Abbildung 66 : Drehmoment und Leistungskurve in originaler Abstimmung [80].....	93
Abbildung 67 : Varianten der Gemischbildung	94
Abbildung 68 : Vergleich-Quantitäts- und Qualitätsregelung im Lastregelbereich	96
Abbildung 69 : Vergleich-Wirkungsgrad der Quantitäts- und Qualitätsregelung im Lastregelbereich	96
Abbildung 70: Vergleich der Quantitäts- und Qualitätsregelung bezüglich unverdünnter NO _x - Rohemissionen	97
Abbildung 71 : Betriebsbereiche der Varianten V1 und V2 im Schadstoffkonzentrations-Kennfeld.....	97
Abbildung 72 : Komplettbeschaltung der Microsquirt 3 [86].....	100
Abbildung 73 : Kanalhöhen-Variationen der - Haupt- und Neben-Überströmer.....	102
Abbildung 74 : Kenngrößen zur Ladungsbewegung.....	103
Abbildung 75 : 3D-CFD Ergebnisse in kritischen Phasen des Ladungswechsels –	103
Abbildung 76 : Spülkurvenvergleich hinsichtlich Gasdynamik der Abgasanlage [89]	104
Abbildung 77 : Anordnung der Hauptkomponenten bei Koppelung mittels Riemen.....	106
Abbildung 78 : Range Extender Bauraumuntersuchung.....	106
Abbildung 79 : Arbeitskennlinien des Generators und der Verbrennungskraftmaschine zur Bestimmung möglicher Arbeitspunkte mit Fokus auf drehzahlkonstanten Betrieb	109
Abbildung 80 : Versuchsaufbau und schematische Darstellung der Steuerungsvariante V1	110
Abbildung 81: Simulink-Modell der elektrischen Fahrzeugbasis [92]	111
Abbildung 82: Simulink-Modell des Hybrid-Fahrzeugsystems [92].....	113
Abbildung 83 : Schematische Darstellung der Steuerungsvariante – V2	115
Abbildung 84 : Geschwindigkeit-, Leistung- und Spannungsverlauf mit und ohne REX [93]	117
Abbildung 85 : Einzelsteuergeräte der Systemsteuerung.....	119
Abbildung 86 : Schematische Darstellung der Steuerungsvariante – V2 mit erweiterten	

Funktionalitäten	120
Abbildung 87 : Systemzustände des Range Extenders	120
Abbildung 88 : Versuchsaufbau für den Integrationstest.....	122
Abbildung 89 : Drehzahl-, Strom- und Leistungsverlauf über der Spannung –V1.....	123
Abbildung 90 : Versuchsfahrzeug am Zweirad-Rollen-Prüfstand [76]	125
Abbildung 91 : Drehzahlverlauf der Variante V1 im Fahrzyklus ECE-R47	126
Abbildung 92 : Elektrische Ausgangsleistung der Variante V1	127
Abbildung 93 : Emissionsverhalten der Variante V1.....	127
Abbildung 94: Zeitaufgelöster Verlauf des Fahr-, REX- und Batteriestroms im Zyklus– V2	129
Abbildung 95: Ladebilanz im Zyklus ECE-R47 bei Abschaltung nach 6 Teilzyklen	130
Abbildung 96: Energiebilanz im Zyklus ECE-R47 bei Abschaltung nach 6 Teilzyklen.....	131
Abbildung 97: Laufzeitverkürzung um einen Teilzyklus durch um 15% leistungsgesteigerte Variante.....	131
Abbildung 98: Drehzahl-, Leistungs- und Spannungsverlauf im Zyklus ECE-R47	132
Abbildung 99 : Verlauf der gemessenen Abgaskomponenten HC, CO, NO _x im Fahrzyklus ECE- R47	133
Abbildung 100 : Verlauf der angenommenen Konvertierungs- bzw. Durchschlagsrate für eine Abgasnachbehandlung mit 100-80-20 Eigenschaft	135
Abbildung 101 : Verlauf der HC-, CO-, und NO _x -Emissionen mit virtueller Abgasnachbehandlung 100-80-20 im Fahrzyklus ECE-R47	135
Abbildung 102 : Steuerspannungsverlauf und Schwellwerte und daraus resultierendes Betriebsverhalten im Fahrzyklus WMTC Phase 3 Zyklus.....	138
Abbildung 103 :Energiebilanz des Gesamtsystems für den Fahrzyklus WMTC Phase 3	139
Abbildung 104 : Errechneter Verlauf der verdünnten Rohemissionen HC, CO, NO _x im Fahrzyklus WMTC Phase 3	140
Abbildung 105 : Verlauf der errechneten Emissionen – zeitlich aufgelöst und kumulierte im Fahrzyklus WMTC Phase3	141
Abbildung 106 : Einheit aus Motor, Transmission und Generator	149
Abbildung 107 : Kühlkreislauf.....	150
Abbildung 108 : Einheit inklusive Anschlüsse – links und Einhausung mit Durchführungen – rechts.....	150
Abbildung 109 : Verschiedene Arten von Kapselkonstruktionen und deren Wirkung am Beispiel eines Elektromotors [102].....	151
Abbildung 110 : Beispiel für die Schallübertragungswege einer Kapselung [102].....	152
Abbildung 111 : REX-Einheit.....	152
Abbildung 112 : Anwendungsbereiche und übliche Spannungslagen	153

