



Dekanat der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

DISSERTATION

Entwicklung eines 48 Volt Full-Hybrid Antriebsstrangs für ein Ultraleicht-Fahrzeug

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

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Hofmann

E 315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Robert Steffan

Matrikelnummer: 1128779

Albertgasse 32/13, 1080 Wien

Wien, am 14. Sep. 2015

Robert Steffan

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

**„Entwicklung eines 48 Volt Full-Hybrid
Antriebsstrangs für ein Ultraleicht-Fahrzeug“**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Dissertation nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Dissertationsarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 14. Sep. 2015

Robert Steffan

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien und beschreibt aufbauend auf zwei Forschungsprojekten die Entwicklung eines Full-Hybrid Antriebsstrangs im Niederspannungsbereich für ein ultraleichtes Fahrzeugkonzept.

Mein Dank gilt dem Leiter des Instituts, Prof. Dr. Bernhard Geringer, für die freundliche Aufnahme und die Ermöglichung dieser Promotion. Im Speziellen möchte ich mich bei Prof. Dr. Peter Hofmann (Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien) für die Betreuung dieser Dissertation bedanken sowie für die unzähligen fachlichen Diskussionen und Anregungen. Prof. Dr. Christian Beidl, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Darmstadt, danke ich an dieser Stelle für die Übernahme des Koreferats.

Für die Möglichkeit an dem innovativen Entwicklungsprojekt CULT mitwirken zu dürfen, danke ich Wolfgang Fritz und Dr. Franz Thomas Kampelmühler sowie den weiterhin am Projekt beteiligten Mitarbeitern von Magna Steyr Fahrzeugtechnik. Eine Fahrzeugstudie von der ersten Skizze bis zum fahrbaren Prototypen begleiten zu können, stellte ein herausforderndes Erlebnis dar, bei dem ich vielschichtige Erfahrungen sammeln konnte. Zusätzlich möchte ich mich auch bei allen direkt sowie indirekt am Projekt beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen bedanken. Im Besonderen danke ich Dietrich Burkardt sowie Martin Gerhardt von der Firma Schaeffler Engineering für ihre unermüdliche Unterstützung im Bereich der Funktionsentwicklung und Applikation.

Meinen CULT Kollegen, Thomas Hofherr, Marko Damböck und Friedrich Forsthuber danke ich für die gute Zusammenarbeit und ihrem Engagement, welches wesentlich zum Gelingen des Projekts und damit dieser Dissertation beigetragen hat. Mein Dank gilt darüber hinaus auch den am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik wirkenden Mitarbeitern für ihre fachliche Unterstützung sowie das hilfsbereite und kollegiale Arbeitsumfeld.

An dieser Stelle gilt der größte Dank vor allem meiner Freundin Nicole Moser. Sie hat mich liebevoll durch die Höhen und Tiefen dieser Dissertation begleitet und in allen Lebenslagen tatkräftig unterstützt.

*„Nicht die Jahre in unserem Leben zählen,
sondern das Leben in unseren Jahren.“*

Adlai Ewing Stevenson

Kurzfassung

Als Reaktion auf die gesetzliche Reglementierung der CO₂ Fahrzeugemissionen werden aktuell verschiedenste Technologieansätze in der automobilen Forschung und Entwicklung verfolgt, um die geforderten Grenzwerte einzuhalten und die bei Überschreitung drohenden Strafzahlungen zu umgehen. Seitens der Hersteller wurde unter anderem das CO₂ Einsparpotenzial durch die Reduktion des Fahrzeuggewichts erkannt. Weiterhin werden zunehmend hybride Antriebslösungen in die Serienproduktion überführt, welche durch einen intelligenten Betrieb von Verbrennungsmotor und Elektromaschine die Triebstrangeffizienz steigern.

Neben komplexen und kostenintensiven Hochvoltsystemen werden darüber hinaus Hybridansätze im Niederspannungsbereich bis 60 Volt untersucht. Deren Komplexität ist durch die Vermeidung von zusätzlichen Spannungsschutzmaßnahmen deutlich geringer. Vorrangig sollen diese Systeme den steigenden Bedarf an elektrischer Energie im Bordnetz decken, darüber hinaus wird das im Vergleich zum konventionellen 12 Volt System gesteigerte Rekuperationspotenzial nachhaltig zur Verbrauchsreduktion eingesetzt. Die Nutzung der Elektromaschine als Antriebsmotor und damit die Darstellung eines vollwertigen Hybridfahrzeugs bleibt vor allem in Serienfahrzeugen auf Grund des höheren Fahrzeuggewichts und der dennoch limitierten Leistung dieser Niederspannungssysteme eher begrenzt.

Die vorliegende Arbeit widmet sich einer Kombination der zuvor erwähnten Technologietrends und untersucht im Speziellen einen Hybridantrieb im Niederspannungsbereich im Kontext eines ultraleichten Fahrzeugkonzepts (A-Segment) mit einem Leergewicht unter 700 kg. Betrachtet werden Riemen-Starter-Generatoren mit einem Spannungsniveau von 12 Volt und 48 Volt im Vergleich zu in diesem Segment üblichen Konfigurationen bestehend aus konventioneller Lichtmaschine und Ritzelstarter. Besonderer Fokus wird dabei auf die Antriebsarchitektur, d.h. die Positionierung des Riemen-Starter-Generators in den bestehenden Triebstrang, gelegt. Verbrauchs- und komfortrelevante Faktoren werden mittels Simulationen und Messungen am realen Antriebsstrang untersucht und die Besonderheiten der einzelnen Topologien hervorgehoben. Die intelligente Anbindung des Riemen-Starter-Generators in Kombination mit einer fundierten Betriebsstrategie generiert trotz einem Spannungsniveau von lediglich 48 Volt somit die Funktionalitäten eines Full-Hybrid Fahrzeugs mit Verbrauchsvorteilen von -23,2 % (NEFZ) und -16,1 % (WLTP) gegenüber dem konventionellen 12 Volt Antriebssystem.

Abstract

Due to the legal limitation of the CO₂ vehicle emissions, different technologies were actually focused in the automotive research and development to achieve the requested targets and avoid financial penalties. The car manufacturer recognised the CO₂ saving potential by a reduced vehicle weight. In addition, hybrid powertrain solutions, which increase the fuel efficiency by an intelligent combination of the internal combustion engine with the electric motor, were more and more introduced in the series production.

Next to complex and cost intensive high voltage systems, hybrid approaches with a voltage level below 60 Volt were analysed as well. As additional voltage protection demands can be avoided, these installations are less complex. As a priority target, the increasing energy demand of the electrical on-board system should be covered and, in addition, the higher recuperation potential in comparison to a conventional 12 Volt system is used for a sustainable fuel reduction. The use of the electric machine as a traction motor and, therefore, to represent a hybrid vehicle with all common driving functions, is limited especially for series vehicles due to the higher curb weight and the limited power of the low voltage system.

This thesis deals with the combination of the prior mentioned technology trends and analyses in detail a low voltage hybrid approach in the context of an ultra-light vehicle concept (A-segment) with a curb weight below 700 kg. Belt-Starter-Generators with a voltage level of 12 Volt and 48 Volt were considered and compared to a powertrain configuration with a conventional alternator plus starter structure as this would be common in such vehicle class. Especially the powertrain architecture, which means the positioning of the Belt-Starter-Generator in the existing powertrain, is focused. Simulations as well as test bench measurements at the real powertrain investigate the different topologies regarding fuel efficiency and comfort criteria. Despite the 48 Volt level, an intelligent adaptation of the Belt-Starter-Generator in combination with an established hybrid operating strategy generates hybrid functions as they are common for Full-Hybrid vehicles and lead to a fuel reduction up to -23,2 % (NEDC) and -16,1 % (WLTP) compared to a conventional 12 Volt configuration.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Hybridtechnologie	5
2.1.1	Einteilung von Hybridkonzepten	6
2.1.2	Niederspannungsbereich bis 60 Volt	9
2.1.3	Hybrid-Komponenten	12
2.1.3.1	Verbrennungsmotor	12
2.1.3.2	Elektrische Maschine	12
2.1.3.3	Bordnetztopologie	14
2.1.3.4	Leistungselektronik	15
2.1.3.5	Speichertechnologie	16
2.1.4	Antriebsstrangmanagement	18
2.2	Hybridkonzepte für den Niederspannungsbereich	19
2.2.1	Micro-Hybridisierung 12 Volt	20
2.2.2	Mild-Hybridisierung 48 Volt	21
2.3	CULT - Cars Ultra-Light Technology	28
2.3.1	Fahrzeugkonzept	28
2.3.2	Leichtbautechnologie	30
2.3.3	Antriebsstrang	32
2.3.3.1	Verbrennungsmotor	33
2.3.3.2	Getriebe	35
2.3.3.3	Riemen-Starter-Generator	37
3	Methodik	38
3.1	Simulation	38
3.1.1	Aufbau eines Simulationsmodells	38
3.1.2	Bedatung der Hauptkomponenten	39
3.1.2.1	Konventionell	39
3.1.2.2	Hybrid	44

3.1.3	Betriebsstrategie	48
3.1.3.1	Lastpunktanhebung	49
3.1.3.2	Rekuperation	53
3.1.3.3	Segeln	54
3.1.3.4	Boost	55
3.1.3.5	Elektrisch Fahren	55
3.1.4	Validierung des Simulationsmodells	58
3.2	Prüfstand	59
3.2.1	Konzept dynamischer Antriebsprüfstand	59
3.2.2	Funktionsentwicklung und Applikation	60
3.2.2.1	Allgemein	60
3.2.2.2	Hybrid Control Unit	63
4	Untersuchungen	65
4.1	12 Volt Hybridkonzept	65
4.1.1	Potenzielle Antriebstopologien	65
4.1.2	Verbrauchspotenziale	66
4.1.2.1	Basisvalidierung Antriebsstrang	66
4.1.2.2	Rekuperation	69
4.1.2.3	Segeln	73
4.1.2.4	Elektrisch Fahren	74
4.1.2.5	Lastpunktanhebung	76
4.1.2.6	Zusammenfassung	76
4.1.3	Komfortbewertung	78
4.2	48 Volt Hybridkonzept	81
4.2.1	Potenzielle Antriebstopologien	81
4.2.2	Verbrauchspotenziale	82
4.2.2.1	Basisvalidierung Antriebsstrang	82
4.2.2.2	Rekuperation	83
4.2.2.3	Segeln	87
4.2.2.4	Elektrisch Fahren	88
4.2.2.5	Lastpunktanhebung	94
4.2.2.6	Zusammenfassung	97
4.2.2.7	Optimierungsansätze	106
4.2.2.8	Einfluss Fahrzeuggewicht	112
4.2.3	Komfortbewertung	114
4.3	48 Volt Plug-In Hybridkonzept	121
4.3.1	Plug-In Zertifizierung	121
4.3.2	Verbrauchspotenzial	122

4.3.3 Zusammenfassung	124
5 Zusammenfassung und Ausblick	125
5.1 Zusammenfassung	125
5.2 Ausblick	127
Anhang	128
Literaturverzeichnis	129

Nomenklatur

Griechische Symbole

α	Neigungswinkel Fahrbahn	[°]
$\bar{\eta}_{Laden}$	Mittlerer Wirkungsgrad Batterieladevorgang	[-]
$\bar{\eta}_{VKM,diff,n}$	Differenzieller Wirkungsgrad Verbrennungsmotor für Drehzahlschritt n	[-]
$\bar{\eta}_{VKM,diff}$	Mittlerer differenzieller Wirkungsgrad Verbrennungsmotor	[-]
$\eta_{Bat,Entladen}$	Entladewirkungsgrad Batterie	[-]
$\eta_{Bat,Laden}$	Ladewirkungsgrad Batterie	[-]
η_{eff}	Effektiver Wirkungsgrad	[-]
$\eta_{ElektrFahren}$	Wirkungsgrad für den elektrischen Fahrbetrieb	[-]
η_{Gen}	Wirkungsgrad RSG Generatorbetrieb	[-]
$\eta_{Laden,ges}$	Gesamtwirkungsgrad Ladevorgang	[-]
η_{Mot}	Wirkungsgrad RSG Motorbetrieb	[-]
η_{RSG}	Gesamtwirkungsgrad für den elektrischen Fahrbetrieb	[-]
$\eta_{VKM,diff}$	Differenzieller Wirkungsgrad Verbrennungsmotor	[-]
η_{VKM}	Wirkungsgrad Verbrennungsmotor	[-]
λ	Drehmassenzuschlagfaktor	[-]
λ	Verbrennungsluftverhältnis	[-]
ϕ	Magnetischer Fluss	[Wb]
ρ	Spezifischer Widerstand im elektrischen Leiter	[$\Omega * mm^2/m$]
ρ_{Luft}	Luftdichte	[kg/m^3]

Lateinische Symbole

\dot{m}_{Gas}	Gasmassenstrom	[kg/h]
A	Querschnitt eines elektrischen Leiters	[mm^2]

A	Querspanntfläche Fahrzeugfront	$[m^2]$
a	Fahrzeugbeschleunigung	$[m/s^2]$
A_{12V}	Leiterquerschnitt im 12 Volt Bordnetz	$[mm^2]$
A_{48V}	Leiterquerschnitt im 48 Volt Bordnetz	$[mm^2]$
C_{1e}	Kraftstoffverbrauch Plug-In bei voll aufgeladener Batterie (Methode: Elektrische Reichweite)	$[kg/100km]$
C_{1OVC}	Kraftstoffverbrauch Plug-In bei voll aufgeladener Batterie (Methode: Gesamtreichweite)	$[kg/100km]$
C_2	Kraftstoffverbrauch Plug-In bei minimaler Batterieladung	$[kg/100km]$
C_e	Kraftstoffverbrauch Plug-In (Methode: Elektrische Reichweite)	$[kg/100km]$
C_{OVC}	Kraftstoffverbrauch Plug-In (Methode: Gesamtreichweite)	$[kg/100km]$
cw	Luftwiderstandsbeiwert	$[-]$
D_{AV}	Durchschnittliche Strecke zwischen zwei Batterieaufladungen (25 km)	$[km]$
D_{ei}	Elektrische Reichweite für den i-ten NEFZ	$[km]$
D_e	Elektrische Reichweite (Methode: Elektrische Reichweite)	$[km]$
D_{OVC}	Elektrische Reichweite (Methode: Gesamtreichweite)	$[km]$
E_{1e}	Elektrischer Energieverbrauch Plug-In bei voll aufgeladener Batterie (Methode: Elektrische Reichweite)	$[Wh/km]$
E_{1OVC}	Elektrischer Energieverbrauch Plug-In bei voll aufgeladener Batterie (Methode: Gesamtreichweite)	$[Wh/km]$
E_4	Elektrischer Energieverbrauch Plug-In bei minimaler Batterie- ladung	$[Wh/km]$
E_e	Elektrischer Energieverbrauch Plug-In (Methode: Elektrische Reichweite)	$[Wh/km]$
E_{OVC}	Elektrischer Energieverbrauch Plug-In (Methode: Gesamtreichweite)	$[Wh/km]$
f	Widerstandsbeiwert Reifen	$[-]$
F_0	Fahrwiderstandskoeffizient (konstant)	$[N]$
F_1	Fahrwiderstandskoeffizient (linear)	$[N/(km/h)]$
F_2	Fahrwiderstandskoeffizient (quadratisch)	$[N/(km/h)^2]$

F_{Beschl}	Beschleunigungswiderstand	[N]
F_{ges}	Gesamtfahrwiderstand	[N]
F_{Luft}	Luftwiderstand	[N]
F_{Roll}	Rollwiderstand	[N]
F_{Steig}	Steigungswiderstand	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H_u	Unterer Heizwert des Kraftstoffs	[MJ/m ³]
I	Strom	[A]
i	Zeitintervall	[s]
i	Übersetzungsverhältnis	[-]
l	Länge eines elektrischen Leiters	[m]
M	Drehmoment	[Nm]
m	Masse	[kg]
$m_{\Delta,Plug-In}$	Zusatzgewicht für die Plug-In Modellversion	[kg]
M_{FW}	Fahrerwunschmodent	[Nm]
$M_{LPA,opt}$	Wirkungsgradoptimales LPA-Moment	[Nm]
n	Anzahl Drehzahlschritte	[-]
n	Drehzahl	[1/min]
n_{Achse}	Achsdrehzahl	[1/min]
P	Leistung	[W]
$P_{chem,FW}$	Chemische Leistung Verbrennungsmotor (Fahrerwunsch)	[W]
P_{chem}	Chemische Leistung Verbrennungsmotor	[W]
P_{eff}	Effektive Leistung	[W]
$P_{Gen,elektr}$	Elektrische Leistung Generator	[W]
$P_{Gen,mech}$	Mechanische Leistung Generator	[W]
P_i	Verlustleistung über Innenwiderstand der Batterie	[W]
P_L	Verlustleistung im elektrischen Leiter	[W]
$P_{VKM,FW}$	Mechanische Leistung (Fahrerwunsch) Verbrennungsmotor	[W]

$P_{VKM,mech}$	Mechanische Leistung Verbrennungsmotor	[W]
R_{12V}	Widerstand im 12 Volt Bordnetz	[Ω]
R_{48V}	Widerstand im 48 Volt Bordnetz	[Ω]
r_{dyn}	Dynamischer Reifendurchmesser	[m]
R_i	Innenwiderstand Batterie	[Ω]
R_L	Widerstand im elektrischen Leiter	[Ω]
R_m	Magnetischer Widerstand	[Ω]
s_{Elektr}	Elektrische Reichweite Plug-In Fahrzeug	[km]
U	Spannung	[V]
U_0	Leerlaufspannung Batterie	[V]
U_{12V}	Spannung im 12 Volt Bordnetz	[V]
U_1	Spannung der Batterie im Belastungsfall	[V]
U_{48V}	Spannung im 48 Volt Bordnetz	[V]
U_{DS}	Spannung zwischen Drain und Source (Transistor)	[V]
U_{GS}	Spannung zwischen Gate und Source (Transistor)	[V]
U_m	Magnetische Spannung	[V]
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	[km/h]
$x_{Plug-In}$	Plug-In Index - Verhältnis Zusatzgewicht zu elektrischer Reichweite	[kg/km]

Abkürzungen

AC	Alternating Current
AGM	Absorbent Glas Mat
Al	Aluminium
ALABC	Advanced Lead Acid Battery Consortium
ASG	Automatisiertes Schaltgetriebe
ASM	Asynchronmaschine
AT	Austria
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
BEV	Battery Electric Vehicle

BRS	Boost Recuperation System
CAN	Controller Area Network
CEH	Cost Efficient Hybrid
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNG	Compressed Natural Gas
CPT	Controlled Power Technologies
CULT	Cars Ultra-Light Technology
CVT	Continuously Variable Transmission
D	Deutschland
DC	Direct Current
DE	Direkteinblasung (CNG)
DI	Direct Injection
DOHC	Double Overhead Camshaft
ECU	Engine Control Unit
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GTC	Gasoline Technology Car
HA	Hinterachse
HCU	Hybrid Control Unit
HiL	Hardware-in-the-Loop
I-VCP	Intake Valve Camshaft Positioning
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISG	Integrierter-Starter-Generator
KFZ	Kraftfahrzeug
KPM	Klauenpolmaschine
Li-Ion	Lithium-Ion
LM	Leichtmetall
LPA	Lastpunktanhebung
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
OVC	Off-Vehicle Charging
PCU	Programmable Control Unit
PDC	Park Distance Control
PerfET	Performing and Efficient Transmission
PI-Regler	Regler mit proportionalem und integralem Verhalten
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschinen
PWM	Pulsweitenmodulation
RCP	Rapid Control Prototyping Unit
RM	Reluktanzmaschine
SiL	Software in the Loop
SOC	State of Charge
TCU	Transmission Control Unit
VA	Vorderachse
VCU	Vehicle Control Unit
VW	Volkswagen
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
ZOT	Zünd-OT

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Die automobilen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden derzeit massiv von den gesetzlichen Emissionsrestriktionen bestimmt. Vor allem die Reduktion des CO₂ Ausstoßes soll in den nächsten Jahren erheblich vorangetrieben werden. CO₂ als Treibhausgas wird nach [8, 84] direkt mit der Erderwärmung in Verbindung gebracht. Basierend auf der Verbrennung von Kraftstoffen emittiert der Fahrzeugsektor (PKW, Nutzfahrzeuge, etc.) neben dem Energieerzeugungs- sowie Industriesektor den drittgrößten Anteil am weltweiten CO₂ Ausstoß [23, 111]. Die Europäische Union hat sich diesem Thema angenommen und eine Gesetzgebung für den automobilen Sektor verfasst, welche eine klare Reduktion der CO₂ Emissionen für definierte Zeitabschnitte vorgibt [26, 27]. Diese Regelung bezieht sich auf die gemittelten CO₂ Emissionen einer gesamten PKW-Flotte eines Fahrzeugherstellers und strebt für 2015 einen CO₂ Grenzwert von 130 gCO₂/km an sowie weiterführend 95 gCO₂/km bis 2021. Rückblickend von 2001 bis 2013 stellt Abb. 1.1 die jährliche Entwicklung des CO₂ Ausstoßes im Fahrzeugsektor sowie das bereits erzielte Einsparpotenzial dar. Im Jahr 2013 wurde ein Durchschnittswert von 127 gCO₂/km für die 28 Staaten der Europäischen Union (EU-28) erzielt. Für den europäischen Raum betrachtet, ist damit das CO₂ Emissionsziel für das Jahr 2015 bereits erreicht. Auch eine detaillierte Aufschlüsselung der CO₂ Emissionen nach Fahrzeughersteller [71] verdeutlicht, dass der Grenzwert für 2015 unter Beibehaltung der derzeitigen Verbrauchsabsenkungstendenz größtenteils erreicht werden kann. Dennoch ist bis zum Jahr 2021 eine weitere Reduktion von 27 % notwendig, um die geforderten 95 gCO₂/km zu erreichen. Die Nichteinhaltung dieser Limitierung sieht Strafzahlungen für jedes gCO₂/km vor, welches über dem festgelegten Grenzwert liegt. Nach [27] bedeutet eine Überschreitung ab 2019 Kosten von 95 Euro pro zusätzlichem gCO₂/km und neu zugelassenem PKW. Hypothetisch betrachtet bedeutet somit eine Überschreitung des Grenzwertes von z.B. 5 gCO₂/km im Jahr 2020 bei 1 Mio. neu zugelassener Fahrzeuge eine Strafzahlung für den Fahrzeughersteller in Höhe von 475 Mio. Euro. Das in Fachmedien ständig präsente Marketing zum Thema CO₂ Reduktionspotenzial zeigt, dass die Hersteller sich dieser Konsequenzen bewusst sind und eine nachhaltigere Fahrzeugentwicklung forcieren. Da die CO₂ Emissionen im direkten Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch stehen, profitiert letztendlich auch der Kunde aus dieser angeheizten Diskussion.

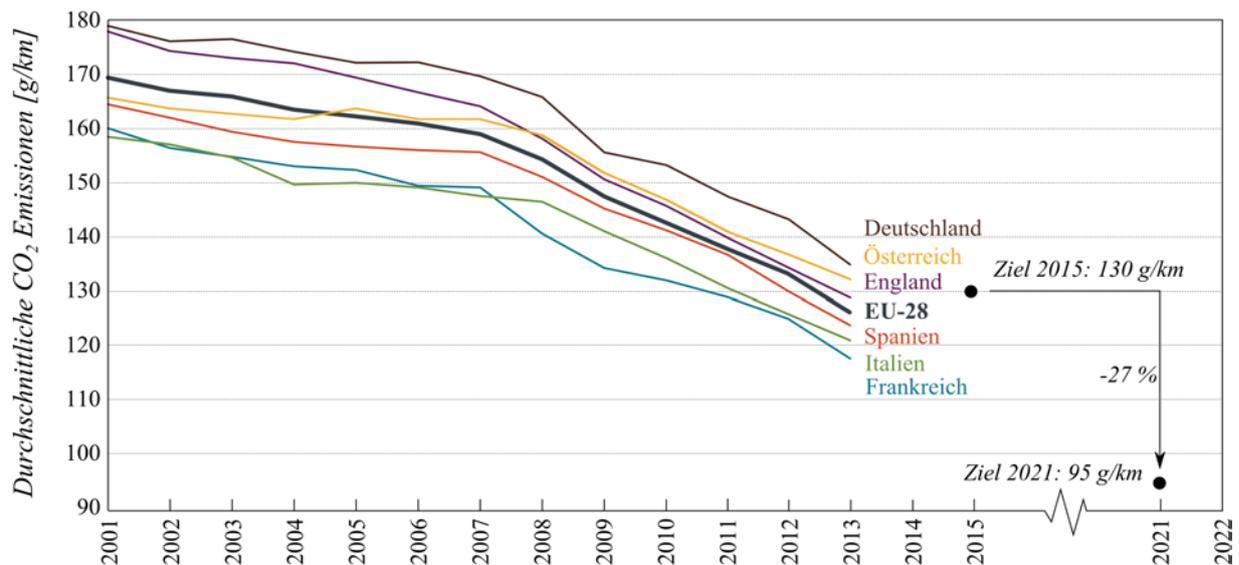


Abbildung 1.1: Jährliche CO₂ Emissionen und deren Reduzierung differenziert nach ausgewählten EU Ländern im Zeitraum von 2001 bis 2013 [71]

Die Lösungsansätze zur Bewältigung dieser CO₂ Restriktionen sind äußerst vielfältig. Es lässt sich erkennen, dass die Hersteller bzw. Zulieferindustrie sowohl evolutionäre, d.h. die konsequente Weiterentwicklung bestehender Technologien, als auch revolutionäre Ansätze verfolgen und damit das Thema automobiler Mobilität völlig neu überdenken.

Die ambitionierte Zielsetzung von 95 gCO₂/km lässt zumindest zwei Hauptrichtungen in der derzeitigen Forschung und Entwicklung erkennen. Einerseits sind rein verbrennungsmotorische Antriebsstränge zur Erreichung dieser Ziele nur noch bedingt geeignet. Obwohl zunehmend hoch entwickelte Downsizing Dreizylindermotoren in einer breiten Anwendung zum Einsatz kommen [59], bleibt deren CO₂ Reduktionspotenzial verbrennungsbedingt dennoch limitiert. Aus diesem Grund wird zunehmend eine hybride Antriebslösung aufgegriffen, bei welcher der Verbrennungsmotor mit einer elektrischen Maschine gekoppelt wird und die Synergien effizient in eine Verbrauchsreduktion umgesetzt werden. Die beiden Antriebe unterscheiden sich grundlegend hinsichtlich Wirkungsgrad und Leistungsspektrum, so dass eine intelligente Kombination eine Steigerung der Systemeffizienz in Aussicht stellt. Dabei gilt tendenziell, dass sich mit zunehmender Leistung der Elektromaschine sowie einer größeren Batteriekapazität auch das Verbrauchspotenzial positiv beeinflussen lässt, wohingegen im gleichen Schritt die Komplexität des Hybridsystems ansteigt. Viele Fahrzeughersteller haben mittlerweile Hybridvarianten als Maßnahme zur CO₂ Reduktion in ihrem Portfolio aufgenommen. In weiterer Folge wurde auch der beträchtliche Einfluss des Fahrzeuggewichts auf den Verbrauch und damit die CO₂ Emissionen erkannt. Die Vergangenheit zeigt, dass ausgehend von einem Fahrzeugmodell, das Gewicht des Folgemodells stetig angestiegen ist. Dies begründet sich einerseits auf die gleichzeitig ansteigenden Fahrzeugdimensionen sowie auf die Integration von zusätzlichen Assistenz-, Komfort- und Sicherheitssystemen. Mittlerweile konnte durch den Einsatz leichterer Werkstoffe bzw. gewichtsoptimierter Bauteile

erstmalig der Gewichtsanstieg kompensiert und teilweise eine Gewichtsreduktion bei den Folgemodellen erzielt werden [24, 37, 80].

Damit sind zwei grundsätzliche Entwicklungsrichtungen klar definiert, eine Kombination von hybriden Antrieben mit leichten Fahrzeugstrukturen verspricht, einen signifikanten Beitrag im Hinblick auf die CO₂ Diskussion leisten zu können. Da die dafür notwendigen Technologien noch am Anfang der Entwicklung stehen und sehr kostenintensiv sind, spiegelt sich dies auch im Absatzmarkt wieder und schließt dementsprechend eine potenziell interessierte Käuferschicht aus. Grundsätzlich ist die Bereitschaft der Kunden vorhanden, ein alternatives Antriebssystem zu nutzen, jedoch wird ein höherer Kaufpreis nur eingeschränkt akzeptiert [61, 95, 114], so dass vorrangig wieder auf konventionell angetriebene Fahrzeuge zurückgegriffen wird.

Aus diesen Spannungsfeldern lässt sich die Motivation erkennen, die beiden Schwerpunkte Leichtbau und Hybridantrieb sinnvoll zu vereinen und dennoch die Kundenbedürfnisse (z.B. potenzieller Kaufpreis) nicht zu vernachlässigen. Bei identischen Lastprofilen erfordern Fahrzeuge mit einem niedrigeren Eigengewicht grundsätzlich eine geringere Antriebsleistung. D.h. kleinere Antriebskomponenten, im Speziellen kleine und kostengünstige Elektromaschinen, genügen, um einen äquivalenten Anwendungsbereich verglichen zu vollwertigen Hybridfahrzeugen mit einem entsprechend hohen CO₂ Reduktionspotenzial abdecken zu können. Diese Skalierung der elektrischen Bauteile auf das niedrigere Anforderungsniveau eines leichten Fahrzeugs führt darüber hinaus zu einem geringeren Mehrpreis für den Hybridantrieb im Vergleich zu konventionellen schweren Hochvoltkonzepten (über 100 V).

1.2 Motivation und Zielsetzung

Diese wissenschaftliche Arbeit befasst sich im Speziellen mit dem Themengebiet der Hybridisierung im Niederspannungsbereich (< 60 Volt) in einem ultraleichten Fahrzeug. Im Zuge eines innovativen Entwicklungsprojekts wurde in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen und wissenschaftlichen Partnern ein fahrbarer Fahrzeugprototyp (CULT - CARS ULTRA-LIGHT TECHNOLOGY [36]) entwickelt und gefertigt (Abb. 1.2). Für das 4-sitzige Fahrzeug im A-Segment wurde ein Leergewicht von lediglich 600 kg angestrebt, was einer Gewichtsreduktion von 300 kg gegenüber Benchmarkfahrzeugen entspricht [35]. Der Fokus der vorliegenden Arbeit konzentriert sich auf die Hybridisierungsmaßnahmen im Niederspannungsbereich, welche innerhalb des Projekts am speziell entwickelten Antriebsstrang vorgenommen wurden und beschreibt aufbauend auf einem Folgeprojekt weitere hybride Maßnahmen, die zu einer deutlichen Reduktion des CO₂ Ausstoßes beitragen.



Abbildung 1.2: CULT - CARS ULTRA-LIGHT TECHNOLOGY Prototypfahrzeug

Die zentrale Frage, welche mit dieser wissenschaftlichen Abhandlung untersucht werden soll, fokussiert die Kraftstoffeffizienz und den Komfortaspekt, die sich aus der Integration eines elektrischen Zusatzantriebs in Form eines Riemen-Starter-Generators in diese spezielle ultraleichte Fahrzeugstruktur ergeben. Ausgehend vom 12 Volt bzw. 48 Volt Bordnetz, werden verbrauchs- und komfortrelevante Faktoren gezielt untersucht. Damit die ambitionierten Gewichts- und Kostenziele nicht vernachlässigt werden, wird bewusst auf eine Hochvolt-Bordnetzinfrastruktur verzichtet. Damit kommt diese Untersuchung auch der in der Motivation abgeleiteten Forderung nach einem ökologischen und dennoch ökonomischen Hybridantrieb nach, der vor allem durch das resultierende niedrigere Kostenniveau neue potenzielle Käufer von der Hybridtechnologie überzeugen könnte.

Zur Zielerreichung werden zunächst grundlegend Hybridisierungsstufen mit einem Spannungslevel unter 60 Volt analysiert und verwandte Projekte abgegrenzt. Anschließend erfolgt eine detailliertere Beschreibung des ultraleichten Fahrzeugkonzepts CULT inklusive der Antriebsstrangkomponenten, welche die Basis für die im Hauptteil folgenden Simulations- und Prüfstandsuntersuchungen bilden.

Es werden die Entwicklungsmethoden betrachtet, welche zur qualitativen und quantitativen Untersuchung und Auswertung der Ergebnisse dieser Arbeit herangezogen werden. Schwerpunktmäßig wird dabei die Simulationsumgebung beschrieben, welche als Bewertungs- und Optimierungstool des hybriden Antriebssystems maßgebend ist. Weiterhin wird die experimentelle Prüfstandsumgebung vorgestellt, welche zur Verifizierung der Simulationsergebnisse genutzt wird.

Im Ergebnisteil dieser Arbeit werden gezielt die Spannungsniveaus 12 Volt und 48 Volt untersucht. Mittels Längsdynamiksimulationen werden geeignete Antriebslayouts, welche sich durch die Anordnung des Riemen-Starter-Generators im Antriebsstrang unterscheiden, hinsichtlich verbrauchs- und komfortrelevanter Faktoren bewertet. Um die Simulationsergebnisse mit dem realen Antrieb abzugleichen, wird weiterführend eine Validierung mittels Prüfstandsmessungen am gesamten Antriebsstrang vorgenommen.

2 Grundlagen

2.1 Hybridtechnologie

In einem Fahrzeug mit einem hybriden Antriebssystem wird grundsätzlich auf mindestens zwei unterschiedliche Energieformen zurückgegriffen, welche durch entsprechende Wandlung in kinetische Energie umgesetzt werden. Grundsätzlich ist dabei jede Energieform denkbar, tendenziell setzt sich zum jetzigen Zeitpunkt vor allem der kombinierte Antrieb aus Verbrennungsmotor (Otto und Diesel) und einer elektrischen Maschine durch. [87]

Diese Systeme sind jedoch nicht grundlegend neu, [48] gibt einen umfassenden Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Hybridfahrzeugen. Erste Patente bezüglich eines kombinierten Antriebs mit Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine wurden demnach schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts eingereicht. Die Umsetzung beschränkte sich jedoch auf vereinzelte Prototypen. Problematisch stellte sich unter anderem das hohe Fahrzeuggewicht dar, welches aus der Integration beider Technologien vor allem auch durch große Batterien mit einer entsprechenden Speicherkapazität entstand. Größeren Absatz erlangte jede Technologie jedoch nur separat, so konnte der verbrennungsmotorische Antrieb besonders für weite Strecken und höhere Reisegeschwindigkeiten seine Vorzüge ausspielen, während der elektrische Antrieb batteriebedingt zwar auf kurze Distanzen reduziert war, sich jedoch durch seine deutlich leichtere Steuer- und Regelbarkeit wesentlich komfortabler darstellte. Ende des 20. Jahrhunderts gelangte erstmals ein erwähnenswerter Durchbruch bei der Markteinführung von Hybridfahrzeugen. Der Toyota Prius, mittlerweile in der dritten Generation, vereint seit 1997 erfolgreich einen Benzin- und Elektromotor und hatte zwischenzeitlich, im Hinblick auf die Absatzzahlen, sogar eine Monopolstellung erzielt [22].

Die Einführung eines kombinierten Antriebs aus Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine begründet sich laut [87] vor allem auf drei Fakten:

- Reduzierung der CO₂ Emissionen bzw. des Kraftstoffverbrauchs
- Steigerung von Fahrdynamik und Fahrkomfort
- Zwischenschritt zum reinen Elektrofahrzeug

Ein wesentlicher Initiator für die Forschung und Entwicklung an hybriden Antriebssystemen ist die Gesetzgebung, welche eine klare Reduktion des CO₂ Ausstoßes in definierten

Zeitabständen vorgibt und bei Überschreitung drastische Strafzahlungen für die Automobilhersteller vorsieht [26, 27]. Da der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs linear mit den CO₂ Emissionen korreliert, wirkt sich eine Steigerung der Antriebseffizienz durch Technologiekombinationen auch vorteilhaft auf den Kraftstoffbedarf aus. Damit ergeben sich geringere Betriebskosten im Vergleich zu einem rein verbrennungsmotorischen Antriebskonzept. Die Kombination beider Antriebstechnologien bedeutet jedoch in den meisten Fällen auch einen höheren Anschaffungspreis, da die teils kostenintensive Hardware (z.B. Hochvolt Batterie) für den elektrischen Antrieb zusätzlich integriert werden muss und keine Substitutionsvorteile mit dem konventionellen Antrieb entstehen. Lediglich in der Dimensionierung der Antriebsaggregate kann bei gleichbleibenden Leistungsniveau kombinationsbedingt Gewichtspotenzial durch Downsizing erschlossen werden, insgesamt steigt das Fahrzeuggewicht jedoch.

Neben verbrauchsrelevanten Aspekten kann die hybride Struktur auch einen Mehrwert bezüglich Fahrkomfort und Fahrdynamik generieren. Hervorzuheben ist hier vor allem die Addition der Antriebsmomente, welche bei entsprechender Antriebsarchitektur (Kap. 2.1.1) in zusätzliche Beschleunigungskraft umgesetzt werden kann und auch bei schwereren Fahrzeugen eine höhere Agilität verspricht. Weiterhin können z.B. Stop-and-Go Situationen oder automatisierte Parkmanöver rein elektrisch durchgeführt werden. Dabei werden insbesondere die unangenehmen Vibrationen sowie Geräusche des Verbrennungsmotors unterbunden, welche vorrangig im unteren Geschwindigkeitsbereich vom Fahrer als störend wahrgenommen werden können.

Langfristig betrachtet stellt das Hybridfahrzeug zudem einen Technologieträger dar, bei dessen Entwicklung die elektrischen Komponenten erprobt und optimiert werden können. Dieser evolutionäre Ansatz ist vom Markt und der Industrie leichter zu bewältigen als ein Technologiesprung vom verbrennungsmotorischen Antrieb direkt auf einen reinen Elektroantrieb. Zwischenstufen wie ein Plug-In Konzept verschieben bereits die Bedeutung in Richtung des elektrischen Antriebs durch leistungsstärkere elektrische Maschinen und Batterien mit erhöhter Speicherkapazität und damit zunehmender Reichweite.

2.1.1 Einteilung von Hybridkonzepten

Nach [48, 87] können Hybridsysteme entsprechend ihrer Kombination von Verbrennungsmotor, Getriebe, elektrischer Maschine bzw. Generator in folgende Kategorien eingeteilt werden:

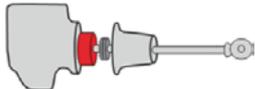
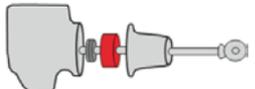
- Serielle Hybridantriebe
- Parallele Hybridantriebe
- Leistungsverzweigte Hybridantriebe

Der **serielle Hybridantrieb** ist dadurch charakterisiert, dass es keine mechanische Verbindung des Verbrennungsmotors mit den Antriebsrädern gibt. Stattdessen ist ein Generator

an die Kurbelwelle der VKM gekoppelt. Zum Vortrieb wird ein zusätzlicher Elektromotor verwendet, der direkt oder über ein Getriebe mit den Rädern verbunden ist. Der Verbrennungsmotor dient ausschließlich der Erzeugung elektrischer Energie. Diese wird entweder über einen Gleichrichter in der Batterie abgespeichert bzw. über einen Wechselrichter dem Traktionsmotor (Elektromotor) zugeführt und in kinetische Antriebsenergie umgesetzt. Vorteilhaft erweist sich, dass der Betrieb des Verbrennungsmotors größtenteils unabhängig vom Fahrzustand erfolgen kann, d.h. dieser kann für definierte Betriebspunkte verbrauchoptimal ausgelegt werden. Negativ gestaltet sich die wirkungsgradbehaftete Energiekette und vor allem die verschiedenen Umwandlungsvorgänge.

Der **parallele Hybridantrieb** unterscheidet sich konstruktiv zum seriellen Konzept durch eine mechanische Kopplung von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine mit den Antriebsrädern. Tendenziell wird nur ein elektrisches Aggregat eingesetzt, welches im Motor- und Generatormodus betrieben werden kann. Zusätzlich lässt sich diese Art der Hybridisierung anhand des Integrationsorts der elektrischen Maschine in den Antriebsstrang charakterisieren. Die möglichen Topologievarianten P1¹ bis P4 sind zusammenfassend in Tab. 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Parallele Hybridtopologien mit besonderem Fokus auf den Integrationsort der elektrischen Maschine in den konventionellen Antriebsstrang [48]

Typ	Konfiguration	Eigenschaften
P1		Elektromotor drehfest mit Verbrennungsmotor verbunden
P2		Elektromotor am Getriebeeingang, durch Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt
P3		Elektromotor hinter dem Getriebe
P4		Elektromotor an separater, vom Verbrennungsmotor nicht angetriebener Achse

Parallele Hybride erweisen sich im Vergleich zum seriellen Antrieb als vorteilhaft im Hinblick auf die Wirkungsgradverkettung bei der Energiewandlung, vor allem da der Verbrennungsmotor das Fahrzeug mechanisch antreiben kann. Weiterhin sind die Kosten und die Komplexität im Vergleich zum seriellen Antrieb geringer. Da beide Antriebe ihr Potenzial im realen Fahrbetrieb aufweisen, kann die Dimensionierung entsprechend dem Lastprofil optimaler ausgelegt werden. D.h. die Elektromaschine wird für potenziell niedrigere Lastkollektive und geringe Geschwindigkeiten genutzt, während der Verbrennungsmotor die Reserven für hohe

¹P1-Hybrid: Die drehfeste Anbindung der Elektromaschine über den Riementrieb an den Verbrennungsmotor wird in der Literatur teilweise auch als P0-Hybrid deklariert

Lasten und Geschwindigkeiten sicherstellt. Dennoch bleibt die Betriebsweise des Verbrennungsmotors eher dynamisch, womit sich prinzipielle Nachteile für die Abgasemissionen und den Verbrauch ergeben.

Der **leistungsverzweigte Hybrid** stellt eine dritte Möglichkeit dar, den Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Antrieb zu kombinieren. Dabei wird die vom Verbrennungsmotor abgegebene mechanische Leistung auf zwei Pfade aufgeteilt. Dieser Leistungssplitt bezieht sich auf einen mechanischen und einen elektrischen Pfad, die mittels Planetengetriebe miteinander gekoppelt sind [108]. Analog dem seriellen Hybrid wird ein Teil der Leistung über eine Elektromaschine in elektrische Leistung gewandelt und anschließend über eine weitere Elektromaschine wieder zurück in mechanische Leistung. Danach werden die Leistungen wieder zusammengeführt und stellen die entsprechende Antriebsleistung dar. Während die Leistungsübertragung im mechanischen Pfad richtungsabhängig ist, kann diese im elektrischen Pfad in beide Richtungen ablaufen. Die Leistungsverzweigung die mittels Planetengetriebe erzielt wird, bietet die Möglichkeit je nach Steuerung der Elektromaschine die Drehzahl und das Moment des Verbrennungsmotors unabhängig vom Fahrzustand zu wählen, wodurch sich wiederum verbrauchsoptimale Bereiche einstellen lassen. Dennoch fordert dieses System einen höheren Hardwareaufwand sowie aufwendige Steuerungs- und Regelkonzepte.

Eine Kategorisierung der Hybridfahrzeuge kann beispielsweise nach dem Grad der Hybridisierung erfolgen. Grundsätzlich unterscheidet man dabei folgende vier Varianten:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid
- Plug-In-Hybrid

Tendenziell werden die Konzepte nach [48] anhand deren möglichen elektrischen Funktionen (z.B. Start Stopp, Rekuperation, Boost, elektrisch Fahren) und dem damit einhergehenden Einsparungspotenzial beim Kraftstoffverbrauch unterteilt. Weiterhin kann die Differenzierung anhand des Leistungspotenzials der Elektromaschine und der Batteriekapazität, welche ein Maß für die Reichweite im elektrischen Betrieb darstellt, erfolgen. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass mit steigender elektrischer Leistungsfähigkeit, welche vorrangig aus der Anhebung des Spannungsniveaus im Bordnetz resultiert, die elektrischen Freiheitsgrade steigen und damit positive Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch einhergehen. In Bezug auf [16, 96] lassen sich diese Potenziale jedoch nur durch einen signifikanten Kostenmehraufwand erschließen. Somit bedeutet die Implementation eines Micro-Hybrid Systems in ein konventionellen Antriebsstrang einen finanziellen Mehraufwand von bis zu 800 Euro. Leistungspotenziale von 10 - 20 kW in Mild-Hybridfahrzeugen verursachen einen potenziellen Kostenanstieg des Fahrzeugs von bis zu 3.000 Euro, bei Full-Hybridsystemen sind es sogar zwischen 4.000 - 8.000 Euro finanzieller Mehraufwand. Plug-In Fahrzeuge stellen mit bis zu

10.000 Euro den größten Kostenanstieg zum konventionellen Antrieb dar. Die angeführten Kosten lassen sich indirekt auch in aktuellen Volumenprognosen verschiedener Hersteller und der Zulieferindustrie für die nächsten Jahre wiedererkennen [25, 63]. Demnach erfahren kurz- bis mittelfristig nur Micro- und teilweise auch Mild-Hybridansätze größeren Absatz, da die potenziellen Anschaffungskosten im relativen Vergleich überschaubar bleiben. Grundsätzlich lässt sich derzeit vor allem eine starke Motivation im Bereich der elektrischen Antriebe im Niederspannungsbereich (bis 60 Volt) erkennen, wie im folgenden Kap. 2.1.2 detaillierter beschrieben wird.

2.1.2 Niederspannungsbereich bis 60 Volt

Die Grundidee, die Bordnetzspannung im PKW Bereich zu erhöhen, entstand nach [88] bereits in den 90er Jahren. Basierend auf dem Einzug zunehmend leistungsstärkerer elektrischer Verbraucher (z.B. Lüfter, Servolenkung, PTC-Heizungen, Kühlmittelpumpen, Klimakompressoren, elektrische Bremsen, etc.) im KFZ und dem damit ansteigendem Gesamtverbrauch an elektrischer Energie, gelangt das konventionelle 12 Volt Bordnetz auf Grund der limitierenden Stromstärke (ca. 250 A) an die Grenzen [10]. Diese Limitierung begründet sich vorrangig auf die damit einhergehende thermische Belastung der elektrischen Bauteile, welche in Korrelation mit der Stromstärke steht. Abb. 2.1 stellt verschiedene Spannungsniveaus und das theoretische Leistungspotenzial in Abhängigkeit der Stromstärke vergleichend gegenüber.

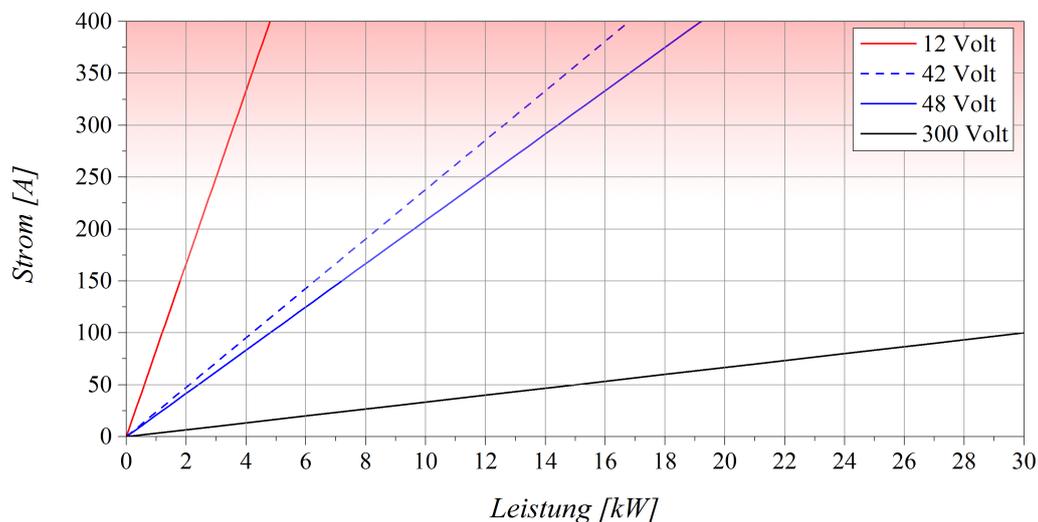


Abbildung 2.1: Elektrische Leistungsgrenzen in Abhängigkeit der Stromstärke für verschiedene Spannungsniveaus [21]

Um den Technologiesprung nicht zu abrupt zu gestalten und um Entwicklungskosten einzusparen, sollte ein kombiniertes Bordnetz mit einem 12 Volt und 42 Volt Zwischenkreis, welche über einen Gleichspannungsrichter miteinander gekoppelt sind, in die PKW Elektrik

integriert werden. Dies erspart die kostenintensive Umrüstung der bewährten 12 Volt Komponenten, gestattet jedoch die Versorgung leistungsstarker Verbraucher auf der 42 Volt Seite. Insgesamt sollte die 42 Volt Spannungsebene zwei Hauptvorteile gegenüber einem konventionellen 12 Volt Bordnetz aufweisen [88]:

- Anhebung des elektrischen Leistungsniveaus zur Versorgung der leistungsstarken Verbraucher im Fahrzeug
- Reduzierung der Baugröße und der Querschnitte der elektrischen Bauteile und Leitungen, positive Auswirkungen auf die widerstandsbehafteten Verluste in den elektrischen Leitern sowie Verringerung von Bauraum, Gewicht und Kosten

Neben diversen Analysen und Prototypen [38, 79, 90, 112] wurde dieses Konzept nicht in Serienfahrzeuge integriert und die Entwicklung mit Beginn des 21. Jahrhunderts eingestellt. Die grundsätzliche Restriktion, die den Durchbruch dieser Technologie verhinderte, ist nach [88] in der Leistungsfähigkeit der Batterie begründet. Zu dieser Zeit erschien die Blei-Säure Batterie als einzig wirtschaftliche Lösung. Diese konnte den Anforderungen an die Zyklusbeständigkeit und den Lade- und Entladeleistungen jedoch nicht genügen.

Durch die akribische Forschung und Entwicklung im Energiespeichersektor (Kap. 2.1.3.5) konnte die Li-Ionen Technologie unter anderem als potenzielle Batterie für eine höhere Spannungslage forciert werden, welche den Anforderungen hinsichtlich Zyklenbeständigkeit, Lade- und Entladeleistungen sowie Gewicht aber auch Kosten gerecht werden kann. Diese Möglichkeit eröffnete in den letzten fünf Jahren erneut die Diskussion hinsichtlich eines Zweispannungsbordnetzes, wobei diesmal ein Spannungsniveau von 48 Volt favorisiert wird. Neben den bekannten 42 Volt Vorteilen, Anhebung des elektrischen Leistungsniveaus sowie Reduzierung der elektrischen Baugröße und der Leiterquerschnitte, ist die Motivation diesmal verstärkt auf die gesetzlichen CO₂ Restriktionen gestützt. Studien belegen, dass das erzielte Leistungsniveau von bis zu 15 kW im elektrischen Betrieb genügt, um einen überwiegenden Anteil der kinetischen Energie in einem Bremsvorgang regenerativ zurückzugewinnen [88, 89, 109]. Zudem sind je nach Konzept (Kap. 2.2) elektrische Unterstützungsfunktionen wie Boost, Segeln bzw. elektrisch Kriechen für niedrige Geschwindigkeiten möglich, so dass über diese Funktionen kategorisch eine Einteilung in die Klasse der Mild-Hybrid Fahrzeuge vorgenommen werden kann.

Im Hinblick auf die Spannungsschutzklassen (Abb. 2.2) bleibt eine weitere Anhebung des Grundspannungsniveaus eher unwahrscheinlich, da im Betrieb die nominelle Spannung von 48 Volt durch Ladevorgänge zusätzlich angehoben werden muss, um den Elektronenfluss in den Batteriezellen anzuregen. Die gesetzlichen Bestimmungen sehen bei Überschreiten der 60 Volt Grenze im Gleichstromnetz gesonderte Bestimmungen im Hinblick auf den Berührungsschutz, Potenzialausgleich und Isolationsüberwachung [72] von Stecker und Anschlussverbindungen vor, die mit einem signifikanten Mehraufwand und entsprechenden Kosten verbunden sind. Der Aufwand, um diese Isolierungsvorschriften einzuhalten, amortisiert sich

erst bei Hochvoltkonzepten mit deutlich über 100 Volt durch einen Mehrwert in den elektrischen Freiheitsgraden und den resultierenden Verbrauchspotenzialen.

Berührschutzbereich		Abkürzung	Bezeichnung	Wert
Überspannungsbereich	60 V $U_{48 \text{ sh protect}}$	$U_{48 \text{ sh protect}}$	Berührungsspannung, Abgeleitet aus der Forderung der Einhaltung des Grenzwertes für den Berührungsschutz von Gleichspannungen nach EC6-R 100	60 V
	58 V $U_{48 \text{ r}}$	$U_{48 \text{ r}}$	2 V Sicherheitsreserve bis zur Berührungsspannung	58 V
oberer Betriebsbereich mit Funktionseinschränkungen	54 V $U_{48 \text{ max. high limited}}$	$U_{48 \text{ max. high limited}}$	Maximale Spannung des oberen Betriebsbereichs mit Funktionseinschränkung	54 V
	52 V $U_{48 \text{ max. unlimited}}$	$U_{48 \text{ max. unlimited}}$	Maximale Spannung des Betriebsbereichs ohne Funktionseinschränkung	52 V
Betriebsbereich ohne Funktionseinschränkungen	48 V $U_{48 \text{ n}}$	$U_{48 \text{ n}}$	BN48-Nennspannung (Die Nennspannung orientiert sich an der Norm DIN IEC 60038)	48 V
	36 V $U_{48 \text{ min. unlimited}}$	$U_{48 \text{ min. unlimited}}$	Minimale Spannung des Betriebsbereichs ohne Funktionseinschränkung	36 V
unterer Betriebsbereich mit Funktionseinschränkungen	24 V $U_{48 \text{ max. low limited}}$	$U_{48 \text{ max. low limited}}$	Minimale Spannung des unteren Betriebsbereichs mit Funktionseinschränkung	24 V
	20 V $U_{48 \text{ sto protect}}$	$U_{48 \text{ sto protect}}$	Speicherschutzspannung	20 V

Abbildung 2.2: Spannungsgrenzen bis 60 Volt [4]

Wie zuvor erwähnt, steigt bei der Leistungsübertragung durch die Anhebung des Spannungsniveaus im Bordnetz zusätzlich die Effizienz im Leiter. Grundlegend kann der Leistungsverlust P_L in einem elektrischen Leiter gemäß folgender Gl. 2.1 aus der Stromstärke I und dem Widerstand im Leiter R_L berechnet werden. Die Stromstärke I ist gemäß Gl. 2.2 von der elektrischen Leistung P sowie dem Spannungsniveau U im jeweiligen Bordnetz abhängig.

$$P_L = I^2 \cdot R_L \quad (2.1)$$

$$I = \frac{P}{U} \quad (2.2)$$

Unter der Annahme, dass der elektrische Leiter als homogen angesehen wird, kann der Widerstand R_L entsprechend [113] nach Gl. 2.3 kalkuliert werden, wobei ρ den spezifischen Widerstand für das eingesetzte Leitermaterial repräsentiert und A sowie l den Querschnitt und die Länge des elektrischen Leiters.

$$R_L = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

Durch die zunehmende Elektrifizierung der Nebenaggregate und Komfortsysteme und dem daraus steigenden Bedarf an zusätzlichen Kabeln, resultiert ein Anstieg des Gewichts für die Elektroinfrastruktur. Durch die Anhebung des Spannungsniveaus kann bei gleicher zu übertragender Leistung auf Grund der abnehmenden Stromstärke der Kabelquerschnitt deutlich reduziert werden [43]. Anhand Gl. 2.4 kann exemplarisch das Verhältnis der Kabelquerschnitte für die 12 Volt und 48 Volt Spannungslage hergeleitet werden.

$$I = \frac{U_{12V}}{R_{12V}} = \frac{U_{48V}}{R_{48V}} \rightarrow \frac{U_{12V} \cdot A_{12V}}{\rho \cdot l} = \frac{U_{48V} \cdot A_{48V}}{\rho \cdot l} \rightarrow A_{12V} = 4 \cdot A_{48V} \quad (2.4)$$

2.1.3 Hybrid-Komponenten

2.1.3.1 Verbrennungsmotor

Je nach Hybridisierungsgrad (Kap. 2.1.1) spielt der konventionelle Verbrennungsmotor im hybriden Antriebsstrang eine unter- bzw. übergeordnete Rolle. Bei der speziellen Betrachtung von Riemen-Starter-Generatoren bleibt die VKM das Hauptantriebsaggregat, da seine Leistung im Verhältnis zur kleineren Elektromaschine selbst bei kleinen Downsizing Aggregaten dominierend bleibt. Im Hinblick auf die Drehmomententwicklung und Wirkungsgradbetrachtung fällt jedoch in Abb. 2.3 das Potenzial auf, das sich bei einer Kombination beider Antriebssysteme ergeben kann. Vor allem den unteren Betriebsbereich, d.h. niedrige Lasten, deckt der Verbrennungsmotor nur mit niedrigen Effizienzen ab, so dass eine Substitution dieser Lastanforderungen durch den elektrischen Antrieb Verbrauchsvorteile generieren kann. Der Verbrennungsmotor ist das dominierende Aggregat für mittlere bis hohe Lasten und höhere Fahrzeuggeschwindigkeiten. Die Bestimmung des in Abb. 2.3 dargestellten Grenzmoments, welches als Grundlage für die Entscheidungsfindung zwischen dem elektrischen bzw. verbrennungsmotorischen Betrieb des Fahrzeugs dient, kann in weiterer Folge Kap. 3.1.3.5

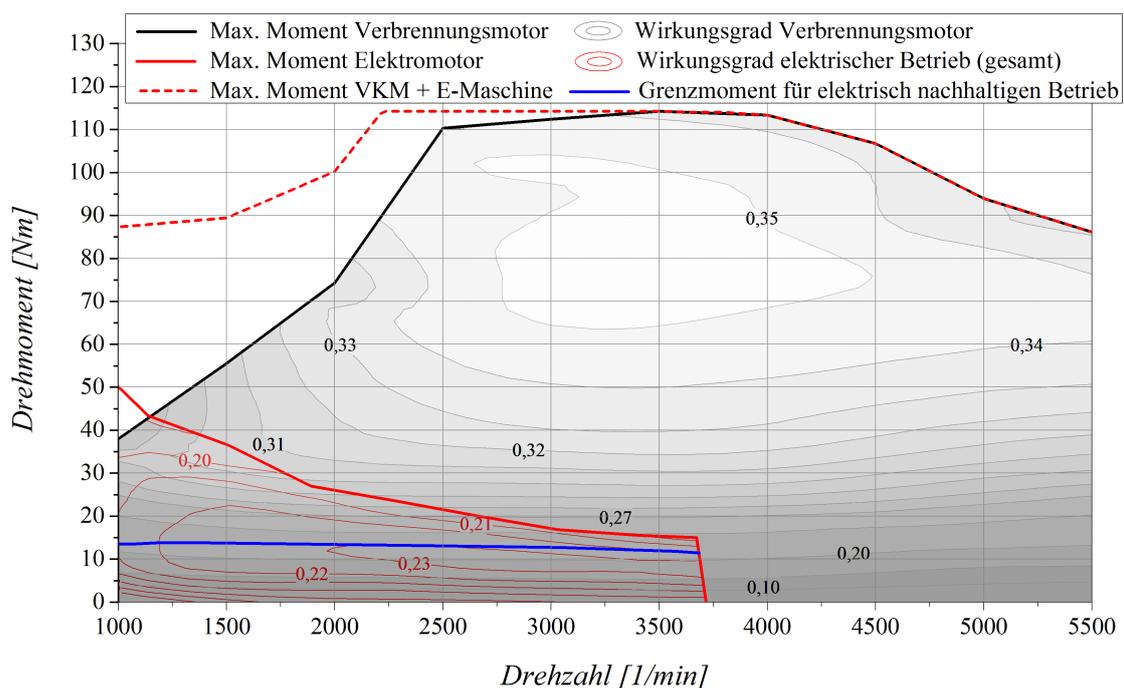


Abbildung 2.3: Wirkungsgradkennfeld Verbrennungsmotor im Vergleich zur Gesamteffizienz des elektrischen Antriebs (rot); Darstellung der Grenzwertlinie (blau) zur effizienten Nutzung der Elektromaschine

2.1.3.2 Elektrische Maschine

Grundsätzlich wird unter einem Riemen-Starter-Generator eine elektrische Maschine verstanden, welche durch eine intelligente Ansteuerung sowohl als Erzeuger elektrischer Energie (Generator) eingesetzt werden kann, aber auch Leistung bzw. Drehmoment abgeben kann

und somit als Antriebsmotor fungiert. Abb. 2.4 stellt exemplarisch den Signalfluss zur Steuerung eines elektrischen Antriebs dar. Über die Leistungselektronik (Umrichter) ist die elektrische Maschine mit dem Energiespeicher gekoppelt. Eine aufwendige Regelung ist notwendig, um den optimalen Betrieb entsprechend der Fahranforderungen realisieren zu können. Nach [11] können für einer Riemen-Starter-Generator im Niederspannungsbereich Asynchronmaschinen (ASM), permanenterregte Synchronmaschinen (PSM), Reluktanzmaschinen (RM) und Klauenpolmaschinen (KPM) eingesetzt werden.

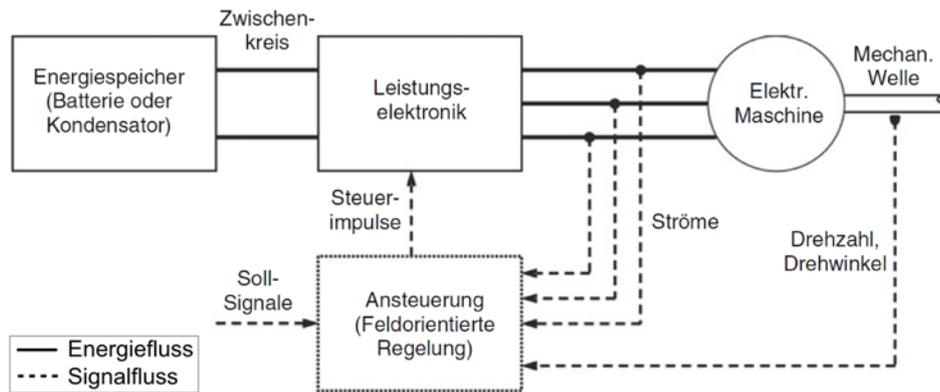


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung zur Steuerung eines elektrischen Antriebs; Darstellung des Energie- und Signalflusses [87]

Die Asynchronmaschine stellt basierend auf dem Kurzschlussläuferprinzip eine kostengünstige und robuste Variante der Elektromaschine dar [11]. Im Bereich niedriger Drehzahlen sind die Wirkungsgrade gegenüber permanenterregten Synchronmaschinen jedoch geringer [85]. Insgesamt betrachtet weist die PSM durch den Einsatz von Permanentmagneten die beste Leistungs- und Drehmomentdichte auf [40, 85]. Der Einsatz von Seltenen Erden macht dieses Maschinenkonzept jedoch teuer im Vergleich zu den anderen Maschinenlayouts [11, 81]. Die kostengünstigste Variante stellt die Klauenpolmaschine dar, da diese bereits seit mehreren Jahrzehnten standardisiert in Kraftfahrzeugen als konventionelle Lichtmaschine eingesetzt wird. Nach [11] weisen diese jedoch im Vergleich die geringsten Wirkungsgrade auf. Die Reluktanzmaschine kommt ebenfalls ohne kostenintensive Seltene Erden aus. Um das Reluktanzprinzip effizient umsetzen zu können, bedarf es jedoch erhöhter Fertigungsanforderungen, um den Luftspalt zwischen Rotor und Stator möglichst gering zu halten. Basierend auf der geschalteten Funktionsweise ergibt sich ein pulsierendes Drehmoment, welches zu einer erhöhten Lagerbelastung führt und im Vergleich zu anderen Konstruktionen ein ungünstiges NVH² Verhalten nach sich ziehen kann [11].

Da in den weiteren 12 Volt und 48 Volt Untersuchungen ein Riemen-Starter-Generator verwendet wurde, der auf dem Reluktanzprinzip beruht, soll dieses System im Folgenden detaillierter beschrieben werden. Grundsätzlich beschreibt die Reluktanz R_m den magnetischen

²Noise Vibration Harshness (engl.): Beschreibung der hörbaren Geräusche und spürbaren Vibrationen im Kraftfahrzeug (dt.: Geräusch, Vibration, Rauheit)

Widerstand, der sich in Abhängigkeit der magnetischen Spannung U_m und des magnetischen Flusses ϕ ergibt (Gl. 2.5).

$$U_m = R_m \cdot \phi \quad (2.5)$$

Stator und Rotor eines Reluktanzmotors bestehen aus einer geraden aber unterschiedlichen Anzahl von Zähnen, Abb. 2.5 (li.) zeigt den Schnitt durch einen Motor mit der Zähnekonfiguration 6/4. Die Zähne am Stator sind weiterhin mit Wicklungen in Form von Spulen versehen, die über die Leistungselektronik entsprechend gesteuert bestromt werden können. Die Ausführung der Wicklungen entscheidet über die Drehmoment- und Leistungscharakteristik der Reluktanzmaschine. Eine geringe Windungszahl steigert die Leistung bei höheren Drehzahlen, wohingegen das Anfangsdrehmoment abnimmt [52]. Die Drehbewegung des Reluktanzmotors beruht auf der Tatsache, dass das System versucht, einen minimalen magnetischen Widerstand zwischen den Stator- und Rotorzähne einzustellen. Je nach aktueller Schaltung der Statorwicklungen richtet sich der Rotor dementsprechend aus. Diese Drehbewegung wird durch das schrittweise Weiterschalten der Bestromung der Statorwicklungen in Abhängigkeit zur gemessenen Rotorlage aufrechterhalten. [48]

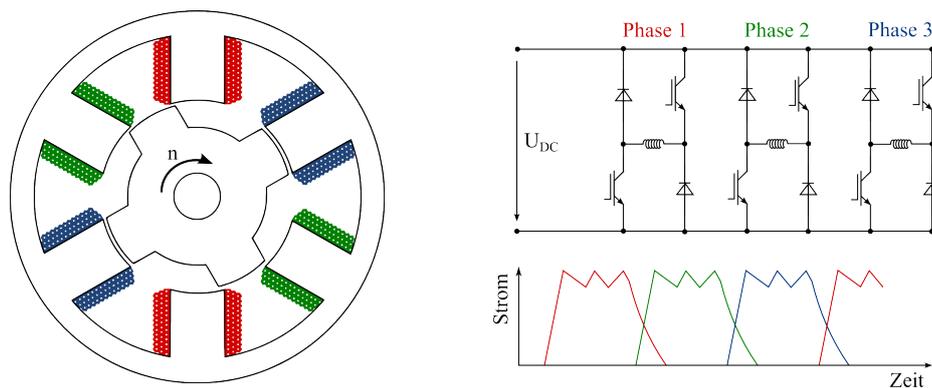


Abbildung 2.5: Ansteuerung eines geschalteten 6/4 Reluktanzmotors [76]

2.1.3.3 Bordnetztopologie

Gegenüber dem konventionellen 12 Volt Bordnetz müssen bei der zusätzlichen Einführung einer 48 Volt Spannungslage weitere elektrische Bauteile im Bordnetz integriert werden. Abb. 2.6 veranschaulicht schematisch die notwendigen Komponenten. In den meisten Anwendungsfällen findet die Erzeugung der elektrischen Energie im kombinierten Bordnetz auf der 48 Volt Seite statt. Diese Energie wird teilweise im 48 Volt Speicher abgelegt bzw. den leistungsstarken 48 Volt Zusatzkomponenten direkt zur Verfügung gestellt. Ein gewisser Anteil wird über einen DC/DC Wandler auf das 12 Volt Bordnetz übertragen und steht hier ebenfalls den konventionellen 12 Volt Verbrauchern zur Verfügung bzw. wird in der zusätzlich vorhandenen 12 Volt Batterie zwischengespeichert. Diese Struktur verlangt weiterhin

nach einem erweitertem Energiemanagement, bei dem die Zustände der Batterien überwacht werden und daraus der Bedarf an generatorischer Energie unter Berücksichtigung einer effizienten Lastpunktanhebung der VKM (Kap. 2.1.4) festgelegt wird. Der konventionelle Starter auf der 12 Volt Seite kann je nach Hybridkonfiguration entfallen.

