

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Betrachtung von hybriden Antriebssträngen für Nutzfahrzeuge Modellierung und Simulation eines seriellen Hybridbusses

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Associate Prof. Dr. techn. Peter Hofmann

E315

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau

Institutsvorstand: Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

und

Dipl.-Ing. Michael Aschaber

Steyr Motors GmbH

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefan Enzendorfer

e0326253

Berggasse 5, 4400 Steyr

Diplomaufgabe

Die Aufgabe der Diplomarbeit ist es Hybridsysteme für Nutzfahrzeuge zu untersuchen. Dazu werden die wichtigsten Einzelkomponenten von Hybridfahrzeugen betrachtet. Im Speziellen soll auf die Elektromaschine und den Dieselmotor näher eingegangen werden. Des Weiteren werden die Hybridsysteme klassifiziert und Betriebsstrategien für Hybride dargestellt. Die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Hybriden in Nutzfahrzeugen stellen einen weiteren wichtigen Punkt der Arbeit dar.

Im zweiten Teil der Diplomarbeit wird ein serielles Hybridsystem für Busse modelliert und eine Verbrauchssimulation mit verschiedenen Varianten durchgeführt. Hierbei werden unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen mit mehreren Motorvarianten und Betriebsstrategien untersucht. Des Weiteren wird das Hybridfahrzeug mit Fahrzeugen mit konventionellem und dieselektrischem Antrieb verglichen.

Vorwort

Aufgrund seiner hohen Kraftstoffeinsparungen stellt der Hybridantrieb eine der wichtigsten Weiterentwicklungen des Kraftfahrzeuges dar. Daher ist er auch eines der meistdiskutierten und interessantesten Antriebskonzepte der heutigen Fahrzeugentwicklung dar. Jedoch steht das Nutzfahrzeug hier wesentlich weniger im Fokus als der PKW obwohl es auch gerade in diesem Bereich ideale Anwendungen für Hybridantriebe gibt. Daher freut es mich sehr dass, ich bei der Steyr Motors GmbH eine Arbeit zu diesem Thema verfassen konnte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau Herrn Prof. Dr. Peter Hofmann. Sein fachkundiger Rat und seine Unterstützung waren mir eine große Hilfe.

Mein Betreuer bei Steyr Motors Herr DI Michael Aschaber hatte die Idee zu dieser Diplomarbeit. Durch seine großartige Betreuung und viele interessante Diskussionen ermöglichte er erst das entstehen dieser Arbeit. Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeitern von Steyr Motors, welche mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Sehr herzlich möchte ich mich bei DI Christian Vana von der Viseon Bus GmbH für das zur Verfügung stellen von Daten der Viseon Bus GmbH bedanken.

Abschließen will ich meinen Eltern für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums danken. Durch ihre Fröhlichkeit gab mir Martina die Kraft diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Eidesstattliche Erklärung

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

Betrachtung von hybriden Antriebssträngen für Nutzfahrzeuge
Modellierung und Simulation eines seriellen Hybridbusses

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit 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 Diplomarbeitsthema 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.

Steyr, am Datum

Stefan Enzendorfer

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung der *Steyr Motors GmbH* nicht gestattet.

Kurzfassung

Aufgrund des Treibhauseffekts werden die CO₂-Emissionen und damit der Verbrauch von KFZ immer mehr reguliert. Dies ist neben dem hohen Ölpreis und dem Trend zu höherer Energieautarkie das Hauptargument für den Einsatz von Hybridfahrzeugen. Aus den genannten Gründen sind Hybridsysteme, trotz ihrer höheren Kosten, eine sehr interessante Alternative im Fahrzeugbereich.

In dieser Arbeit wird zuerst das System Hybridfahrzeug näher betrachtet. Neben der Einteilung der Hybridsysteme und der Betriebsstrategien wird dabei vor allem auf die Komponenten des Hybridfahrzeuges und auf Nutzfahrzeughybride eingegangen. Bei den Motoren ist der Ottomotor zwar das Antriebsaggregat mit dem höchsten Verbrauchspotential, jedoch kann der Dieselmotor aufgrund seiner besseren Wirkungsgrade die niedrigeren Gesamtverbräuche erreichen. Bei der Elektromaschine gibt es einige interessante Varianten, wobei sich bei einem Vergleich die permanenterrregte Synchronmaschine als die geeignetste herausgestellt hat.

Gerade auch im Nutzfahrzeugbereich gibt es diverse Entwicklungen von seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybriden. Hierbei ist vor allem der Stadtbus mit seinem transientem Fahrzyklus als Anwendung interessant. Beim Stadtbus kann der serielle Hybrid seine Vorteile optimal zur Geltung bringen. Er bietet das höchste Rekuperationspotential aller Hybridvarianten und ermöglicht eine freie Drehzahl- und Drehmomentenwahl der Verbrennungskraftmaschine. Des Weiteren ermöglicht er als einzige Variante einen ausschließlichen Einsatz von Radnabenmotoren für die Traktion.

Um nähere Aussagen über den seriellen Hybridbus treffen zu können wurde dieser modelliert und simuliert. Dabei wurden, aufbauend auf einem Oberleitungsbus von *Viseon*, verschiedene Varianten untersucht. Hierbei wurden zwei 6-Zylinder und ein 4-Zylinder Dieselmotor von *Steyr-Motors* sowie die Betriebsstrategien Trajektorienbetrieb und ON-OFF Betrieb näher betrachtet. Diese Varianten wurden mit einem konventionellen Bus und einem dieselektrischen Bus verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass der serielle Hybrid eine sehr interessante Variante für den Stadtbus ist, welche hohe Verbrauchseinsparungen ermöglicht. Bei der Dieselmotorauslegung müssen, neben den Wirkungsgraden, vor allem die Leistungsanforderungen und die Lage des Bestpunktes beachtet werden.

Abstract

The CO₂ emissions and therewith the consumption of vehicles are increasingly regulated because of the greenhouse effect. This is next to the high oil price and the trend to higher energy independence the main reason for the application of hybrid vehicles. Because of these causes, and despite their higher costs, hybrid systems are an interesting alternative in the vehicle segment.

In this work I will first cover the system hybrid-vehicle. Next to a classification of hybrid systems and the operating strategies the components of hybrid vehicles and commercial vehicle hybrids will be examined in detail. The gasoline engine is the power plant with the highest fuel economy improvements, but the diesel engine is able to achieve the lowest consumption because of its higher efficiency. There are several interesting types of electric machines for hybrids. It was ascertained in a comparison that the permanent magnet synchronous motor is the most capable type.

As well in the commercial vehicle sector there are many developments of serial, parallel and powersplit hybrids. Above all city busses, with their transient driving cycle, are an interesting hybrid application. Especially in city busses the advantages of serial hybrids are apparent. They offer the highest recuperation potential of all hybrid types and enable an unconstrained engine speed and torque control. Furthermore the serial hybrid is the only type which enables an exclusive use of wheel hub motors.

A serial hybrid bus has been modeled and simulated to draw detailed conclusions about this system. Based on a trolley bus by *Viseon* several versions are examined. Two 6 cylinder and one 4 cylinder diesel engines by Steyr-Motors and the operating strategies "trajectory operation" and "ON-OFF operation" are discussed. These versions are compared to a conventional bus and a diesel-electrical bus. It could be shown that the serial hybrid is suitable for city busses. It enables high fuel economy improvements. When selecting the diesel engine the power requirements and the location of the most efficient point are as important as the engine efficiency.

Abkürzungsverzeichnis

AGM	Absorbent glass mat
APU	Auxiliary power unit
CVT	Continuous variable transmission
DE	Dieselelektrisch
EM	Elektromaschine
EVT	Electrical variable transmission – elektrisches Stufenlosgetriebe
HCCI	Homogenous charge compression ignition
Li-Ionen	Lithium-Ionen
mpg	miles per gallon
NFZ	Nutzfahrzeug
NiMH	Nickel-Metallhydrid
OBD	On-board Diagnose
PMSM	permanent erregte Synchronmaschine
SOC	State of Charge - Ladezustand
SRM	Switched reluctance machine - geschaltete Reluktanzmaschine
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VRLA	Valve regulated lead acid

Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG</u>	<u>1</u>
1.1	MOTIVATION	1
1.2	PROBLEMSTELLUNG	3
1.3	GLIEDERUNG	3
2	<u>DER HYBRIDE ANTRIEBSSTRANG</u>	<u>4</u>
2.1	DEFINITION HYBRIDFAHRZEUG	4
2.2	EINTEILUNG DER HYBRIDSYSTEME	4
2.2.1	EINTEILUNG NACH DER TOPOLOGIE	4
2.2.1.1	Serieller Hybridantriebsstrang	5
2.2.1.2	Paralleler Hybridantriebsstrang	8
2.2.1.3	Leistungsverzweigter Hybridantriebsstrang	9
2.2.2	EINTEILUNG NACH DER INSTALLIERTEN E-MASCHINENLEISTUNG	13
3	<u>BETRIEBSSTRATEGIE</u>	<u>15</u>
3.1	LASTPUNKTVERSCHIEBUNG	15
3.2	START-STOPP	18
3.3	ELEKTRISCHES FAHREN	19
3.4	BREMSENERGIERÜCKGEWINNUNG	19
3.5	BETRIEBSARTEN DER VERSCHIEDENEN HYBRIDVARIANTEN	20
3.5.1	SERIELLER HYBRIDANTRIEB	20
3.5.1.1	Trajektorienbetrieb	20
3.5.1.2	ON-OFF-Betrieb	20
3.5.2	PARALLELER HYBRIDANTRIEB	21
3.5.3	LEISTUNGSVERZWEIGTE HYBRIDANTRIEBE	21
4	<u>KOMPONENTEN VON HYBRIDFAHRZEUGEN</u>	<u>22</u>

4.1	DER VERBRENNUNGSMOTOR	22
4.1.1	DIESELMOTOR	22
4.1.2	OTTOMOTOREN	23
4.2	ELEKTRISCHE MASCHINEN FÜR HYBRIDFAHRZEUGE	24
4.2.1	ÜBERBLICK	24
4.2.1.1	Einteilung	24
4.2.1.2	Anforderungen an die elektrische Maschine	25
4.2.1.3	Betriebsgrenzen der elektrischen Maschine	26
4.2.2	GLEICHSTROMMASCHINE	28
4.2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	28
4.2.2.2	Vor- und Nachteile	29
4.2.2.3	Ausführungen	30
4.2.3	DREHSTROMMOTOREN	31
4.2.3.1	Asynchronmaschine	33
4.2.3.2	Synchronmaschine	35
4.2.3.2.1	Permanenterregte Synchronmaschine	35
4.2.3.2.2	Fremderregte Synchronmaschine	37
4.2.4	SONDERMASCHINEN	38
4.2.4.1	Geschaltete Reluktanzmaschine	38
4.2.4.2	Transversalflussmaschine	39
4.2.5	BEWERTUNG DER KONZEPTE	40
4.3	ENERGIESPEICHERSYSTEME	42
4.3.1	EINLEITUNG	42
4.3.2	ÜBERBLICK ÜBER DIE SPEICHERSYSTEME	42
4.3.3	BLEIAKKUMULATOREN	45
4.3.4	NICKEL-METALLHYDRID AKKUMULATOREN	45
4.3.5	LITHIUM-IONEN AKKUMULATOREN	46
4.3.6	SUPERKAPAZITÄTEN	46

	IX
4.3.7 VERGLEICH DER SYSTEME	47
4.4 LEISTUNGSELEKTRONIK	48
4.5 GETRIEBE FÜR HYBRIDFAHRZEUGE	49
4.5.1 VORGELEGEGETRIEBE	50
4.5.1.1 Automatisches Schaltgetriebe	50
4.5.1.2 Doppelkupplungsgetriebe	51
4.5.2 AUTOMATIKGETRIEBE	52
4.5.3 STUFENLOSE GETRIEBE	53
4.5.3.1 Two-Mode Hybridgetriebe	54
4.5.3.2 CVT – Getriebe	54
<u>5 HYBRIDSYSTEME FÜR NUTZFAHRZEUGE</u>	<u>55</u>
5.1 SERIELLE SYSTEME	56
5.1.1 DIESELELEKTRISCHE ANTRIEBE	57
5.1.2 SERIELLE HYBRIDANTRIEBE	58
5.2 PARALLELE HYBRIDSYSTEME	60
5.3 LEISTUNGSVERZWEIGTE HYBRIDSYSTEME	62
<u>6 SIMULATION EINES SERIELLEN BUSHYBRIDES</u>	<u>64</u>
6.1 MODELLIERUNG DES BUSHYBRIDEN	64
6.1.1 FAHRZEUGMODELL DES BUSSES	66
6.1.1.1 Fahrzeugdaten	66
6.1.1.2 Leistungsbedarf und Fahrwiderstände	67
6.1.1.3 Fahrzyklus und Energiebedarf	70
6.1.2 KOMPONENTEN VON SERIELLEM HYBRID UND DIESELELEKTRISCHEM ANTRIEB	71
6.1.2.1 Verbrennungskraftmaschine	72
6.1.2.2 Generator	73
6.1.2.3 Batterie	75

	X
6.1.2.4 Nebenaggregate	76
6.1.2.5 Traktionsmotor	76
6.1.2.6 Achsgetriebe und Reduktionsgetriebe	77
6.1.2.7 Trägheitsmoment	77
6.1.3 KOMPONENTEN DES KONVENTIONELLEN ANTRIEBES	78
6.1.3.1 Schaltgetriebe und Achsgetriebe	78
6.1.3.2 Trägheitsmomente	79
6.1.4 FAHRERMODELL	80
6.1.5 BETRIEBSSTRATEGIE	81
6.1.5.1 Trajektorienbetrieb	82
6.1.5.2 ON-OFF Betrieb	83
6.1.5.3 VKM – Steuerung	83
6.2 SIMULATION UND AUSWERTUNG	85
6.2.1 SERIELLER HYBRIDBUS MIT VKM <i>M16-TCA</i>	85
6.2.1.1 Leistungsbedarf des Seriellen Hybridbusses	92
6.2.2 VERBRAUCH DER BUSVARIANTEN MIT DER VKM <i>M16TCA</i>	93
6.2.2.1 Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlich hoher Hybridfunktionalität	93
6.2.2.2 Untersuchung verschiedener Fahrzeug- und Betriebsstrategievarianten	95
6.2.2.3 Auswirkung der Komponentenwirkungsgrade auf den Verbrauch	96
6.2.3 DER ON-OFF BETRIEB BEIM <i>M16TCA</i> -HYBRID	98
6.2.4 VERBRÄUCHE DER VERSCHIEDENEN VKM- UND ANTRIEBSTRANGVARIANTEN	99
6.2.5 BEWERTUNG UND VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN VKM-VARIANTEN	100
6.2.5.1 Steyr Motors M16TCA	100
6.2.5.2 Steyr Motors M16SCI	101
6.2.5.3 Steyr Motors MO174V40	104
<u>7 ZUSAMMENFASSUNG</u>	<u>105</u>
<u>8 LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>107</u>
<u>9 ANHANG</u>	<u>112</u>

9.1	DATENBLATT VISEON OBERLEITUNGSBUS	112
9.2	DATEN DER STEYR MOTORS DIESELMOTOREN	114
9.2.1	DATENBLATT	114
9.2.2	STEYR MOTORS M16TCA	114
9.2.3	STEYR MOTORS M16SCI	116
9.2.4	STEYR MOTORS MO174V40	116
9.3	GENERATORDIAGRAMME	117
9.3.1	GENERATOR 205 kW	117
9.3.2	GENERATOR 234,6 kW	117
9.4	WIRKUNGSGRADKENNFELD DES TRAKTIONSMOTORS	118
9.5	BESTPUNKTLINIEN DER LADEGRUPPEN	118
9.5.1	<i>SMO M16 TCA</i> + GENERATOR 205kW	118
9.5.2	<i>SMO M16 SCI</i> + GENERATOR 234,6 kW	119
9.5.3	<i>SMO MO174V40</i> + GENERATOR 205 kW	119
9.6	M-FILE DER EINGANGSGRÖßEN DES M16 TCA HYBRIDMODELLS	120
9.7	DATENBLATT DES AUTOMATGETRIEBES HP 502 C VON ZF	123

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mobilität stellt eines der Grundbedürfnisse des Menschen in unserer Gesellschaft dar. Durch die Erfindung von Eisenbahn, Kraftfahrzeug und Flugzeug ergaben sich völlig neue Möglichkeiten der Mobilität für den Menschen. Insbesondere ermöglichten diese Entwicklungen Mobilität für eine wesentlich größere Bevölkerungsschicht als bisher und führten zu einer wesentlichen Erhöhung der zurückgelegten Distanzen. Diese Entwicklungen bedingten jedoch auch eine starke Erhöhung des Energieverbrauches, insbesondere des Ölverbrauches. Das Kraftfahrzeug als wichtigstes Fortbewegungsmittel trägt dazu entscheidend bei.

Der Verkehr ist in Österreich für 32,3% [1] des CO₂- Ausstoßes und für 28% der Treibhausgasemissionen verantwortlich (Abb. 1). Die Gesamtemissionen an Treibhausgasen betragen 2007 in Österreich 88 Mio. t CO₂ Äquivalent [2]. Der Anstieg der Emissionen des Verkehrs um 10,2 Mio. Tonnen Kohlendioxidäquivalenten entspricht einer Erhöhung um 72,6% gegenüber 1990. Daraus ist ersichtlich, dass der Verkehr maßgeblich zum Treibhauseffekt beiträgt und die durch den Verkehr bedingten Emissionen in den letzten 20 Jahren auch stark gestiegen sind.

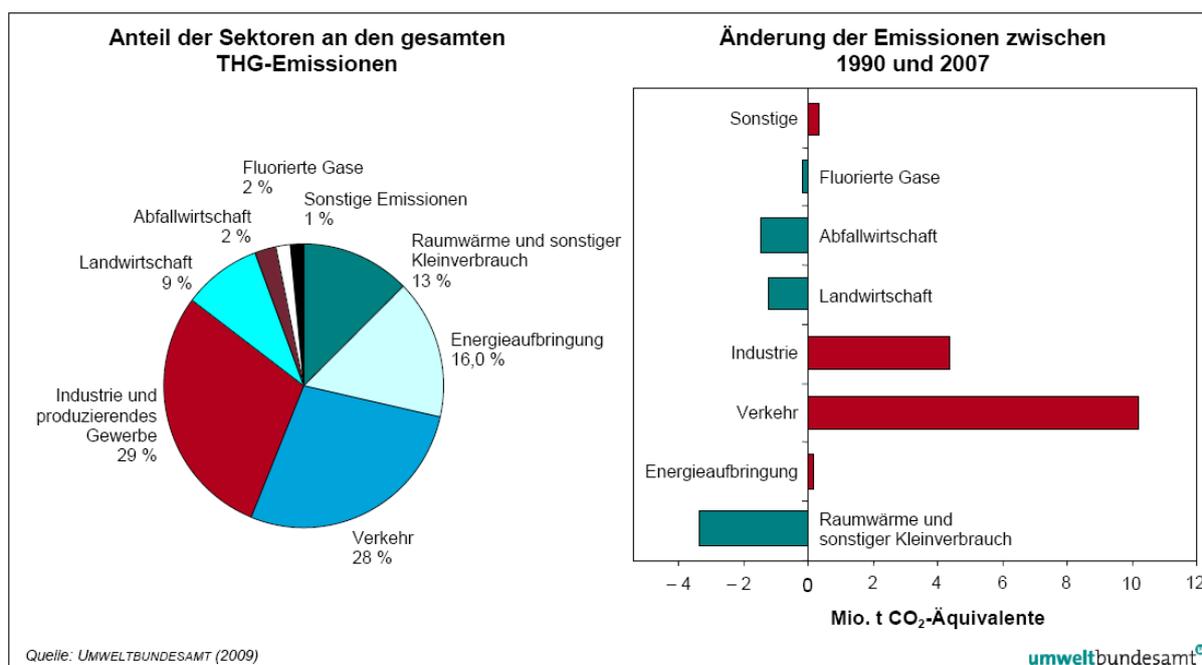


Abb. 1: Anteil der Sektoren an den Treibhausgasemissionen in Österreich 2007 und deren Änderung zu 1990 [2]

Das *Kyoto-Protokoll* legte erstmals verbindliche Treibhausgas-Reduktionsziele für die teilnehmenden Staaten fest. Das Ziel des Protokolls ist es, die Treibhausgasemissionen, insbesondere CO₂ bis zur Periode 2008-2012 um 5% gegenüber 1990 zu reduzieren. Die *EU* hat sich in diesem Rahmen zu einer Reduzierung von 8% verpflichtet, wobei *Österreich* eine Reduzierung von 13% erreichen soll. Daher haben die *EU* und andere Staaten Zielwerte für den Verbrauch von KFZ festgelegt, welche bei Nichterreichung auch zu Sanktionen führen. Diese Emissionsziele stellen einen der Hauptgründe zur Entwicklung energiesparender Fahrzeugkonzepte dar.

Der weltweit hohe Energieverbrauch führt des Weiteren zu einer Verknappung der Ölreserven und damit zu einem steigenden Ölpreis. Auch entwickelte sich der Ölpreis in den letzten Jahren aufgrund von Krisen im *Nahen Osten*, anderen geopolitischen Ereignissen und nicht zuletzt aufgrund von Spekulation an den Ölhandelsbörsen sehr volatil. Daher ist es für Staaten, Firmen und dem Konsumenten selbst zunehmend von Bedeutung, unabhängiger von der Ölpreisentwicklung zu sein.