Anhang

Gesetzliche Grundlagen

Es wird davon ausgegangen, dass sich die durch die United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) vorangetriebene Harmonisierung des Typgenehmigungsverfahrens durchsetzen wird. Deshalb wird die Betrachtung auf diese Regelungen und mit Bezug auf die Fahrzeugklasse L1eB eingeschränkt.

Die betreffenden Rechtsakte sind die Verordnung 168/2013 und die Delegierte Verordnung 134/2014.

Die Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013, regelt die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen. Ihr Anwendungsbereich umfasst laut Artikel 2, Ziffer 1:

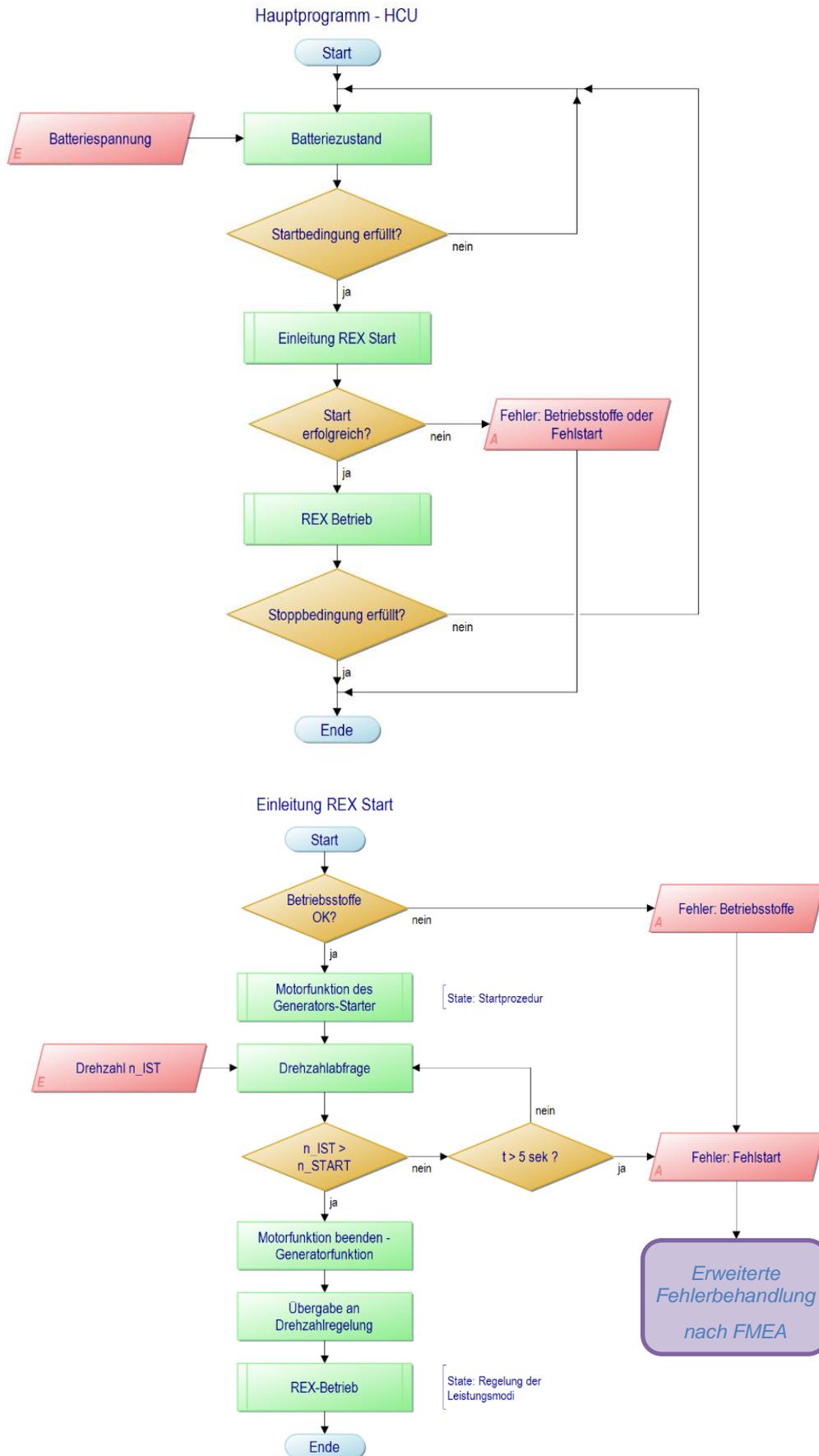
„Diese Verordnung gilt für alle zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeuge gemäß Artikel 4 und Anhang I (im Folgenden „Fahrzeuge der Klasse L“), die dazu bestimmt sind, auf öffentlichen Straßen gefahren zu werden, einschließlich Fahrzeuge, die in einer oder mehreren Stufen ausgelegt und gebaut werden, und für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten sowie für Teile und Ausrüstungen, die für solche Fahrzeuge ausgelegt und gebaut werden.“