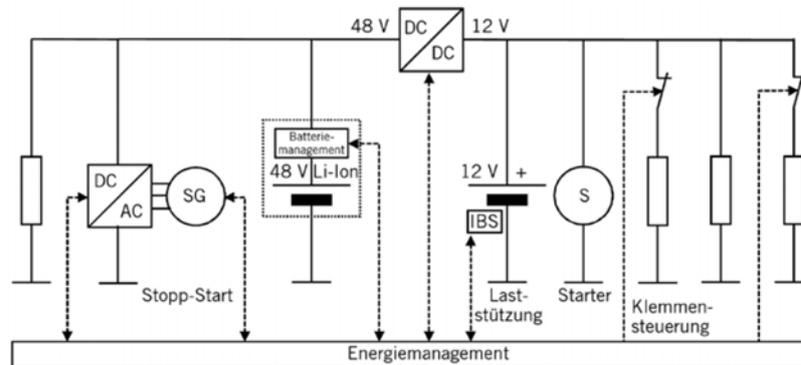


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau eines kombinierten 12 / 48 Volt Bordnetzes [69]

2.1.3.4 Leistungselektronik

Das Kernelement leistungselektronischer Bauelemente bilden gesteuerte Halbleiterschalter, welche je nach Ansteuerung leitend oder hochohmig sein können. Diese werden vorrangig als Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) oder als Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ausgeführt. Nach [87] erweisen sich für Spannungen kleiner 100 Volt und damit für den Niederspannungsbereich MOSFET als vorteilhafter. Positiv wirkt sich vor allem die hohe Schaltfrequenz aus, die für die optimale Steuerung in Hybridanwendungen notwendig ist. Abb. 2.7 zeigt die Struktur eines n-Kanal MOSFET³. Über die Ansteuerung U_{GS} zwischen Gate (G) und Source (S) kann der Widerstand zwischen Source (S) und Drain (D) bestimmt werden. Liegt keine Spannung U_{GS} an, wird der Stromfluss unterbunden. Erst beim Überschreiten einer bestimmten Schwellenspannung öffnet sich das Gate und die Elektronen können sich zwischen Source (S) und Drain (D) bewegen.

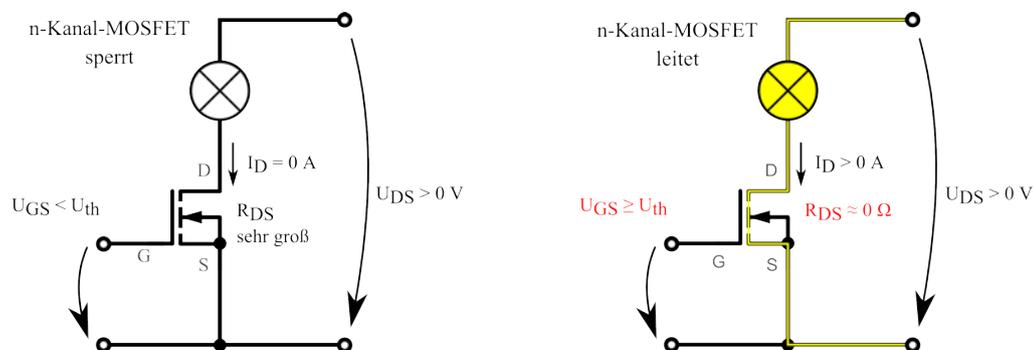


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung eines n-Kanal MOSFET [77]

³n-Kanal MOSFET: Am Stromfluss sind nur die Elektronen beteiligt; p-Kanal MOSFET: Stromfluss wird durch Löcher (Defektelektronen) initiiert

Wechselrichter (AC/DC)

Die Kopplung von Energiespeicher (12 Volt oder 48 Volt) mit dem Riemen-Starter-Generator erfordert eine elektronische Stelleinrichtung zur Wandlung des von der Batterie bereitgestellten Gleichstroms (DC - Direct Current) in den zum Betrieb notwendigen mehrphasigen Wechselstrom (AC - Alternating Current). Wird der RSG im Generatormodus betrieben, findet diese Umwandlung in umgekehrter Reihenfolge statt. [87]

DC/DC Wandler

Die Verbindung zwischen dem 12 Volt und 48 Volt Bordnetz wird über einen Gleichspannungswandler (DC/DC) geschaffen. Damit wird sichergestellt, dass die 12 Volt Batterie über den 48 Volt RSG nachgeladen werden kann bzw. die 12 Volt Verbraucher direkt mit der notwendigen Leistung versorgt werden. Die Umwandlung von Strom und Spannung wird durch wiederholtes Ein- und Ausschalten von Transistoren (MOSFET) in Kombination mit Freilaufdioden und den damit verbundenen Laden und Entladen einer Spule und eines Kondensators erreicht [48]. Die Taktung der Transistoren richtet sich nach dem angestrebten arithmetischen Mittelwert der geforderten Ausgangsspannung. Da der Energiefluss im vorliegenden Anwendungsfall ausschließlich vom 48 Volt Spannungskreis auf die 12 Volt Seite erfolgt, wird theoretisch lediglich ein Tiefsetzsteller benötigt.

2.1.3.5 Speichertechnologie

Als Speichertechnologie für den Niederspannungsbereich wird vorrangig auf Akkumulatoren sowie bei Bedarf auf zusätzliche Ultrakondensatoren [5, 54, 64] zurückgegriffen. Nach Abb. 2.8 unterscheiden sich diese beiden Speicherkonzepte grundlegend hinsichtlich ihrer spezifischen Energie- und Leistungsdichte. Demnach können Kondensatoren kurzzeitig eine hohe Leistung rekuperieren bzw. wieder abgeben, die Speicherenergie ist jedoch stark limitiert. Basierend auf den ablaufenden chemischen Prozessen in einer Batterie, ist deren Reaktionsgeschwindigkeit bei der Aufnahme und Abgabe von elektrischer Energie begrenzt und somit die spezifische Leistungsdichte deutlich geringer. Dennoch kann ein entsprechend höherer Anteil an elektrischer Energie abgespeichert werden. Neben diesen Hauptvarianten wird in [93] zusätzlich das Potenzial von Schwungradspeicher für den Niederspannungsbereich untersucht.

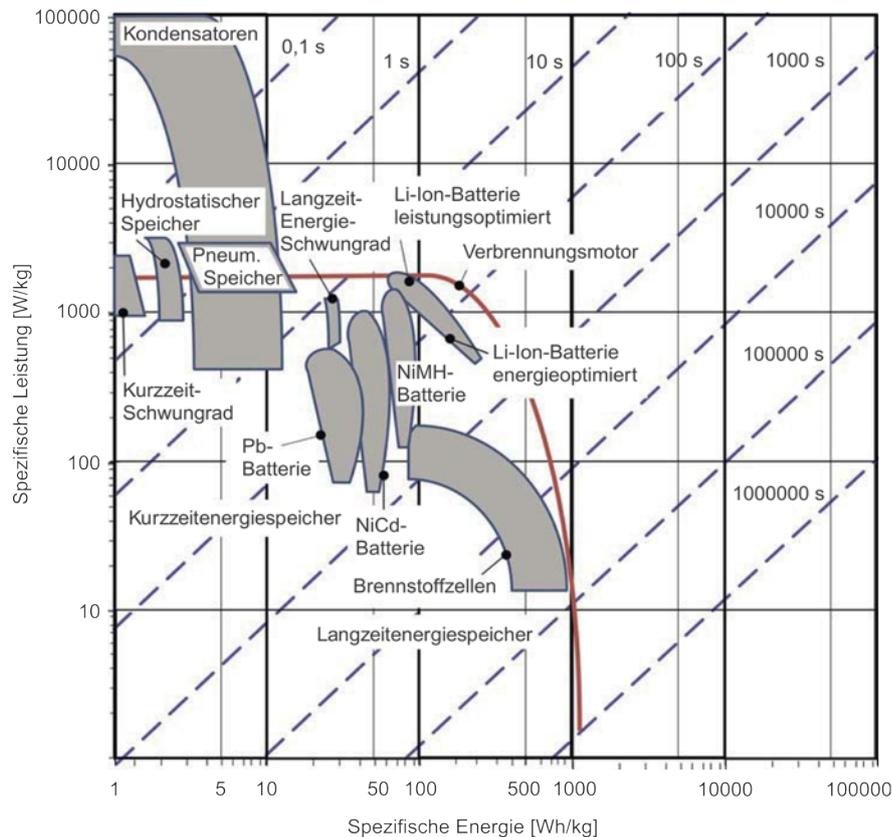


Abbildung 2.8: Darstellung der spezifischen Energie- und Leistungsichte verschiedener Speichertechnologien (Ragone-Diagramm) [87]

Als Akkumulatoren in Hybridfahrzeugen werden tendenziell Bleisäure, NiMH oder Li-Ionen Speicher eingesetzt, wobei mit zunehmender Hybridisierung vor allem im Hochvoltbereich vorrangig auf die Li-Ionen Technologie zurückgegriffen wird. Dennoch fokussiert auch ein bedeutender Anteil der 48 Volt Entwicklungen (Kap. 2.2.2) die Li-Ionen Technologie, wobei hier weiterhin eine Optimierung der Zellchemie zur Reduktion des Innenwiderstands und damit zur Erhöhung der Lade- und Entladeeffizienz beitragen kann [70]. Da die Batterie den Hauptkostentreiber in einem Hybridfahrzeug darstellt, reduziert das 48 Volt Spannungsniveau den potenziellen Preisanstieg, da die Batteriekosten mit der Anzahl der benötigten Zellen korreliert und diese im Vergleich zu Hochvoltsystemen entsprechend geringer sind [17]. Die im Hauptteil dieser wissenschaftlichen Abhandlung untersuchten Hybridmaßnahmen basieren auf der Bleisäuretechnologie, jedoch in AGM (Absorbent Glas Mat) Ausführung, welche im Folgenden näher beschrieben werden soll. Zusätzliche Informationen zu NiMH oder Li-Ionen Konzepten können bei Bedarf der einschlägigen Literatur entnommen werden [53]. Eine detailliertere Gegenüberstellung der zuvor erwähnten Speichertechnologien für den Niederspannungsbereich kann [52] entnommen werden.

Mit dem Einzug der Start Stopp Systeme wurden die herkömmlichen Bleisäurebatterien durch die Integration einer feinen Glasvliesmatte (AGM) zwischen den Elektroden, welche die Schwefelsäure absorbiert, erweitert. Dadurch wurde insbesondere die notwendige Zyklenfestigkeit durch die wiederholten Startvorgänge der VKM sichergestellt [12, 110]. Weiterhin

wird durch die gepresste Bauweise das aktive Elektrodenmaterial gefestigt, wodurch sich eine verlängerte Lebensdauer ergibt. Wird die AGM Batterie voll geladen, muss der Ladestrom deutlich gesenkt werden, um einen überproportionalen Druckaufbau in den Zellen durch die Rekombination der Gase zu verhindern [12]. Durch die Applikation eines Batteriemanagementsystems, welches die AGM Batterie nicht in die Vollladung überführt, können diese ineffizienten Zustände unterbunden werden. Die poröse Struktur des Glasfaservlies erlaubt einen effizienten Transport der Gase durch den Elektrolytraum, wodurch der Ablauf der chemischen Reaktionen begünstigt wird und diese Bauform auf Grund ihrer hohen Leistungsfähigkeit für Rekuperationsvorgänge besonders geeignet erscheint [7]. Im Vergleich zu konventionellen Bleisäurebatterien stellt sich der Temperatureinfluss von AGM Batterien jedoch sensibler im Hinblick auf deren Betriebsverhalten dar [1].

2.1.4 Antriebsstrangmanagement

Das Management des Antriebsstrangs eines Hybridfahrzeugs umfasst grundsätzlich die Betriebsstrategie, welche notwendig wird, um die Antriebskombination aus Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine möglichst effizient, d.h. hinsichtlich verbrauchs- und komfortrelevanter Faktoren, nutzen zu können. Unter Berücksichtigung verschiedenster Eingangsgrößen (z.B. Fahrerwunschkraftmoment, Batterieladezustand, usw.) wird infolge eine möglichst optimale Momentenaufteilung zwischen den beiden Antriebseinheiten vorgenommen [86]. Für den speziellen Anwendungsfall eines parallelen Hybrids bestehend aus Verbrennungsmotor und Riemen-Starter-Generator ist neben dem kombinierten Betrieb beider Antriebsaggregate je nach Antriebsarchitektur auch eine separate Verwendung möglich. Grundsätzlich können folgende Betriebszustände dargestellt werden.

- **Start Stopp:** VKM und RSG werden im Fahrzeugstillstand deaktiviert.
- **Segeln:** Die VKM wird in Verzögerungsphasen ausgekuppelt und abgestellt, um basierend auf der kinetischen Energie des Fahrzeugs den Ausrollweg zu maximieren.
- **Verbrennungsmotorischer Betrieb:** Ausschließlich die VKM wird zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt.
- **Lastpunktanhebung:** Der RSG wird im Generatormodus betrieben, um den elektrischen Energiespeicher wieder nachzuladen. Dafür muss die VKM mehr Leistung aufbringen, als für den eigentlichen Antrieb des Fahrzeugs notwendig ist.
- **Elektrischer Betrieb:** Ausschließlich die elektrische Maschine wird zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt.
- **Boost:** Bei Volllastanforderungen werden die Momente von VKM und RSG addiert, wodurch die Fahrzeugbeschleunigung gesteigert wird.

- **Rekuperation:** Je nach Verzögerungsanforderung kann ein entsprechender Anteil des Wunschbremsmoments über den RSG aufgebracht werden, indem dieser im Generatormodus betrieben wird und so das Fahrzeug teilweise verzögert.

Der Gütegrad bei der Abstimmung dieser Betriebszustände des hybriden Antriebs entscheidet maßgebend über den nachhaltigen Erfolg. Grundsätzlich findet ständig eine energiebasierte Bilanzierung zwischen dem verbrennungsmotorischen und dem elektrischen Antrieb statt, um mit einem möglichst geringen Energie- bzw. Kostenaufwand eine möglichst weite Fahrstrecke zurückzulegen [29, 30]. Dabei unterscheidet sich das Ergebnis in Form einer Verbrauchssenkung bzw. CO₂ Reduktion deutlich, je nachdem ob der Betriebsstrategie Information über das zukünftige Fahrprofil vorliegen (a priori Wissen) oder ob der vorausschauende Zeithorizont begrenzt bzw. nicht vorhanden (a posteriori Wissen) ist [86]. Numerische Ansätze streben durch die detaillierte Untersuchung des kommenden Fahrzyklus effiziente Lösung an, die in weiteren iterativen Schritten optimiert werden können [82]. Im realen Fahrzeugbetrieb lassen sich diese Möglichkeiten jedoch nur sehr begrenzt integrieren [78], da das Wissen über zukünftige Fahrsituationen stark limitiert ist. Im Hinblick auf die zunehmende visuelle Sensorik sowie den abgeleiteten Informationen über das aktuelle Fahrprofil basierend auf den Navigationsdaten, ist es dennoch möglich, der Hybridstrategie einen gewisse Weitsicht zur Verfügung zu stellen [107]. Vorrangig stehen der Betriebsstrategie jedoch nur die gesammelten Information bis zum aktuellen Berechnungszeitpunkt für die Ableitung eines energieoptimalen Einsatzes der beiden Antriebsaggregate zur Verfügung. Dieser Ansatz soll auch in weiterer Folge die Grundlage der in dieser Arbeit entwickelten Betriebsstrategie für das hybride Ultraleichtfahrzeug darstellen (Kap. 3.1.3).

2.2 Hybridkonzepte für den Niederspannungsbereich

Um das Leistungspotenzial von Riemen-Starter-Generatoren weiter auszubauen, werden aktuell seitens der Fahrzeughersteller sowie der Zulieferindustrie intensive Bestrebungen in Form von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf diesem Gebiet durchgeführt. Während 12 Volt Riemen-Starter-Generatoren zunehmend serienmäßigen Einsatz finden, beschränkt sich die Anwendung von 48 Volt Riemen-Starter-Generatoren noch auf Prototypen und Konzeptstudien [25]. Die nachfolgenden Recherchen sollen die verschiedenen Konzepte entsprechend ihrer Architektur, Leistungsfähigkeit und dem Kraftstoff- bzw. CO₂ Einsparpotenzial zusammenfassen und einen Überblick hinsichtlich dem Stand der Technik liefern. Weiterführende Informationen zu den einzelnen Konzepten können bei Bedarf den angeführten Literaturverweisen in Tab. 2.2 (12 Volt) und Tab. 2.3 (48 Volt) entnommen werden.

2.2.1 Micro-Hybridisierung 12 Volt

Riemen-Starter-Generatoren, welche in das konventionelle 12 Volt Bordnetz integriert werden, erfahren zunehmend Anwendung in Serienfahrzeugen. Grundsätzlich wird diese Form der Micro-Hybridisierung in einer P1-Topologie⁴ vorgenommen, wodurch die konstruktiven Änderungen bei der Integration des RSG in den existierenden Antriebsstrang überschaubar bleiben. Durch die individuelle Steuerung der Elektromaschine wird ein intelligentes Generatormanagement ermöglicht. Dieses beinhaltet neben einer wirkungsgradoptimierten Lade-strategie zusätzlich die Möglichkeit, einen Teil der Bremsenergie über Rekuperation zurückzugewinnen. Diese Systeme realisieren weiterhin einen komfortablen Start Stopp Betrieb, der sich aus dem schnellen Ansprechverhalten (unter 400 ms bis zum Erreichen der Leerlaufdrehzahl [14]) und der hohen Dynamik dieser Riemen-Starter-Generatoren ergibt. Dabei ist das Geräusch- und Vibrationsniveau im Vergleich zu einem konventionellen Ritzelstarter deutlich geringer. Teilweise wird durch die schnelle Wiederstartmöglichkeit (Change-of-Mind) der Verbrennungsmotor bereits ab 20 km/h [6] ausgeschaltet und somit eine vereinfachte Segelfunktion dargestellt, bei der das Fahrzeug bei geöffneter Kupplung ausrollt. Tab. 2.2 stellt die Systeme, welche auf einem Riemen-Starter-Generator basieren, zusammenfassend dar. Die Drehmoment und Leistungslimitierung im 12 Volt Betrieb macht diese RSG Technologie jedoch nicht für alle Dimensionen von Verbrennungsmotoren geeignet. Zu berücksichtigen bleiben konstruktive Gegebenheiten wie Reibleistung, Zylinderzahl, Kompressionsverhältnis sowie Hubraum [87].

Tabelle 2.2: Übersicht 12 Volt Micro-Hybridisierung, Serienfahrzeuge [58]

Hersteller	Modell	System	Funktionen	Verweise
Mercedes	A, B- Klasse	RSG (Valeo StARS)	Start Stopp, Segeln unter 8 km/h	[55, 65, 66]
Smart	Fortwo mhd	RSG (Valeo StARS)	Start Stopp, Segeln unter 20 km/h, Rekuperation	[91]
PSA Peugeot Citroën	eHDI Modelle	RSG (Valeo StARS)	Start Stopp, Segeln unter 20 km/h, Rekuperation	[6, 73, 83]

Die Micro-Hybridisierung kann in Form von Start Stopp und Rekuperation aber auch mit einer Kombination aus Ritzelstarter und Lichtmaschine dargestellt werden, sofern zumindest eine individuelle Ansteuerung des Generators möglich ist. BMW verfolgt diese Konfiguration z.B. in den „EfficientDynamics“ Modellen [13, 20].

⁴P1-Topologie: Fallweise auch als P0-Topologie bezeichnet

2.2.2 Mild-Hybridisierung 48 Volt

Das große Interesse hinsichtlich der 48 Volt Spannungslage erschließt sich aus der großen Anzahl publizierter Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Nachfolgend soll eine Übersicht hinsichtlich dem Stand der Technik zu bekannten 48 Volt Systemen und Fahrzeugkonzepten aufgestellt und deren Potenzial hinsichtlich Komfort und Verbrauchseinsparung dargelegt werden.

Bosch stellt mit dem sogenannten **Boost Recuperation System (BRS)** ein Zweispannungsbordnetz vor, dessen Grundlage eine 48 Volt Klauenpolmaschine mit integriertem AC/DC Konverter bildet. Bosch verzichtet bewusst auf eine Kühlmitteldurchströmung der elektrischen Maschine, um den Aufwand bei der Integration in den bestehenden Antriebsstrang möglichst gering zu halten [109]. Der RSG kann eine Peakleistung von bis zu 12 kW für eine Zeitspanne von fünf Sekunden rekuperieren sowie eine mechanische Antriebsleistung von 9,8 kW kurzzeitig für Boost Vorgänge zur Verfügung stellen. Mit Berücksichtigung der internen Inverterverluste sowie des Leistungsbedarfs für den integrierten Lüfter, erreicht die Klauenpolmaschine eine Effizienz von bis zu 88 % [67]. Für den 48 Volt Energiespeicher ist eine Li-Ionen Batterie vorgesehen. Die Kopplung zum vorhandenen 12 Volt Bordnetz erfolgt über einen bidirektionalen Multiphasen Buck-Boost Gleichspannungswandler⁵, der in vier verschiedenen Leistungsgrößen (1,5 - 3,0 kW) und einer maximalen Effizienz von 96,5 % ausgeführt werden kann [67].

Mit dem BRS System soll Rekuperation, Drehmomentunterstützung der VKM sowie der Start Stopp Betrieb abgebildet werden. Darüber hinaus verweist Bosch auf die Möglichkeit zum Segelbetrieb mit den einhergehenden Verbrauchsvorteilen. Das hohe dynamische Potenzial der Elektromaschine ermöglicht in Change-of-Mind Situationen ein entsprechend schnellen Wiederstart der VKM, wobei Bosch dabei besonders auf das niedrige Geräuschniveau und die geringen Vibrationen als deutlich wahrnehmbares Komfortfeature eingeht [109]. Zur Demonstration der BRS Potenziale wählt Bosch ein Fahrzeug der Kompaktklasse (VW Passat 1,2 TSI) und weitet die Simulationen zusätzlich auf weitere Fahrzeugsegmente aus.

Neben der konventionellen Anbindung des RSG an der VKM (P1-Hybrid) hat Bosch trotz der höheren konstruktiven Aufwendungen das gesteigerte Leistungspotenzial durch die Adaption des RSG an die Ausgangswelle eines manuellen Schaltgetriebes (P3-Hybrid) erkannt. Diese Möglichkeit wird als „leistbare“ Hybridlösung für die Sub- / Kompaktklasse angeführt. Im Vergleich zu konstruktiv aufwändigen Integrierten-Starter-Generatoren (ISG) in Form eines P2-Hybriden sind die elektrischen Fahrfunktionen nur unwesentlich eingeschränkt wobei jedoch das Kostenniveau deutlich reduziert ist. [51]

Continental demonstriert mit dem **48 V Eco Drive** in Kombination mit einem Downsi-

⁵Buck-Boost Gleichspannungswandler: Die Eingangsspannung (DC) kann sowohl in eine niedrigere als auch in eine höhere Ausgangsspannung (DC) gewandelt werden

zing Verbrennungsmotor einen ganzheitlichen Ansatz im Bereich der Niederspannungssysteme [92]. Der dieser Konfiguration zu Grunde liegende Riemen-Starter-Generator stellt eine mechanische Spitzenleistung von bis zu 14 kW (2 s) und eine konstante Antriebsleistung von 4,2 kW (1 h) bereit. Dafür kommt ein Asynchronmotor [92] mit integrierter Leistungselektronik und Kühlmitteldurchströmung zum Einsatz. Continental setzt auf Li-Ionen Zellen als Speichermedium. Diese stellen laut [41] den besten Kompromiss hinsichtlich Gewicht, Volumenleistung, Energie und Lebensdauer dar. Zur Erreichung der Nominalspannung von 48 Volt bei einem Ladezustand der Batterie von 50 % werden 13 Zellen benötigt, die Kapazität beträgt 460 Wh. Die Batterie wird aktiv mit Kühlluft angeströmt und kann Leistungen von 14 / 11 kW aufnehmen bzw. abgeben. Weiterhin wurde ein bidirektionaler Buck-Boost DC/DC Konverter entwickelt mit einer Leistungsübertragung von bis zu 3 kW. [63]

Durch die Integration der zweiten Spannungsebene im Fahrzeug sollen Funktionen wie ein erweiterter Start Stopp Betrieb, Rekuperation, Drehmomentunterstützung der VKM, Segeln und elektrisch Kriechen möglich sein [63]. Zusätzlich wird auf die schnelle VKM Startzeit von lediglich 140 ms hingewiesen. Die VKM kann bereits unter 20 km/h abgeschaltet werden, wodurch die störenden Motorabstellvibrationen in Bereiche verschoben werden, die für den Fahrer kaum wahrgenommen werden [92]. Startvorgänge mit dem RSG sind auch bei -10°C möglich. Die Boost Funktion kann das geringe Low-End-Torque⁶ des kleinvolumigen Verbrennungsmotors bis zum Erreichen eines angemessenen Ladedrucks überbrücken [92]. Die elektrische Drehmomentreserve ermöglicht zudem, dass je nach Fahrsituation ein geringerer Momentenvorhalt der VKM, der meist mit einer Wirkungsgradsteigerung einhergeht, vorgesehen werden kann [92]. Der bereits definierten Segelfunktion kann Continental einen weiteren Vorteil zusprechen, der auch auf vergleichbare Systeme anwendbar ist. Durch die Abkopplung der VKM in Schubphasen, wird keine Frischluft durch das Abgassystem gepumpt, wodurch das Auskühlen des Katalysators verlangsamt wird [92].

Zur Verifizierung der Potenziale hat Continental zwei Serienfahrzeuge umgerüstet. Ein VW Golf VI BlueMotion 1,2 l TSI erreichte in NEFZ Messungen bis zu 10,1 % CO₂ Einsparpotenzial, im WLTP bis zu 6,9 % im Vergleich zu einer konventionellen Start Stopp Lösung [40]. Dem Segelbetrieb wird im realen Fahrbetrieb deutlich mehr Potenzial zugesprochen, da keine vordefinierten Geschwindigkeitsprofile eingehalten werden müssen. Somit geht Continental von Gesamteinsparungen (inklusive Rekuperation) bis zu 10,5 % (außerstädtisch, 92 km, 1000 hm) und 19,9 % (innerstädtisch, 11 km, 180 hm) aus [40]. 2014 hat **Continental** in Kooperation mit **Schaeffler** einen Ford Focus mit einem aufgeladenen 1,0 l 3-Zylinder Ottomotor (92 kW) und 6-Gang Handschaltgetriebe auf ein 48 Volt Bordnetz umgerüstet. Continental bezeichnet diese Studie als **Gasoline Technology Car** [115].

Schaeffler untersucht mit dem **48 V Minihybrid** ein im Vergleich zum Wettbewerb alternatives Antriebslayout in Form eines elektrischen Hinterradachsmoduls (P4-Hybrid), dessen

⁶Low-End-Torque: Drehmomentverhalten (Vollast) von Verbrennungsmotoren bei niedrigen Drehzahlen

Hauptbestandteil ein 48 Volt Riemen-Starter-Generator darstellt. Schaeffler geht davon aus, dass diese RSG Systeme in naher Zukunft in großer Stückzahl gefertigt werden und aus diesem Grund einen kostengünstigen Elektroantrieb darstellen. Die publizierten Angaben beziehen sich auf eine 48 Volt Asynchronmaschine mit einer Spitzenleistung von 11,4 kW (20 s) sowie einer kontinuierlichen Leistung von 5,0 kW (60 s) [89].

Die elektrische 48 Volt Achse kann sowohl in front- als auch heckgetriebenen Fahrzeugen verbaut werden und repräsentiert somit eine Art Allradantrieb in Kombination mit der von der VKM angetriebenen Achse. In dem Achsmodul sind zwei Planetengetriebe integriert, welche das Drehmoment vom RSG auf die Achse bzw. umgekehrt übertragen. Um einen möglichst großen elektrischen Betriebsbereich darzustellen, können zur Steigerung der Übersetzung die beiden Planetenradsätze in Reihe geschaltet werden. Dabei wird ein maximales Drehmoment von bis zu 1000 Nm bereitgestellt. Bei höheren Geschwindigkeit ist nur noch ein Planetengetriebe im Einsatz, wodurch die Übersetzung geringer wird [94]. Schaeffler nutzt diese Möglichkeit, um Geschwindigkeiten unter 20 km/h rein elektrisch abzudecken, vorrangig zum Anfahren bzw. als Komfortfeature für Stop-and-Go Verkehr oder Rangiervorgänge. Bei koaxialer Einbauweise ist darüber hinaus auch ein Torque Vectoring⁷ darstellbar. Zudem ermöglicht diese Konfiguration auch das regenerative Bremsen sowie die Drehmomentunterstützung der VKM bei höheren Geschwindigkeiten. Dennoch benötigt diese Architektur eine zusätzliche VKM Starteinrichtung, die laut Schaeffler als 12 Volt oder 48 Volt RSG ausgeführt sein sollte [94]. Hervorzuheben ist die hohe thermische Stabilität des elektrischen Systems, das bis zu einer Temperatur von 150°C die volle Leistungsfähigkeit bereitstellt [89]. Hinsichtlich CO₂ Optimierung bezieht Schaeffler sich in seinen theoretischen Untersuchungen auf eine eher schwere Fahrzeugkategorie (2000 kg) mit großer Motorisierung (8 Zylinder). Im NEFZ beträgt das Einsparpotenzial ca. 9 % gegenüber einem konventionellen Start Stopp System.

Controlled Power Technologies (CPT) entwickelte gemeinsam mit den Partnern AVL, Advanced Lead Acid Battery Consortium (ALABC), Valeo, Mubea und Provector den sogenannten **LC Super Hybrid**, einen Volkswagen Passat 1,4 l TSI Blue Motion, der mittlerweile in zwei Prototypen Versionen (12 Volt und 48 Volt) verfügbar ist [16]. CPT konzentriert sich in diesem übergreifendem Konsortium auf die Entwicklung des dem Konzept zu Grunde liegenden Riemen-Starter-Generators mit der Bezeichnung „SpeedStart“. Dieser RSG ist je nach Anforderung in einer 12 Volt und 48 Volt Variante verfügbar. Bei beiden Versionen handelt es sich um eine geschaltete Reluktanzmaschine mit integrierter Elektronik und Wasserkühlung [52]. CPT führt für die 12 Volt Version Dauerleistungen von bis zu 2,7 kW und Spitzenwirkungsgrade von ca. 90 % an [68]. Hervorgehoben wird weiterhin die hohe Dynamik beim Einleiten der maximalen Ströme (bis zu 205 A) mit Reaktionszeiten unter 10 ms, die vor allem den Change-of-Mind Komfort entscheidend erhöht [68]. Im Laufe des Entwick-

⁷Torque Vectoring beschreibt eine individuelle Verteilung des Antriebsmoments auf das jeweilige Rad

lungsprozesses konnte die Leistungsdichte durch angepasste Regelungsstrategien sowie die Optimierung der Statorwicklungen immer weiter gesteigert werden, so dass die bereits angekündigte 48 Volt Version über 12,5 kW Spitzenleistung und eine kontinuierliche Leistung von ca. 5 kW erreichen soll [15, 52]. Startvorgänge der VKM bis zur Leerlaufdrehzahl sollen unter 400 ms möglich sein [14]. Dabei muss nicht wie bei herkömmlichen Ritzelstartersystemen gewartet werden, bis die VKM Drehzahl null beträgt, sondern der Wiederstart kann jederzeit im Auslaufvorgang erfolgen [16]. Im Gegensatz zum allgemein erkennbaren Trend zur Nutzung von Li-Ionen Zellen als Speichertechnologie sieht CPT das Potenzial in neu entwickelten Bleisäure Batterien, die Vorteile hinsichtlich Wärmeregulierung, Management und vor allem Kostenniveau aufweisen [52].

Die hybriden Funktionsumfänge umfassen beim 12 Volt Prototypen Start Stopp, regeneratives Bremsen und eine Boost Option. Die höhere Leistung der 48 Volt Variante kann weiterführend auch für elektrisches Kriechen, d.h. elektrischer Antrieb für niedrige Geschwindigkeiten sowie elektrische Parkmanöver, genutzt werden. Ersteres stuft CPT hauptsächlich für den realen Stadtverkehr als deutlichen Komfortgewinn ein [52]. In Summe konnte mit der 12 Volt Micro-Hybridisierung eine CO₂ Reduktion im NEFZ von 7 % erzielt werden. Das 48 Volt Demonstrationsfahrzeug erzielte eine Gesamtersparnis von insgesamt 17 % im Vergleich zum gleichwertig motorisierten VW Passat [15]. Neben der klassischen P1-Topologie wie diese vorrangig für Fahrzeugsegmente der Kategorie C und D zum Einsatz kommen soll, untersuchte CPT zusammen mit MAGNA Powertrain eine P2-Struktur für das A/B Segment (siehe MAGNA Powertrain - Cost Efficient Hybrid) [52].

MAGNA Powertrain beschreibt mit dem **Cost Efficient Hybrid (CEH)** ein Antriebsmodul basierend auf einem 48 Volt Riemen-Starter-Generator, welches in Form einer P2-Anordnung in einen konventionellen Antriebsstrang zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe eingebunden werden kann [57]. Vorrangig ist diese Entwicklung für kleine bis mittlere Fahrzeugsegmente mit automatisierten Schaltgetrieben vorgesehen. Für den vollen Funktionsumfang wurde neben der herkömmlichen Anfahrkupplung eine weitere Trennkupplung vorgesehen, die es erlaubt, die VKM vom Antrieb abzukoppeln wobei der RSG über die zweite geschlossene Kupplung mit dem Getriebe verbunden bleibt und rekuperieren bzw. antreiben kann. Der RSG basiert in dieser Konfiguration auf der „SpeedStart“ Einheit von CPT.

MAGNA nutzt zur Demonstration der Potenziale ihres RSG-Moduls einen Fiat 500 twinair (B-Segment) mit einem 2-Zylinder Ottomotor und einem automatisierten Schaltgetriebe. Der Riemen-Starter-Generator weist eine elektrische Leistung von 7,5 kW und ein maximales Drehmoment von 40 Nm, bezogen auf die RSG-Rotorwelle, auf. 1500 Nm können unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung am Abtrieb kurzzeitig bereit gestellt werden. Zusätzlich zum Standardfunktionsumfang für diese 48 Volt Anwendungen können neben Start Stopp, Rekuperation und Boost auch elektrische Fahrfunktionen für niedrige Geschwindig-

keiten dargestellt werden. Das P2-Layout begünstigt diese Fahrfunktion durch das Abkoppeln des VKM Schleppmoments nachhaltig. Das Demonstrationsfahrzeug beschleunigt aus dem Stillstand rein elektrisch mit 1 m/s^2 auf eine Geschwindigkeiten von 25 km/h . Eine elektrische Segelfunktion kann bis zu 50 km/h realisiert werden, dabei kann der RSG diese Geschwindigkeit aufrechterhalten, wenn die VKM ausgekuppelt ist. Die theoretische elektrische Reichweite mit der luftgekühlten Batterie und einer nutzbaren Energie von 100 Wh beschreibt MAGNA mit ca. 500 m . Insgesamt erzielt das Demonstratorfahrzeug eine CO_2 Ersparnis von $11,4 \%$ im NEFZ im Vergleich zur Start Stopp Applikation. Zusätzlich kann auch der Anteil an rekuperierbarer Energie gegenüber einer P1-Konfiguration gesteigert werden. Zu berücksichtigen bleibt, dass auch bei abgeschalteter und ausgekuppelter VKM der Kühlmittelstrom für den RSG sowie die Erzeugung eines Unterdrucks für den Bremskraftverstärker sichergestellt werden müssen. Aus diesem Grund wurde eine elektrische Wasserpumpe und Vakuumpumpe integriert. [57]

Magneti Marelli wählt mit dem **PerfET (Performing and Efficient Transmission)** Konzept eine P3-Architektur in Kombination mit einem automatisierten Schaltgetriebe und hebt besonders die Vorteile hinsichtlich einer elektrischen Drehmomentunterstützung in den Phasen der Zugkraftunterbrechung im Schaltvorgang hervor [2]. Laut [3] leistet das wassergekühlte RSG System im 48 Volt Generatorbetrieb Spitzenleistungen von bis zu 21 kW und 12 kW kontinuierlich. Das Drehmoment an der RSG Welle beträgt kurzzeitig 60 Nm und kontinuierlich 30 Nm . Der RSG ist als permanenterregter Synchronmotor ausgeführt und erzielt einen maximalen Wirkungsgrad von bis zu 95% [19]. Der RSG ist über eine Zahnradpaarung mit der sekundären Getriebewelle gekoppelt und dadurch direkt mit dem Differenzial verbunden [3]. Über diese feste Übersetzung können maximal 700 Nm für den Abtrieb zur Verfügung gestellt werden. Dieses Drehmoment genügt, um selbst bei hohen Beschleunigungen noch 75% der ursprünglichen Zugkraft im Schaltvorgang bereitstellen zu können [19]. Die Funktionen Rekuperation, Boost und Segeln sind mit diesem System ebenfalls möglich. Durch die direkte Kopplung des RSG an das Getriebe kann zusätzlich eine elektrische Fahrfunktion dargestellt werden. Magneti Marelli beschreibt die Motorstartfunktion als eine Art Schwungstart, wobei über eine gezielte Kupplungsansteuerung die kinetische Energie des Fahrzeugs genutzt wird, um den Motor auf die Startdrehzahl zu schleppen.

Magneti Marelli hat zwei Demonstratorfahrzeuge (Fiat 500 und Fiat Panda) mit dem PerfET System ausgestattet. Diese sollen das Potenzial des Antriebssystems vor allem für die kleineren Fahrzeugsegmente widerspiegeln. Als Energiespeicher wurde eine Li-Ionen Batterie mit einer Kapazität von $1,2 \text{ kWh}$ implementiert, die bis zu 25 kW bereitstellen kann. Der Verbrauchsvorteil wird mit 31% angegeben, allerdings im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Start Stopp und mit manuellem Schaltgetriebe. [19]

Valeo bietet mit dem i-StARS System bereits mehrere Jahre einen 12 V Riemen-Starter-Generator an, der in diversen Serienfahrzeugen integriert wurde (Kap. 2.2.1). Mit dem **Hy-**

brid4All Konzept untersucht Valeo ein RSG Konzept, das auf dem 48 Volt Bordnetz beruht. Es wird ein klassisches P1-Konzept angestrebt, um den konstruktiven Aufwand bei der Integration in ein bestehendes Fahrzeug möglichst gering zu halten. Dem Konzept liegt ein luftgekühlter Elektromotor zu Grunde, der eine Spitzenleistung von 12 kW entwickelt und ein Drehmoment von bis zu 55 Nm aus dem Stand zur Verfügung stellen kann [81]. Der maximale Wirkungsgrad wird mit 90 % angegeben. Valeo untersucht in [81] den Kosteneinfluss von Klauenpol- und permanenterregten Synchronmaschinen, eine exakte Angabe, welches Maschinendesign verwendet wurde, findet sich jedoch nicht. Der verwendete Gleichspannungswandler kann eine Leistung bis zu 2,5 kW konvertieren, der maximale Wirkungsgrad beträgt 96 %.

Das Hybrid4All Konzept wurde zur Demonstration in einen Peugeot 207 (1,6 l, Turbo) mit manuellem fünf Gang Getriebe integriert. Es bietet eine Start Stopp Möglichkeit sowie eine Rekuperation- und Boostfunktion. Zusätzlich kann die VKM im Segelbetrieb schon ab 70 km/h ausgekuppelt und abgestellt werden. Das Anfahren kann elektrisch unterstützt oder rein elektrisch erfolgen. Beim unterstützten Anfahrvorgang wird das geringe Drehmoment des Turbomotors bei niedrigen Drehzahlen durch das elektrische Zusatzmoment kompensiert. Simulative Untersuchungen im NEFZ ergaben ein theoretisches CO₂ Reduktionspotenzial bis zu 15 % [81].

Ricardo kündigt ein Demonstrationsfahrzeug mit einem 48 Volt Bordnetz und der Bezeichnung **Advanced Diesel Electric Powertrain (ADEPT)** an [62]. Basierend auf einem Ford Fokus soll ein 48 Volt System integriert werden. Laut [75] soll mit einer Fertigstellung des Prototypen im Jahr 2016 zu rechnen sein.

Die zuvor beschriebenen Bemühungen seitens der Zulieferindustrie, die 48 Volt Systeme möglichst attraktiv in Form von Demonstrationsfahrzeugen darzustellen, sollen letztendlich die OEM überzeugen, ihre Bordnetztopologien zukünftig auf die höhere Spannungslage umzustellen. Seitens der Fahrzeughersteller werden erste Versuche unternommen, wie sich diese Systeme in das aktuelle Portfolio integrieren lassen. Audi beschreibt in [10] die Verbrauchspotenziale und Komfortfaktoren für ein 48 Volt RSG System im aktuellen A7. Auch Mercedes [105, 106], BMW [33] und Ford [9] analysieren die Potenziale.

Die zuvor angeführten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten sollen einen Auszug geben, in welchem Umfang die 48 Volt Technologie derzeit untersucht wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem die Zulieferindustrie das höhere Spannungslevel forciert und die Attraktivität mit diversen adaptierten Prototypen unter Beweis stellt. Es werden Untersuchungen für otto- und dieselbetriebene Serienfahrzeuge angestellt, wobei der 48 Volt RSG in verschiedenen Antriebskonfigurationen (P1 bis P4-Hybrid) untersucht wird. Tendenziell wird die klassische P1-Struktur favorisiert, da diese den geringsten konstruktiven Aufwand bei der Integration eines solchen Systems in vorhandene Fahrzeuge darstellt. Dennoch zeigt sich, dass verbrauchs- und komfortrelevante Faktoren mit der Adaption eines Riemen-Starter-

Generators z.B. am Getriebeeingang bzw. -ausgang interessante Ansätze darstellen, deren hybride Freiheitsgrade z.B. in Form von elektrisch Fahren ausgeweitet werden können. Die Angabe elektrischer und mechanischer Leistungen für die Riemen-Starter-Generatoren sind teilweise sehr unterschiedlich. Dies begründet sich zum Einem auf die verschiedenen Elektromotorenkonzepte und zum Anderen sind vor allem die Angaben zur Spitzenleistung stark an die Zeit gebunden, wie lang diese Leistung abgerufen werden kann.

Tabelle 2.3: Übersicht Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der 48 Volt Mild-Hybridisierung

Hersteller	Bezeichnung	Konfig.	E-Maschine	Verweise
Bosch	Boost Recuperation System (BRS)	P1-Hybrid	Klauenpolmaschine	[51, 67, 109]
Continental	48 V Eco Drive	P1-Hybrid	Asynchronmaschine	[39, 40, 41, 63, 92]
Continental / Schaeffler	Gasoline Technology Car (GTC)	P1-Hybrid	Asynchronmaschine	[115]
Schaeffler	48 V Minihybrid	P4-Hybrid	Asynchronmaschine	[89, 94]
CPT	LC Super Hybrid	P1-Hybrid	Reluktanzmaschine	[14, 15, 16, 52, 68]
MAGNA Powertrain	Cost Efficient Hybrid (CEH)	P2-Hybrid	Reluktanzmaschine (Update: PSM)	[56, 57]
Magneti Marelli	Performing and Efficient Transmission (PerfET)	P3-Hybrid	Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)	[2, 3, 19]
Valeo	Hybrid4All	P1-Hybrid	k.A.	[81]
Ricardo	Advanced Diesel Electric Powertrain (ADEPT)	P1-Hybrid	Reluktanzmaschine	[75]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sämtliche Bestrebungen vorrangig auf die Bedürfnisse aktueller Fahrzeugsegmente projiziert werden, um den notwendigen Beitrag für die kommende CO₂ Limitierung zu leisten. In dieser kurzfristig anmutenden Denkweise verschwindet der wissenschaftliche Spielraum, diese Systeme in zukünftigen Fahrzeugarchitekturen und damit die mittel- bis langfristige Ausrichtung dieser kostengünstigen Hybridstrukturen im Niederspannungsbereich zu untersuchen. Weiterhin unberücksichtigt bleibt der Einfluss des Fahrzeuggewichts auf das Leistungspotenzial dieser höheren Spannungslage. Gemäß Kap. 2.3.2 findet gerade in diesem Bereich durch die Integration neuer leichter Materialien und Strukturen ein starkes Umdenken statt, wodurch erweiterte Funktionalitäten für einen 48 Volt Hybridantrieb geschaffen werden könnten. Die elektrische Kriechfunktion kann bei einem ultraleichten Fahrzeug z.B. zu einer vollwertigen Fahrfunktion mit akzeptablen Beschleunigungen und je nach Batteriegröße entsprechenden Reichweiten ausgeweitet wer-

den. Die Bremsenergie kann fast vollständig durch den Generator regenerativ in die Batterie zurückgespeist werden. Damit stellt eine extrem leichte 48 Volt Fahrzeugkombination kein klassisches Mild-Hybridkonzept mehr da, sondern kann trotz des geringen Spannungsniveaus Funktionen eines Full-Hybrids aufweisen. Die nachfolgenden Ausführungen gehen auf die speziellen Potenziale bei der Implementierung von Niederspannungshybridssystemen bis 60 Volt in den Kontext eines ultraleichten Fahrzeugs ein. Das zu Grunde liegende Prototypkonzept soll dazu im Folgenden (Kap. 2.3.1) vorgestellt werden.

2.3 CULT - Cars Ultra-Light Technology

2.3.1 Fahrzeugkonzept

Das dieser Arbeit zu Grunde liegende Fahrzeugkonzept CULT (CARS ULTRA-LIGHT TECHNOLOGY) basiert auf einem öffentlich geförderten Projekt mit dem Fokus, zukunftsweisende Entwicklungsarbeit im Bereich nachhaltige Mobilitätslösungen im Kleinwagensegment zu fördern. Die Hauptmerkmale für dieses 4-sitzige A-Segmentkonzept können Tab. 2.4 entnommen werden.

Tabelle 2.4: CULT Fahrzeugspezifikationen [34]

		Fahrzeuglänge	mm	3626
		Fahrzeugbreite	mm	1600
		Fahrzeughöhe	mm	1400
		Gepäckraum	l	180 - 650
		Radstand	mm	2300
		Spurweite VA/HA	mm	1420 / 1420
		Leergewicht	kg	672,5
		Zul. Gesamtgewicht	kg	972,5
		Zul. Anhängelast	kg	0
		Bodenfreiheit	mm	120
		Böschungswinkel vo/hi	°	10 / 28
		Rampenwinkel	°	10
		Reifen, Räder	-	145/80/R13 auf 4Jx13
		Tankinhalt	l / kg	50 / 8
		Zielpreis	EUR	17.000,-
		Reichweite	km	400
Antrieb	0,66l R3-Zylinder CNG DI Turbo			
Leistung max.	kW bei 1/min 50 / 4500			
Drehmoment max.	Nm bei 1/min 110 / 2500			
Getriebe	6 Gang Automatisiertes Schaltgetriebe (ASG)			
Antriebskonzept	Vorderradantrieb			
Fahrwerk VA	GFK Blattfederachsmodule mit Radführungseinheiten aus Al, St-Hilfsrahmen			
Fahrwerk HA	GFK Querblattfeder radführend			
Bremssystem	vorne Scheibenbremse massiv, hinten Trommelbremse			
Lenkung	Elektromechanische Lenkung			
Serienausstattung	Bremsenergieerückgewinnung, Start Stopp, Leichtlaufreifen, Kamera-Außenspiegel, Heckspoiler			
Optionen	Klimaanlage, Zentral-Tablet (HiFi-Anlage, Navigationssystem), LM-Räder, Keyless go, PDC			

Der Begriff der Nachhaltigkeit richtet sich im Speziellen an die emittierten CO₂ Emissionen, welche durch zukunftsweisende Technologien drastisch reduziert wurden. Abb. 2.9 veranschaulicht qualitativ die Auswirkungen der verschiedenen Optimierungsansätze, welche im

Projekt verfolgt wurden. Die Optimierung des Antriebsstrangs bietet demnach das größte Potenzial im Hinblick auf eine nachhaltige CO₂ Reduktion. Dieser Bereich umfasst unter anderem die Hybridmodifikationen, welche in dieser Arbeit behandelt werden. Zusätzlich kann ein signifikanter Anteil durch Leichtbautechnologien erreicht werden. Weiterhin wurde auch der positive Einfluss der Fahrzeugaerodynamik, rollwiderstandsoptimierter Reifen sowie Steigerung der fahrzeugbezogenen Effizienz erkannt. [34]

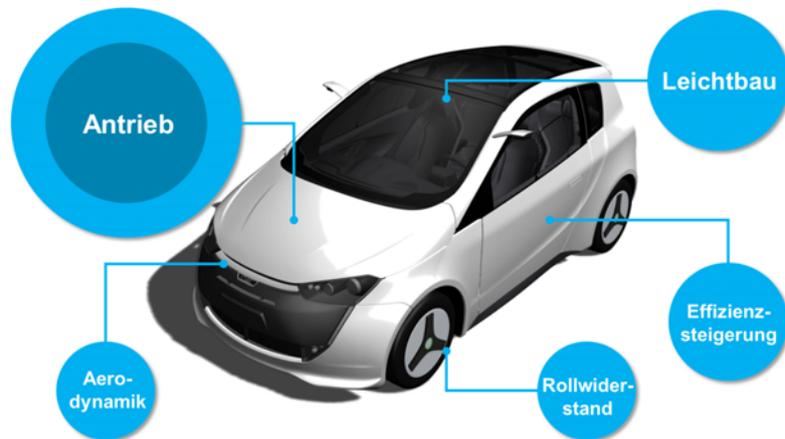


Abbildung 2.9: CULT Stellhebel zur nachhaltigen CO₂ Reduktion [34]

Neben den technischen Kriterien wurde dieses Fahrzeugkonzept auch unter dem Gesichtspunkt „Endkundenbedürfnisse“ betrachtet. Die kundenspezifische Ausrichtung des CULT Fahrzeugs basierte auf Gesellschafts- und Marktanalysen wie z.B. der Sinus-Milieus Zielgruppen Topologie. Daraus entstand unter anderem die Idee, ein „modernes, effizientes, minimalistisches Lifestyle-Fahrzeug [34] zu entwickeln, welches den Anforderungen der zukünftigen potenziellen Käuferschicht entspricht. Im Hinblick auf den Sinus-Milieus Ansatz, gliedert sich dieses Konzept in jede soziale Lage ein, wobei es bei der Orientierung zunehmend auf die Kunden eingeht, welche nach einer Modernisierung bzw. Neuorientierung suchen [34]. Speziell diese Ausrichtung bietet Entwicklungsspielraum für die im weiteren Verlauf beschriebenen hybriden Antriebsinnovationen, welche sich von konventionellen Antrieben abheben und dem Kundendrang nach Modernisierung Rechnung tragen. Im Hinblick auf die gewählte Fahrzeugkategorie (A-Segment) dürfte das CULT Fahrzeug vorrangig im urbanen Sektor und nur begrenzt für außerstädtische Fahrten zum Einsatz kommen. Diese eher dynamischen Fahranteile steigern den Vorteil des hybriden Antriebssystems unter Nutzung intelligenter Betriebsstrategien und führen insgesamt zu einem nachhaltigen Kraftstoffeinsatz. Trotz der Integration innovativer Technologien und Materialien soll der potenzielle Anschaffungspreis des CULT Fahrzeugs in der 12 Volt Hybridisierungsstufe maximal 3.000 Euro über dem Preis vergleichbarer Fahrzeuge liegen, um für die Zielgruppe interessant zu bleiben.

Weiterhin wurde für das CULT Fahrzeug eine Nachhaltigkeitsanalyse (Abb. 2.10) aufgestellt, welche das Erdgas-Hybrid Konzept unter ökologischen sowie ökonomischen Aspekten für die Länder Deutschland (D) und Österreich (AT) mit „Best in Class“ Fahrzeugen im A-Segment

vergleicht, die auf unterschiedliche Antriebssysteme zurückgreifen. Das CULT Konzept überzeugt dabei sowohl bei Betrachtung der Ökobilanz (links) als auch bei den Gesamtkosten für den Kunden (rechts, Total Costs of Ownership) gegenüber den Wettbewerbern. Anzumerken ist dabei, dass in der Analyse für Österreich für das reine Elektrofahrzeug (BEV - Battery Electric Vehicle) der landesspezifische Strommix mit einem überdurchschnittlich hohen Anteil an regenerativen Energiequellen angenommen wurde. Bei Betrachtung des deutschen Strommixes mit einem höheren Anteil an fossilen Energieträgern, ist die Ökobilanz von BEV vergleichbar mit modernen Dieselfahrzeugen. Unter Berücksichtigung einer Laufleistung von 200.000 km und 10 Jahren Nutzungsdauer liegen die Gesamtkosten des CULT Fahrzeugs für den Endkunden auf einem relativ niedrigen Niveau im Vergleich zu den angeführten Antriebssystemen. Der minimal höhere Anschaffungspreis wird durch die niedrigeren Betriebskosten (CNG) sowie den geringeren Verbrauch kompensiert. [101]

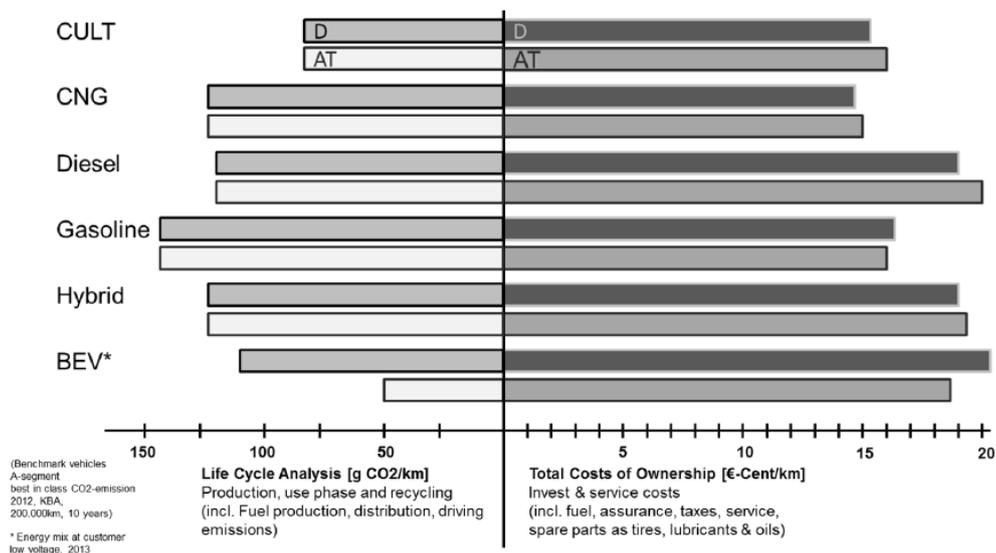


Abbildung 2.10: Nachhaltigkeitsanalyse CULT im Hinblick auf ökologische (li.) und ökonomische (re.) Aspekte im Vergleich mit „Best in Class“ Benchmarkfahrzeugen im A-Segment; Annahme: Gebrauchsdauer 10 Jahre und 200.000 km [44]

2.3.2 Leichtbautechnologie

Die Basis für die im Hauptteil dieser Arbeit untersuchten Hybridlösungen im Niederspannungsbereich (bis 60 Volt) bildet die ultraleichte Fahrzeugstruktur des entwickelten Prototypfahrzeugs CULT. Nur durch den zu Grunde liegenden gesamtheitlichen Ansatz zur drastischen Reduktion des Leergewichts eröffnet sich die Möglichkeit, hybride Fahrfeatures freizuschalten, wie diese sonst nur konventionellen schwereren Fahrzeugen mit einer entsprechenden komplexen Hochvoltstruktur ermöglicht werden.

Ausgehend von einem klassengleichen Benchmarkfahrzeug (kein CNG) sollte die Ausgangsmasse von 900 kg um 300 kg verringert werden. Erdgas betriebene Fahrzeuge im A-Segment weisen sogar ein Leergewicht von ca. 1000 kg auf, welches sich hauptsächlich aus dem höheren

Gewicht der notwendigen CNG Systemkomponenten ergibt. Trotz drastischer Gewichtsreduktion wurden crashrelevante Aspekte ebenso berücksichtigt, wie die Auswirkungen auf den potenziellen Kaufpreis, welcher maximal 3.000 Euro über dem eines vergleichbaren Fahrzeugs liegen sollte [35].

Zur Erreichung dieses Gewichtsziels wurden Ansätze aus den Bereichen Funktionsintegration, Materialsubstitution und Downsizing aufgegriffen. Die Funktionsintegration ist geprägt vom Kerngedanken, möglichst viele Funktionen in einem Bauteil zu integrieren und dadurch Komponenten einsparen zu können. So konnten z.B. durch gezielte Gestaltung der Innenstrukturteile zusätzliche Verkleidungsteile vermieden werden. Diese Maßnahmen sollten insgesamt Einsparungen von bis zu 80 kg erzielen. Im Bereich der Materialsubstitution wurden gezielt Leichtbauwerkstoffe gewählt. Dies umfasst nach Abb. 2.11 in einem großen Umfang vor allem Aluminium Komponenten in Form von Blechen, Profilen oder Gussteilen. Zusätzlich wurde gezielt auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sowie glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) zurückgegriffen. Um das Crashverhalten sicherzustellen, wurde im Bereich der B-Säule Stahl gewählt. Der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen sollte das Gewicht um weitere 100 kg reduzieren. 120 kg sollten durch Skalierungseffekte (Downsizing) diverser Bauteile generiert werden. So können beispielsweise für ein derart leichtes Fahrzeug die Bremsen deutlich kleiner und damit leichter dimensioniert werden als auch der gesamte Antriebsstrang. [101]

Insgesamt konnte der finale CULT Prototyp ein Leergewicht von 672,5 kg (inklusive 12 Volt, P2-Hybrid) erzielen, was einer Reduktion von 227,5 kg gegenüber konventionellen Fahrzeugen dieser Klasse und 327,5 kg gegenüber CNG betriebenen Fahrzeugen entspricht. [34]

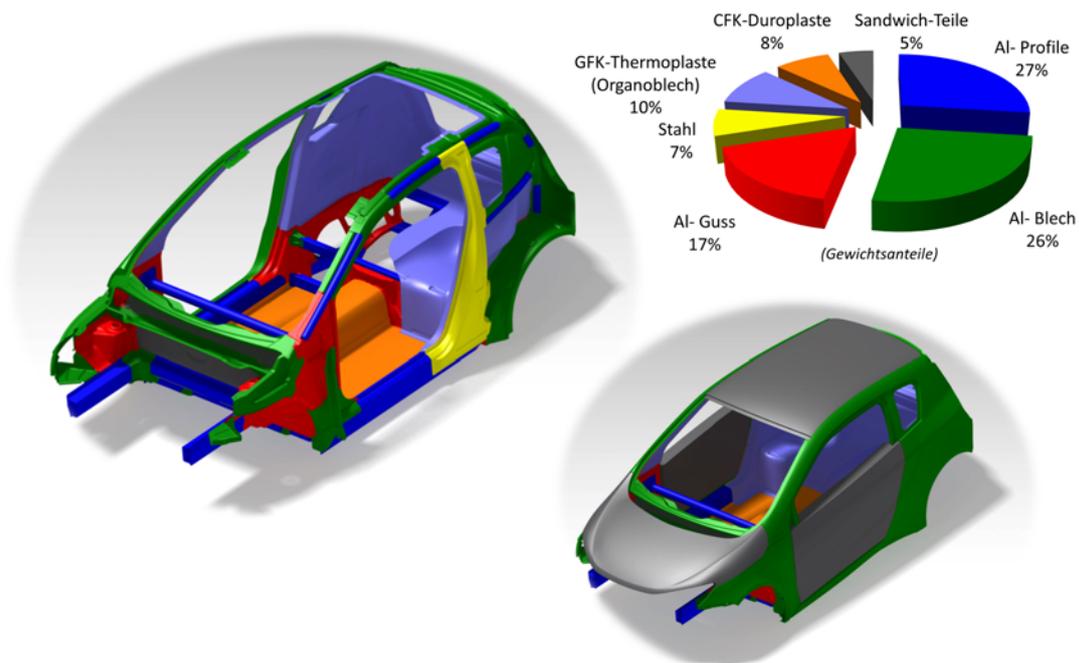


Abbildung 2.11: Materialmix des Rohbaukonzepts für das CULT Fahrzeug [35]

Die im CULT Projekt erzielten Gewichtseinsparungen stellen wegweisende Entwicklungsszenarien dar und veranschaulichen die positiven Auswirkungen auf die Kraftstoffeffizienz, welche mit diesen Gewichtspotenzialen einhergehen. Grundsätzlich wurde der signifikante Einfluss des Fahrzeuggewichts auf den Verbrauch und damit den CO₂ Ausstoß auch in aktuellen Fahrzeugentwicklungen erkannt und ist teilweise auch schon in der Fahrzeugserie angekommen. Rückblickend stieg in der Vergangenheit das Fahrzeuggewicht mit jeder Evolutionsstufe eines bestimmten Fahrzeugmodells stetig an [102]. Diese Entwicklung ist begründet durch die wachsenden Außendimensionen sowie die Integration zusätzlicher Komfort-, Assistenz- und Sicherheitssysteme. In der Modellentwicklung ergab sich dadurch stets ein positives Gewichtsdelta beim Vergleich von zwei aufeinanderfolgenden Modellen. Der Einfluss des Fahrzeuggewichts als nicht zu vernachlässigende Stellschraube zur Erreichung zukünftiger Emissionsziele wurde erkannt und wird mittlerweile konsequent verfolgt. Nach [80] konnte die Gewichtsspirale somit z.B. beim Volkswagen Golf VII umgedreht werden und die Basisversion ist entsprechend leichter als das vergleichbare Vorgängermodell. Im Hinblick auf das CO₂ Einsparpotenzial und die hohe Stückzahl des Volkswagen Golf lässt sich ableiten, welchen signifikanten Einfluss diese Gewichtsreduktion auf die Ökobilanz hat. Eine ähnliche Gewichtsentwicklung ist laut [80] auch beim Audi A3 zu erkennen. Trotzdem steht dieser Trend noch am Anfang und das Potenzial ist noch nicht erschöpft. [24] gibt an, dass z.B. das Leergewicht beim Volkswagen Passat zwischen dem Modell B5 und B6 stagniert, wobei in [37] beschrieben wird, dass durch Leichtbautechnologien zumindest eine Gewichtserhöhung durch die gestiegenen Außendimensionen und Zusatzsysteme kompensiert wurde.

2.3.3 Antriebsstrang

Für das CULT Prototypfahrzeug wurde ein innovativer Antriebsstrang unter Berücksichtigung der Fahrleistungsanforderungen entwickelt, der sich durch das niedrige Gewicht zudem ideal in das ultraleichte Konzept eingliedert. Abb. 2.12 zeigt die finale Konfiguration des kompletten Antriebsstrangs mit der Anbindung des Riemen-Starter-Generators an die Getriebeingangswelle (P2-Hybrid). Weitere Details zu den Komponenten CNG Verbrennungsmotor, automatisiertes Schaltgetriebe und Riemen-Starter-Generator (RSG) können den folgenden Kap. 2.3.3.1 bis Kap. 2.3.3.3 entnommen werden. Im Hauptteil dieser Arbeit (Kap. 4) bleibt die konventionelle Antriebsumgebung identisch, der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Riemen-Starter-Generator, dessen Potenzial durch Variation der Spannungslage in Kombination mit der hybriden Antriebsarchitektur unter besonderer Berücksichtigung verbrauchs- und komfortrelevanter Kriterien analysiert wird.

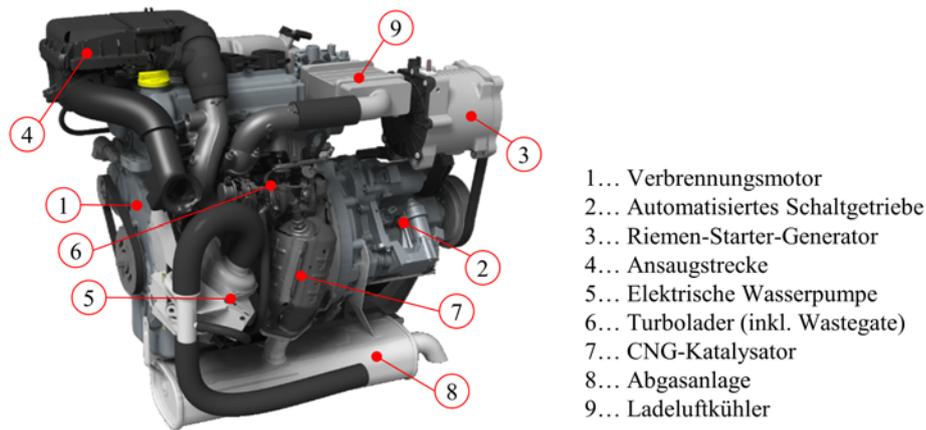


Abbildung 2.12: Antriebsstrang für das CULT Prototypfahrzeug [31]

2.3.3.1 Verbrennungsmotor

Das Kernstück des CULT Antriebskonzepts bildet ein Downsizing 3-Zylinder Verbrennungsmotor mit lediglich 659 cm^3 Hubraum. Dieser ursprünglich benzinbetriebene Motor aus dem japanischen Kei-Car Segment [60] wurde auf CNG Direkteinblasung umgerüstet. Durch die lastpunktabhängige Möglichkeit zur Einstellung der Einblaszeitpunkte des CNG-Luft-Gemischs in den Verbrennungsraum bietet diese Modifikation gegenüber serienmäßigen CNG Saugrohrkonzepten diverse Vorteile hinsichtlich Drehmomententwicklung, Kraftstoffeffizienz sowie Abgasnachbehandlungsstrategien [45]. Unter Zuhilfenahme der Motorprozessrechnung [31] wurden verschiedene Maßnahmen simulativ untersucht und das System hinsichtlich Effizienz und Leistungs- bzw. Drehmomentpotenzial optimiert. Je nach Potenzial der Einzelmaßnahme wurde der reale Verbrennungsmotor für das CULT Prototypfahrzeug angeglichen und die Resultate am Prüfstand validiert. Tab. 2.5 fasst die wichtigsten Merkmale des Verbrennungsmotors im Vergleich zur benzinbetriebenen Ausgangskonfiguration zusammen.

Tabelle 2.5: Kenndaten CULT CNG Verbrennungsmotor für Hybriduntersuchungen im Vergleich zur serienmäßigen benzinbetriebenen Ausgangsvariante

	Basismotor	CULT Applikation
Leistung	47 kW bei 6500 1/min	50 kW bei 4500 1/min
Drehmoment	103 Nm bei 3500 1/min	110 Nm bei 2500 1/min
Zylinder	3	3
Hubraum	658 cm ³	658 cm ³
Verdichtungsverhältnis	8,8	12,0
Bohrung	68,0 mm	68,0 mm
Hub	60,4 mm	60,4 mm
Ventiltrieb	DOHC	DOHC / I-VCP
Kraftstoff	ROZ 95	CNG
Gemischbildung	Bezin-DE	CNG-DE
Aufladung	Abgasturbolader	Abgasturbolader

Die Hauptmodifikation des Verbrennungsmotors (Abb. 2.13) beziehen sich unter anderem auf die Integration einer CNG Direkteinblaseeinheit (DE), bestehend aus den CNG DE Injektoren, dem CNG Rail sowie dem CNG Druckregler, der den Gasdruck vom Speicherdruck in den Gastanks (bis zu 200 bar) auf den geforderten Einblasedruck minimiert. Basierend auf der Direkteinblasefunktion wurden verschiedenste Strategien hinsichtlich Brennverfahrensoptimierung untersucht. Grundsätzlich lässt sich durch die DE Technologie eine Anhebung des Drehmoments für den unteren Drehzahlbereich bis 2500 1/min (Low-End-Torque) erreichen [32, 46, 49]. Dieser Effekt wird durch einen Turbolader mit elektrisch regulierbaren Wastegate verstärkt. Die Auswirkungen verschiedener Turbolader mit unterschiedlich großen Turbinen- und Verdichterquerschnitten wurden ebenfalls simulativ und exemplarisch untersucht [31, 32, 45]. Durch verschiedene Einblasestrategien sowie verschränkte Nockenwellen wurde das Brennverfahren optimiert, so dass hier eine Effizienzsteigerung erreicht werden konnte [45, 46, 47]. Der Grundmotor wurde für das Prototypfahrzeug um eine verstellbare Einlassnockenwelle erweitert, die sich durch Verstellwinkel von bis zu 60° Kurbelwinkel ebenfalls positiv auf das Brennverfahren auswirkt [45]. Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Verdichtungsverhältnisse auf den thermischen Wirkungsgrad und damit die Gesamteffizienz evaluiert [31, 45]. Dazu wurde die Kolbengeometrie adaptiert und verstärkte Pleuel verbaut. Zusätzlich wurde eine elektrische Wasserpumpe eingesetzt, die durch eine unabhängige kennfeldbasierte Regelung Vorteile hinsichtlich Thermomanagement sowie Energieeffizienz bietet. Detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der Optimierungen für diesen 3-Zylinder CNG DE Motor sind den Quellen [31, 45] zu entnehmen.