Ich glaube, dass sich der Verbrauch selbst nur relativ gering auf das Kaufverhalten der Konsumenten im preissensiblen PKW-Massenmarkt auswirkt. In diesem Marktsegment ist, neben subjektiven Entscheidungskriterien wie Image der Marke oder Ausstattung, in erster Linie der Fahrzeugpreis entscheidend. Aufgrund der oben genannten Gründe gewinnt der Kraftstoffverbrauch jedoch immer mehr an Bedeutung als Kaufkriterium und kann zusätzlich durch staatliche Zuschüsse aufgewertet werden.

Bei Nutzfahrzeugen wird das Fahrzeug meist nach rein wirtschaftlichen Kriterien ausgewählt. Daher muss die mögliche Verbrauchsabsenkung tatsächlich auch zu einer Kostenreduzierung führen. Dies gilt natürlich auch für Busse für den öffentlichen Verkehr, jedoch spielen hier auch andere Kriterien wie, Image der Stadt / des Verkehrsbetriebes, Kundenwünsche, öffentliche Meinung, politischer Wille eine große Rolle.

Dieser Problembereich führt zu dem Ziel, möglichst kostengünstige und verbrauchsarme Nutzfahrzeuge für die zukünftige Mobilität zu entwickeln. Dabei stellen Hybridfahrzeuge, und im speziellen der serielle Hybrid beim Stadtbuss, eine interessante Möglichkeit, und somit das Thema dieser Diplomarbeit, dar.

1.2 Problemstellung

Zunehmend stoßen Hybridfahrzeuge auch im Nutzfahrzeugsegment auf gesteigertes Interesse. So gibt es vor allem im Stadtbusbereich schon verschiedene Entwicklungen und in Serie befindliche Anwendungen. Zu diesem Thema gibt es jedoch sehr verschiedene technologische Zugänge. Dieser große Variantenreichtum, mit verschiedensten zur Auswahl stehenden Einzelkomponenten macht es sehr schwierig, ein ideales Hybridkonzept für eine bestimmte Anwendung zu definieren. Daher sollen die grundlegenden Konzepte und Anwendungen für Nutzfahrzeuge untersucht werden. Da der Erfolg eines Hybridkonzeptes jedoch vor allem auch von der Eignung der gewählten Komponenten wie VKM, Batterie oder E-Maschine abhängt, sind diese entscheidend bei der Entwicklung von Hybridfahrzeugen. Um eine quantifizierbare Aussage über die Eignung eines bestimmten Konzeptes treffen zu können, muss jedoch ebenfalls das gesamte System als Einheit untersucht werden. Diese Untersuchung kann zum Beispiel durch Längsdynamiksimulation des Fahrzeuges erfolgen. Daraus können dann, über die Ermittlung von Verbrauch, Leistungsbedarf, etc., Schlüsse für das Gesamtkonzept gezogen werden.

1.3 Gliederung

Die Diplomarbeit gliedert sich in 2 Hauptteile.

Im theoretischen Teil wird das Hybridfahrzeug generell betrachtet. Er umfasst die Kapitel 2 bis 5. Dabei werden zuerst die verschiedenen Hybridkonzepte dargestellt und die Hybridvarianten klassifiziert. Im dritten Kapitel werden die Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge betrachtet. Diese sind für alle Hybridvarianten sehr ähnlich. Anschließend werden die einzelnen Komponenten des Hybridfahrzeuges untersucht. Dabei werden die verschiedensten Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt. Der Fokus bei der Komponentenuntersuchung liegt auf der E-Maschine. In Kapitel 5 wird näher auf das Nutzfahrzeug als Anwendung für den hybriden Antriebsstrang eingegangen.

Der zweite Teil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation eines seriellen Hybridbusses. Dabei werden verschiedenste Varianten des seriellen Hybridbusses betrachtet, sowie dieser mit einem dieselektrischem Antrieb und einem konventionellem Antrieb verglichen. Zuerst werden das untersuchte System und die Modelle der Einzelkomponenten dargestellt. Anschließend wird die Simulation beschrieben und deren Ergebnisse ausgewertet.

2 Der hybride Antriebsstrang

2.1 Definition Hybridfahrzeug

Die UNO definierte 2003 den Begriff Hybridfahrzeug wie folgt [3]:

„Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben.“

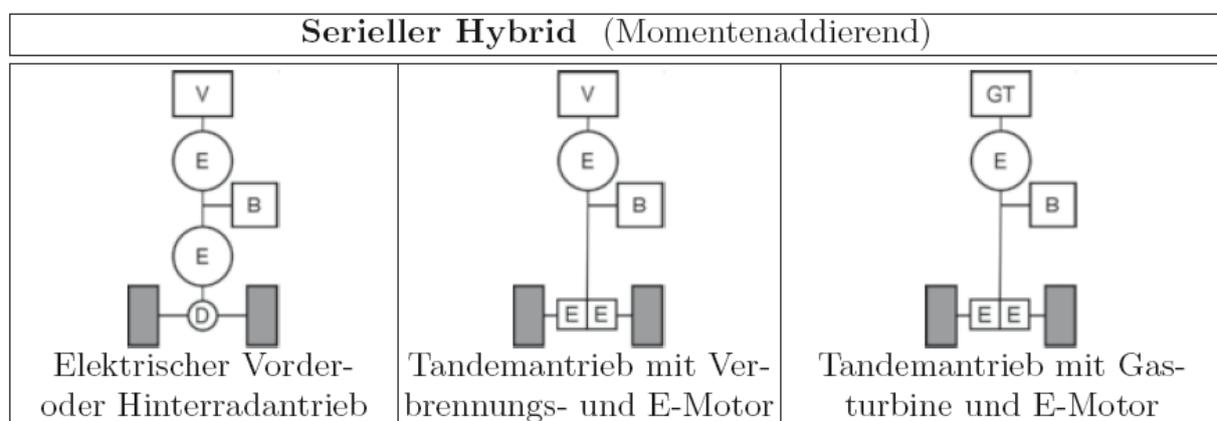
Bei den heute üblichen Hybridvarianten sind die Verbrennungskraftmaschine und die Elektromaschinen die Energiewandler. Der Kraftstofftank und die Batterie sind die Energiespeichersysteme.

2.2 Einteilung der Hybridsysteme

Hybridfahrzeuge werden üblicherweise nach zwei Gesichtspunkten eingeteilt. Einerseits wird die Topologie des Antriebsstranges und damit der Aufbau des Hybridantriebes betrachtet. Andererseits können Hybride auch nach der Leistung der installierten Elektromaschinen (EM) eingeteilt werden.

2.2.1 Einteilung nach der Topologie

In Abb. 2 sind verschiedene Topologien von Hybridfahrzeugen dargestellt. Es ist eine Unterscheidung in 3 Hauptvarianten ersichtlich. Diese sind der Serieller Hybrid, der Parallele Hybrid und der Leistungsverzweigte Hybrid.



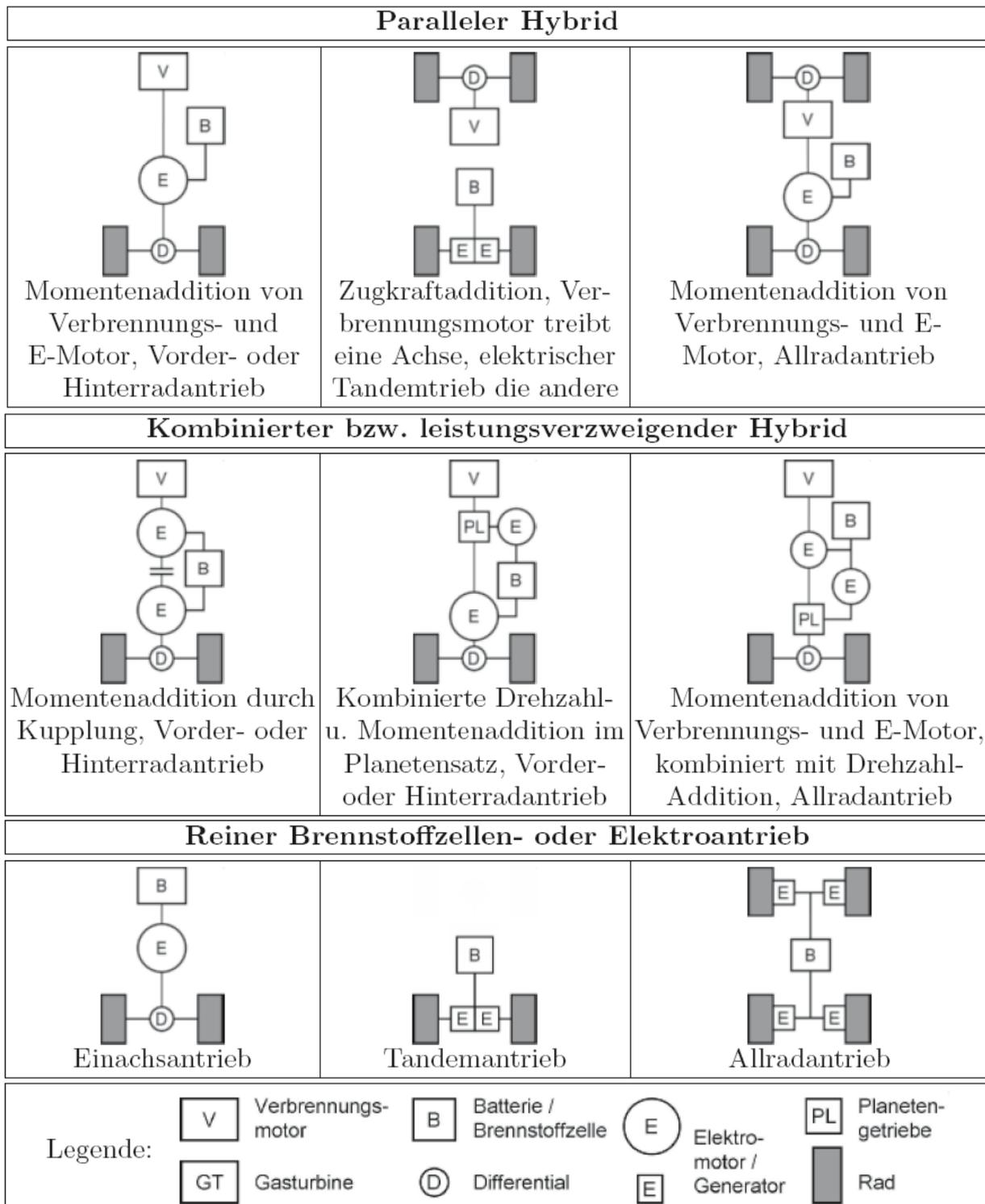


Abb. 2: Einteilung von Hybridsystemen [4] S.567

2.2.1.1 Serieller Hybridantriebsstrang

In Abb. 3 ist ein serieller Hybridantrieb schematisch dargestellt. Beim seriellen Hybridantriebsstrang wird aus der Bewegungsenergie der Verbrennungskraftmaschine (VKM) vom Generator elektrische Energie erzeugt. VKM plus Generator werden auch als Ladegruppe bezeichnet. Die als Wechselstrom vorliegende Energie wird über

Umrichter in eine Gleichspannung umgewandelt und dient entweder zum Laden der Batterie oder zum Betrieb des elektrischen Traktionsmotors, welcher über Wechselrichter angesteuert wird.

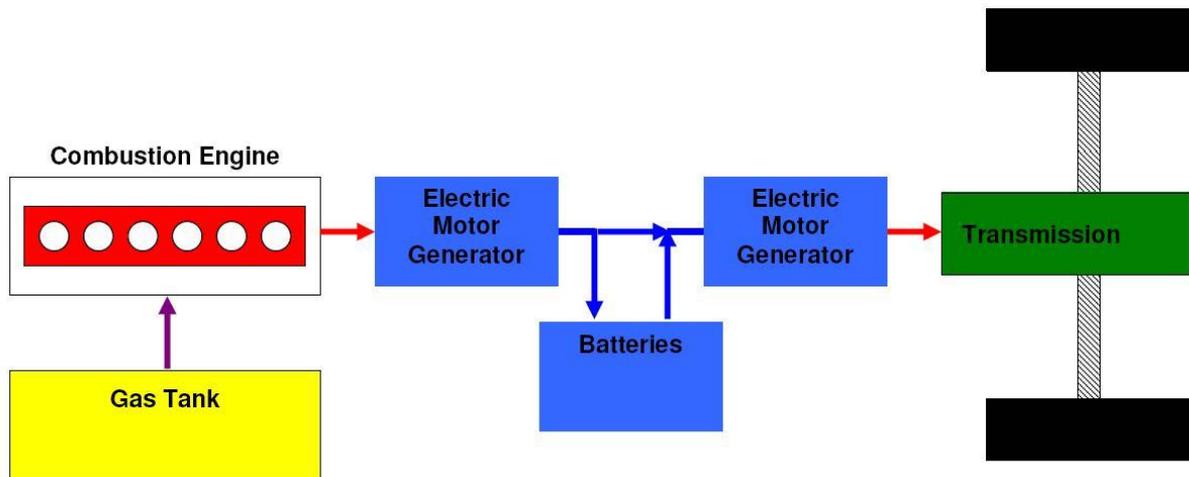


Abb. 3: Serieller Hybridantrieb [5]

Der Traktionsmotor ist die eigentliche Antriebseinheit des Fahrzeuges. Auf mechanische Kennungswandler und Anfahrkupplungen kann beim seriellen Hybridantrieb verzichtet werden, da der serielle Hybridantriebsstrang wie ein EVT (Electrical variable transmission) arbeitet. Dieses EVT ermöglicht jede beliebige Übersetzung zwischen VKM und Abtrieb. So kann die VKM auch bei Stillstand des Fahrzeuges betrieben werden, und dabei die Batterie über den Generator laden. Eine weitere Möglichkeit ist, das Fahrzeug bei abgeschalteter VKM zu betreiben. Dabei wird der Traktionsmotor von der Batterie gespeist. Dieser Betriebsmodus ist jedoch aufgrund der eingeschränkten Batteriekapazitäten nur kurzzeitig möglich.

Es sind verschiedene Auslegungen von Serienhybriden denkbar, welche sich durch eine unterschiedliche Dimensionierung von Batterie und Ladegruppe unterscheiden. Der Traktionsmotor selbst muss grundsätzlich nach der erforderlichen Höchstleistung ausgelegt werden. Diese tritt normalerweise bei der Höchstgeschwindigkeit auf. Batterie und Ladegruppe müssen dem Fahrzyklus entsprechend ausgelegt werden.

Bei der klassischen Auslegung wird die Ladegruppe so groß dimensioniert, dass sie die Maximalleistungsanforderung des Traktionsmotors abdecken kann. Dies führt dazu, dass die Ladegruppe meist sogar etwas größer als der Traktionsmotor dimensioniert werden muss. Vorteilhaft bei dieser Variante ist, dass eine relativ kleine Batterie gewählt werden kann und die Maximalleistung kontinuierlich zur Verfügung steht.

Nachteilig ist, dass die VKM vor allem im Stadtverkehr relativ häufig im Teillastbereich mit seinen schlechten Wirkungsgraden betrieben werden muss.

Das genaue Gegenteil der klassischen Auslegung sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge mit „Range Extender“. Dabei wird die Ladegruppe nur zur Reichweitenerhöhung eines Elektrofahrzeuges eingesetzt. Dieser „Range Extender“ ermöglicht jedoch nicht den Betrieb bei Maximalleistung und liefert in etwa nur die mittlere benötigte Leistung für den Stadtbetrieb. Er kann jedoch kontinuierlich bei Volllast und somit sehr hohem Wirkungsgrad betrieben werden. Bei dieser Variante sind sehr große und damit teure Batterien notwendig.

Vorteile des seriellen Hybridantriebes sind:

- Vollständige Entkopplung von VKM und Abtrieb
- Größtes Potential für Emissionsverminderung
- Verbrauchseinsparungen
- Flexible räumliche Anordnung der Komponenten
- Einsatz der VKM im verbrauchsgünstigen Betriebsbereich möglich
- Einsatz einer kleineren VKM möglich (Downsizing)
- Nutzung der Bremsenergie
- Rein elektrischer Betrieb mit eingeschränkter Reichweite möglich
- Radnabenantrieb ist möglich
- Entwicklungsaufwand niedriger
- Viele Anbieter für Komponenten

Nachteile des seriellen Hybridantriebes sind:

- Teuer, hohe Systemkosten (E-Maschinen, Leistungselektronik)
- Höchste installierte E-Maschinenleistung notwendig
- Schlechter Übertragungswirkungsgrad
- Meist schlechterer Gesamtwirkungsgrad als andere Hybridvarianten

Der schlechte Übertragungswirkungsgrad des seriellen Hybrid kann bei sehr transientem Betriebsverhalten stärker kompensiert werden. Dies ist möglich, da die Rekuperation, aufgrund der hohen installierten E-Maschinenleistung, mit seriellen Hybriden optimal durchgeführt werden kann und der Lastpunkt der VKM frei wählbar ist. Der serielle Hybridantriebsstrang kann mit Radnabenantrieben ausgeführt werden. Er ermöglicht auch einen stark modulweisen Aufbau. Die Batterie im

Gleichspannungszwischenkreis kann grundsätzlich weggelassen werden. Dann handelt es sich jedoch nicht mehr um einen seriellen Hybrid im eigentlichen Sinn. Dieses Konzept eines dieselektrischen Antriebes bietet nur mehr die Vorteile der Antriebsstrangauflösung und der flexiblen räumlichen Anordnung der Komponenten.

Quellen: [4], [6], [7]

2.2.1.2 Paralleler Hybridantriebsstrang

Beim parallelen Hybrid ist meist zwischen VKM und Getriebe ein Elektromotor eingebaut. In Abb. 4 sind verschiedene Varianten von parallelen Hybriden dargestellt. Dieses Konzept ermöglicht die Kombination der Antriebsleistung durch Momentenaddition, Drehzahladdition oder Zugkraftaddition.

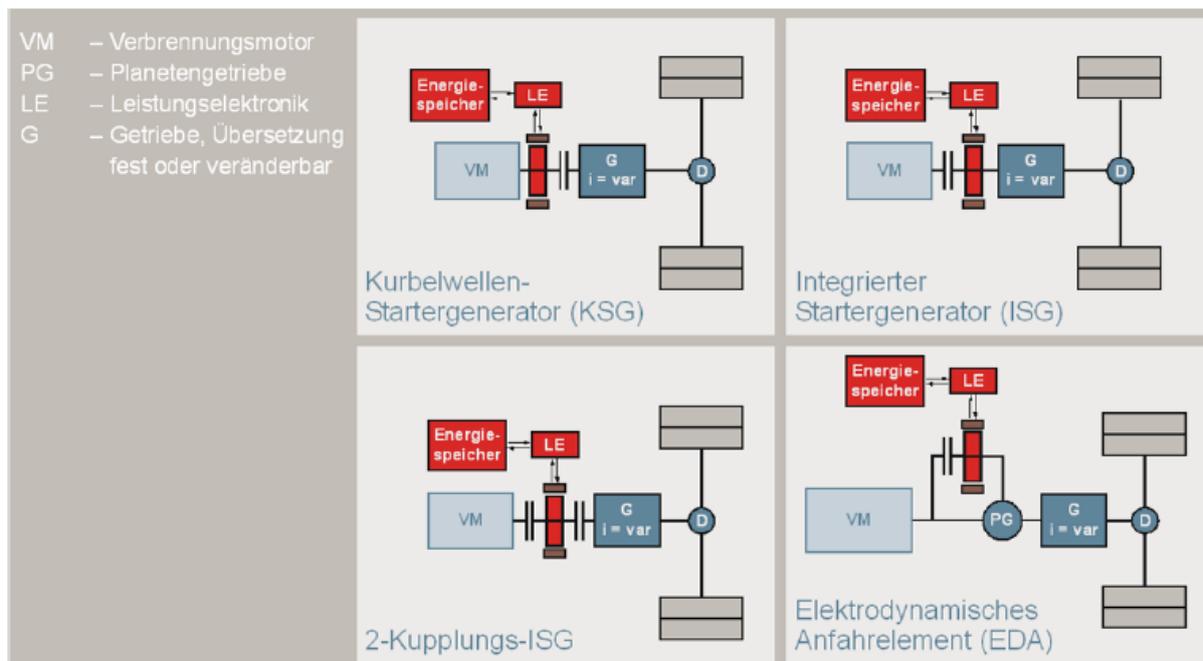


Abb. 4: Varianten von Parallelen Hybriden [8]

Bei der Momentenaddition (z.B.: integrierter Startergenerator) werden VKM-Moment und Elektromaschinen-Moment kombiniert. Die Drehzahlen von VKM, Elektromaschine und Getriebeeingangswelle sind bei diesem Konzept jedoch fix gekoppelt. Durch die Momentenaddition kann Energie in die Batterie gespeist oder aus ihr entnommen werden. Dies erfolgt durch Anheben bzw. Absenken des VKM-Lastpunktes verglichen zur Lastanforderung durch den Fahrer. Die Momentenaddition stellt die wichtigste Variante für parallele Hybride dar und wird in fast allen Parallelhybridkonzepten der Fahrzeughersteller angewendet.

Bei der Drehzahladdition werden die Drehzahlen über ein Planetengetriebe miteinander kombiniert, die Momentenverhältnisse sind jedoch fix vorgegeben. Dadurch lässt sich ebenfalls Leistung zwischen VKM, Batterie und Abtrieb verteilen. Bei der Drehzahladdition kann die VKM-Drehzahl unabhängig von der Raddrehzahl gewählt werden. Somit ist ebenfalls eine Lastpunktverschiebung möglich.

Die dritte Möglichkeit eines parallelen Hybridantriebsstranges ist die Zugkraftaddition. Diese stellt ebenfalls eine Form von Momentenaddition dar, wobei hier die elektrische Maschine eine eigene Achse antreibt. Somit ist ein Hybrid-Allradantrieb darstellbar.