Die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 134/2014 DER KOMMISSION vom 16. Dezember 2013, ergänzt die Verordnung (EU) Nr. 168/2013 in Bezug auf die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die Leistung der Antriebseinheit sowie zur Änderung ihres Anhangs V. Sie enthält nach Kapitel I, Artikel 1:

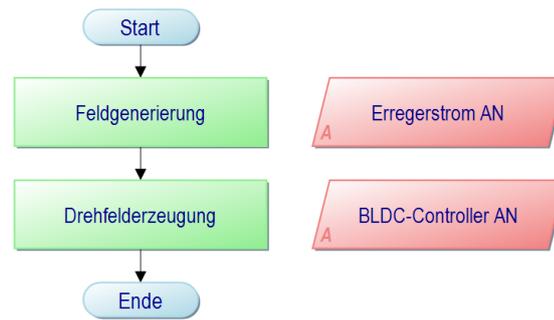
„Diese Verordnung enthält die detaillierten technischen Anforderungen und Prüfverfahren hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und der Leistung der Antriebseinheit für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klasse L und der für solche Fahrzeuge bestimmten Systeme, Bauteile und selbstständigen technischen Einheiten in Übereinstimmung mit der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 sowie eine Liste von UNECE-Regelungen und dazugehörigen Änderungen.“

Dieser Rechtsakt umfasst auch die Inhalte der 2009/40/EG, welche als Ergänzung zu 97/24/EG die Thematik des Hybridantriebs erstmals für die L-Kategorie adressierte. Die 2009/40/EG stützt sich hierfür streng auf die UN ECE 100, weshalb die Inhalte jenen der PKW Regulierung entsprechen.

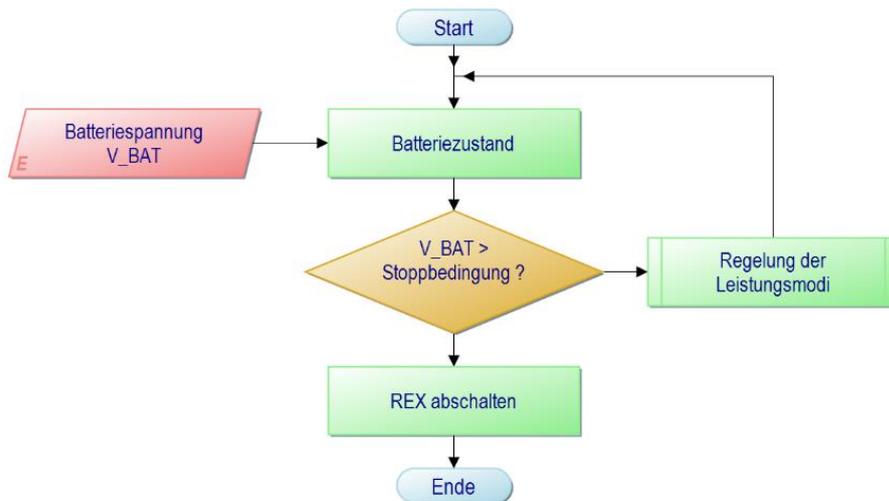
Steuerungslogik



Motorfunktion des Generators



REX Betrieb



Regelung der Leistungsmodi