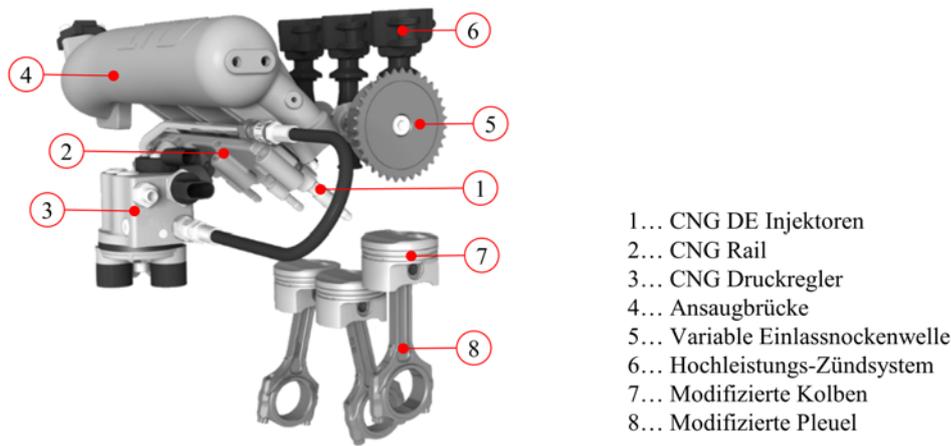


Abbildung 2.13: Modifizierte Bauteile und Baugruppen für den CNG Verbrennungsmotor [32]

Durch die Möglichkeit den CNG-Kraftstoff direkt in den Verbrennungsraum einzublasken, wurde mit dieser Technologie die Voraussetzung geschaffen, den Verbrennungsmotor aus dem Stillstand durch eine kontrollierte Gemischzündung selbstständig zu starten, ohne dass dafür ein zusätzlicher Ritzelstarter nötig wird [18]. Zudem sind mittels Direktstart äußerst schnelle Motorstartvorgänge (250 - 400 ms bis 800 1/min) möglich, dadurch könnte vor allem im hybriden Antriebsstrang eine komfortable Change-of-Mind Funktion dargestellt werden. Die Direktstartfunktion ist jedoch nur eingeschränkt anwendbar. Problematisch gestaltet sich unter anderem der lange Zündabstand zwischen den drei Zylindern. Weiterhin ist diese Funktion stark vom Verdichtungsverhältnis sowie den Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur) abhängig, die sich negativ auf die Füllung im Zylinder auswirken. Nach [28] wird diesem Konzept jedoch nur geringe Relevanz für die Serienentwicklung zugesprochen. Detaillierte Ausführungen zu den Direktstartuntersuchungen an dem gewählten CNG DE Motor für das CULT Fahrzeug können ergänzend [18] entnommen werden.

2.3.3.2 Getriebe

Zur Kraftübertragung wurde ein 6-Gang automatisiertes Schaltgetriebe verwendet. Wie Abb. 2.14 veranschaulicht, zeichnet sich diese Variante durch eine äußerst kompakte Bauweise aus. Dabei ist die Getriebeeingangswelle mit lediglich drei Gangstufen belegt. Durch einen zusätzlichen Wechsel der Differenzialübersetzung können dennoch die insgesamt sechs Übersetzungen dargestellt werden. Dadurch gliedert sich das Getriebe mit einem Gewicht von unter 27 kg perfekt in das ultraleichte Fahrzeugkonzept ein. Zudem ermöglicht die hohe Spreizung inklusive Overdriveauslegung des letzten sechsten Gangs sowie eine intelligente Schaltstrategie (Kap. 3.1.2.1), welche frühzeitig die Gänge hochschaltet, einen verbrauchseffizienten Betrieb des Verbrennungsmotors. Die Getriebekonfiguration orientiert sich neben dem Verbrauchsgedanken zusätzlich an den geforderten Fahrleistungsanforderungen für das Fahrzeugkonzept hinsichtlich Beschleunigungs-, Elastizitäts- und Topspeedanforderungen.

Ein großer Nachteil des Getriebes ist die sequenzielle Ausführung, die mit langen Schaltzeiten und damit unkomfortablen Zugkraftunterbrechungen verbunden ist.

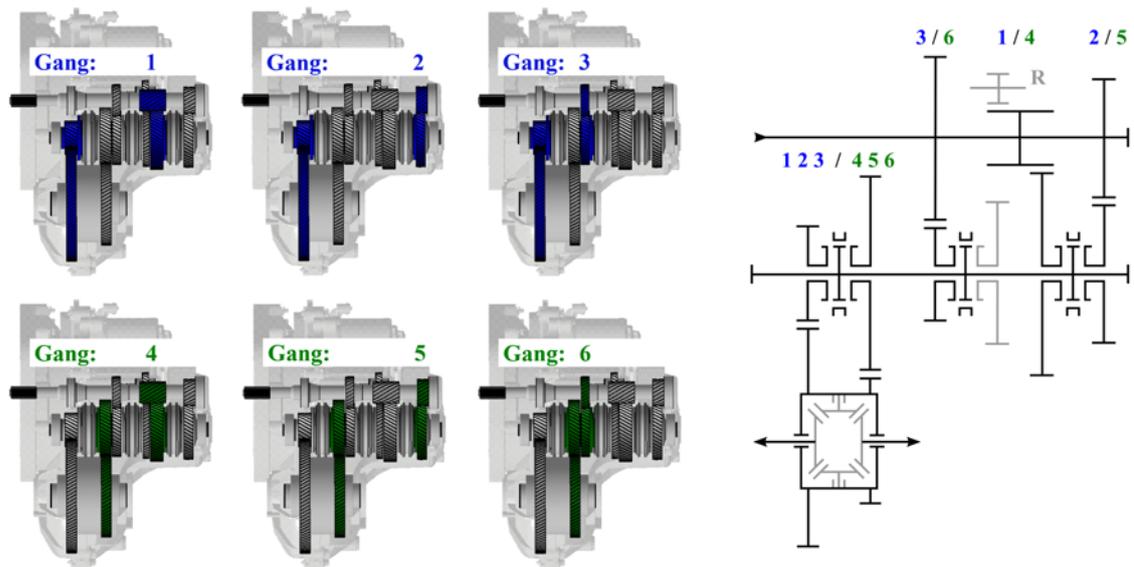


Abbildung 2.14: Veranschaulichung der Gangbelegung des 6-Gang automatisierten Schaltgetriebes für das CULT Fahrzeugkonzept

Um die mechanische Effizienz zu erhöhen, wurde das Getriebe auf eine Trockensumpfschmierung umgerüstet. Diese Modifikation war darüber hinaus notwendig, da das Getriebe im Gegensatz zur serienmäßigen Einbaulage zusätzlich gedreht werden musste und dadurch das herkömmliche Tauchschmierungskonzept die Schmierung aller reibungsbehafteten Stellen nicht mehr sicherstellen konnte. Abb. 2.15 stellt schematisch das Schmierölssystem inklusive den Getriebewellen und Gangstufen dar. Durch die Integration eines externen Ölreservoirs konnte das Ölniveau soweit abgesenkt werden, dass die Zahnräder nicht mehr in das Öl eintauchen und die daraus resultierenden viskosen Schleppverluste unterbunden werden. Insgesamt konnte somit eine Steigerung des mechanischen Wirkungsgrads erzielt werden. Jede Schmierstelle (Zahnräder, Lager, Synchronringe) wird über speziell angeordnete Spritzdüsen separat versorgt. Vorangegangene Simulationen [42] unterstützten dabei die Auslegung der jeweiligen Düsenquerschnitte, um einen geeigneten Schmierölvolumenstrom festlegen zu können. Die druckseitig angeordnete Ölpumpe wird elektrisch betrieben, dadurch wird ein komplett vom aktuellen Fahrprofil unabhängiger Betrieb des Schmierölsystems ermöglicht. Die kennfeldbasierte Regelung ermöglicht die Adaption des Schmierölvolumenstroms je nach Lastprofil. So wird die Pumpe z.B. im Leerlauf stark gedrosselt bzw. abgeschaltet, während der Volumenstrom für hohe Lasten und Drehzahlen angehoben wird. Insgesamt kann somit der elektrische Energieverbrauch signifikant reduziert werden.

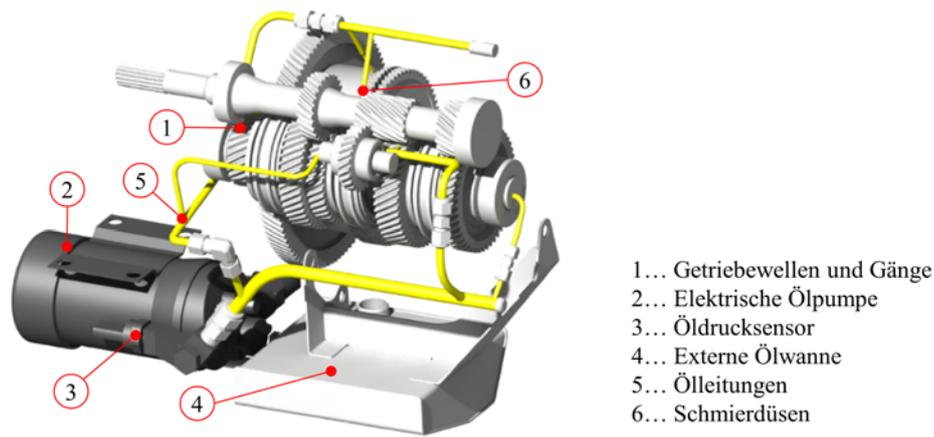


Abbildung 2.15: Trockensumpfschmierung inklusive elektrischer Ölpumpe, externem Ölreservoir und den Schmierleitungen sowie Schmierdüsen für das automatisierte Schaltgetriebe

2.3.3.3 Riemen-Starter-Generator

Im Bereich der Hybridisierung wurde gemäß der Gewichtsrestriktion für den gesamten Antriebsstrang auf einen Riemen-Starter-Generator zurückgegriffen. Während die Komponenten Motor und Getriebe für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschriebenen Hybriduntersuchungen identisch bleiben, werden durch Variation des Integrationsortes der elektrischen Maschine sowie Variation des Spannungslevels (12 Volt bzw. 48 Volt) die Potenziale von Riemen-Starter-Generatoren in dem zuvor beschriebenen CULT Ultraleichtfahrzeug analysiert. Abb. 2.16 stellt die untersuchten Antriebskonfigurationen dar, auf die im Hauptteil dieser Arbeit detailliert eingegangen wird. Für das finale Demonstratorfahrzeug wurde eine P2-Hybridisierung favorisiert, die auf einem Spannungslevel von 12 Volt beruht [97, 98, 101] und nur einen minimalen Gewichtsanstieg im Vergleich zur konventionellen Ritzelstarter plus Lichtmaschinenkonfiguration (Abb. 2.16, links) verursacht. Zusätzlich wurde basierend auf der ultraleichten Fahrzeugstruktur der Einfluss eines 48 Volt Spannungslevels hinsichtlich verbrauchs- und komfortrelevanter Faktoren für eine P2- und P3-Architektur untersucht [99, 100].

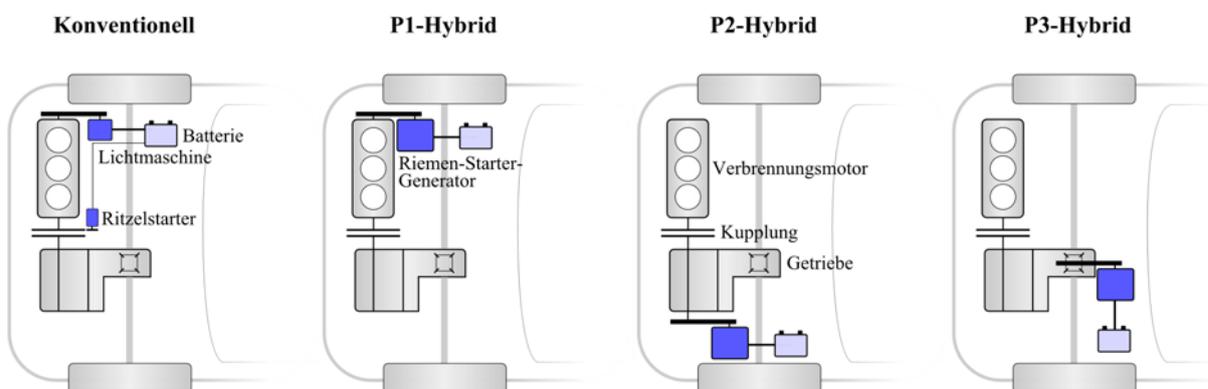


Abbildung 2.16: Favorisierte Riemen-Starter-Generator Antriebskonfigurationen im Vergleich zu einer konventionellen Anordnung bestehend aus Ritzelstarter und Lichtmaschine

3 Methodik

3.1 Simulation

3.1.1 Aufbau eines Simulationsmodells

Zur effizienten Verifizierung und Optimierung diverser Hybridmaßnahmen wurde ein Simulationsmodell des gesamten Fahrzeugs in der Softwareumgebung GT-SUITE (Gamma Technologies) erstellt. Der Fokus wurde dabei besonders auf die Längsdynamik und das Energiemanagement des elektro-hybriden Antriebsstrangs, bestehend aus Verbrennungsmotor und Riemen-Starter-Generator, gerichtet. Abb. 3.1 zeigt exemplarisch die modellierte Fahrzeug- und Steuerungsstruktur und veranschaulicht die Verknüpfung der Hauptkomponenten Verbrennungsmotor, Getriebe inklusive Kupplung, Elektromaschine und Batterie mit dem Fahrzeug.

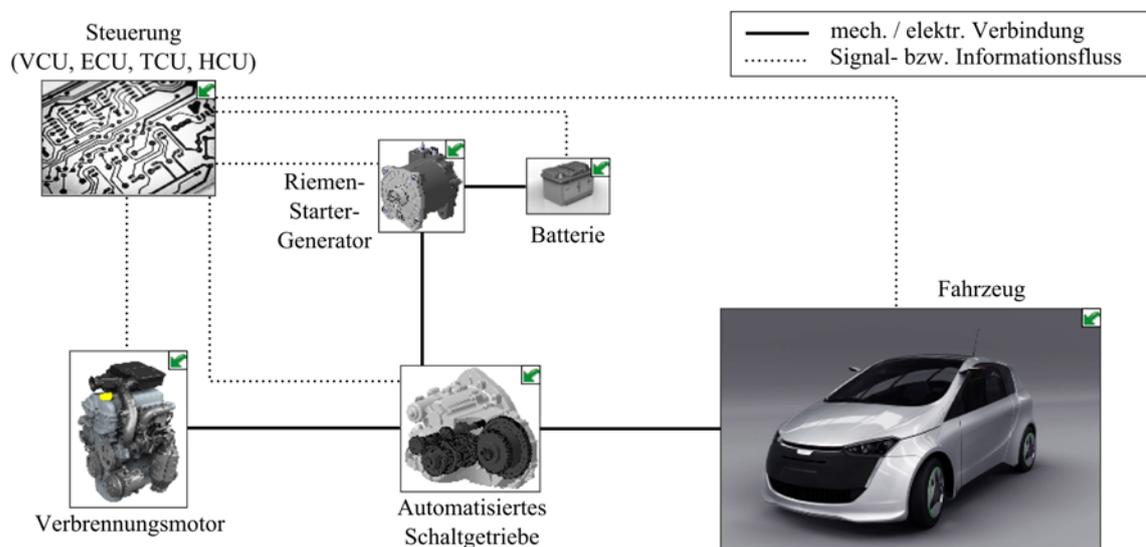


Abbildung 3.1: Oberfläche des CULT Längsdynamik-Simulationsmodells; Schematische Darstellung der mechanischen bzw. elektrischen Verbindungen sowie deren Kommunikation mit den Steuerungseinheiten

Der modulare Aufbau bietet die Möglichkeit, die Position des RSG im Antriebsstrang sowie den Einfluss der zu untersuchenden Spannungslage (12 Volt bzw. 48 Volt) unter geringem Aufwand variieren zu können, um die daraus resultierenden Verbrauchspotenziale und Komfortaspekte effektiv zu bewerten. Zusätzlich wurden die verschiedenen Steuerungseinheiten

(VCU, ECU, TCU, HCU)¹ abgebildet, wobei der Fokus in weiterer Folge verstärkt auf der Entwicklung der Hybridsteuerung (HCU) lag.

3.1.2 Bedatung der Hauptkomponenten

Die Qualität der Simulation steigt mit dem Gütegrad der Bedatung der entsprechenden Antriebskomponenten. Im Folgenden werden die dominierenden Eigenschaften der einzelnen Aggregate angeführt, wie diese im Simulationsmodell abgebildet wurden. Dabei wird zwischen den konventionellen (Kap. 3.1.2.1) und den hybridrelevanten (Kap. 3.1.2.2) Komponenten unterschieden.

3.1.2.1 Konventionell

Fahrzeug

Das entwickelte CULT Demonstratorfahrzeug erzielte nach [35] ein virtuelles Leergewicht² von 672,5 kg inklusive der 12 Volt P2-Hybridisierung (Riemen-Starter-Generator an Getriebeeingangswelle). Wie in Tab. 3.1 aufgeschlüsselt, würde das Leergewicht des Fahrzeugs mit konventioneller Lichtmaschine und Ritzelstarter 664,9 kg betragen. Dabei entfallen 20,8 kg auf das Gewicht des Generators und den Starter inklusive diverser Halter und Anschlüsse sowie der Batterie. Die 12 Volt Hybrideinheit umfasst neben dem Gewicht für den RSG auch die Batterie (38 Ah), die Leistungsverkabelung für den RSG mit der Batterie, ausgelegt für Ströme bis zu 250 A, sowie diverse Anbauteile zur Integration des RSG in den Antriebsstrang. Insgesamt ist die 12 Volt RSG Variante dennoch lediglich 7,6 kg schwerer. Die 48 Volt Hybridkonfiguration berücksichtigt darüber hinaus die Gewichtserhöhung durch eine zusätzliche Li-Ionen Batterie mit einer nominellen Kapazität von 0,5 kWh, sowie den DC/DC Umrichter zur Versorgung des 12 Volt Bordnetzes. Ein geringer Gewichtsanteil konnte durch eine Verringerung der Kapazität der 12 Volt Batterie auf 25 Ah kompensiert werden. Da keine elektrischen 12 Volt Verbraucher in das 48 Volt Bordnetz integriert wurden, bleiben positive Gewichtseffekte durch die Reduzierung von Kabelquerschnitten (Kap. 2.1.2) auf Grund der höheren Spannungslage in dieser Konfiguration unberücksichtigt. Dennoch weist das deutlich leistungsfähigere 48 Volt Konzept ein Mehrgewicht von lediglich 10,4 kg gegenüber der Basisvariante mit einem 12 Volt Riemen-Starter-Generator auf. In der Plug-In Konfiguration wird zur externen Nachladung der Batterie außerdem ein Ladegerät benötigt. In dieser Variante dominiert der Gewichtsanteil der 48 Volt Batterie (57,0 kg) deutlich gegenüber den anderen Komponenten. Um eine entsprechende elektrische Reichweite darstellen

¹Vehicle (V), Engine (E), Transmission (T), Hybrid (H) Control Unit (CU)

²Entspricht dem potenziellen Leergewicht bei einer serienmäßigen Produktion des vorgestellten Fahrzeugkonzepts. Dabei wurden theoretische Gewichtsoptimierungen einbezogen, welche im realen Prototyp nicht dargestellt werden konnten.

zu können, wurde eine nominelle Batteriekapazität von 3,0 kWh angenommen. Ausgehend von den jeweiligen Leergewichten für die verschiedenen hybriden Ausbaustufen wurde für die Kraftstoff- bzw. CO₂ Zertifizierung nach [116] das Bezugsgewicht ermittelt, indem ein zusätzliches Deltagewicht von 100 kg für den Fahrer plus Gepäck angenommen wurde.

Tabelle 3.1: Gewicht Hybridkomponenten und Leergewicht (gesamt) für die untersuchten elektro-hybriden Fahrzeugvarianten 12 Volt, 48 Volt und 48 Volt Plug-In

		12 Volt	48 Volt	48 Volt Plug-In
Fahrzeuggewicht (konventionell)	[kg]	664,9		
Elektrische Komponenten (konventionell)	[kg]	20,8		
Fahrzeuggewicht (ohne elektr. Komponenten)	[kg]	644,1	644,1	644,1
RSG (inkl. Leistungselektronik)	[kg]	12,1	12,1	12,1
DC/DC Umrichter	[kg]	-	2,7	2,7
Ladegerät	[kg]	-	-	7,0
Batterie 12 Volt	[kg]	11,8	8,0	8,0
Batterie 48 Volt	[kg]	-	9,5	57,0
Leistungsverkabelung RSG	[kg]	1,0	1,0	1,0
Kühlmittelverbindungen RSG	[kg]	0,5	0,5	0,5
Sonstige Anbauteile	[kg]	3,0	5,0	10,0
Hybridkomponenten (gesamt)	[kg]	28,4	38,8	98,3
Fahrzeug (Leergewicht)	[kg]	672,5	682,9	742,4
Bezugsgewicht	[kg]	772,5	782,9	842,4

Ein wichtiger Einflussfaktor zur simulativen Beurteilung der Antriebseffizienz betrifft die aerodynamischen Verluste des Fahrzeugs hervorgerufen durch den Luftwiderstandsbeiwert c_w und die Querschnittfläche A der Fahrzeugfront. Basierend auf Aerodynamikuntersuchungen des Prototypen im Windkanal und weiteren virtuellen Optimierungen wurde ein c_w Wert von 0,306 und eine Querschnittfläche A von ca. 1,99 m² erzielt. Diese Werte sind für alle folgenden Untersuchungen gültig und unabhängig vom Hybridisierungsgrad. Weiterhin wurden diverse abtriebsseitige Verluste einbezogen, dazu gehören die Reibmomente der Radlager sowie die Verlustmomente, welche durch die Bremsscheiben und Seitenwellen verursacht werden.

Unter Berücksichtigung dieser Verluste und dem entsprechenden Fahrzeuggewicht kann eine virtuelle Ausrollkurve des Fahrzeugs ermittelt werden, welche die Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit widerspiegelt. Dazu wird das Fahrzeug zunächst auf die maximale Geschwindigkeit beschleunigt, anschließend die Kupplung geöffnet und der Geschwindigkeitsverlust über der Zeit bestimmt. Daraus lassen sich die Fahrwiderstände $F0 [N]$, $F1 [N/km/h]$, $F2 [N/(km/h)^2]$ bestimmen. Diese dienen der Kalibrierung des dynamischen

Antriebsstrangprüfstands zur Verifizierung der Simulationsergebnisse. Tab. 3.2 fasst die entscheidenden Fahrzeugparameter noch einmal zusammen. Deutlich wird, dass die jeweilige Hybridisierungsstufe kaum einen Einfluss auf die Fahrwiderstandsbeiwerte hat. Vorrangig der $F0$ Faktor, welcher die Rollreibungsverluste charakterisiert, wird über das entsprechende Bezugsgewicht beeinflusst.

Tabelle 3.2: Bezugsgewichte, Aerodynamikkennwerte und Fahrwiderstände für die Fahrzeugvarianten 12 Volt, 48 Volt und 48 Volt Plug-In

		12 Volt	48 Volt	48 Volt Plug-In
Bezugsgewicht (m)	[kg]	772,5	782,9	842,4
Luftwiderstandsbeiwert (cw)	[-]	0,306	0,306	0,306
Frontquerschnittsfläche (A)	[m ²]	1,9881	1,9881	1,9881
Fahrwiderstandskoeffizient (F0)	[N]	112,83	113,67	118,45
Fahrwiderstandskoeffizient (F1)	[N/(km/h)]	0,0834	0,0835	0,0836
Fahrwiderstandskoeffizient (F2)	[N/(km/h) ²]	0,0266	0,0266	0,0267

Verbrennungsmotor

In weiterer Folge wird das Antriebspotenzial des Verbrennungsmotors durch das Maximaldrehmoment sowie das Schleppmoment in der Simulation beschrieben. Der benzinbetriebene Basismotor aus dem Kei-Car Segment ist in seiner ursprünglichen Form in Kombination mit einem CVT Getriebe gekoppelt und vorrangig auf hohe Drehzahlen ausgelegt. Wie aus [45] hervorgeht, steigt durch die innovative Direkteinblasung des Erdgases in den Brennraum vor allem im unteren Drehzahlbereich das Drehmoment im Vergleich zur konventionellen Saugrohreinblasung deutlich an. Das Potenzial von saugrohreinblasenden Motoren ist auf Grund von Füllungsverlusten basierend auf Verdrängungseffekten reduziert [104]. Entsprechend Abb. 3.2 stellt sich somit beim zugrunde liegenden CNG DE Motor ab einer Drehzahl von 2500 1/min das maximale Drehmoment von ca. 110 Nm ein. Die maximale Leistung von ca. 50 kW wird bei 4500 1/min erreicht.

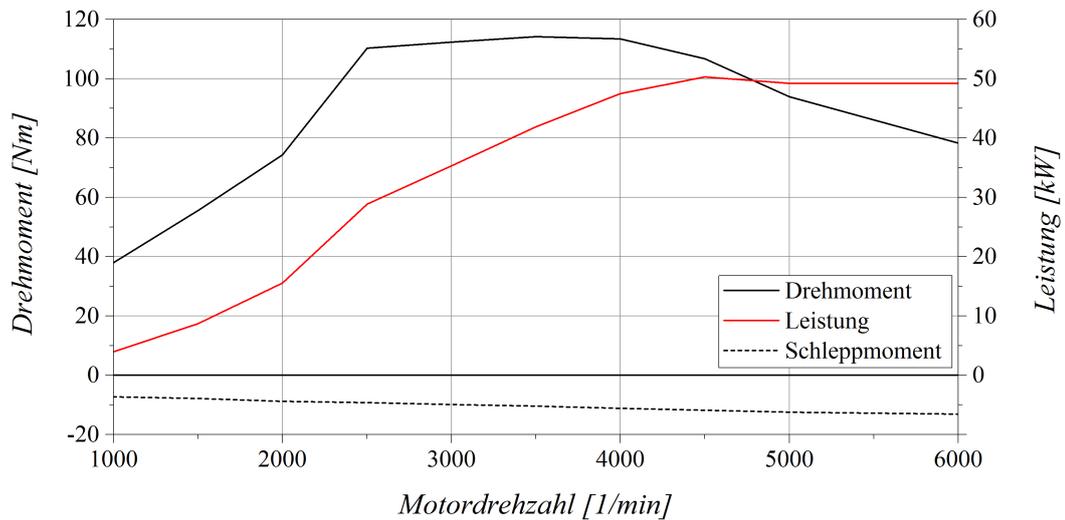


Abbildung 3.2: Volllast- und Schleppmoment sowie Leistungscharakteristik (stationär) des aufgeladenen Verbrennungsmotors mit CNG Direkteinblasung

Die Erstellung und Implementierung eines Verbrauchskennfelds für die zu Grunde liegende Verbrennungsmotorkonfiguration ist für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs entscheidend und wird als Hauptindikator für die hybride Betriebsstrategie herangezogen. Abb. 3.3 stellt den spezifischen Kraftstoffverbrauch des Motors mit CNG Direkteinblasung und einem Verdichtungsverhältnis ε von 12,0 dar. Durch die Bilanzierung gemäß Gl. 3.1 ergibt sich der effektive Wirkungsgrad η_{eff} der VKM aus dem Verhältnis der effektiv abgegebenen Leistung P_{eff} zur chemisch eingesetzten Leistung P_{chem} im jeweilig betrachteten Betriebspunkt. Demnach erreicht der Verbrennungsmotor im Bestpunkt eine Effizienz von 35,6 %.

$$\eta_{eff} = \frac{P_{eff}}{P_{chem}} = \frac{M \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n}{\dot{m}_{Gas} \cdot Hu} \quad (3.1)$$

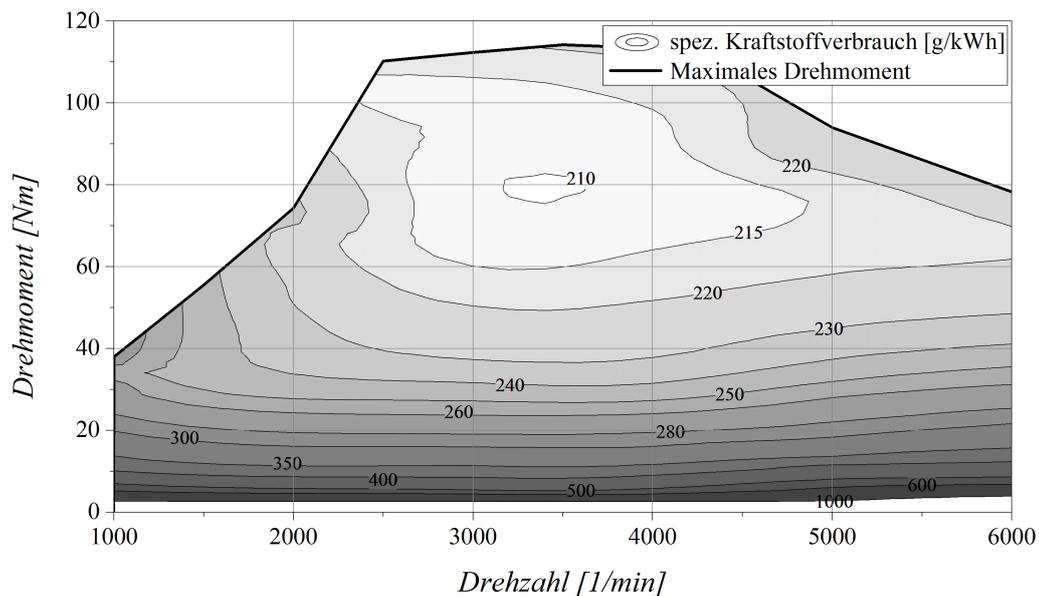


Abbildung 3.3: Maximales Drehmoment und spezifischer Kraftstoffverbrauch des CNG Verbrennungsmotors mit Direkteinblasung ($\varepsilon = 12,0$), Prüfstandsvermessung bei 90°C Kühlmitteltemperatur

Getriebe

Zur Kraftübertragung wurde ein automatisiertes 6-Gang Schaltgetriebe mit folgenden Gesamtübersetzungen (inklusive Differenzial) verwendet: 1. Gang ($i = 12,375$), 2. Gang ($i = 8,983$), 3. Gang ($i = 6,453$), 4. Gang ($i = 4,566$), 5. Gang ($i = 3,315$), 6. Gang ($i = 2,381$). In Anlehnung an das Drehmomentpotenzial der VKM wurde eine Schaltstrategie entwickelt, welche unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit sowie des Fahrerwunschs die aktuelle Gangentscheidung entsprechend Abb. 3.4 trifft.

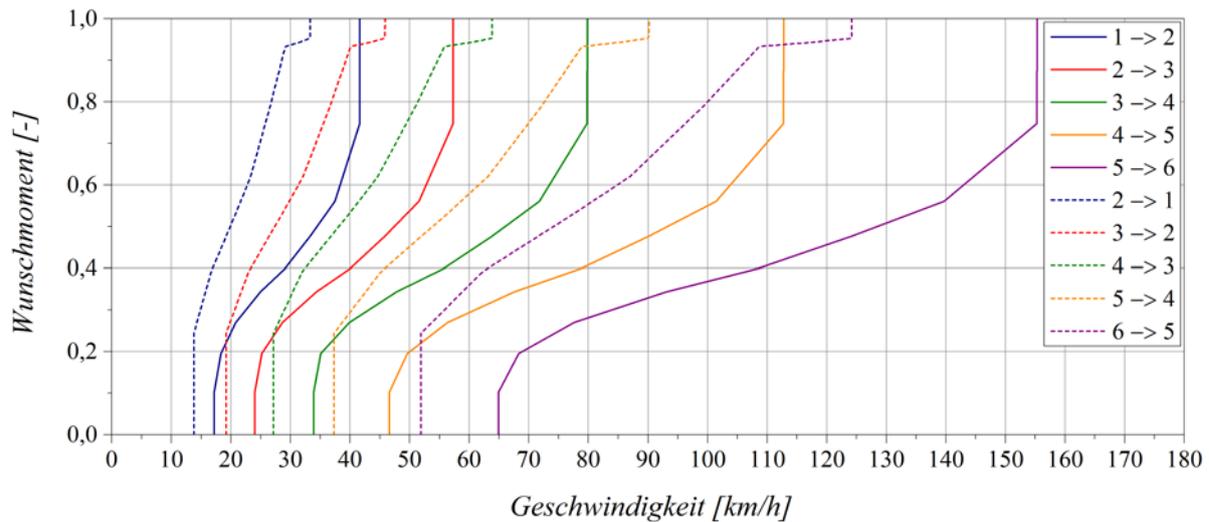


Abbildung 3.4: Schaltstrategie für das automatisierte 6 Gang Getriebe, Darstellung der Hoch- und Runterschaltkennlinien unter Berücksichtigung des aktuellen Fahrerwunschschriftmoments (normiert) und der Fahrzeuggeschwindigkeit

Weiterführend wurden die Wirkungsgrade für jede Gangstufe in Abhängigkeit der Getriebeingangsdrehzahl und dem Eingangsdrehmoment für verschiedene Temperaturniveaus (30°C, 60°C und 90°C) messtechnisch erfasst und in das Simulationsmodell integriert. Anhand einer exemplarischen Auswahl der gemessenen Wirkungsgrade bei 60°C Öltemperatur für die Gänge 1 - 6 (Anhang - Wirkungsgrad Getriebe) lässt sich die hohe Effizienz dieses Getriebes für einen großen Last- und Drehzahlbereich erkennen, was sich nachhaltig auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Negativ stellen sich vor allem die aus dem sequenziellen Aufbau resultierenden langen Schaltzeiten dar, bei denen bis zu 1,8 Sekunden vergehen, bis sich die maximale Zugkraft am Rad wieder einstellt.

Fahrzyklus

Die Bewertung der Kraftstoffeffizienz für die verschiedenen Hybridvarianten soll basierend auf dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) und dem WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) Fahrprofil vorgenommen werden. Abb. 3.5 stellt die beiden Fahrzyklen hinsichtlich ihrem Geschwindigkeitsverlauf und dem Beschleunigungsanforderungen gegenüber und veranschaulicht den unterschiedlichen dynamischen Charakter. Eventuelle

Komfortaspekte, welche sich aus den jeweiligen Hybridmodifikationen ergeben könnten, sollen im Einzelnen gesondert analysiert werden, ohne das dabei auf ein genormtes Fahrprofil zurückgegriffen wird.

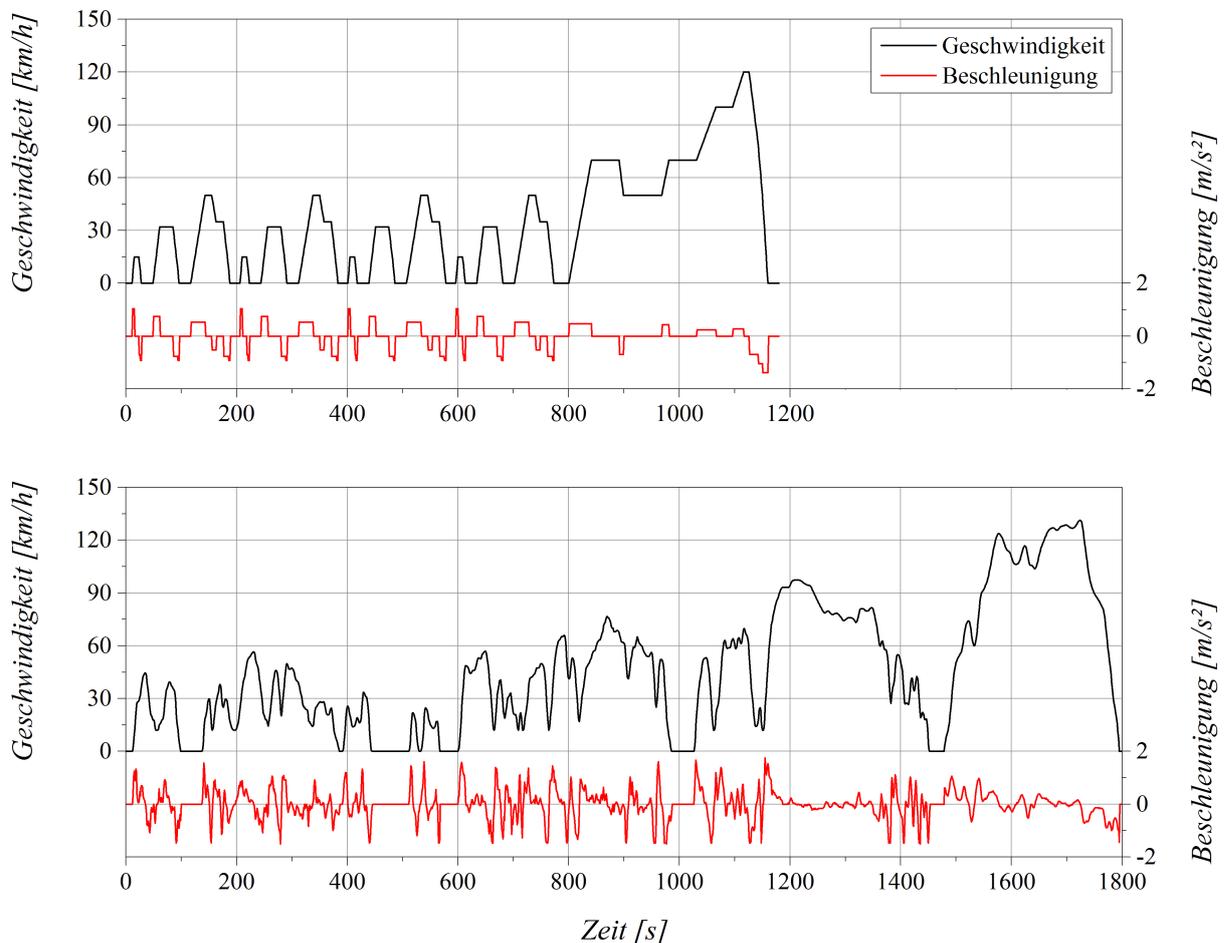


Abbildung 3.5: Geschwindigkeit und Beschleunigung im NEFZ (oben) und WLTP (unten) Fahrprofil

3.1.2.2 Hybrid

Der Fokus der im Hauptteil (Kap. 4) folgenden simulativen und experimentellen Untersuchungen liegt in der Bestimmung von verbrauchs- und komfortrelevanten Faktoren, welche aus den 12 Volt und 48 Volt Hybridkonfigurationen entstehen. Im Folgenden sollen diesbezüglich die Hauptmerkmale der Hybridkomponenten, bestehend aus Riemen-Starter-Generator, Batterie und Gleichspannungswandler dargelegt werden.

12 Volt Riemen-Starter-Generator

In der ersten Hybridkonfiguration des Ultraleichtfahrzeugs (Kap. 4.1) repräsentiert der 12 Volt Riemen-Starter-Generator das Kernelement des elektrischen Antriebs. Abb. 3.6 stellt die wichtigsten Eigenschaften in Bezug auf Drehmoment und Effizienz des verwendeten 12 Volt RSG dar. Im Antriebsmodus erreicht der RSG demnach ein maximales Moment von ca. 14 Nm bezogen auf die Rotorwelle, die maximale mechanische Leistung beträgt ca. 1,6 kW. Unter

Berücksichtigung des Batterieladezustands ist diese Leistung kontinuierlich abrufbar. Die dargestellten Wirkungsgrade beinhalten bereits die Verluste durch die integrierte Leistungselektronik sowie, durch den messtechnischen Aufbau bedingt, die Verluste im Riementrieb und den Leitungsanschlüssen zur Batterie. Im Antriebsmodus kann ein maximaler Wirkungsgrad von 82 % erreicht werden, dieser ist jedoch nur für einen kleinen Kennfeldbereich gültig. Die maximale Drehzahl ist in diesem Quadranten auf 10.000 1/min beschränkt.

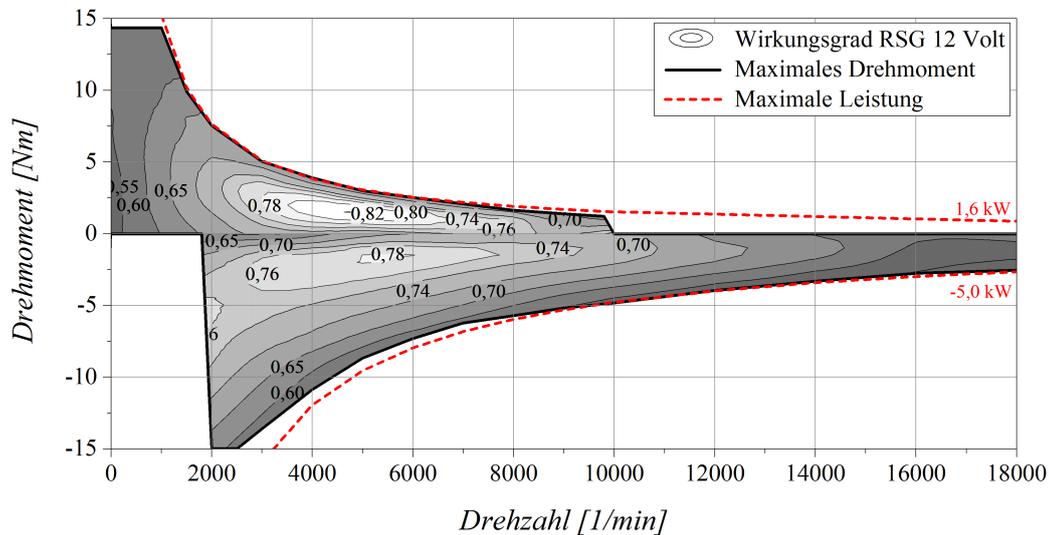


Abbildung 3.6: Maximales mechanisches Drehmoment (bezogen auf RSG Rotorwelle) sowie Wirkungsgrad (inklusive Riemen- und Leitungsverlusten) des 12 Volt Riemen-Starter-Generators im Motor (positive y-Achse) und Generatorbetrieb (negative y-Achse); Prüfstandsvermessung bei 90°C Kühlmitteltemperatur

Im Generatormodus erreicht der RSG eine maximale elektrische Leistung von bis zu 2,7 kW. Das resultierende mechanische Lastmoment für den Antriebsstrang ist in Abb. 3.6 mit bis zu 5,0 kW dargestellt. Im Generatormodus beträgt der maximale Wirkungsgrad 78 %. Wie weiterhin ersichtlich wird, kann das Generatormoment nicht bis zur Drehzahl 0 1/min aufrechterhalten werden, sondern wird durch die interne RSG Steuerung unter 2000 1/min reduziert. Somit kann z.B. keine Rekuperation bis zum Fahrzeugstillstand durchgeführt werden. Die vermessenen Werte beziehen sich auf eine Kühlmitteltemperatur von 90°C.

12 Volt Batterie

Für die 12 Volt Hybridisierung wurde als Energiespeicher auf eine Bleibatterie in AGM Bauweise zurückgegriffen, welche gegenüber den konventionellen Bleisäurebatterien Vorteile in Bezug auf die Zyklenfestigkeit und Lebensdauer durch die Einbindung des Elektrolyten in ein Glasvlies aufweist. In der 12 Volt Konfiguration beträgt die nominelle Batteriekapazität 38 Ah. Um das Energiemanagement (Kap. 3.1.3) des hybriden Antriebsstrangs in der späteren Simulation optimieren zu können, wurde zur Beschreibung der Lade- und Entladeeffizienz der Innenwiderstand der Batterie in experimentellen Versuchen bestimmt. Abb. 3.7 stellt die Spannungsverläufe für verschiedene Lade- (links) und Entladeleistungen (rechts) in Abhängigkeit des aktuellen Ladezustands (SOC - State of Charge) dar.

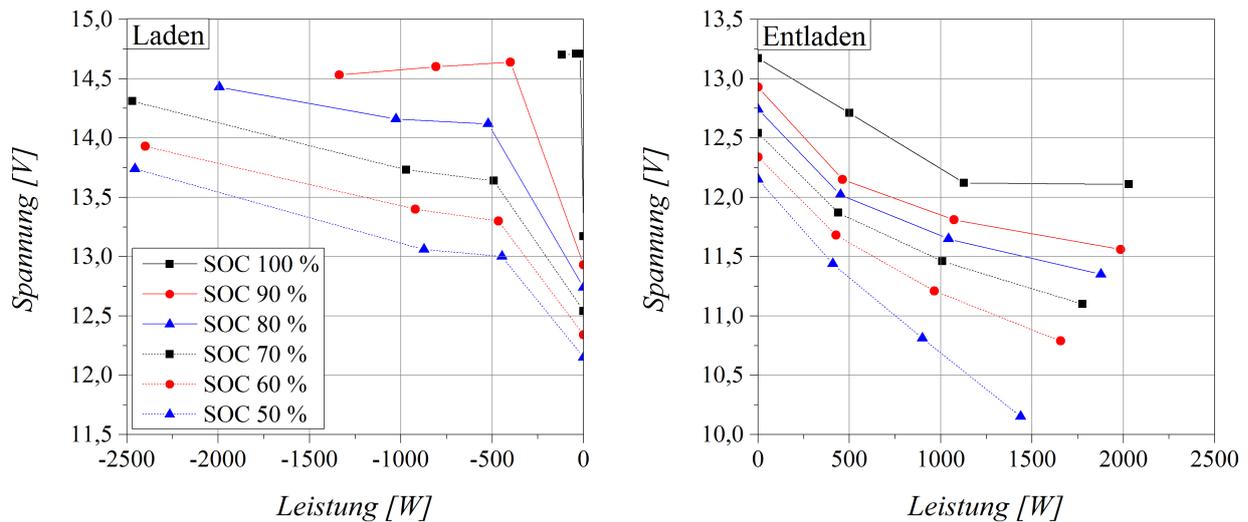


Abbildung 3.7: Gemessene Spannungsverläufe für die verwendete 12 Volt AGM Batterie (38 Ah) in Abhängigkeit der Lade- (li.) und Entladeleistung (re.) (Leerlaufspannung entspricht 0 W)

Für die Berechnung wurde für die Batterie ein vereinfachtes elektrisches Ersatzmodell angenommen, bei dem der Innenwiderstand mit einem Kondensator, welcher den eigentlichen Energiespeicher repräsentiert, in Reihe geschaltet ist. Demnach kann über die im Vergleich zur Leerlaufspannung U_0 (Leistung 0 W, Abb. 3.7) auftretende Spannungsdifferenz im jeweiligen Belastungszustand U_1 der Innenwiderstand R_i gemäß Gl. 3.2 bestimmt werden.

$$R_i = \frac{U_0 - U_1}{I} \quad (3.2)$$

48 Volt Riemen-Starter-Generator

Im zweiten Schritt der Untersuchungen (Kap. 4.2) wird ein Riemen-Starter-Generator System mit 48 Volt in das ultraleichte Fahrzeugkonzept integriert. Durch die Anhebung der Spannungslage kann die Leistung und die Effizienz des RSG im Vergleich zur 12 Volt Version gesteigert werden. Abb. 3.8 stellt das mechanische Drehmoment des RSG im Motor- und Generatorbetrieb dar. Demnach erreicht der RSG im Antriebsmodus eine mechanische Dauerleistung von ca. 5,8 kW und ein Anfangsmoment von 24 Nm bezogen auf die Rotorwelle. Über 10.000 1/min wird die Leistungsübertragung durch die interne Steuerung unterbunden. Die Wirkungsgradvermessung berücksichtigt analog der 12 Volt Darstellung die integrierte Leistungselektronik sowie die Riemen- und Leitungsverluste.

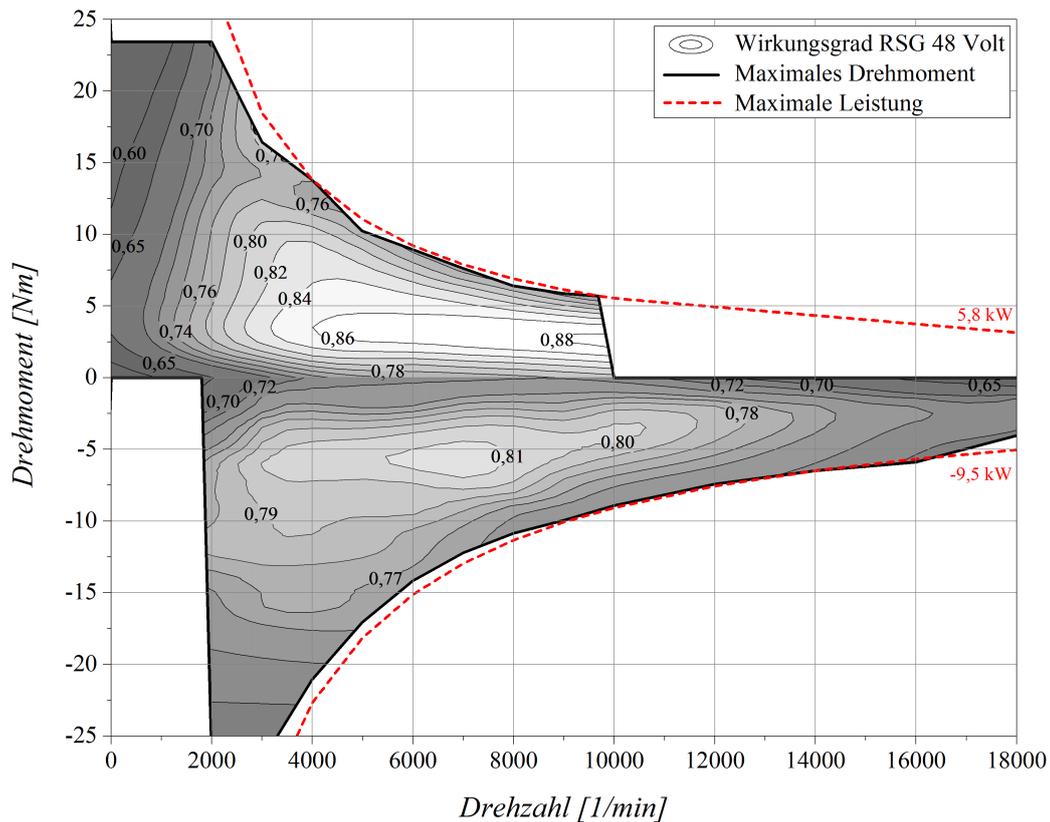


Abbildung 3.8: Maximales mechanisches Drehmoment (bezogen auf RSG Rotorwelle) und Wirkungsgrad (inklusive Riemen- und Leitungsverlusten) des 48 Volt Riemen-Starter-Generators im Motor- (positive y-Achse) und Generatorbetrieb (negative y-Achse); Prüfstandsvermessung bei 90°C Kühlmitteltemperatur

Generatorisch wird eine maximale elektrische Leistung von 7,3 kW (kontinuierlich) erzielt, was nach Abb. 3.8 einer mechanischen Leistung von bis zu 9,5 kW entspricht. Die Wirkungsgrade betragen für einen weiten Kennfeldbereich über 80 % (maximal 81 %). Analog zur 12 Volt RSG Einheit kann der Generator nicht unterhalb von 2000 1/min betrieben werden.

48 Volt Batterie

In der realisierten Prüfstandskonfiguration wurde zur Darstellung des 48 Volt Energiespeichers auf einen Batterieverbund zurückgegriffen, welcher aus insgesamt vier in Reihe geschalteten 12 Volt AGM Batterien mit einer nominellen Kapazität von 38 Ah besteht. In Summe ergibt sich somit für die experimentellen Versuche eine Gesamtkapazität von 1,82 kWh. Im Simulationsmodell wurde die Kapazität für die 48 Volt Hybridvariante auf 0,5 kWh reduziert, für das Plug-In Modell wurde eine Kapazität von 3,0 kWh angenommen. Die Lade- und Entladeverluste wurden aus den entsprechenden Vermessungen des 12 Volt Energiespeichers übertragen, wobei das Leistungspotenzial an die vierfach höhere Spannungslage angepasst wurde.

DC/DC Wandler

Für die Kopplung des 12 Volt Bordnetzes mit der 48 Volt Spannungsebene wurde ein unidirektionaler Gleichspannungswandler verwendet, welcher die Ladeerhaltung der 12 Volt

Batterie über den 48 Volt Energiespeicher sicherstellt. Der gewählte DC/DC Wandler ermöglicht eine maximale Leistungsübertragung von 200 W, kurzzeitig sind bis zu 240 W möglich (bis 20 Sekunden). Der mittlere Leistungsbedarf im 12 Volt Bordnetz konnte in experimentellen Versuchen mit ca. 130 W bestimmt werden und kann somit über den gewählten Spannungswandler dargestellt werden. Abb. 3.9 stellt den vermessenen Wirkungsgradverlauf des DC/DC Wandlers in Abhängigkeit der Eingangsleistung dar. Deutlich zu erkennen ist die hohe Effizienz mit über 92 % ab einer Eingangsleistung von 90 W. Darunter sinkt die Effizienz deutlich, so dass eine Verwendung für diesen Bereich durch die Betriebsstrategie verhindert werden sollte.

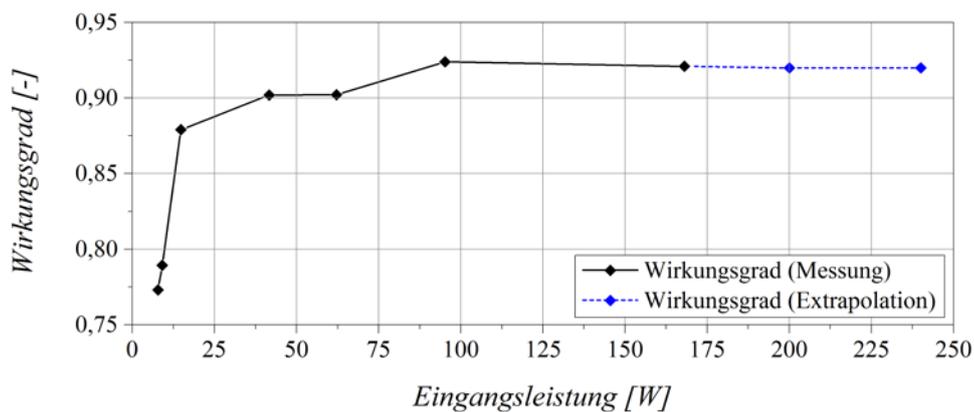


Abbildung 3.9: Umwandlungswirkungsgrade des verwendeten 48/12 Volt DC/DC Umrichters in Abhängigkeit der Eingangsleistung (Messung)

3.1.3 Betriebsstrategie

Im Folgenden wird die grundsätzliche Hybridstrategie vorgestellt, welche die Kombination von Verbrennungsmotor und Riemen-Starter-Generator im realen Fahrbetrieb möglichst effizient gestalten soll. Durch eine intelligente Integration der Funktionsumfänge der elektrischen Maschine (Motor- und Generatormodus) in die Betriebsstrategie lässt sich sowohl die Kraftstoffeffizienz des konventionellen Verbrennungsmotors erhöhen sowie auch der Fahrkomfort steigern. Der Fokus der im Folgenden angeführten Strategie liegt in der Entwicklung einer zyklusunabhängigen Methodik, welche ohne einen vorausschauenden Horizont (a posteriori Wissen), d.h. ohne Kenntnisse über das folgende Fahrprofil, auskommt. Es werden nur die bis zum aktuellen Zeitpunkt verfügbaren Datensätze genutzt, um den Verbrauch des elektro-hybriden Antriebs im Vergleich zum rein verbrennungsmotorischen Betrieb zu senken. Für die Entwicklung dieser Strategie und die Einbindung in das Simulationsmodell sowie im realen Antriebssteuergerät sind tiefgreifende Informationen über die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des konventionellen und elektrischen Antriebs notwendig. Im weiteren Verlauf sollen die Möglichkeiten exemplarisch beschrieben werden, in welcher Art und Weise der Riemen-Starter-Generator intelligent in den Antrieb eingreifen kann. Dazu sollen die folgenden hybriden Funktionen im Detail näher betrachtet werden:

- Lastpunktanhebung
- Rekuperation
- Segeln
- Boost
- Elektrisch Fahren

3.1.3.1 Lastpunktanhebung

Der Einsatz von Riemen-Starter-Generatoren bietet gegenüber konventionellen Lichtmaschinen den grundsätzlichen Vorteil, dass die Energiegewinnung zur Kompensation des Bordnetzverbrauchs sowie zum Laden der Batterie individuell gesteuert werden kann. Die dafür notwendige Ladestrategie verfolgt das Ziel, einen definierten Ladezustand (State of Charge - SOC) in der Batterie einzustellen, wobei die eingespeiste Energie bei einem möglichst geringen Mehrverbrauch des Verbrennungsmotors erzielt werden soll. Abgeleitet aus der „Energiekostenbilanzierung“ in [29, 30] wurde dahingehend eine wirkungsgradoptimale Ladestrategie entwickelt. Um diese effizient in die Gesamtstrategie integrieren zu können, ist ein umfangreiches Wissen hinsichtlich der Effizienzen des Verbrennungsmotors $\bar{\eta}_{VKM,diff}$, des Riemen-Starter-Generators η_{Gen} sowie der Batterieladeverluste $\eta_{Bat,Laden}$ notwendig. Daraus abgeleitet ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad für den Batterieladevorgang $\eta_{Laden,ges}$ entsprechend Gl. 3.3, den es im Betrieb zu maximieren gilt.

$$\eta_{Laden,ges} = \bar{\eta}_{VKM,diff} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{Bat,Laden} \quad (3.3)$$

Im Folgenden werden die Besonderheiten der am Ladevorgang beteiligten Bauteile separat betrachtet. Exemplarisch wird dabei die Ladestrategie am Beispiel des 12 Volt Riemen-Starter-Generators in Kombination mit der AGM Batterie beschrieben. Diese Systematik wurde für die Untersuchungen des 48 Volt Systems ebenfalls durchgeführt.

Verbrennungsmotor

Um elektrische Energie konventionell, d.h. ausgenommen von Rekuperationsvorgängen, über den Generator zu gewinnen, muss eine Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors und somit eine Verschiebung des Wirkungsgrads stattfinden. Aus Gl. 3.4 wird ersichtlich, dass der Gesamtwirkungsgrad des Verbrennungsmotors η_{VKM} aus dem Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung $P_{VKM,mech}$ zur eingesetzten chemischen Leistung P_{chem} des Kraftstoffs resultiert.

$$\eta_{VKM} = \frac{P_{VKM,mech}}{P_{chem}} \quad (3.4)$$

Abb. 3.10 (links) stellt dazu exemplarisch die Wirkungsgradsteigerung durch Anhebung des Betriebspunkts von 20 Nm auf 60 Nm bei einer Drehzahl von 3000 1/min dar. Basierend auf dem CNG Kraftstoffkonzept ergeben sich im Gegensatz zum Ottomotor keine Kühlungseffekte der Bauteile durch einen unterstöchiometrischen Betrieb bei einem Verbrennungsluftverhältnis $\lambda < 1$, weshalb im gesamten Kennfeld $\lambda = 1$ eingestellt ist. Somit ist für große Kennfeldbereiche des eingesetzten CNG Motors fast immer in eine Steigerung des Wirkungsgrads basierend auf der Lastpunktanhebung zu erwarten. Für die Ladestrategie ist vorrangig der differenzielle Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors $\eta_{VKM,diff}$, definiert nach Gl. 3.5, entscheidend. Dieser kann, wie aus Abb. 3.10 (rechts) ersichtlich, aus den Willians-Linien ermittelt werden. Dazu wird die chemische Leistung, welche sich aus dem Kraftstoffmassenstrom und dem Heizwert ergibt, in Abhängigkeit zur abgegebenen mechanischen Antriebsleistung des Verbrennungsmotors für verschiedene Drehzahlneiveaus aufgetragen. Wie weiterhin aus Abb. 3.10 (rechts) zu erkennen ist, ergeben sich dabei lineare Zusammenhänge, wobei der differenzielle Wirkungsgrad der Steigung dieser Geraden entspricht.

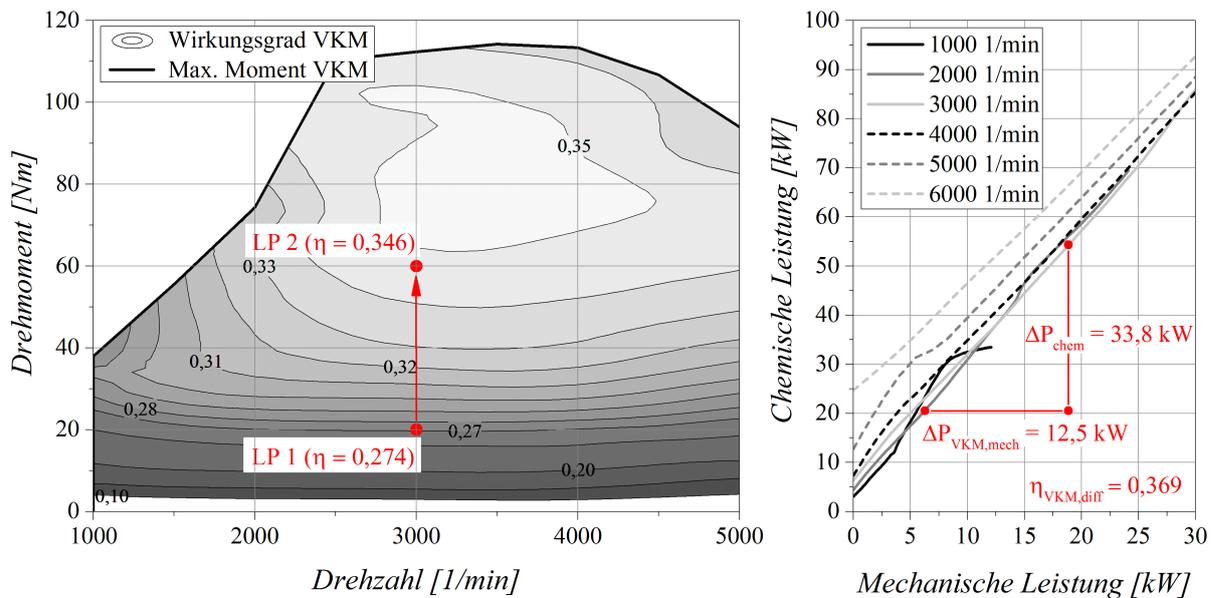


Abbildung 3.10: Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors durch Lastpunktanhebung (li.), differenzieller Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors (re.), Lastpunkt 1 (LP 1): 3000 1/min, 20 Nm ; Lastpunkt 2 (LP 2): 3000 1/min, 60 Nm

Der differenzielle Wirkungsgrad $\eta_{VKM,diff}$ nach Gl. 3.5 berücksichtigt das Verhältnis zwischen der mechanischen Leistung resultierend aus der Auflastung durch den Generator $P_{Gen,mech}$ in Relation zur dafür eingesetzten chemischen Leistung $P_{chem} - P_{chem,FW}$. Die reale generatorische Leistung resultiert aus der Differenz zwischen der aktuellen Leistungsabgabe des Motors $P_{VKM,mech}$ und der vom Fahrer angeforderten Leistung $P_{VKM,FW}$.

$$\eta_{VKM,diff} = \frac{\Delta P_{VKM,mech}}{\Delta P_{chem}} = \frac{P_{VKM,mech} - P_{VKM,FW}}{P_{chem} - P_{chem,FW}} = \frac{P_{Gen,mech}}{P_{chem} - P_{chem,FW}} \quad (3.5)$$

In Anbetracht der vergleichbaren linearen Verläufe der Willians-Linien für die einzelnen Drehzahlschritte n , wird für die folgenden Berechnungen ein mittlerer differenzieller Wirkungsgrad $\bar{\eta}_{VKM,diff}$ nach (Gl. 3.6) ermittelt, welcher die Effizienz des Verbrennungsmotors bei einer Lastpunktanhebung beschreibt und die Grundlage für die weitere Kalkulation einer wirkungsgradoptimalen Ladestrategie bildet.

$$\bar{\eta}_{VKM,diff} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{VKM,diff,i} = \frac{\eta_{VKM,diff,1} + \dots + \eta_{VKM,diff,n}}{n} \quad (3.6)$$

Riemen-Starter-Generator

Entsprechend der exemplarischen Beschreibung der Ladestrategie basierend auf dem 12 Volt System wird die Ladeeffizienz des 12 Volt Generators (Abb. 3.11) herangezogen. Zu berücksichtigen ist, dass das Generatormoment sowie die Drehzahl des RSG bereits auf das Kurbelwellenniveau der VKM mit einer Übersetzung von 1 : 2,6 bezogen wurden. Gemäß Gl. 3.7 ergibt sich der generatorische Wirkungsgrad η_{Gen} aus dem Verhältnis von elektrischer Leistung $P_{Gen,elektr}$ zu mechanischer Leistung $P_{Gen,mech}$.

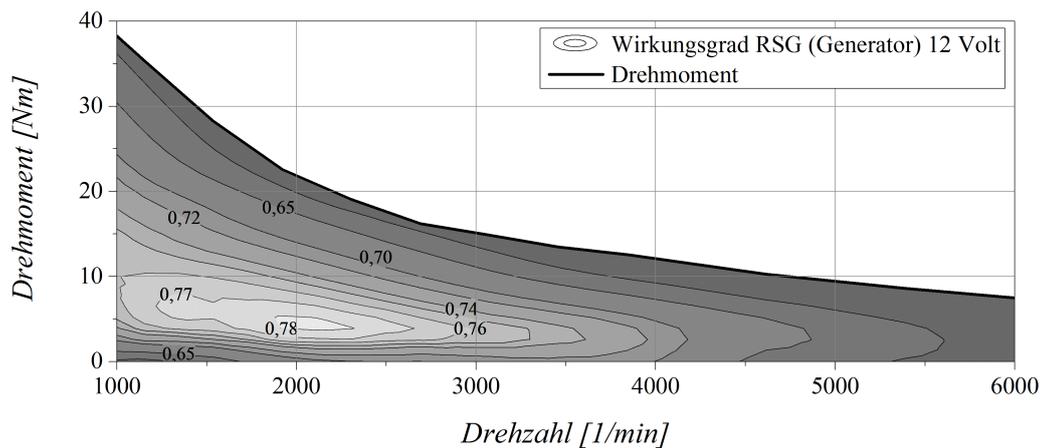


Abbildung 3.11: Generatorischer Wirkungsgrad des 12 Volt Riemen-Starter-Generators, Drehzahl und Moment auf VKM Kurbelwellenniveau bezogen (Übersetzung 1 : 2,6)

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{Gen,elektr}}{P_{Gen,mech}} \quad (3.7)$$

Batterie

Über die experimentelle Bestimmung des Innenwiderstands der Batterie (Kap. 3.1.2.2) kann die Ladeeffizienz $\eta_{Bat,Laden}$ ermittelt werden. Gemäß Gl. 3.8 wird dazu die Verlustleistung über dem Innenwiderstand P_i mit der Gesamtleistung P , gemessen an den Batteriepolen, in Relation zueinander betrachtet.

$$\eta_{Bat,Laden} = \frac{P_i}{P} \quad (3.8)$$

Abb. 3.12 fasst die Ladeverluste in Abhängigkeit des aktuellen Batterieladezustands und der angeforderten Ladeleistung in einem Wirkungsgradkennfeld zusammen. Die Erstellung des Kennfelds stützt sich bei SOC Werten über 50 % auf gemessene Daten, welche in weiterer Folge für niedrigere Ladezustände extrapoliert wurden. Die Ladeeffizienz der Batterie verändert sich sowohl in Abhängigkeit des aktuellen SOC sowie der Ladeleistung.

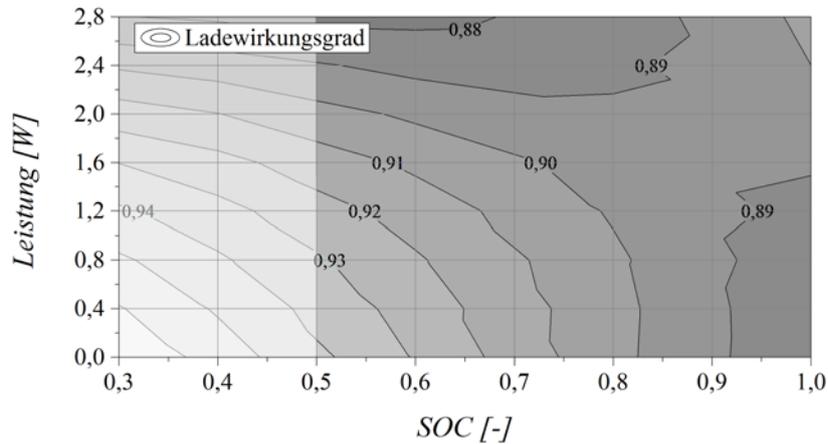


Abbildung 3.12: Ladewirkungsgrad der verwendeten 12 Volt AGM Batterie (38 Ah)

Es lässt sich ableiten, dass der Ladewirkungsgrad mit zunehmenden SOC abnimmt, was durch einen Anstieg des Innenwiderstands hervorgerufen wird. Um die Speicherung der erzeugten Energie möglichst effektiv zu gestalten, strebt die Ladestrategie einen Ziel SOC von 70 % an. Dieser stellt darüber hinaus sicher, dass einerseits genug Energie für die diversen elektrischen Verbraucher aber auch den elektrischen Antrieb zur Verfügung steht und zusätzlich bei Bremsvorgängen noch eine Ladereserve verbleibt, um die Verzögerungsenergie verbrauchsschonend zurück in die Batterie speisen zu können.

Lastpunktanhebung (gesamt)

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Komponenteneigenschaften kann abschließend die effizienzoptimierte Berechnung des LPA-Moments³ entsprechend dem maximalen Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Motordrehzahl nach Gl. 3.3 vorgenommen werden. Abb. 3.13 stellt den Ladewirkungsgrad des Gesamtsystems dar. Das LPA-Moment wird durch das maximale Generatormoment oder das Volllastmoment des Verbrennungsmotors begrenzt. Zusätzlich findet eine Berücksichtigung des aktuellen Fahrerwunsches statt, d.h. es wird zwischen Konstantfahrt und Beschleunigung unterschieden. Im letzteren Fall muss eine Drehmomentreserve der VKM vorgehalten werden, um die Geschwindigkeitssteigerung realisieren zu können. Grundsätzlich versucht das Lademanagement, den Generator im optimalen Systemwirkungsgradbereich zu betreiben und ineffiziente Bereiche mit niedrigem bzw. hohem LPA-Moment

³LPA-Moment: Drehmoment resultierend aus Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors durch den Generator (RSG) im Ladevorgang

zu vermeiden. Das entsprechend der aktuellen Motordrehzahl optimale LPA-Moment wird durch die rote Linie in Abb. 3.13 repräsentiert.