Vorteile des parallelen Hybridantriebs sind:

- Günstigste Variante
- Vielfalt der Betriebsmöglichkeiten
- Einsatz der Antriebsaggregate alternativ oder kombiniert → Einsatz kleiner VKM möglich (Downsizing)
- Überlagerung oder Verspannung der Antriebsmomente möglich
- Nutzung der Bremsenergie
- Rein elektrischer Betrieb mit eingeschränkter Leistung und Reichweite möglich

Nachteile parallel Hybrid:

- Meist geringeres Rekuperationspotential aufgrund der niedrigeren installierten Elektromaschinenleistung
- Keine Entkopplung von VKM und Antrieb

Der Parallele Hybrid eignet sich am besten für Fahrzeuge, welche im Mischbetrieb verwendet werden. Das heißt für Fahrzeuge die sowohl in der Stadt, Überland und auf Autobahnen bewegt werden. Da tendenziell kleinere Elektromaschinenleistungen verbaut werden, ermöglicht er eine relativ kostengünstige Hybridvariante, welche einfacher in bereits bestehende Fahrzeugkonzepte integriert werden kann. Dazu sind jedoch geeignete Getriebe mit integrierter Elektromaschine notwendig. Parallelhybride weisen normalerweise einen geringen Hybridisierungsgrad auf.

Quelle: [6]

2.2.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantriebsstrang

Der leistungsverzweigte Hybridantrieb stellt eine Kombination zwischen den beiden bereits beschriebenen Varianten dar. Er ermöglicht die Aufteilung der elektrischen Leistung in einen mechanischen Pfad und einen elektrischen Pfad. Bei den

leistungsverzweigten Hybriden gibt es verschiedenste Varianten, welche sich aus Kombinationen von Momenten und Drehzahladdition zusammensetzen. In Abb. 5 aus [9] ist ein leistungsverzweigtes Getriebe mit einem ausgangsgekoppeltem Planetenradsatz dargestellt.

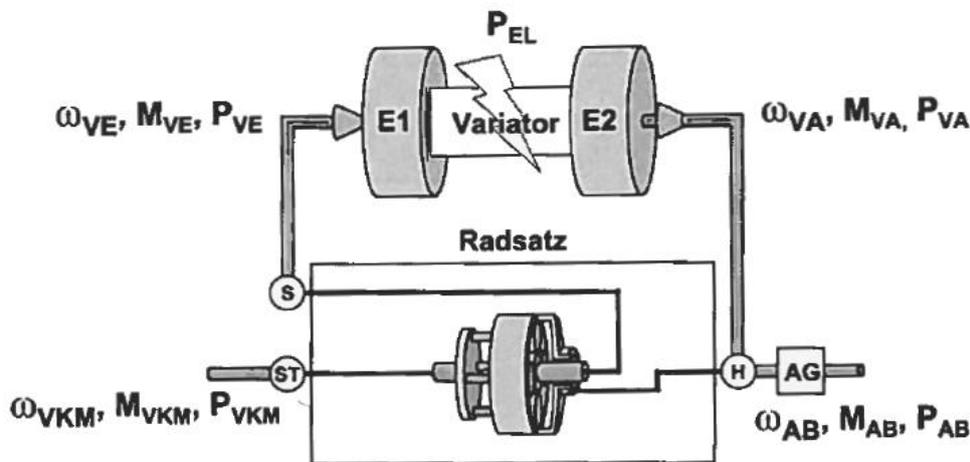


Abb. 5: Elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe mit einem Planetenradsatz [9]

S=Sonnenrad, ST=Steg, H=Hohlrads

Dieser Planetenradsatz ist jedoch nur eine von vielen möglichen Ausführungsformen des Radsatzes. Er kann aus verschiedensten Kombinationen von Planetensätzen, Übersetzungen und Kupplungen bestehen.

Betrachtet man nun den Leistungsfluss und die Wirkungsgrade über das leistungsverzweigte Getriebe Abb. 6 aus [9] ergeben sich zwei Pfade, der elektrische und der mechanische Zweig.

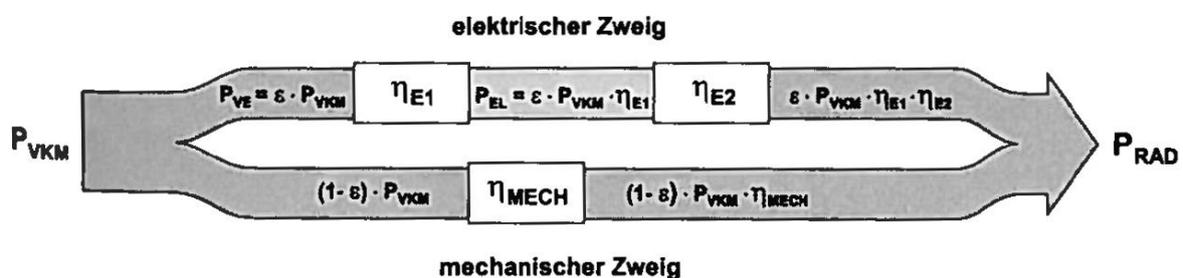


Abb. 6: Leistungsfluss im Getriebe bei reiner Leistungsteilung

Das Verhältnis zwischen der von der E1 (Elektromaschine 1 = E1) generatorisch aufgenommenen Leistung P_{VE} und der Eingangsleistung P_{VKM} ergibt sich zu (1):

$$\varepsilon = \frac{P_{VE}}{P_{VKM}} \quad \text{Leistungsaufteilung} \quad (1)$$

Nimmt man nun einen Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen inklusive Umrichter von 90% an, so ergibt sich für den elektrischen Zweig (ohne Batteriezwischenspeicherung) ein Wirkungsgrad von 80%. Dieser liegt weit unter jenem des mechanischen Zweiges, welcher bei einfachen Ausführungen bis zu 99% betragen kann. Aus diesen Größen ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad des leistungsverzweigten Getriebes (2) aus [9]:

$$\eta_{GES} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{\eta_{E1}}\right) \cdot \eta_{MECH} + \varepsilon \cdot \eta_{E2} \quad \text{Gesamtwirkungsgrad} \quad (2)$$

Um nun einen Gesamtwirkungsgrad des Getriebes von über 90% zu erreichen, darf der Leistungsanteil über den elektrischen Pfad nicht mehr als $\varepsilon = 0,3$ betragen. Daraus ergibt sich das Ziel, möglichst viel Leistung mechanisch zu übertragen, um einen hohen Getriebewirkungsgrad zu erreichen. Diese Forderung wird jedoch von einigen anderen Kriterien überlagert. Das elektrisch leistungsverzweigte Getriebe arbeitet als stufenloses Getriebe und muss somit gewisse Übersetzungen zwischen VKM und Rad ermöglichen sowie eine ausreichende Spreizung gewährleisten. Des Weiteren müssen zusätzliche Funktionalitäten wie Bremsenergierückgewinnung und Start-Stopp ermöglicht werden. Die in Abb. 5 betrachtete Struktur kann als einfaches Beispiel dienen, um die Leistungsaufteilung bei bestimmten Übersetzungen zu untersuchen. Bei dieser Variante wird ein antriebsseitig angeordneter Planetensatz mit zwei elektrischen Maschinen gekoppelt. Der Ausgang des Variators (der elektrische Zweig) ist fest mit dem Ausgang des Planetensatzes am Hohlrad gekoppelt. Es erfolgt eine Momentenaddition. Der Getriebeeingang ist mit dem Steg des Planetensatzes und der Variatoreingang E1 mit dem Sonnenrad verbunden. Dies führt zu einer Drehzahlvariation zwischen Getriebeeingang und –ausgang aufgrund der Drehzahl der E1. In Abb. 7 ist die Leistungsaufteilung dieses leistungsverzweigten Getriebes bei verschiedenen Übersetzungen ersichtlich. Der Punkt P1 stellt die Übersetzung dar, bei der die gesamte Leistung über den mechanischen Zweig fließt. Die E1 muss an diesem Punkt nur ein Haltemoment aufbringen. Bei zunehmender Abweichung von dieser Übersetzung wird mehr Leistung über den elektrischen Zweig übertragen. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass bei dieser Variante nur in einem kleinen Bereich ein Leistungsanteil von unter 30% über den elektrischen Pfad fließt, und somit Wirkungsgrade über 90% auftreten. Würde nur dieser Bereich genutzt werden, wäre die Spreizung des stufenlosen Getriebes zu gering. Somit müssten schlechtere Wirkungsgrade in Kauf genommen werden, oder andere kompliziertere Radsatzvarianten gewählt werden. Im Bereich mit negativer

Blindleistung zirkuliert Leistung im stufenlosen Getriebe. Diese führt zu hohen Belastungen des leistungsverzweigten Getriebes und schlechten Wirkungsgraden. Daher sollte dieser Bereich vermieden werden.

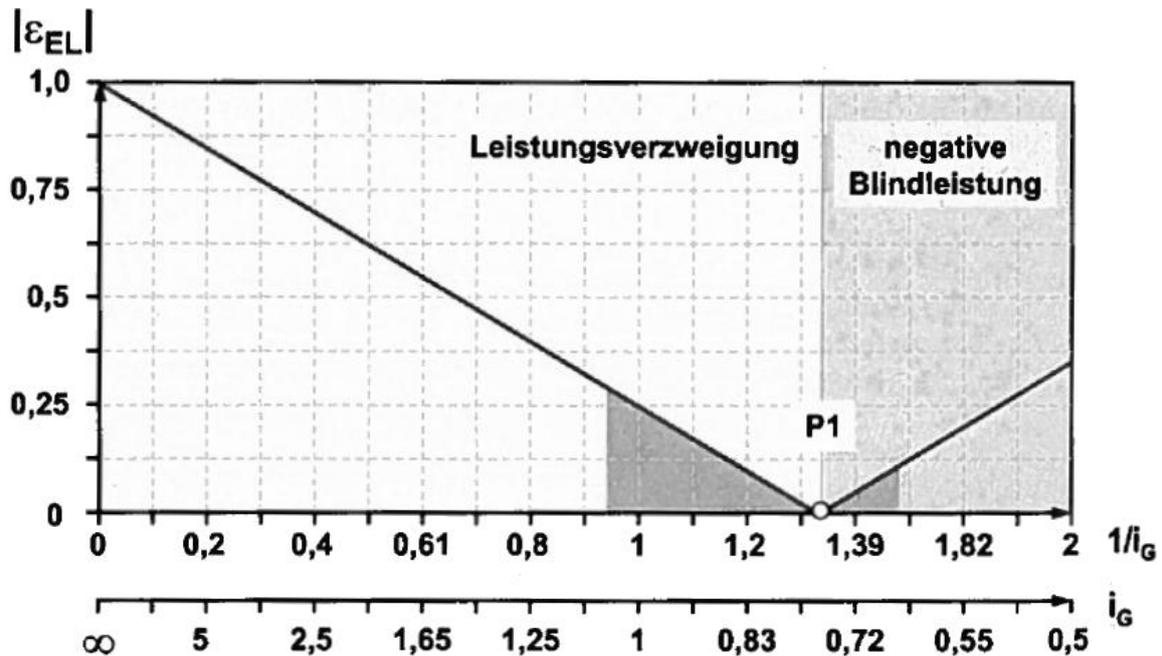


Abb. 7: Leistungsaufteilung ϵ für eine ausgangsgekoppelte Getriebestruktur in Abhängigkeit von der Getriebeübersetzung i_G [9]

Mit weiterentwickelten Getriebestrukturen lassen sich beim leistungsverzweigten Getriebe sehr hohe Wirkungsgrade erreichen. So wird in Kapitel 5.3 ein leistungsverzweigtes Getriebe mit 3 Planetensätzen und zwei unterschiedlichen mechanischen Übersetzungen beschrieben. Dadurch ist eine wesentlich günstigere Leistungsaufteilung zwischen elektrischem und mechanischem Pfad mit einem über weite Bereiche niedrigeren elektrischen Anteil möglich. Mit der im Variator verbauten Batterie ergibt sich dadurch eine sehr flexible Getriebestruktur. Weitere Verbesserungen des Wirkungsgrades sind durch die Darstellung von fixen mechanischen Gängen möglich, bei denen keine Leistung über den elektrischen Zweig fließt.

Vorteile des leistungsverzweigten Hybriden:

- Höchstes Kraftstoffeinsparungspotential
- Hohe Flexibilität der Aufteilung der Antriebsleistung
- Lastpunktverschiebung der VKM möglich
- Bremsenergierückgewinnung
- Start-Stopp Betrieb

Nachteile:

- Teuer
- Kompliziertes Getriebe
- Hoher Entwicklungsaufwand

Quelle: [9], [6]

2.2.2 Einteilung nach der installierten E-Maschinenleistung

Die zweite wichtige Möglichkeit Hybridsysteme einzuteilen ist nach der installierten E-Maschinenleistung. In Tab. 1 nach [10] ist eine Einteilung von Nutzfahrzeughybriden nach der E-Maschinenleistung dargestellt.

Tab. 1: Einteilung der Nutzfahrzeughybride nach der installierten Leistung der E-Maschine(n)

	Leistung der E-Maschine(n)	Spannungs-niveau	Funktion
Micro Hybrid	2 – 4 kW	≥ 24 V	Entkopplung Nebenaggregate
Mild Hybrid	5 – 20 kW	100 – 500 V	Stopp-Start, eingeschränkte Bremsenergieerückgewinnung, Entkopplung Nebenaggregate
Power Assist Hybrid	20 – 75 kW	100 – 500 V	Stopp-Start, eingeschränkte Bremsenergieerückgewinnung, Entkopplung Nebenaggregate, Boostfunktion
Full Hybrid	100 – 250 kW	400 – 800 V	Bremsenergieerückgewinnung, Stopp-Start, rein elektrischer Betrieb möglich, Entkopplung Nebenaggregate

Zu beachten ist, dass der Nutzfahrzeugsektor ein sehr breit gefächertes Bereich, mit den verschiedensten Anwendungen und installierten VKM-Leistungen ist. Daher ist die Einteilung in Tab. 1 zwar repräsentativ für Nutzfahrzeuge, die angeführten Leistungen können jedoch von Anwendung zu Anwendung von den beschriebenen Leistungen abweichen. Aufbauend auf der verbauten Elektromaschinenleistung werden Hybride gerne nach ihrer Funktionalität eingeteilt. Micro-Hybride ermöglichen zum Beispiel nur eine Entkopplung der Nebenaggregate und eventuell die Implementierung einer Start-Stop Strategie. Full-Hybridfahrzeuge dagegen bieten den gesamten Funktionsumfang des Hybridsystems, mit rein elektrischem Fahren und maximaler

Bremsenergie­rückgewinnung. Full-Hybride benötigen jedoch die höchste installierte Elektromaschinenleistung.

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Einteilung von Hybridsystemen ist, die installierte Elektromaschinenleistung auf die VKM-Leistung zu beziehen. In [11] wird ein Koeffizient der Hybridisierung ermittelt (3).

$$K_H = P_{em} / P_{vkm} \quad \text{Hybridisierungsgrad} \quad (3)$$

P_{em} Leistung des/der Elektromotor(en)
 P_{vkm} Leistung des Verbrennungsmotors

Vergleicht man den Kraftstoffverbrauch verschiedener Hybridfahrzeuge über dem Hybridisierungsgrad ergeben sich laut [11] sehr interessante Ergebnisse. Bei parallelen und kombinierten Hybridfahrzeugen ergibt sich ein Optimum des Kraftstoffverbrauches bei K_H -Werten von 0,9 bis 1 (Abb. 8).

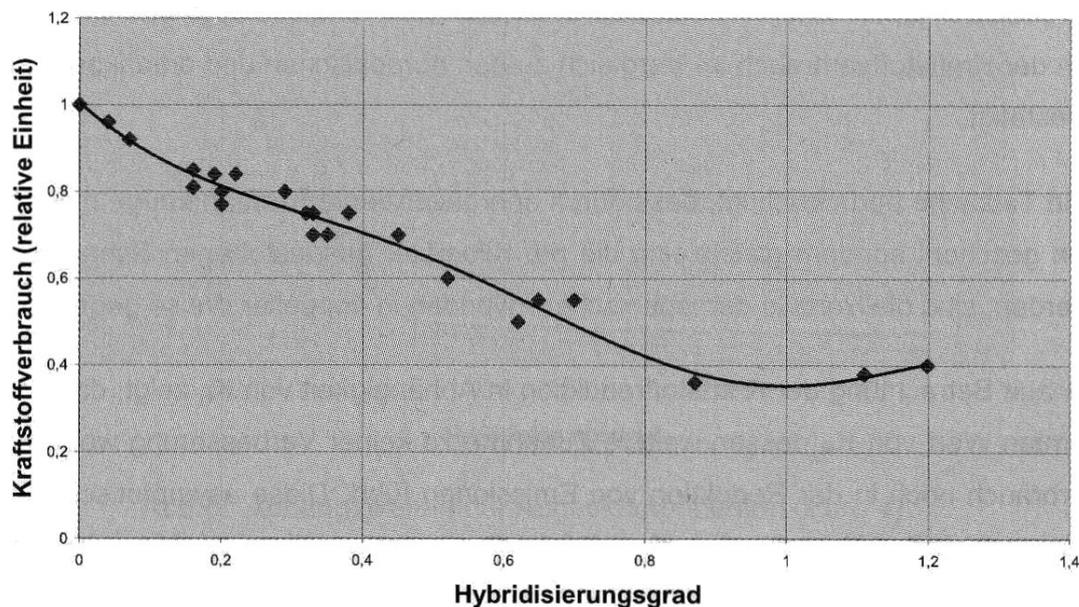


Abb. 8: Parallele und kombinierte Hybridantriebe

Bei seriellen Hybridfahrzeugen liegt dieses Optimum bei einem deutlich höheren Hybridisierungsgrad von ca. 2,5.

Zusammenfassend liegt das Potential zur Senkung des Kraftstoffverbrauches für parallele Hybridfahrzeuge bei 5 bis 25%. leistungsverzweigte können 60 bis 65% und serielle Hybrid ca. 50% Kraftstoffeinsparung erreichen.

3 Betriebsstrategie

Bei der Wahl der Betriebsstrategie müssen zuerst die Entwicklungsziele definiert werden. So können ein niedriger Kraftstoffverbrauch, niedrige Emissionen (Schadstoffe, Lärm) aber auch eine erhöhte Funktionalität (besseres Beschleunigungsvermögen, etc.) die wichtigsten Kriterien der Entwicklung sein. Bei Hybridfahrzeugen ist das Ziel meist einen möglichst geringen Kraftstoffverbrauch zu erreichen. Dies bedeutet, dass der geforderte Fahrzyklus mit einem möglichst geringen Energiebedarf bewerkstelligt werden soll. Dabei müssen jedoch annehmbare beziehungsweise zumindest gleichbleibende Fahrleistungen erreicht werden. Diese Forderung wird zusätzlich durch den höheren technischen Aufwand durch zusätzliche Aggregate und das höhere Fahrzeuggewicht durch das Hybridsystem erschwert.

Um die geforderten Energieeinsparung zu erreichen, sind die Betriebsstrategien Lastpunktverschiebung, Start-Stopp, elektrisches Fahren und Bremsenergie-Rückgewinnung möglich. Diese verschiedenen Strategien müssen mit einem optimalen Energiemanagement verbunden werden. Dieses muss sicherstellen, dass die Energie wirkungsgradoptimal erzeugt wird, sowie die Potentiale von Start-Stopp und Rekuperation optimal genutzt werden. Des Weiteren muss das Energiemanagement die technischen Beschränkungen der einzelnen Komponenten berücksichtigen. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Betriebsstrategien näher beschrieben. Das Energiemanagement wird dabei nur am Rande näher behandelt, da es, je nach Hybridvariante sehr abweichen kann. Die Quellen dieses Abschnittes sind [6], [7].

3.1 Lastpunktverschiebung

Die Lastpunktverschiebung ist die grundlegende Strategie des Hybridfahrzeuges, da sie versucht die Energieerzeugung in der VKM möglichst effizient zu gestalten. Betrachtet man den Betrieb eines Verbrennungsmotors mit einem gewöhnlichen Getriebe, so wird ersichtlich, dass der Betriebsbereich der VKM bei Konstantfahrt nicht im Kennfeldbereich mit den geringsten spezifischen Verbräuchen liegt, sondern meist in Bereichen mit wesentlich höheren Verbräuchen. Dies ist in Abb. 9 im Muscheldiagramm mit eingezeichneten Fahrwiderstandslinien ersichtlich. Durch die endliche Zahl an Übersetzungen und die benötigte Zugkraftreserve für Beschleunigungsmanöver kann die VKM nicht im optimalen Kennfeldbereich betrieben werden. Daher wäre es sinnvoll, den Betriebsbereich der VKM möglichst in diesen optimalen Bereich zu verschieben. Um dies zu erreichen, sind eine freie Wahl von Drehzahl und Drehmoment notwendig.

Diese freie Wahl wird jedoch durch die Leistungs- und Energiebilanz als Randbedingung beschränkt, wobei sich weitere Freiheitsgrade durch den Einbau einer Batterie ergeben. Die Verschiebung des Betriebsbereiches der VKM ist entweder durch eine Anhebung des Lastpunktes oder eine Absenkung der VKM-Drehzahl, auch als Downspeeding bezeichnet, möglich (Abb. 9). Bei der Lastpunktanhebung wird ein Teil der VKM-Leistung über den E-Motor in die Batterie gespeist. Eine weitere Möglichkeit der Lastpunktverschiebung ist die Lastpunktabsenkung, das so genannte Boosten. Dabei wird die VKM durch die E-Maschine unterstützt bzw. der Traktionsmotor beim seriellen Hybriden stärker als der Generator belastet. Je nach Hybridvariante sind diese Möglichkeiten darstellbar.

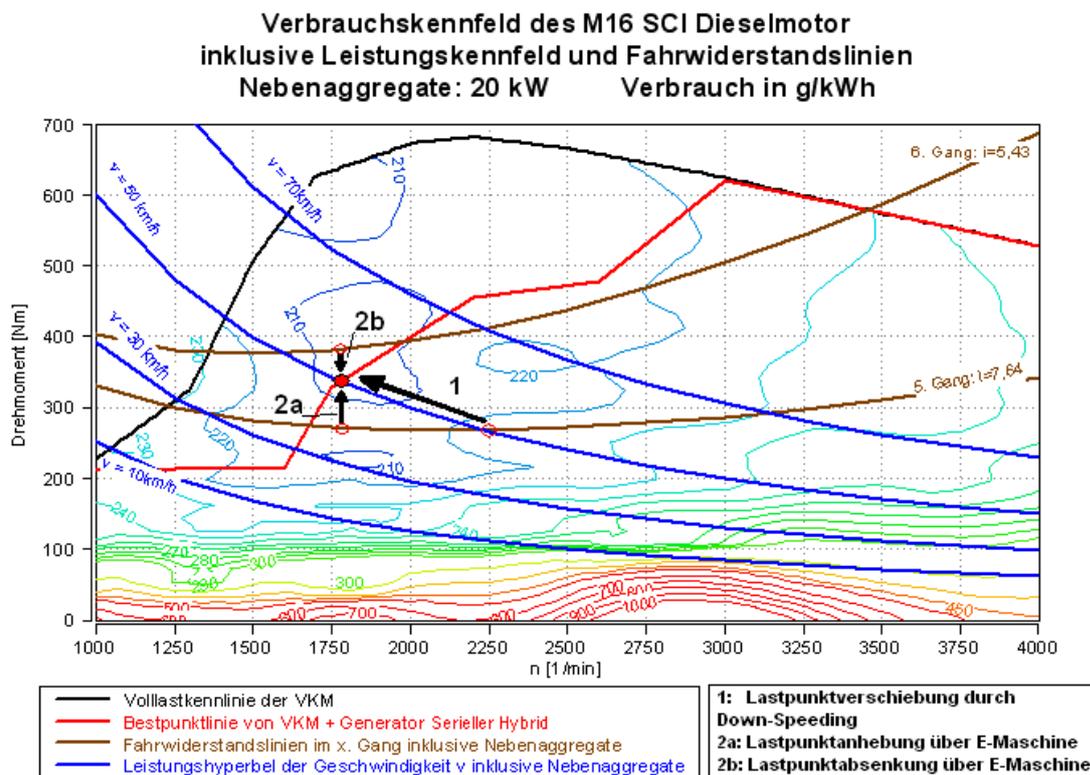


Abb. 9: Lastpunktverschiebung im Muscheldiagramm des aufgeladenen Dieselmotors M16 SCI von Steyr Motors in einem Stadtbus

Serielle und leistungsverzweigte Hybride erlauben aufgrund ihrer Architektur eine nahezu freie Wahl der VKM-Drehzahl. Dadurch kann der Lastpunkt entlang der Linie für die konstante Geschwindigkeit frei gewählt werden. Bei Parallelhybriden ist dies nur durch eine längere Übersetzung des Getriebes möglich. Dies vermindert jedoch die Zugkraftreserve und damit die Elastizität des Fahrzeuges. Dieser Effekt kann jedoch durch Boosten mit dem Elektromotor kompensiert werden. Lastpunktanhebung und Boosten sind bei allen Hybridarchitekturen möglich. Dadurch kann der Drehmoment-

Lastpunkt der VKM bei einer bestimmten Drehzahl noch zusätzlich verschoben werden. Vor allem die Lastpunktanhebung hat große Bedeutung, da Fahrzeuge meist im Teillastbereich betrieben werden. Die beschränkenden Größen für diese Betriebsarten sind die Elektromaschinenleistungen sowie die Batteriekapazität.

Eine starke Entkoppelung von Leistungsanforderung für den Fahrbetrieb und Leistungserzeugung durch die VKM ermöglicht einen verbrauchsgünstigen und konstanten Betrieb der VKM. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Umwandlungsverluste durch den Fluss über den elektrischen Zweig und die Batterie niedriger sein müssen als die dadurch gewonnene Wirkungsgradverbesserung der VKM.

Eine weitere Möglichkeit zur sinnvollen Nutzung der Lastpunktanhebung ist eine Auslegung der VKM-Betriebsstrategie auf möglichst niedrige Emissionen. Dies kann jedoch mit einer Strategie für niedrigsten Verbrauch im Widerspruch stehen, da sich die Minima von Verbrauch und Emissionen im Muscheldiagramm nicht decken. Alternative Brennverfahren können bei Hybridfahrzeugen sinnvoller genutzt werden. So kann der Ottomotor auch während kurzer Beschleunigungsphasen mit HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) betrieben werden. Da bei der Beschleunigung der Kennfeldbereich des HCCI Verfahrens, mit seinen niedrigen NO_x -Emissionen verlassen werden müsste, wird das zusätzlich erforderliche Moment über die Elektromaschine abgedeckt. Bei Dieselmotoren bietet die Phlegmatisierung ein hohes Potential zur Emissionssenkung bei Beschleunigungsvorgängen. Bei der Beschleunigung besteht immer ein Zielkonflikt zwischen Motordynamik, Partikelaustritt und NO_x -Emissionen. Dieser Zielkonflikt entsteht durch die hohe Einspritzmenge beim Beschleunigen bei einem gleichzeitig langsameren Ladedruckaufbau. Beim Hybridfahrzeug ist eine langsamere Erhöhung des VKM-Moments und damit ein langsamer Ladedruckaufbau bei optimalen Abgasrückführungsraten möglich. Dieser Vorgang wird als Phlegmatisieren bezeichnet. Das fehlende Moment wird über die Elektromaschine aufgebracht. Dies führt zu einer Absenkung der Partikel und NO_x -Emissionen. Bei Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter sind des Weiteren Verbesserungen bei der Abgasnachbehandlung möglich. Die Partikelfilter müssen ab einem bestimmten Beladungsgrad frei gebrannt werden. Dies kann mittels thermischer Regeneration mit Sauerstoff bei Temperaturen von 600 – 650°C erfolgen. Solch hohe Temperaturen treten jedoch nur bei hoher Motorlast (Autobahnfahrten) auf. Daher wird die Motorlast durch das Einschalten von Nebenverbrauchern ohne Bedarf erhöht. Des Weiteren sind

zusätzliche motorische Eingriffe für die Regeneration nötig. Diese Maßnahmen führen zu einem deutlichen Mehrverbrauch durch das Abbrennen der Partikelfilter. Bei Hybridfahrzeugen können hier deutliche Verbesserungen erzielt werden indem durch Lastpunktanhebung die VKM-Leistung erhöht wird und mit der dadurch verfügbaren Energie die Batterie geladen wird.

3.2 Start-Stopp

Um den Verbrauch und die Emissionen, vor allem im Stadtverkehr, weiter zu senken, wird bei der Start-Stopp Strategie die VKM während längerer Stillstandsphasen abgestellt. Dadurch kann der verbrauchsintensive Leerlaufbetrieb vermieden werden. Vor allem im Stopp-and-Go Verkehr oder bei Staus führt dies zu deutlichen Kraftstoffeinsparungen. Bei der Abschaltung der VKM werden verschiedene Strategien angewendet. Die VKM kann bereits abgestellt werden, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit unter einen bestimmten Wert fällt oder erst nach einer Stillstandsdauer von einigen Sekunden. Meist wird der Motor bei getretenem Bremspedal und eingekuppeltem Motor abgestellt. Für den Start-Stopp Betrieb müssen jedoch zusätzlich einige Randbedingungen erfüllt werden. So müssen die Motortemperatur ausreichend hoch sein, das Abgasnachbehandlungssystem die Betriebstemperatur erreicht haben und die Nebenaggregate ausreichend mit elektrischer Energie versorgt werden. Bei den Nebenaggregaten ergibt sich ein weiteres Einsparpotential, da diese bei abgeschalteter VKM zum Teil nicht betrieben werden müssen. Dies ermöglicht eine zusätzliche Energieeinsparung.

Um einen schnellen Neustart der VKM zu ermöglichen, sind motorseitig einige Maßnahmen nötig. Die Kurbelwellenposition muss beim Auslaufen festgestellt und gespeichert werden und der Druck in der Kraftstoffleitung muss aufrechterhalten werden, um eine schnelle Einspritzung bereits während der ersten Kurbelwellenumdrehung zu ermöglichen. Bei Automatikfahrzeugen ist eine elektrische Ölpumpe notwendig um den Öldruck in Getriebe und Wandler aufrecht zu erhalten. Um den heutigen Komfortansprüchen zu genügen, müssen Start-Stopp Systeme einen ruckfreien, schnellen und unmerklichen Start ermöglichen. Dies ist vor allem bei Dieselfahrzeugen aufgrund der hohen Verdichtung schwierig umzusetzen.

3.3 Elektrisches Fahren

Eine weitere Betriebsart von Hybridfahrzeugen ist das rein elektrische Fahren. Dies wird vor allem bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten angewendet. Ein Vorteil des rein elektrischen Fahrens ist die Möglichkeit eines zeitweilig Lärm- und Schadstoffemissionsfreien Betriebes in besonders geschützten Gebieten wie Innenstädten. Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung von ungünstigen Betriebszuständen der VKM.

Wie beim Start-Stopp Betrieb muss die VKM auch beim elektrischen Fahren während des Fahrbetriebes bei Bedarf möglichst unmerklich neu gestartet werden. Dies ist bei seriellen und leistungsverzweigten Hybriden aufgrund der 2 verbauten Elektromaschinen relativ leicht möglich. Bei parallelen Hybridfahrzeugen ist dieser Neustart während des Fahrbetriebes zwar schwieriger aber grundsätzlich ebenfalls durchführbar. Es sind jedoch spezielle Startstrategien mithilfe des Drehmomentwandlers und einer Trennkupplung zwischen Elektromaschine und VKM notwendig. Des Weiteren ist eine Drehmomentreserve für ein ruckfreies Starten der VKM ohne Drehmomentabfall am Abtrieb notwendig.

3.4 Bremsenergierückgewinnung

Bei der Bremsenergierückgewinnung oder Rekuperation wird die beim Bremsen frei werdende Energie statt in Wärme über die Elektromaschine in elektrische Energie umgewandelt und in der Batterie gespeichert. Diese Energie steht somit für nachfolgende Beschleunigungsvorgänge „gratis“ zur Verfügung. Dadurch kann der Gesamtwirkungsgrad des Hybridfahrzeuges verbessert werden. Vor allem bei Fahrzyklen mit vielen und langen Haltephasen wie bei Stadtbussen lassen sich dadurch hohe Verbrauchseinsparungen realisieren. Bei der Rekuperation wird zwischen zwei verschiedenen Strategien unterschieden. Bei der parallelen Rekuperation wird der Anteil zwischen regenerativem Bremsen und Reibungsbremsen über den gesamten Bremsmomentbereich mit einem konstanten Bremsmomentverhältnis aufgeteilt. Bei der seriellen Regeneration wird zuerst das gesamte Potential für regeneratives Bremsen ausgenutzt. Nur das diesen Wert übersteigende Bremsmoment wird durch Reibungsbremsen aufgebracht. Daher bietet die serielle Rekuperation das höhere Energierückgewinnungspotential. Eine der Schwierigkeiten bei der Anwendung der Rekuperation ist es dem Fahrer ein möglichst natürliches und nachvollziehbares Bremsverhalten zu bieten. Daher sind die Abstimmung und der Übergang zwischen Reibungsbremsen und Rekuperation von höchster Bedeutung.

3.5 Betriebsarten der verschiedenen Hybridvarianten

3.5.1 Serieller Hybridantrieb

Für serielle Hybridfahrzeuge bieten sich die 2 Betriebsarten Trajektorienbetrieb und ON-OFF Betrieb an ([7] S. 288). sie werden nachfolgend noch näher behandelt. Zusätzlich wird in Kapitel 6.1.5 noch die Modellierung dieser Betriebsarten für das Simulationsmodell eines seriellen Bushybriden beschrieben. Bei seriellen Hybriden können alle in Kapitel 3 beschriebenen Betriebsstrategien angewendet werden.

3.5.1.1 Trajektorienbetrieb

Beim Trajektorienbetrieb wird die VKM möglichst entlang der Bestpunktlinie der Ladegruppe (VKM + Generator) betrieben (Abb. 9). Dies garantiert, dass die geforderte Leistung mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad erzeugt wird. Die Leistung welche bei dieser Betriebsart von der VKM aufgebracht werden muss wird in erster Linie von der Leistungsanforderung durch die Verbraucher bestimmt. Um eine weitere Wirkungsgradsteigerung der Ladegruppe zu ermöglichen, kann über die Batterie der Lastpunkt der VKM verschoben werden. Die Möglichkeiten der Lastpunktverschiebung werden jedoch vom Ladezustand der Batterie beschränkt.

Vorteile:

- Geringerer Leistungsfluss über die Batterie (Wirkungsgrad, Lebensdauer)
- Abdeckung von Lastspitzen über die Batterie
- Die Ladegruppe muss den Spitzenleistungsbedarf des Abtriebes nicht abdecken.

Nachteile:

- Schlechterer mittlerer Ladegruppenwirkungsgrad
- Höherer Kraftstoffverbrauch (lt. Simulation Kapitel 6.2.2.2)

3.5.1.2 ON-OFF-Betrieb

Beim ON-OFF Betrieb wird die VKM intermittierend betrieben. Dabei wird die Ladegruppe entweder im Bestpunkt betrieben oder abgestellt. Dies führt zu einem sehr hohen Wirkungsgrad der Ladegruppe. Die VKM muss beim ON-OFF Betrieb jedoch ausreichend Leistung im Bestpunkt zur Verfügung stellen um die Leistungsanforderungen auch bei entladener Batterie abzudecken. Der ON-OFF Betrieb kann entweder nur den Ladezustand (SOC) der Batterie oder auch den Fahrzyklus berücksichtigen. Wird der Fahrzyklus berücksichtigt, so wird die VKM möglichst bei

niedrigen Leistungsanforderungen abgestellt und bei hohen Leistungsanforderungen betrieben.

Vorteile:

- Betrieb im Bestpunkt der Ladegruppe
- Niedrigerer Energiebedarf der Nebenaggregate aufgrund des hohen Zeitanteiles mit abgeschalteter VKM
- Geringerer Kraftstoffbedarf (lt. Simulation Kapitel 6.2.2.2)

Nachteile:

- Hoher Leistungsfluss über die Batterie (Verluste!)
- Kein Boostbetrieb bei niedrigem Ladezustand der Batterie möglich
- Die Ladegruppe muss den Spitzenleistungsbedarf abdecken

3.5.2 Paralleler Hybridantrieb

Bei parallelen Hybriden werden nach ([7] S. 286) folgende Betriebsarten eingesetzt:

- Elektromotorischer Betrieb bei niedrigen Leistungsanforderungen.
- Boosten bei starken Beschleunigungsvorgängen.
- Rekuperation nur in geringem Maße, aufgrund der niedrigen Elektromaschinenleistungen.
- Nachladen des Energiespeichers bei mittleren Lastanforderungen.
- Verwendung der Elektromaschine als Starter und Lichtmaschine.

3.5.3 Leistungsverzweigte Hybridantriebe

Leistungsverzweigte Hybride werden ähnlich wie parallele Hybride betrieben, jedoch ermöglichen sie aufgrund der freieren Drehzahlwahl einen ausgeprägteren Trajektorienbetrieb. Des Weiteren kann mehr Bremsenergie rekuperiert werden.

4 Komponenten von Hybridfahrzeugen

4.1 Der Verbrennungsmotor

Auch bei Hybridfahrzeugen stellt der Verbrennungsmotor das Herz des Fahrzeuges dar. Dies deshalb, da er – mit Ausnahme von Plug-In Hybriden – der Hauptenergiewandler ist, welcher die im Kraftstoff gespeicherte Primärenergie in Bewegungsenergie umsetzt. Die Batterie dient dabei nur als Zwischenspeicher welche hilft, den Verbrennungsmotor mit einer möglichst günstigen Betriebsstrategie zu betreiben. In PKW-Hybridfahrzeugen werden derzeit fast ausschließlich Ottomotoren verbaut. Dies ist vor allem durch die Vorherrschaft des Ottomotors am amerikanischen und asiatischen Markt zu erklären. Des Weiteren sind die Systemkosten von Dieselmotoren durch das teure Abgasnachbehandlungssystem bereits viel höher als jene von Ottomotoren. Dadurch können die zusätzlichen Kosten des Hybridsystems beim Ottomotor wesentlich leichter verkraftet werden. Bei Nutzfahrzeugen ist die Situation eine andere, da hier der Dieselmotor aufgrund seiner höheren Wirkungsgrade, im Speziellen in der Teillast, das dominante Antriebsaggregat ist. Hier werden sich, bei gegebener Wirtschaftlichkeit der Anwendung, die Dieselhybride durchsetzen.

4.1.1 Dieselmotor

Der Dieselmotor bietet aufgrund seines höheren Wirkungsgrades die besten Voraussetzungen um niedrigste Verbräuche zu erreichen. Dabei kommen dem Dieselmotor auch beim Hybridfahrzeug seine wesentlich höheren Teillastwirkungsgrade zu Gute. Er weist jedoch ein geringeres Verbrauchseinsparungspotential auf. Das Hauptziel der meisten Hybridkonzepte ist eine Verminderung des Verbrauchs und eine Absenkung des CO₂ Ausstoßes. Dies wird über die verschiedenen Betriebsstrategien erreicht (siehe Kapitel 3), welche auch die Anforderungen an das Antriebsaggregat definieren. Diese sind für Dieselmotoren:

- Sehr hoher Volllastwirkungsgrad
- Hoher Teillastwirkungsgrad
(Ist jedoch je nach Konzept weniger relevant)
- Downsizing ist aufgrund der meist niedrigeren Leistungsanforderung möglich
- Schneller, ruckfreier Motorstart für Start-Stopp
- Geringere Dynamikanforderungen

Für Hybridkonzepte eignen sich im Besonderen Downsizingkonzepte mit aufgeladenen Motoren. Dadurch können leichtere Motoren mit höheren Maximalwirkungsgraden erreicht werden. Bei diesen Varianten kann das Turboloch des aufgeladenen Motors durch den E-Motor kompensiert werden. Durch den schnelleren Motorhochlauf kommt der Turbolader schneller auf Drehzahl. Somit wird auch der Ladedruck schneller aufgebaut. Es ist auch ein „Downspeeding“ des Dieselmotors mit den dadurch erreichbaren Kraftstoffeinsparungen möglich und sinnvoll. Bei parallelen Hybriden stellt die Elektromaschine dabei bei niedrigen Drehzahlen ein höheres Drehmoment zur Verfügung. Somit muss weniger Moment von der VKM aufgebracht werden. Dadurch ist eine längere Getriebe-/Achsübersetzung möglich.

Die Kosten des Hybridsystems sind bei Dieselmotoren besonders kritisch zu bewerten. Um die heutzutage erforderlichen Grenzwerte bei Partikel- und NO_x zu unterschreiten, sind sehr aufwändige und kostspielige Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung notwendig. Dadurch werden die ohnehin schon hohen Systemkosten des Dieselmotors weiter erhöht. Daher sollte ein Hybridsystem beim Dieselmotor eine Vereinfachung der Abgasnachbehandlung ermöglichen. Dies kann durch eine Absenkung der NO_x -Emissionen mittels Phlegmatisierung sowie durch Partikelfilterregeneration mittels Lastpunktanhebung der VKM bewerkstelligt werden (siehe Kapitel 3.1). Des Weiteren hilft der geringere Verbrauch die Schadstoffemissionen zu senken.

4.1.2 Ottomotoren

Der Hauptnachteil des Ottomotors gegenüber dem Dieselmotor ist sein niedrigerer Wirkungsgrad. Insbesondere ist der Teillastwirkungsgrad von konventionellen Ottomotoren aufgrund der gedrosselten Laststeuerung relativ schlecht. Dieser Nachteil kann jedoch durch Hybridkonzepte minimiert werden und es ergeben sich höhere Verbrauchseinsparungspotenziale als beim Dieselmotor. Generell ergeben sich für den Ottomotor sehr ähnliche Anforderungen wie für den Dieselmotor. Hier sind ebenfalls Downsizingkonzepte mit aufgeladenen Ottomotoren und „Downspeeding“ zur Erreichung eines möglichst niedrigen Verbrauches anzustreben.

Toyota verwendet beim *Prius* ein alternatives Verbrennungskonzept, den *Atkinson* Zyklus. Der *Atkinsonprozess* weist einen Expansionshub auf, welcher länger als der Verdichtungshub ist. Dies führt zu zusätzlich nutzbarer Expansionsarbeit und damit zu einem höheren Wirkungsgrad. Dieser Unterschied bei den Hübten wird durch ein spätes Schließen der Einlassventile mittels variabler Ventilsteuerung bewerkstelligt. Um ein

ähnliches effektives Verdichtungsverhältnis wie bei normalen Motoren zu erreichen, muss das geometrische Verdichtungsverhältnis erhöht werden. Der *Atkinson* Prozess weist aufgrund des höheren geometrischen Verdichtungsverhältnisses einen höheren Hubraum als konventionelle Motoren auf und hat somit eine geringere spezifische Leistung.