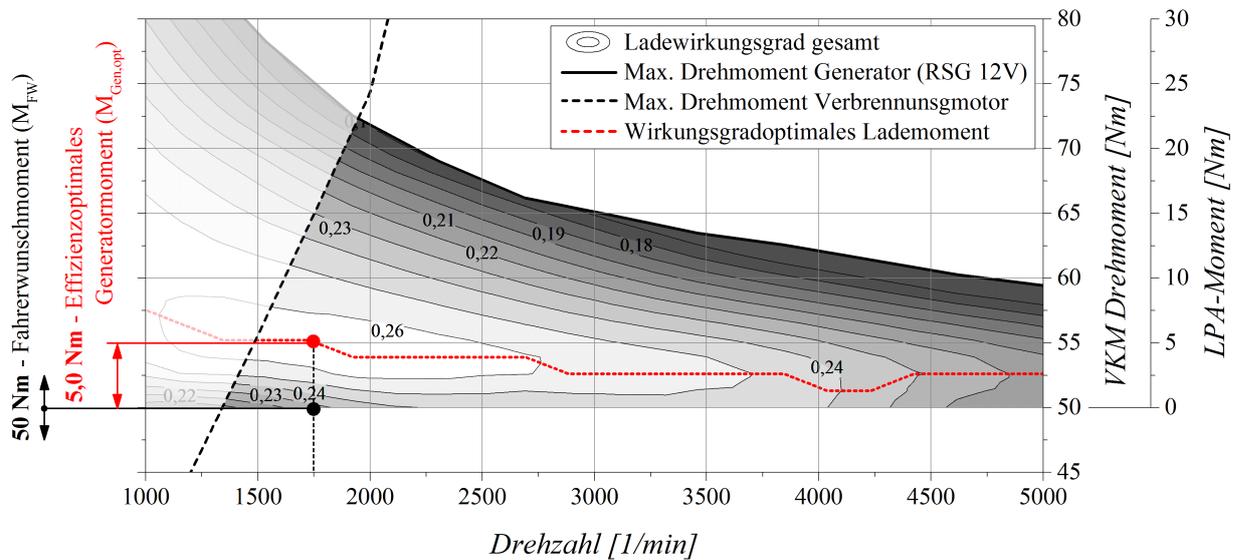


Abbildung 3.13: Gesamtwirkungsgradkennfeld zur Beschreibung der elektrischen Energiegewinnung durch effizienzoptimierte Lastpunktanhebung ($M_{LPA,opt}$) des Verbrennungsmotors über den 12 Volt Generator (RSG) inklusive Ladeverluste der Batterie; Darstellung des wirkungsgradoptimalen Generator Moments (rot) in Abhängigkeit der aktuellen Motordrehzahl bei einem Fahrerwunschloment (M_{FW}) von 50 Nm

Um bei steigender Bordnetzbelastung, z.B. durch elektrische Fahrvorgänge, eine Tiefentladung der Batterie zu vermeiden, ist das LPA-Moment weiterhin noch mit dem aktuellen Batterieladezustand zu verknüpfen. Stellt sich trotz der zuvor erläuterten Ladestrategie in einem definierten Zeitraum eine fortschreitende Abnahme des SOC ein, muss das Generatormoment gesteigert werden, auch wenn dies mit Effizienzeinbußen verbunden ist. Dazu werden im Vorfeld kritische SOC Grenzen definiert, ab denen eine sukzessive Erhöhung der Ladeleistung eingeleitet wird.

3.1.3.2 Rekuperation

Die regenerative Umwandlung kinetischer Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie während Verzögerungsphasen stellt die erste Stufe einer intelligenten Betriebsstrategie in einem Hybridfahrzeug dar. Die sogenannte Rekuperation sorgt in Abhängigkeit des Wunschverzögerungsmoments (Bremspedalbetätigung) unter Berücksichtigung des Batterieladezustands (SOC) für eine Aktivierung des Generators. Das daraus resultierende mechanische Generatormoment wirkt als Bremsmoment im Antriebsstrang und führt zu einer Verzögerung des Fahrzeugs. Übersteigt das Wunschbremsmoment des Fahrers das maximale Generatormoment, werden zusätzlich die mechanischen Reibbremsen aktiviert. Unabhängig davon können die Verzögerungsmomente resultierend aus den Fahrwiderständen sowie dem Schleppmoment des Verbrennungsmoments nicht geregelt werden. Diese wirken als permanente Einflussfaktoren und sind von der aktuellen Motordrehzahl und der Geschwindigkeit abhängig. Bei einem

P2- oder P3-Hybrid kann das Motorschleppmoment durch Auskuppeln der VKM als Bremsmoment im Antriebsstrang deaktiviert werden. Abb. 3.14 stellt den Regelkreis bei einem Verzögerungsvorgang noch einmal schematisch dar.

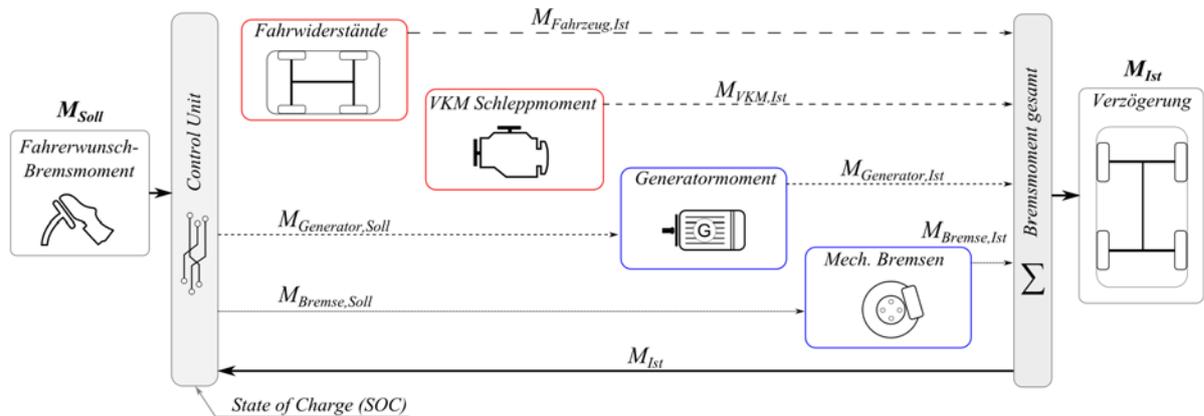


Abbildung 3.14: Darstellung der an einem Bremsvorgang beteiligten Komponenten in einem Hybridfahrzeug (rot - Moment nicht regelbar, blau - Moment regelbar)

Um ein regeneratives Verzögern über das Bremspedal zu gestatten, muss eine Regelung und Aufteilung der Bremsmomente zwischen Generator und mechanischer Bremsen ermöglicht werden. Da im zu Grunde liegenden Fahrzeugkonzept aus Gewichtsgründen auf zusätzliche Stelleinrichtungen zur unabhängigen Betätigung der Bremsen verzichtet wurde, aber dennoch eine komfortable Regelung und Maximierung der Rekuperationsleistung erfolgen soll, wurde die Rekuperationsfunktion in das Fahrpedal integriert. D.h. ein entsprechender Anteil der Fahrpedalposition wird als ein negatives Fahrerwunschmoment interpretiert und an den Generator übertragen, wodurch sich eine Verzögerung des Fahrzeugs einstellt. Erst beim weiteren Betätigen des Fahrpedals wird das Moment positiv und in kinetische Energie durch den Verbrennungsmotor oder die elektrische Maschine umgesetzt.

3.1.3.3 Segeln

Im Segelmodus soll die kinetische Energie des Fahrzeugs möglichst effizient genutzt werden, um den Ausrollweg ohne zusätzlichen Energieeinsatz (weder VKM noch RSG) zu maximieren. Diese Strategie ist grundsätzlich unabhängig vom Hybridisierungsgrad und kann auch bei rein verbrennungsmotorischen Antrieben implementiert werden. Im Segelbetrieb wird das Schleppmoment des Verbrennungsmotors durch Öffnen der Kupplung als unerwünschtes Bremsmoment im Antriebsstrang deaktiviert. Wie aus Abb. 3.15 ersichtlich, kann mit der identischen kinetischen Fahrzeugenergie eine wesentlich größere Distanz zurückgelegt werden, ohne dass ein weiterer Energieeintrag in das System nötig wird. Die Verbrauchseffizienz wird vor allem dann gesteigert, wenn der Verbrennungsmotor im Segelmodus abgeschaltet wird und nicht im Leerlauf verweilt. Für die allgemeine Akzeptanz muss dann weiterführend

eine komfortable Wiederstartfunktion der VKM in sogenannten Change-of-Mind Situationen geschaffen werden.

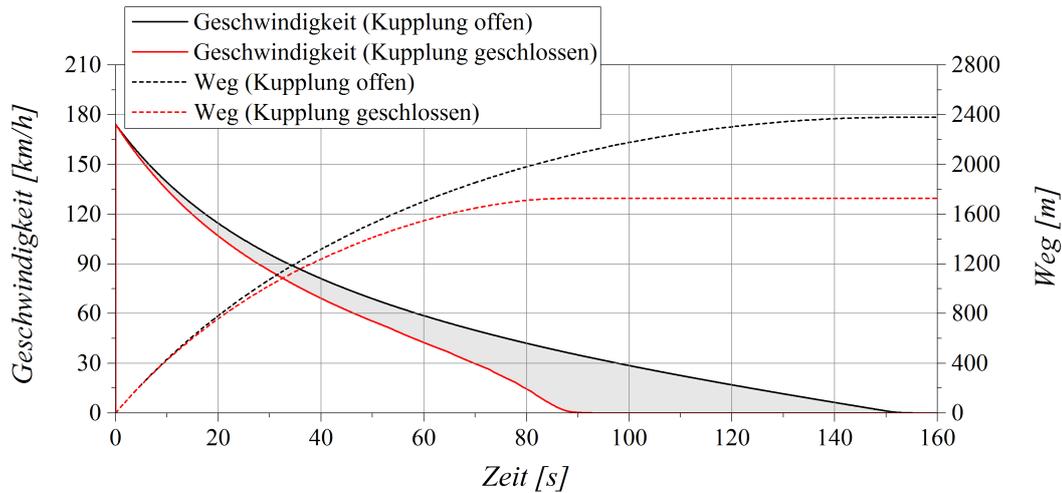


Abbildung 3.15: Vergleich der Ausrollzeiten und dem zurückgelegten Weg bei geschlossener sowie geöffneter Kupplung (Segelbetrieb)

3.1.3.4 Boost

Die Boostfunktion beschreibt eine elektrische Drehmomentunterstützung des Verbrennungsmotors durch den Riemen-Starter-Generator. Für die Regelung dieser Funktion wird die Boostanforderung durch den Fahrer über eine Kick-Down⁴ Erkennung diagnostiziert und über die Hybridsteuerung umgesetzt. Dabei werden die maximalen Momente von VKM und RSG im aktuellen Zeitpunkt addiert. Diese Funktion ist vor allem als Komfortkriterium einzustufen und kann die Nachteile hinsichtlich geringem Low-End-Torque von aufgeladenen (CNG) Motoren (Kap. 3.1.2.1) kompensieren. Wird die Boostfunktion bei geringen Antriebsmomenten in Form einer Lastpunktabsenkung der VKM angewendet, bewirkt diese eine Verringerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrads. Sollte die elektrische Energie dafür nicht aus Rekuperationsvorgängen stammen, sondern aus der Batterieladefunktion gewonnen werden, ist mit einem negativen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch zu rechnen. Das effektive Gesamtmoment von VKM plus RSG ist von der gewählten Hybridstruktur abhängig und wird in Kap. 4 näher betrachtet.

3.1.3.5 Elektrisch Fahren

Die verbrauchs- und komfortrelevanten Vorteile eines kombinierten Antriebs, bestehend aus Verbrennungs- und Elektromotor, resultieren aus einer intelligenten Verknüpfung der positiven Eigenschaften des jeweiligen Antriebssystems. Ohne einen vorausschauenden Fahrhorizont muss für jede Fahrsituation neu bilanziert werden, ob im aktuellen Zeitpunkt der

⁴Kick-Down: Beschreibt im vorliegenden Anwendungsfall die maximale Betätigung des Gaspedals, um die höchst mögliche Beschleunigung des Fahrzeugs zu erzielen.

verbrennungsmotorische oder der elektrische Antrieb den verbrauchseffizienteren Betrieb darstellt. Im Zuge der Entwicklung der Hybridsteuerung wurde eine adaptive Regelung zur Entscheidungsfindung entworfen, welche, unter Berücksichtigung der Gesamtwirkungsgrade, über einen optimierten Einsatzbereich von Verbrennungsmotor und Elektromotor entscheidet.

Das Kernelement dieser Betriebsstrategie bildet die aktuelle Effizienz des jeweiligen Antriebs bezogen auf das gleiche Wellenniveau (z.B. Kurbelwelle). Im Folgenden soll diese Bilanzierung anhand einer P2-Hybridstruktur vorgestellt werden. Dafür werden die Wirkungsgrade des verbrennungsmotorischen sowie des elektrischen Pfades auf das Kurbelwellenniveau bezogen. Abb. 3.16 stellt den Ablauf und die Verknüpfung der notwendigen Eingangsparameter für den weiteren Entscheidungsprozess dar.

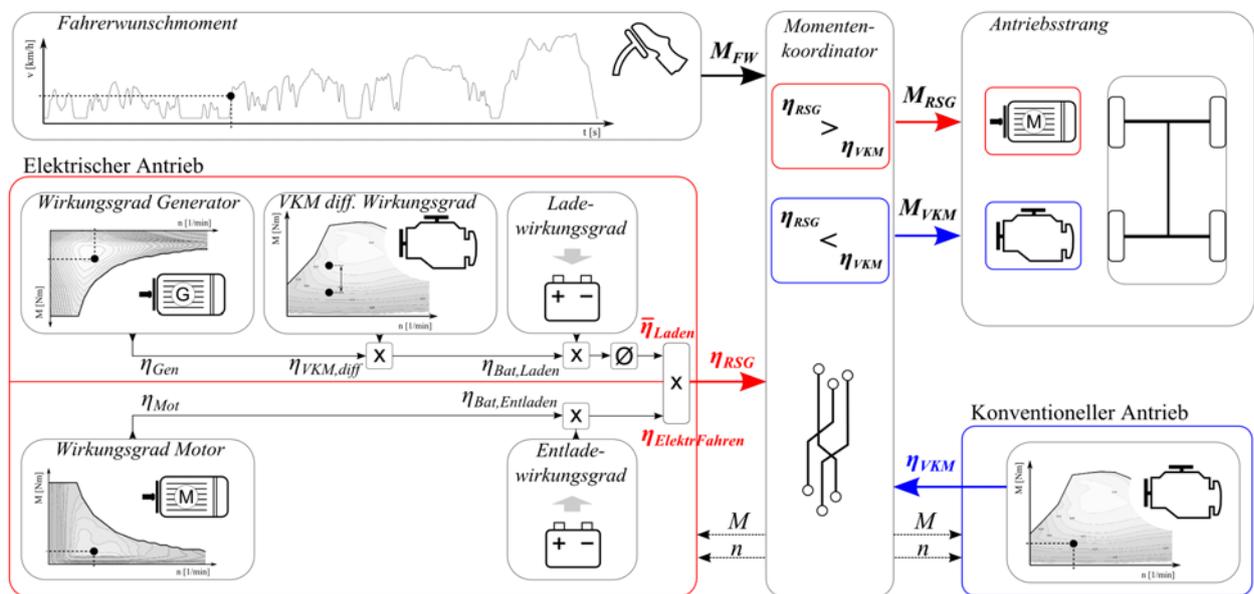


Abbildung 3.16: Wirkungsgradbilanzierung der Hybridstrategie zur Bestimmung des effizientesten Antriebssystems für den aktuellen Fahrzustand

Für den aktuellen Fahrzustand, repräsentiert durch das Fahrerwunschmoment M_{FW} , findet die Effizienzbetrachtung für den konventionellen und den elektrischen Antrieb separat statt. Der aktuelle Motorwirkungsgrad η_{VKM} (Abb. 3.16, blau) wird durch den Betriebspunkt resultierend aus Drehzahl und Drehmoment charakterisiert. Für den elektrischen Antriebspfad (Abb. 3.16, rot) ist es grundsätzlich möglich, den gesamten Wirkungsgrad $\eta_{ElektrFahren}$, welcher aus dem Wirkungsgrad des Elektromotors η_{Mot} sowie der Entladeeffizienz der Batterie $\eta_{Bat,Entladen}$ resultiert, nach Gl. 3.9 für den momentanen Zeitpunkt zu bestimmen. Um die maximale Effizienz für den gesamten elektrischen Fahrbetrieb η_{RSG} (Gl. 3.11) zu erfassen, muss weiterhin das notwendige Aufladen der Batterie $\eta_{Laden,ges}$ (Gl. 3.3) entsprechend Kap. 3.1.3.1 berücksichtigt werden. Da sich eine im aktuellen Betrachtungszustand gleichzeitige Verwendung des Motor- und Generatorbetriebs des RSG ausschließt, muss die Energiegewinnung zeitlich versetzt und gegebenenfalls unter anderen Betriebsbedingungen

stattfinden. Dies bedeutet, dass eine konkrete Aussage zur Bestimmung der Gesamteffizienz ausgehend von der Energiegewinnung bis hin zum elektrischen Antrieb zum aktuellen Zeitpunkt nicht eindeutig getroffen werden kann. Die im Folgenden vorgestellte Methode stützt sich aus diesem Grund auf Erfahrungswerte vorangegangener Ladephasen in Form eines mittleren Ladewirkungsgrads $\bar{\eta}_{Laden}$ (Gl. 3.10) und lässt diese zum jeweiligen Zeitschritt in die Entscheidung einfließen. Je nach dem Gütegrad des Ladeverhaltens bzw. dem Lastprofil in zuvor absolvierten Fahrsituationen, ergeben sich unterschiedliche Effizienzwerte, welche in weiterer Folge kontinuierlich angepasst werden und somit den Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Pfades η_{RSG} charakterisieren.

$$\eta_{ElektrFahren} = \eta_{Entladen,ges} = \eta_{Mot} \cdot \eta_{Bat,Entladen} \quad (3.9)$$

$$\bar{\eta}_{Laden} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{Laden,ges,i} = \eta_{Gen} \cdot \bar{\eta}_{VKM,diff} \cdot \eta_{Bat,Laden} \quad (3.10)$$

$$\eta_{RSG} = \eta_{ElektrFahren} \cdot \bar{\eta}_{Laden} \quad (3.11)$$

Die Gesamteffizienz des elektrischen Antriebspfades wird mit dem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors verglichen und der HCU Momentenkoordinator entscheidet basierend auf dem aktuellen Belastungsprofil daraufhin zwischen dem verbrennungsmotorischen und dem elektrischen Antrieb. D.h. liegt die berechnete Effizienz des Elektroantriebs über der des Verbrennungsmotors, wird der RSG als Antriebsquelle favorisiert, andernfalls wird das Fahrerwunschmoment an den Verbrennungsmotor weitergeleitet. Abb. 3.17 veranschaulicht die Betriebsstrategie an einem beispielhaften Fahrprofil. Als Grenzwirkungsgrad für den elektrischen Antrieb wurde eine Effizienz von ca. 20 % ermittelt. Alle potenziellen Betriebspunkte, bei denen der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors geringer ist als diese Grenzeffizienz, werden vorzugsweise über den elektrischen Antrieb dargestellt, unter der Voraussetzung, dass alle notwendigen Bedingungen (z.B. SOC) für diesen Betrieb erfüllt sind.

Da zu Beginn des Fahrzyklus keinerlei Vorkenntnisse über die Wirkungsgrade im elektrischen Betrieb vorhanden sind, wird zunächst eine Einlernphase des Systems vorgenommen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass parallel erste plausible Anhaltswerte für den Wirkungsgrad des generatorischen und motorischen Pfades aufgezeichnet werden können. Nach dem Abschluss der Einlernphase wird die Grenzeffizienz über die real berechneten Größen charakterisiert und je nach Fahrprofil angepasst. Um einen komfortablen Betrieb zu gewährleisten, ist ein permanentes Hin- und Herschalten zwischen den Antriebsaggregaten zu unterbinden. Durch die Applikation einer Hysterese in der Grenzeffizienz gemäß Abb. 3.17 kann dieser Forderung nachgegangen werden. Grundsätzlich repräsentiert der obere Hysteresewert dabei die zuvor berechnete Grenze zwischen elektrischem und verbrennungsmotorischem Betrieb. Um überschüssige Rekuperationsenergie, welche nicht durch das Bordnetz verbraucht wird, mitzuberechnen, ist es möglich über eine Energiebilanzierung diesen oberen Hysterese-

wert weiter heraufzusetzen, um somit das Plus an regenerativer Energie aufzubrechen und den elektrischen Fahrbetrieb auszuweiten.

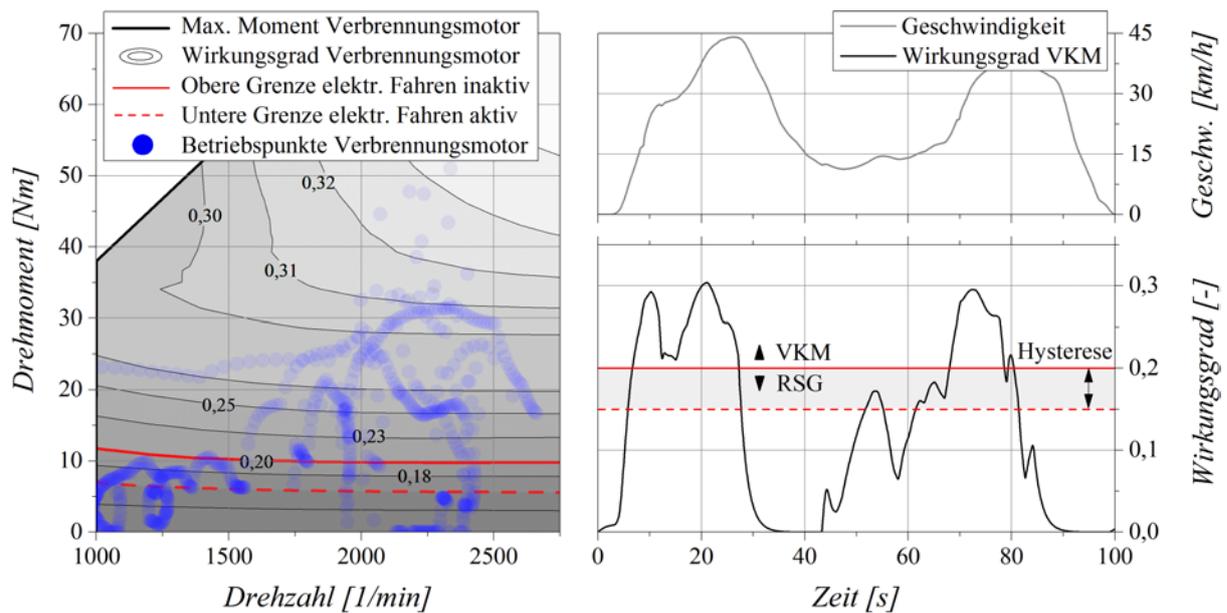


Abbildung 3.17: Darstellung des Grenzwirkungsgrads ($\eta = 0,20$) inklusive Hysterese für den elektrischen Antrieb an einem beispielhaften Fahrprofil

Der Vorteil einer adaptiven Regelung dieses Grenzwirkungsgrads begründet sich auf der ständigen Berücksichtigung des aktuellen Fahrprofils. Eine feste Grenzeffizienz könnte bei zu konservativer Auslegung (d.h. pro Verbrennungsmotor) wichtige Verbrauchsvorteile durch zu geringe Nutzung der elektrischen Maschine ungenutzt lassen. Im Gegenzug könnte eine zu optimistische Grenzeffizienz (d.h. pro elektrischer Antrieb) die Gegebenheiten einer potenziellen ineffizienten Energiegewinnung basierend auf einem Fahrprofil, welches z.B. eine optimale Ladestrategie nach Kap. 3.1.3.1 nicht gestattet, vernachlässigen. Dadurch würden die Verbrauchspotenziale durch den elektro-hybriden Antrieb gemindert werden. Die adaptive Regelung berücksichtigt diese besonderen Gegebenheiten durch die Korrektur der Ladeeffizienz $\bar{\eta}_{Laden}$ und damit der Grenzeffizienz η_{RSG} , so dass der verbrennungsmotorische Antrieb favorisiert wird, bis eine optimalere Ladebilanz sichergestellt werden kann.

3.1.4 Validierung des Simulationsmodells

Simulationen sind ein grundlegender Standard, um in der frühen Entwicklungsphase erste Aussagen über Erfolg und Misserfolg einer Technologie treffen zu können und gegebenenfalls weitere Optimierungsschritte abzuleiten. Mit fortschreitendem Entwicklungsstatus bedarf es dennoch einer begleitenden Validierung des Simulationsmodells hinsichtlich dem Verhalten und den Eigenschaften des realen Systems. Anhand verschiedenster Verifikationsparameter wird die Modellierungsgüte aufgezeigt und ein Abgleich der Resultate im Ergebnisteil dieser Arbeit (Kap. 4) dient der Steigerung der Aussagekraft des Simulationsmodells bei der

Potenzialabschätzung. Die experimentelle Umgebung zur Analyse des elektro-hybriden Antriebsstrangs für das zu Grunde liegende Ultraleichtfahrzeug soll in weiterer Folge in Kap. 3.2 vorgestellt werden.

3.2 Prüfstand

Im weiteren Entwicklungsprozess wurde der gesamte Antriebsstrang für das in Kap. 2.3.1 beschriebene ultraleichte Fahrzeugkonzept an einem dynamischen Antriebsprüfstand aufgebaut. Die theoretischen Erkenntnisse aus der Simulation konnten durch die Nachstellung am Prüfstand validiert werden, wodurch sich die Aussagekraft der Simulationsergebnisse im Allgemeinen erhöht. Im Folgenden wird das Prüfstandskonzept vorgestellt sowie zusätzlich ein Einblick in die Funktionsentwicklung gegeben, welche zur Erstellung der Hybridsteuerung und Aktuierung des elektro-hybriden Antriebsstrangs notwendig wurde.

3.2.1 Konzept dynamischer Antriebsprüfstand

Um die Effizienz des gesamten Antriebsstrangs bewerten zu können, müssen über die Belastungsmaschine am Prüfstand dynamische Geschwindigkeitsprofile unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrwiderstände vorgegeben werden können. Ein erster Schritt zur Verifizierung des Verhaltens eines hybriden Antriebsstrangs wird teilweise über sogenannte Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen vorgenommen. Die Messanforderungen verringern sich dabei deutlich, da lediglich ausgewählte Komponenten des Antriebsstrangs (z.B. Verbrennungsmotor) hardwareseitig umgesetzt werden und alle weiteren Aggregate sowie deren Interaktionen in einer parallelen Echtzeitsimulation beschrieben werden. Die Betriebszustandsänderungen, ausgelöst durch den elektrischen Antrieb, werden als Lastprofil an die Belastungsmaschine übergeben. Zur Beurteilung der Effizienz des hybriden Systems wird meist die Reaktion der VKM in Form einer Kraftstoffverbrauchsänderung analysiert.

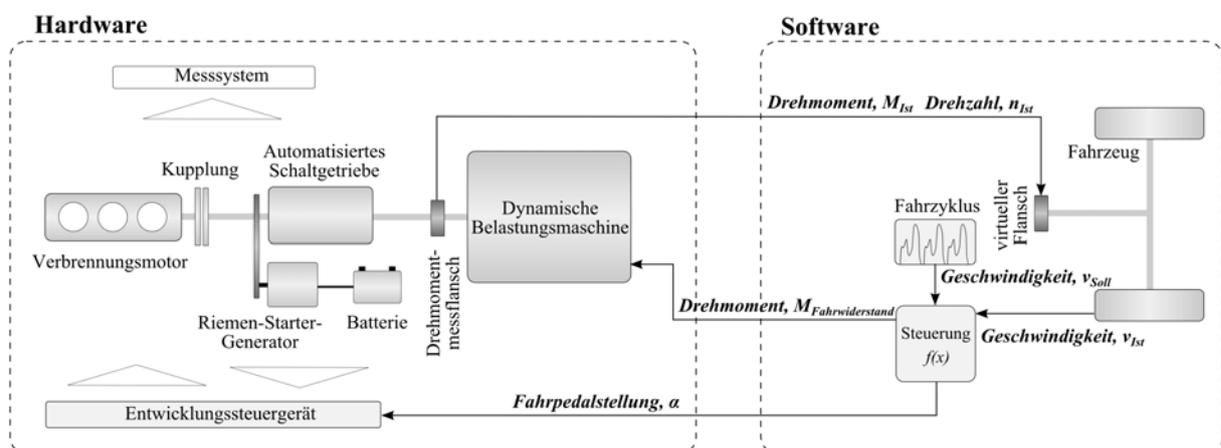


Abbildung 3.18: Prüfstandskonfiguration des gesamten Antriebsstrangs an einer dynamischen Belastungsmaschine; Darstellung der Regelstruktur für ein vorgegebenes Geschwindigkeitsprofil

Für die experimentellen Untersuchungen wurde der gesamte elektro-hybride Antriebsstrang bestehend aus CNG Verbrennungsmotor, automatisierten Schaltgetriebe inklusive Kupplung sowie 12 Volt bzw. 48 Volt Riemen-Starter-Generator und Batterie an eine dynamische Belastungsmaschine gekoppelt (Abb. 3.18). Die Prüfstandssteuerung berechnet die aerodynamischen sowie rollwiderstandsbehafteten Fahrwiderstände in Abhängigkeit der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Dafür wird die aktuelle Last und die Drehzahl über den Drehmomentmessflansch an der Antriebsachse erfasst und an die Prüfstandssteuerung übergeben. Bei der Vorgabe eines definierten Fahrprofils wird die Soll- und die Ist-Geschwindigkeit über die Steuerung abgeglichen und mittels PI-Regler der Fahrpedalwert entsprechend nachgeregelt und an das Entwicklungssteuergerät übertragen. Der Pedalwert dient als Haupteingangsgröße zur Regulierung der Längsdynamik sowie zur Steuerung sämtlicher Antriebsfunktionen inklusive der Betriebsstrategie für den Hybridbetrieb. Weiterhin werden alle Sensoren des Antriebs über das Steuergerät erfasst und über die verschiedensten Steuerungseinheiten (VCU, HCU, ECU, TCU) ausgewertet. Basierend auf den gesammelten Messwerten wird das gesamte Antriebsstrangmanagement vorgenommen und die jeweiligen Aktuatoren (z.B. Drosselklappe, Kupplung, etc.) angesteuert. Durch den Aufbau des gesamten Antriebssystems erhöht sich die Komplexität und die Anforderungen bei der Verifizierung der Simulationsergebnisse steigen im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Hardware-in-the-Loop Methode deutlich an. Allerdings repräsentiert der komplexere Messaufwand einen hohen Gütegrad der Ergebnisse in Bezug auf das reale Verhalten des gesamten Antriebsstrangs.

3.2.2 Funktionsentwicklung und Applikation

3.2.2.1 Allgemein

Um die Validierung der Simulationsergebnisse mittels Prüfstandsmessungen vornehmen zu können, müssen die gesamten Antriebsfunktionen auf einem Entwicklungssteuergerät abgebildet werden. Im Folgenden wird auf die sogenannte Funktionsentwicklung insbesondere für den hybriden Betrieb (Hybrid Control Unit) eingegangen. In Anbetracht des vielfältigen Antriebskonzepts konnte auf keine vorhandene Seriensoftware zurückgegriffen werden, so dass die Funktionalitäten für einen zuverlässigen Betrieb des Verbrennungsmotors und des automatisierten Schaltgetriebes eigenständig entwickelt werden mussten. Durch die Wahl eines freiprogrammierbaren Steuergeräts wurde die Flexibilität geschaffen, vor allem die Hybridfunktionen mit ihren vielschichtigen Interaktionen zu der VKM und dem Getriebe darstellen zu können. Mit dem gewählten Rapid-Control-Prototyping (RCP) Steuergerät war es möglich, die gesamte Signalkette, d.h. die jeweiligen Eingangssignale (Analog, Digital, CAN) zu erfassen, anschließend eine entsprechende Signalverarbeitung vorzunehmen und daraufhin die Steuerung und Regelung über die Ausgangssignale (PWM, Digital) vorzunehmen. [74] stellt die Hardwarespezifikationen des eingesetzten Steuergerätes detailliert dar.

Von der Entwicklung der Antriebsfunktionen bis zur finalen Applikation der Parameter und Kennfelder am Prüfstand ist eine umfassende Softwarekette notwendig. Zu Beginn müssen die jeweiligen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Steuergeräts mittels PCU-Konfigurator (Schaeffler Engineering) festgelegt werden. Die eigentliche Funktionsentwicklung wurde anschließend mit dem Programm MATLAB Simulink unter Nutzung des dSPACE TargetLink Blocksets vorgenommen. Diese modellbasierte Entwicklungsumgebung ermöglicht durch ihre grafische Oberfläche eine effektive Erarbeitung von Funktionsabläufen und bietet bei Bedarf auch die Möglichkeit, Software-in-the-Loop (SiL) Tests durchzuführen, um das prinzipielle Verhalten der entwickelten Algorithmen zu verifizieren. Mittels dSPACE TargetLink Compiler wird das erstellte Antriebsmodell in den C-Code überführt, welcher alle zuvor festgelegten Informationen hinsichtlich Eingangs- und Ausgangssignale, Steuerung und Regelung sowie die Applikationsparameter beinhaltet. In weiterer Folge wird mittels Wind River Diab Compiler aus dem C-Code der steuengerätkonforme Hex-Code erstellt. Der Generierungsprozess des C-Codes und des Hex-Codes erfolgt automatisiert, wodurch der Entwicklungsprozess deutlich beschleunigt wird. Nach dem Upload des Hex-Codes in das Steuergerät mit Hilfe des PCU-Bootloader Tools (Schaeffler Engineering) können die entwickelten Funktionen am realen Bauteil erprobt werden. Die Überwachung und Applikation der im Steuergerät hinterlegten Funktionen kann sowohl über die Mess-, Kalibrier- und Diagnosesoftware MARC (Schaeffler Engineering) als auch mittels INCA (ETAS) vorgenommen werden. Der große Vorteil in diesem Softwareentwicklungsprozess liegt in der schnellen Durchlaufzeit angefangen von der Integration neuer Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen, deren modellbasierte Verknüpfung sowie der Code-Generierung mit anschließender Erprobung und Applikation.

Auf der Softwareebene sind die einzelnen Funktionen nach den entsprechenden Hauptkomponenten im Antrieb gegliedert. Abb. 3.19 stellt die vier Einheiten bestehend aus VCU, HCU, ECU und TCU dar. Weiterhin werden die jeweiligen Funktionen, welche in den einzelnen Subsystemen behandelt werden, in verschiedene Zeitschienen eingeteilt, welche die Häufigkeit der Aktualisierung bzw. der Berechnung vorgeben. Grundsätzlich erfolgt die Wahl eines Zeitintervalls für eine bestimmte Anwendung nach deren Anforderung im Hinblick auf z.B. die Regelgeschwindigkeit. In der 1 ms Task wird vorrangig die Ansteuerung der Aktuatoren übernommen, welche eine schnelle Reaktion für ein optimales Betriebsverhalten benötigen. Dies setzt voraus, dass auch die notwendigen Sensoren, welche in den Regelkreis einfließen, entsprechend schnell eingelesen werden. In der 10 ms Task wird vor allem das Management der diversen Betriebszustände vorgenommen. In der ECU wird zusätzlich noch eine sogenannte ZOT Task notwendig, die auf den oberen Totpunkt des Kolbens getriggert ist, in dem die Zündung erfolgt. Dadurch kann das optimale Kraftstoff-Luftverhältnis unter Berücksichtigung des gemessenen Lambdawerts für jeden Verbrennungszyklus adaptiert werden.

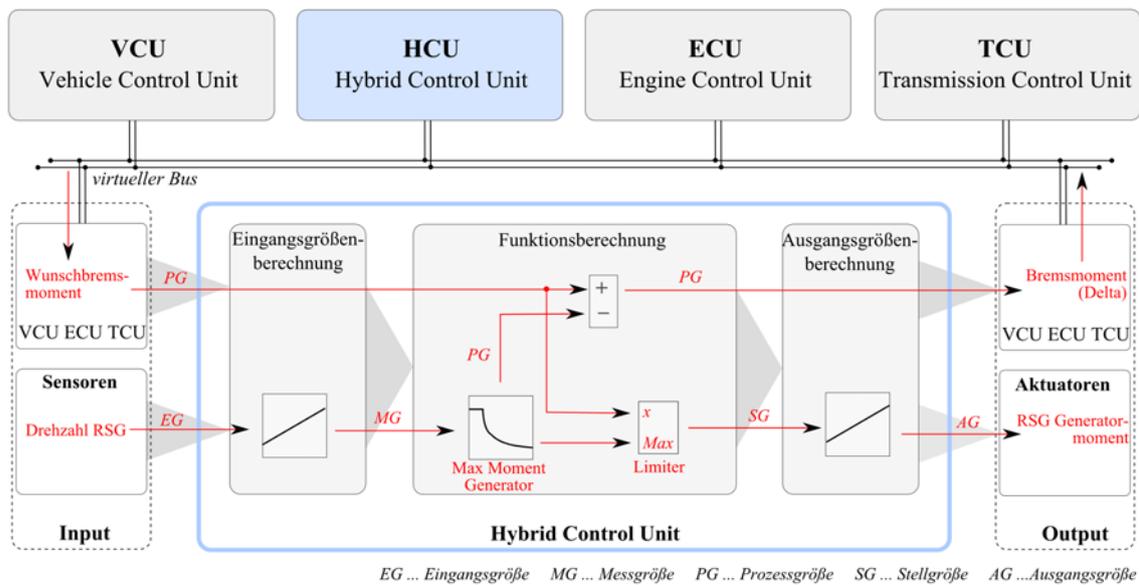


Abbildung 3.19: Schematische Darstellung der Steuerungseinheiten für die einzelnen Antriebssysteme; Hybrid Control Unit mit exemplarischer Veranschaulichung des Signalverlaufs bei einem Rekuperationsvorgang

Des Weiteren wird die Kommunikation bzw. Weiterleitung von Mess- und Prozessgrößen zwischen den einzelnen Tasks sowie zwischen den unterschiedlichen Steuerungseinheiten über einen virtuellen Bus ermöglicht. Dies wird notwendig, da potenzielle Zustandswechsel unter Umständen Auswirkungen auf das Regelverhalten anderer Funktionen haben. So verlangt z.B. ein Gangwechsel in der TCU, nach einer Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors in der ECU wobei kurzzeitig die elektrische Energiegewinnung durch den RSG in der HCU unterbrochen werden muss.

Abb. 3.19 stellt exemplarisch den Signalverlauf innerhalb der HCU für einen Rekuperationsvorgang dar. Dabei erfolgt zunächst der externe Input diverser Sensoren (z.B. RSG Drehzahl), welche als Eingangsgrößen (EG) in das Entwicklungssteuergerät eingehen. Über eine Korrektur bzw. Umrechnung werden diese Signale als Messgrößen (MG) an den Funktionsteil der HCU übergeben. Zusätzlich fließen über den virtuellen Bus die verschiedenen Prozessgrößen (PG) z.B. das Wunschbremsmoment des Fahrers in die Berechnung ein. Im Funktionsteil wird das geforderte Bremsmoment mit dem maximalen Generatormoment abgeglichen und gegebenenfalls limitiert an die Ausgangsgrößenberechnung als Prozessgröße weitergeleitet und in ein entsprechendes Ansteuersignal (AG) für den RSG konvertiert. Die Information, ob der RSG das geforderte Bremsmoment im generatorischen Betrieb abbilden kann, wird an den virtuellen Bus übergeben, damit eventuell notwendige Schritte in den anderen Kontrolleinheiten vorgenommen werden können.

3.2.2.2 Hybrid Control Unit

Die zentrale Aufgabe der HCU ist die Koordination der beiden Antriebseinheiten Verbrennungsmotor und Riemen-Starter-Generator unter Berücksichtigung der notwendigen Eingangsgrößen sowie in weiterer Folge die Aktuierung des Riemen-Starter-Generators in Abhängigkeit der zu Grunde liegenden Betriebsstrategie. Insgesamt wurde die gesamte Hybridstruktur in der 10 ms Task umgesetzt, da die Signale des RSG durch die integrierte Steuerung mit maximal 100 Hz erfasst werden.

Im Funktionsteil der HCU wurde mittels Stateflow (MATLAB Simulink) ein Zustandsautomat entwickelt, welcher die Hauptbetriebsarten im elektro-hybriden Verbund bestehend aus Verbrennungsmotor und Riemen-Starter-Generator koordiniert. Diese Zustände unterscheiden sich dadurch, welcher der beiden Antriebseinheiten zum jeweiligen Zeitpunkt aktiv ist und in welchem Verhältnis das Fahrerwunschmoment entsprechend aufgeteilt wird. Folgende vier Zustände sind nötig, um das gesamte Antriebspektrum dieses parallelen Antriebssystems nutzen zu können:

- **Stand-By:** Aktivierung erfolgt bei Fahrzeugstillstand bzw. im Start Stopp Modus. Verbrennungsmotor und RSG sind nicht aktiv.
- **Verbrenner-Betrieb:** Es ist ausschließlich der Verbrennungsmotor aktiv, bei Bedarf wird lediglich eine Lastpunktanhebung durch den Generator (RSG) vorgenommen, um die Batterie zu laden.
- **Hybrid-Betrieb:** Aktivierung erfolgt bei Boostanforderung. Dieser Modus stellt den kombinierten Antrieb von Verbrennungsmotor und Elektromaschine zur Maximierung des Antriebsmoments dar.
- **E-Betrieb:** Es werden alle Hybridfunktionen, in denen der Verbrennungsmotor nicht aktiv ist, freigeschaltet. Dazu zählen: Rekuperation, Segeln, elektrisch Fahren.

Abb. 3.20 stellt diese Zustände und deren Verknüpfung im zentralen Hybridmanager dar. Grundsätzlich sind alle Zustandswechsel, mit Ausnahme dem direkten Wechsel vom Stand-By in den Hybrid-Betrieb sowie der Wechsel vom Hybrid- in den E-Betrieb, in beide Richtungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Übergangskriterien gestattet. Als Input zur Beurteilung ob diese Zustandswechsel durchgeführt werden dürfen, sind diverse Mess- und Prozessgrößen als Eingang definiert, welche bei einem potenziellen Zustandswechsel berücksichtigt werden. Vorrangig werden die Eingangsgrößen als Status (0 oder 1) abgefragt, die Festlegung der Grenzwerte mittels Applikationsparameter sowie eventuelle Hysteresen werden außerhalb des Zustandsautomaten festgelegt. Die Übergangskriterien (a...h) sind exemplarisch in Tab. 3.3 beschrieben. Als Output wird lediglich der aktuelle Betriebsmodus an den virtuellen Bus weitergegeben. Alle Entscheidungen (z.B. VKM Status, RSG Moment, Kupplungsposition, etc.) werden nachfolgend entsprechend diesem Zustand eingestellt.

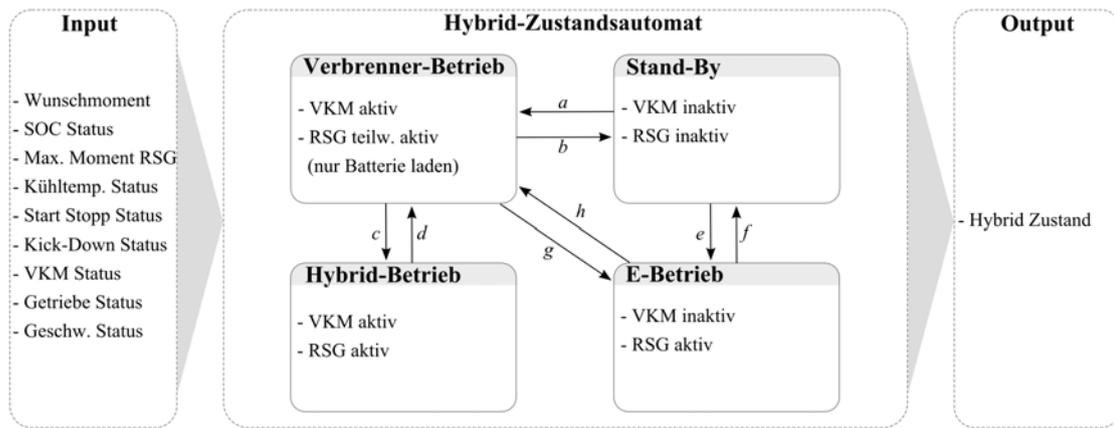


Abbildung 3.20: Übersicht Betriebszustände Hybrid Control Unit; Darstellung der Ein- und Ausgangsgrößen sowie der Übergangsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Funktionen

Die Signalübertragung sowie die Ausgabe interner Messgrößen des RSG werden über eine CAN Schnittstelle realisiert. Für die korrekte Aktivierung des RSG sind Informationen über die Betriebsart (Generator oder Motor) notwendig. Weiterhin muss das Wunschkraftmoment festgelegt werden sowie der Gradient, mit dem das Moment aufgebaut wird. Im Generatormodus, welcher für die Lastpunktanhebung und zur Rekuperation genutzt wird, muss zusätzlich die maximal zulässige Ladespannung vorgegeben werden. Der RSG erfasst über die interne Steuerung weitere Systemgrößen, welche für die Regelung der Reluktanzmaschine notwendig sind und stellt ausgewählte Parameter (Drehzahl RSG, Kühlmitteltemperatur, Spannung am RSG sowie das aktuelle Moment und den Strom) über die CAN Schnittstelle dem Entwicklungssteuergerät und somit der HCU zur Verfügung.

Tabelle 3.3: Exemplarische Auswahl der Übergangskriterien sowie deren Verknüpfung zur Darstellung der Wechsel zwischen den Betriebszuständen in der HCU

Pfad	Zustandswechsel	Übergangskriterien
a	Stand-By > Verbrenner-Betrieb	(Wunschkraftmoment > 0) UND (Start Stopp Status = 0) UND (Getriebe Status = 1)
b	Verbrenner-Betrieb > Stand-By	((Wunschkraftmoment < 0) ODER (Start Stopp Status = 1)) UND (Geschwindigkeit Status = 0)
c	Verbrenner-Betrieb > Hybrid-Betrieb	(Kick-Down Status = 1) UND (SOC Status = 1)
d	Hybrid-Betrieb > Verbrenner-Betrieb	(Kick-Down Status = 0) ODER (SOC Status = 0)
e	Stand-By > E-Betrieb	(Wunschkraftmoment > 0) UND (Start Stopp Status = 1) UND (SOC Status = 1) UND (Kühltemp. Status = 1)
f	E-Betrieb > Stand-By	((Wunschkraftmoment < 0) ODER (Start Stopp Status = 1)) UND (Geschwindigkeit Status = 0)
g	Verbrenner-Betrieb > E-Betrieb	(Wunschkraftmoment < Max. Moment RSG) UND (SOC Status = 1) UND (Kühltemp. Status = 1) UND (Getriebe Status = 1)
h	E-Betrieb > Verbrenner-Betrieb	((Wunschkraftmoment > Max. Moment RSG) ODER (SOC Status = 0) ODER (Kühltemp. Status = 0)) UND (VKM Status = 1)

4 Untersuchungen

Der folgende Abschnitt stellt die wesentlichen Erkenntnisse dar, welche sich aus den simulativen und experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Integration eines 12 Volt und 48 Volt Riemen-Starter-Generators in den im Kap. 2.3 vorgestellten ultraleichten Fahrzeugverbund ergeben. Untergliedert nach der Spannungslage soll sich mit der zentralen Frage auseinandergesetzt werden, welche Maßnahmen und Strategien notwendig sind, um einen signifikanten Mehrwert in Form von Verbrauchsvorteilen und Komfortsteigerungen generieren zu können.

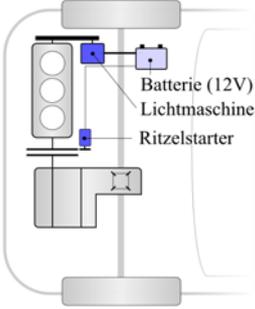
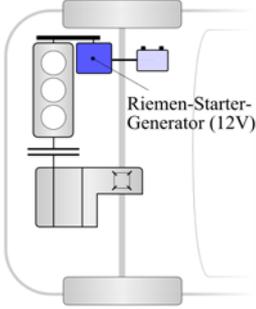
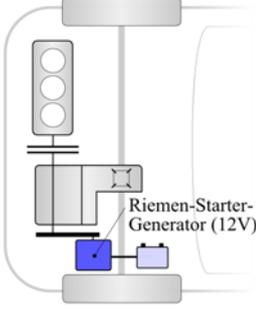
4.1 12 Volt Hybridkonzept

Unter Berücksichtigung des ambitionierten Gewichtsziels (Kap. 2.3) des ultraleichten Prototypen, war die finale Hybridkonfiguration für das endgültige Demonstratorfahrzeug auf ein Bordnetz mit einem Spannungsniveau von 12 Volt begrenzt. Die potenzielle Gewichtserhöhung durch Integration einer 48 Volt Architektur (Tab. 3.1) konnte dahingehend nicht akzeptiert werden.

4.1.1 Potenzielle Antriebstopologien

Durch die Limitierung auf ein Spannungsniveau von lediglich 12 Volt bleiben die hybriden Freiheitsgrade bedingt durch den maximal zulässigen Strom bzw. die elektrische Leistungen (Kap. 2.1.2, Abb. 2.1) grundsätzlich eingeschränkt. Den minimalsten konstruktiven Aufwand stellt dahingehend eine konventionelle Konfiguration aus spannungsgeregelter Lichtmaschine plus separaten Ritzelstarter dar (Tab. 4.1, links). Diese Konfiguration ermöglicht zumindest die Implementation einer Start Stopp Funktion. Weitere kraftstoffreduzierende Faktoren ergeben sich jedoch erst durch die Integration eines Riemen-Starter-Generators in den Rientrieb des Verbrennungsmotors in Form eines P1-Hybrid (Tab. 4.1, mittig). Diese Micro-Hybridisierung ermöglicht über eine individuelle Ansteuerung des RSG die teilweise Rückgewinnung von kinetischer Energie in den Bremsphasen (Rekuperation). Bei Bedarf ist auch eine Boostfunktion möglich, bei der ein zusätzliches Moment vom RSG bereitgestellt wird, sofern ein entsprechend hoher Beschleunigungswunsch von der Fahrzeugsteuerung detektiert wird (z.B. Kick-Down).

Tabelle 4.1: Potenzielle 12 Volt Antriebsstrangkonfigurationen und deren Hybridisierungspotenzial

Konventionell	P1-Hybrid	P2-Hybrid
		
Lichtmaschine + Ritzelstarter	Riemen-Starter-Generator am Verbrennungsmotor	Riemen-Starter-Generator an Getriebeeingangswelle
Start Stopp	Start Stopp Rekuperation Boost	Start Stopp Rekuperation Boost Elektrisch Kriechen
Konventionell (12 Volt)	Micro-Hybrid (12 Volt)	Mild-Hybrid (12 Volt)

In weiterer Folge wurden Untersuchungen hinsichtlich einer P2-Strukturierung vorgenommen, bei welcher der Riemen-Starter-Generator an die Getriebeeingangswelle gekoppelt wurde (Tab. 4.1, rechts). Der Hauptvorteil dieser Konfiguration besteht in der Möglichkeit, dass das Schleppmoment des Verbrennungsmotors in Rekuperationsphasen abgekoppelt werden kann. Darüber hinaus kann dadurch die mechanische Antriebsleistung des RSG vollständig für den Vortrieb des Fahrzeugs genutzt werden, wodurch eine elektrische Fahrfunktion für niedrige Geschwindigkeiten, sogenanntes elektrisches Kriechen, ermöglicht wird. Grundvoraussetzung dafür sind vor allem die geringen Fahrleistungsanforderungen, welche durch das geringe Fahrzeuggewicht indiziert werden. Nach [48] kann diese Konfiguration auf Grund ihres gesteigerten Funktionsumfangs trotz Beibehaltung der 12 Volt Spannungsebene somit bereits in die Kategorie der Mild-Hybride eingeordnet werden.

4.1.2 Verbrauchspotenziale

4.1.2.1 Basisvalidierung Antriebsstrang

Für die Beurteilung der Verbrauchspotenziale resultierend aus der Integration eines 12 Volt Riemen-Starter-Generators wurde das NEFZ und WLTP Fahrprofil favorisiert. Um einen ersten Abgleich des in Kap. 3.1 vorgestellten Simulationsmodells mit dem Verhalten des realen Antriebs zu schaffen, wurde eine Validierung entsprechend Abb. 4.1 und Abb. 4.2 mittels Messungen, welche am dynamischen Antriebsstrangprüfstand (Kap. 3.2.1) erzielt wurden,

vorgenommen. Dabei wurden die simulativen und experimentellen Ergebnisse hinsichtlich Fahrzeuggeschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch, mechanischer Antriebsleistung gegenübergestellt, um so Aussagen über die Modellierungsgüte des virtuellen Antriebsstrangs treffen zu können. Weiterhin wurde das Verhalten der Schaltstrategie abgeglichen sowie der Einfluss des elektrischen Bordnetzverbrauchs auf den Ladezustand der 12 Volt Batterie. Die dargestellten Ergebnisse repräsentieren den Antriebsstrang mit 12 Volt RSG und den zugehörigen Fahrwiderständen (Kap. 3.1.2.1), berücksichtigen zur effizienteren Verifizierung des Simulationsmodells jedoch keine Start Stopp sowie Hybridfunktionen. Die Messungen wurden im betriebswarmen Zustand mit einem entsprechend vorkonditioniertem Kühlmittel und Schmieröl durchgeführt.

Der Abgleich der benötigten Antriebsleistung im NEFZ (Abb. 4.1), vor allem für die Konstantfahranteile, bestätigt die gleichwertige Reaktion des Antriebsstrangs auf die Fahrwiderstände und die Reibungsverhältnissen von Simulationsmodell und realem Antrieb. Durch den Abgleich der Gänge konnte das Verhalten der in Kap. 3.1.2.1 vorgestellten Schaltstrategie validiert werden. Die Belastung des Bordnetzes durch diverse elektrische Verbraucher (z.B. elektrische Wasserpumpe) ist durch den abnehmenden Batterieladezustand gekennzeichnet. Basierend auf der gemessenen Leistung der elektrischen Verbraucher im gesamten Zyklus konnte eine mittlere Bordnetzlast von ca. 130 W ermittelt werden, welche in weiterer Folge im Simulationsmodell angenommen wurde. Zusammenfassend lässt sich aus dem kumulierten Kraftstoffverbrauch eine gute Übereinstimmung für das zu Grunde liegende Fahrprofil erkennen. Insgesamt benötigt der konventionelle Antrieb 0,301 kg CNG zur Bewältigung der NEFZ Fahransforderungen. Bezogen auf die zurückgelegte Strecke entspricht dies einem Gesamtverbrauch von 2,77 kg/100km. In den Prüfstandsmessungen konnte ein Verbrauch von 2,81 kg/100km (+1,4 %) erzielt werden. Für die folgende nachhaltige Verbrauchsbeurteilung sollte nach Beendigung des jeweiligen Zyklus ein ausgeglichener Ladezustand in der Batterie wieder hergestellt sein. Simulativ konnte dadurch eine Verbrauchserhöhung von 0,12 kg/100km ermittelt werden. Somit ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 2,89 kg/100km, welcher als Basis für die im Folgenden betrachteten Hybridpotenziale herangezogen wird.

Abb. 4.2 stellt den analogen Validierungsprozess von Simulation und realem Antriebsstrang für das WLTP Fahrprofil dar. Ein exakter Abgleich der Antriebsleistung ist auf Grund des dynamischeren Anforderungsprofils des WLTP im Vergleich zum NEFZ nur eingeschränkt möglich. Im Hinblick auf die Schaltstrategie kann ein annähernd gleiches Verhalten festgestellt werden. In Phasen mit starken Verzögerungen und anschließenden Beschleunigungsvorgängen gibt es geringfügige Abweichungen, welche auf die teilweise ungenügende Schaltqualität des realen Antriebs zurückzuführen sind. Auch für den WLTP wurde die mittlere Bordnetzleistung in der Simulation mit 130 W angenommen und führt im Vergleich zum Realverbrauch zum ähnlichen Abfall des Batterieladezustands über die Zykluszeit. Insgesamt beträgt der kumulierte CNG Verbrauch für den WLTP 0,656 kg, dies entspricht 2,82 kg/100km für

den betriebswarmen Antrieb ohne Start Stopp Funktion. Die Validierung durch Prüfstandsmessungen ergab einen Realverbrauch von 2,88 kg/100km, was zu einer Abweichung von +2,1 % gegenüber den Simulationsergebnissen führt. Laut Simulation stellt sich ein Verbrauch von 2,91 kg/100km ein, wenn ein ausgeglichener Ladezustand in der 12 Volt Batterie hergestellt wird.

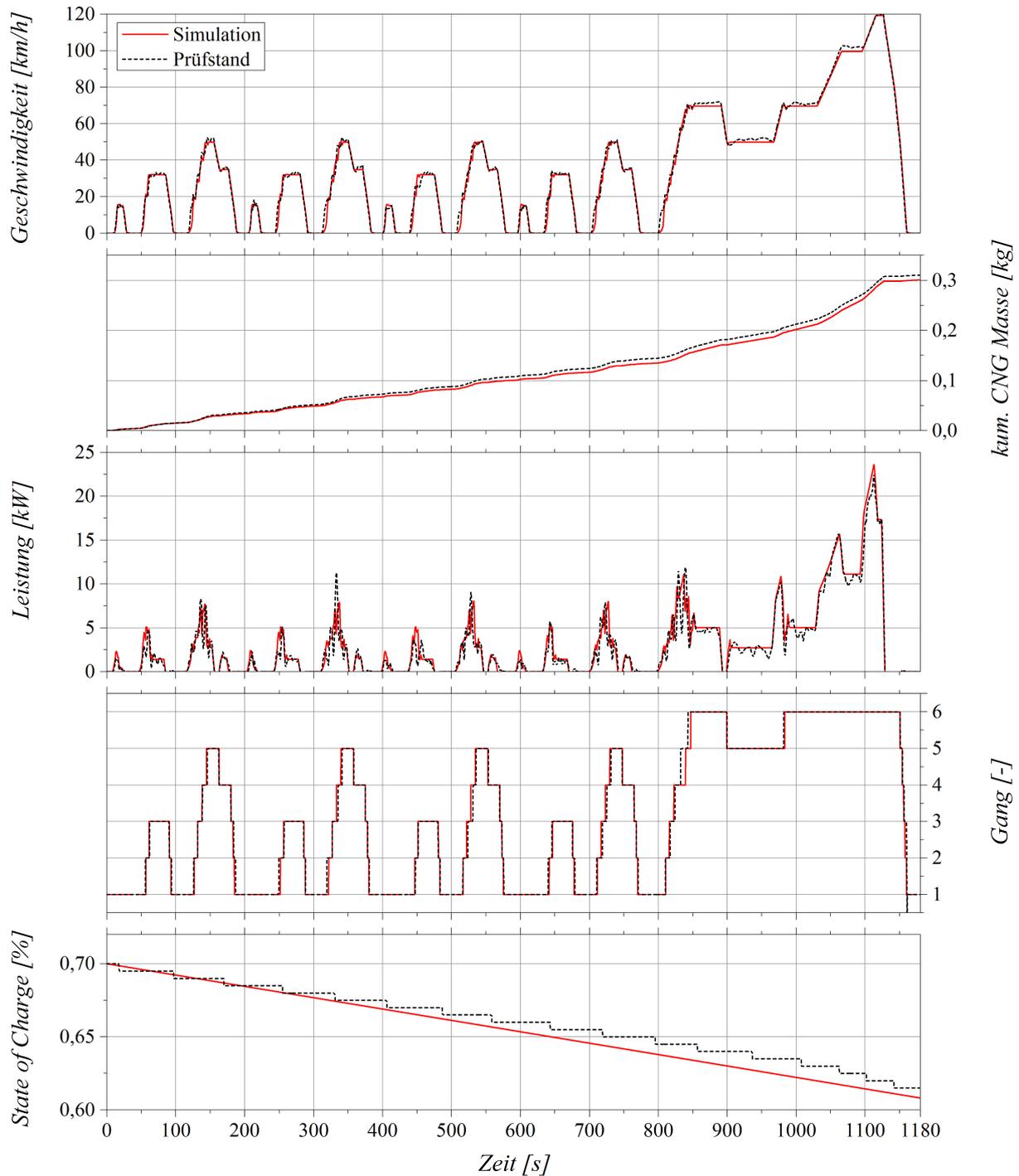


Abbildung 4.1: Basisvalidierung der Simulationsergebnisse durch Prüfstandsmessungen; Vergleich von Geschwindigkeit, CNG Verbrauch, Antriebsleistung, aktuellem Gang sowie State of Charge im NEFZ Fahrprofil

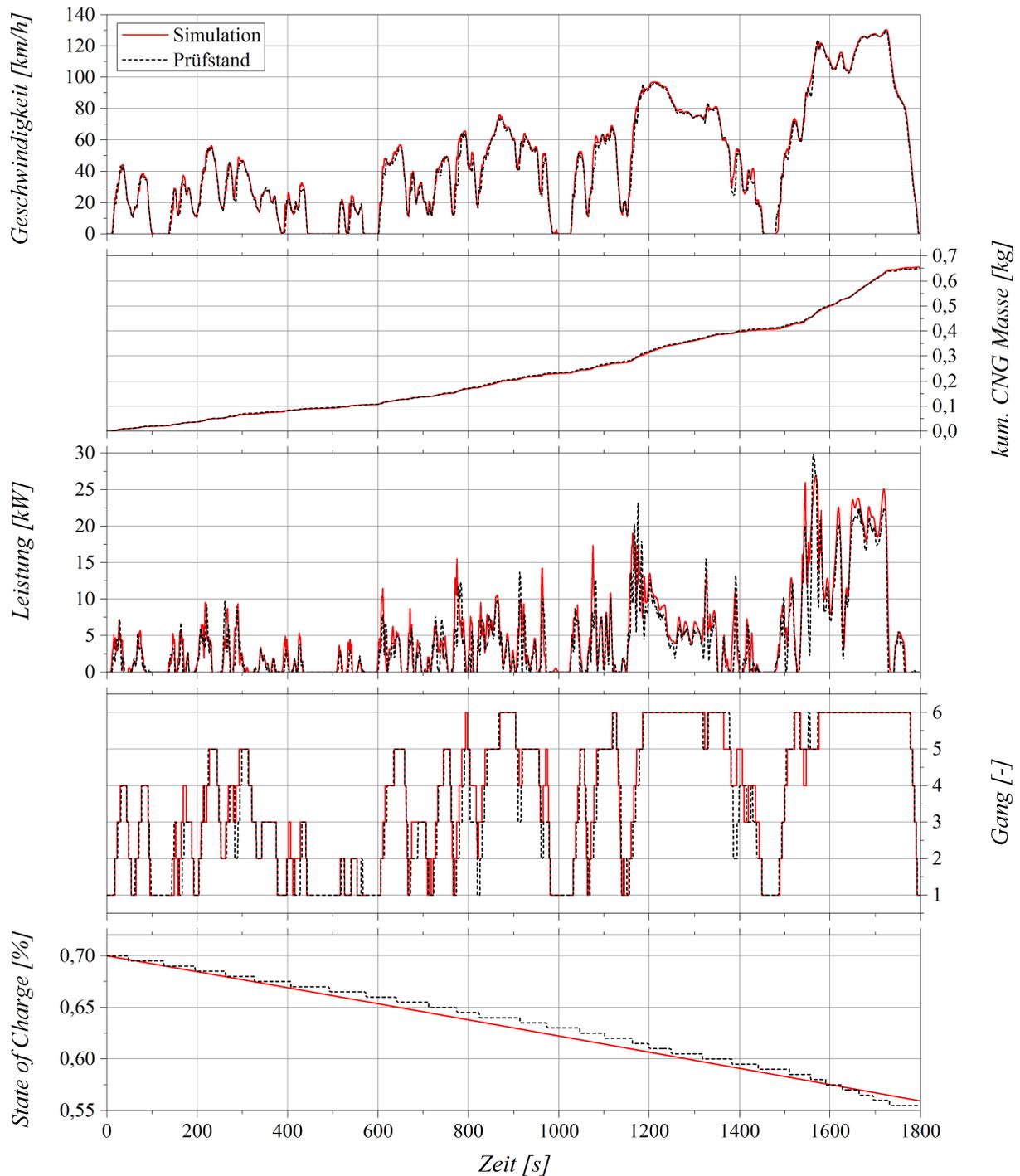


Abbildung 4.2: Basisvalidierung der Simulationsergebnisse durch Prüfstandsmessungen; Vergleich von Geschwindigkeit, CNG Verbrauch, Antriebsleistung, aktuellem Gang sowie State of Charge im WLTP Fahrprofil

4.1.2.2 Rekuperation

Mit der Integration des Riemen-Starter-Generators in den Antriebsstrang des Ultraleichtfahrzeugs ergibt sich im Vergleich zur konventionellen Antriebsarchitektur mit konventioneller Lichtmaschine die Möglichkeit, Bremsenergie in potenziellen Verzögerungsphasen zu nutzen und in Form von elektrischer Energie zu speichern. Eine intelligente Regelung des Generators ermöglicht die gezielte Anforderung eines definierten Generatormoments, welches je nach

Bremsmomentwunsch des Fahrers reguliert werden kann. Genügt die Rekuperationsleistung nicht aus, um die gewünschte Verzögerungsrate einstellen zu können, werden zusätzlich die mechanischen Reibbremsen aktiviert.

Ist der Riemen-Starter-Generator in den Riementrieb des Verbrennungsmotors integriert (P1-Hybrid), muss zur Energierückgewinnung die Kupplung zwischen VKM und Getriebe in den Verzögerungsphasen geschlossen bleiben. Dabei fungiert das Motorschleppmoment als Bremsmoment, welches die Rekuperationsleistung vor allem für kleinere Verzögerungen mindert. Durch die getriebeseitige Integration des RSG (P2-Hybrid) besteht die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor bei Bremsvorgängen abzukoppeln, wodurch die verzögernde Wirkung des Schleppmoments auf den Gesamtantrieb entfällt. Bei einer gleichbleibenden Verzögerungsrate kann so zusätzliche elektrische Energie über den Generator bereitgestellt werden.

Abb. 4.3 stellt dahingehend die Antriebs- bzw. Bremsleistungen für unterschiedliche Verzögerungsraten bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h (links) und 100 km/h (rechts) für die P1- und P2-Struktur gegenüber. Die Schnittpunkte der Leistungsverläufe mit dem Nulldurchgang charakterisieren den energieneutralen Zustand im System. Bei einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h (Abb. 4.3, links) ergibt sich bei der P2-Anordnung somit bereits bei Verzögerungen von lediglich $-0,23 \text{ m/s}^2$ ein Zustand bei dem kein Energieeintrag in den Antriebsstrang mehr notwendig ist. Im Gegensatz dazu muss in der P1-Struktur bei geschlossener Kupplung eine Antriebsleistung von 1,6 kW aufgebracht werden, um die gleiche Verzögerungsrate darstellen zu können. Erst ab $-0,38 \text{ m/s}^2$ verzögert diese Konfiguration ohne zusätzliche Antriebsenergie. In diesem Zustand kann in der P2-Konfiguration bereits eine Leistung von bis zu $-1,8 \text{ kW}$ rekuperiert werden. Auf Grund der ansteigenden aerodynamischen Verluste bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h (Abb. 4.3, rechts), ergibt sich ein energieneutraler Segelbetrieb erst bei höheren Verzögerungsraten. Dennoch kann der P2-Hybrid bei ausgekuppeltem Verbrennungsmotor bereits ab $-0,49 \text{ m/s}^2$ ohne Antriebsenergie auskommen. Bei einer Verzögerung von $-0,61 \text{ m/s}^2$, bei welcher der P1-Hybrid mit geschlossener Kupplung energieneutral verzögert, können bereits bis zu $-2,8 \text{ kW}$ in der P2-Struktur regenerativ genutzt werden.