Quelle: [12], [6]

4.2 Elektrische Maschinen für Hybridfahrzeuge

4.2.1 Überblick

Elektrische Maschinen ermöglichen das Umwandeln von elektrischer in mechanische Energie. Sie bestehen aus dem feststehenden Stator und dem umlaufenden Rotor. Zur Umwandlung der Energie wird über Spulen oder Permanentmagnete in einem geschlossenen Eisenkreis ein Magnetfeld erzeugt, welches in eine sich relativ dazu bewegendes Spulenwicklung eine Spannung induziert. Grundsätzlich ermöglichen Elektromaschinen einen Betrieb als Generator und als Motor. Der Wechsel zwischen diesen beiden Betriebszuständen erfolgt verzögerungsfrei und somit hochdynamisch.

4.2.1.1 Einteilung

Elektrische Maschinen können in verschiedenen Bauformen unterteilt werden, wobei eine jede seine bestimmten Eigenschaften und Vor- und Nachteile für den Einsatz in Hybridfahrzeugen aufweist. In Abb. 10 sind die verschiedenen Elektromaschinen-Varianten dargestellt. Dabei sind die bei Hybridfahrzeugen sinnvoll einsetzbaren Varianten rot gekennzeichnet.

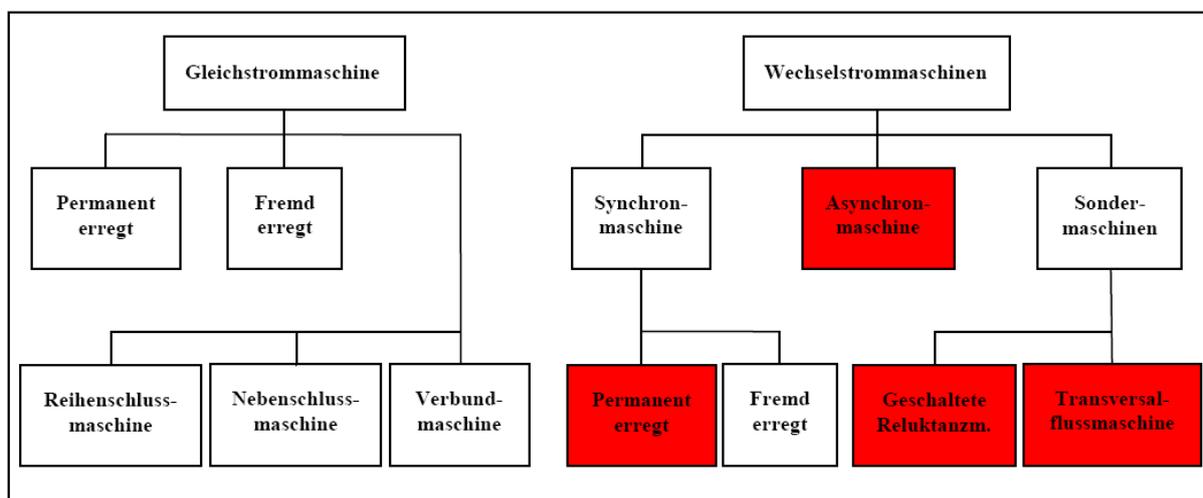


Abb. 10: Einteilung der Elektromaschinen

4.2.1.2 Anforderungen an die elektrische Maschine

Entscheidend für die Auswahl von elektrischen Maschinen sind die Anforderungen für die jeweilige Anwendung. Meist müssen die elektrischen Maschinen motorischen und generatorischen Betrieb in einem weiten Drehzahlbereich ermöglichen. Eine weitere Anforderung sind Lebensdauern im Bereich oder über der Fahrzeuglebensdauer. Solch hohe Lebensdauern sind üblicherweise auch problemlos darstellbar.

Eine der Hauptzielsetzungen von Hybridfahrzeugen ist das Erreichen von möglichst geringen Verbräuchen. Daher sind niedrige Verluste und hohe Wirkungsgrade der E-Maschinen eines der Hauptkriterien bei der Auswahl. Aus diesem Grund, und vor allem wegen des begrenzten Bauraumes, sind eine hohe Leistungs- und Momentendichte neben dem Wirkungsgrad prioritäre Entwicklungsziele. Zu diesen Hauptanforderungen technischer Natur kommen noch die Kosten für E-Maschine, Wechselrichter und zusätzliche Bauteile, welche großen Einfluss auf die Verwirklichbarkeit verschiedener technischer Varianten haben. Insbesondere die Wechselrichter sollten bei diesem Punkt nicht unterschätzt werden, da durch sie eine kostengünstigere Elektromaschinen-Variante insgesamt teurer oder nur geringfügig kostengünstiger sein kann.

Zusammengefasst ergeben sich die grundlegenden Anforderungen für Elektromaschinen in Fahrzeugen nach [6], [13] und [14]:

- Niedrige Kosten
- Bereitstellung der erforderlichen Drehmomente und Drehzahlen
- Hoher Wirkungsgrad über großen M-n Bereich
- Hohe Leistungs- und Momentendichte
- Kompakte Bauweise
- Hohe Lebensdauer, Verlässlichkeit
- Sicherheit
- Gute Regelbarkeit
- Ölbeständigkeit, Wasserdichtheit
- Niedrige Geräuschentwicklung
- Robust, keine Beschädigung durch Erschütterungen
- Überlastfähigkeit (ca. das zweifache des Dauerdrehmoments)
- Geringer Wartungsaufwand

- Feldschwächebetrieb bei Traktionsmotoren
- Hohe Spannungen für niedrige Verluste

Vor allem für Traktionsantriebe ist ein weiter Feldschwächebereich sinnvoll. Dieser Bereich mit konstanter Leistung sollte Drehzahlen bis zum 3 - 4 fachen der Nenndrehzahl ermöglichen. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen den Maximalmomentanforderungen und der Volt-Ampere Belastbarkeit des Inverters dar [14].

4.2.1.3 Betriebsgrenzen der elektrischen Maschine

Der Betriebsbereich von elektrischen Maschinen wird von verschiedenen physikalischen Effekten beschränkt. So dürfen gewisse Werte von Spannung, Strom, Drehzahl und Drehmoment nicht überschritten werden. Diese Werte werden einerseits von der mechanischen Festigkeit und Lebensdauer der Bauteile sowie deren maximalen Temperaturen und andererseits auf der elektrischen Seite, von den Maximalwerten von Strom und Spannung am Gleich- bzw. Wechselrichter beschränkt. Daraus ergeben sich der, für die meisten Elektromaschinen, charakteristischen Betriebsbereiche im M-n Diagramm (Abb. 11 und Abb. 12) nach [6], [13] und [14].

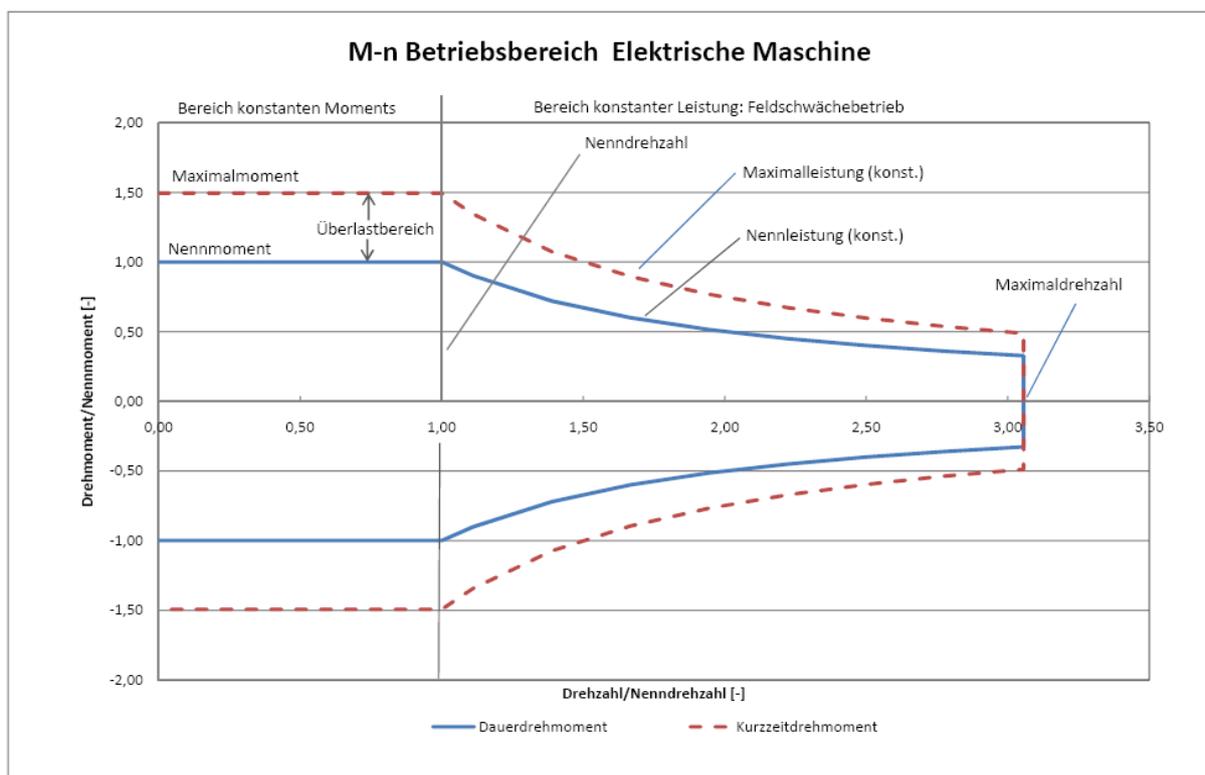


Abb. 11: M-n Betriebsbereich elektrische Maschine

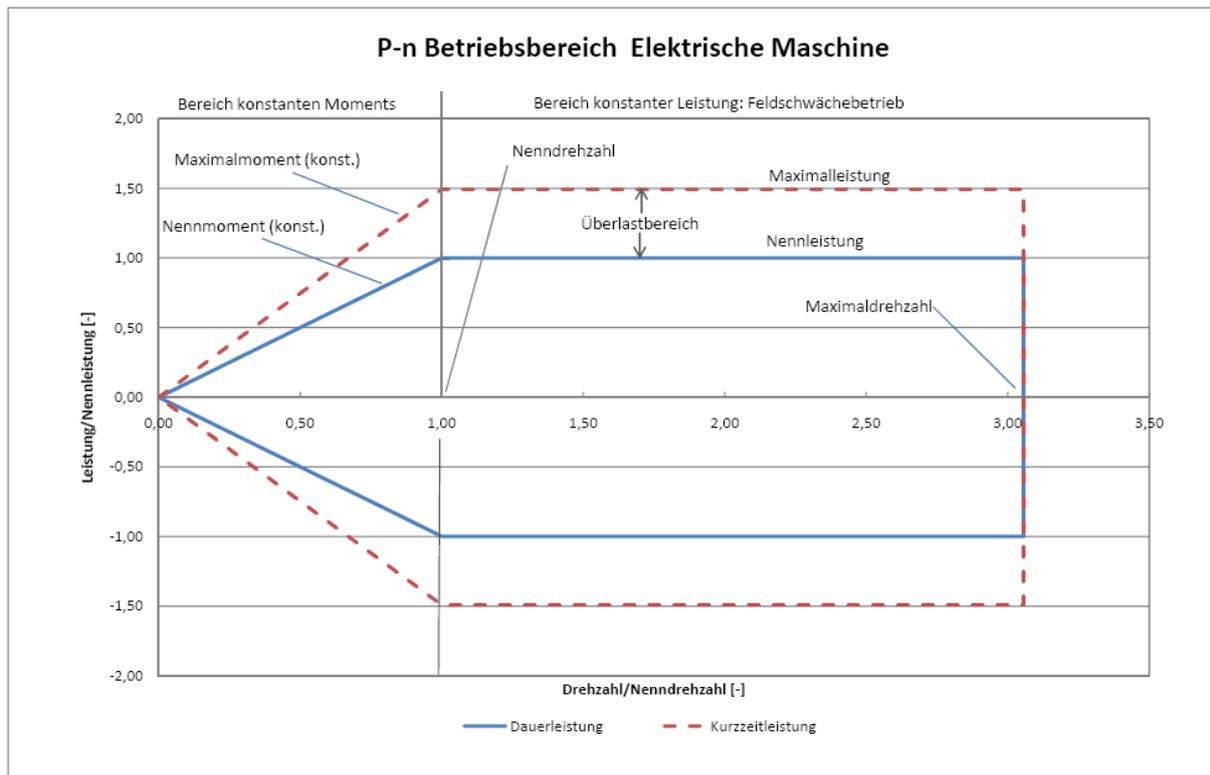


Abb. 12: P-n Betriebsbereich elektrische Maschine

Wenn man die 2 Betriebsbereiche der Elektromaschine nun für Nennwerte betrachtet ergibt sich folgendes Bild. Im Bereich konstanten Moments der elektrischen Maschine kann diese mit dem Nennmoment betrieben werden. Das maximal übertragbare Moment wird dabei meist durch den vom Inverter übertragbaren Strom beschränkt. Bei Nennzahl wird die Maximalspannung des Inverters erreicht [14]. Da im Normalbetrieb $U \sim n$ ist, muss für höhere Drehzahlen das Erregerfeld geschwächt werden, um die induzierte Spannung zu reduzieren. Diese Feldschwächung erfolgt je nach E-Maschinenausführung auf unterschiedliche Weise. Daher wird dieser Bereich von Nennspannung und Nennstrom und somit von der Nennleistung beschränkt.

Beim Betrieb von elektrischen Maschinen muss des Weiteren zwischen Nenngößen und Maximal- oder Kurzzeitgrößen unterschieden werden. Unterhalb der Nennwerte kann die Maschine im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Ein Betrieb mit Maximalmoment oder Maximalleistung ist nur intermittierend möglich. So muss die Elektromaschine z.B. nach 5s Maximalleistung für 30s unter dem Dauerdrehmoment betrieben werden. Vor allem hohe Temperaturen können zu einer thermischen Überlastung der Maschine führen und beschränken die Maximalwerte sowie die Betriebsdauer bei diesen Werten. Zu hohe Drehzahlen können zu einer mechanischen Schädigung der Maschine durch Ausschleudern des Rotors führen [6].

Die kurzzeitige Überlastbarkeit von E-Maschinen ist für den Einsatz im Fahrzeugbereich von großem Interesse. Sie kann zur Abdeckung von Leistungsspitzen im Sekundenbereich angewandt werden z.B. Überhohlvorgänge, Steigungen. Eine weitere Verbesserung der Überlastfähigkeit von E-Motoren ist durch Temperaturmessungen an der Maschine möglich.

4.2.2 Gleichstrommaschine

Gleichstrommaschinen wurden vor allem zu Beginn der E-Fahrzeugentwicklung häufig bei kleineren Elektrofahrzeugen eingesetzt, da sie direkt aus der Fahrzeugbatterie gespeist werden können [13]. Der Gleichstrommotor wird heute nur mehr selten bei Traktionsantrieben angewendet, da er aufgrund der hohen Kosten, des Wartungsaufwandes und des geringen Wirkungsgrades wenig attraktiv ist. Die Lebensdauer liegt je nach Qualität der Kohlebürsten zwischen 2000 – 4000h [15].

4.2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

In Abb. 13 aus [15] ist der Aufbau einer fremderregten Gleichstrommaschine abgebildet. Der Stator der Gleichstrommaschine ist meist ein Ring aus Walzstahl. Auf diesem sind die Hauptpole und Wendepole angebracht. Die Hauptpole können als Elektromagnete oder Permanentmagnete ausgeführt sein. Der Rotor besteht aus einem geblechten Eisenpaket und ist trommelförmig aufgebaut. Die aus isolierten Eisenblechen bestehenden Blechpakete vermindern die Wirbelströme und die durch diese ausgelösten Verluste. Dadurch kann auch die Erwärmung des Rotors klein gehalten werden. Er trägt die Ankerwicklungen, welche meist in Nuten untergebracht sind. Die Ankerwicklungen werden mit einem Kollektor verbunden, auf dessen Lamellen die Bürsten zur Stromzuführung schleifen.

Bei der Gleichstrommaschine wird an den Anker- und den Feldkreis eine Gleichspannung angelegt. Wobei durch den Erregerstrom in den Feldwicklungen ein konstantes Magnetfeld erzeugt wird. Dieses magnetische Gleichfeld bewirkt jedoch allein noch keine Drehbewegung des Läufers. Um die Drehbewegung hervorzurufen, muss im Anker eine Wechselfeldspannung anliegen. Dazu wird mit Hilfe des Kommutators die Spannung im Anker durch die Drehbewegung umgepolt. Das magnetische Gleichfeld des Hauptpols durchdringt neben dem Stator, auch den Luftspalt und das geblechte Eisenpaket des Läufers. Von den stromdurchflossenen Ankerwicklungen wird ebenfalls ein Magnetfeld erzeugt, welches das Erregerfeld überlagert und so ein

resultierendes Magnetfeld erzeugt. Dies führt bei Stromfluss zu einer Verdichtung der Feldlinien auf der linken Seite und zu einer Feldschwächung auf der rechten Seite. Dadurch wird eine Kraftwirkung und Drehbewegung des Ankers im Uhrzeigersinn ausgelöst.

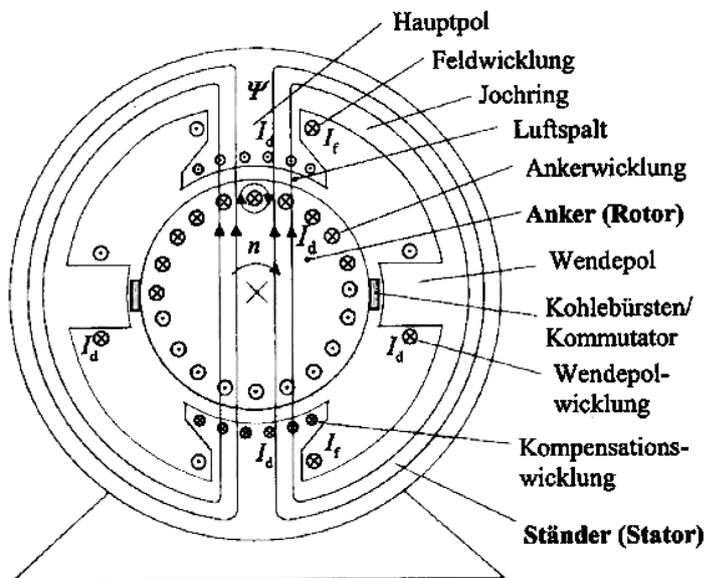


Abb. 13: Aufbau einer fremderregten Gleichstrommaschine [15]

Damit der Erregerstrom der Maschine möglichst niedrig gewählt werden kann, muss der Luftspalt zwischen Stator und Rotor möglichst klein sein. Es sind Luftspalte unter einem halben Millimeter üblich. Die Ströme in den Ankerdrähten führen zu einer Verzerrung des Erregerfeldes unter den Hauptpolen sowie an den Kohlebürsten. Dieser Effekt kann durch Kompensationswicklungen und Wendepolwicklungen, welche in umgekehrter Richtung vom Ankerstrom durchflossen sind, vermindert werden. Um die Gleichstrommaschine mit Feldschwächung zu betreiben, muss der Erregerstrom reduziert werden. Quelle: [15]

4.2.2.2 Vor- und Nachteile

Nach: [13] und [15]

Vorteile:

- Technisch ausgereift
- Einfach zu steuern
- Preiswert

Nachteile:

- Wirkungsgrad und Leistungsdichte sind geringer als bei Drehstrommotoren

- Geringes Leistungsgewicht von ca. 0.15 kW/kg [15]
- Der Kommutator mit Bürsten ist störanfällig und muss gewartet werden.
- Nicht in explosionsgefährdeten Bereichen einsetzbar (Bürsten)
- Platz für Kommutator notwendig, Maschine baut länger.
- Maximale Umfangsgeschwindigkeit von 7000 U/min

Standard-Gleichstrommaschinen weisen normalerweise Wirkungsgrade zwischen 70 und 80% auf.

4.2.2.3 Ausführungen

In Abb. 14 sind die wichtigsten Ausführungsformen von Gleichstrommaschinen dargestellt. Dies sind die fremderregte Gleichstrommaschine, die Nebenschlussmaschine, die Reihenschlussmaschine sowie die permanenterregte Gleichstrommaschine. Eine weitere Bauform ist die Doppelschlussmaschine, welche eine Kombination aus fremderregter und Nebenschlussmaschine ist.

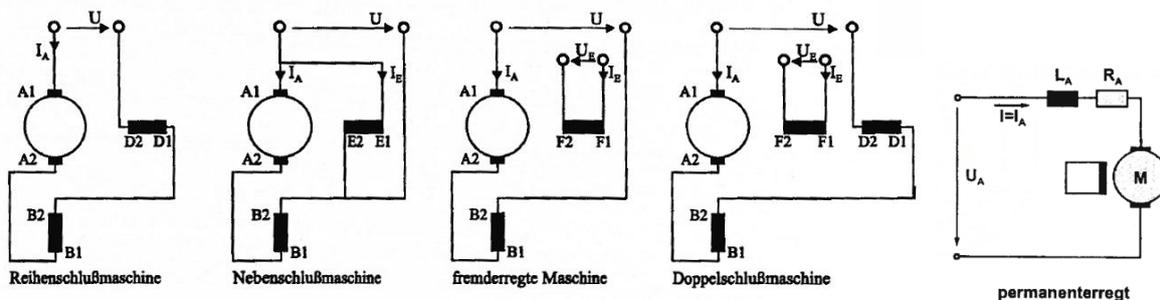


Abb. 14: Ersatzschaltbilder der Gleichstrommaschine [16] und [6]

Abb. 13 zeigt den Aufbau einer fremderregten Gleichstrommaschine. Bei der fremderregten Gleichstrommaschine werden die Feldwicklung und die Ankerwicklungen aus zwei getrennten Gleichspannungsquellen gespeist. Durch diese Schaltung sind Strom und Spannung der Erregerwicklung und der Ankerwicklung voneinander unabhängig. Die Umkehr der Drehrichtung erfolgt meist über kontaktlose Umschaltung der Ankerspannung.

Nebenschlussmotoren sind gleich aufgebaut wie fremderregte Gleichstrommotoren, jedoch werden Erregerkreis und Ankerkreis von derselben Spannungsquelle versorgt. Dies führt zu einem langsameren linearer Drehmomentabfall über der Drehzahl. Nachteilig wirkt sich jedoch das niedrigere Anzugsdrehmoment aus.

Die Erregerwicklung wird bei der permanenterregten Gleichstrommaschine durch Permanentmagnete ersetzt. Aufgrund der Kohlebürsten tritt jedoch auch bei

permanenterregten Gleichstrommaschine ein hoher Wartungsaufwand auf. Eine Ausführung der permanenterregten Gleichstrommaschine ist die bürstenlose Gleichstrommaschine. Dabei wird der Permanentmagnet, wie bei der Synchronmaschine, im Läufer und die Ankerwicklung im Ständer untergebracht. Da in der Ankerwicklung eine Kommutierung notwendig ist, muss der Strom anstatt mit den Bürsten elektrisch kommutiert werden. Dies wird mittels Stromrichter bewerkstelligt. Da die Stränge bei der bürstenlosen Gleichstrommaschine so angesteuert werden müssen, dass die Flusssichten des Ständers und des Läufers im Mittel um 90° phasenverschoben sind, muss die Rotorposition festgestellt werden.

Bei der Reihenschlussmaschine sind Anker und Feldwicklung in Reihe geschaltet. Bei der Reihenschlussmaschine ist eine Umkehr der Drehrichtung nur durch Umpolung von Ankerwicklung oder Feldwicklung möglich, und somit während des Betriebs ausgeschlossen. Daher ist bei Traktionsmotoren kein Generatorbetrieb möglich. Die Reihenschlussmaschine ist für Hybridfahrzeuge ungeeignet.

Quelle: [13], [15], [17]

4.2.3 Drehstrommotoren

Im Gegensatz zu Gleichstrommotoren werden Drehstrommotoren mit meist 3-phasigem Wechselstrom betrieben. Sie haben aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade und Leistungsdichten die Gleichstrommaschine schon nahezu vollständig bei Traktionsanwendungen verdrängt.

Im Drehstrommotor wird das magnetische Feld mittels einer Drehfeldwicklung im Stator erzeugt. Abweichend von der Gleichstrommaschine ist das Magnetfeld kein konstantes Feld sondern ein umlaufendes Drehfeld (Abb. 15). Der Stator selbst besteht aus Blechpaketen welche aus gegeneinander isolierten Dynamoblechen aufgebaut sind. Dies dient, wie bei der Gleichstrommaschine, zur Reduzierung der Wirbelstromverluste. Die in Nuten verlegte Statorwicklung besteht normalerweise aus mindestens 3 Strängen, welche mit dem 3-phasigen Wechselstrom verbunden sind. Diese Statorwicklungen erzeugen das oben erwähnte Drehfeld, welches mit der Synchrondrehzahl umläuft (4) aus [15]).

$$n_d = \frac{f_1}{p} \quad \text{Drehfelddrehzahl, Synchrondrehzahl} \quad (4)$$

p Polpaarzahl der Maschine

f_1 Speisefrequenz

Die Drehzahlstellung erfolgt bei Traktionsanwendungen über die Änderung der Frequenz des Drehstromes. Dadurch kann die Drehzahl variabel geändert werden. Dabei wird beim KFZ aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung erzeugt. Das Drehmoment der Drehfeldmaschine ergibt sich nach [16] zu (5).

$$M = \frac{3p}{\omega} U_{h_s} I_s \cos(\varphi_{u_h} - \varphi_{i_s}) \quad \text{Drehmoment} \quad (5)$$

$$\omega = f_1 / 2\pi \quad \text{Kreisfrequenz der Speisespannung}$$

U_{h_s} Hauptspannung bezogen auf den Stator

I_s Statorstrom

$(\varphi_{u_h} - \varphi_{i_s})$ Phasenlage Hauptspannung zu Statorstrom

Für hohe Wirkungsgrade muss der Luftspalt zwischen Stator und Rotor möglichst klein sein. Ein Vorteil der Drehfeldmaschine ist, dass mit dem maximalen Moment angefahren werden kann.

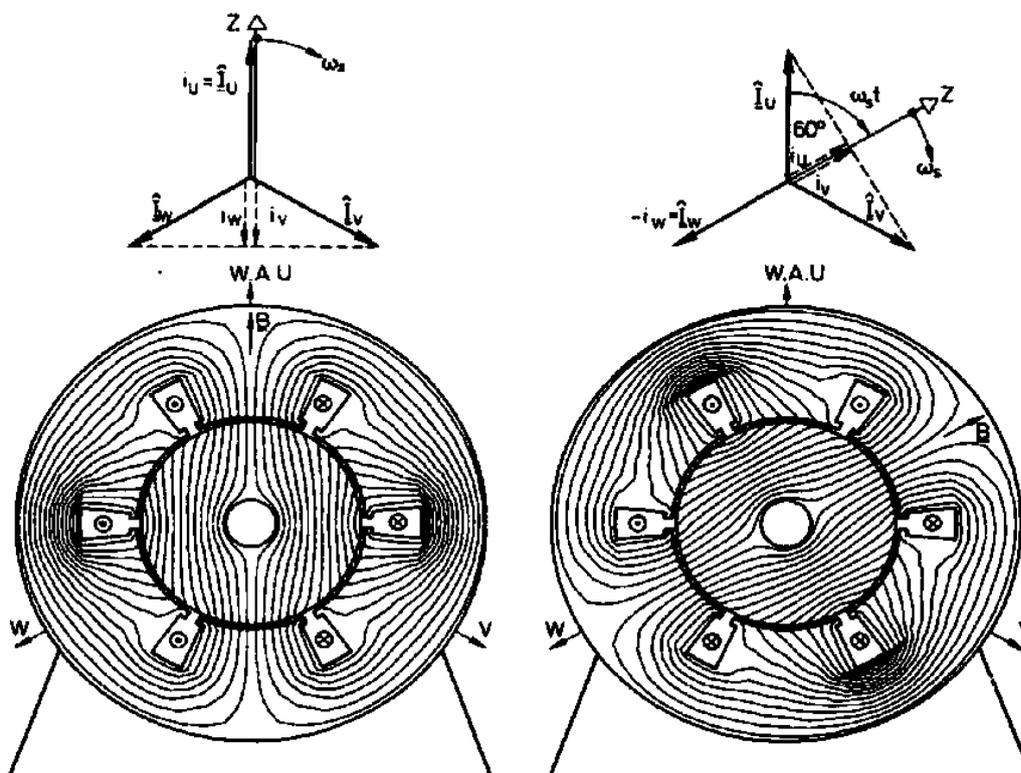


Abb. 15: Erregerfeldverlauf zu zwei Zeitpunkten (60° Phasenverschiebung) [17]

Grundsätzlich kann bei Drehfeldmaschinen zwischen Asynchronmaschinen und Synchronmaschinen unterschieden werden. Diese beiden Typen haben unterschiedliche Prinzipien der Leistungsübertragung auf den Rotor. Dadurch ergeben sich abweichende Rotorbauweisen und, wie der Name schon sagt, dreht sich die Synchronmaschine mit

der Winkelgeschwindigkeit des Drehfelds und die Asynchronmaschine mit einer um den Schlupf verminderten Geschwindigkeit. [6, 15, 17]

4.2.3.1 Asynchronmaschine

Asynchronmaschinen werden sehr häufig für Traktionsanwendungen eingesetzt. Der Rotor der Asynchronmaschine ist wie der Stator aus Dynamoblech aufgebaut. In ihm wird ein magnetischer Rückschluss durch den Drehstrom erzeugt. Es gibt zwei Läuferbauformen der Asynchronmaschine: den Schleifring- und den Käfigläufer. Schleifringläufer bestehen aus Drehstromwicklungen, die über Bürsten und Schleifringe mit einem äußeren Stromkreis verbunden sind. Über diesen kann mittels Läuferwiderstände bzw. untersynchronen Stromrichter-kaskaden das Betriebsverhalten der Schleifringläufermaschine wesentlich beeinflusst werden. Trotz geringerem Verschleiß der Schleifringläufer als bei Gleichstrommaschinen haben diese im praktischen Einsatz erhebliche Nachteile. Aus diesem Grund sind Käfigläufer für Traktionsmotoren vorzuziehen. Bei diesen sind die Läuferwicklungen nicht mit dem Stator verbunden. Beim Käfigläufer sind in den Rotornuten Profilstäbe aus Kupfer-, Bronze- oder Aluminiumlegierungen untergebracht, welche stirnseitig mit einem Kurzschlussring verbunden sind. Besonders preiswert lassen sich diese Käfige aus Aluminium im Spritzgussverfahren herstellen. Aluminiumkäfige leiten jedoch schlechter als Kupferkäfige. Dadurch liegt der Wirkungsgrad solcher Standardmaschinen nur bei ca. 70 – 75%.

Wenn die Ständerwicklungen an das Drehspannungssystem angeschlossen werden, fließt durch diese ein Wechselstrom, der ein Drehfeld aufbaut. Dieses Drehfeld induziert wiederum eine Spannung in der Läuferwicklung, welche einen Stromfluss über die Kurzschlussringe auslöst. Aufgrund der Kraft, welche auf stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld wirkt, wird der Rotor in Bewegung versetzt. Wie in Kapitel 4.2.3 dargestellt, läuft das Drehfeld mit der Synchronfrequenz um. Dreht sich der Läufer nun mit derselben Frequenz wie dieses Drehfeld, ist dieses aus Läufersicht ein Gleichfeld und es wird keine Spannung im Läufer induziert. Daher wirkt bei Synchrondrehzahl keine Kraft auf den Läufer und die Asynchronmaschine kann kein Moment übertragen. Steigert man nun die Belastung auf die Asynchronmaschine erhöht sich der Schlupf des Rotors (Glg. (6) aus [16]). Dadurch läuft der Rotor nicht mehr synchron mit dem Drehfeld und es kann ein Moment übertragen werden. Wird die Asynchronmaschine als Generator betrieben, dreht sich der Läufer schneller als die synchrone Drehzahl.

$$s = \frac{n_d - n}{n_d} \quad \text{Schlupf} \quad (6)$$

n_d Drehfelddrehzahl, Synchrondrehzahl (Glg. (4))

n Rotordrehzahl

Da der Läufer der Asynchronmaschine nicht an eine Spannungsquelle angeschlossen ist, liefert er keinen Beitrag zur Erzeugung des Drehfeldes. Daher muss die Asynchronmaschine Blindleistung aus dem Netz beziehen. Dies ist bei Batteriefahrzeugen ebenfalls zu beachten, da die Blindleistung für die Asynchronmaschine vom Gleichstromkreis zur Verfügung gestellt werden muss. Beim Erreichen des maximal übertragbaren Moments der Asynchronmaschine, dem Kippmoment, fällt das übertragbare Drehmoment der Asynchronmaschine ab. Dies wird durch die steigenden Streublindwiderstände bei hohen Drehzahldifferenzen verursacht und führt zu rapide sinkenden Rotordrehzahlen. Eine Beeinflussung der Drehzahl der Asynchronmaschine ist durch Veränderung der Drehfeldfrequenz, der Polpaarzahl und des Schlupfes möglich. Jedoch eignet sich nur die Frequenzänderung zu einer Änderung der Drehzahl in weiten Bereichen.

Quelle: [6],[13], [15],[18]

Vorteile der Asynchronmaschine:

- Betriebssicher
- Wartungsarm
- Hohes Leistungsgewicht: von 0.6 kW/kg [15]
- Hohe Lebensdauer bis 100.000 Stunden
- Erreicht hohes dynamische Verhalten von geregelten Gleichstrommaschinen
- 4-Quadrantenbetrieb
- Weiter Feldschwächebereich ohne Überspannungsschutz
- Einfache Rotorhandhabung da keine Dauermagnete
- Einfacher U/f Betrieb ohne Positionsmessung möglich

Nachteile der Asynchronmaschine:

- Hohe Rotor- und Wellentemperatur im Bereich der Lager
- Schlechter Wirkungsgrad bei niedrigen Drehzahlen

Quelle: [6],[13], [15], [19]

4.2.3.2 Synchronmaschine

Der Ständer der Synchronmaschine ist vom Prinzip her gleich wie jener der Asynchronmaschine aufgebaut. Im Rotor der Synchronmaschine wird ein Magnetfeld erzeugt, welches aus magnetischen Gleichpolen besteht. Dadurch ziehen sich die entgegengesetzten Pole der beiden Magnetfelder an und es kommt zum Mitlaufen des Rotors mit dem Drehfeld der Synchronmaschine. Dies erfolgt im stationären Zustand genau mit der Kreisfrequenz des umlaufenden Magnetfeldes. Im Motorbetrieb eilt der Rotor jedoch dem Erregerdrehfeld nach, und im Generatorbetrieb vor. Bei der Überschreitung eines Überlastmomentes wird dieser Winkel so groß, dass das Moment nicht mehr übertragen werden kann und der Rotor außer Tritt fällt.

Da bei Synchronmaschinen kein Schlupf auftritt, können sie nur in frequenzvariablen Netzen anlaufen. Neben der Unterscheidung zwischen permanent und fremderregten Synchronmaschine kann auch zwischen Vollpol- und Schenkelläufern unterschieden werden. (Abb. 16)

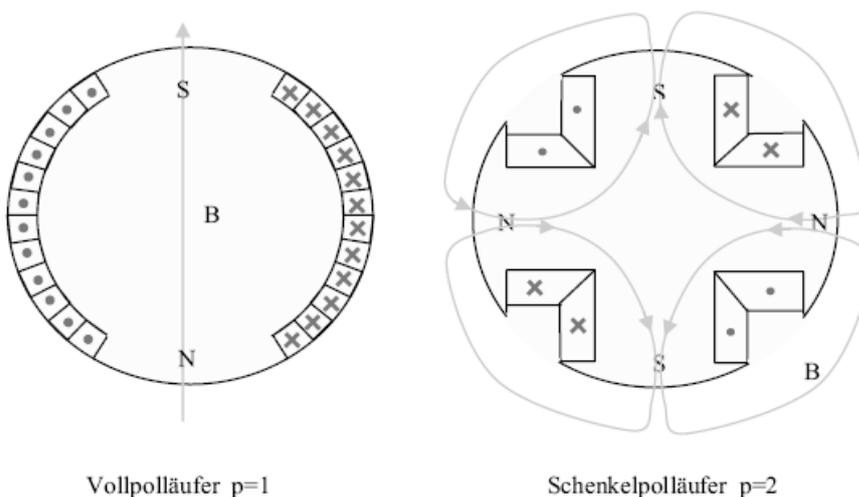


Abb. 16: Läuferbauweisen der Synchronmaschine [17] S.110

Der Schenkelläufer wird nur bei sehr langsam drehenden Maschinen eingesetzt. Da der Vollpolläufer bei schnell drehenden Maschinen eingesetzt wird, ist er die sinnvollere Ausführung für Traktionsanwendungen. Ein großer Vorteil gegenüber der Gleichstrommaschine ist, dass bei der Drehfeld-Synchronmaschine ein Vierquadrantenbetrieb möglich ist.

4.2.3.2.1 Permanenterregte Synchronmaschine

Bei der permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) wird das Rotormagnetfeld durch Permanentmagnete erzeugt. Daher muss kein Strom in den Rotor zugeführt

werden. Da dem Rotor kein Strom zugeführt wird, kann das Erregerfeld nicht durch Verkleinern des Erregerstroms reduziert werden. Die Feldschwächung erfolgt daher durch Hinzufügen einer zusätzlichen negativen Längskomponente zum Ständerstrom, welcher selbst ein Feld erzeugt und das Rotorfeld überlagert. Dieser Ständerstrom erhöht jedoch die Verluste im Feldschwächebetrieb und senkt den Wirkungsgrad. In Abb. 17 sind verschiedene Bauformen der PMSM dargestellt. PMSM können mit Oberflächenmagneten oder mit vergrabenen Magneten ausgeführt werden. Bei PMSM mit Oberflächenmagneten müssen diese aufgrund der hohen Fliehkräfte mit einer Kohlefaserbandage umwickelt werden. Daher ist ihr Einsatz in der Großserienfertigung unwirtschaftlich. Aufgrund der Bandagen stößt man auch bei Wartungs- und Reparaturarbeiten auf große Probleme. Des Weiteren ist der Feldschwächebetrieb aufgrund der kleinen Synchronreaktanzen bei Maschinen mit Oberflächenmagneten nur eingeschränkt durchführbar.

Bei Ausführungen mit vergrabenen Magneten sind diese in axialen Nuten des Rotorblechpaketes eingelegt. Weitere Verbesserungen sind hier durch eine V-Anordnung der Permanentmagnete erzielbar. Dies führt zu einer Flusskonzentration.

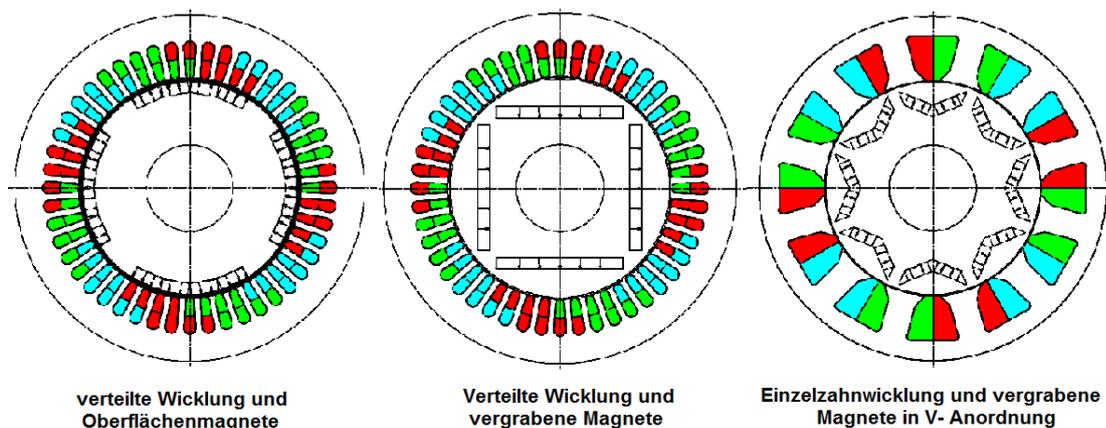


Abb. 17: Aufbau von permanenterregten Synchronmaschinen [20]

PMSM können mit einer Drehstromwicklung oder mit Einzelspulen auf ausgeprägten Statorpolen ausgeführt werden. Diese Einzelzahnwicklungen weisen sehr kleine Wickelkopfabmessungen an beiden Blechpaketen auf. Jedoch treten eine schlechtere Wärmeabfuhr, vermehrte Geräuschbildung durch Statorblechdeformation, sowie Oberwellenbildung im Statorfeld auf.

Eine mögliche Bauform der permanent erregten Synchronmaschine ist die Außenläuferbauweise. Sie eignet sich bei hohen Polpaarzahlen vor allem um Motoren mit hohem Drehmoment und hoher Leistungsdichte bei niedrigen Drehzahlen zu

realisieren. Das Außenläuferprinzip ermöglicht eine sehr gute großflächige Kühlung und damit eine bessere Leistungsausnutzung der Elektromaschine.

Die PMSM eignet sich vor allem wegen ihres hohen Wirkungsgrades (bis 94%), dem einfachen mechanischen und elektrischen Aufbau und der elektronischen Kommutierung sehr gut zum Antrieb von PKWs und stellt sich zunehmend als ideale Antriebsart für Elektro- und Hybridfahrzeuge heraus [6].

Vorteile:

- Höchste Wirkungsgrade
- Hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich
- Sehr hohe Leistungsdichten
- Hohes Leistungsgewicht über 1 kW/kg [15]
- Hohe Kurzschlussfestigkeit
- Größere Rotorbohrung möglich
- Kühlere Rotoren
- Tiefere Ströme
- Lebensdauern bis 100.000 h
- Sehr kleine Bauvolumina mit Seltenerde und Nd-Fe-B-Magneten möglich
- Keine Schleifringe und Bürsten

Nachteile:

- Teuer wegen der Magnetwerkstoffe
- Montage schwierig wegen hohen Magnetkräften
- Flussschwächung im hohen Drehzahlbereich notwendig
- Verhalten bei Wicklungsschäden
- Schleppverluste bei leer laufendem Rotor ohne Stromaufnahme / -abgabe
- Rotorlagesensor notwendig

Quelle: [6],[13], [17], [15], [19], [20], [21]

4.2.3.2 Fremderregte Synchronmaschine

Bei der fremderregten Synchronmaschine ist der Rotor mit Wicklungen versehen, durch welche Strom fließt. Dieser Stromfluss erzeugt ein Magnetfeld welches, wie oben beschrieben, vom Statormagnetfeld angezogen wird. Der Vorteil dieser Bauform ist, dass die Stärke des Magnetfeldes über den Erregerstrom beeinflusst werden kann und somit ein weiter Bereich maximaler Leistung erreichbar ist. Werden fremderregte

Synchronmaschinen übererregt betrieben, ermöglichen sie die Abgabe von Blindleistung an des Netz. Bei großen Leistungseinheiten kann die Leistung in den Rotor auch schleifringlos zugeführt werden. Dabei werden transformatorisch Spannungen in eine mit dem Läufer rotierende Drehstromwicklung mit Gleichrichter induziert.