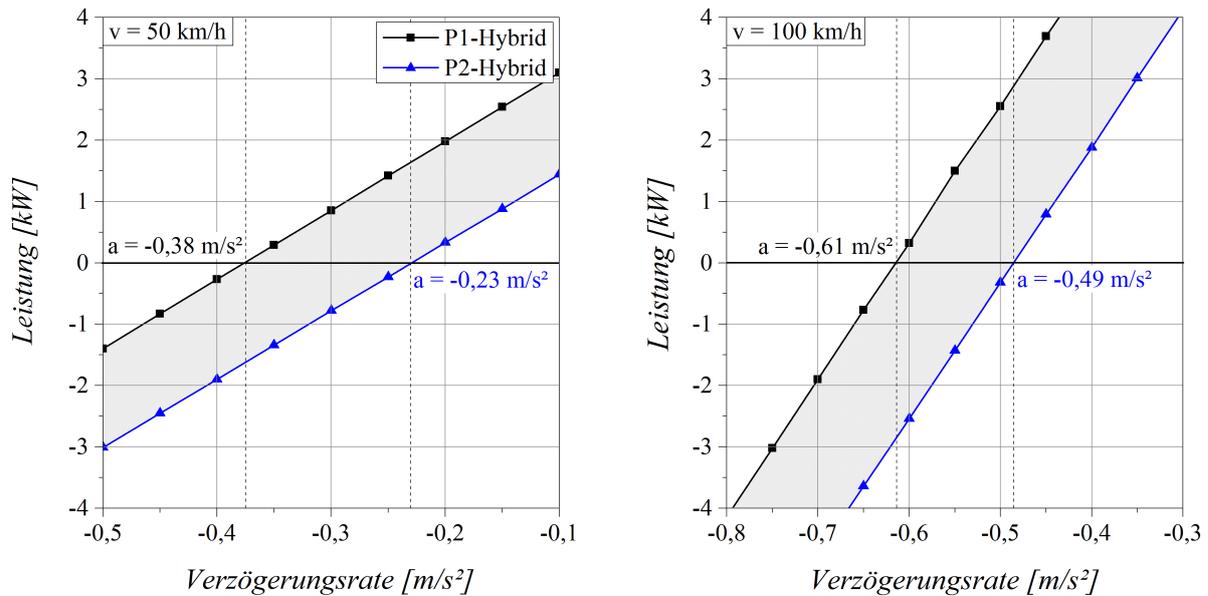


Abbildung 4.3: Darstellung der Antriebs- bzw. Bremsleistungen für verschiedene Verzögerungsraten ohne (P1-Hybrid) und mit (P2-Hybrid) geöffneter Kupplung für eine Geschwindigkeit von 50 km/h (li.) und 100 km/h (re.)

Das für diese simulativen Untersuchungen ausschlaggebende Schleppmoment des Verbrennungsmotors basiert dabei bereits auf Vermessungen mit einem vorgewärmten Antriebssystem und einer entsprechend niedrigeren Ölviskosität, wodurch eine geringere Gesamtreibung im System indiziert wird. Im Umkehrschluss verstärkt sich für Betriebsbedingungen mit geringeren Temperaturen und höherer Ölviskosität dieser Effekt durch das Abkoppeln des Verbrennungsmotors zugunsten des P2-Hybrids weiter.

Abb. 4.4 vergleicht die Energien resultierend aus den Rekuperationsvorgängen im NEFZ Fahrprofil für den P1- und P2-Hybridantrieb. Die kinetische Verzögerungsenergie im NEFZ beträgt insgesamt 960 kJ. Unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände resultiert daraus eine Gesamtbremsenergie von 585 kJ (100 %) für das ultraleichte Fahrzeugkonzept mit einem Bezugsgewicht von 772,5 kg. Durch regeneratives Bremsen mit dem 12 Volt RSG in Form einer P1-Konfiguration können davon 236 kJ (40 %) für die Rekuperation aufgewendet werden. In der P2-Topologie kann durch die Abkopplung des VKM Schleppmoments die mechanische Rekuperationsenergie um ca. 15 % bis auf 323 kJ (55 %) gesteigert werden. Wie Abb. 4.4 (rechts) weiterführend darstellt, steht basierend auf den generatorischen Umwandlungsverlusten 28 % (P1) und 36 % (P2) der Gesamtenergie als elektrisch nutzbare Energie im Bordnetz zur Verfügung.

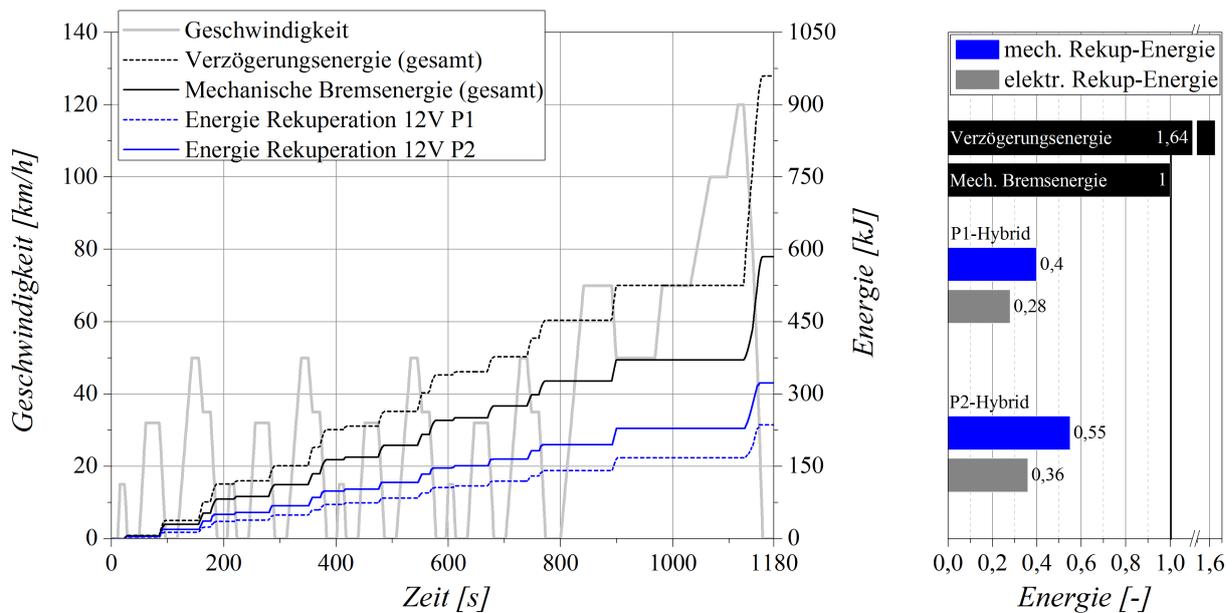


Abbildung 4.4: Vergleich der mechanischen und elektrischen Rekuperationsenergie im NEFZ für den 12 Volt P1- und P2-Hybrid in Relation zur gesamten Bremsenergie

Der negative Einfluss des VKM Schleppmoments auf die mögliche Rekuperationsenergie kann auch im WLTP Fahrprofil dargestellt werden (Abb. 4.5). In Relation zur Gesamtbremsenergie von 1313 kJ (100 %) können in der P1-Struktur 515 kJ (39 %) und in der P2-Architektur 636 kJ (48 %) regenerativ genutzt werden. Unter Berücksichtigung der generatorischen Umwandlungsverluste stehen demnach 25 % (P1) und 31 % (P2) der Gesamtenergie als elektrisch nutzbare Energie im Bordnetz zur Verfügung.

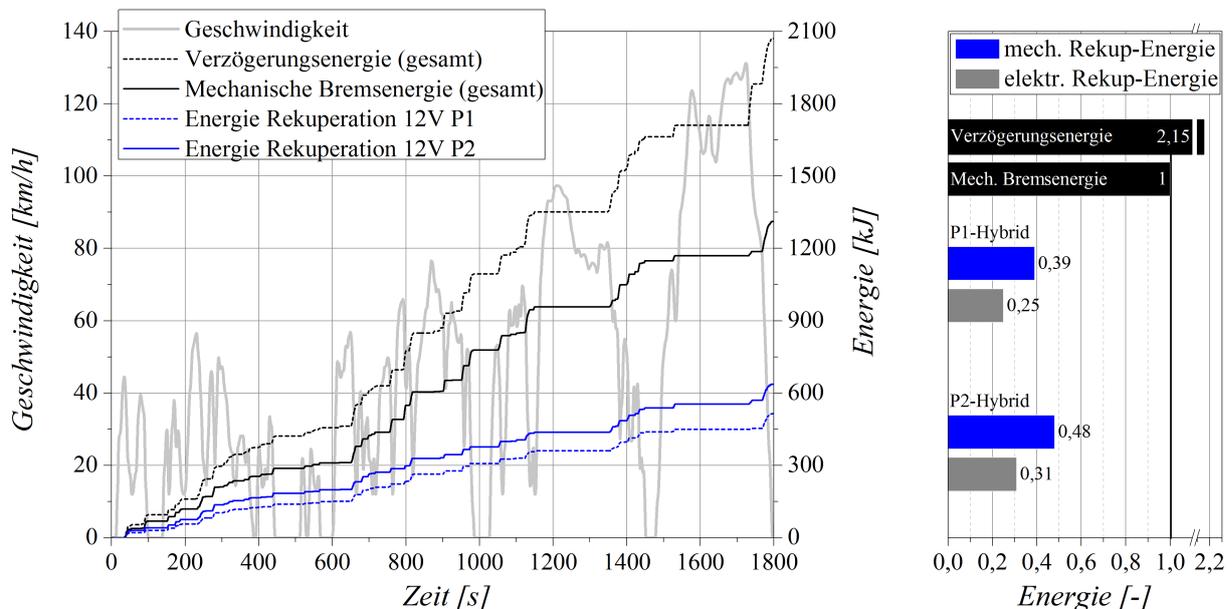


Abbildung 4.5: Vergleich der mechanischen und elektrischen Rekuperationsenergie im WLTP für den 12 Volt P1- und P2-Hybrid in Relation zur gesamten Bremsenergie

Obwohl durch die P2-Anordnung des RSG im Antriebsstrang die Rekuperationsenergie gesteigert werden kann, bleibt je nach Fahrprofil und Hybridarchitektur ein Großteil der ki-

netischen Energie ungenutzt und muss über die konventionellen Reibbremsen irreversibel umgewandelt werden. Ein signifikanter Anteil der theoretischen Verzögerungsenergie wird allein über die Fahrwiderstände sowie über die Reibungsverluste im Abtrieb (Radlager, Seitenwellen, Bremsen) abgebaut. Zusätzlich wird bei Verzögerungsanforderungen von über $-0,85 \text{ m/s}^2$ die maximale mechanische Generatorleistung von ca. -5 kW (Kap. 3.1.2.2) des 12 Volt Riemen-Starter-Generators erreicht. Das Rekuperationspotenzial für Verzögerungen von bis zu $-1,39 \text{ m/s}^2$ und $-1,50 \text{ m/s}^2$ im NEFZ und WLTP Fahrprofil kann demnach nicht vollständig ausgeschöpft werden. Weiterhin kann zwar durch die innovative Anbindung des 12 Volt RSG an die Getriebeeingangswelle ein zusätzlicher Anteil an Rekuperationsenergie durch den Wegfall des VKM Schleppmoments generiert werden, dennoch wirken sich die Rückschaltungen des automatisierten Schaltgetriebes mit entsprechend langen Zugkraftunterbrechungen, in denen der Energiefluss unterbrochen wird, nachteilig auf die Rekuperationsenergie aus. Unter Berücksichtigung, dass keine Energiegewinnung unterhalb einer Generator Drehzahl von 2000 1/min möglich ist, kann demzufolge keine Rekuperation bis zum vollständigen Fahrzeugstillstand erfolgen.

4.1.2.3 Segeln

Durch die Implementierung einer Segelfunktion in die Hybridstrategie können vor allem Vorteile für Betriebsphasen generiert werden, in denen nur leichte Verzögerungsraten vom Fahrer angefordert werden. Durch die Abkopplung des VKM Schleppmoments kann die kinetische Fahrzeugenergie zum verbrauchseffizienten Ausrollen genutzt werden. Grundsätzlich kann der Segelbetrieb auch in der P1-Konfiguration implementiert werden. Sollte dann allerdings die durch den Fahrer initiierte Wunschverzögerung zu der aus den Fahrwiderständen resultierenden Verzögerung geringfügig abweichen, muss die VKM wieder eingekuppelt werden. Ein komfortable Abstimmung des Weg- und Zuschaltens der VKM ist in diesem Fall von besonderem Interesse, um die Akzeptanz dieser Segelfunktion gewährleisten zu können. Durch die Implementation des Riemen-Starter-Generators an der Getriebeeingangswelle können etwaige Abweichungen in bestimmten Grenzen durch die Nutzung des Motor- bzw. Generatorbetriebs kompensiert werden.

Die Verbrauchseinsparung durch den Segelbetrieb im NEFZ und WLTP sind durch die vordefinierten Geschwindigkeitsgrenzen eher gering. Dennoch ergibt sich im realen Fahrbetrieb durch den vorausschauenden Betrieb des Fahrers ein wesentlich höheres Verbrauchspotenzial, wenn der Segelbetrieb z.B. gezielt für Ausrollphasen beim Einfahren in eine Ortschaft genutzt wird. Abb. 4.6 stellt dafür exemplarisch den kumulierten Kraftstoffverbrauch für eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 50 km/h in Relation zur zurückgelegten Strecke dar. Verglichen werden dabei drei unterschiedliche Betriebsstrategien und deren Einfluss auf den jeweiligen Verbrauch für die entsprechende Fahrsituation. Insgesamt indiziert die Segelfunktion, bei der die Kupplung geöffnet wird und die VKM im Leerlaufbetrieb ver-

bleibt, den niedrigsten Verbrauch. Die Nachstellung der identischen Wegstrecke im VKM Schubbetrieb (Kupplung geschlossen) führt zu einer Verdoppelung des Kraftstoffverbrauchs. Entspricht der Konstantfahranteil mit 100 km/h der halben Wegstrecke (Abb. 4.6) muss eine aktive Bremsung eingeleitet werden und der Verbrauch erhöht sich um das Vierfache. Wird in diesem Betrieb die gesamte Bremsenergie jedoch zur Rekuperation aufgewendet, kann rückwirkend über den Wirkungsgrad des Getriebes sowie der VKM ein CNG Äquivalent von ca. 4,5-5,0 mg ermittelt werden. Der potenzielle zeitliche Mehraufwand zwischen dem Segelbetrieb und der aktiven Bremsung beträgt dabei 7 Sekunden (100-50 km/h: Segeln - 42 Sekunden, Bremsen: 35 Sekunden).

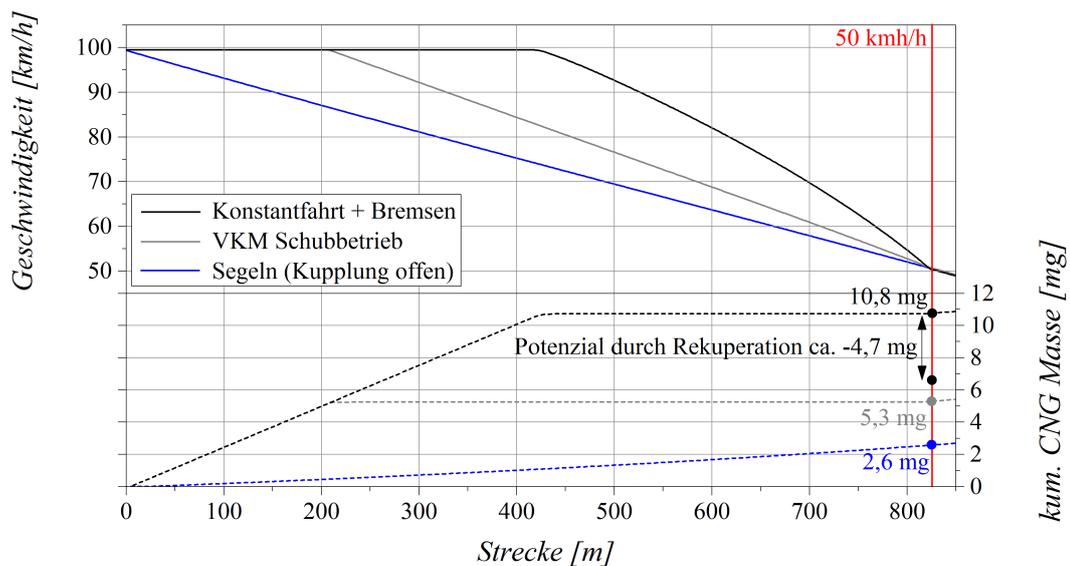


Abbildung 4.6: Darstellung des kumulierten Kraftstoffverbrauchs bei einer Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 50 km/h im Segelbetrieb bei geöffneter Kupplung und VKM im Leerlaufbetrieb im Vergleich zum VKM Schubbetrieb sowie aktiver Verzögerung über die Reibbremsen

Um eine nachhaltige Betriebsstrategie zu realisieren und um die Verbrauchseffizienz im Segelbetrieb weiter zu maximieren, sollte der Verbrennungsmotor in diesem Fahrmodus deaktiviert werden. Auf Grund eines konstanten Leerlaufverbrauchs von ca. 0,23 kg/h steigt das Potenzial durch Deaktivierung der VKM hin zu niedrigen Geschwindigkeiten signifikant an.

4.1.2.4 Elektrisch Fahren

Mit den Betriebsarten Start Stopp und Rekuperation sind die Hauptfunktionen der sogenannten Micro-Hybride in Serienfahrzeugen mit 12 Volt Riemen-Starter-Generatoren bereits abgedeckt. Durch die hohe Ausgangsmasse sind die hybriden Freiheitsgrade deutlich eingeschränkt und der RSG fungiert vorrangig als erweiterte Lichtmaschine mit der Möglichkeit zur individuellen Ansteuerung bzw. Regelung. Im Gegensatz dazu ermöglicht das geringe Fahrzeuggewicht des zu Grunde liegenden Ultraleichtkonzepts eine Erweiterung der hybriden Funktionen durch einen rein elektrischen Fahrbetrieb für niedrige Geschwindigkeiten, so-

nanntes elektrisches Kriechen, wodurch trotz einem Spannungsniveau von lediglich 12 Volt bereits eine Einstufung in die Klasse der Mild-Hybride erfolgen kann.

Abb. 4.7 stellt zur Veranschaulichung dieser elektrischen Fahrfunktion das Antriebspotenzial des 12 Volt Riemen-Starter-Generators im Zusammenhang mit den Fahrwiderständen des CULT Fahrzeugs dar. Der Schnittpunkt der Fahrwiderstandslinie mit der Hüllkurve der Zugkraftlinien des RSG repräsentiert die maximale Fahrgeschwindigkeit von ca. 37 km/h, welche der RSG trotz einer Spannungsversorgung von lediglich 12 Volt, aufrechterhalten kann. Anzumerken ist, dass dabei der stationäre Betriebspunkt betrachtet wird, eine akzeptable Beschleunigung aus dem Stillstand bis zu dieser Geschwindigkeit ist nicht möglich. In Kap. 4.1.3 wird unter dem Komfortaspekt das Beschleunigungsvermögen des RSG separat betrachtet. Im Vergleich zu Serienfahrzeugen aus dem A- und B-Segment ist das theoretische elektrische Antriebspotenzial entsprechend Abb. 4.7 um bis zu 14 km/h höher.

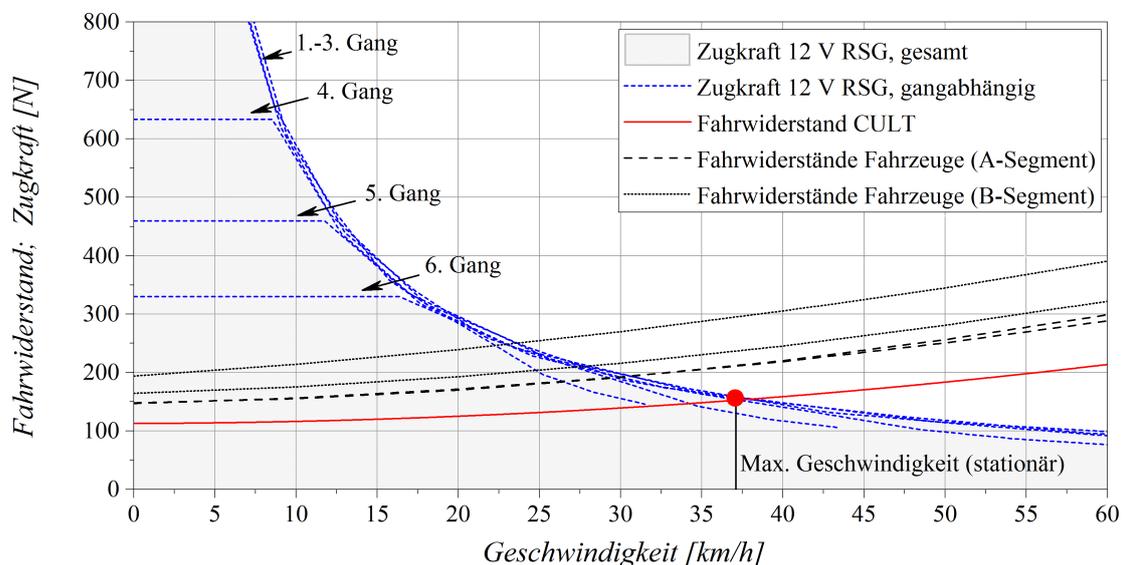


Abbildung 4.7: Zugkraft des 12 Volt RSG in Abhängigkeit des gewählten Gangs; Fahrwiderstand in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit für das CULT Fahrzeug sowie für weitere Fahrzeuge aus dem A- und B-Segment

Um eine potenzielle Verbrauchsreduktion dieser elektrischen Fahrfunktion quantifizieren zu können, wurde dieser Betriebsmodus in die hybride Betriebsstrategie integriert und im NEFZ und WLTP Fahrprofil bewertet. Basierend auf der in Kap. 3.1.3.5 vorgestellten Bilanzierung des Grenzwirkungsgrads, bis zu dem eine Substitution des verbrennungsmotorischen Betriebs durch den RSG sinnvoll ist, lässt sich feststellen, dass über die Zykluszeit eine maximale Effizienz des elektrischen Pfads von ca. 14,2 - 15,1 % erreicht wird. Diese genügt, um im NEFZ lediglich die kurzen Konstantfahranteile mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h zu ersetzen, für höhere Geschwindigkeiten repräsentiert die VKM den effizienteren Antrieb und wird von der Betriebsstrategie als Hauptantrieb favorisiert. Im WLTP beschränkt sich der Einsatz des 12 Volt RSG auf Grund des dynamischeren Geschwindigkeitsverlaufs auf leichte Verzögerungsphasen in denen der RSG mit einem geringen positiven Antriebsmoment unterstützt,

um die aus den Fahrwiderständen resultierende Geschwindigkeitsabnahme abzuschwächen. Für die 12 Volt Hybridisierung werden die Beschleunigungsphasen grundsätzlich über den Verbrennungsmotor dargestellt. Erst wenn die Übergangskriterien erfüllt sind (z.B. Grenzwirkungsgrad, SOC, Wunschmoment), leitet die Hybridsteuerung den elektrischen Betrieb ein, wobei die VKM ausgekuppelt und abgeschaltet wird. Ab diesem Moment fungiert der RSG als Hauptantrieb bis sich die Umgebungsbedingungen ändern und ein erneuter Zustandswechsel z.B. Bremsen bzw. Rekuperation oder der VKM Betrieb eingeleitet wird. Für den letzteren Fall gestaltet sich vor allem bei deaktivierter VKM deren Wiederstart (Change-of-Mind) als nicht trivial und wird gesondert in Kap. 4.1.3 betrachtet.

4.1.2.5 Lastpunktanhebung

Der in Kap. 3.1.3.1 vorgestellte Ansatz zur intelligenten Nachladung der AGM Batterie mittels Lastpunktanhebung erlangt mit steigenden elektrischen Fahranteilen einen bedeutsamen Stellenwert, um den ausgeglichenen Batterieladezustand wieder nachhaltig und im Idealfall mit einer positiven Gesamtbilanz für den Kraftstoffverbrauch herzustellen. Als Grundlage für die Betriebsstrategie dient das entsprechend Kap. 3.1.3.1 (Abb. 3.13) vorgestellte Wirkungsgradkennfeld, welches die Verluste bei der Energiegewinnung, je nach LPA-Moment bewertet. Je häufiger das Generatormoment dem Idealverlauf folgt, desto optimaler die Bedingungen unter welcher die elektrische Energie erzeugt wird. Da die zeitlichen Fahranteile des RSG in den betrachteten Fahrzyklen relativ gering sind, kann ein überwiegender Anteil des elektrischen Energieverbrauchs bereits über die Rekuperation kompensiert werden. Demnach sinkt die Bedeutung einer intelligenten Generatorregelung für diese Fahrprofile. Detaillierte Ausführungen zur zeitlichen Aufteilung der einzelnen Betriebszustände kann Kap. 4.1.2.6 entnommen werden. Im realen Betrieb mit steigenden rein elektrischen Fahranteilen, z.B. im Stop-and-Go Verkehr, steigt die Notwendigkeit zur effizienten Energierückgewinnung deutlich an und rechtfertigt die Implementation der in Kap. 3.1.3.1 vorgestellten Methodik.

4.1.2.6 Zusammenfassung

Durch die Integration eines 12 Volt Riemen-Starter-Generators in den Antriebsstrang des zu Grunde liegenden Ultraleichtfahrzeugs kann die Gesamteffizienz gegenüber einer konventionellen Antriebsstruktur angehoben werden. Abb. 4.8 und Abb. 4.9 zeigen die zeitliche Aufteilung der einzelnen Betriebszustände für das NEFZ und WLTP Fahrprofil für die in Tab. 4.1 angeführten 12 Volt Konfigurationen. Gemäß den Stillstandszeiten im Zyklus sind die Anteile, in denen die VKM im Start Stopp (SS) Modus ist, ca. gleich groß. Der Verbrennungsmotor (VKM) übernimmt den Vortrieb für die Beschleunigungen und Konstantfahranteile. Die Verzögerungen werden je nach Antriebskonfiguration über die mechanischen

Bremsen (BR) oder die Rekuperation (REK) beschrieben, wobei Letzteres auch den parallelen Betrieb von Bremse und Generator beinhaltet. Obwohl die Rekuperationsphasen zeitlich betrachtet in den P1- und P2-Modifikationsstufen ähnlich sind, unterscheiden sich die Topologien entsprechend der Analyse in Kap. 4.1.2.2 jedoch in der Quantität der letztendlich regenerativ gewonnenen Energie. Wie bereits hervorgehoben, muss die Kupplung in der P1-Struktur in den Verzögerungsphasen geschlossen bleiben, wodurch das Rekuperationsmoment ergänzend zum Schleppmoment wirkt. Die Anteile, in denen die VKM durch die zuvor beschriebene intelligente Generatorregelung (LPA) aufgelastet wird, um einen ausgeglichenen Batterieladezustand herzustellen, sind durch die geringen elektrischen Fahranteile sowohl im NEFZ als auch im WLTP eher gering. Der Bordnetzverbrauch wird vorrangig über die Rekuperationsenergie gedeckt. Demnach ist die VKM der dominierende Antrieb für die etwaigen Beschleunigungen und Konstantfahranteile in den betrachteten Zyklen.

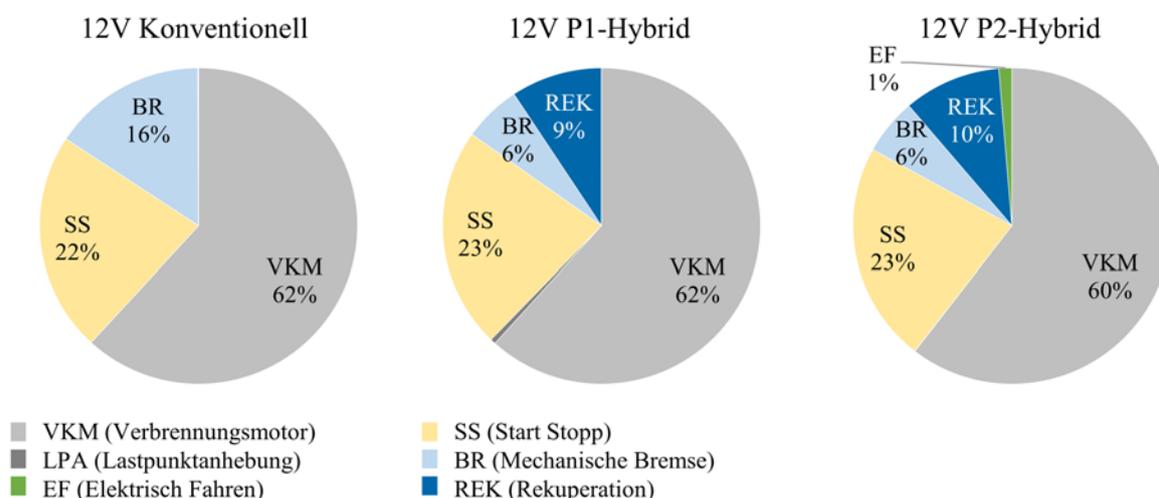


Abbildung 4.8: Zeitliche Aufteilung der jeweiligen Betriebszustände im NEFZ für die untersuchten 12 Volt Hybridtopologien

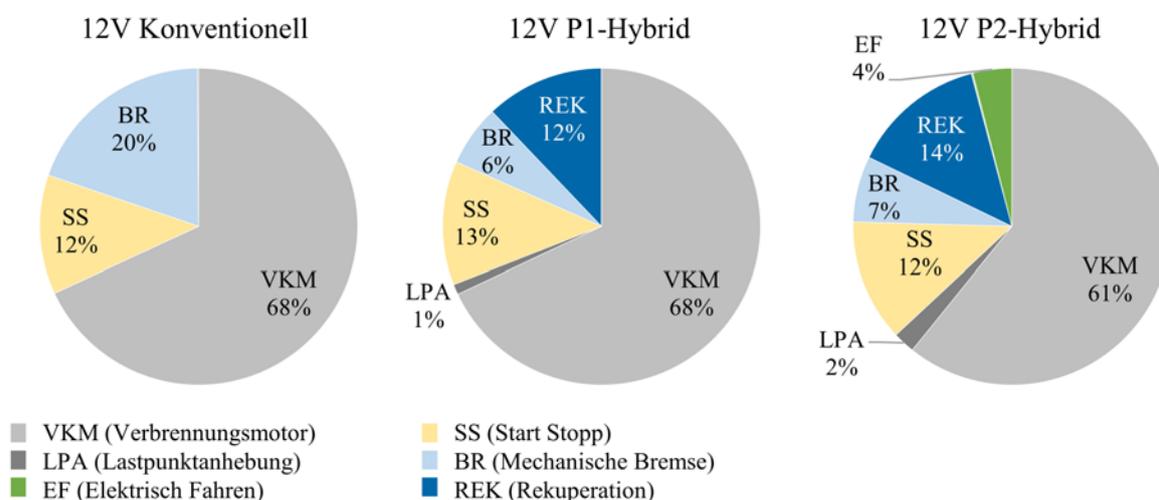


Abbildung 4.9: Zeitliche Aufteilung der jeweiligen Betriebszustände im WLTP für die untersuchten 12 Volt Hybridtopologien

Abschließend lassen sich die Verbrauchsreduktionen durch die verschiedenen 12 Volt Hybridmodifikationsstufen der Tab. 4.2 entnehmen. Ausgehend vom Basisverbrauch für den NEFZ von 2,89 kg/100km und 2,91 kg/100km (Kap. 4.1.2.1) konnte der Verbrauch durch den Start Stopp Betrieb um ca. -5,5 % (NEFZ) und -3,1 % (WLTP) gesenkt werden. Durch die Micro-Hybridisierung, d.h. die Integration des RSG in den Riementrieb des Verbrennungsmotors (P1-Hybrid), lässt sich durch ein intelligentes Generatormanagement inklusive Rekuperation der Verbrauch um weitere -3,5 % (NEFZ) und -2,1 % (WLTP) absenken. Durch die Abkoppelung der VKM in den Verzögerungsphasen beim P2-Hybrid konnte das regenerative Bremsen intensiviert werden, wodurch der Rekuperationsbetrieb in dieser Konfiguration insgesamt -7,6 % (NEFZ) und -6,9 % (WLTP) Kraftstoff einspart. Da somit bereits ein überwiegender Anteil vom elektrischen Bordnetzverbrauch über die Rekuperationsenergie kompensiert werden kann, sinken die zeitlichen Anteile in der die VKM zusätzlich aufgelastet werden muss, um einen ausgeglichenen SOC herzustellen. Weiterhin ermöglicht die P2-Anordnung eine rein elektrische Kriechfunktion für niedrige stationäre Geschwindigkeiten. Das reale Verbrauchspotenzial durch diese Funktion ist jedoch auf Grund der Wirkungsgradbilanzierung und der begrenzten Systemleistung eingeschränkt. Letztendlich beschränkt sich die Verbrauchseinsparung auf -0,7 % (NEFZ) und -1,3 % (WLTP). Unter Ausschöpfung der zuvor beschriebenen Potenziale erreicht das ultraleichte 12 Volt Mild-Hybrid Fahrzeug in der P2-Topologie einen Gesamtverbrauch von 2,49 kg/100km im NEFZ und 2,58 kg/100km im WLTP Fahrzyklus, was einer Reduktion von -13,8 % bzw. -11,3 % gegenüber dem konventionellen Fahrzeug ohne Start Stopp entspricht.

Tabelle 4.2: Zusammenfassende Darstellung der Verbrauchsreduktion im NEFZ und WLTP durch die Integration eines 12 Volt Riemen-Starter-Generators in einer P1- und P2-Konfiguration

	Konventionell		P1-Hybrid		P2-Hybrid	
	Lichtmaschine + Ritzelstarter		Riemen-Starter-Generator am Verbrennungsmotor		Riemen-Starter-Generator an Getriebeeingangswelle	
	NEFZ	WLTP	NEFZ	WLTP	NEFZ	WLTP
Start Stopp	-5,2 %	-3,1 %	-5,5 %	-3,1 %	-5,5 %	-3,1 %
Rekuperation			-3,5 %	-2,1 %	-7,6 %	-6,9 %
Elektrisch Kriechen					-0,7 %	-1,3 %
Gesamt:	-5,2 %	-3,1 %	-9,0 %	-5,2 %	-13,8 %	-11,3 %

4.1.3 Komfortbewertung

Im Folgenden sollen die Besonderheiten hinsichtlich Fahrkomfort dargestellt werden, welche sich aus der speziellen Adaption des Riemen-Starter-Generators an die Getriebeeingangswelle ergeben. Trotz der Möglichkeit den Verbrennungsmotor im elektrischen Fahrbetrieb abzu-

koppeln, ist das Leistungspotenzial des RSG im Hinblick auf das Beschleunigungsvermögen sowie die maximale Geschwindigkeit eher gering. Zusätzlich zeigt die Verbrauchsanalyse, dass dieser Substitutionsbetrieb auf Grund des niedrigen elektrischen Gesamtwirkungsgrads nur eine geringe verbrauchsreduzierende Bedeutung erlangt. Im realen Fahrbetrieb lässt sich dieses Feature damit vorrangig auf Anwendungen überführen, aus denen ein Komfortgewinn für den Fahrer entsteht. Anzuführen wären hierbei exemplarisch Situationen mit niedrigen Geschwindigkeiten und häufigen VKM Startvorgängen. Gerade in diesen Betriebspunkten werden die dadurch ausgelösten Antriebsvibrationen deutlich vom Fahrer wahrgenommen, da die aerodynamisch und rollreibungsbedingte Akustik zur Überblendung dieser Störgrößen einen untergeordneten Stellenwert einnimmt. Gemäß Abb. 4.10 kann mit dem Antriebspotenzial des RSG das Ultraleichtfahrzeug eine Geschwindigkeit von ca. 15 km/h mit einer akzeptablen Beschleunigung erreichen. Dadurch erscheint dieser Betriebsmodus vor allem für Stop-and-Go Situationen, bzw. Einpark- oder Rangiervorgänge eine sinnvolle Funktion darzustellen.

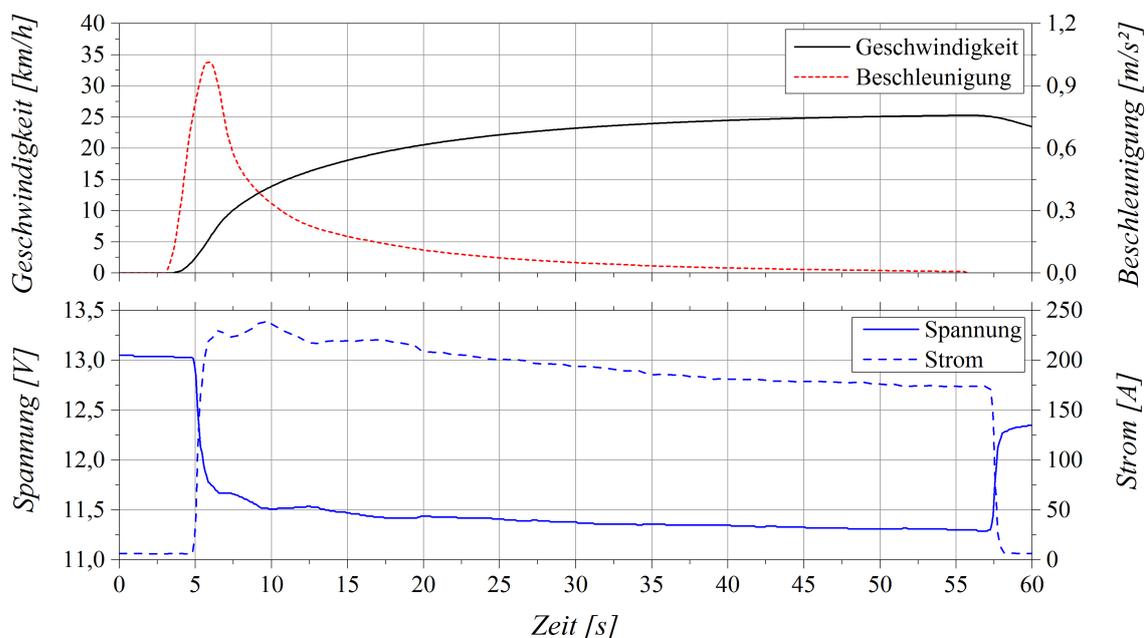


Abbildung 4.10: Darstellung der maximalen Beschleunigung und Geschwindigkeit für den rein elektrischen Anfahrvorgang mit dem 12 Volt RSG in der P2-Konfiguration und ausgekuppelter VKM; Darstellung der resultierenden Batteriespannung und -strom (Prüfstandsmessungen)

Als wesentliche Herausforderung der P2-Konfiguration stellt sich das Starten des Verbrennungsmotors bzw. der Wiederstart in Change-of-Mind Situation dar. Die Möglichkeit den Verbrennungsmotor komfortabel und schnell mittels RSG hochzuschleppen, wie dieses beim P1-Hybrid möglich ist, kann durch die Anbindung an der Getriebeeingangswelle ohne zusätzliche Implementation einer weiteren Trennkupplung nicht umgesetzt werden. Ein Start wäre demnach nur möglich, wenn im Getriebe die Neutral-Position eingelegt ist und die Kupplung geschlossen wird. So wird sichergestellt, dass der Kraftfluss zu den Antriebsrädern unterbunden ist und das Startmoment des RSG an die VKM übertragen werden kann.

Durch die langen Schaltzeiten des automatisierten Schaltgetriebes würde dies inakzeptable Verzögerungen verursachen. Eine Direktstartfunktion der VKM (Kap. 2.3.3.1) könnte durch die Erzielung schneller und komfortabler Starts bzw. Wiederstarts diesen Nachteil der P2-Anordnung umgehen. Dennoch gibt es Einschränkungen dieser Funktion vor allem in Anbetracht des eingesetzten 3-Zylinder Verbrennungsmotors mit entsprechend großen Zündabständen, welche eine Direktstartfunktion nur mit zusätzlichem Aufwand gestatten. Details zu dieser simulativ und experimentell untersuchten Funktion können bei Bedarf [18] entnommen werden. Grundsätzlich wird in allen Untersuchungen keine 100 prozentige Startersicherheit prognostiziert und auf die Notwendigkeit einer Notstartfunktion der VKM hingewiesen. Diese Rückfalllösung kann über die P2-Struktur sichergestellt werden, in dem der RSG bei Fehlverhalten des Direktstarts die VKM notstarten kann.

Abb. 4.11 veranschaulicht das theoretische Gesamtmoment für den Boost Betrieb. Dieser Betriebsmodus dient einzig der Komfortverbesserung, um bei einer Kick-Down Erkennung das Antriebsmoment steigern zu können und eine höhere Beschleunigung zu erzielen. Eine simulative Untersuchung mit dem unlimitierten Gesamtmoment von VKM und RSG ergab, dass die maximale Beschleunigung von 0-100 km/h um -7,6 % (von 18,4 auf 17,0 Sekunden) verbessert werden konnte. Grundsätzlich resultieren aus den langen Schaltzeiten (bis zu 1,8 Sekunden) des automatisierten Schaltgetriebes signifikante Nachteile auf das Beschleunigungsverhalten im Allgemeinen. Weiterhin wurde der Einfluss dieses Boostbetriebs auf das Durchzugsvermögen untersucht. Dabei konnten für die Elastizitätswerte von 60-100 km/h und 80-120 km/h Verbesserungen in der Größenordnung von -20,7 % und -13,5 % erzielt werden.

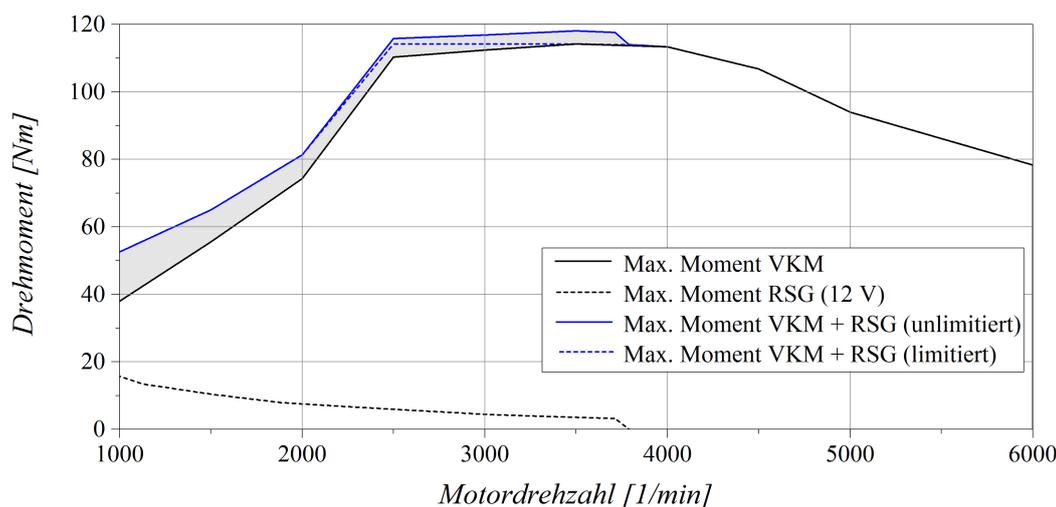


Abbildung 4.11: Maximale Momente von Verbrennungsmotor (stationär) sowie 12 Volt Riemen-Starter-Generator; Summiertes Gesamtmoment im Boost Modus

Durch die P1- bzw. P2-Struktur in Kombination mit dem automatisierten Schaltgetriebe ergibt sich ein signifikanter Komfortnachteil in Verzögerungsvorgängen. Wie bereits in Kap. 4.1.2.2 erwähnt, wird die Rekuperationsbilanz gemindert, da in den Rückschaltphasen

der Energiefluss durch die Synchronisation der Gänge unterbrochen ist und keine Verzögerungsenergie durch den Generator aufgenommen werden kann. Dabei entsteht die Problematik, dass bei gleichbleibender Bremspedalstellung in diesen Phasen kein Bremsmoment auf den Antriebsstrang wirkt, wodurch sich Änderungen in der Verzögerungsrate einstellen, welche als nachteilig empfunden werden können. Durch eine individuelle Ansteuerungsmöglichkeit der mechanischen Reibbremsen könnte in diesem Moment eine Überblendung stattfinden, wobei die konventionellen Bremsen im Rückschaltvorgang die gewünschte Verzögerung aufrechterhalten. Dieses System ist durch die notwendigen elektrischen Stellanrichtungen mit einem zusätzlichen Gewicht sowie finanziellen Aufwand verbunden und für die zu Grunde liegende Fahrzeugkategorie damit als ungeeignet einzustufen.

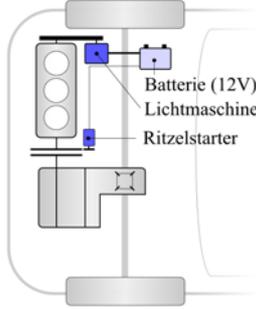
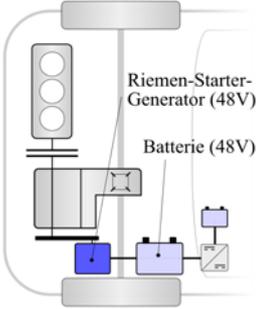
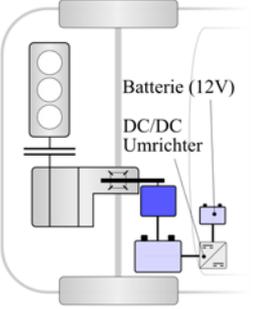
4.2 48 Volt Hybridkonzept

Die in Kap. 4.1 angeführten Untersuchungen für die Hybridmodifikationen im konventionellen 12 Volt Bordnetz vermitteln einen ersten Eindruck, welche Möglichkeiten durch die Integration eines Riemen-Starter-Generators in einem ultraleichten Fahrzeugverbund entstehen. Dennoch bleiben die objektiven Potenziale auf Grund der elektrischen Leistungslimitierung eingeschränkt. Die Anhebung der Bordnetzspannung auf ein Niveau von 48 Volt stellt zusätzliche Verbrauchseinsparung sowie Komfortverbesserungen in Aussicht, welche im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

4.2.1 Potenzielle Antriebstopologien

Als Basisantriebsstrang soll für die folgenden Untersuchungen wieder die konventionelle 12 Volt Konfiguration bestehend aus spannungsgeregelter Lichtmaschine und Ritzelstarter (Tab. 4.3, links) herangezogen werden. Basierend auf den 12 Volt Erkenntnissen wurde für die 48 Volt Hybridisierung keine P1-Struktur betrachtet. Entsprechend Tab. 4.3 stellen eine P2- (mittig) sowie eine P3-Struktur (rechts) die Grundarchitekturen der folgenden Untersuchungen dar. In der bekannten Anbindung des Riemen-Starter-Generators an die Getriebeingangswelle (Tab. 4.3, mittig) bleiben die hybriden Grundfunktionen durch die Elektromaschine identisch mit dem 12 Volt System. Durch die Anhebung des Leistungsniveaus des elektrischen Antriebs kann der Bereich für den elektrischen Fahrbetrieb hinsichtlich Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung jedoch signifikant erweitert werden. Zusätzlich ist ein rein elektrisches Anfahren mit dem 48 Volt RSG möglich. Damit entsprechen die Erweiterungen den Funktionsumfängen von Full-Hybrid Fahrzeugen.

Tabelle 4.3: Potenzielle 48 Volt Antriebsstrangkonfigurationen und deren Hybridisierungspotenzial

Konventionell	P2-Hybrid (48 Volt)	P3-Hybrid (48 Volt)
		
Lichtmaschine + Ritzelstarter	Riemen-Starter-Generator an Getriebeeingangswelle	Riemen-Starter-Generator am Differenzial (Achse)
Start Stopp	Start Stopp Rekuperation Boost	Start Stopp Rekuperation Boost
	Elektrisch Fahren / Anfahren	Elektrisch Fahren / Anfahren Momentenunterstützung im Schaltvorgang
Konventionell (12 Volt)	Full-Hybrid (48 Volt)	Full-Hybrid (48 Volt)

Ein vielversprechender Ansatz, vor allem im Hinblick auf den Fahrkomfort, stellt die Anbindung des RSG an den Getriebeausgang in Form einer P3-Strukturierung (Tab. 4.3, rechts) dar. Da das Differenzial bereits im automatisierten Getriebe integriert ist, ist der Riementrieb über eine entsprechende Übersetzung direkt mit den Antriebswellen verbunden. Die Hauptmotivation dieser konstruktiv aufwändigeren Struktur begründet sich auf der Ermöglichung einer Drehmomentunterstützung durch den RSG in den Schaltphasen, da somit die Zugkraftunterbrechung teilweise kompensiert werden kann, wodurch ein komfortableres Fahrgefühl generiert wird.

4.2.2 Verbrauchspotenziale

4.2.2.1 Basisvalidierung Antriebsstrang

Durch die Integration des Zweispannungssystems in das ultraleichte Fahrzeug ergibt sich entsprechend Kap. 3.1.2.1, Tab. 3.1 eine Gewichtserhöhung um 10,4 kg gegenüber der 12 Volt RSG Konfiguration. Der dadurch indizierte Anstieg des Gesamtverbrauchs des Basisantriebsstrangs erhöht sich gemäß Simulationen für das NEFZ und WLTP Fahrprofil damit um 0,4 % bzw. 0,7 %. Durch die Implementierung des höheren Spannungssystems wird gleichzeitig die Effizienz der Energiegewinnung gesteigert, so dass aus diesem Bereich mini-

male Verbrauchsvorteile resultieren. In Summe stellt sich somit ein absoluter Verbrauch von 2,89 kg/100km (NEFZ) und 2,92 kg/100km (WLTP) bei ausgeglichenem Batterieladezustand ein. Da keine zusätzlichen elektrischen Nebenaggregate integriert wurden, beträgt die Bordnetzleistung in beiden Fahrzyklen weiterhin 130 W. Die geringe Verbrauchsdifferenz ist mittels Prüfstandsmessungen nicht auflösbar, so dass basierend auf der Basisvalidierung für das 12 Volt System (Kap. 4.1.2.1) das übereinstimmende Verhalten des Simulationsmodells mit dem des realen Antriebsstrangs ebenfalls vorausgesetzt werden kann.

4.2.2.2 Rekuperation

Grundsätzlich wird in den Verzögerungsphasen der Segelbetrieb aktiviert und entsprechend dem 12 Volt Konzept der Verbrennungsmotor abgekoppelt und ausgeschaltet. Diese Strategie wird auch für den 48 Volt Hybridantrieb, sowohl in der P2- als auch in der P3-Konfiguration angewendet. Abb. 4.12 stellt die kumulierte Verzögerungsenergie im NEFZ dar und führt zum Vergleich der Spannungslagen noch einmal die rekuperierte Energie des 12 Volt P2-Konzepts an. Durch das höhere Leistungsniveau des 48 Volt RSG kann der Anteil der mechanisch regenerativ genutzten Energie in der P2-Anordnung auf 376 kJ erhöht werden, was einem Anteil von 64 % an der Gesamtbremsenergie entspricht. Durch die Umwandlungsverluste können letztendlich 294 kJ (50 %) zurück in die 48 Volt Batterie gespeist werden. Dennoch kann auf Grund der zugkraftbedingten Unterbrechung der Rekuperation im Schaltvorgang ein gewisser Anteil an Bremsenergie nicht genutzt werden und muss über die Reibbremsen irreversibel umgewandelt werden. Im Gegensatz dazu kann durch die P3-Anordnung die Rekuperationsregelung unabhängig von den Schaltphasen erfolgen. Dadurch erhöht sich der Anteil der mechanischen Rekuperationsenergie an der Gesamtbremsenergie auf 77 % (451 kJ). Damit kann die regenerativ nutzbare Energie im Vergleich zum 12 Volt P2-System mit 323 kJ um ca. 40 % erhöht werden. Final werden 351 kJ (60 %) elektrische Energie zurück in die Batterie gespeist und stehen zur Kompensation des Bordnetzverbrauchs bzw. für eine elektrische Antriebsunterstützung zur Verfügung.

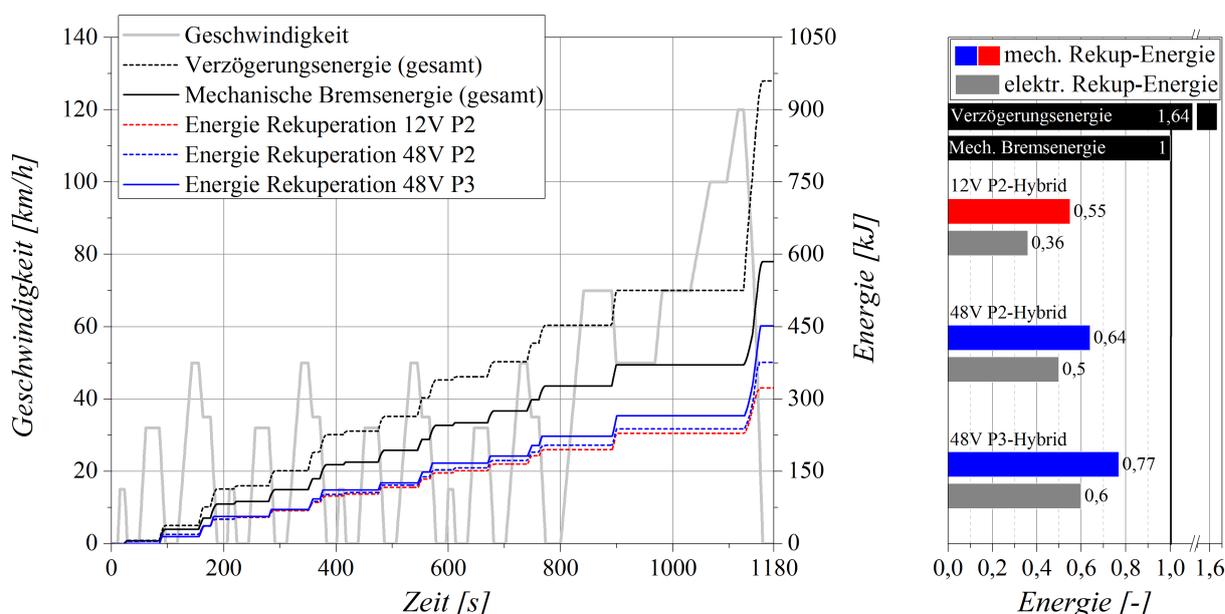


Abbildung 4.12: Vergleich der mechanischen und elektrischen Energie aus der Rekuperation für den 48 Volt P2- und P3-Hybrid in Relation zur gesamten Bremsenergie im NEFZ sowie der Rekuperationsenergie des 12 Volt P2-Hybrid

Ähnliche Relationen stellen sich auch bei Betrachtung der Rekuperationsenergien im WLTP Fahrprofil ein (Abb. 4.13). Im direkten Vergleich zum 12 Volt P2-Antriebsstrang erreicht der 48 Volt RSG in der P2-Anordnung eine mechanische Gesamtenergie durch die Rekuperationsphasen von 808 kJ, was einem Anteil von 62 % an der theoretischen Gesamtbremsenergie entspricht. Begründet durch die Umwandlungsverluste des Generators können davon 618 kJ (47 %) elektrisch genutzt werden. Durch die Entkopplung der Rekuperationsphasen von den Schaltvorgängen kann die mechanische Rekuperationsenergie in der P3-Anordnung auf 1055 kJ (80 %) gesteigert werden. Elektrisch bleiben davon 797 kJ (61 %) erhalten.

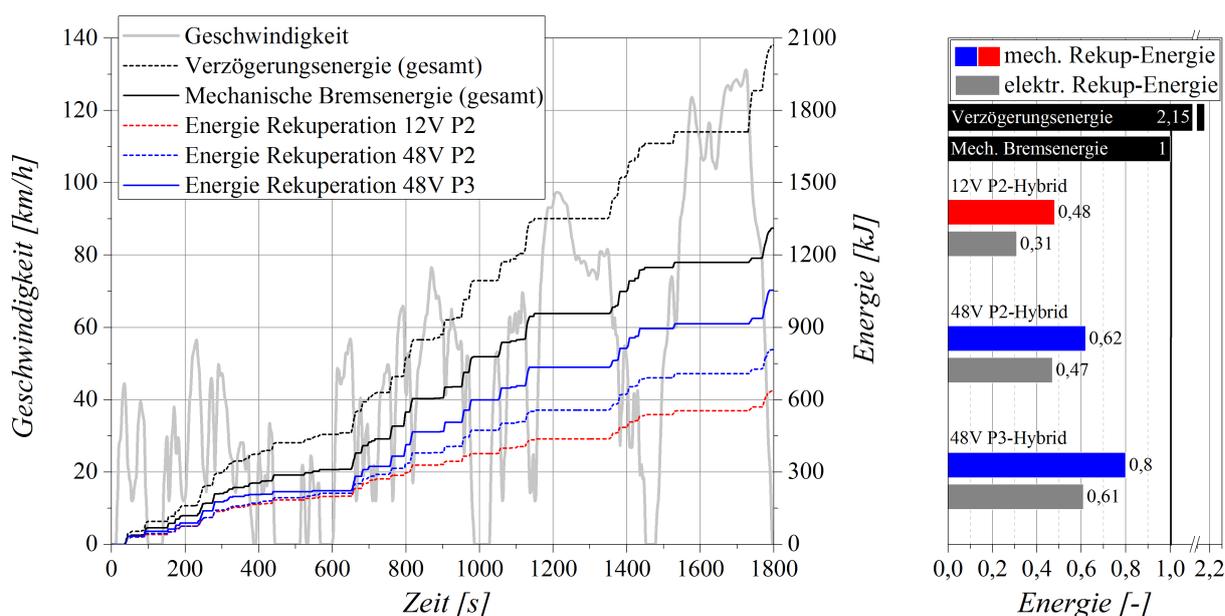


Abbildung 4.13: Vergleich der mechanischen und elektrischen Energie aus der Rekuperation für den 48 Volt P2- und P3-Hybrid in Relation zur gesamten Bremsenergie im WLTP sowie der Rekuperationsenergie des 12 Volt P2-Hybrid

Durch die konstante Übersetzung des RSG zur Abtriebswelle in der P3-Konfiguration wird entsprechend Abb. 4.14 (NEFZ) und Abb. 4.15 (WLTP) ein größerer Drehzahlbereich des Generators genutzt. Im Gegensatz dazu kann die RSG Drehzahl bei der P2-Anordnung durch die Abhängigkeit vom aktuell gewählten Gang in einem definierten Bereich gehalten werden und darüber hinaus über eine potenzielle Optimierung der Schaltpunkte gesteuert werden. Für die gewählten Fahrprofile bleibt der Einfluss der Antriebstopologie auf die mittlere Effizienz der Energiewandlung für die Rekuperationsvorgänge dennoch vernachlässigbar. Demnach stellt sich im NEFZ ein durchschnittlicher Wirkungsgrad für den P2- bzw. P3-Hybrid von 78 % und im WLTP von 76 % ein. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere Effizienz für das 12 Volt P1-System 71 % (NEFZ) und 65 % (WLTP).

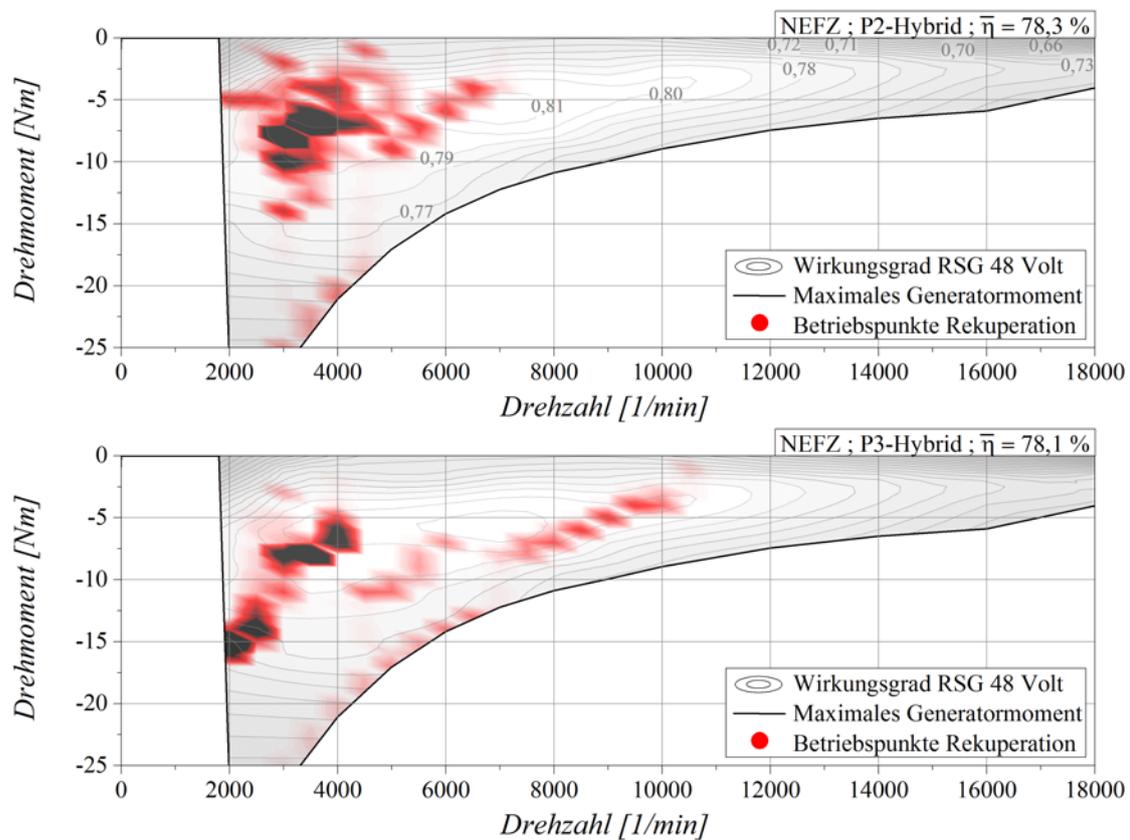


Abbildung 4.14: Darstellung der generatorischen Betriebspunkte für die Rekuperationsphasen im NEFZ für die P2- (oben) und P3-Hybridstruktur (unten)

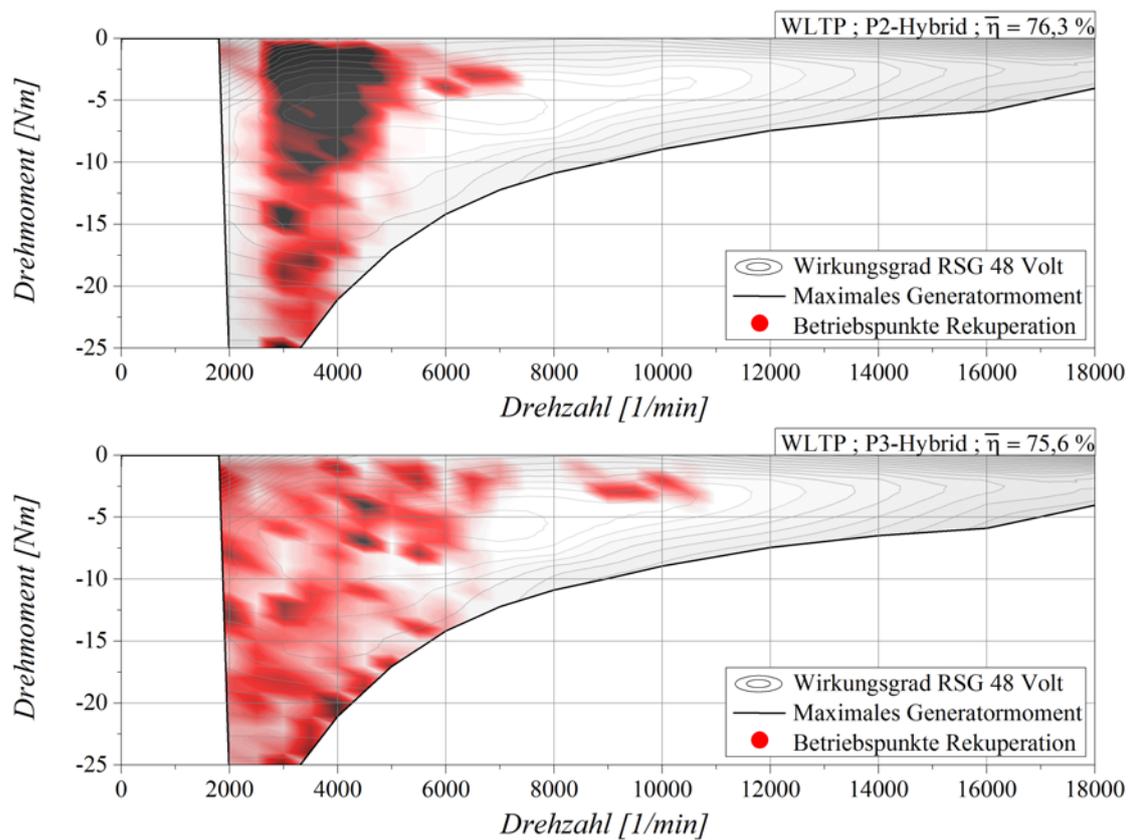


Abbildung 4.15: Darstellung der generatorischen Betriebspunkte für die Rekuperationsphasen im WLTP für die P2- (oben) und P3-Hybridstruktur (unten)

In Summe sind die unmittelbaren Verbrauchseinsparungen durch Rekuperation für die P2- und P3-Struktur mit bis zu -5,9 % Kraftstoff im NEFZ und -6,2 % im WLTP identisch und auf dem Niveau der 12 Volt P2-Struktur. Zusätzlich wird bei dem betrachteten Bordnetzverbrauch von 130 W mehr Energie über regenerative Bremsvorgänge gewonnen, als zum Ausgleich des Batterieladezustands notwendig ist. Dadurch ergibt sich eine positive Ladebilanz, d.h. der SOC weist nach Beendigung des Fahrzyklus ein höheres Niveau auf als zu Beginn. Dieses Energieplus variiert entsprechend dem Spannungsniveau und der Antriebsarchitektur. In Summe ergibt sich, bei einem ausgeglichenen Ladezustand in der 12 Volt Batterie, ein SOC-Plus für die P2-Hybridisierung von 5,1 % (NEFZ) und 17,0 % (WLTP) sowie 7,8 % (NEFZ) und 24,4 % (WLTP) für die P3-Struktur. Diese Werte beziehen sich auf einen Anfangsladezustand in der Batterie von 70 % bei einer nominellen Kapazität des 48 Volt Energiespeichers von 0,5 kWh. Da somit kein Ausgleich des Ladezustands durch Lastpunktanhebung der VKM notwendig wird, ergeben sich in erster Instanz keine zusätzlichen Verbrauchsvorteile durch die Anhebung des Spannungsniveaus auf 48 Volt. Eine nachhaltige Verknüpfung dieses Energieplus mit dem Antriebs- bzw. Substitutionspotenzial des Riemen-Starter-Generators als Antriebsmotor führt zu einer weiteren Verbrauchsreduktion (Kap. 4.2.2.4).

4.2.2.3 Segeln

Der Segelbetrieb ist unabhängig von der Systemleistung des elektrischen Antriebs. Damit ergeben sich die gleichen Verbrauchsvorteile durch die Abkopplung sowie Deaktivierung der VKM, wie diese bereits in der 12 Volt Konfiguration beschrieben wurden (Kap. 4.1.2.3). Dennoch kann durch das höhere Leistungspotenzial des 48 Volt Riemen-Starter-Generators bei Bedarf eine Änderung der Beschleunigung, welche nicht der Verzögerungsrate resultierend aus dem Segelvorgang bei geöffneter Kupplung entspricht, vorgenommen werden. Durch die Bereitstellung eines Antriebs- bzw. Rekuperationsmoments durch den RSG im Ausrollvorgang kann so auf potenzielle Fahrerwünschänderungen reagiert werden, ohne den Verbrennungsmotor erneut starten zu müssen bzw. die Reibbremsen zu aktivieren.

Abb. 4.16 stellt dahingehend die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsänderung respektive Verzögerungsrate mit elektrischer Antriebsunterstützung bzw. durch Aufbringung des maximalen generatorischen Moments durch den 12 Volt bzw. 48 Volt Riemen-Starter-Generator im Vergleich zum konventionellen Segelmodus und abgekoppelter VKM gegenüber. Nach der Beschleunigungsphase geht der Antrieb ab 140 km/h in den Ausrollmodus über, und wird je nach Konfiguration mit dem maximalen bzw. minimalen RSG Moment beaufschlagt.