4.2.4 Sondermaschinen

4.2.4.1 Geschaltete Reluktanzmaschine

In Abb. 18 ist der prinzipielle Aufbau einer geschalteten Reluktanzmaschine (SRM = switched reluctance machine) dargestellt.

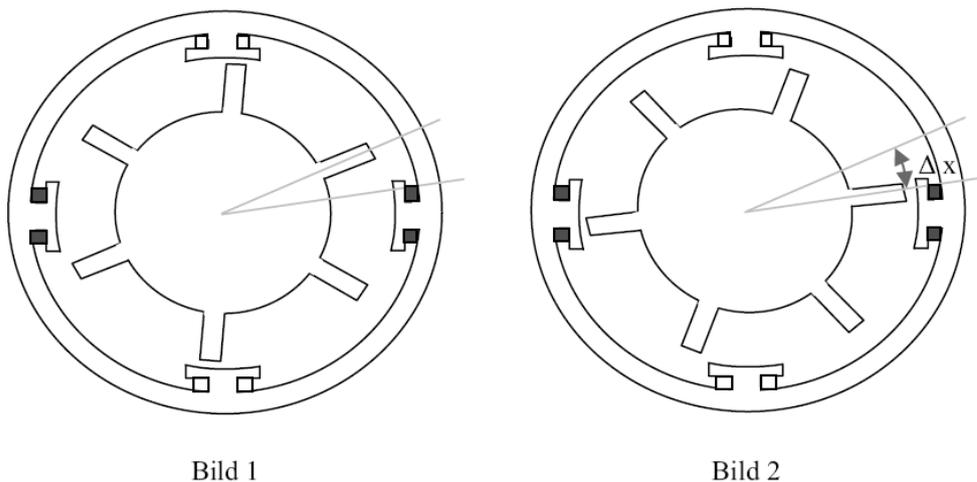


Abb. 18: Aufbau der geschalteten Reluktanzmaschine [17] S.49

Bei der SRM sind nur im Ständer Drehstromwicklungen untergebracht. Diese Wicklungen erzeugen stark ausgeprägte Pole. Der Läufer der SRM hat die Form eines langgestreckten Zahnrades und besteht aus Weicheisen. Er enthält keine Erregerwicklungen und hat normalerweise weniger Polansätze als der Ständer Pole. Die Wicklungen des Stators werden über die Leistungselektronik so angesteuert, dass sich das Magnetfeld gezielt weiterbewegt. Da die Polansätze des Rotors von diesem Magnetfeld angezogen werden, bewegt sich dieser weiter (Abb. 18). Das Anlaufen der Reluktanzmaschine erfolgt asynchron, danach geht sie in synchronen Lauf über. Die SRM ist einfach und kostengünstig herzustellen, hat aber den Nachteil eines ungleichmäßigen Drehmoments. Dieses ist von der Läuferposition abhängig. Mit modernen Steuerungen ist dieser Nachteil jedoch kompensierbar.

Quelle: [6], [13], [17]

Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad in weitem Drehzahlbereich
- Geringes Trägheitsmoment aufgrund der Zahnücken
- Hohes Beschleunigungsvermögen
- Hohes Dauerdrehmoment bei kleinen Drehzahlen
- Robust
- Geringer Wartungsaufwand
- Stabiler Motorlauf, auch bei Ausfall einer oder mehrerer Phasen
- Kompakte Bauweise
- Hohe Überlastbarkeit
- Geringe Erwärmung bei kleinen Drehzahlen
- Hohes Leistungsgewicht
- Kostengünstiger Aufbau

Nachteile:

- Drehmomentwelligkeit, Normalkraftschwankungen
- Erhöhte Geräuschemissionen
- Aufwändige Leistungselektronik, komplexe Regelverfahren
- Schlechtes Verhalten im Feldschwächebereich

Quelle: [6], [13]

4.2.4.2 Transversalflussmaschine

Die Transversalflussmaschine ist eine Sonderform der Drehfeldmaschine. Bei dieser Maschine wird der magnetische Fluss quer zur Bewegungsrichtung geführt. Dabei wird der Strom im Läufer in Umfangsrichtung geleitet. Ebenso ist der im Ständer erzeugte magnetische Fluss nicht senkrecht zum Läufer, sondern parallel dazu. Die Antriebskraft entsteht, wie bei allen elektromagnetischen Maschinen durch die Änderung der Energiedichte im Luftspalt. Das Reluktanzprinzip in dieser Maschine beruht auf dem physikalischen Effekt, dass magnetische Felder stets versuchen, den magnetischen Widerstand im Magnetkreis zu minimieren. Dies führt zur Anziehung eines magnetisch leitfähigen Eisenkernes durch den Magnetkreis. Für den Antrieb sind mindestens zwei zueinander versetzte Systeme nötig. Jeder Strang benötigt ein eigenes Stator/Rotorsystem mit Stromrichter.

Vorteile:

- 3 - 5 mal höhere Leistungsdichte
- Hohe Wirkungsgrade durch reduzierte Kupferverluste

Nachteile:

- Komplexer Aufbau
- Hohe Kosten
- Momentenwelligkeit, Normalkraftschwankungen

Momentenwelligkeit und Normalkraftschwankung haben eine zerstörerische Wirkung und bewirken eine hohe Geräusentwicklung.

Die Transversalflussmaschine bietet sich aufgrund der hohen Drehmomentdichte und der kompakten Bauweise als zukünftiger Antrieb, insbesondere bei Radnabenmotoren an. Da sie verglichen zu Maschinen mit Fremderregung oder Asynchronmaschine eine hohe Kraftdichte bei langsamen Drehzahlen aufweist, ist kein Getriebe notwendig.

Quelle: [6], [13], [17]

4.2.5 Bewertung der Konzepte

In [6] S. 80 sowie in [19] und [20] sind Bewertungen von elektrischen Maschinen für Hybridfahrzeuge dargestellt. In diesem Kapitel sind die Ergebnisse aus den einzelnen Bewertungen kombiniert, neu zusammengefasst und dargestellt.

Zunächst wurde eine Reihung der Kriterien zur Konzeptbewertung nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt (Tab. 2). Dabei bedeutet die Zahl 1, dass das Spaltenkriterium die höhere Wichtigkeit aufweist. -1 bedeutet eine höhere Wichtigkeit des Zeilenkriteriums. Aus diesen Zahlen ergibt sich eine Spaltensumme, durch welche die Reihung der Kriterien wiedergespiegelt wird. Für die eigentliche Bewertung (Tab. 3) werden die einzelnen Kriterien der Reihung folgend mit Gewichten versehen. Hierbei drückt ein hohes Gewicht eine gute Bewertung (niedriger Reihungswert) aus. Aus dieser Bewertung geht die permanenterregte Synchronmaschine als geeignetste Variante für Traktionsanwendungen hervor. Gefolgt wird sie von der geschalteten Reluktanzmaschine und der Asynchronmaschine. Es ist bei der Bewertung jedoch zu beachten, dass sie stark von der Reihung der Kriterien abhängt. Somit können die Ergebnisse bei verschiedenen Anwendungen wie Radnabenmotor, dieselektrischem Generator oder Traktionsmotor für Busse stark voneinander abweichen und von dieser Darstellung variieren.

Tab. 2: Reihung der Kriterien nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Technische Wertung

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		LD	Zuverl.	WG	SV	Regel	Überl.	Gerä.	FET	Kosten
1	Leistungsdichte	x	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
2	Zuverlässigkeit	-1	x	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3	Wirkungsgrad	-1	-1	x	-1	-1	-1	-1	-1	-1
4	Systemverhalten	-1	-1	1	x	-1	-1	-1	-1	-1
5	Regelbarkeit	1	1	1	1	x	-1	-1	-1	-1
6	Überlastbarkeit	1	1	1	1	1	x	-1	-1	-1
7	Geräuschpegel	1	1	1	1	1	1	x	1	-1
8	Fertigungstechn.	1	1	1	1	1	1	-1	x	-1
9	Gesamtkosten	1	1	1	1	1	1	1	1	x
	Summe	2	4	8	4	0	-2	-6	-4	-8
	Reihung	4	2	1	2	5	6	8	7	9

-1	Zeilenkriterium Höherwertig
0	Gleichwertig
1	Spaltenkriterium Höherwertig

Wirtschaftliche Wertung

		1	4	5	7	8	10	12	13	14
		LD	Zuverl.	WG	SV	Regel	Überl.	Gerä.	FET	Kosten
1	Leistungsdichte	x	1	1	-1	-1	1	-1	1	1
2	Zuverlässigkeit	-1	x	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
3	Wirkungsgrad	-1	-1	x	-1	-1	-1	-1	-1	1
4	Systemverhalten	1	1	1	x	-1	1	-1	1	1
5	Regelbarkeit	1	1	1	1	x	1	-1	1	1
6	Überlastbarkeit	-1	1	1	-1	-1	x	-1	1	1
7	Geräuschpegel	1	1	1	1	1	1	x	1	1
8	Fertigungstechn.	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	x	1
9	Gesamtkosten	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	x
	Summe	-2	4	6	-4	-6	0	-8	2	8
	Reihung	6	3	2	7	8	5	9	4	1

Tab. 3: Bewertung der E-Maschinen Varianten

Kriterium	Gleichstrommotor					SM		permanent erregte SM		Asynchron		Transversalflussm.		SR-Maschine							
	TR	TG	WR	WG	SG	El. Erregt		OM		VM											
						W	W*SG	W	W*SG	W	W*SG	W	W*SG	W	W*SG	W	W*SG				
Leistungsdichte	4	7	6	5	12	5	60	4	48	4	48	2	24	1	12	4	48	1	12	3	36
Zuverlässigkeit	2	7	3	7	14	4	56	3	42	3	42	3	42	2	28	1	14	3	42	1	14
Wirkungsgrad	1	9	2	7	16	7	112	6	96	3	48	2	32	1	16	5	80	1	16	3	48
Systemverhalten	2	7	7	4	11	2	22	3	33	2	22	5	55	4	44	1	11	5	55	1	11
Regelbarkeit	5	5	8	2	7	1	7	1	7	3	21	3	21	3	21	4	28	3	21	2	14
Überlastbarkeit	6	4	5	5	9	2	18	2	18	2	18	2	18	2	18	2	18	2	18	3	27
Geräuschpegel	8	2	9	1	3	5	15	5	15	1	3	1	3	1	3	1	3	3	9	3	9
Fertigungstechn.	7	3	4	6	9	7	63	4	36	7	63	3	27	2	18	2	18	4	36	1	9
Gesamtkosten	9	1	1	8	9	2	18	3	27	2	18	3	27	4	36	2	18	7	63	4	36
Gesamtwert		45		45	90		371		322		283		249		196		238		272		204
Reihung							8		7		6		4		1		3		5		2

TR technische Reihung, TG technisches Gewicht, WR wirtschaftliche Reihung, WG wirtschaftliches Gewicht, SG = TG + WG Summengewicht
 OM = Oberflächenmagnete; VM = vergrabene Magnete

In [19] werden die Kosten von verschiedenen Elektromaschinen-Varianten untersucht. Dabei stellt sich heraus, dass sich bei einer Betrachtung ohne Berücksichtigung der Wechselrichter ein wesentlich anderes Bild ergibt als mit deren Berücksichtigung. Bei den reinen Motorkosten stellt sich die SRM als am billigsten heraus, jedoch liegt der Unterschied zur PMSM unter 20%, welche die teuerste Variante darstellt. Aufgrund der

teuren Wechselrichter verliert die SRM bei den Gesamtkosten ihren Vorteil als billigste Variante und wird sogar zur teuersten. Bei den Gesamtkosten ist die Asynchronmaschine am günstigsten. Die Unterschiede in den Gesamtkosten des Hybridsystems sind jedoch sehr gering, da der Wechselrichter nur ca. 25% und der E-Motor nur ca. 15-18% der Kosten ausmachen. Der Preisunterschied zwischen der teuersten und der billigsten Variante beträgt deshalb lediglich ca. 7%.

4.3 Energiespeichersysteme

4.3.1 Einleitung

Durch die derzeitige Entwicklung hin zu Hybridfahrzeugen sind moderne und leistungsfähige Batterien eine Schlüsseltechnologie für zukünftige Fahrzeuge. Um die Vorteile des Hybridantriebes wie Verbrauchseinsparungen, Betrieb der VKM im optimalen Kennfeldbereich, Emissionsreduzierung, Boostfunktion und elektrisches Fahren ausnützen zu können, müssen zukünftige Traktionsbatterien die dadurch entstehenden Anforderungen erfüllen können. Dazu gehören vor allem eine hohe Speicherkapazität, schnelles Laden und Entladen und natürlich eine lange Lebensdauer. Vor allem bei sehr teuren Batteriesystemen sollte diese im Bereich der Fahrzeuglebensdauer liegen. Da Batterien mit zunehmender Hybridisierung auch einen steigenden Kostenanteil am Fahrzeug haben, sind eine möglichst den Anforderungen durch das Fahrzeug entsprechende Batterieleistung und damit möglichst niedrige Kosten anzustreben. Des Weiteren müssen Batterien möglichst leicht und platzsparend sein. Die Quellen dieses Abschnittes sind [22] – [29], [6] und [7].

4.3.2 Überblick über die Speichersysteme

Für Hybridfahrzeuge sind derzeit vor allem 3 verschiedene Batterietypen im Gespräch. Einerseits können weiterentwickelte Bleiakkumulatoren für Mikro-Hybride eingesetzt werden. Diese bieten aber nicht die nötigen Speicherkapazitäten und Lebensdauern für den Einsatz in Mild- und Full-Hybridfahrzeugen. Derzeit sind bei vielen Hybridfahrzeugen Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren im Einsatz. Bei zukünftigen Hybriden werden die bei einigen Herstellern am Beginn der Serienproduktion stehenden Lithium-Ionen Akkumulatoren vermehrt zum Einsatz kommen.

Weitere Batterietypen, welche für Hybridfahrzeuge in Betracht kommen könnten, sind die im Folgenden angeführten Systeme. Erstens, die bereits im Serieneinsatz bei elektrischen Fahrzeugen stehenden Na/NiCl₂-Akkumulatoren, auch ZEBRA Batterie

genannt. Diese sind jedoch Hochtemperaturbatterien welche bei ca. 300°C betrieben werden. Ein zukünftiger Batterietyp sind die sogenannten Nano-Lithium-Ionen Akkumulatoren, welche durch eine geringere Partikelgröße des Aktivmaterials (~50nm) wesentlich bessere Eigenschaften als die herkömmlichen Li-Ionen Akkumulatoren aufweisen. Zukünftig sollen Li-Air und Li-Fluorine Akkumulatoren noch höhere Speicherkapazitäten als Li-Ionen Akkumulatoren ermöglichen. Nickel-Zink, Nickel-Cadmium und Nickel-Wasserstoff Batterien sind weitere Speichertechnologien, die bei Fahrzeugen zum Einsatz kommen könnten. Nickel-Wasserstoff Akkumulatoren haben vor allem im kombinierten Einsatz mit der Brennstoffzelle Entwicklungspotential. Die zuletzt genannten Batterietypen werden im Folgenden aber nicht weiter behandelt, da sie kurz- bis mittelfristig wohl kaum in Hybridfahrzeugen Verwendung finden werden. Vertiefende Information über diese Batterietypen findet man in [23] und [24].

Neben Batterien sind auch sogenannte Superkondensatoren für den Einsatz in Fahrzeugen vorstellbar, da sie Vorteile bei schnellem Ladungswechsel aufweisen. Diese Supercaps können auch mit Bleiakkumulatoren zu Ultrabatteries kombiniert werden.

Ein wichtiger Aspekt beim Einsatz von Batterien in Hybridsystemen ist, dass durch die zunehmende Hybridisierung die notwendige Batteriespannung stark ansteigt. Sind bei Micro-Hybridfahrzeugen eventuell schon 14V Batteriespannung ausreichend, so werden für Mild-Hybride 42V und für Full-Hybride über 300V Batteriespannung benötigt [25]. Ein besonderes Merkmal von Batterien für Hybridfahrzeuge gegenüber normalen Batterien ist, dass sie bei Teilladung betrieben werden, um eine Rekuperation der Bremsenergie und ein lastabhängiges Laden zu ermöglichen. Des Weiteren müssen diese Batterien eine hohe Akzeptanz für dynamische Ladevorgänge aufweisen, um ein schnelles Laden z.B. beim Bremsen zu ermöglichen.

Für die Einbindung von Traktionsbatterien in ein Fahrzeug sind aber noch einige zusätzliche Anforderungen zu erfüllen. Es ist ein ausreichendes elektrisches Management und eine Überwachung des Batteriestatus notwendig. Aufgrund der schnellen Lastwechsel zwischen Laden und Entladen und des generell höheren Energieumsatzes, ist eine Kühlung der Batterie notwendig. Die Sicherheit ist eines der wichtigsten Kriterien für Batterien. So müssen Fehler frühzeitig erkannt und durch die OBD (On board diagnostic) behandelt werden. Des Weiteren darf bei einem Unfall keine Gefahr für Passagiere und Umwelt bestehen.

Quelle: [22], [25], [24]

Im Folgenden werden die wichtigsten Speichersysteme für Hybridfahrzeuge betrachtet. Diese sind Bleiakkumulatoren, Nickel-Metallhydrid (NiMH) Akkumulatoren, Li-Ionen Akkumulatoren sowie Supercaps. In Abb. 19 aus [26] sind die Leistungsdichten und Energiedichten verschiedener Akkumulatoren abgebildet. Dabei ist ersichtlich, dass Li-Ionen Akkus die höchsten Energiedichten und Leistungsdichten unter den Akkumulatoren aufweisen. Doppelschichtkondensatoren ermöglichen zwar extrem hohe Leistungsdichten, sie weisen jedoch sehr geringe Energiedichten auf.

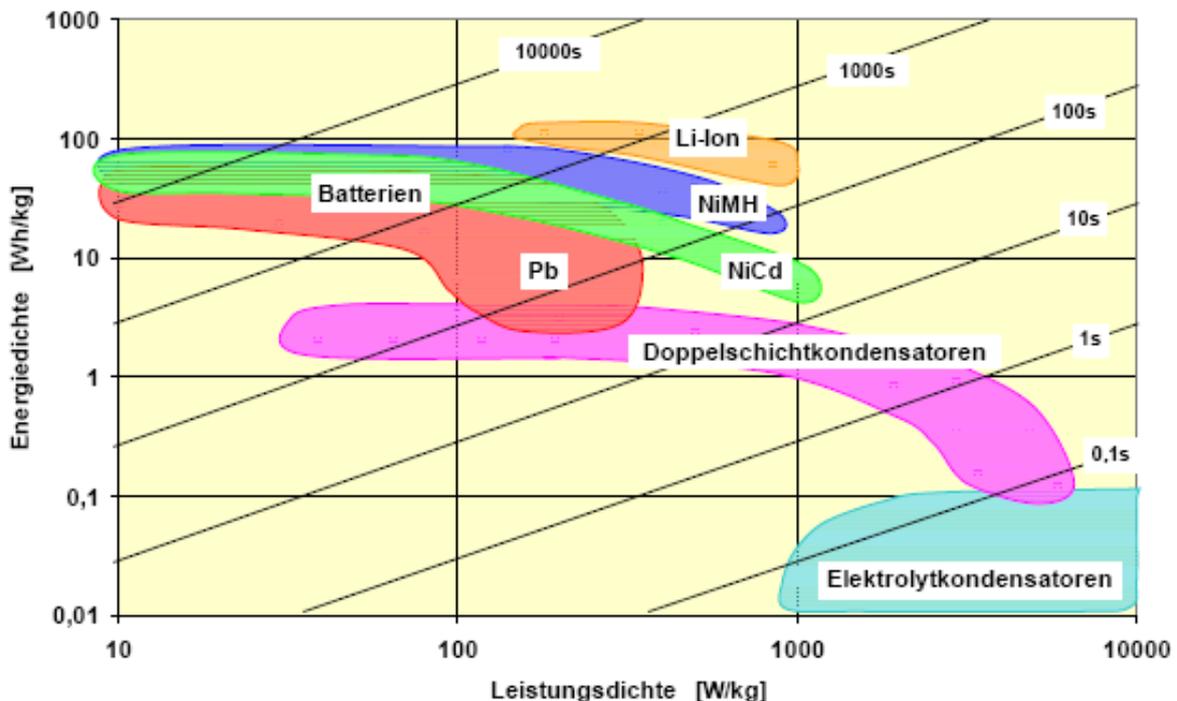


Abb. 19: Ragonediagramm verschiedener Speichertechnologien [26]

In Tab. 4 sind Daten ([7] S.172, [27] S. 29) der wichtigsten Batteriesysteme angeführt. Zu beachten ist der Unterschied zwischen theoretisch und praktisch möglicher spezifischer Energie. Der theoretische Wert wird rein aus thermodynamischen Größen berechnet und stellt einen oberen Grenzwert dar. Des Weiteren ist der wesentlich bessere Wh-Wirkungsgrad der Li-Ionen Batterie zu erwähnen.