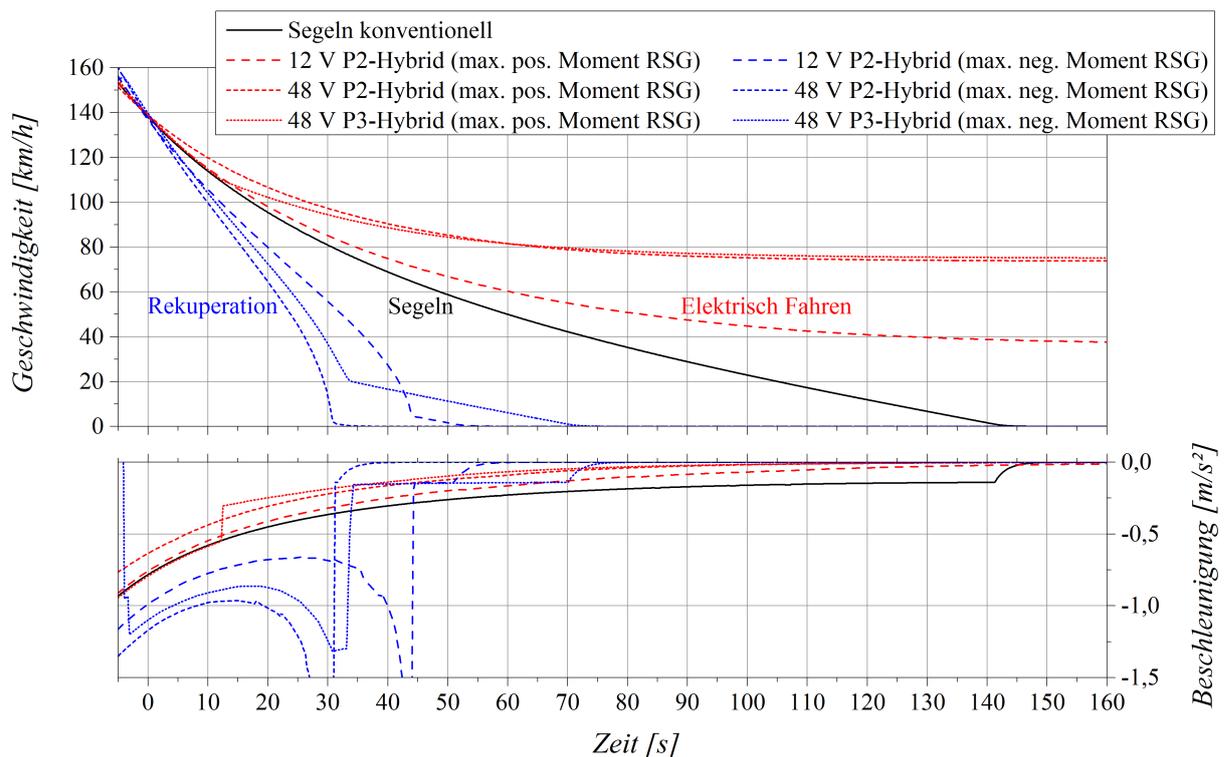


Abbildung 4.16: Betriebsbereichserweiterung im Ausrollvorgang durch den Riemen-Starter-Generator (12 Volt und 48 Volt Betrieb) im Vergleich zum Segelbetrieb (Kupplung geöffnet)

Durch die zusätzliche Einleitung eines positiven RSG Moments kann die Verzögerungsrate im Ausrollbetrieb vor allem im 48 Volt Bordnetz deutlich gesenkt werden. Entsprechend der Analyse in Kap. 4.1.2.4 kann im 12 Volt Betrieb eine stationäre Geschwindigkeit von ca.

37 km/h dargestellt werden. Die 48 Volt Antriebsstrukturen erreichen, unter Berücksichtigung der exponentiell steigenden aerodynamischen Verluste, die doppelte Geschwindigkeit. Für das ultraleichte Konzept stellt sich somit ab ca. 75 km/h kein Geschwindigkeitsverlust mehr ein und der stationäre Fahrbetrieb kann ausschließlich über den 48 Volt RSG erfolgen. Anzumerken ist, dass diese Betrachtung eine rein theoretische Leistungsanalyse des jeweiligen RSG Systems darstellt, wobei eine energetisch nachhaltige Bewertung der Effizienzen der einzelnen Antriebskomponenten nach Kap. 3.1.3.5 nicht berücksichtigt wird. Die Verzögerungsrate steigt signifikant an, wenn das maximale Generatormoment auf den Antriebsstrang im Ausrollvorgang wirkt. Die größte Verzögerung stellt sich dabei in der 48 Volt P2-Konfiguration ein. Der Bereich zwischen dem elektrischen Fahrbetrieb und der Rekuperation (Abb. 4.16) kann ausschließlich über den RSG dargestellt werden. D.h. etwaige Fahrerwünschänderungen, welche nicht dem konventionellen Ausrollverhalten im Segelbetrieb entsprechen, können in den dargestellten Grenzen über den RSG kompensiert werden, ohne dass es dabei zu erneuten VKM Startvorgängen kommen muss. Diese Betriebsbereichserweiterung stellt sich insbesondere für niedrigere Fahrzeuggeschwindigkeiten, in denen das Fahrgeräuschniveau noch gering ist, als vorteilhaft dar, da so unkomfortable Motorstartvibrationen vermieden werden können.

4.2.2.4 Elektrisch Fahren

Ein deutlicher Mehrwert durch die 48 Volt Hybridisierung des ultraleichten Fahrzeugs kann vor allem im Hinblick auf den rein elektrischen Fahrbetrieb erreicht werden. Bei Betrachtung des Fahrgesamtwiderstands F_{ges} entsprechend Gl. 4.1 und Gl. 4.2 lässt sich der Einfluss des Fahrzeuggewichts m deutlich erkennen. Demnach fließt die Fahrzeugmasse in die Berechnung des Rollwiderstands F_{Roll} , des Steigungswiderstands F_{Steig} sowie des Beschleunigungswiderstands F_{Beschl} ein.

$$F_{ges} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steig} + F_{Beschl} \quad (4.1)$$

$$F_{ges} = (m \cdot g \cdot f) + (c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v^2) + (m \cdot g \cdot \sin \alpha) + (\lambda \cdot m \cdot a) \quad (4.2)$$

$$P = F_{ges} \cdot r_{dyn} \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n_{Achse} \quad (4.3)$$

In Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit lässt sich aus dem Gesamtwiderstand (Gl. 4.2) der Leistungsbedarf P (Gl. 4.3) unter Berücksichtigung des dynamischen Reifendurchmessers r_{dyn} und der Achsdrehzahl n_{Achse} für den jeweiligen Betriebspunkt ermitteln. Abb. 4.17 stellt den zusätzlichen Leistungsbedarf dar, welcher im Vergleich zur 12 Volt P2-Hybridisierung (Kap. 4.1) notwendig wird, um für eine Bezugsmasse von 782,9 kg (48 Volt Hybrid), 1100 kg, 1600 kg und 2100 kg gleichwertige Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte zu erzielen.

Der Einfluss des Steigungswiderstands bleibt dabei unberücksichtigt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Leistungsbedarf selbst für hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für die in diesem Abschnitt untersuchte 48 Volt Variante nur unwesentlich steigt (kleiner 800 W). Eine Erhöhung des Bezugsgewichts auf 1100 kg, welches laut den Recherchen (Kap. 2.3.2) mit dem Gewicht vergleichbarer CNG Fahrzeug (ohne Hybridisierung) in diesem Segment korreliert, stellt bereits deutlich höhere Anforderungen an die notwendigen Fahrleistungen im beispielhaft gewählten Betriebspunkt für eine Beschleunigung von 1 m/s^2 bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h . Eine Anhebung der Bezugsmasse um weitere 500 kg bzw. 1000 kg lässt die Fahrleistungen signifikant ansteigen. Entsprechend den Beschleunigungsanforderungen steigen mit der Fahrzeugmasse auch die Verzögerungsleistungen deutlich an, wie an dem exemplarisch gewählten Betriebspunkt (-1 m/s^2 , 80 km/h) erkennbar wird.

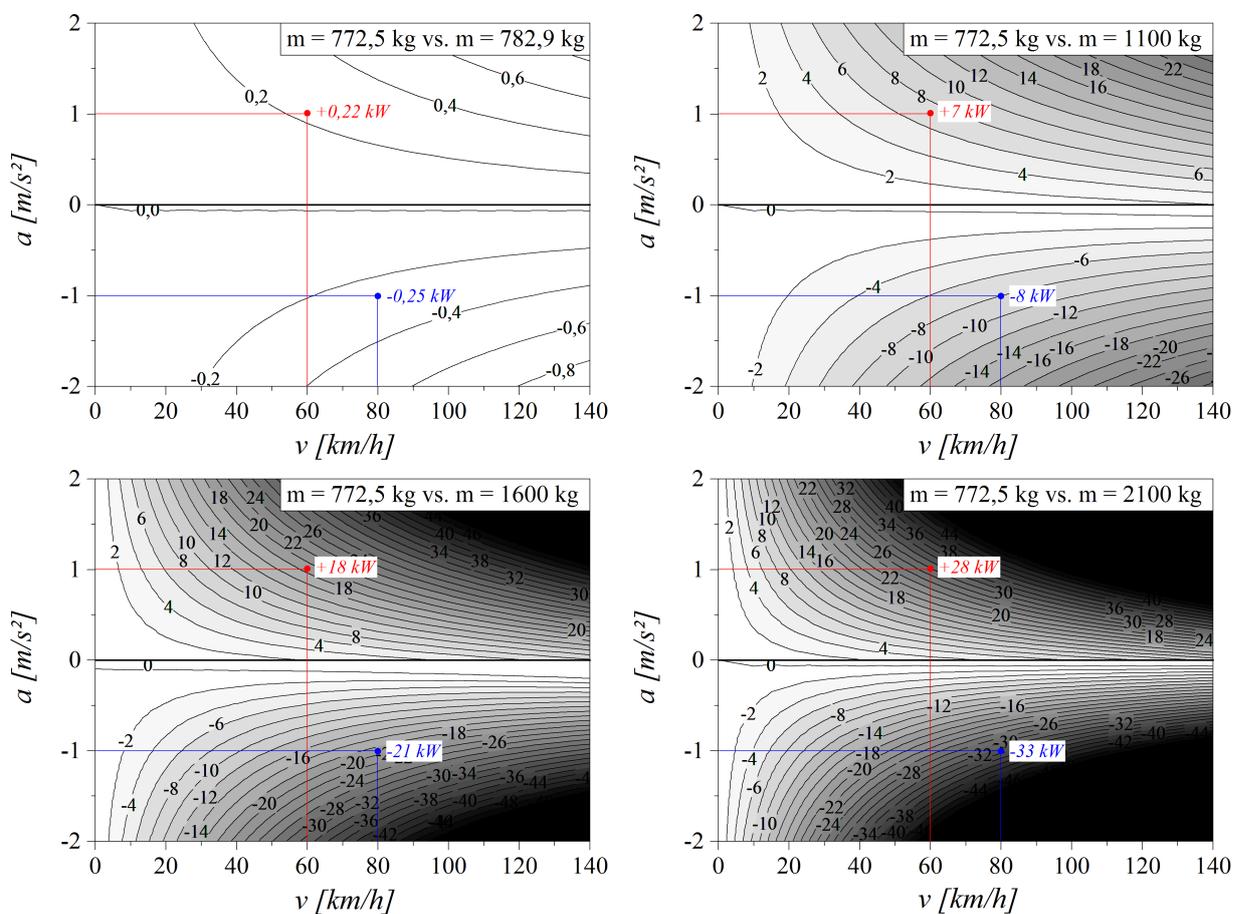


Abbildung 4.17: Darstellung der zusätzlichen Antriebsleistung für verschiedene Fahrzeugmassen (Bezugsgewicht = Leergewicht + 100 kg) im Vergleich zur ultraleichten Ausgangsvariante (Bezugsgewicht = $772,5 \text{ kg}$, 12 Volt Hybrid)

Weiterführend wurde das theoretische Antriebs- und Rekuperationspotenzial des 48 Volt RSG für den NEFZ (Abb. 4.18) und WLTP (Abb. 4.19) Fahrzyklus untersucht. Ausgehend von der mechanischen Leistung des 48 Volt Riemen-Starter-Generators von $5,8 \text{ kW}$ (Motorbetrieb) und $-9,5 \text{ kW}$ (Generatorbetrieb) wurden diese Isolinien in den Fahrleistungsdiagrammen für die 48 Volt Hybridisierung im ultraleichten Konzeptfahrzeug ($782,9 \text{ kg}$) rot (Motor) und blau (Generator) gekennzeichnet. Darüber hinaus wurden die identischen RSG

Leistungsgrenzen für eine Bezugsmasse von 2100 kg eingetragen. Die grau schraffierte Fläche entspricht demnach dem gesteigerten elektrischen Antriebs- bzw. Verzögerungspotenzial im Hinblick auf die Höchstgeschwindigkeit und die maximale Beschleunigung, welche auf das niedrige Fahrzeuggewicht zurückzuführen ist.

Abb. 4.18 und Abb. 4.19 stellen zusätzlich die Betriebspunkte für den NEFZ und WLTP dar. Aus den Fahrleistungsdiagrammen sind die wesentlich höheren Dynamikanforderungen des WLTP deutlich zu erkennen, während die Beschleunigungen und Verzögerungen im NEFZ konstant verlaufen. Theoretisch betrachtet können alle Betriebspunkte der Fahrzyklen, welche von der roten und blauen Isolinie umschlossen werden, ausschließlich über den elektrischen 48 Volt Antrieb dargestellt werden. D.h. 5,8 kW im Motorbetrieb des RSG genügen, um zeitlich betrachtet im NEFZ in der ultraleichten Fahrzeugstruktur ca. 59 % der gesamten Beschleunigungs- und Konstantfahranteile durch den elektrischen Antrieb abzudecken. Im WLTP können 45 % der benötigten Antriebsleistungen dargestellt werden. Diese Verhältnis sinkt mit steigendem Fahrzeuggewicht entsprechend ab. So können im NEFZ und WLTP bei einem Bezugsgewicht von 2100 kg jeweils theoretisch nur noch 33 % der Antriebsleistungen über den 48 Volt RSG dargestellt werden.

Der Einfluss des Fahrzeuggewichts auf die Ausschöpfung des RSG Leistungspotenzials lässt sich auch im Generatorbetrieb wiedererkennen. Demnach können in der ultraleichten Fahrzeugstruktur bis zu 98 % (NEFZ) und 94 % (WLTP) der Verzögerungsanforderungen über den Generator dargestellt werden. Eine Erhöhung des Bezugsgewichts auf 2100 kg reduziert das Substitutionspotenzial im NEFZ auf 54 % und im WLTP auf 69 %.

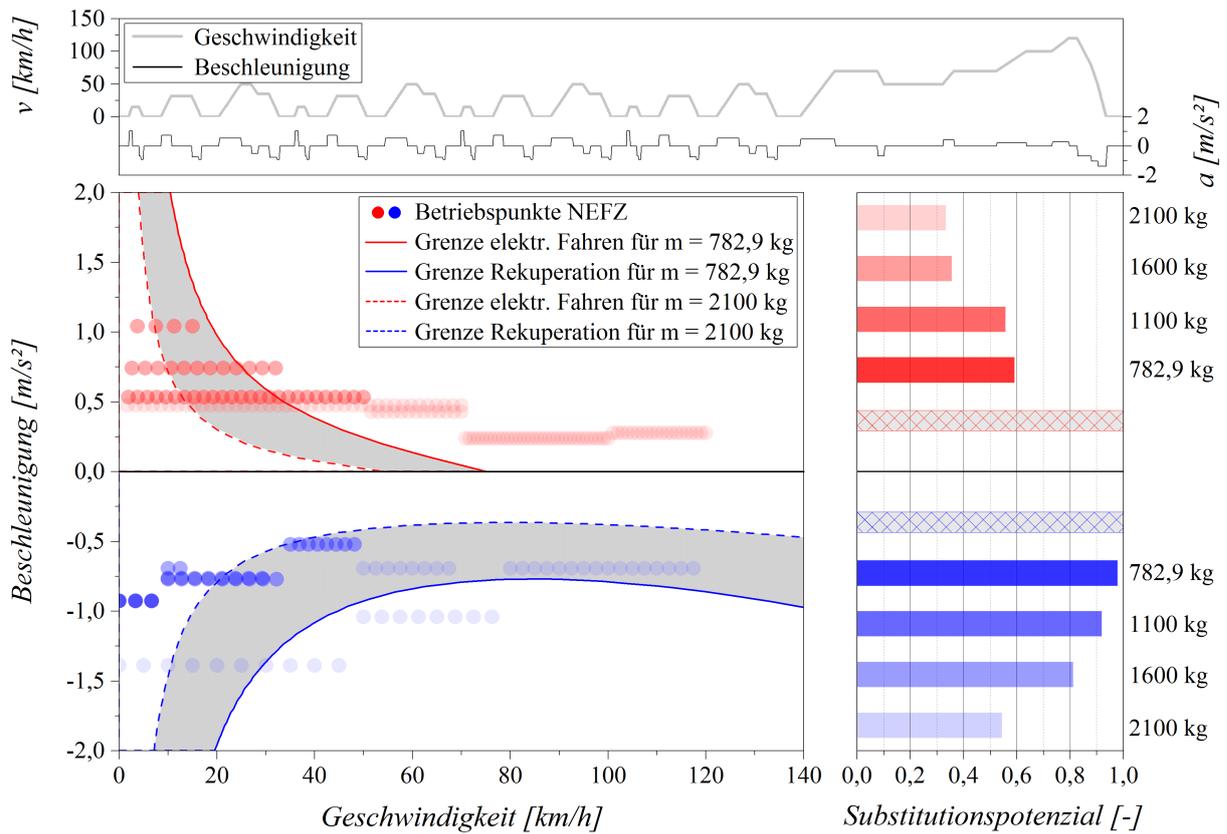


Abbildung 4.18: Elektrisches Fahr- bzw. Rekuperationspotenzial des 48 Volt Riemen-Starter-Generators in Relation zur Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie für die Betriebspunkte im NEFZ unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse ($m = 782,9$ kg ; $m = 2100$ kg)

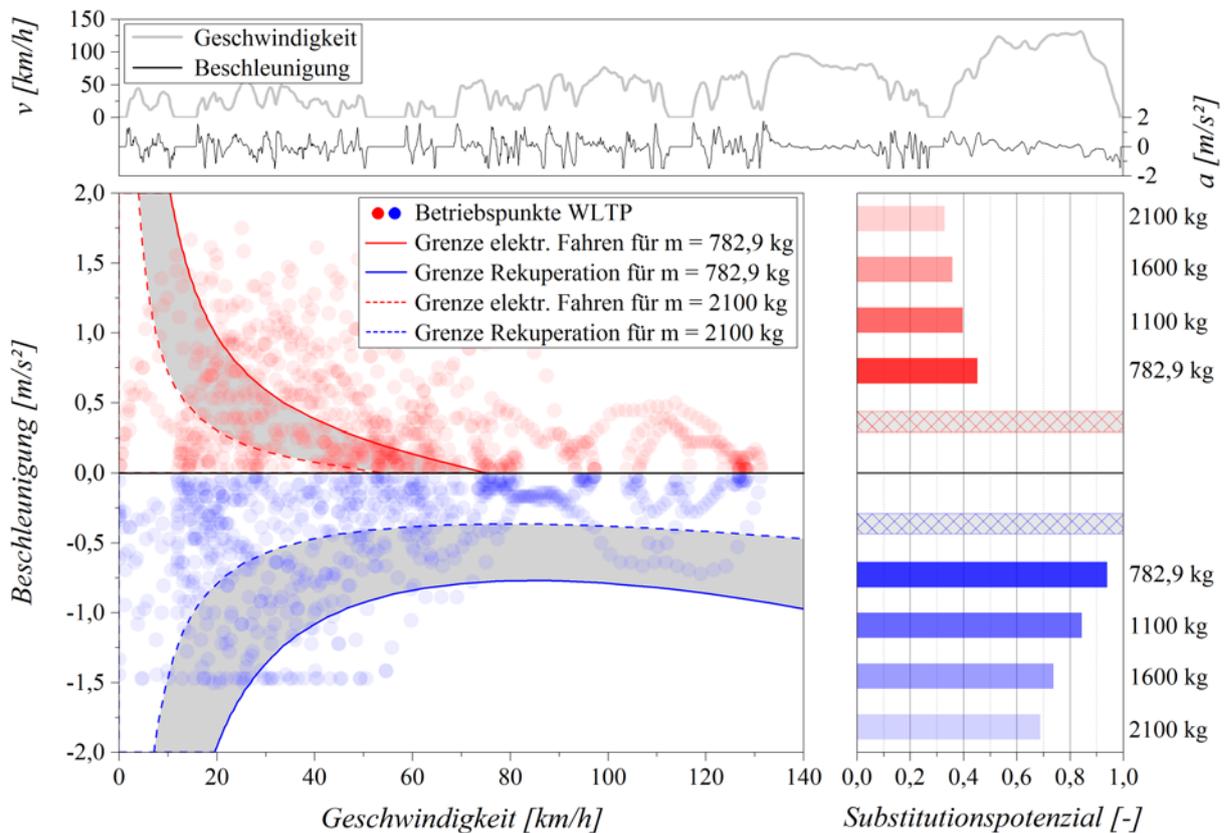


Abbildung 4.19: Elektrisches Fahr- bzw. Rekuperationspotenzial des 48 Volt Riemen-Starter-Generators in Relation zur Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie für die Betriebspunkte im WLTP unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse ($m = 782,9$ kg ; $m = 2100$ kg)

Ausgehend von dieser theoretischen Betrachtung mit dem speziellen Fokus des Einflusses des Fahrzeuggewichts ist es letztendlich nicht zweckmäßig, alle potenziellen Betriebspunkte elektrisch durch den RSG zu substituieren. Für eine nachhaltige Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wird auch für die 48 Volt Antriebstopologien die in Kap. 3.1.3.5 vorgestellte effizienzbasierte Methodik angewandt. Abb. 4.20 und Abb. 4.21 stellt dahingehend den jeweiligen elektrischen Grenzwirkungsgrad inklusive Hysterese im NEFZ und WLTP dar, wie dieser aus dem motorischen und generatorischen Systemverhalten des elektrischen Zweigs resultiert. Wie zu erkennen ist, erfolgt für die ersten 200 Sekunden des jeweiligen Zyklus zunächst eine Initialisierung der Grenzen, um für den weiteren Betrieb (über 200 Sekunden) erste Erfahrungswerte an die adaptive Grenzwertbestimmung zu übermitteln.

Der Effizienzgrenzwert für einen nachhaltigen elektrischen Fahrbetrieb bewegt sich im NEFZ zwischen 18,4 und 19,1 %, im WLTP ist dieser mit 16,9 bis 18,2 % etwas geringer. Weiterhin sind in Abb. 4.20 und Abb. 4.21 die Fahranteile eingezeichnet, in denen die VKM ausgeschaltet ist. Dazu gehören neben den Start Stopp Situationen bei Fahrzeugstillstand auch die Segel- und Rekuperationsphasen sowie der elektrische Fahrbetrieb mittels Riemen-Starter-Generator. Letzteres wird über die Betriebsstrategie ausgewählt, wenn sich der elektrische Antrieb gegenüber dem Verbrennungsmotor als effizienter darstellt. Grundsätzlich werden so, unter der Voraussetzung, dass ein ausreichender Batterieladestand vorhanden ist, sämtliche Anfahrvorgänge bis zu einer Geschwindigkeit von mindestens 10 km/h rein elektrisch durchgeführt. Über 10 km/h entscheidet vorrangig das vom Fahrer angeforderte Wunschmoment sowie der Grenzwirkungsgrad des elektrischen Antriebs über die momentane Antriebswahl. Obwohl theoretisch über den elektrischen Antrieb darstellbar, lässt sich im NEFZ Profil erkennen, dass die VKM für eine konstante Geschwindigkeit von 50 km/h den effizienteren Antrieb repräsentiert. Konstantfahranteile bis ca. 40 km/h lassen sich wiederum mittels RSG verbrauchsschonender darstellen. Aus dem WLTP Profil ist zu erkennen, dass der RSG neben geringen Beschleunigungsanforderungen vor allem für Verzögerungen, welche ein positives Antriebsmoment verlangen, genutzt wird. Dies unterstützt das Potenzial dieser Antriebskombination im realen Fahrbetrieb durch die nachhaltige Nutzung eines verbrauchsschonenden Ausrollverhaltens.

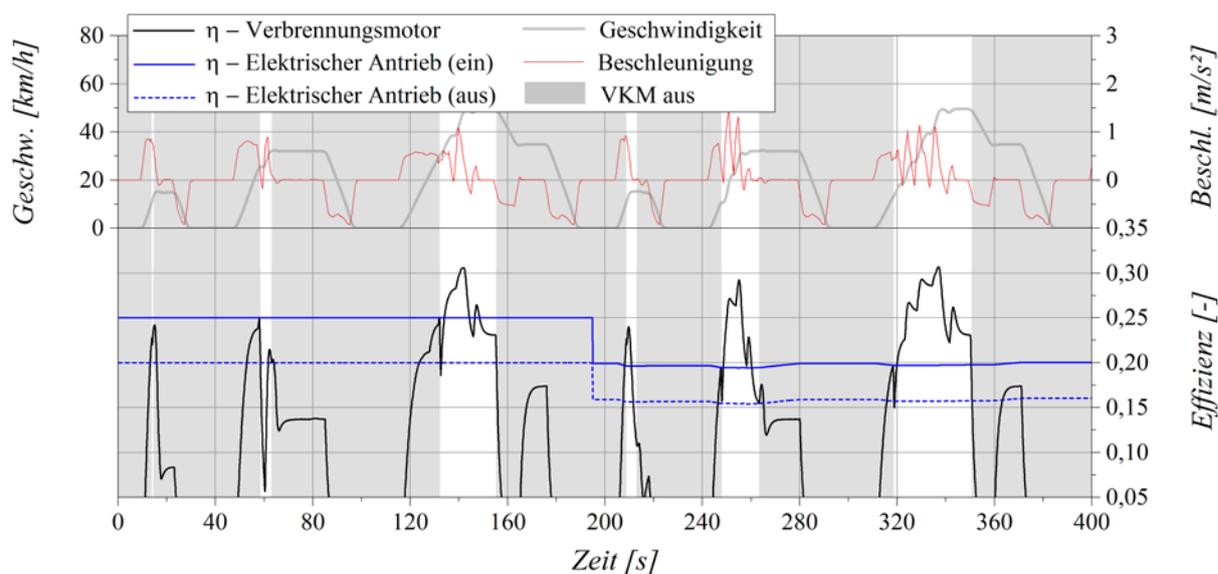


Abbildung 4.20: Wirkungsgradanalyse für den 48 Volt P3-Hybrid im NEFZ zur nachhaltigen Entscheidungsfindung hinsichtlich des effizientesten Antriebssystems (VKM bzw. RSG); Darstellung der Bereiche in denen die VKM ausgeschaltet ist (Elektrisch Fahren, Segeln, Rekuperation, Start Stopp)

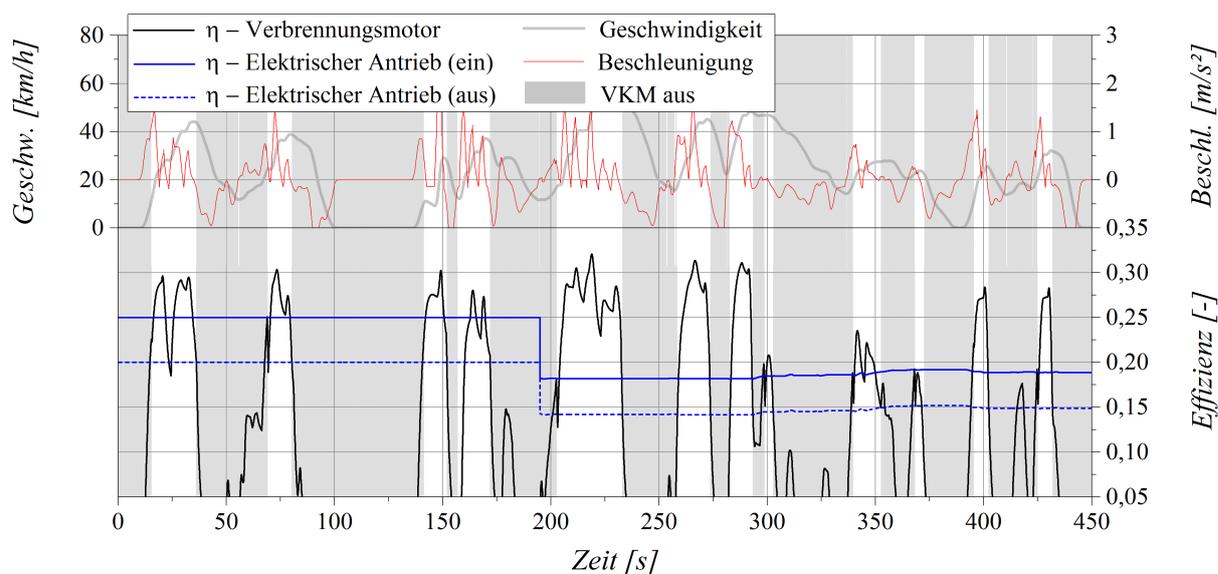


Abbildung 4.21: Wirkungsgradanalyse für den 48 Volt P3-Hybrid im WLTP zur nachhaltigen Entscheidungsfindung hinsichtlich des effizientesten Antriebssystems (VKM bzw. RSG); Darstellung der Bereiche in denen die VKM ausgeschaltet ist (Elektrisch Fahren, Segeln, Rekuperation, Start Stopp)

Zusammenfassend kann durch die Implementation dieses rein elektrischen Fahrbetriebs für ineffiziente verbrennungsmotorische Betriebspunkte inklusive elektrischer Anfahrfunktion -9,7 % Kraftstoff im NEFZ und -5,2 % im WLTP in der P2-Konfiguration eingespart werden. Durch die Adaption des RSG an den Getriebeausgang (P3) erhöht sich die Effizienz des elektrischen Pfades, da die Getriebeverluste umgangen werden. Somit ergibt sich gegenüber der P2-Anordnung eine weitere Verbrauchsreduktion durch den elektrischen Fahrbetrieb auf insgesamt -10,7 % (NEFZ) und -6,2 % (WLTP).

4.2.2.5 Lastpunktanhebung

Auf Grund des größeren elektrischen Leistungspotenzials des 48 Volt RSG und den daraus zunehmenden elektrischen Fahranteilen für die betrachteten Fahrzyklen, steigt die Bedeutung des intelligenten Lademanagements deutlich an. Entsprechend der in Kap. 3.1.3.1 vorgestellten Methodik wird für das 48 Volt Gesamtsystem ein Ladewirkungsgradkennfeld erstellt, aus dem ein effizienzoptimales LPA-Moment hervorgeht. Grundsätzlich strebt die Ladestrategie einen SOC von 70 % in der 48 Volt Batterie an. Je nach Entladetiefe muss die effizienzoptimale Ladestrategie angepasst werden. D.h. je größer die Differenz zwischen dem aktuellen SOC im Vergleich zum Zielwert (70 %) ist, desto stärker wird das LPA-Moment angehoben. Neben dem Energiebedarf basierend auf dem RSG Antrieb muss das Lademanagement auch den Energieverbrauch im 12 Volt Bordnetz kompensieren, wobei die Umwandlungsverluste des Gleichspannungswandlers zwischen den zwei Spannungskreisen berücksichtigt werden müssen.

Ein grundsätzlicher Unterschied bei der elektrischen Energiegewinnung stellt sich in Abhängigkeit des topologischen Hybridbaus dar. Abb. 4.22 und Abb. 4.23 stellen die Generatormomente im Ladeeffizienzfeld vergleichend für die 48 Volt P2- (oben) und P3-Konfiguration (unten) im NEFZ und WLTP Fahrprofil gegenüber. Zu beachten ist, dass das jeweilige Lademoment in der P2-Konfiguration abhängig von der Getriebeeingangsdrehzahl und in der P3-Anordnung von der Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Demnach entsteht bei der P3-Anordnung durch die konstruktiv vorgegebene Generatorübersetzung eine größere Spreizung in den Ladebetriebspunkten im Vergleich zum P2-Layout, bei dem die Generatordrehzahl zusätzlich von der Schaltstrategie des Getriebes abhängig ist. Dennoch sind die resultierenden Wirkungsgradeinbußen basierend auf der P3-Anordnung des Riemen-Starter-Generators vernachlässigbar. Im Detail beträgt der mittlere Ladewirkungsgrad (Generator, VKM und Batterie, Kap. 3.1.3.1) im NEFZ 27,4 % (P2) und 27,3 % (P3) sowie im WLTP 26,7 % (P2) und 26,5 % (P3). In Anbetracht der maximal möglichen Systemeffizienz $\eta_{Laden,ges}$ von 28,2 % (Kap. 3.1.3.1, Gl. 3.3), erreicht die entwickelte Ladestrategie in den betrachteten Fahrprofilen eine zufriedenstellende Gesamtbilanz.

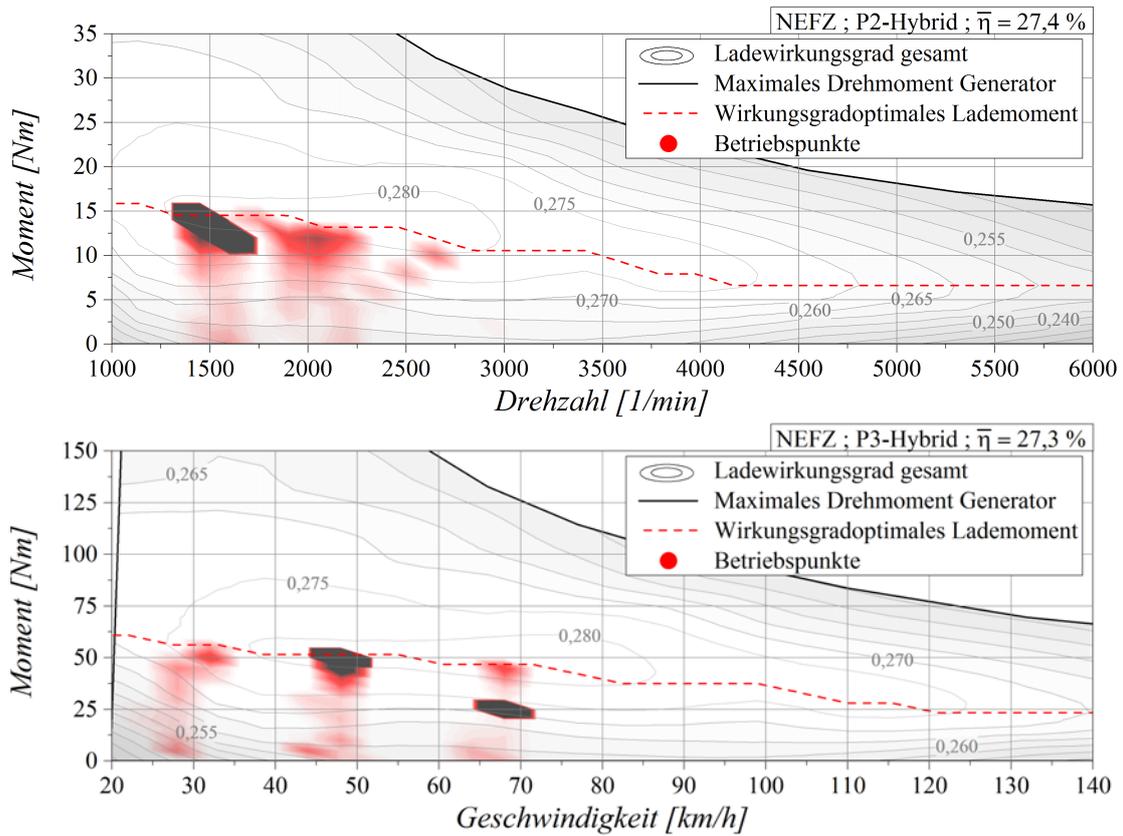


Abbildung 4.22: Ladewirkungsgrad (gesamt) für das 48 Volt P2- (oben) und P3-System (unten), Darstellung der Lademomente in Abhängigkeit der Motordrehzahl (P2) bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit (P3) für das NEFZ Fahrprofil

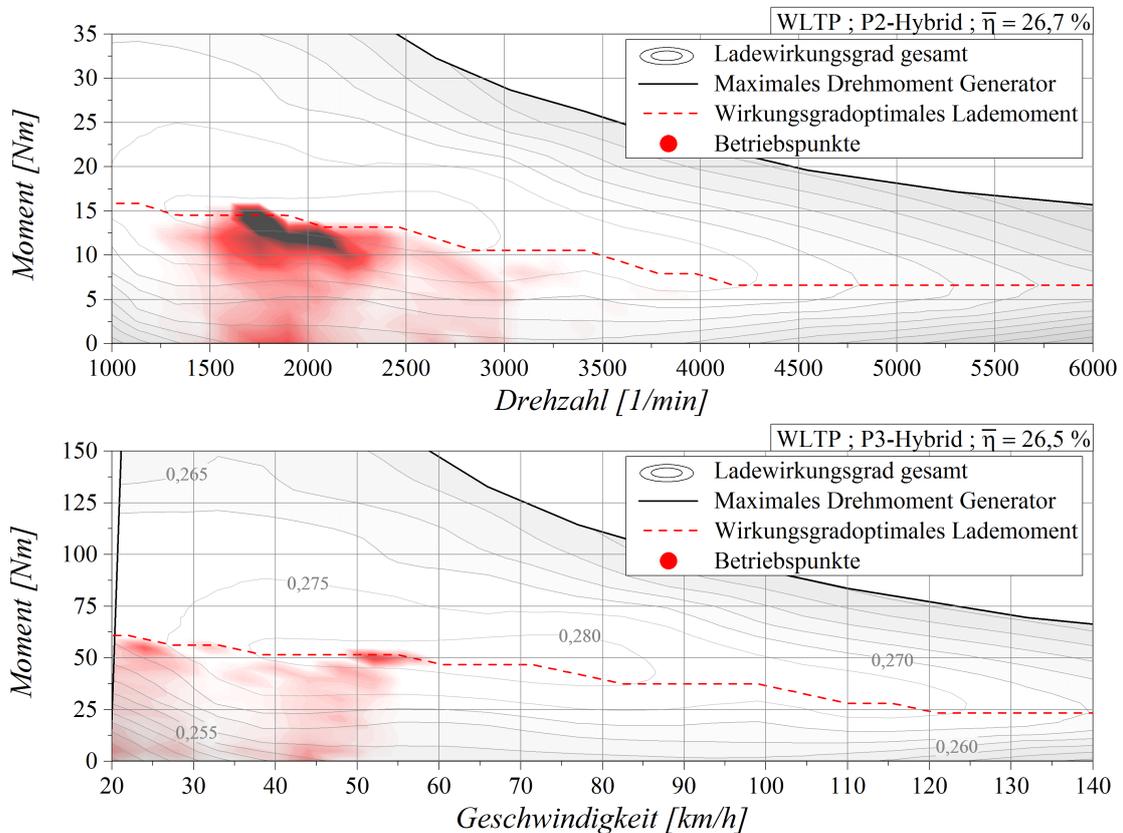


Abbildung 4.23: Ladewirkungsgrad (gesamt) für das 48 Volt P2- (oben) und P3-System (unten), Darstellung der Lademomente in Abhängigkeit der Motordrehzahl (P2) bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit (P3) für das WLTP Fahrprofil

Abschließend wurde der Ladezustand für die 48 Volt Batterie im NEFZ und WLTP Fahrzyklus für die P2- und P3-Konfiguration in Abb. 4.24 dargestellt. Für beide Varianten wurde von einem Start SOC von 70 % ausgegangen, als unterer Grenzwert wurde ein SOC von 40 % festgelegt. Wird dieser Grenzwert unterschritten, erfolgt über eine Hysterese zunächst eine erneute Aufladung der Batterie bis zu einem SOC von 65 % bevor die elektrischen Fahrfunktionen wieder aktiviert werden. Unterschreitet der SOC einen Ladezustand von 50 % wird das Lademoment im Vergleich zur wirkungsgradoptimalen Strategie gesteigert. Da der SOC diesen Grenzwert in den betrachteten Zyklen nicht unterschreitet, findet eine Nachladung der Batterie ausschließlich unter optimalen Ladebedingungen statt, was zu einer insgesamt nachhaltigen Energiegewinnung führt. Deutlich zu erkennen ist der signifikante Einfluss auf den Batterieladezustand, welcher durch eine potenzielle RSG Drehmomentunterstützung in den Schaltvorgängen (Kap. 4.2.3) hervorgerufen wird. Diese Funktion ist entkoppelt von der Effizienzbewertung beider Antriebssysteme durch die Betriebsstrategie und muss damit nicht zwangsläufig verbrauchsreduzierend sein. Eine simulative Analyse ergab in beiden Fahrzyklen einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs durch die Zuschaltung dieser Funktion (+3,8 % NEFZ, +4,1 % WLTP).

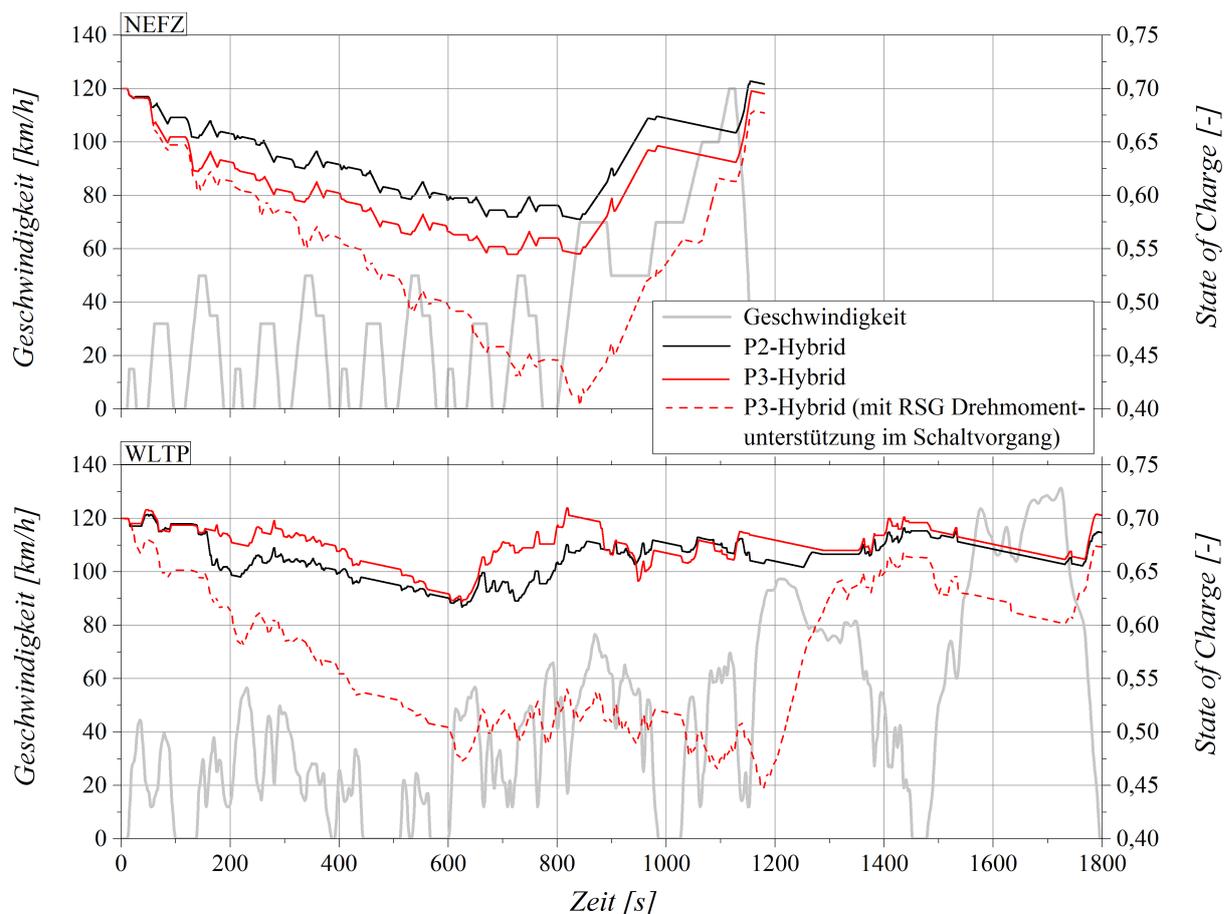


Abbildung 4.24: Darstellung des SOC Verlaufs im NEFZ (oben) und WLTP (unten) für den 48 Volt P2- und P3-Hybrid, mit und ohne RSG Drehmomentunterstützung im Schaltvorgang

4.2.2.6 Zusammenfassung

Im Folgenden sollen die zuvor angeführten Untersuchungen hinsichtlich dem Verbrauchspotenzial eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators im Antriebsstrang eines ultraleichten Fahrzeugs zusammengefasst werden. Untersucht wurden dabei im Speziellen die Auswirkungen durch die Adaption des RSG an die Getriebeeingangswelle (P2-Hybrid) bzw. eine potenzielle Anbindung an den Getriebeausgang in Form einer P3-Hybridisierung. Abb. 4.25 veranschaulicht die zeitliche Aufteilung der Betriebszustände im NEFZ im Vergleich zur konventionellen 12 Volt Konfiguration. Demnach können unabhängig von der Hybridtopologie fast zwei Drittel der Verzögerungsanteile im Rekuperationsmodus (REK) bei abgekoppeltem Verbrennungsmotor abgebildet werden. Obwohl die Rekuperation im P3-Hybrid unabhängig von den Schaltphasen erfolgen kann, ist der zeitliche Anteil gegenüber dem P2-Hybrid gleich geblieben. Da unterhalb einer RSG Drehzahl von 2000 1/min keine Energie generatorisch erzeugt werden kann, müssen, bedingt durch das definierte Übersetzungsverhältnis des RSG zu den Antriebswellen, für Geschwindigkeiten unter 20 km/h die mechanischen Reibbremsen (BR) aktiviert werden. Im Gegensatz dazu kann der Rekuperationsvorgang bei der P2-Anordnung bis ca. 6 km/h aufrechterhalten werden, wodurch die zeitlichen Einbußen während den Schaltvorgängen kompensiert werden. Durch die gestiegene Traktionsleistung des Riemen-Starter-Generators werden bestimmte Fahranteile, in denen der Verbrennungsmotor einen im Vergleich zum elektrischen Antrieb niedrigeren Wirkungsgrad aufweist, rein elektrisch bewältigt. Vorrangig werden entsprechend den Analysen in Kap. 4.2.2.4 Anfahrvorgänge (EAF) und stationäre Geschwindigkeiten (EF) bis 35 km/h durch den elektrischen Antrieb substituiert. Da die Rekuperation diesen Bedarf an elektrischer Energie nicht decken kann, erfolgt zusätzlich eine Auflastung (LPA) der VKM unter möglichst wirkungsgradoptimalen Bedingungen. Der zeitliche Anteil in denen der Verbrennungsmotor ausschließlich und ohne jegliche Interaktion mit dem RSG genutzt wird, ist in beiden Topologien im Vergleich zur konventionellen Antriebskonfiguration deutlich geringer.

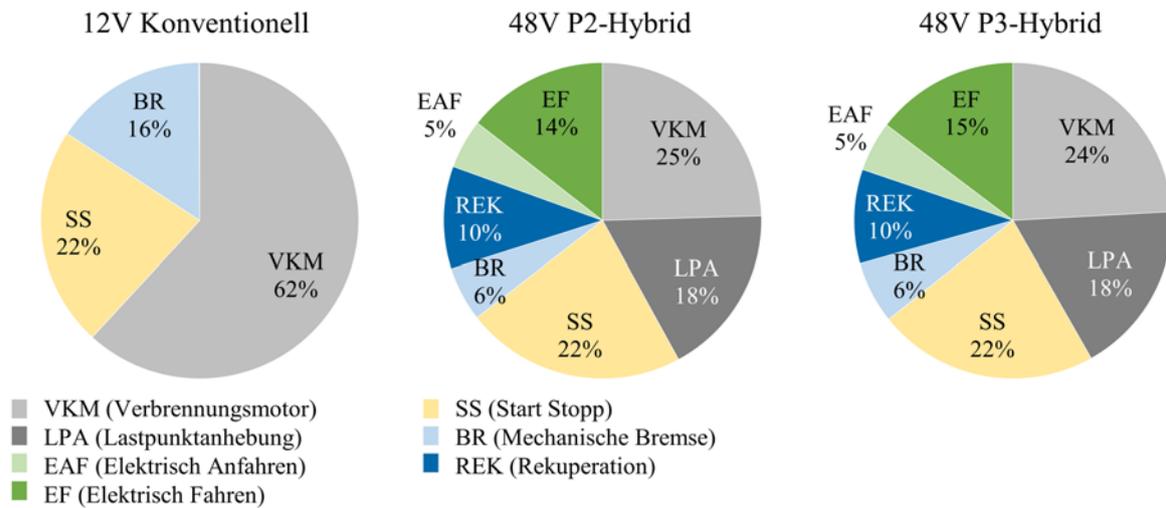


Abbildung 4.25: Zeitliche Aufteilung der jeweiligen Betriebszustände im NEFZ für die untersuchten 48 Volt Hybridtopologien

Neben der zeitlichen Quantifizierung der Betriebszustände wurde zusätzlich der Energiefluss im NEFZ in Form eines SANKEY-Diagramms für den konventionellen 12 Volt Basisantriebsstrang ohne Start Stopp (Abb. 4.26) mit dem des 48 Volt P3-Hybrids (Abb. 4.27) verglichen. Ausgehend von der eingesetzten Primärenergie in Form von CNG wird die Aufteilung zwischen mechanischem und elektrischem Pfad hervorgehoben sowie alle Verlustanteile im Antriebssystem aufgedeckt. Auf Grund der höheren Triebstrangeffizienz des 48 Volt P3-Hybrids ist der Primärenergiebedarf (11.683 kJ) um -22,8 % geringer im Vergleich zum konventionellen 12 Volt System (15.143 kJ). Diese Angabe entspricht ca. dem Verbrauchspotenzial, welches auch in Tab. 4.4 zusammenfassend dargestellt ist (-23,2 %). Da in der vorliegenden Auswertung der Primärenergiebedarf jedoch nicht auf die zurückgelegte Strecke bezogen wird und geringfügige Abweichungen innerhalb der Toleranzen im Geschwindigkeitsprofil zwischen den beiden Antriebssträngen auftreten können, entsteht eine minimale Abweichung zwischen den Gesamtergebnissen. Grundsätzlich findet bei beiden Antriebsvarianten die chemische Umwandlung der Primärenergie in mechanische Antriebsenergie der Kurbelwelle unter prozessbedingten thermodynamischen Verlusten des Verbrennungsmotors statt. Für die weitere Beurteilung ist vor allem der resultierende mechanische Energieanteil von Bedeutung. Hier ergibt sich beim P3-Hybrid auf Grund des geringeren Primärenergiebedarfs auch ein niedrigerer mechanischer Energieeintrag (3.503 kJ) von der VKM auf die Kurbelwelle (12 Volt, 3.709 kJ). Zusätzlich entstehen im konventionellen 12 Volt Antriebssystem VKM Schlepp- (132 kJ) sowie Leerlaufverluste (929 kJ). Aus der relativen Aufteilung der Primärenergie ist zudem die mittlere Effizienz des Verbrennungsmotors erkennbar. So erreicht die VKM im NEFZ ohne Hybridisierung (Abb. 4.26) einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 24,5 %, welcher durch die Integration des 48 Volt Riemen-Starter-Generators (Abb. 4.27) auf insgesamt 30,0 % gesteigert werden kann.

In Abb. 4.26 ist zu erkennen, dass die elektrische Energie zur Kompensation des Bordnetz-

bedarfs über die 12 Volt Lichtmaschine entnommen wird, welche direkt mit der Kurbelwelle verbunden ist. Der Bordnetzbedarf im NEFZ entspricht insgesamt 153 kJ. Unter Berücksichtigung der Energiewandlungsverluste (z.B. Generator-, Lade- bzw. Entladewirkungsgrad der 12 Volt Batterie) muss dazu über Lastpunktanhebung eine mechanische Energie von 240 kJ an die 12 Volt Lichtmaschine übertragen werden. Die übrige mechanische Antriebsenergie wird unter Berücksichtigung der Kupplungsverluste, welche auf Anfahr- und Schaltvorgängen basiert, an das Getriebe geleitet. Eine weitere Energieminderung ergibt sich aus den Wirkungsgradverlusten im Getriebe. Letztendlich stehen 3.086 kJ zur Kompensation der Fahrwiderstände sowie der Triebstrangverluste (Radlager, Bremscheiben und Seitenwellen) zur Verfügung. Der Beschleunigungsenergiebedarf im NEFZ beträgt dabei rund 442 kJ, dieser wird jedoch irreversibel in Verzögerungsvorgängen über die Reibbremsen abgebaut.

In der hybriden 48 Volt Antriebslösung (Abb. 4.27) werden die Kupplungsverluste durch die rein elektrischen Anfahrvorgänge deutlich minimiert. Die Energieentnahme für den elektrischen Pfad wird in der dargestellten P3-Topologie erst am Differenzial vorgenommen. Die Fahrwiderstandsanteile weichen in der relativen Betrachtung auf Grund des geringeren Primärenergiebedarfs des 48 Volt Hybridantriebs im Vergleich zum konventionellen 12 Volt Antrieb (Abb. 4.26) ab, quantitativ ergibt sich jedoch ein ähnliches Niveau. Dies betrifft nicht die Beschleunigungs- respektive Bremsverluste. Diese betragen in der gezeigten Hybridkonfiguration lediglich 141 kJ, der größte Teil der Beschleunigungsenergie wird über regeneratives Bremsen (451 kJ) über den 48 Volt Riemen-Starter-Generator zurückgewonnen und zunächst in der 48 Volt Batterie zwischengespeichert. Da die Rekuperationsenergie nicht genügt, um den Bedarf an elektrischer Energie resultierend aus dem 12 Volt Bordnetzverbrauch sowie den elektrischen Fahrvorgängen zu decken, wird zusätzlich eine Lastpunktanhebung der VKM vorgenommen, dies entspricht einem Energiebedarf von 428 kJ. Zu berücksichtigen sind dabei die generatorischen Verluste (186 kJ) sowie die Einbußen basierend auf dem Ladewirkungsgrad der 48 Volt Batterie (47 kJ). Zur besseren Darstellung des Energieflusses wurde der RSG als separate Motor- und Generatoreinheit dargestellt, eine zeitlich parallele Nutzung dieser beiden Modi schließt sich dennoch aus. Die gespeicherte Energie wird zu einem geringen Anteil zur Kompensation des 12 Volt Bordnetzverbrauchs (153 kJ) ähnlich dem konventionellem Konzept in Abb. 4.26 genutzt. Zusätzliche Verluste ergeben sich jedoch durch den benötigten DC/DC Umrichter. Unter Beachtung der Entladewirkungsgrade der 48 Volt Batterie (39 kJ) sowie der motorischen Umwandlungsverluste des RSG (119 kJ) werden 326 kJ über den RSG dem Differenzial als mechanische Antriebsenergie wieder zur Verfügung gestellt.

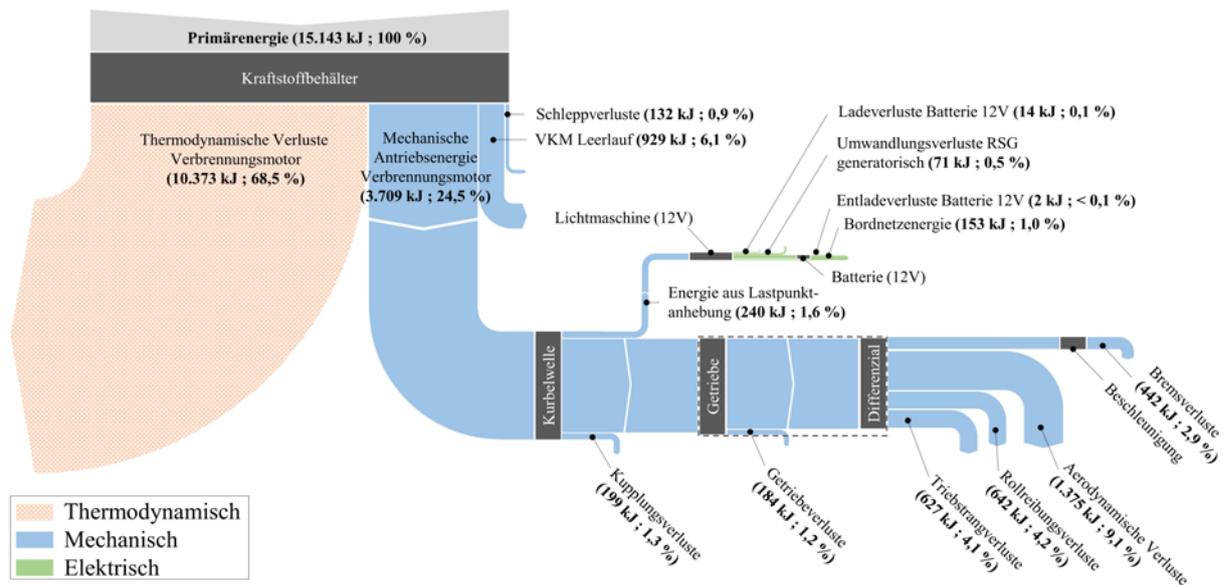


Abbildung 4.26: Darstellung des Energieflusses (SANKEY-Diagramm) für den konventionellen 12 Volt Basisantriebsstrang im NEFZ

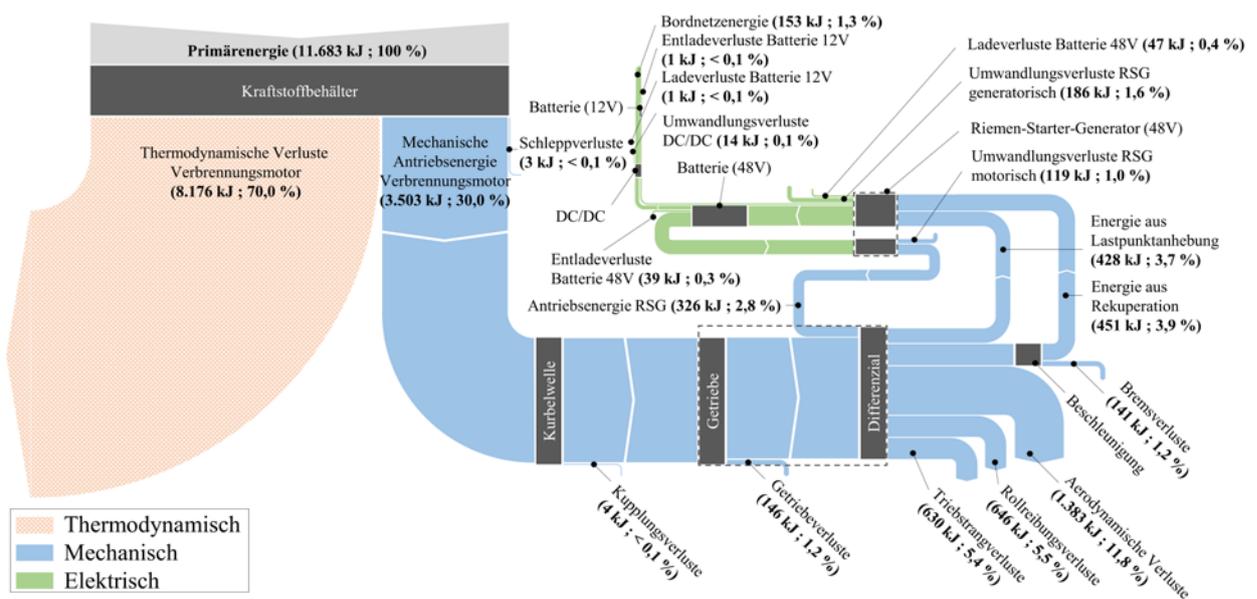


Abbildung 4.27: Darstellung des Energieflusses (SANKEY-Diagramm) für den 48 Volt P3-Hybridantriebsstrang im NEFZ

Weiterführend stellen Abb. 4.28 und Abb. 4.29 die Verschiebung der verbrennungsmotorischen Betriebspunkte im NEFZ für die Anordnung des RSG in Form einer P2- (Abb. 4.28, rechts) und einer P3-Topologie (Abb. 4.29, rechts) im Vergleich zu der zuvor erwähnten 12 Volt Ausgangskonfiguration (jeweils links) dar. Deutlich zu erkennen ist, dass die Bereiche ineffizienter verbrennungsmotorischer Betriebspunkte, d.h. kleine bis mittlere Lasten und niedrige Drehzahlen, fast vollständig über den RSG kompensiert werden und die VKM in diesem Bereich ungenutzt bleibt. Durch den Segelbetrieb wird der Verbrennungsmotor in Verzögerungsphasen frühzeitig vom Antriebsstrang abgekoppelt wodurch der Wegfall des Schleppmoments begründet ist. Für identische Fahrsituationen kann teilweise ein Anhebung

des Drehmoments festgestellt werden, welche aus der intelligenten Auflastung der VKM durch den RSG resultiert. Qualitativ kann aus dieser Darstellung nur ein geringer Unterschied zwischen der P2- und P3-Anordnung festgestellt werden. Die Tendenzen hinsichtlich elektrischem Fahren und der Auflastung der VKM lassen sich demnach auch in der P3-Anordnung erkennen.

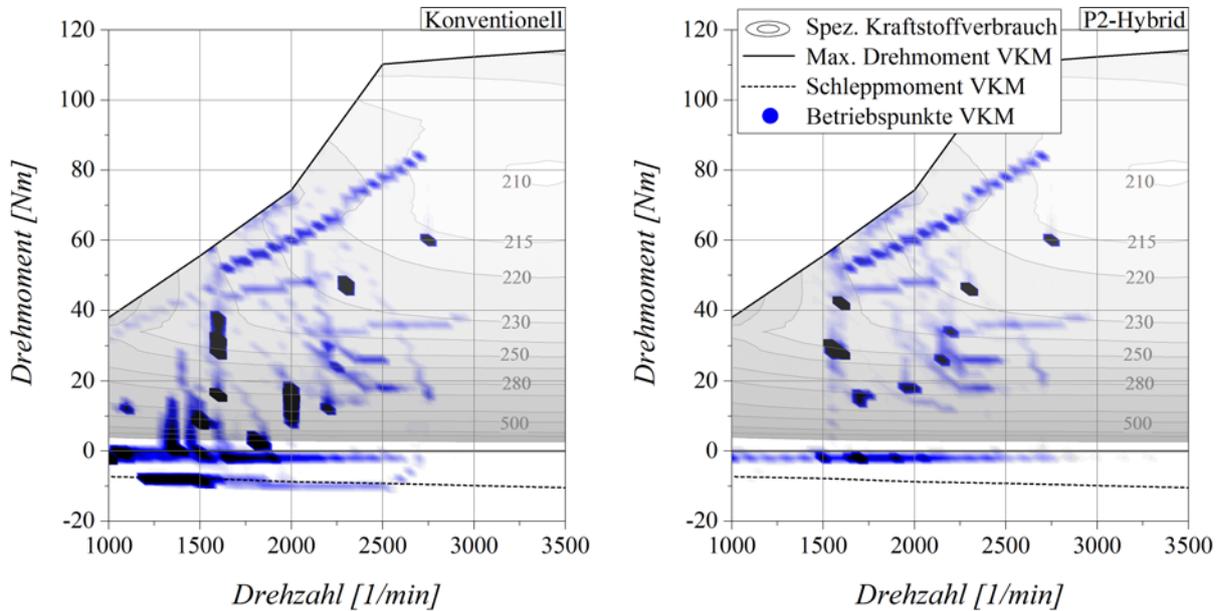


Abbildung 4.28: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors im NEFZ ohne Hybridisierung (li.) und in der P2-Konfiguration (re.) mit Anbindung des 48 Volt Riemen-Starter-Generators an die Getriebeeingangswelle

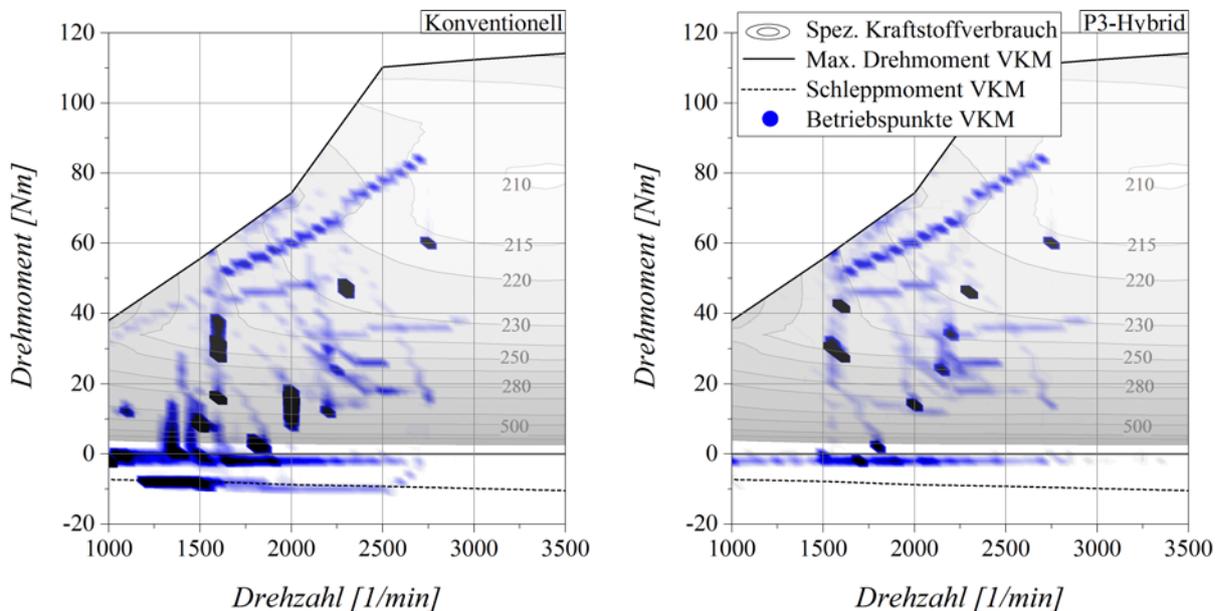


Abbildung 4.29: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors im NEFZ ohne Hybridisierung (li.) und in der P3-Konfiguration (re.) mit Anbindung des 48 Volt Riemen-Starter-Generators an den Getriebeausgang

Die zeitliche Auswertung der Betriebszustände für das WLTP Fahrprofil (Abb. 4.30), zeigt im Vergleich zum NEFZ eine ähnliche qualitative Aufteilung der Betriebszustände. Demnach

wird, unabhängig von der Antriebstopologie, bei ca. zwei Drittel der Verzögerungsanforderungen der RSG generatorisch genutzt, um Bremsenergie regenerativ zurückzugewinnen. Auf Grund des dynamischen Charakters des WLTP sinken die Anteile, in denen der RSG verbrennungsmotorische Betriebspunkte durch elektrisches Fahren substituiert. Der Verbrennungsmotor bleibt der dominierende Antrieb. Die Phasen in denen eine intelligente Auflastung der VKM stattfindet, sinken, da über die Rekuperationsvorgänge bereits ein signifikanter Anteil des Energieverbrauchs kompensiert wird.

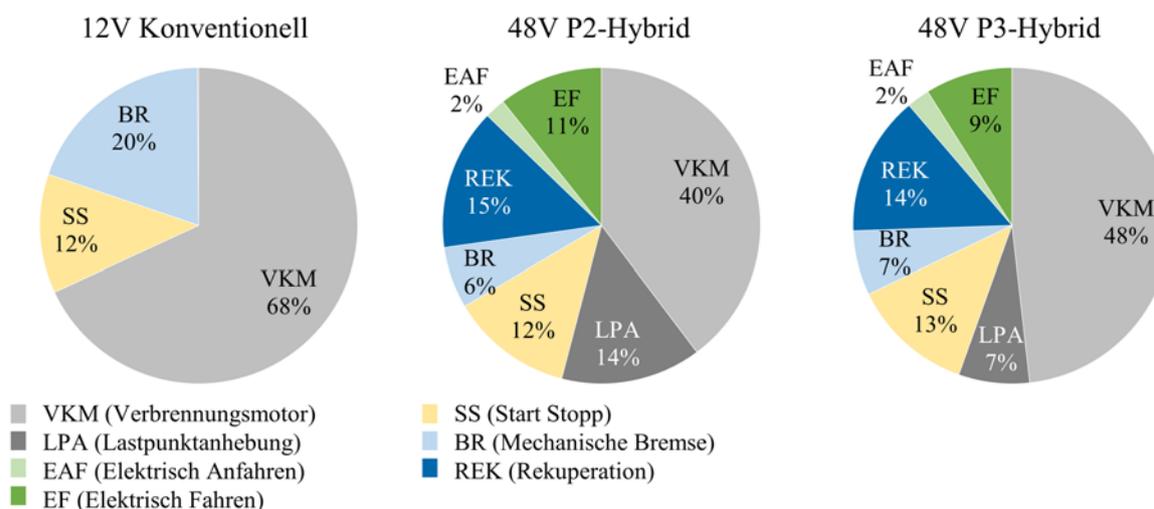


Abbildung 4.30: Zeitliche Aufteilung der jeweiligen Betriebszustände im WLTP für die untersuchten 48 Volt Hybridtopologien

Auch für den WLTP wurde eine Energiebilanzierung (SANKEY-Diagramm) für den konventionellen 12 Volt Antrieb ohne Start Stopp (Abb. 4.31) sowie für den 48 Volt P3-Triebstrang (Abb. 4.32) aufgestellt. Basierend auf dem geringeren Primärenergiebedarf des effizienteren elektro-hybriden Antriebsstrangs (Abb. 4.32) ist im Vergleich zum 12 Volt System weniger mechanische Antriebsenergie an der Kurbelwelle nötig. Im konventionellen Antrieb bleiben die negativen Einflüsse durch die Schleppverluste des Verbrennungsmotors (241 kJ) sowie der Leerlaufverluste (894 kJ) erhalten. Der mittlere Wirkungsgrad der VKM beträgt dennoch bereits 27,3 % und wird damit verglichen zum NEFZ (Abb. 4.26) um 2,8 % effizienter genutzt. Ausschlaggebend dafür ist vorrangig die größere Dynamik des WLTP, wodurch vor allem der verwendete Downsizing CNG Motor oft im Bereich höherer Lasten und damit einer optimaleren Energieumsetzung betrieben wird. Dennoch kann durch die Implementierung eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators (Abb. 4.32) die mittlere Effizienz der VKM auf insgesamt 30,3 % gesteigert werden.

Der Bordnetzenergiebedarf beträgt bei beiden Antrieben 234 kJ und wird in der 12 Volt Konfiguration ausschließlich über Lastpunktanhebung (393 kJ) unter Berücksichtigung der entsprechenden Umwandlungsverluste bedient. Die Beschleunigungsenergie beträgt 1.000 kJ und wird über die Reibbremsen abgebaut. Im Gegensatz dazu werden im 48 Volt Hybridantrieb 1.055 kJ zur Rekuperation aufgewendet, lediglich 226 kJ können nicht regenerativ

genutzt werden und müssen ebenfalls über die Reibbremsen kompensiert werden. Ähnlich der NEFZ Energieanalyse (Abb. 4.27) wird die zurückgewonnene Energie genutzt, um dem Differenzial wieder mechanische Antriebsenergie über den Riemen-Starter-Generator zuzufügen (393 kJ) sowie den 12 Volt Bordnetzbedarf auszugleichen. Auf Grund des dynamischen Lastprofils des WLTP Fahrzyklus ist die Nutzung des RSG als Antriebsmotor jedoch beschränkt, so dass nur ein geringer Anteil an elektrischer Energie zusätzlich über Lastpunktanhebung (175 kJ) gewonnen werden muss.

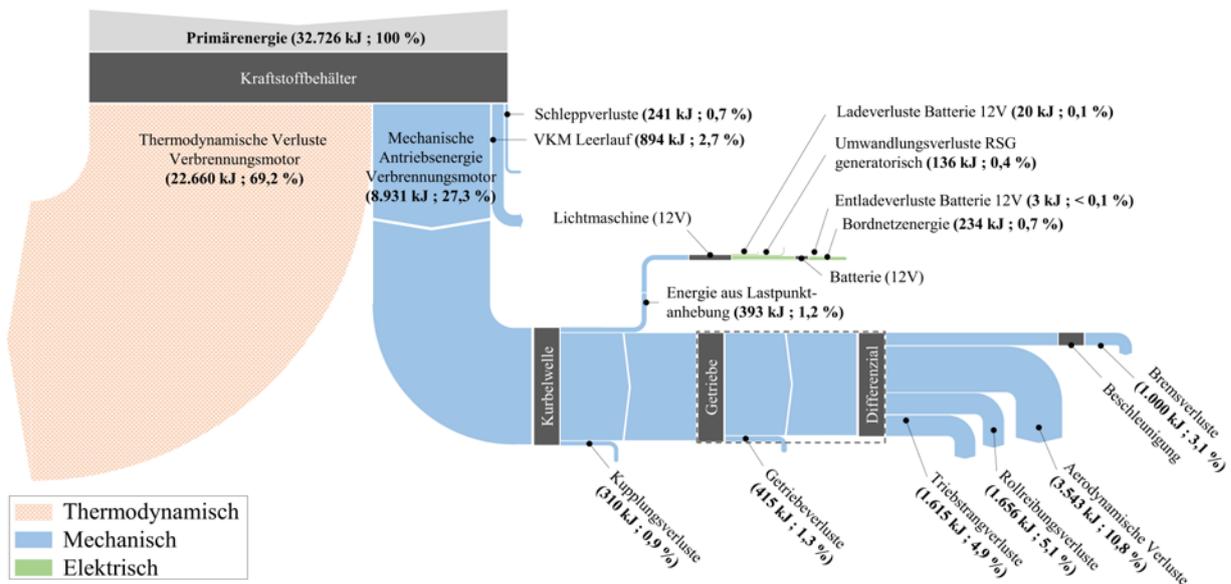


Abbildung 4.31: Darstellung des Energieflusses (SANKEY-Diagramm) für den konventionellen 12 Volt Basisantriebsstrang im WLTP

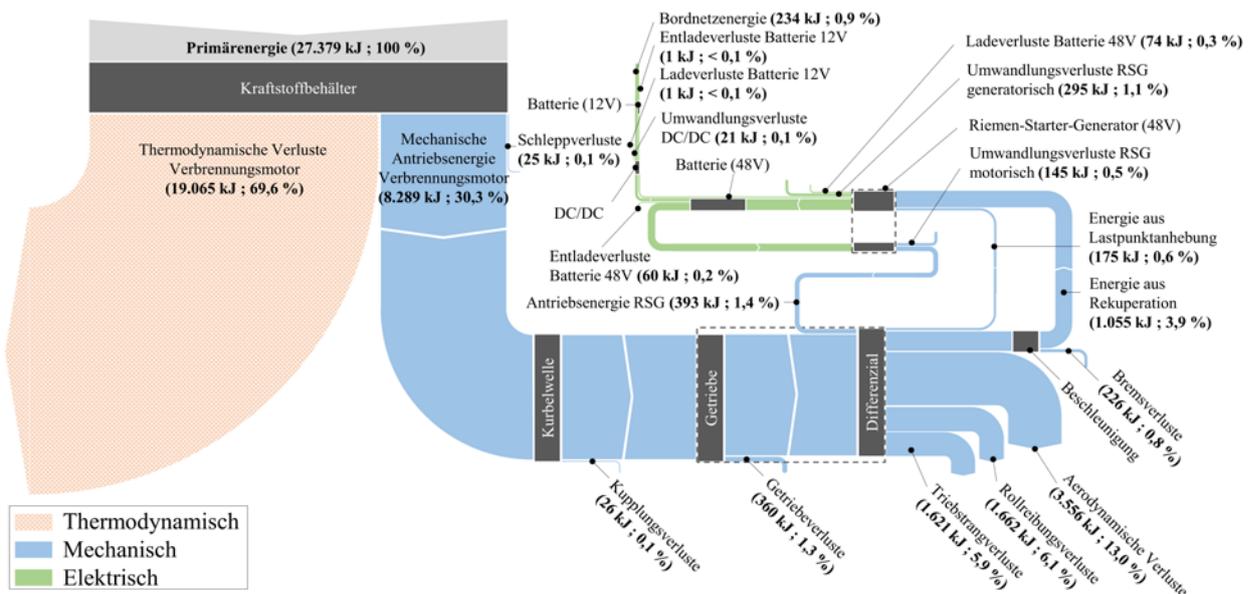


Abbildung 4.32: Darstellung des Energieflusses (SANKEY-Diagramm) für den 48 Volt P3-Hybridantriebsstrang im WLTP

Ähnlich den NEFZ Analysen (Abb. 4.28 und 4.29) ist das Substitutionspotenzial ineffizienter VKM Bereiche durch den RSG auch in der VKM Betriebspunktendarstellung für den P2-Hybrid in Abb. 4.33 (rechts) und den P3-Hybrid in Abb. 4.34 (rechts) im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang (jeweils links) wiederzuerkennen. Der Betriebsbereich des Verbrennungsmotors beschränkt sich somit erkennbar auf einen Drehzahlbereich über 1500 1/min und mittlere Lasten, wobei zusätzlich eine teilweise Auflastung in Bereiche höherer Wirkungsgrade über Lastpunktanhebung stattfindet.

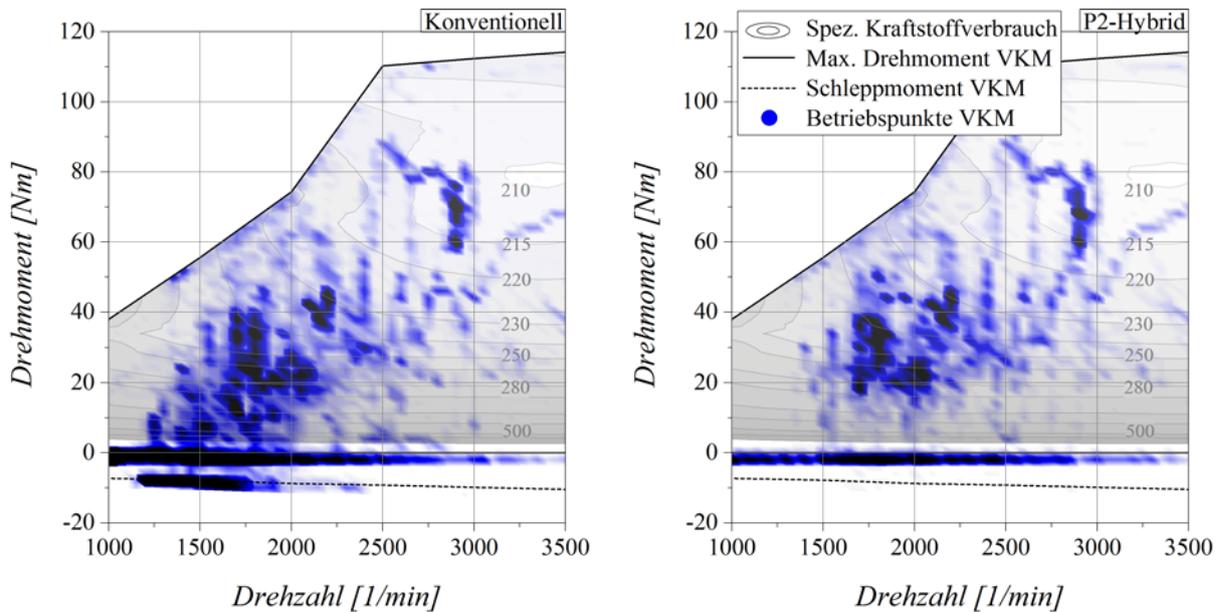


Abbildung 4.33: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors im WLTP ohne Hybridisierung (li.) und in der P2-Konfiguration (re.) mit Anbindung des 48 Volt Riemen-Starter-Generators an die Getriebeeingangswelle

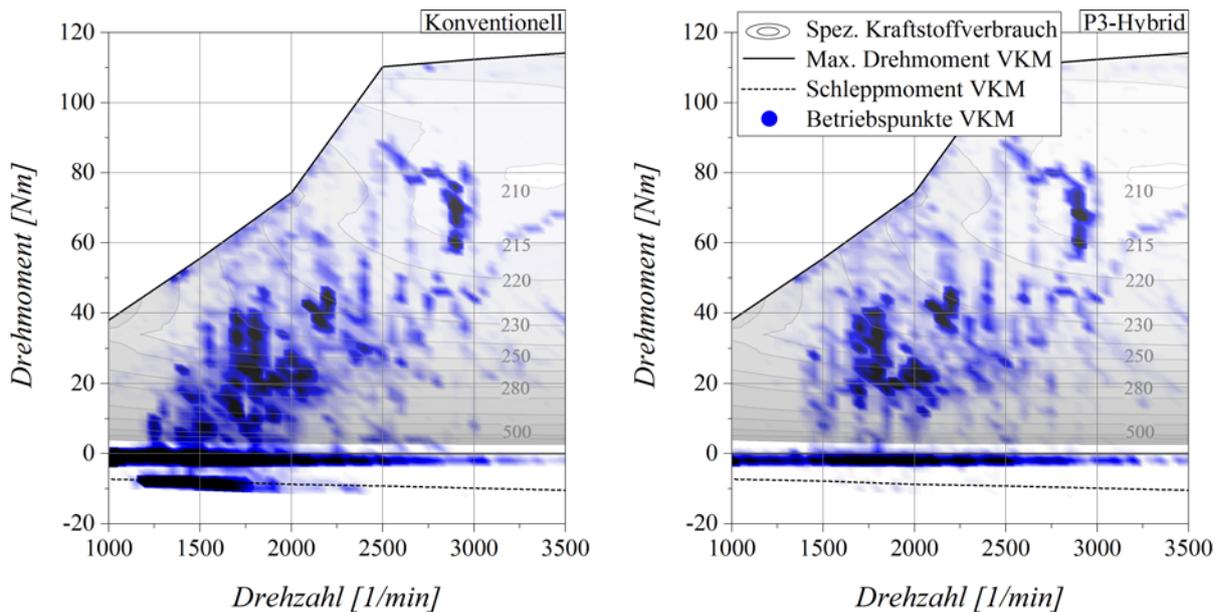


Abbildung 4.34: Betriebspunkte des Verbrennungsmotors im WLTP ohne Hybridisierung (li.) und in der P3-Konfiguration (re.) mit Anbindung des 48 Volt Riemen-Starter-Generators an den Getriebeausgang

Abschließend lassen sich die Verbrauchsreduktionen, welche auf der Integration eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators in den ultraleichten Fahrzeugverbund basieren, anhand Tab. 4.4 zusammenfassend darstellen. Ausgehend von der konventionellen 12 Volt Struktur, sind die Einzelpotenziale resultierend aus Rekuperation und elektrischem Fahren plus Anfahren für die Full-Hybrid P2- und P3-Variante unterschieden nach NEFZ und WLTP Fahrzyklus aufgelistet. Demnach kann durch die Anbindung des 48 Volt RSG an die Getriebeeingangswelle (P2) der Verbrauch durch regenerative Bremsvorgänge im NEFZ um -7,6 % und im WLTP um -6,9 % reduziert werden. Da in beiden Konfigurationen ein Energieüberschuss in der Batterie entsteht, welcher erst im zweiten Schritt durch elektrische Fahr- bzw. Anfahrvorgänge aufgebraucht wird, stellt sich für die P3-Topologie ein ähnliches Potenzial ein (-7,7 % NEFZ, -7,2 % WLTP), wobei die rekuperierte Energie entsprechend den Ausführungen in Kap. 4.2.2.2 deutlich gestiegen ist. Durch die Substitution ineffizienter VKM Betriebspunkte können bei P2-Anordnung des RSG -9,7 % (NEFZ) und -5,2 % (WLTP) eingespart werden. In der P3-Topologie steigt das Potenzial durch elektrisches Fahren bzw. Anfahren auf -10,7 % im NEFZ und -6,2 % im WLTP. In dieser Antriebskonfiguration stellt sich zusammenfassend das größte Verbrauchspotenzial ein. Inklusive Start Stopp ergibt sich somit eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ von 2,89 kg/100km (Kap. 4.2.2.1) um -23,2 % auf ein Minimum von 2,22 kg/100km. Im WLTP Fahrzyklus wird der Verbrauch von 2,92 kg/100km (Kap. 4.2.2.1) um -16,1 % auf 2,45 kg/100km gesenkt. Unberücksichtigt bleibt dabei zunächst eine potenzielle Zugkraftunterstützung durch den Riemen-Starter-Generator im Schaltvorgang. Diese Funktion unterstützt vorrangig den Komfortaspekt (Kap. 4.2.3) und trägt, wie aus den Analysen hervorgeht, nicht zur Verbrauchsreduktion bei. Wird dieses Feature in die Verbrauchsbilanzierung aufgenommen, wird das Gesamtpotenzial um bis zu 3,8 % im NEFZ und 4,1 % im WLTP gemindert.

Tabelle 4.4: Zusammenfassende Darstellung der Verbrauchsreduktion im NEFZ und WLTP durch die Integration eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators in einer P2- und P3-Konfiguration

	Konventionell		P2-Hybrid (48 Volt)		P3-Hybrid (48 Volt)	
	Lichtmaschine + Ritzelstarter		Riemen-Starter-Generator an Getriebeeingangswelle		Riemen-Starter-Generator am Differenzial (Achse)	
	NEFZ	WLTP	NEFZ	WLTP	NEFZ	WLTP
Start Stopp	-5,2 %	-3,1 %	-5,2 %	-2,7 %	-4,8 %	-2,7 %
Rekuperation			-7,6 %	-6,9 %	-7,7 %	-7,2 %
Elektrisch Fahren / Anfahren			-9,7 %	-5,2 %	-10,7 %	-6,2 %
Gesamt:	-5,2 %	-3,1 %	-22,5 %	-14,8 %	-23,2 %	-16,1 %

4.2.2.7 Optimierungsansätze

Im Folgenden soll eine simulative Sensibilitätsanalyse für die 48 Volt P3-Antriebslösung durchgeführt werden, welche auf Grund des größten Verbrauchspotenzials für eine weitere Optimierung favorisiert wurde. Basierend auf den Energieflussanalysen (Kap. 4.2.2.6) ist zu erkennen, dass vor allem die Energiewandlung zwischen dem mechanischen und elektrischen Pfad Verbesserungspotenzial aufweist. Zu berücksichtigen sind dabei die generatorischen und motorischen Verluste des Riemen-Starter-Generators sowie die Energieeinbußen durch Lade- und Entladevorgänge der 48 Volt Batterie. Das in Kap. 3.1.2.2 vorgestellte Leistungsspektrum des verwendeten 48 Volt Riemen-Starter-Generators entspricht teilweise nicht dem Niveau vergleichbarer RSG Systeme (Kap. 2.2.2) und wurde zur Potenzialabschätzung angehoben. Die ungenügende Generatorregelung unterhalb einer RSG Drehzahl von 2000 1/min wurde optimiert und der Einfluss auf den Gesamtverbrauch bewertet. Basierend auf der Substitution des automatisierten Schaltgetriebes im P2-Antriebsstrang durch ein Doppelkupplungsgetriebe¹, konnten die negativen Effekte der schaltbedingten Zugkraftunterbrechung auf das hybride Verhalten besser separiert werden. Abschließend zeigt eine Analyse der VKM Effizienz, welches theoretische Potenzial im verbrennungsmotorischen Antrieb verbleibt. Zusammenfassend werden die nachfolgend angeführten Optimierungen im weiteren Verlauf detaillierter beschrieben:

- Leistung Riemen-Starter-Generator (motorisch und generatorisch)
- Wirkungsgrad Riemen-Starter-Generator (motorisch und generatorisch)
- Wirkungsgrad 48 Volt Batterie (Laden und Entladen)
- Gesamtoptimierung der elektrischen Komponenten 48 Volt RSG und 48 Volt Batterie
- Optimierung der Generatorregelung unterhalb einer RSG Drehzahl von 2000 1/min
- Implementierung eines Doppelkupplungsgetriebes in den P2-Antriebsstrang
- Adaption der verbrennungsmotorischen Betriebspunkte hinsichtlich optimaler Effizienz

In Abb. 4.35 werden dazu die angeführten Einflussfaktoren (Leistung RSG, Wirkungsgrad RSG und Batterie) im Hinblick auf ihren Originalwert (Faktor 1), aus dem das in Kap. 4.2.2.6 Tab. 4.4 dargestellte Gesamtpotenzial resultiert, fakturiert. Eine Minderung des Faktors bedeutet eine Abnahme der Leistung bzw. des Wirkungsgrads, umgekehrt entspricht eine Erhöhung der Fakturierung einer Leistungs- bzw. Effizienzsteigerung.

Aus Abb. 4.35 (oben) wird ersichtlich, dass die Anhebung der Leistung des Riemen-Starter-Generators sowohl motorisch bzw. generatorisch als auch in Kombination unabhängig vom gewählten Fahrprofil nur eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf das weitere Verbrauchspotenzial erzielt. Aus den Rekuperationsanalysen in Kap. 4.2.2.2 geht hervor, dass mit der

¹Doppelkupplungsgetriebe: Automatisiertes Schaltgetriebe, bei dem die geraden bzw. ungeraden Gänge jeweils auf zwei separate Teilgetriebe aufgeteilt und über getrennte Kupplungen zugeschaltet werden, so dass keine Zugkraftunterbrechung entsteht

vorhanden Leistung des RSG bereits ein überwiegender Anteil der Bremsenergie regenerativ zurückgewonnen werden kann. Somit führt eine Erhöhung der Generatorleistung um das 1,5 fache zu einer Verbrauchsreduktion von lediglich -0,8 % im NEFZ und -1,4 % im WLTP. Obwohl die mechanische Antriebsleistung des RSG mit 5,8 kW (Kap. 3.1.2.2) eher gering erscheint, bringt eine Leistungssteigerung kaum Verbrauchsvorteile. Grundsätzlich wird der RSG motorisch nicht an der Vollast betrieben, sondern der elektrische Nutzungsbereich anhand der Wirkungsgradbilanzierung von VKM und RSG vorgenommen (Kap. 3.1.3.5). Da die Effizienz jedoch identisch bleibt, werden im Vergleich zur Ausgangskonfiguration ähnliche verbrennungsmotorische Betriebspunkte ersetzt. Somit resultiert das Fazit, dass eine Anhebung der RSG Leistung nur sinnvoll erscheint, wenn der Wirkungsgrad des RSG ebenfalls gesteigert werden kann, da sich dadurch der elektrisch nachhaltige Antriebsbereich vergrößert.

In der mittleren Darstellung in Abb. 4.35 wird der Einfluss des RSG Wirkungsgrads auf den potenziellen Kraftstoffverbrauch hervorgehoben. Entsprechend den signifikanten generatorischen und motorischen Umwandlungsverlusten, welche bereits aus den SANKEY-Diagrammen in Abb. 4.27 und Abb. 4.32 hervorgehen, resultiert in diesem Fall ein nachhaltiger Einfluss auf den Verbrauch. Kann der motorische Wirkungsgrad des RSG auf das 1,1 fache gesteigert werden, ergibt sich eine Verbrauchsreduktion von -0,9 % im NEFZ und -1,2 % im WLTP. Im Rückblick auf den Basiswirkungsgrad (Kap. 3.1.2.2, Abb. 3.8) initiiert dies einen Spitzenwirkungsgrad von ca. 97 %. Eine Steigerung des generatorischen Wirkungsgrads um ebenfalls 1,1 (entspricht ca. 89 % im Bestpunkt) reduziert den Verbrauch im NEFZ und WLTP jeweils um -1,0 %, wenn die motorische Effizienz identisch zur Ausgangsvariante bleibt. Können die Wirkungsgrade im gesamten Kennfeld (Motor und Generator) um das 1,1 fache gesteigert werden, sinkt der Verbrauch im NEFZ um -3,9 % und im WLTP um -2,2 %. Ein weitere Anhebung der Generatoreffizienz um das 1,2 fache (entspricht ca. 97 % im Bestpunkt) erzielt in Kombination mit dem 1,1 fachen Motorwirkungsgrad eine Gesamtreduktion von -5,7 % im NEFZ und -3,3 % im WLTP.

Da es sich im vorliegenden Antriebskonzept um einen parallelen Antriebsstrang mit nur einer elektrischen Maschine handelt, muss die Energie, welche über den Riemen-Starter-Generator erzeugt wird, zunächst in der 48 Volt Batterie zwischengespeichert werden, um diese als elektrische Antriebsenergie zu einem späteren Zeitpunkt wieder abrufen zu können. Aus diesem Grund wirken sich auch die Lade- und Entladeverluste (Abb. 4.35, unten), resultierend aus dem Innenwiderstand der Batterie, auf die potenzielle Verbrauchsreduktion aus. Würde die Effizienz für die Energieentnahme sowie Energiezufuhr um den Faktor 1,08 gesteigert werden, würde dies eine Verbrauchsreduktion von -1,7 % im NEFZ und -1,1 % im WLTP indizieren.

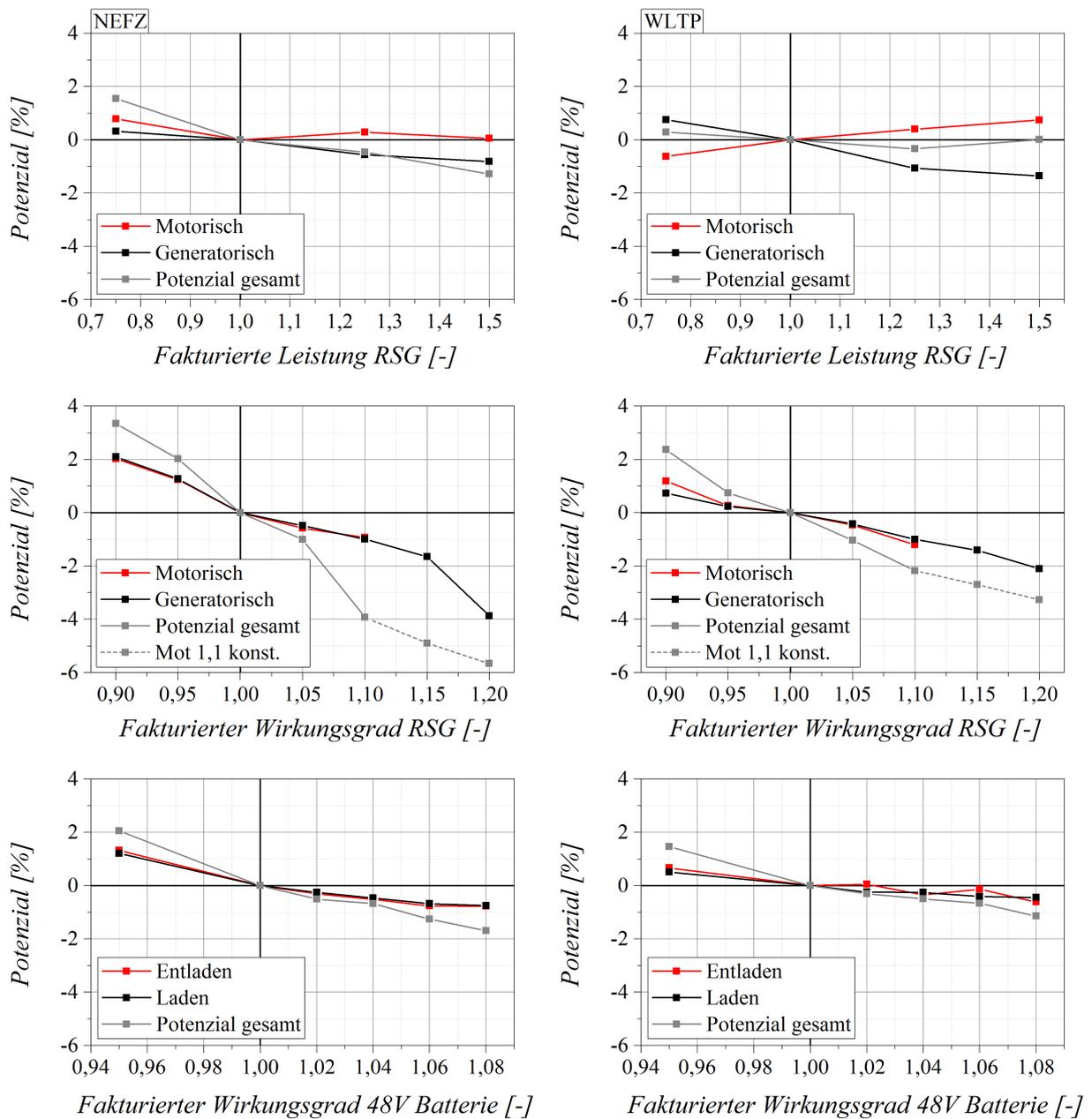


Abbildung 4.35: Sensitivitätsanalyse zur weiteren Optimierung des elektro-hybriden P3-Antriebsstrangs; Verbrauchspotenzial für den NEFZ (li.) und WLTP (re.) Fahrzyklus in Abhängigkeit der Leistung des RSG (oben) sowie der Wirkungsgrade des RSG (mittig) und der 48 Volt Batterie (unten)

Zusammenfassend lässt sich aus der zuvor aufgestellten Sensitivitätsanalyse ein Grenzpotenzial ermitteln, bei dem die Leistung des RSG (1,5) sowie dessen Wirkungsgrad (Motor 1,1 und Generator 1,2) und die Lade- und Entladeeffizienz (1,08) der Batterie angehoben wird. In diesem speziellen Fall kann ein zusätzliches Verbrauchspotenzial von bis zu -8,2 % im NEFZ und -6,1 % im WLTP für den elektro-hybriden P3-Antriebsstrang erschlossen werden. Damit kann die in Kap. 4.2.2.6 (Tab. 4.4) ermittelte Verbrauchsreduktion auf ein absolutes Minimum von -31,4 % (NEFZ) und -22,2 % (WLTP) im Vergleich zur konventionellen 12 Volt Antriebslösung ohne Start Stopp gesteigert werden.

Durch die Anhebung der Wirkungsgrade des RSG und der Batterie wird insbesondere der Grenzwirkungsgrad zur Bestimmung des elektrisch nachhaltigen Fahrbereichs erhöht und

damit der verbrauchsschonende Betrieb des Riemen-Starter-Generators als Traktionsmotor erweitert. Entsprechend den Analysen in Kap. 4.2.2.4 wird der Grenzwirkungsgrad von maximal 19,1 % (NEFZ) und maximal 18,2 % (WLTP) auf bis zu 28,7 % (NEFZ) und 26,9 % (WLTP) gesteigert. Abb. 4.36 veranschaulicht zusätzlich, welche Betriebsbereiche des Verbrennungsmotors so zukünftig durch die zuvor angeführte Optimierung über den Elektromotor nachhaltig ersetzt werden könnten.

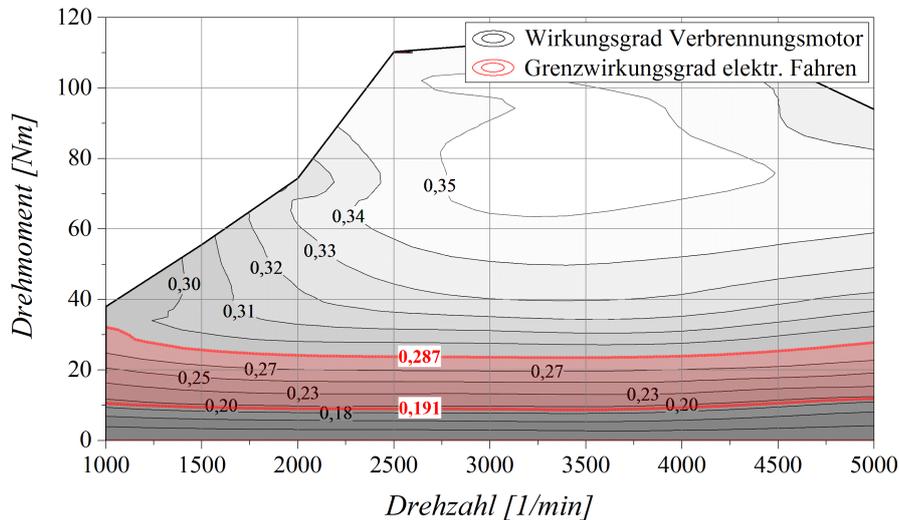


Abbildung 4.36: Steigerung des Grenzwirkungsgrads im NEFZ (von 19,1 % auf 28,7 %) für den elektrischen Betrieb durch Anhebung der Leistung und des Wirkungsgrads des 48 Volt Riemen-Starter-Generators sowie der Lade- und Entladeeffizienz der Batterie

Des Weiteren wird, wie aus den Vermessungen hinsichtlich des maximalen Drehmoments des 48 Volt RSG (Kap. 3.1.2.2, Abb. 3.8) hervorgeht, das Generatormoment unterhalb einer Drehzahl von 2000 1/min durch die interne Steuerung der Elektromaschine auf 0 Nm reduziert. Hauptsächlich ergeben sich für den P3-Antriebsstrang durch das feste Übersetzungsverhältnis des RSG zur Antriebsachse Nachteile für den Rekuperationsbetrieb, da das Generatormoment somit nur für Geschwindigkeiten über 20 km/h aufgebracht werden kann. Dies schränkt das Rekuperationspotenzial vor allem für den innerstädtischen Betrieb mit einem vorrangig niedrigen Geschwindigkeitsniveau deutlich ein. Eine weitere Analyse bewertet aus diesem Grund das Verbrauchspotenzial, welches sich ergibt, wenn die RSG Steuerung optimiert wird und der Generatormodus erst unterhalb einer Drehzahl von 500 1/min deaktiviert wird. Demnach steigt die regenerativ gewonnene Gesamtenergie weiter an, so dass ein größerer Teil des Energiebedarfs, welcher durch das Bordnetz bzw. durch elektrische Fahrvorgänge hervorgerufen wird, kompensiert werden kann und damit die Anteile, in denen die VKM zusätzlich über den Generator aufgelastet werden muss, sinken. Dadurch ergibt sich, bezogen auf das Gesamtpotenzial (Kap. 4.2.2.6, Tab. 4.4), eine weitere Reduktion des Verbrauchs im NEFZ um -1,9 % auf insgesamt -25,1 % sowie im WLTP um -1,0 % auf -17,1 %.

Im Hinblick auf die Verbrauchsanalysen in Kap. 4.2.2.6 (Tab. 4.4) erlangt die P3-Topologie einen Vorteil gegenüber dem P2-Antriebsstrang. Auch in der Komfortbewertung beider Antriebslayouts (Kap. 4.2.3) stellt sich die Anbindung des Riemen-Starter-Generators nach dem Getriebe (P3) als vorteilhaft dar. Grund dafür ist vor allem das diesen Analysen zu Grunde liegende automatisierte Schaltgetriebe, welches, bedingt durch die langen Schaltzeiten, den Energiefluss zwischen den Antriebsrädern und dem RSG in jedem Schaltvorgang unterbricht und damit negativ beeinflusst. Die Nachteile des vorhandenen automatisierten Schaltgetriebes können durch die Integration eines Doppelkupplungsgetriebes umgangen werden. In Summe ergibt sich so ein Verbrauchspotenzial des 48 Volt P2-Antriebsstrangs mit Doppelkupplungsgetriebe von -23,6 % (NEFZ) und -15,8 % (WLTP), welches dem Niveau des P3-Hybrids entspricht.

Im Folgenden soll das verbleibende Potenzial der VKM, welche nach wie vor den Hauptantrieb im vorliegenden Hybridkonzept (P3) darstellt, untersucht werden. Aus den Energieflussanalysen für den konventionellen und den P3-Antriebsstrang (Kap. 4.2.2.6) geht hervor, dass durch die Integration eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators und Implementierung einer nachhaltigen Betriebsstrategie die mittlere Effizienz des Verbrennungsmotors sowohl im NEFZ als auch im WLTP erhöht werden kann. Abb. 4.37 stellt dahingehend die Wirkungsgradverteilung der VKM im NEFZ noch einmal gegenüber. Zu erkennen ist, dass die relative Anzahl der Betriebspunkte unterhalb einer Effizienz von 27,0 % im elektro-hybriden Antriebsstrang im Vergleich zum konventionellen Konzept abnimmt, während die Verweildauer bei höheren Wirkungsgraden zunimmt. In Summe resultiert daraus, wie bereits aus den SANKEY-Analysen bekannt, eine mittlere VKM Effizienz des P3-Hybrids von 30,0 %. Im Bestpunkt (Kap. 3.1.2.1) weist der verwendete Verbrennungsmotor im CNG Betrieb einen minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch von ca. 210 g/kWh auf, was entsprechend der Leistung in diesem Punkt einer maximalen Effizienz von ca. 35,6 % entspricht. Würden alle verbleibenden Betriebspunkte der VKM dahingehend optimiert, könnte der Kraftstoffverbrauch des 48 Volt P3-Antriebsstrangs im NEFZ um weitere -12,5 % reduziert werden.

Diese Grenzwertanalyse wurde analog auch im WLTP Fahrprofil durchgeführt (Abb. 4.38). Auf Grund der höheren Dynamik im Zyklus mit einem entsprechend geringeren Anteil konstanter Geschwindigkeiten ergibt sich im Vergleich zur NEFZ Auswertung (Abb. 4.37) eine homogenere Verteilung der Häufigkeiten. In Summe erreicht der hybride P3-Antriebsstrang eine mittlere Effizienz von 30,3 %. Eine idealisierte Betrachtung bei einem verbrennungsmotorischen Wirkungsgrad von 35,6 % für alle Betriebspunkte würde den Verbrauch theoretisch um weitere -10,5 % reduzieren.

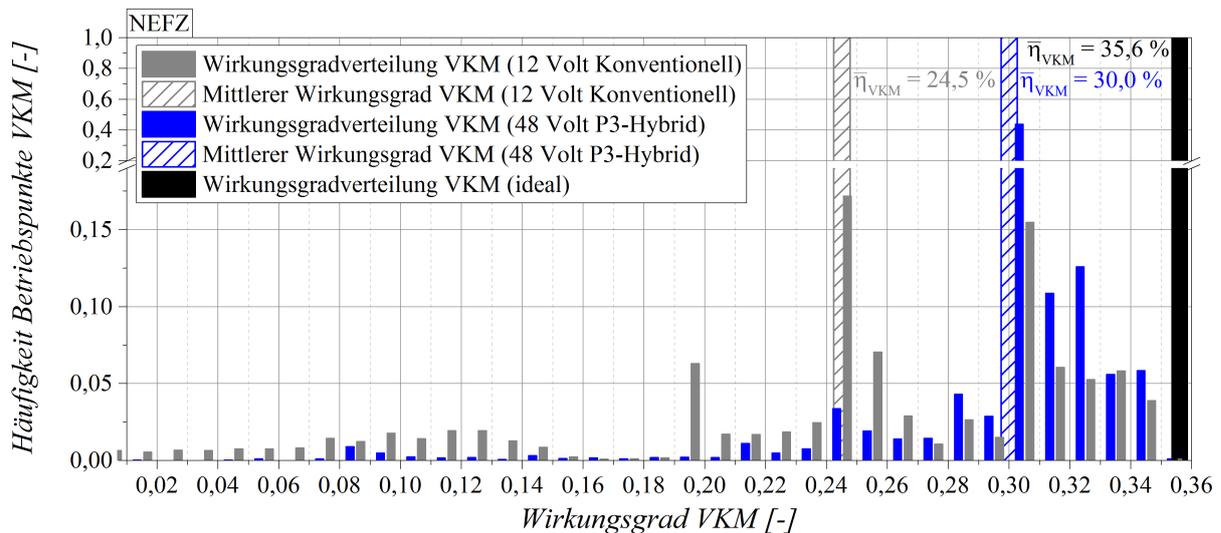


Abbildung 4.37: Wirkungsgradverteilung (Histogramm) der VKM Betriebspunkte im NEFZ für den konventionellen 12 Volt und den hybriden 48 Volt P3-Antriebsstrang; Darstellung der mittleren sowie der maximalen VKM Effizienz

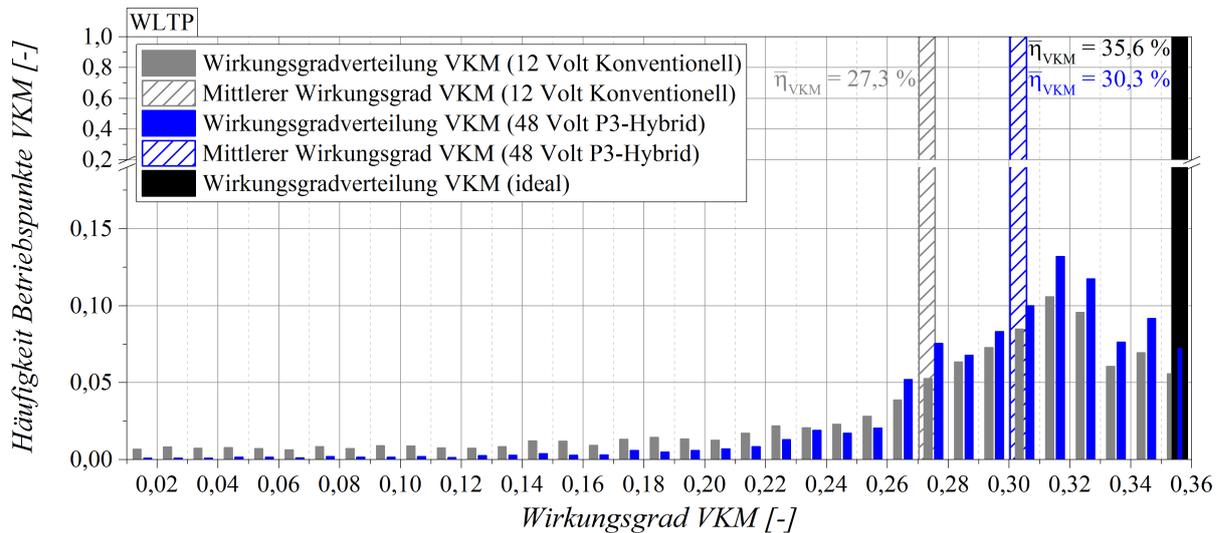


Abbildung 4.38: Wirkungsgradverteilung (Histogramm) der VKM Betriebspunkte im WLTP für den konventionellen 12 Volt und den hybriden 48 Volt P3-Antriebsstrang; Darstellung der mittleren sowie der maximalen VKM Effizienz

Rückblickend wurden ausgewählte Maßnahmen vorgestellt, welche die Sensibilität verschiedener Optimierungsansätze auf den Kraftstoffverbrauch aufzeigen. Es lässt sich zusammenfassen, dass insbesondere die verlustbehaftete Energieumwandlung zwischen elektrischem und mechanischem Pfad einer weiteren Optimierung bedarf. Eine Anhebung der generatorischen und motorischen Wirkungsgrade des Riemen-Starter-Generators in Kombination mit einer weiteren Leistungssteigerung unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Ströme weist vor allem in Kombination mit einer optimierten Lade- und Entladeeffizienz der 48 Volt Batterie ein signifikantes Verbrauchspotenzial auf. Eine optimierte generatorische Momentenregelung für Drehzahlen unter 2000 1/min würde die Nachhaltigkeit des Rekuperationsbetriebs besonders für den P3-Antriebsstrang weiter ausweiten. Die Verbrauchsvorteile der

in Kap. 4.2.2.6 favorisierten P3-Antriebslösung können durch die Integration eines Doppelkupplungsgetriebes und damit zugkraftunterbrechungsfreier Schaltvorgänge auch in einer P2-Topologie erreicht werden. Dabei gilt es den konstruktiven Aufwand dieser unterschiedlichen Architekturen auf den jeweiligen Anwendungsfall gezielt abzustimmen. Die Auswertung der mittleren Effizienz des Verbrennungsmotors zeigt, dass die VKM durch die Hybridisierung im Vergleich zum konventionellen Antrieb bereits in einem optimaleren Betriebsbereich mit entsprechend höheren Wirkungsgraden betrieben wird. Dennoch konnte der signifikante Stellenwert einer fortschreitenden Optimierung der VKM durch eine weitere theoretische Anhebung des mittleren Wirkungsgrads herausgearbeitet werden.

4.2.2.8 Einfluss Fahrzeuggewicht

In weiterer Folge wurde eine Analyse entsprechend Abb. 4.39 durchgeführt, welche die energetischen Auswirkungen für den Rekuperations- sowie elektrischen Fahrbetrieb im NEFZ und WLTP aufzeigt, wenn das potenzielle Fahrzeuggewicht variiert wird. Als Grundlage dient der elektro-hybride Antriebsstrang mit 48 Volt Riemen-Starter-Generator und P3-Topologie. Zum simulativen Vergleich wurden schwerere Varianten mit einem Bezugsgewicht von 1100 kg, 1600 kg und 2100 kg gewählt. Des Weiteren wurde zur Grenzbetrachtung des 48 Volt Hybridantriebs das Fahrzeuggewicht auf 600 kg reduziert. Das VKM Moment wurde hinsichtlich gleichem Beschleunigungsverhalten der verschiedenen Fahrzeugsegmente skaliert. Das motorische und generatorische Volllastverhalten des 48 Volt Riemen-Starter-Generators ist in allen Klassen identisch den Vermessungen aus Kap. 4.1.2.1. Zusätzlich wurde eine Adaption der Fahrwiderstände bei den unterschiedlichen Gewichtsklassen vorgenommen. Diese Werte orientieren sich dabei an Eigenschaften, welche im jeweiligen Segment als charakteristisch angesehen werden können. Lediglich der Fahrwiderstand, resultierend aus dem $c_w \cdot A$ Verhältnis, des 600 kg Fahrzeugs wurde überdurchschnittlich um ca. 50 % gegenüber dem 782,9 kg Fahrzeug reduziert, wobei diese Annahme das derzeit technisch Mögliche im serienmäßigen Fahrzeugbau repräsentiert. Da die Zertifizierung des Kraftstoffverbrauchs im Fahrzyklus ohne Berücksichtigung etwaiger elektrischer Zusatzverbraucher basierend aus z.B. potenziellen Komfortfunktionen erfolgt, wurde von einer gleichbleibenden konstanten Bordnetzleistung von 130 W ausgegangen, welche basierend auf den Validierungsmessungen (Kap. 4.1.2.1) vorrangig aus dem Antriebsstrangsteuergerät und den elektrischen Nebenaggregaten stammt. Der reale Energieverbrauch im Bordnetz, welcher nicht aus der Nutzung der Elektromaschine bei einem Hybridantrieb resultiert, kann jedoch in den einzelnen Fahrzeugsegmenten sehr unterschiedlich ausfallen, wobei tendenziell eine höhere Bordnetzleistung mit einem steigenden Fahrzeuggewicht erwartet wird.

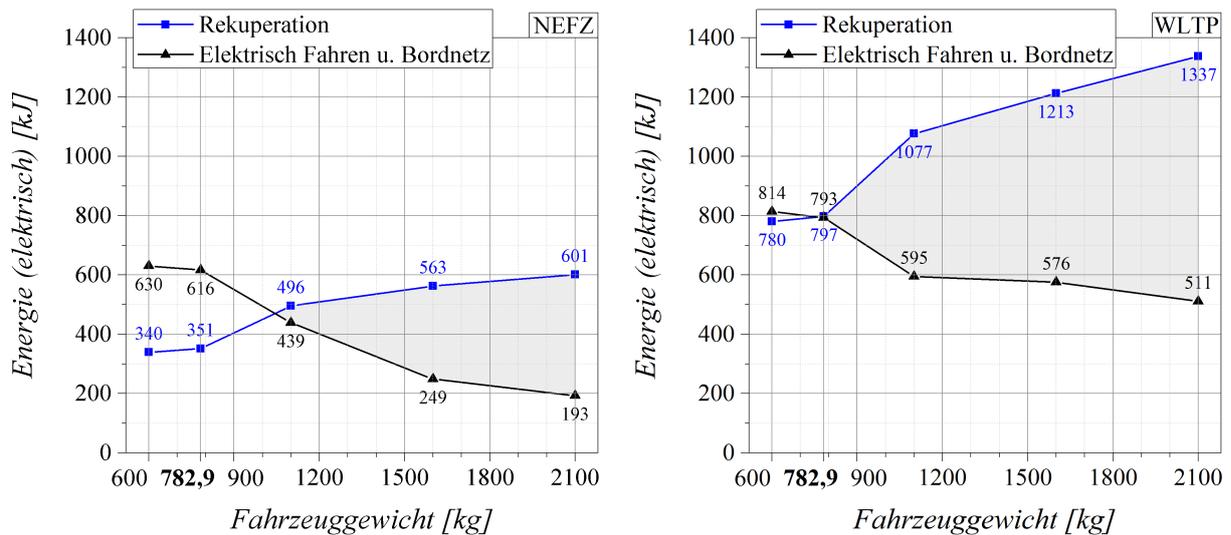


Abbildung 4.39: Einfluss des Fahrzeuggewichts (Bezugsgewicht) auf die Energiebilanz resultierend aus Rekuperation und elektrischem Fahrbetrieb für den 48 Volt P3-Antriebsstrang im NEFZ (li.) und WLTP (re.) Fahrprofil

Bei Betrachtung des Energiepotenzials (Abb. 4.39), welches aus regenerativen Bremsvorgängen stammt, kann im NEFZ ein direkter Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht (Bezugsgewicht) und Rekuperationsenergie festgestellt werden. Grundsätzlich erhöht sich mit dem Fahrzeuggewicht auch die kinetische Verzögerungsenergie, welche unter Berücksichtigung der Leistungsgrenzen des RSG zu einem höherem Energieplus in der 48 Volt Batterie mit steigender Fahrzeugmasse führt. Durch die überproportionale Reduktion der aerodynamischen Verluste für das 600 kg Fahrzeug können die Rekuperationseinbußen auf Grund des geringeren Fahrzeuggewichts kompensiert werden und die regenerativ zurückgewonnene Energie entspricht ca. dem Niveau des 782,9 kg Fahrzeugs. In allen Varianten kann die Bordnetzbelastung von 130 W ausschließlich über die rekuperierte Energie gedeckt werden, so dass eine zusätzliche Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors über den Generator (RSG) zum Ausgleich des Batterieladezustands nicht notwendig ist. Demnach ist das Verbrauchspotenzial stark davon abhängig, welcher Bordnetzverbrauch tatsächlich in der jeweiligen Gewichtsklasse vorliegt. Wird die überschüssige Energie aus der Rekuperation in eine mittlere elektrische Bordnetzleistung umgerechnet, genügt die Energie, um die in Tab. 4.5 dargestellten Leistungen über die Fahrzyklusdauer zu kompensieren.

Tabelle 4.5: Theoretische Bordnetzleistungen zur Kompensation der überschüssigen Rekuperationsenergie für unterschiedliche Fahrzeugmassen im NEFZ und WLTP

Bezugsgewicht	600 kg	782,9 kg	1100 kg	1600 kg	2100 kg
NEFZ	241 W	249 W	348 W	408 W	440 W
WLTP	371 W	374 W	498 W	585 W	659 W

Weiterführend ist in Abb. 4.39 der elektrische Energieverbrauch dargestellt, wie dieser aus der potenziellen Nutzung des RSG als Antriebsmotor sowie der Bordnetzbelastung (130 W)

resultiert. Es lässt sich für beide Fahrzyklen eine Abnahme des Energieverbrauchs mit steigender Bezugsmasse erkennen. Da die Belastung durch das Bordnetz in allen Fahrzeugklassen für den jeweiligen Fahrzyklus identisch bleibt, begründet sich dieses Verhalten auf die steigenden Fahrleistungsanforderungen mit zunehmenden Bezugsgewicht und die damit limitierten Nutzungsmöglichkeiten des 48 Volt Riemen-Starter-Generators als Traktionsmotor. Tendenziell werden bis zu einem Gewicht von 1100 kg ähnliche Konstantfahranteile im Zyklus elektrisch gefahren. Ein rein elektrischer Anfahrtrieb stellt sich auf Grund der limitierten motorischen Leistung des RSG jedoch für diese Gewichtsklasse nicht mehr als sinnvoll dar. Darüber hinaus wird es für den elektrischen Antriebspfad in schwereren Fahrzeugklassen zunehmend ineffizienter, auch leichte Beschleunigungen auf Grund des steigenden Energiebedarfs elektrisch zu fahren. Somit kann die überschüssige Energie aus Rekuperationsvorgängen nicht unmittelbar aufgebraucht werden. Ausblickend bleibt anzumerken, dass das resultierende Energieplus im realen Fahrbetrieb nachhaltig zur Kompensation des zumeist höheren Bordnetzbedarfs eingesetzt werden kann. Weiterhin ist auch eine Lastpunktabsenkung durch eine gezielte elektrische Unterstützung des konventionellen Antriebs durch den Riemen-Starter-Generator zur Steigerung des Fahrkomforts denkbar.

4.2.3 Komfortbewertung

Im Gegensatz zu den in Kap. 4.1.3 vorgestellten Komfortverbesserungen durch die Adaption eines 12 Volt Riemen-Starter-Generators an die Getriebeeingangswelle ergeben sich bei dem 48 Volt System zusätzliche Möglichkeiten, den Fahrkomfort positiv zu beeinflussen. Wie im weiteren Verlauf dargelegt, trägt dabei vor allem die deutlich gesteigerte Antriebsleistung des 48 Volt RSG sowie die alternative Anbindung an das Differenzial (P3-Hybrid) bei. Die Momentenaddition von VKM und RSG im Boostbetrieb wirkt sich positiv auf das Beschleunigungs- und Durchzugsvermögen des ultraleichten Konzepts aus. Je nach Integrationsort des RSG in den konventionellen Antriebsstrang ergibt sich der in Abb. 4.40 (P2-Hybrid) und Abb. 4.41 (P3-Hybrid) dargestellte kombinierte Drehmomentverlauf.

In der P2-Konfiguration ist die RSG Drehzahl von der Motordrehzahl abhängig, eine Drehmomentunterstützung kann somit unabhängig von der Geschwindigkeit und des aktuellen Gangs bis ca. 3750 1/min erfolgen. Dies entspricht einer RSG Drehzahl von ca. 10.000 1/min, darüber kann der RSG nicht mehr antreiben. Insbesondere das geringere Low-End-Torque des CNG Verbrennungsmotors kann in der P2-Konfiguration zufriedenstellend kompensiert werden. Das in Abb. 4.40 gezeigte summierte Gesamtmoment beschreibt das theoretische Maximum zur Beurteilung des Beschleunigungs- und Elastizitätspotenzials. Im Zuge einer harmonischen Drehmomententwicklung des Gesamtantriebsstrangs sollte das Moment jedoch entsprechend der gestrichelten Linie begrenzt werden.

Im Gegensatz dazu ist die RSG Drehzahl in der P3-Konfiguration (Abb. 4.41) über ein festes

Übersetzungsverhältnis mit der Achsdrehzahl gekoppelt und damit direkt abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Somit kann der RSG bis ca. 107 km/h mit einem Boostmoment unterstützen, bevor die motorische Maximaldrehzahl erreicht wird.

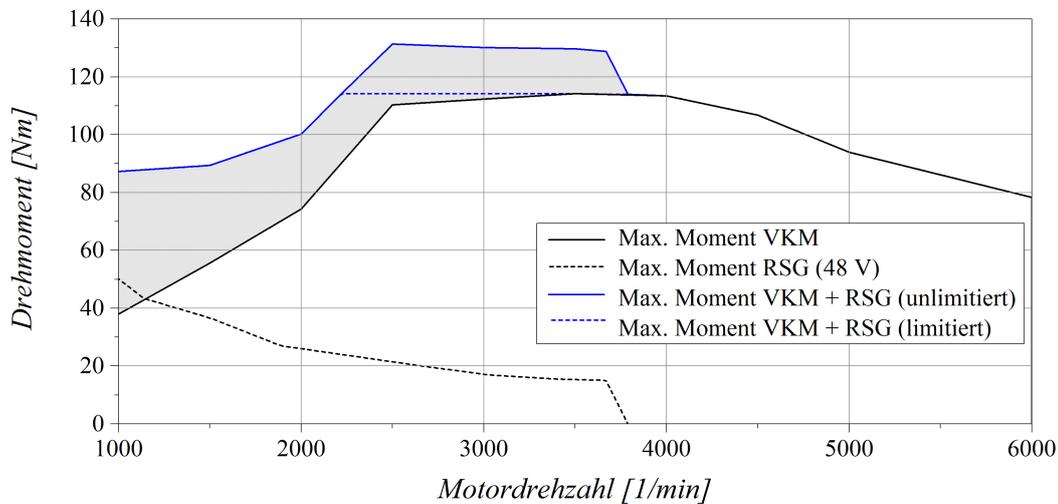


Abbildung 4.40: Maximale Momente von Verbrennungsmotor (stationär) sowie 48 Volt Riemen-Starter-Generator bezogen auf Kurbelwellenniveau; Summiertes Gesamtmoment im Boost Modus für P2-Struktur

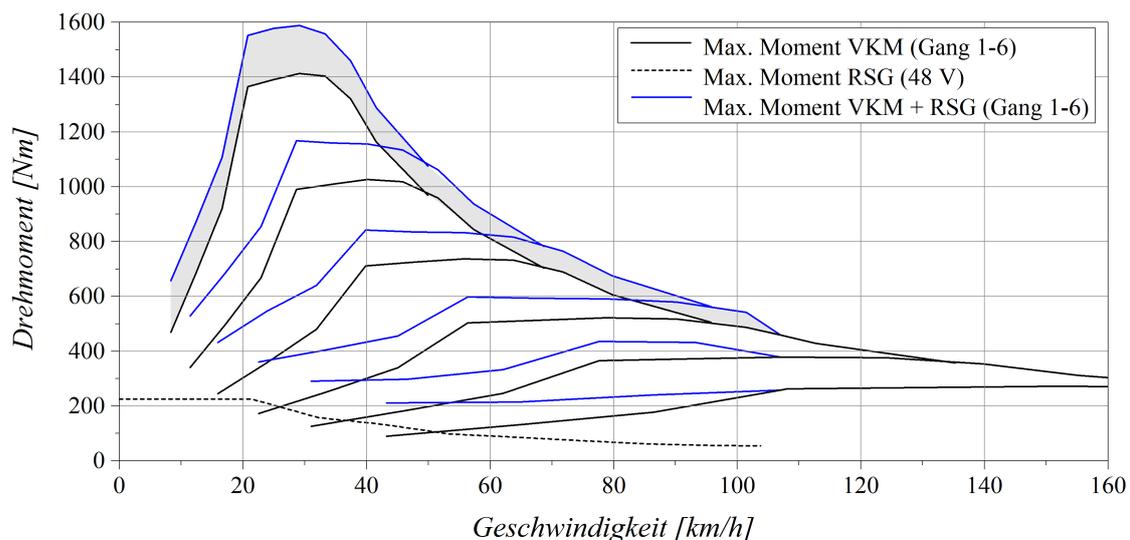


Abbildung 4.41: Maximale Momente von Verbrennungsmotor (stationär) sowie 48 Volt Riemen-Starter-Generator bezogen auf Achsniveau; Summiertes Gesamtmoment im Boost Modus für P3-Struktur

Ein entscheidendes Kriterium zur Festlegung des Integrationsortes des RSG in den Antriebsstrang stellt die Wahl des Getriebes dar. Im Hinblick auf das automatisierte Schaltgetriebe und den signifikant langen Schaltzeiten von bis zu 1,8 Sekunden mit der entsprechenden Zugkraftunterbrechung stellt sich die Adaption des RSG an das Differenzial als deutlicher Komfortgewinn dar, auch wenn sich diese Form der Anbindung als konstruktiv aufwändiger erweist. Zur Veranschaulichung der dadurch generierten Möglichkeit eine Drehmomentunterstützung im Schaltvorgang zu ermöglichen, soll anhand der in Abb. 4.42 und Abb. 4.43 durchgeführten Simulationen (jeweils links) sowie Messungen (jeweils rechts) am realen P3-Antriebssystem für unterschiedliche Beschleunigungsanforderungen dargestellt werden.

Ausgehend von einem vom Fahrer indizierten Wunschmoment von 15 Nm zeigt Abb. 4.42 für den beispielhaft gewählten Schaltvorgang von Gang 3 auf Gang 4, dass im Vergleich zur konventionellen Antriebsart (ohne RSG Stützmoment) keinerlei Zugkraftunterbrechung auftritt. Diese Unterstützungsfunktion kann ohne Einbußen in der Zugkraft bis zu einem Fahrerwunschmoment von 40 Nm aufrechterhalten werden. Danach kann der RSG das angeforderte Beschleunigungsmoment nur noch teilweise bedienen, so dass es, wie in Abb. 4.43 für ein Fahrerwunschmoment von 50 Nm ersichtlich, zu einer Abnahme der Beschleunigung im Schaltvorgang kommt. Der daraus indizierte Geschwindigkeitsverlust kann im Vergleich zum konventionellen Antrieb dennoch geringer gehalten werden, wodurch ein komfortableres Schaltverhalten realisiert werden kann.

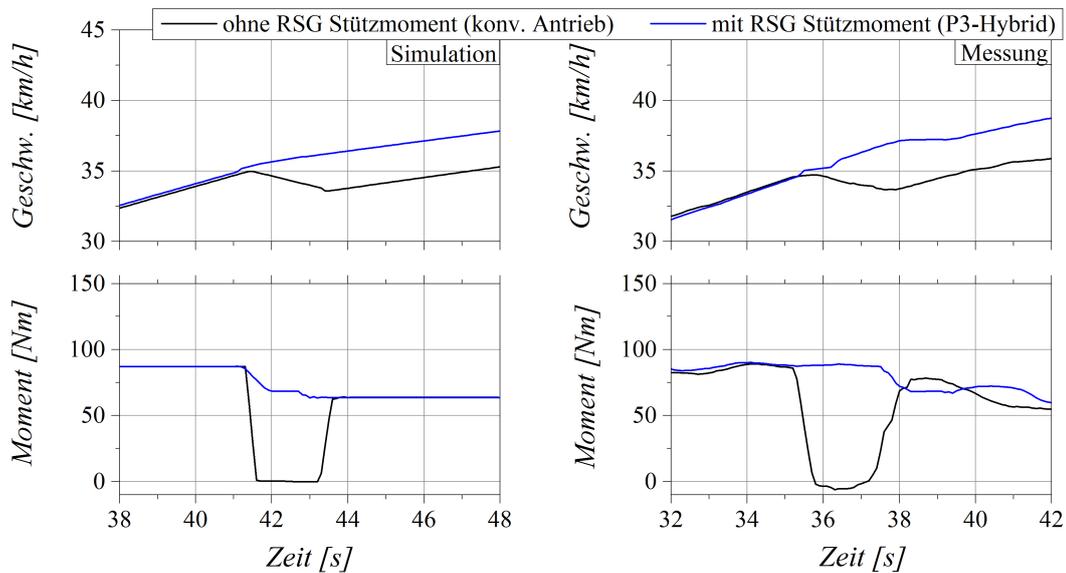


Abbildung 4.42: Vergleich des Geschwindigkeitseinbruchs beim Gangwechsel (3 auf 4) bei einem Fahrerwunschmoment von 15 Nm mit und ohne abtriebsseitiger Drehmomentunterstützung durch den RSG (P3-Hybrid), Simulation (li.) und Messung (re.)

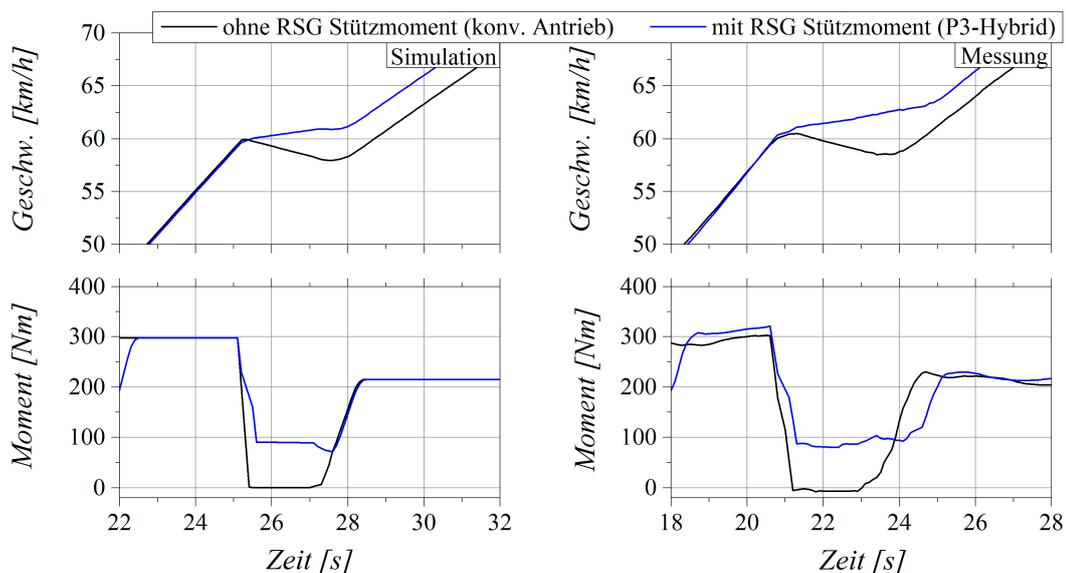


Abbildung 4.43: Vergleich des Geschwindigkeitseinbruchs beim Gangwechsel (3 auf 4) bei einem Fahrerwunschmoment von 50 Nm mit und ohne abtriebsseitiger Drehmomentunterstützung durch den RSG (P3-Hybrid), Simulation (li.) und Messung (re.)

Abb. 4.44 veranschaulicht das Beschleunigungsverhalten für ein Fahrerwunschkmoment von 30 Nm und 50 Nm mit und ohne Drehmomentunterstützung durch den Riemen-Starter-Generator im Schaltvorgang. Zu erkennen ist, dass für ein Wunschkmoment von 30 Nm eine harmonische Beschleunigung für die gezeigten Gangwechsel realisiert werden kann. Die signifikanten Zugkraftunterbrechungen im Schaltvorgang beim konventionellen Antrieb werden gänzlich verhindert. Auch für ein Wunschkmoment von 50 Nm kann zumindest eine positive Beschleunigung im Schaltvorgang aufrechterhalten werden.

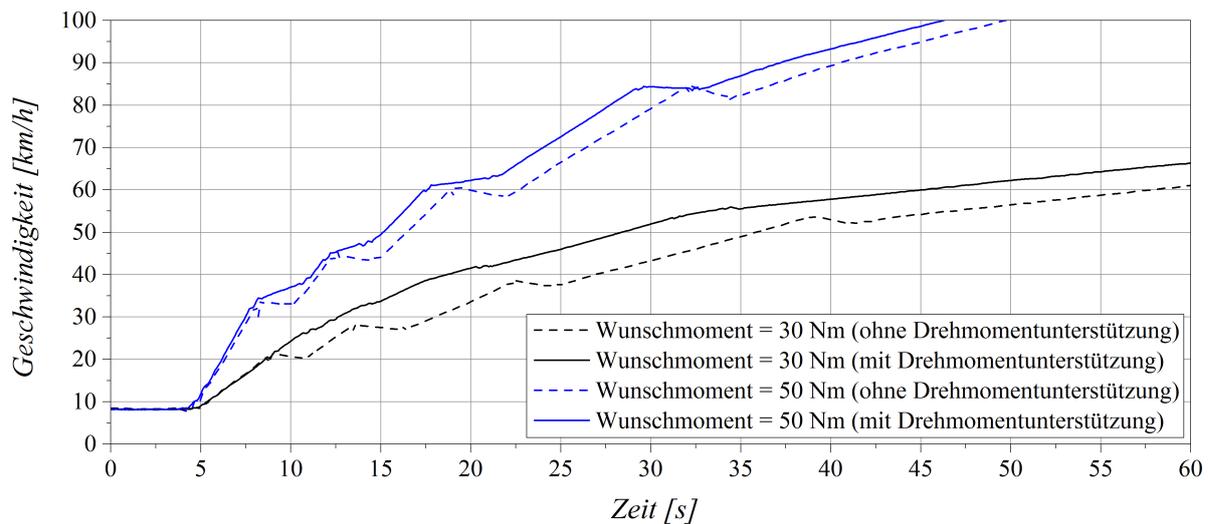


Abbildung 4.44: Beschleunigungsverhalten mit und ohne Drehmomentunterstützung durch den RSG im Schaltvorgang für ein Fahrerwunschkmoment von 30 Nm und 50 Nm (Messung)

In weiterer Folge wurden die maximale Beschleunigung von 0-100 km/h sowie die Elastizitätswerte von 60-100 km/h sowie 80-120 km/h ermittelt und die Auswirkungen durch die Integration eines Riemen-Starter-Generators in Form einer P2- bzw. P3-Strukturierung untersucht. Entsprechend Abb. 4.45 und Tab. 4.6 werden die Beschleunigungszeiten von 0 auf 100 km/h für ein Fahrzeugbezugsgewicht von 782,9 kg und 2100 kg dargestellt. Durch eine Skalierung des VKM Drehmoments für das 2100 kg Fahrzeug benötigt der Basisantriebsstrang (ohne Boostfunktion) für beide Gewichtsklassen 18,5 Sekunden aus dem Stillstand bis 100 km/h erreicht sind. Dabei werden die Gänge 1 bis 4 entsprechend den Schaltpunkten aus Kap. 3.1.2.1 (Abb. 3.4) durchgeschaltet. Zu berücksichtigen sind die langen Schaltzeiten von jeweils ca. 1,8 Sekunden, welche einen negativen Einfluss auf das Beschleunigungsverhalten im Allgemeinen verursachen. Für das Fahrzeugkonzept mit dem Bezugsgewicht von 782,9 kg kann der RSG in der P2-Anordnung während des Anfahrvorgangs mit einem Boostmoment unterstützen, dadurch kann vor allem das geringe Low-End-Torque für VKM Drehzahlen unter 2500 1/min kompensiert werden und der P2-Antriebsstrang erzielt bis zu einer Geschwindigkeit bis ca. 42 km/h die höchste Beschleunigung. Anschließend kann der Boostbetrieb keinen Vorteil mehr darstellen, da die Motordrehzahlen auf Grund der Vollastbeschleunigung vorrangig über 3800 1/min bleiben und der RSG in diesem Bereich kein Antriebsmoment abgeben kann (Abb. 4.40). In Summe kann die Beschleunigungszeit somit

für das 782,9 kg Konzept um -10,8 % gegenüber dem Basisantrieb verkürzt werden. Im Gegensatz dazu unterstützt der RSG in der P3-Anordnung die Beschleunigung kontinuierlich bis 100 km/h und stellt auf Grund der Anbindung am Differenzial sein volles Antriebsmoment auch in den Schaltphasen zur Verfügung. Dementsprechend ergibt sich nach Tab. 4.6 somit ein Gesamtpotenzial von bis zu -16,8 % bezogen auf die Beschleunigungszeit des Basisantriebs. Im Vergleich dazu ist das Boostpotenzial für das schwere Fahrzeug (2100 kg) mit lediglich 8,1 % um mehr als die Hälfte reduziert. Obwohl der RSG in der P3-Topologie ebenfalls kontinuierlich mit einem Zusatzmoment unterstützt, ist das Beschleunigungspotenzial auf Grund der höheren Fahrleistungsanforderungen auf dem Niveau des P2-Hybrids.

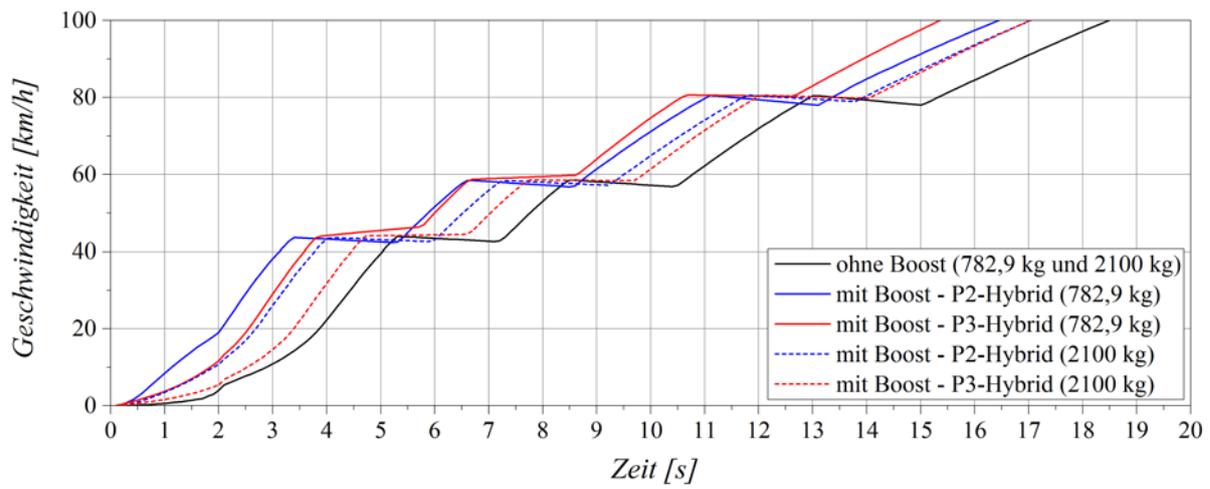


Abbildung 4.45: Maximale Beschleunigung von 0-100 km/h für unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen und Fahrzeuggewichte mit und ohne 48 Volt RSG Boostmoment

Tabelle 4.6: Beschleunigungszeiten von 0-100 km/h für unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen mit und ohne RSG Boostmoment und Fahrzeuggewichte (782,9 kg und 2100 kg)

Bezugsgewicht Konfiguration	782,9 kg		2100 kg	
	Zeit [s]	Potenzial [%]	Zeit [s]	Potenzial [%]
Basis (ohne Boost)	18,5	-	18,5	-
P2-Hybrid (mit Boost)	16,5	-10,8	17,0	-8,1
P3-Hybrid (mit Boost)	15,4	-16,8	17,0	-8,1

Auch das Durchzugsvermögen (Elastizität) des ultraleichten Fahrzeugkonzepts kann durch die Integration eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators gesteigert werden. Dazu wurden die Zeiten für eine Geschwindigkeitserhöhung im höchsten Gang (6) von 60 auf 100 km/h (Abb. 4.46) sowie von 80 auf 120 km/h (Abb. 4.47) bestimmt. Tab. 4.7 stellt zur besseren Übersicht die simulativ ermittelten Zeiten sowie das Boostpotenzial des hybriden Antriebsstrangs in der P2- und P3-Anordnung zusammenfassend dar. Auf Grund der geringen Motordrehzahl von ca. 1400 1/min bei einer Beschleunigung von 60 auf 100 km/h macht

sich das zusätzliche Antriebsmoment des RSG deutlich bemerkbar. Hier kann die Beschleunigungszeit um fast -50 % reduziert werden (Tab. 4.7). Bei einer Startgeschwindigkeit von 80 km/h beträgt die Motordrehzahl ca. 1850 1/min, dennoch kann durch das Boostpotenzial im hybriden Antrieb die Durchzugszeit um bis zu -33,5 % gegenüber der Basiskonfiguration verkürzt werden. Für die dargelegte Elastizitätsbestimmung spielt die Anordnung des Riemen-Starter-Generators im Antrieb nur eine untergeordnete Rolle, da in beiden Konfigurationen die Drehzahlgrenzen im motorischen Betrieb des RSG nicht überschritten werden und keine Schaltvorgänge vorkommen.

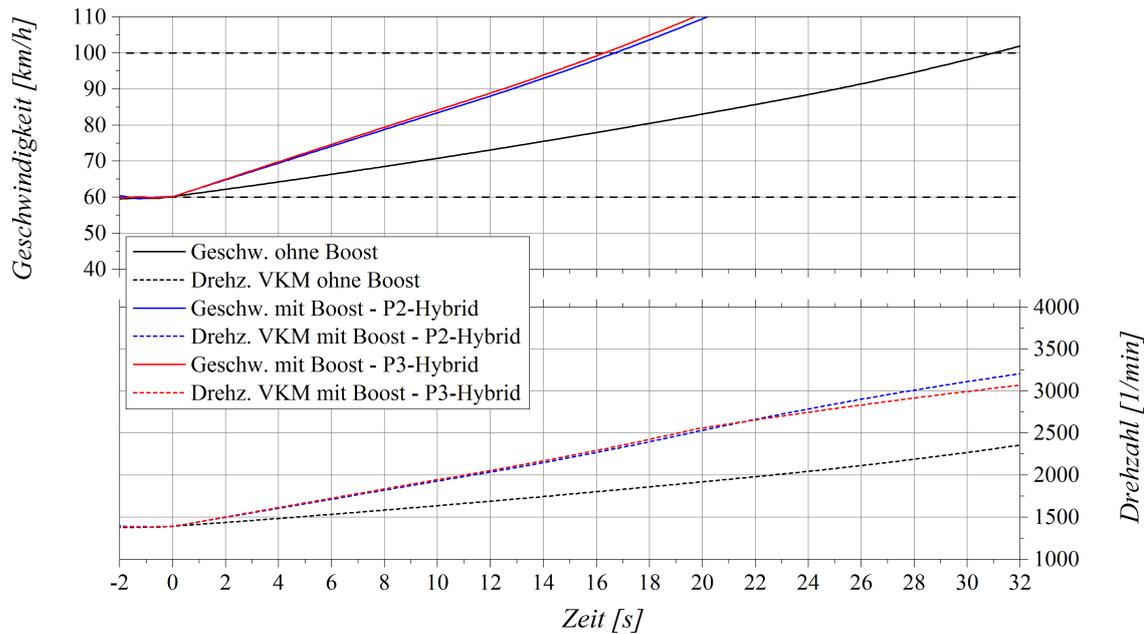


Abbildung 4.46: Beschleunigungszeiten von 60-100 km/h für unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen mit und ohne 48 Volt RSG Boostmoment

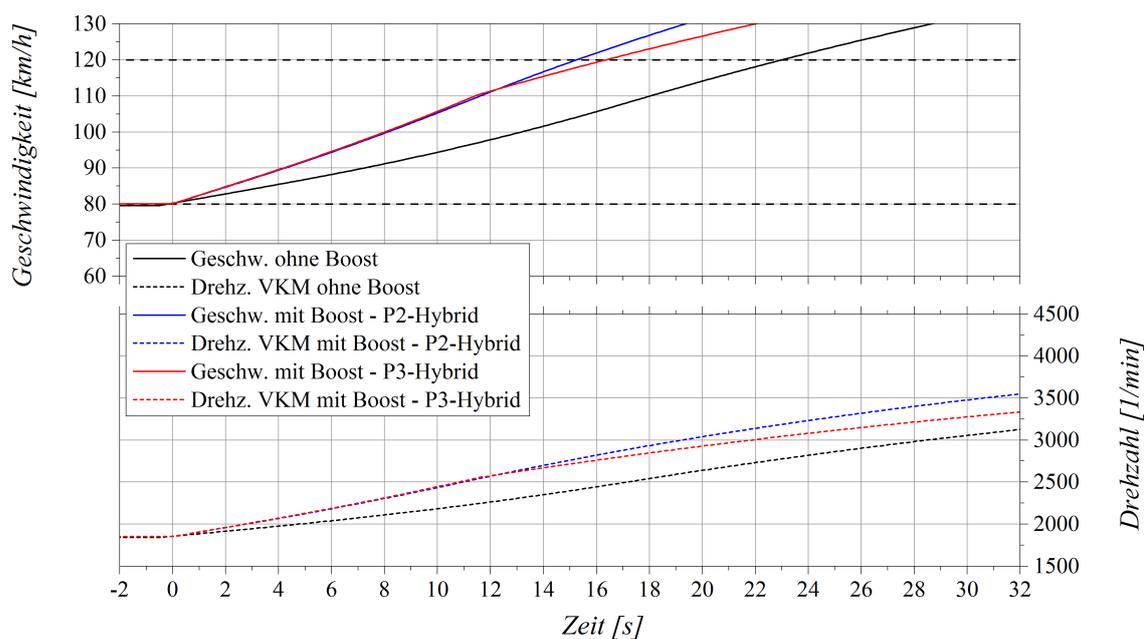


Abbildung 4.47: Beschleunigungszeiten von 80-120 km/h für unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen mit und ohne 48 Volt RSG Boostmoment

Tabelle 4.7: Beschleunigungszeiten von 60-100 km/h und von 80-120 km/h für unterschiedliche Antriebsstrangkongfigurationen mit und ohne RSG Boostmoment

Konfiguration	60-100 km/h		80-120 km/h	
	Zeit [s]	Potenzial [%]	Zeit [s]	Potenzial [%]
Basis (ohne Boost)	31,0	-	23,0	-
P2-Hybrid (mit Boost)	16,7	-46,1	15,3	-33,5
P3-Hybrid (mit Boost)	16,3	-47,4	16,4	-28,7

Im Gegensatz zum Antriebsstrang mit einem 12 Volt Riemen-Starter-Generator soll die 48 Volt Konfiguration genutzt werden, um rein elektrische Anfahrvorgänge abbilden zu können. Zu diesem Zweck wurden mittels Messungen (Abb. 4.48) das Beschleunigungsvermögen sowie die Höchstgeschwindigkeit des P3-Antriebs ermittelt. Für den Beginn des Anfahrvorgangs wird eine Beschleunigung von bis zu $0,8 \text{ m/s}^2$ erreicht. Bis 50 km/h sollte im realen Straßenverkehr jedoch eine für den Fahrer komfortable Fahrt möglich sein. Diese erweiterten Anfahrvorgänge setzten eine entsprechende Konditionierung und Überwachung des Batterieladezustands voraus. Abb. 4.48 stellt diesbezüglich die gemessenen Spannungen und Ströme an der verwendeten 48 Volt Batterie dar. Eine rein elektrische Beschleunigung bis ca. 70 km/h ist theoretisch mit dem zu Grunde liegenden ultraleichten Fahrzeugkonzept möglich, das Beschleunigungsvermögen sinkt aber über 50 km/h deutlich ab.

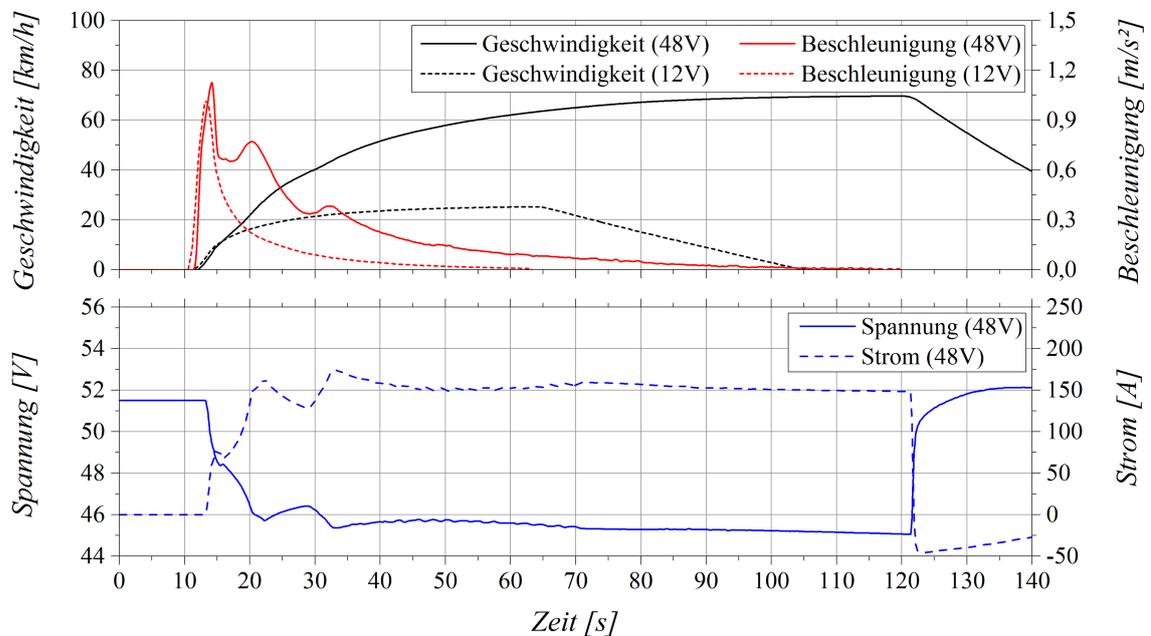


Abbildung 4.48: Darstellung der maximalen Beschleunigung und Geschwindigkeit für den rein elektrischen Anfahrvorgang mittels 48 Volt Riemen-Starter-Generator in der P3-Konfiguration und ausgekuppelter VKM sowie der resultierenden Batteriespannung und -strom (Messung)

4.3 48 Volt Plug-In Hybridkonzept

Durch die Integration eines leistungsstarken 48 Volt RSG in die ultraleichte Struktur des zu Grunde liegenden Fahrzeugkonzepts lässt sich die Motivation ableiten, mit diesem System aufbauend auf den Full-Hybriduntersuchungen (Kap. 4.2) eine 48 Volt Plug-In Version als innovativen Antrieb für den urbanen Verkehr zu analysieren. Basierend auf den Verbrauchsvorteilen und Komfortverbesserungen durch die Wahl einer P3-Antriebskonfiguration soll diese im Folgenden für die Plug-In Zertifizierung herangezogen werden. Um den elektrischen Fahrbereich zu erweitern, wurde die Leistung des Riemen-Starter-Generators um 50 % angehoben. Demnach kann die 48 Volt Einheit eine mechanische Antriebsleistung von bis zu 8,7 kW zur Verfügung stellen. Berücksichtigt wurde dabei der maximal zulässige Strom von ca. 181 A, welcher sich aus dieser Leistungssteigerung ergibt und unter der maximal zulässigen Grenze von 250 A (Kap. 2.1.2) liegt.

4.3.1 Plug-In Zertifizierung

Um Plug-In Hybridfahrzeuge und deren Verbrauchseffizienz gegenüber konventionellen bzw. Hybridantrieben vergleichen zu können, wurde eine spezielle Zertifizierungsmethode entwickelt, welche beide Antriebssysteme basierend auf dem Kraftstoffverbrauch im NEFZ Fahrprofil unter Berücksichtigung der rein elektrischen Reichweite wichtet. Entsprechend [117] können für die Plug-In Zertifizierung zwei Methoden herangezogen werden.

Demnach bewertet die Methode „Elektrische Reichweite“ den Kraftstoffverbrauch C_e basierend auf zwei NEFZ, wobei der erste Zyklus bei vollständig aufgeladener Batterie unter Zuhilfenahme des gesamten elektrischen Fahrpotenzials durchlaufen wird und keine Nachladung erfolgt. Der zweite NEFZ wird bei dem durch die Betriebsstrategie vorgegebenen minimalen Batterieladestatus durchfahren. In diesem sogenannten Ladeerhaltungsbetrieb (Charge Sustaining), ist das elektrische Antriebspotenzial auf Grund des limitierten SOC Hubs deutlich eingeschränkt. Über die Betriebsstrategie wird der minimale Ladezustand über die Zykluszeit sichergestellt. Gl. 4.4 bewertet den Gesamtverbrauch C_e unter Berücksichtigung des Kraftstoffverbrauchs C_{1e} für den ersten NEFZ mit vollständig aufgeladener Batterie und der elektrischen Reichweite D_e sowie den Verbrauch im Ladungserhaltungsbetrieb C_2 und einer angenommenen mittleren Distanz zwischen zwei Aufladevorgängen D_{AV} von 25 km. Dieser Term wird ins Verhältnis zur elektrischen plus der mittleren Reichweite gesetzt.

$$C_e = \frac{D_e \cdot C_{1e} + D_{AV} \cdot C_2}{D_e + D_{AV}} \quad (4.4)$$

Für die Methode „Gesamtreichweite“ C_{OVC} (OVC - Off-Vehicle Charging) ist die Batterie zunächst ebenfalls voll geladen. Das NEFZ Fahrprofil wird so lange wiederholt bis der

Mindestladezustand in der Batterie erreicht ist. Anschließend wird ein letzter NEFZ im Ladeerhaltungsmodus nach der zuvor angeführten Methode „Elektrische Reichweite“ durchlaufen. Gl. 4.5 wird dementsprechend durch den Verbrauch für die vollständig geladene Batterie C_{1OVC} und der elektrischen Reichweite D_{OVC} charakterisiert. Zur Beurteilung des Kraftstoffverbrauchs des 48 Volt Plug-In Fahrzeugs in Kap. 4.3.2 soll die Methode „Gesamtreichweite“ in weiterer Folge zur Anwendung kommen.

$$C_{OVC} = \frac{D_{OVC} \cdot C_{1OVC} + D_{AV} \cdot C_2}{D_{OVC} + D_{AV}} \quad (4.5)$$

Die elektrische Gesamtreichweite D_{OVC} wird nach Gl. 4.6 aus den jeweiligen elektrischen Fahranteilen D_{ei} der einzelnen NEFZ ermittelt. Entsprechend [103] müssen dabei die verbrennungsmotorischen und elektrischen Fahranteile und deren Abfolge beachtet werden. Demnach werden nur die Phasen berücksichtigt, welche rein elektrisch gefahren werden sowie die direkt nach dem elektrischen Betrieb folgenden Verzögerungsphasen. Wurde das Fahrzeug zuvor verbrennungsmotorisch betrieben, werden die darauffolgenden Bremsphasen nicht berücksichtigt. Ebenso zählt das Nachladen der Batterie bei eingeschaltetem Verbrennungsmotor nicht als elektrischer Fahrbetrieb.

$$D_{OVC} = \sum_{i=1}^n D_{ei} \quad (4.6)$$

In dieser Betrachtung bleibt die Erzeugung der elektrischen Energie unberücksichtigt. Lediglich eine ökologische Energiegewinnung machen Plug-In Fahrzeuge und in weiterer Folge reine Elektrofahrzeuge wirklich nachhaltig. Auch aus diesem Grund wird der angegebene Kraftstoffverbrauch bei Plug-In Fahrzeugen vehement diskutiert. Eine zusätzliche Angabe des Energieverbrauchs in Wh/km für den elektrischen Antrieb ist daher sinnvoll, wenn auch derzeit noch nicht mit anderen Erfahrungswerten vergleichbar. Nach [117] erfolgt die Ermittlung analog der Gl. 4.4 bzw. alternativ Gl. 4.5, wobei der Gesamtverbrauch C_e bzw. C_{OVC} sowie der jeweilige Einzelverbrauch C_{1e} , C_{1OVC} und C_2 durch den elektrischen Verbrauch E_e , E_{OVC} , E_{1e} , E_{1OVC} und E_4 ersetzt wird.

4.3.2 Verbrauchspotenzial

Im Folgenden wird das Verbrauchspotenzial der innovativen 48 Volt Plug-In Variante des Ultraleichtfahrzeugs entsprechend dem in Kap. 4.3.1 vorgestellten Zertifizierungsstandard bewertet. Basierend auf dem höheren Fahrzeuggewicht (Kap. 3.1.2.1) beträgt der ermittelte Grundverbrauch im NEFZ 2,97 kg/100km und ist damit im Vergleich zur 48 Volt Full-Hybridvariante um 2,8 % höher (Verbrauch 2,89 kg/100km).

Abb. 4.49 veranschaulicht die nach der Methode „Gesamtreichweite“ absolvierten NEFZ.

Ausgehend von einer vollständig geladenen 48 Volt Batterie des Plug-In Fahrzeugs wird der NEFZ viermal durchfahren, bis der minimale Ladezustand von 18 % erreicht ist. Die schraffierten Fahranteile beschreiben dabei exemplarisch anhand des ersten Zyklus die für die Bestimmung der elektrischen Reichweite geltenden Abschnitte (inklusive Stillstandszeiten), in denen eine Kumulierung der zurückgelegten Strecke (rote Linie) stattfindet. Dementsprechend erreicht das Fahrzeug mit einer nominellen Batteriekapazität von 3,0 kWh, von der 82 % für den Plug-In Betrieb genutzt werden, eine elektrische Gesamtreichweite von 27,2 km. Der Kraftstoffverbrauch beträgt auf Grund der elektrisch zurückgelegten Weganteile für diesen Abschnitt lediglich 0,98 kg/100km, der elektrische Energieverbrauch wurde mit 5,62 kWh/100km ermittelt.

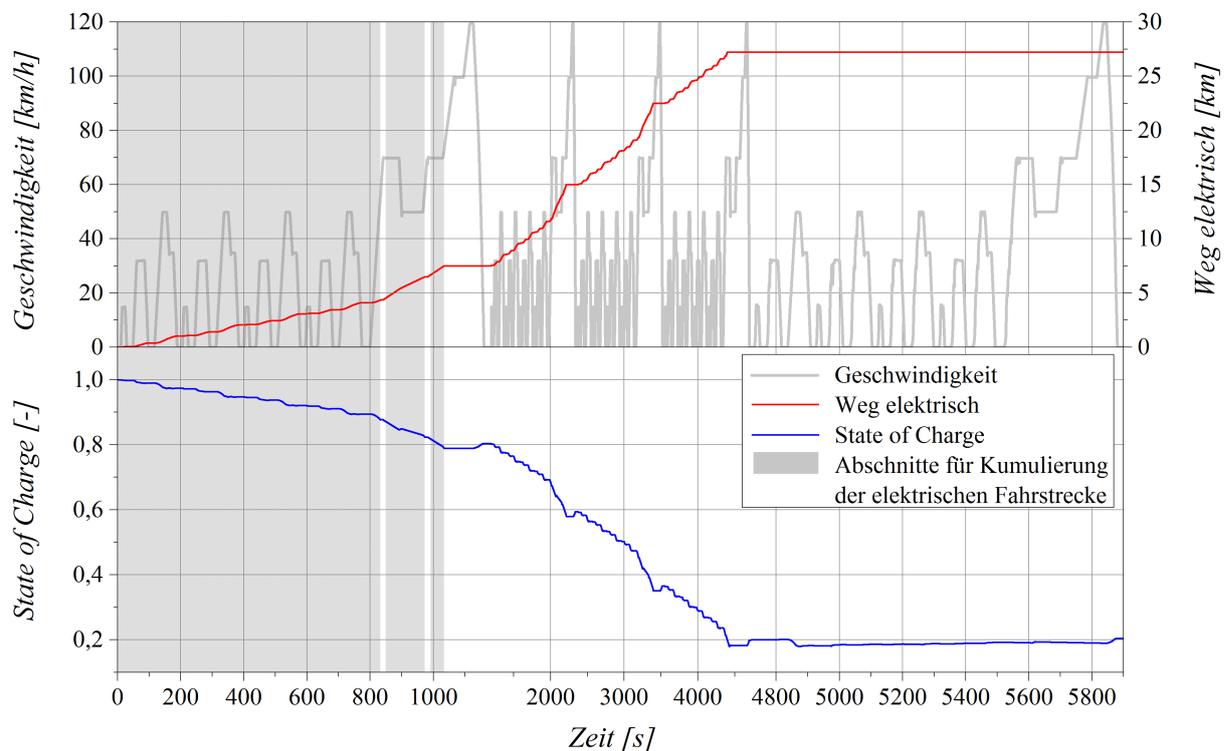


Abbildung 4.49: Darstellung des Geschwindigkeitsprofils sowie des Batterieladezustands für die 48 Volt Plug-In Konfiguration (P3-Struktur) nach der Zertifizierungsmethode „Gesamtreichweite“

Zur Ermittlung des Gesamtverbrauchs wird der letzte NEFZ im Ladeerhaltungsmodus bei einem Batterieladezustand von ca. 18 bis 20 % durchlaufen. Dabei sind die elektrischen Fahranteile auf Grund des zulässigen SOC Hubs deutlich eingeschränkt. Für diesen Zyklus stellt sich ein Kraftstoffverbrauch von 2,52 kg/100km und ein elektrischer Energieverbrauch von -0,12 kWh/100km ein. Insgesamt kann der Gesamtverbrauch nach Gl. 4.5 mit 1,72 kg/100km ermittelt werden, was einer weiteren Reduktion von -22,3 % gegenüber der 48 Volt Full-Hybridkonfiguration (2,22 kg/100km) entspricht. Im Vergleich zum konventionellen 12 Volt Antrieb mit einem Ausgangsverbrauch von 2,89 kg/100km ergibt sich eine Minderung um -40,6 %.

4.3.3 Zusammenfassung

Obwohl das elektrische Fahrpotenzial im 48 Volt Plug-In Betrieb mit maximalen stationären Geschwindigkeiten von ca. 75 km/h eingeschränkt bleibt, überzeugt diese Kombination dennoch vor allem für den urbanen Betrieb. Auch die elektrische Reichweite von 27,2 km deckt laut Studie [50] den täglichen Fahrbedarf der meisten Kunden von durchschnittlich 16 km für den motorisierten Individualverkehr ab. Basierend auf der ultraleichten Ausgangsvariante ist das Zusatzgewicht für die Plug-In Erweiterung im Vergleich zu Plug-In Serienfahrzeugen überschaubar. Gl. 4.7 repräsentiert den zusätzlichen Gewichtsaufwand eines Plug-In Modells $m_{\Delta, Plug-In}$ im Vergleich zur erzielten elektrischen Reichweite s_{Elektr} . Der resultierende Faktor $x_{Plug-In}$ beschreibt somit das Gewicht, welches aufgewendet werden muss, um einen Kilometer rein elektrisch Fahren zu können.

$$x_{Plug-In} = \frac{m_{\Delta, Plug-In}}{s_{Elektr}} \quad (4.7)$$

Abb. 4.50 (links) stellt exemplarisch das Zusatzgewicht verschiedener Serien-Plug-In Fahrzeuge sowie deren Basisgewicht, mit vergleichbarer konventioneller Motorisierung und Getriebe, dar. Zusätzlich wurde die elektrische Reichweite im Plug-In Betrieb erfasst. Eine Bilanzierung nach Gl. 4.7 ist in Abb. 4.50 (rechts) dargestellt und unterstreicht mit einem Verhältnis von lediglich 2,6 kg/km das innovative Potenzial des ultraleichten 48 Volt Antriebsverbands (CULT) im Vergleich zu den gegenübergestellten Plug-In Fahrzeugen mit einem Verhältnis von 5,1 bis zu 8,2 kg/km.

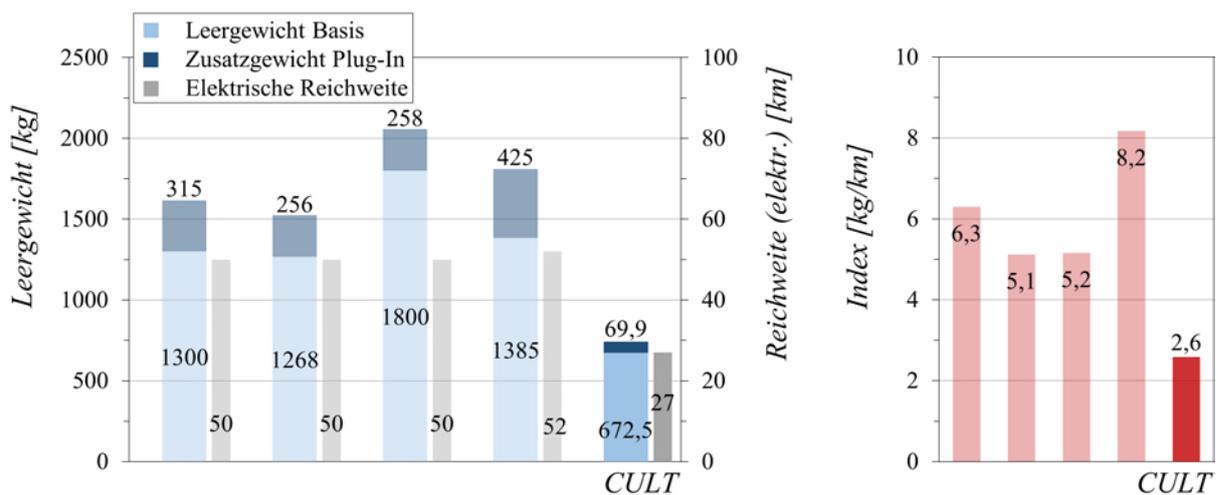


Abbildung 4.50: Zusätzliches Gewicht für verschiedene Plug-In Serienfahrzeuge sowie das entsprechende Leergewicht des konventionellen Modells (li.); Bilanzierung des Gewichtsaufwands im Verhältnis zur elektrischen Reichweite (re.)

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Besonderheiten, die sich aus der Integration von Riemen-Starter-Generatoren für den Niederspannungsbereich (bis 60 Volt) in den Antriebsstrang eines ultraleichten Fahrzeugs im A-Segment ergeben. Ziel der Untersuchungen war es zum Einen, die speziellen Eigenschaften dieser Hybridisierung im Hinblick auf die geringen Fahrleistungsanforderungen, welche sich aus dem niedrigen Gesamtgewicht ergeben, hervorzuheben sowie potenzielle hybride Antriebsarchitekturen detailliert zu betrachten. Dafür wurden zunächst in Kap. 2 grundlegende Recherchen zu Riemen-Starter-Generator Komponenten und Systemen durchgeführt und das für den weiteren Verlauf dieser Arbeit zu Grunde liegende Prototypfahrzeug CULT - CARS ULTRA-LIGHT TECHNOLOGY charakterisiert. Zur Beurteilung der Besonderheiten und Potenziale dieser Systeme wurden in Kap. 3 die simulativen und experimentell verwendeten Methoden angeführt, welche zur detaillierten Untersuchung dieser Riemen-Starter-Generator Systeme in Kap. 4 dienten. Dabei wurde gesondert auf die Spannungsniveaus 12 Volt und 48 Volt eingegangen und verbrauchs- und komfortrelevante Besonderheiten in Abhängigkeit der jeweiligen Antriebstopologie dargelegt.

Es konnte gezeigt werden, dass allein durch die Integration eines Riemen-Starter-Generators in die ultraleichte Fahrzeugstruktur, trotz Beibehaltung des 12 Volt Spannungsniveaus, Vorteile hinsichtlich Verbrauchseffizienz und Komfort gegenüber der in dieser Fahrzeugkategorie üblichen Konfiguration aus spannungsgeregelter Lichtmaschine und Ritzelstarter erzielt werden können. In den Untersuchungen wurde dabei zwischen einer Micro- und Mild-Hybridisierung in Form einer P1- und P2-Konfiguration unterschieden, wobei die Potenziale durch Anbindung des 12 Volt Riemen-Starter-Generators an der Getriebeeingangswelle (P2-Hybrid) überzeugten, so dass diese Architektur letztendlich auch für das finale Prototypfahrzeug favorisiert wurde. Vor allem die Möglichkeit den Verbrennungsmotor und damit das Schleppmoment bei Bedarf abkoppeln zu können, steigerte die Gesamteffizienz des Antriebsstrangs deutlich. Insgesamt konnte der Anteil an rekuperierter Energie in den NEFZ Untersuchungen signifikant gesteigert werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, niedrige Geschwindigkeiten, d.h. ineffiziente Betriebspunkte der VKM durch den elektrischen Antrieb abzudecken. Dafür wurde eine adaptive Betriebsstrategie entwickelt, welche die Effizienz der beiden Antriebssysteme bewertet und die entsprechende Momentenaufteilung zwischen VKM

und RSG vornimmt. Zusammenfassend konnte durch die Integration eines 12 Volt RSG eine Verbrauchsreduktion von -13,8 % im NEFZ und -11,3 % im WLTP gegenüber dem konventionellen Antrieb (ohne Start Stopp) erzielt werden. Die rein elektrische Fahrfunktion durch die innovative Anbindung des RSG an die Getriebeeingangswelle eignet sich auf Grund ihrer Leistungslimitierung insbesondere für Stop-and-Go Situationen bzw. elektrische Rangier- und Parkvorgänge.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den 12 Volt Untersuchungen wurde ausblickend ein Riemen-Starter-Generator System in den Antriebsstrang integriert, welches auf Grund der Spannungsanhebung von 12 Volt auf 48 Volt ein höheres Leistungspotenzial bereitstellt. Die Kombination aus ultraleichtem Fahrzeug und leistungsstarkem 48 Volt Riemen-Starter-Generator eröffnet hybride Freiheitsgrade, wie diese nur bei aufwendigen und kostenintensiven Hochvoltssystemen (über 100 Volt) in deutlich schwereren Full-Hybrid Fahrzeugen erzielt werden. Im Fokus der simulativen und experimentellen Untersuchungen lagen hier vor allem Hybridkonfigurationen in Form einer P2 und P3-Architektur. Durch das wesentliche höhere Leistungsvermögen des RSG im Motor- und Generatorbetrieb konnte das rein elektrische Fahrpotenzial hinsichtlich maximaler Geschwindigkeit und Beschleunigung gegenüber der 12 Volt Konfiguration deutlich angehoben werden. Die Generatorleistung genügt theoretisch, um im 48 Volt Betrieb einen signifikanten Anteil der Verzögerungsphasen im NEFZ und WLTP Fahrzyklus abzudecken. Als favorisierte Antriebstopologie, besonders in Kombination mit dem verwendeten automatisierten Schaltgetriebe, erscheint die Anbindung des Riemen-Starter-Generators an den Getriebeausgang (P3). Dadurch kann in den Schaltvorgängen ein Antriebsmoment vom RSG bereitgestellt werden, welches den Geschwindigkeitsverlust durch die schaltbedingte Zugkraftunterbrechung der VKM kompensiert und den Komfort positiv beeinflusst. Weiterhin steigt der Anteil an regenerativer Bremsenergie, da in der P3-Anordnung kontinuierlich und unabhängig der Schaltpunkte über den RSG rekuperiert werden kann. Im Vergleich zum Fahrzeug mit konventionellen 12 Volt Bordnetz (ohne Start Stopp) lässt sich der Verbrauch durch die Integration dieses 48 Volt Systems im NEFZ um bis zu -23,2 % und im WLTP um bis zu -16,1 % reduzieren. Durch eine detaillierte Analyse der Energieflüsse im Antriebsstrang werden Optimierungsmöglichkeiten für das 48 Volt Hybridfahrzeugkonzept aufgedeckt und deren Verbrauchspotenzial simulativ abgeschätzt.

Abschließend wurde ein Konzept vorgestellt, bei dem die 48 Volt Full-Hybridkonfiguration (P3) um eine größere Traktionsbatterie und eine externe Nachlademöglichkeit erweitert wurde. Dadurch entsteht ein innovativer Plug-In Hybrid im Niederspannungsbereich, der sich auf Grund seiner elektrischen Fahrleistungen und Reichweite vor allem für die urbane Verwendung auszeichnet. Hervorzuheben ist das, im Vergleich zu Plug-In Serienfahrzeugen, geringe Zusatzgewicht des 48 Volt Systems in Relation zur elektrischen Reichweite. Neben der signifikanten Verbrauchseinsparung von -40,6 % (bezogen auf das konventionelle 12 Volt Konzept ohne Start Stopp) besteht zudem die Möglichkeit, in Ballungsgebieten lokal emissionsfrei

zu fahren. Durch die Niederspannungstechnik indiziert diese hybride Ausbaustufe einen geringen Anstieg der Fahrzeugkosten, was wiederum neue potenzielle Käuferschichten von der Hybridtechnologie überzeugen könnte.

5.2 Ausblick

Das Verbrauchspotenzial von Riemen-Starter-Generatoren im Niederspannungsbereich (bis 60 Volt) konnte vor allem in Kombination mit einer ultraleichten Fahrzeugstruktur aufgezeigt werden. Ausblickend gilt es, die Entwicklungstrends Gewichtsreduktion sowie 48 Volt Technologie und besonders deren Kombination in einem Gesamtkonzept stärker zu fokussieren, um einen nachhaltigen Beitrag in der aktuellen CO₂ Diskussion leisten zu können.

Die strukturelle Anordnung des hybriden Antriebssystems mit einem 48 Volt RSG hat einen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Verbrauchsreduktion und beeinflusst auch eventuelle Komfortfaktoren. Demnach sollte der Integrationsort eines 48 Volt Riemen-Starter-Generators in den konventionellen Antriebsstrang grundlegend auf die gewünschten Anforderungen abgestimmt werden. Innovative Anbindungen des RSG an das Getriebe in Form einer P2- bzw. P3-Hybridisierung gestalten sich konstruktiv deutlich aufwändiger als die konventionelle P1-Lösung, können dennoch einen signifikanten Mehrwert im Hinblick auf die Antriebseffizienz und den Komfort erzielen. Das Spannungsfeld aus ökologischen und ökonomischen Faktoren ist hierbei zu analysieren.

Anhand der vorgestellten Optimierungsansätze (Kap. 4.2.2.7) kann abgeleitet werden, dass eine stetige Optimierung der Energiewandlungsverluste die Attraktivität in Form einer weiteren Verbrauchsreduktion zusätzlich steigern kann. Eine Anhebung der Wirkungsgrade des Riemen-Starter-Generators auf das Niveau von Elektromaschinen, welche mit höheren Spannungen betrieben werden, würde dem Hybridantrieb weitere Vorteile gegenüber dem konventionellen Verbrennungsmotor einräumen und den elektrischen Fahrbetrieb nachhaltig ausweiten. Eine Steigerung der RSG Dauerleistung für den Motor- und Generatorbetrieb unter Ausnutzung der maximalen Stromgrenze erscheint in der ultraleichten Fahrzeugstruktur nur sinnvoll, wenn gleichzeitig die Effizienz gesteigert werden kann. Die Batterietechnologie sollte gezielt auf die jeweiligen Bedürfnisse abgestimmt werden und die Optimierung des Innenwiderstands respektive der Lade- und Entladeverluste im Vordergrund liegen. Die hier vorgestellte Kombination eines ultraleichten Hybridfahrzeugs bzw. Plug-In Modells mit lediglich 48 Volt, stellt hohe Anforderungen an die Zyklenfestigkeit sowie Ladegrenzen der Batterie.

Mittel- bis langfristig sollte die Notwendigkeit von zwei Spannungsniveaus unter 60 Volt im Fahrzeugbereich überdacht werden. Die Vermeidung der 12 Volt Spannungsebene, d.h. die konsequente Umrüstung des gesamten Bordnetzes auf das höhere Spannungsniveau von 48 Volt würde die Komplexität signifikant verringern und gleichzeitig einen weiteren Beitrag hinsichtlich Gewichtsreduktion leisten.

Anhang

Wirkungsgrad Getriebe

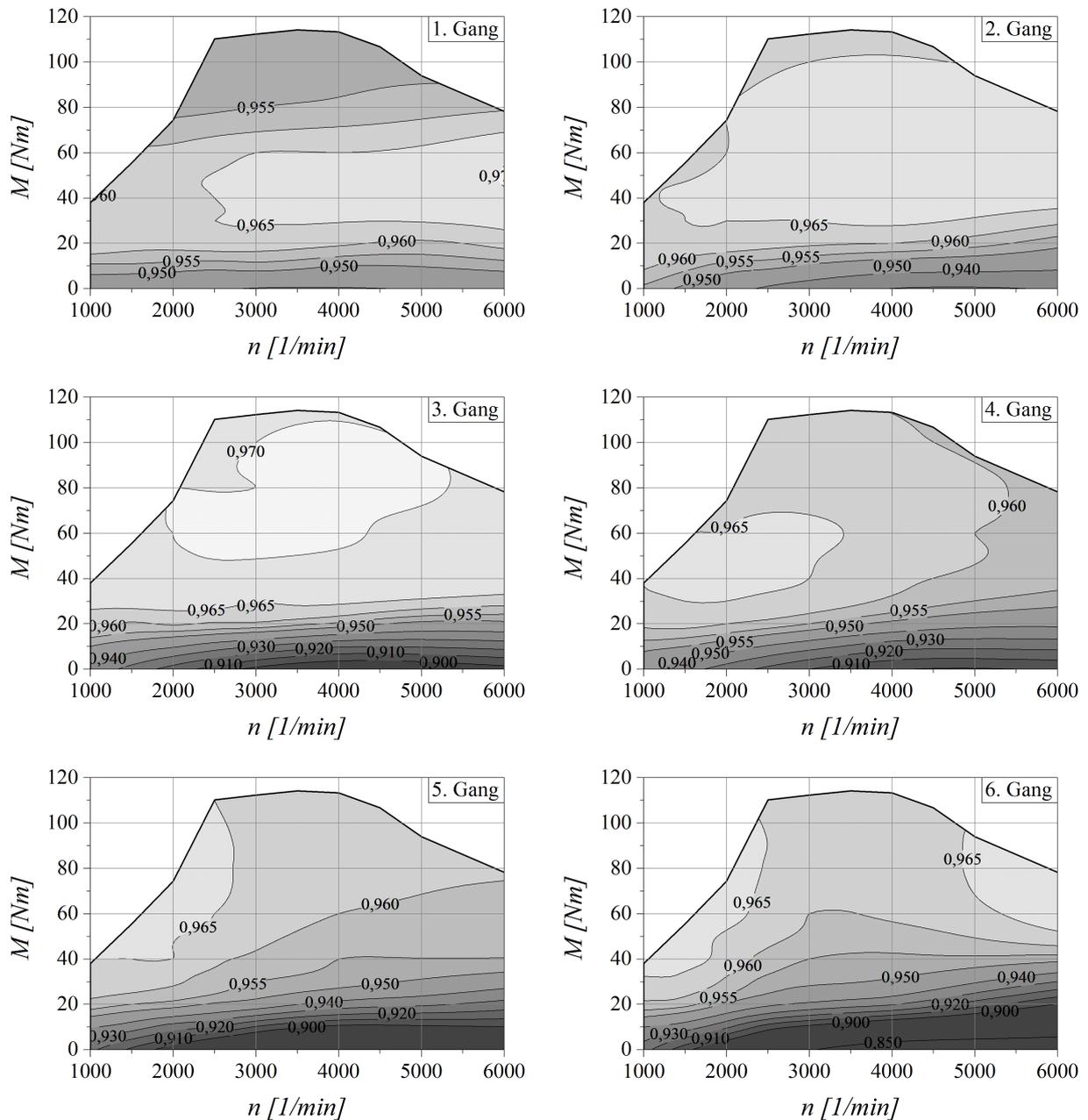


Abbildung A-1: Wirkungsgrad des automatisierten Schaltgetriebes in Abhängigkeit des Eingangsdrehmoments und der Eingangsdrehzahl für die Gänge 1 bis 6 bei einer Öltemperatur von 60°C

Literaturverzeichnis

- [1] ALBERS, Joern: Heat tolerance of automotive lead-acid batteries. In: *Journal of Power Sources* (Mai 2009)
- [2] AMISANO, Fabrizio: AMT + Electric Traction: the Most Efficient Car Transmission. In: *11. Internationales CTI Symposium Fahrzeuggetriebe, HEV und EV-Antriebe* (Berlin, Dez. 2012)
- [3] AMISANO, Fabrizio ; RAIMONDI, Marco: AMT + Electric Traction: the Most Efficient Car Transmission. In: *10. Internationales CTI Symposium Fahrzeuggetriebe, HEV und EV-Antriebe* (Berlin, Dez. 2011)
- [4] AUDI AG ; BMW AG ; DAIMLER AG ; PORSCHE AG ; VOLKSWAGEN AG: *LV148*. 2011
- [5] AUER, Jürgen ; WIESER, Christoph: Einsatzprofile von Ultracaps in zukünftigen Bordnetzen. In: *ATZ elektronik* (Apr. 2009)
- [6] AUTO MOTOR UND SPORT: *Peugeot 308 e-HDi im Fahrbericht*. <http://www.automotor-und-sport.de/fahrberichte/peugeot-308-e-hdi-im-fahrbericht-segelnder-kompakter-aus-frankreich-3663514.html>. Version: (Zugriff: 28. Sep. 2014)
- [7] BABIEL, Gerhard: *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014
- [8] BALS, Christoph ; BURCK, Jan ; NEUBAUER, Larissa ; ROSTOCK, Stefan ; HERM-WILLE, Lukas ; KIER, Gerold ; V., Germanwatch e. (Hrsg.): *Globaler Klimawandel - Klimawandel und Treibhauseffekt*. Verbraucherzentrale Bundesverband e. V, Berlin, 2010
- [9] BARTSCH, Leonhard ; PLOUMEN, Serve: Opportunities of 48V Mild-Hybrid Technology in the CO2 Emission Challenge. In: *23. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik* (Aachen, Okt. 2014)
- [10] BAST, Josef ; KILGER, Michael ; GALLI, Walter ; EISER, Axel ; VASSEN, Heinz-Willi ; KUTSCHERA, Immanuel: Die Chancen des Antriebsstrangs durch das 48V-Bordnetz. In: *34. Internationales Wiener Motorensymposium* (Wien, Apr. 2013)

- [11] BISCHOF, Hubert ; BORK, Michael ; SCHENK, Robert: Startergenerator: System, Funktion, Komponenten. In: *LuK Fachtagung - E-Maschinen im Antriebsstrang* (Apr. 1999)
- [12] CHEESEMAN, Paul ; MAGNUSON, Douglas: Hochentwickelte Bleibatterien - Potenziale für Hybridfahrzeuge. In: *ATZ elektronik* (Apr. 2010)
- [13] CHRIST, Thomas: Bremsenergierückgewinnung im elektrischen Bordnetz. In: *ATZ-elektronik worldwide* (Apr. 2009)
- [14] CONTROLLED POWER TECHNOLOGIES: *CPT SpeedStart® - Integrated Starter Generator*. Mai 2013
- [15] CONTROLLED POWER TECHNOLOGIES: *CPT reveals fuel economy and performance potential of 48V technology*. <http://www.cpowert.com/CPT-reveals-fuel-economy-and-performance-potential-of-48V-technology>. Version: (Zugriff: 02. Okt. 2014)
- [16] COOPER, A. ; BLOORE, P. ; NEUMANN, M. ; KELLAWAY, M. ; STONE, D.: Mild HEV performance at micro hybrid cost - a low voltage lead-acid approach. In: *13. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik* (Stuttgart, Feb. 2013)
- [17] COPPIN, Olivier ; POTTEAU, Sébastien: 48-V-Hybrid-Systemarchitektur zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. In: *ATZ elektronik* (Feb. 2015)
- [18] DAMBÖCK, Marko: *Direktstart beim direkteinblasenden 3-Zylinder-Erdgasmotor*. Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Dissertation, Wien, in Druck
- [19] DENTICI, Ignazio: An Effective Hybrid Powertrain: Integration between the ICE, the AMT and the Electric Motor. In: *3rd International CTI Symposium China* (Suzhou, Sep. 2014)
- [20] DILLMANN, Gerhard ; PRYS, Gerhard ; KLINKERT, Carsten ; SAUER, Jürgen ; OTA-SEVIC, Aleksandar: BMW 7er - EfficientDynamics. In: *ATZextra* (Nov. 2008)
- [21] DÖRSAM, Thomas ; KEHL, Steffen ; KLINKIG, Andreas ; RADON, Andre ; SIRCH, Ottmar: Die neue Spannungsebene 48 Volt im Kraftfahrzeug. In: *ATZ elektronik* (Jan. 2012)
- [22] DUDENHÖFER, Ferdinand: Die Marktentwicklung von Hybrid-Fahrzeugkonzepten. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Apr. 2005)
- [23] DUDLEY, Bob: *BP Energy Outlook 2035*. Jan. 2014
- [24] ECKSTEIN, Lutz ; SCHMITT, Fabian ; HARTMANN, Bastian: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Nov. 2010)

- [25] ELS, Peter ; HORNICK, Will: 48 Volt Electrification and Electrical Systems. In: *Automotive iQ - International Quality and Productivity Center* (Sep. 2014)
- [26] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT NR. 443/2009: *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. Apr. 2009
- [27] EUROPÄISCHE UNION NR. 333/2014: *Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen*. Mrz. 2014
- [28] FESEFELDT, Thomas F.: *Ganzheitliche Betrachtung zur Auswahl der Starteinrichtung des Verbrennungsmotors eines Parallel-Hybrids mit Trennkupplung*. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, Darmstadt, 2010
- [29] FLECKNER, Marco: *Strategien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für ein Vollhybridfahrzeug*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Dissertation, Aachen, 2010
- [30] FLECKNER, Marco ; GÖHRING, Markus ; SPIEGEL, Leo: Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. In: *18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik* (Aachen, Okt. 2009)
- [31] FORSTHUBER, Friedrich: *Methodenentwicklung in der eindimensionalen Simulation am Beispiel eines Nutzfahrzeugantriebs und eines direkteinblasenden Erdgasantriebs unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verbrennungsmodelle*. Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Dissertation, Wien, in Druck
- [32] FORSTHUBER, Friedrich ; HOFHERR, Thomas ; DAMBÖCK, Marko ; HOFMANN, Peter: Potential of Direct Injection for Increasing the Low-End Torque of Boosted CNG Engines. In: *8. Tagung Gasfahrzeuge* (Stuttgart, Okt. 2013)
- [33] FRIEDRICH, Reiner: *BMW Group - Das 48V Bordnetz. Pflicht oder Kür?* Präsentation, Technische Universität Berlin, Jan. 2013
- [34] FRITZ, Wolfgang: *Endbericht CULT - Cars Ultra-Light Technologies*. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG, Graz, 2014
- [35] FRITZ, Wolfgang ; HOFER, Dietmar ; GÖTZINGER, Bruno: Leichtbaukonzept für ein CO₂-armes Fahrzeug. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Sep. 2013)

- [36] FRITZ, Wolfgang ; KAMPELMÜHLER, Franz ; HOFMANN, Peter ; STEFFAN, Robert: 49 g CO₂/km - Ein modernes, effizientes, minimalistisches Lifestyle Fahrzeug. In: *24. Internationale AVL Tagung - Motor & Umwelt* (Graz, Sep. 2012)
- [37] GOEDE, Martin: Karosserieleichtbau als Baustein einer CO₂-Reduzierungsstrategie. In: *16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2007)
- [38] GORDON, Richard L.: i-MoGen - Ein Mild-Hybrid-Antriebskonzept für künftige Dieselfahrzeuge. In: *ATZ worldwide* (Nov. 2002)
- [39] GRAF, Friedrich ; KNORR, Thomas ; JEHLE, Martin ; HUBER, Tobias: Antriebsstrangmanagement in Hybridfahrzeugen mit 48-V-Bordnetz. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* (Sep. 2013)
- [40] GÖTTE, Carsten ; GRAF, Friedrich ; KLEIN, Bernhard: 48-V-Elektrifizierung - bezahlbare Hybridisierung mit hohem Kundennutzen. In: *9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen* (Wolfsburg, Jan. 2014)
- [41] HACKMANN, Wilhelm ; KLEIN, Bernhard ; GÖTTE, Carsten ; SCHMID, Ralf ; PUJOL, Francisco X.: 48V - The Way to a High Volume Electrification. In: *22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2013)
- [42] HAVLIK, Fabian: *Auslegung einer Ölumlaufschmierung für ein automatisiertes Schaltgetriebe*. Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Bachelorarbeit, Wien, 2013
- [43] HEUERMANN, Markus ; ERNST, Markus: Die wichtigsten Bordnetz-Trends. In: *Elektronik automotive - Sonderausgabe Bordnetz* (Sep. 2014)
- [44] HOFER, Dietmar ; KRACHLER, Gerhard: Innovation with Future in Mind - The Example of the CULT Prototype. In: *23. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2014)
- [45] HOFHERR, Thomas: *Potentialbetrachtung effizienzsteigernder Maßnahmen sowie Abgasnachbehandlungsmöglichkeiten eines direkteinblasenden Erdgasmotors für die PKW-Anwendung*. Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Dissertation, Wien, in Druck
- [46] HOFHERR, Thomas ; DAMBÖCK, Marko ; STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter ; FRITZ, Wolfgang ; KAMPELMÜHLER, Franz: Entwicklung eines monovalenten Erdgasantriebes für ein 50 gCO₂/km Ultraleichtfahrzeug. In: *VDI-Tagung - Innovative Fahrzeugantriebe* (Dresden, Nov. 2012)
- [47] HOFHERR, Thomas ; FORSTHUBER, Friedrich ; HOFMANN, Peter: Atkinson with CNG Direct Injection. In: *9. Tagung Gasfahrzeuge* (Potsdam, Sep. 2014)
- [48] HOFMANN, Peter: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. Springer-Verlag, Wien, 2014

- [49] HOFMANN, Peter ; HOFHERR, Thomas ; DAMBÖCK, Marko ; FRITZ, Wolfgang ; KAMPELMÜHLER, Franz: Der CULT Antrieb: Hocheffizienter CNG Motor mit Direkteinblasung. In: *34. Internationales Wiener Motorensymposium* (Wien, Apr. 2013)
- [50] HÜTTER, Andrea: Verkehr auf einen Blick. In: *Statistisches Bundesamt* (Wiesbaden, Apr. 2013)
- [51] KAMPMANN, Stefan ; BUSCH, Roger ; CHRIST, Ansgar: Gasoline engine - Fit for future powertrain. In: *14. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik* (Stuttgart, Mrz. 2014)
- [52] KELLY, John ; SCANES, Peter ; BLOORE, Paul: Specification and Design of a Switched Reluctance 48 V Belt Integrated Starter Generator (B-ISG) for Mild Hybrid Passenger Car Applications. In: *SAE International 2014-01-1890* (2014)
- [53] KETTERER, B. ; KARL, U. ; MÖST, D. ; ULRICH, S.: *Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung I, Karlsruhe, 2009
- [54] KNORR, Rainer ; GILCH, Markus ; AUER, Jürgen ; WIESER, Christoph: Stabilisierung des 12-V-Bordnetzes Ultrakondensatoren in Start-Stopp-Systemen. In: *ATZ elektronik* (Mai 2010)
- [55] KNOTH, Heiko ; WILSTERMANN, Hartung: Automatisches Stopp-Start-System mit riemengetriebenen Starter-Generator am Beispiel der A/B-Klasse von Mercedes-Benz. In: *Haus der Technik - Automatische Motor-Start-Stopp-Systeme* (München, Dez. 2008)
- [56] KOHLHAUSER, Matthias ; BICHLER, Markus: Cost Efficient Hybrid - maximum hybridization for minimal cost. In: *11. Internationales CTI Symposium Fahrzeuggetriebe, HEV und EV-Antriebe* (Berlin, Dez. 2012)
- [57] KOHLHAUSER, Matthias ; BICHLER, Markus: Cost efficient hybrid - electrification with focus on cost and functionality. In: *13. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik* (Stuttgart, Feb. 2013)
- [58] KREMER, Markus ; HÜLSHORST, Thomas: *In-market Application of Start-Stop Systems in European Market*. FEV, Dez. 2011
- [59] LENZ, Hans P.: Ein Fest kleiner Pkw-Motoren. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* (Jul. 2014)
- [60] LIPSCY, Phillip Y. ; SCHIPPER, Lee: Energy efficiency in the Japanese transport sector. In: *Energy Policy* (Mai 2015)
- [61] LIU, Yizao: Household demand and willingness to pay for hybrid vehicles. In: *Energy Economics* (Juli, 2014)

- [62] MALEKI, Ali: ADEPT 48 V Mild Hybridization - Intelligent Electrification: The next step to HyBoost. In: *8th International CTI Symposium North America* (Rochester, Mai 2014)
- [63] MATE, Jean-Luc: 48V eco-Hybrid Systems. In: *European Conference on Nanoelectronics and Embedded Systems for Electric Mobility* (Toulouse, Sep. 2013)
- [64] MATT, Jean-Claude ; DE-BONO, Derek: Mikro-Mildhybrid mit Ultrakondensator-Technik. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Dez. 2008)
- [65] MERCEDES-BENZ: *Road to the Future*. Stuttgart, 2008
- [66] MERCEDES-BENZ: *Umwelt-Zertifikat - A-Klasse*. Stuttgart, 2008
- [67] MÜLLER, Daniel: *Boost Recuperation System and Integration*. Präsentation, Mai 2014
- [68] MORRIS, Guy ; CRIDDLE, Mark ; DOWSETT, Mike ; QUINN, Richard: Konzept für kostengünstigen Niedrigspannung-Hybridantrieb. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* (Sep. 2010)
- [69] NALBACH, Marc ; KÖRNER, André ; HOFF, Carsten: Der 48-V-Mikro-Hybrid - Ein neues Leistungsbordnetz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Apr. 2013)
- [70] NALBACH, Marc ; KÖRNER, André ; KAHNT, Sebastian: Der 48-V-Hybrid - Potenzialanalyse und Systemauslegung. In: *ATZ elektronik* (Feb. 2015)
- [71] N.N.: European Vehicle Market Statistics - Pocketbook 2014. In: *ICCT - International Council on Clean Transportation* (Berlin, 2014)
- [72] N.N.: *Spannungsklassen in der Elektromobilität*. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. - Kompetenzzentrum Elektromobilität, Frankfurt, 2013
- [73] N.N.: Aktuell - Produkte. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Mai 2011)
- [74] N.N.: *PROtronic - Hardware Manual*. Werdohl, 2010
- [75] N.N.: *ADEPT - 48V intelligent electrification diesel car to be revealed by Ricardo at LCV 2014*. <http://www.ricardo.com/en-GB/News--Media/Press-releases/News-releases1/2014/ADEPT-48V-intelligent-electrification-diesel-car-to-be-revealed-by-Ricardo-at-LCV-2014>. Version: (Zugriff: 13. Dez. 2014)
- [76] N.N.: *Animation Reluktanzmotor*. Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. http://www.isea.rwth-aachen.de/images/research/electricaldrives/researchFocus_reluctance1_med.gif. Version: (Zugriff: 14. Dez. 2014)
- [77] N.N.: *MOSFET (Funktion als Schalter) von Cepheiden - Eigenes Werk*. Lizenziert unter GFDL über Wikimedia Commons. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:MOSFET_\(Funktion_als_Schalter\).svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:MOSFET_(Funktion_als_Schalter).svg). Version: (Zugriff: 17. Dez. 2014)

- [78] PAGANELLI, G. ; DELPRAT, S. ; GUERRA, T. M. ; RIMAUX, J. ; SANTIN, J. J.: Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In: *Vehicular Technology Conference* (Birmingham, USA, Mai 2002)
- [79] PELS, Thomas ; REITZ, Dierk ; MÁN, László ; VESTGÅRD, Bård: Kleiner Startergenerator - große Wirkung. In: *7. LuK Kolloquium* (Baden-Baden, Apr. 2002)
- [80] PIËCH, Ferdinand K.: *Innovationsmanagement I - Entwicklung, Prozesse, Erfolgsfaktoren*. Vorlesungsskript, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien, Wien, 2013
- [81] PICRON, Vanessa ; FOURNIGAULT, Damien ; BAUDESSON, Philippe ; ARMIROLI, Paul: Kostengünstiges Hybridsystem mit 48-V-Bordnetz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Okt. 2012)
- [82] PLANER, Michael: *Potenzialanalyse der Hybridisierung bei geschichteten ottomotorischen Brennverfahren mit Hilfe systematischer Optimierungsmethoden*. Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Dissertation, Wien, 2013
- [83] PSA PEUGEOT CITROEN: *Press Information - e HDI*. Jun. 2010
- [84] RAHMSTORF, Stefan ; SCHELLNHUBER, Hans-Joachim: *Der Klimawandel - Diagnose, Prognose, Therapie*. Verlag C.H. Beck, München, 2012
- [85] RAMESOHL, Ingo ; ECKERT, Oliver ; BRAUN, Martin ; MURTINGER, Tibor ; KARAMPATZIAKIS, Kiriakos: Zukünftige Traktionsmotoren für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. In: *9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen* (Wolfsburg, Jan. 2014)
- [86] REIF, Konrad: *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [87] REIF, Konrad ; NOREIKAT, Karl E. ; BORGEEST, Kai: *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [88] RICHTER, Holger ; KENNEL, Daniel: Stopp-Start und 48 V - Verdrängen Micro-Mild-Hybride traditionelle Hybridkonzepte vom Markt? In: *9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen* (Wolfsburg, Jan. 2014)
- [89] SATTLER, Martin ; SMETANA, Tomas ; MEYERHÖFER, Thorsten ; KÜHLKAMP, Karsten: 48 V Minihybrid - A New Solution for the Minimal Hybridization of Vehicles. In: *22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2013)
- [90] SCHÄFER, Heinz: *Innovative Konzepte für Starter-Generatoren (XSG) - Riemengetriebene und integrierte Starter-Generator-Systeme für Kraftfahrzeuge*. Expert Verlag, Renningen, 2004

- [91] SCHMIDT, Torsten: Clever und Smart - Die Start/Stopp-Automatik StARS in der Praxis. In: *Krafthand* (Nov. 2009)
- [92] SCHÖPPE, Detlev ; KNORR, Thomas ; GRAF, Friedrich ; KLINGSEIS, Bernhard ; BEER, Johannes ; GUTZMER, Peter ; HAGER, Sven ; SCHATZ, Axel: Hubraumreduzierter Verbrennungsmotor und 48 V Eco Drive - Ein integrierter Ansatz zur ganzheitlichen Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs. In: *35. Internationales Wiener Motorensymposium* (Wien, Mai 2014)
- [93] SERRARENS, Alex ; DIEPEN, Koen van ; MARK, Smid ; PEETERS, Koen ; VOGELAAR, Gert-Jan: Design and Validation of a 48V 60KW Flywheel-Electric Kers System. In: *FISITA World Automotive Congress* (Maastricht, Jun. 2014)
- [94] SMETANA, Thomas: Wer hat Angst vor 48 V? Der Minihybrid mit E-Achse nicht! - Modularer elektrischer Achsantrieb im 48-V-Bordnetz. In: *Schaeffler-Kolloquium 2014* (Baden-Baden, Apr. 2014)
- [95] SOMMER, Klaus: *Continental-Mobilitätsstudie 2011*. Hannover, 2011
- [96] STAN, Cornel: *Alternative Antriebe für Automobile - Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [97] STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter: Die 12 Volt Bordnetz-Topologie, Betriebsstrategien und Potenziale für Ultraleichtfahrzeuge. In: *35. Internationales Wiener Motorensymposium* (Wien, Mai 2014)
- [98] STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter: Die Chancen und Potenziale von hybriden Antriebsmaßnahmen in Verbindung mit Ultraleicht-Fahrzeugen. In: *9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen* (Wolfsburg, Jan. 2014)
- [99] STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter ; GERINGER, Bernhard: Potentials of a 48 Volt Belt-Starter-Generator in the Powertrain of an Ultra-Light Vehicle. In: *SAE International* 2015-01-1155 (2015)
- [100] STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter ; GERINGER, Bernhard: The Chances and Potentials for Low-Voltage Hybrid Solutions in Ultra-Light Vehicles. In: *IEA - A3PS Workshop about Lightweight in Hybrid and Electric Vehicles* (Schlatt, Okt. 2014)
- [101] STEFFAN, Robert ; SULCOVA, Olga ; GERINGER, Bernhard ; HOFMANN, Peter ; HOFER, Dietmar: CULT - CO2 Reduction by Intelligent Lightweight Design in Combination with Alternative Powertrain in a Complete Vehicle. In: *FISITA World Automotive Congress* (Maastricht, Jun. 2014)
- [102] STIGSON, Björn: *Mobilität 2030: Die Herausforderungen der Nachhaltigkeit meistern*. World Business Council for Sustainable Development, Conches-Geneva, 2004

- [103] THOM, Rudolf W.: Informationsreihe MTZ Wissen: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, 15. Typengenehmigung von PKW mit elektrifizierten Antrieben. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* (Sep. 2013)
- [104] TILAGONE, Richard ; VENTURI, Stéphane ; MONNIER, Gaétan: Natural Gas - an environmentally friendly fuel for urban vehicles - the SMART demonstrator approach. In: *SAE International* 2005-01-2186 (2005)
- [105] TIMMANN, Michael ; RENZ, Martin: 48V at Mercedes-Benz - options for further applications. In: *14. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik* (Stuttgart, Mrz. 2014)
- [106] TIMMANN, Michael ; RENZ, Martin ; VOLLRATH, Oliver: Herausforderungen und potenziale von 48-V-Startsystemen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Mrz. 2013)
- [107] TÖPLER, Felix ; ANTONY, Peter ; LANGHAMMER, Sebastian ; KUBE, Roland ; KÖHLE, Siegfried: Hybridbetriebsstrategien mit elektronischem Horizont - ein Gemeinschaftsprojekt der Daimler AG, der Volkswagen AG und dem ika. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2008)
- [108] TSCHÖKE, Helmut: Informationsreihe MTZ Wissen - Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs - 1. Hybridantriebe: Definition, Lösungsvarianten. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* (Mai 2012)
- [109] UHL, Marc ; WÜST, Marcel ; CHRIST, Ansgar ; PÖRTNER, Nikolas ; TROFIMOV, Alexander: Electrified Powertrain at 48 V - More than CO₂ and Comfort. In: *22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen, Okt. 2013)
- [110] VALENCIANO, J. ; FERNÁNDEZ, M. ; TRINIDAD, F. ; SANZ, L.: Lead-acid batteries for micro- and mild-hybrid applications. In: *Journal of Power Sources* (Feb. 2009)
- [111] VAN DER HOEVEN, Maria: *CO₂ Emissions from Fuel Combustion - Highlights*. International Energy Agency, Paris, 2013
- [112] WALTERS, James E. ; KREFTA, Ronald J. ; GALLEGOS-LOPEZ, Gabriel ; FATTIC, Gerald T.: Technology Considerations for Belt Alternator Starter Systems. In: *SAE International* 2004-01-0566 (2004)
- [113] WEISSGERBER, Wilfried: *Elektrotechnik für Ingenieure I - Gleichstromtechnik und Elektromagnetisches Feld*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007
- [114] WIMMER, Harald: Hybrid-Hype. In: *Medianet* (Wien, Feb. 2012)
- [115] WINTERHAGEN, Johannes: *48-Volt-Systeme sollen Hybridfahrzeugen zum Durchbruch verhelfen*. <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/48-Volt-Systeme-Hybridfahrzeugen-Durchbruch-verhelfen>. Version: (Zugriff: 03. Okt. 2014)

- [116] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA (UN/ECE):
Regelung Nr. 84 - Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen, die mit einem Verbrennungsmotor ausgerüstet sind, hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs. Jul. 1990
- [117] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA (UN/ECE):
Regulation No. 101 - Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range, and of categories M1 and N1 vehicles powered by an electric power train only with regard to the measurement of electric energy consumption and electric range. Jul. 2013

Lebenslauf

Person

Name Robert Steffan
Geburtsdatum 06. Juni 1987
Geburtsort Greifswald, Deutschland
Staatsangehörigkeit deutsch

Ausbildung

Okt. 2006 - **Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**
Sep. 2011 Studium: Allgemeiner Maschinenbau

Praxiserfahrung

Okt. 2011 - **TU Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

Sep. 2015 Dissertation: Energiemanagement Hybridfahrzeug
Funktionsentwicklung Getriebe und Hybrid
Riemen-Starter-Generatoren (12 Volt und 48 Volt)

Apr. 2011 - **KSPG Automotive, Neckarsulm**

Sep. 2011 Diplomarbeit: Reibungsuntersuchungen Kolbengruppe
am Floating-Liner Prüfstand

Okt. 2010 - **Volkswagen AG, Shanghai, China**

Feb. 2011 Praktikum: Motorenentwicklung für den chinesischen Markt

Okt. 2009 **Daimler AG, Ulm**

Mrz. 2010 Praktikum: Forschung und Entwicklung im Bereich
Tribologie Zylinderlaufbahn

Veröffentlichungen

STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter ; GERINGER, Bernhard: Potentials of a 48 Volt Belt-Starter-Generator in the Powertrain of an Ultra-Light Vehicle. In: SAE International 2015-01-1155 (Detroit, USA, 2015)

STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter ; GERINGER, Bernhard: The Chances and Potentials for Low-Voltage Hybrid Solutions in Ultra-Light Vehicles. In: IEA - A3PS Workshop about Lightweight in Hybrid and Electric Vehicles (Schlatt, Schweiz, 2014)

STEFFAN, Robert ; SULCOVA, Olga ; GERINGER, Bernhard ; HOFMANN, Peter ; HOFER, Dietmar: CULT - CO2 Reduction by Intelligent Lightweight Design in Combination with

Alternative Powertrain in a Complete Vehicle. In: FISITA World Automotive Congress (Maastricht, Niederlande, 2014)

STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter: Die 12 Volt Bordnetz-Topologie, Betriebsstrategien und Potenziale für Ultraleichtfahrzeuge. In: 35. Internationales Wiener Motorensymposium (Wien, Österreich, 2014)

STEFFAN, Robert ; HOFMANN, Peter: Die Chancen und Potenziale von hybriden Antriebsmaßnahmen in Verbindung mit Ultraleicht-Fahrzeugen. In: 9. MTZ Fachtagung: Der Antrieb von morgen (Wolfsburg, Deutschland, 2014)