Tab. 4: Daten verschiedener Batteriesysteme

Batteriesystem	Elektrodenmaterial		Elektrolyt	U0 Volt	spez. Energie Wh/kg		Wirkungsgrad	
	negativ	positiv			Theorie	Praxis	Ah	Wh
Blei	Pb	PbO ₂	H ₂ SO ₄	2	160	20-50	0,9	0,8
Nickel/Cadmium	Cd	NiOOH	KOH	1,3	256	20-55	0,75	0,65
Nickel/Wasserstoff Nickel/Metallhydrid	H ₂	NiOOH	KOH	1,3	259	50-80	0,75	0,65
Lithium-Ionen	LixC	Li(1-x)MeO ₂	organ.	3,6	>450	100-150	0,999	0,95

Die Zyklen-Lebensdauer ist ein weiteres wichtiges Kriterium bei den Energiespeichern. Sie ist stark abhängig von der Entladetiefe des Akkumulators. So ermöglichen Bleiakumulatoren 350 – 700 Zyklen bei 80% Entladetiefe. Diese steigt bei 5% Entladetiefe auf über 2000 Zyklen. NiMH und Li-Ionen Batterien haben eine Lebensdauer von über 2000 Zyklen bei 80% Entladetiefe. Sie erreichen Werte über 20000 bzw. 25000 Zyklen bei 5% Entladetiefe. Continental gibt für ihre Li-Ionen Batterien Werte von über 600000 Zyklen an. Supercaps ermöglichen bei 80% Entladetiefe über 100000 Zyklen. Quelle: [6]

4.3.3 Bleiakumulatoren

Bleiakumulatoren bestechen durch die mit Abstand niedrigsten Kosten. Jedoch sind sie nur bei geringen Anforderungen an Lebensdauer und geringer Entladetiefe einsetzbar. Die Zellen-Klemmenspannung von Bleiakku beträgt ca. 2V. Theoretisch ist eine Energiedichte von 160 Wh/kg erreichbar. Teilladung verschärft die Neigung von Bleiakku zur Sulfation. Dies vermindert die Lebensdauer und die mögliche Zyklenzahl dramatisch. Die Bordnetzversorgung und Stopp - Start Strategien moderner Fahrzeuge können mit Absorbent Glass Mat (AGM) Typ Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) Batterien bewerkstelligt werden. So ermöglichen AGM-VRLA Batterien eine bis zu 3-mal höhere Lebensdauer bei Teilladung als herkömmliche Bleiakku. Bei den Bleiakku sind aber noch Verbesserungen bei Teilladungsverhalten, dynamischem Ladeverhalten sowie der Bestimmung von Ladezustand (SOC –State of Charge) und „State of Health“ notwendig, um sie für zukünftige HEV einzusetzen.

4.3.4 Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren

Bei der Nickel-Metallhydrid (NiMH) Batterie wird die Energie in Form von Wasserstoff gespeichert, welcher je nach SOC zu einer der beiden Elektroden transportiert wird. Die Nennspannung einer Zelle beträgt 1.2 V – 1.3V. NiMH Batterien bieten eine wesentlich höhere spezifische Energie und Leistung als Bleiakku. Vor allem bei Teilladung ist die Lebensdauer von NiMH Batterien wesentlich höher als jene von Bleiakku. Nachteilig ist deren schlechtes Verhalten bei extremen Temperaturen (Kaltstart, hohe Temperaturen). NiMH Akkumulatoren sind in Serienhybridfahrzeugen im Einsatz.

Bei der Weiterentwicklung von NiMH Batterien muss vor allem das Niedrigtemperaturverhalten verbessert, sowie ein zuverlässiger Algorithmus zur Bestimmung des Ladezustandes gefunden werden.

4.3.5 Lithium-Ionen Akkumulatoren

Das Funktionsprinzip der Li-Ionen Batterien basiert auf dem Transport von positiv geladenen Li-Ionen zur negativen Elektrode. Dort reagieren sie mit Elektronen, die über den äußeren Strompfad fließen und in der Trägermatrix eingelagert werden. Die Nennspannung von Li-Ionen Zellen liegt zwischen 3,5 und 3,7V. Die Betriebstemperatur der Li-Ionen Batterie bewegt sich zwischen -40°C und 60°C. Verglichen mit NiMH Batterien haben Lithium-Ionen Batterien eine um:

- 30% höhere spezifische Energie
- 50% höhere spezifische Leistung
- Höherer Wh Wirkungsgrad
- Bessere Kaltstart-Eigenschaften
- Benötigen 1/3 weniger Zellen für die selbe Spannung
- Keine Hysterese von Lade- und Entladespannung

Nachteile gegenüber der NiMH Batterie sind:

- Höhere Systemkosten für Zellenüberwachung, Zellenausgleich und Sicherheit
- Geringere Flottenerfahrung
- Erst am Beginn der Massenproduktion

Bei Li-Ionen Batterien sind vor allem die Verbesserung der Zellsicherheit und eine Weiterentwicklung der Überwachungs- und Regelstrategien notwendig. Im speziellen ist eine thermische Einzelzellenüberwachung notwendig.

Quelle: [22], [23]

4.3.6 Superkapazitäten

Doppelschicht Kondensatoren haben eine extrem hohe Teillast-Lebensdauer. Sie weisen eine sehr hohe Leistungsdichte auf, welche nur leicht von der Temperatur abhängig ist. Ihr Wh-Wirkungsgrad kann bis zu 95% betragen. Die Spannung fällt proportional zum SOC. Insgesamt befinden sich diese Systeme noch in der Entwicklung und es sind noch einige technische Fragen offen. Dazu gehören die Wahl des Elektrolytes und die Sicherheit (Verhalten bei hohen Spannungen und Temperaturen). Der technische Hauptnachteil der Supercaps ist deren sehr niedrige Energiedichte.

Die bereits schon erwähnten Ultrabatteries, eine Kombination aus Supercaps und Bleiakkus, haben ein besseres Teilladungsverhalten und ein besseres dynamisches Ladeverhalten als gewöhnliche Bleiakkus. Insgesamt stellen sie ein sehr interessantes

Speichersystem für Hybridfahrzeuge mit hohen Leistungs- und Lebensdaueranforderungen jedoch geringem Energiespeicherbedarf der Batterie dar.

4.3.7 Vergleich der Systeme

In Tab. 5 aus [28] werden die 4 wichtigsten Energiespeichersysteme verglichen. Daraus ist ersichtlich, dass die Li-Ionen Technologie bei allen Bewertungsparametern sehr gut oder gut abschneidet. Vor allem aufgrund der höchsten Energiedichten bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten und den besten Wirkungsgraden ist sie die interessanteste Technologie für Hybridfahrzeuge. Doppelschichtkondensatoren weisen vor allem bei der Energiedichte und den Kosten große Nachteile auf und sind daher nur für Nischenanwendungen mit sehr hohen Leistungsanforderungen von Interesse. Bleiakkus sind aufgrund der bei weitem geringsten Kosten auch für Hybridfahrzeuge eine interessante Alternative. AGM-Typ VRLA Akkus könnten sowohl bei Micro- als auch bei Mild-Hybriden eingesetzt werden. Die Kosten für NiMH Batterien sind höher als für Bleiakkus und werden in [29] mit mehr als 2\$/Wh angegeben. Außerdem weisen sie, verglichen mit Li-Ionen Akkus ein geringes Einsparpotenzial bei den Kosten auf. NiMH Batterien sind die derzeitigen Standardbatterien bei Hybridfahrzeugen und bereits vielfach im Serieneinsatz erprobt.

Tab. 5: Vergleich der Energiespeichertechnologien [28]

	Lead Acid	NiMH	DLC	Lilon
safety	☆☆☆☆ ¹⁾	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
cost	☆☆☆☆	☆☆☆	☆	☆☆☆
→ power	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆☆	☆☆☆☆
cold cranking	☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆
→ energy	☆☆	☆☆☆☆	☆	☆☆☆☆☆☆
environment	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
process ability	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
availability	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
→ calendar life	☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆☆	☆☆☆☆

Die Kosten für Li-Ionen Batterien konnten bereits auf das Niveau von NiMH Batterien und darunter gesenkt werden. Die Herstellkosten werden in [29] kleiner als 2 \$/Wh angegeben. In [28] wird angegeben, dass sich die Herstellkosten für Li-Ionen Zellen bis 2020 auf 35% der heutigen Kosten reduzieren werden. Aufgrund der herausragenden technischen Werte und den geringeren Herstellkosten werden Li-Ionen Akkumulatoren

die NiMH Akkumulatoren in den nächsten Jahren vom Markt verdrängen und die Standardbatterie für Hybridfahrzeuge werden.

Supercaps können eine zukünftige Alternative bei geringem Energiebedarf aber hohen Leistungsanforderungen darstellen. Kombiniert mit Bleiakkus haben sie ein hohes Potential für den Einsatz in Hybriden. Jedoch sind Supercaps sehr teuer und die Kosten für zukünftige Massenproduktionen sind noch nicht abschätzbar.

4.4 Leistungselektronik

Das System Hybridfahrzeug setzt sich aus verschiedensten elektrischen Bauelementen zusammen. In Abb. 20 ist die Topologie der Elektrotechnik eines leistungsverzweigten Hybriden prinzipiell dargestellt. Jedes dieser elektrischen Bauelemente hat unterschiedliche Anforderungen an Frequenz, Phasenanzahl, Strom und nicht zuletzt Spannung. Daher sind verschiedenste Umformer notwendig, welche den elektrischen Strom in die gewünschte Form umwandeln. Dabei sind 4 verschiedene Umrichterarten möglich. Gleichrichter wandeln ein- oder mehrphasige Wechselspannung in Gleichspannung um. Umgekehrt erzeugen Wechselrichter aus Gleichspannung eine Wechselspannung. Wechselstromumrichter ermöglichen die Erzeugung einer Wechselspannung aus einer vorgegebenen Wechselspannung. Gleichstromwandler ermöglichen die Wandlung zwischen zwei Gleichspannungen.

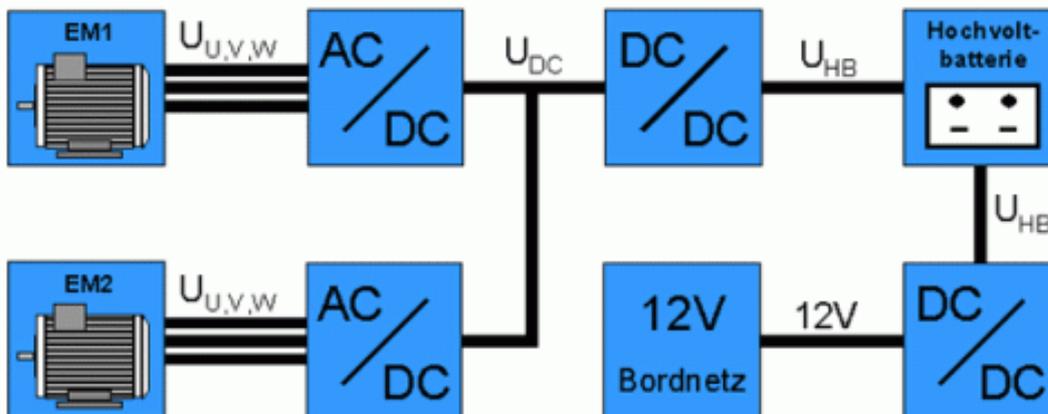


Abb. 20: Powersplit Hybrid: Topologie des elektrotechnischen Systems [30]

Zum Betrieb der elektrischen Maschinen im Hybrid sind jedoch Spannungswandler nicht ausreichend. Zusätzlich muss noch der Stromfluss geregelt werden, um Drehzahl und Drehmoment steuern zu können. Dazu werden Stromrichter benötigt. Die heute in Hybriden übliche Leistungselektronik setzt sich vorwiegend aus Leistungshalbleitern zusammen. Dabei sind die wichtigsten Bauelemente die Transistoren. Im KFZ werden vor allem Bipolare Leistungstransistoren und IGBT's (insulated gate bipolar transistor)

eingesetzt. Bei den Stromrichtern sind vor allem Pulswechselrichter zur Erzeugung eines Wechselstromes zur Ansteuerung der Elektromaschinen sowie Hochsetz- und Tiefsetzsteller von Bedeutung. Die verschiedenen Umrichter und Stromrichter sind üblicherweise bidirektional ausgeführt, um Motor- und Generatorbetrieb zu ermöglichen. In Abb. 20 ist ein DC/DC Wandler zwischen Batterie und Gleichspannungszwischenkreis eingezeichnet. Dieser ermöglicht die Stabilisierung der Gleichspannung im Zwischenkreis, gegenüber der Batteriespannung, auf einem konstanten Niveau, welches über jenem der Batteriespannung liegen kann. Dies reduziert die Leitungsverluste im Zwischenkreis. Durch diese Auslegung mit einer niedrigen Batteriespannung und einer höheren Zwischenkreisspannung ist es möglich, das Batteriegewicht um 10-15% und die E-Maschine um 15-25% sowie den Antriebsumrichter um bis zu 33% kleiner auszuführen [31]. Diese Vorteile ermöglichen die Überkompensierung des höheren Gewichts und der zusätzlichen Verluste durch den DC/DC-Wandler. Quellen: [6], [30], [31].

4.5 Getriebe für Hybridfahrzeuge

Die Möglichkeit der Darstellung verschiedener Hybrid-Antriebsstrangtopologien hängt stark vom gewählten Getriebe und dessen Möglichkeiten ab. Daher spielt die Wahl der Getriebetechnologie eine besondere Rolle. Es stehen Vorgelegegetriebe, Planetenautomaten sowie stufenlose Getriebe zur Auswahl. Start-Stopp Systeme und Hinterachshybride können mit allen Getriebearten realisiert werden. Parallel-Hybride mit einer E-Maschine zwischen Motor und Getriebe (P2-Hybride) können ebenfalls mit allen Getriebevarianten dargestellt werden. Für leistungsverzweigte Hybride ist ein Getriebe mit Leistungsverzweigung notwendig. Dieses Getriebe muss daher speziell für das Zielfahrzeug ausgelegt werden und bringt hohe Kosten mit sich. Bei momentverzweigten Getrieben greift die Elektromaschine direkt ins Getriebe ein. Daher eignen sich vor allem Getriebe in Stirnradbauweise. Vorgelegegetriebe ermöglichen mit geringem Zusatzaufwand eine relativ flexible Ausführung als Parallel oder Torque-Split Hybrid [32].

Aufgrund der derzeit noch geringen Stückzahlen bei Hybridgetrieben sind die Entwicklungs- und Produktionskosten ein sehr wichtiges Kriterium für neue Hybridkonzepte. Aus den Kosten ergibt sich auch als eines der wichtigsten Entwicklungskriterien die möglichst bauraumneutrale Integration des Hybridgetriebes ins Fahrzeug. Dies wird durch eine möglichst starke Integration des Hybridmoduls in

das Getriebe ermöglicht. Dabei sollen bestehende Getriebe mit möglichst wenigen Veränderungen für Hybridfahrzeuge angepasst werden. Insbesondere sollen die Zusatzkomponenten im vorhandenen Getriebegehäuse untergebracht werden. Auf diese Art sind vor allem Start-Stopp System verwirklichtbar, wobei hier bei der Außenläuferbauart der E-Maschine die Primärmasse des Zweimassenschwungrades durch den Rotor ersetzt wird. Eine weitere Stoßrichtung ist die Entwicklung von völlig neuen Getrieben speziell für Hybridanwendungen. Hier liegt der Fokus vor allem auf den leistungsverzweigten Getrieben mit Planetensätzen.

4.5.1 Vorgelegegetriebe

Generell sind alle Varianten von Vorgelegegetrieben für Parallelhybridfahrzeuge einsetzbar. Jedoch werden die Entwicklungen vor allem bei automatischen Schaltgetrieben und Doppelkupplungsgetrieben vorangetrieben, da die Tendenz weltweit weg vom Handschaltgetriebe zu automatischen Varianten geht. Auch bieten diese die Möglichkeit die Schaltstrategie optimal auf das Hybridfahrzeug mit Elektromotor anzupassen.

4.5.1.1 Automatisches Schaltgetriebe

Automatische Schaltgetriebe werden bei vielen Parallelhybridentwicklungen eingesetzt.

Die Vorteile von automatischen Schaltgetrieben sind ([33]):

- Automatisches Schalten
- Niedrige Rotationsverluste, hoher Wirkungsgrad
- Keine Hydraulikpumpe
- Niedrigere Masse als automatische Planetengetriebe (Automatikgetriebe) und Doppelkupplungsgetriebe
- Niedrigere Kosten als Automatikgetriebe in Europa
- Ermöglichen schnelles Schalten
- Individuelle Flexibilität bei der Übersetzung der Gänge
- Direktes Schaltgefühl
- Ermöglichen niedrigsten Kraftstoffverbrauch

Nachteile:

- Zugkraftunterbrechung
- Können Zweimassenschwungrad zur Dämpfung benötigen (Kosten)

- Gerade – gerade oder ungerade - ungerade Schaltvorgänge sind nicht ohne Steuerung oder neutralem Intervall möglich

Ein Beispiel für ein automatisches Schaltgetriebe für Hybridfahrzeuge ist das *ZF HY Tronic Lite* Getriebe. Näheres dazu finden sie in Kapitel 5.2.

4.5.1.2 Doppelkupplungsgetriebe

Doppelkupplungsgetriebe arbeiten wie zwei automatische Schaltgetriebe, wobei ein Schaltgetriebe die geraden und das andere die ungeraden Gänge abdeckt. Daher tritt beim Doppelkupplungsgetriebe keine Zugkraftunterbrechung auf.

Vorteile nach [33] sind:

- Vollautomatisches Schalten ohne Zugkraftunterbrechung
- Gute Schaltqualität
- Niedrige Rotationsverluste
- Schnelles Schalten möglich
- Teilweise Flexibilität der Übersetzung der einzelnen Gänge
- Direktes Gefühl

Und die Nachteile:

- Dämpfungscharakteristik des Antriebsstranges ähnlich wie bei automatischen Schaltgetrieben
- Eventuell Zweimassenschwungrad nötig (Kosten)
- Höhere Kosten als automatische Schaltgetriebe und Automatikgetriebe
- gerade – gerade oder ungerade - ungerade Schaltvorgänge sind nicht ohne Steuerung oder neutralem Intervall möglich
- Ölwechsel könnte nötig sein.

In [34] wird die Anwendung von Doppelkupplungsgetrieben für Hybridfahrzeuge untersucht. In dieser Entwicklung wird eine nasslaufende Kupplung mit reduziertem Kühlmittelstrom im Doppelkupplungsgetriebe eingesetzt. Da es einen relativ geringen Verbrauch bei vertretbarer Erwärmung ermöglicht. Auf Basis dieser Kupplung wurden 2 Konzepte für einen Hybridantriebsstrang entwickelt. Bei einem der Konzepte wird ein 7-Gang Getriebe angewendet (Abb. 21). Dabei sind 2 Elektromaschinen verbaut, wobei die kleinere an der Kurbelwelle montiert ist und zum Starten des Motors verwendet wird. Der stärkere Motor ist mit den geraden Gängen des Antriebs verbunden und ermöglicht ein elektrisches Fahren in den geraden Gängen. Rekuperation ist in allen Gängen

möglich wobei jeweils der optimale gerade Gang für die Bremsenergieerückgewinnung ausgewählt wird.

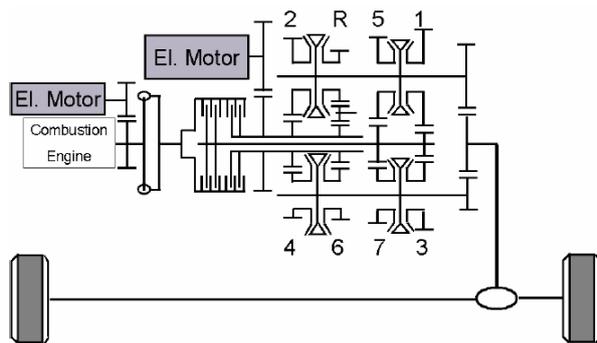


Abb. 21: Mild Hybrid Konfiguration mit einem 7 Gang Doppelkupplungsgetriebe für Kompakt- und Mittelklassefahrzeuge [34] S. 857

Doppelkupplungsgetriebe eignen sich laut [32] hervorragend für verschiedene Hybridkonzepte, wobei für die E-Maschinen verschiedenste Konfigurationen denkbar sind.

4.5.2 Automatikgetriebe

Automatikgetriebe mit Planetensätzen sind eine weitere Variante zur Ausführung von Hybridfahrzeugen. Sie eignen sich gut für vollständige Neuentwicklungen von Hybridfahrzeugen, da sie parallele und leistungsverzweigte Hybride mit sehr guter Integration der Elektromaschine(n) ermöglichen. Des Weiteren sind sie auf dem für Hybridfahrzeuge sehr wichtigen amerikanischen Markt weit verbreitet. Ein Weglassen des Drehmomentwandlers führt zu einer starken Verringerung der Verluste des Antriebsstranges mit Planetengetriebe.

Vorteile sind laut [33]:

- Vollautomatisches Schalten ohne Zugkraftunterbrechung
- Gute Schaltqualität
- Exzellente Anfahrcharakteristik
- Sprungschalten möglich
- gute Dämpfungscharakteristik des Antriebsstranges
- Hohe Anhängerzugkraft

Und Nachteile:

- Hydraulische Systeme verursachen höhere Verluste als Doppelkupplungs- und automatische Schaltgetriebe
- Höhere Kosten als automatische Schaltgetriebe

- Geringe Übersetzungsflexibilität für eine gegebene Konstruktion
- Führt zu schlechtestem Kraftstoffverbrauch

Planetengetriebe werden zum Beispiel in der Hybridversion des VW Tuareg eingesetzt [35]. Dabei wird ein P2 – Parallelhybrid mit einem konventionellen Stufenautomaten mit Drehmomentwandler kombiniert. Bei diesem Konzept ist eine Trennkupplung zwischen VKM und Elektromotor angeordnet. Im Tuareg wird eine 288V Synchronmaschine verwendet, welche eine mechanische Leistung von 34kW und ein maximales Drehmoment von 300Nm liefert. Damit der Drehmomentwandler auch bei abgeschalteter VKM das Drehmoment der Elektromaschine übertragen kann, ist eine elektrische Ölpumpe notwendig.

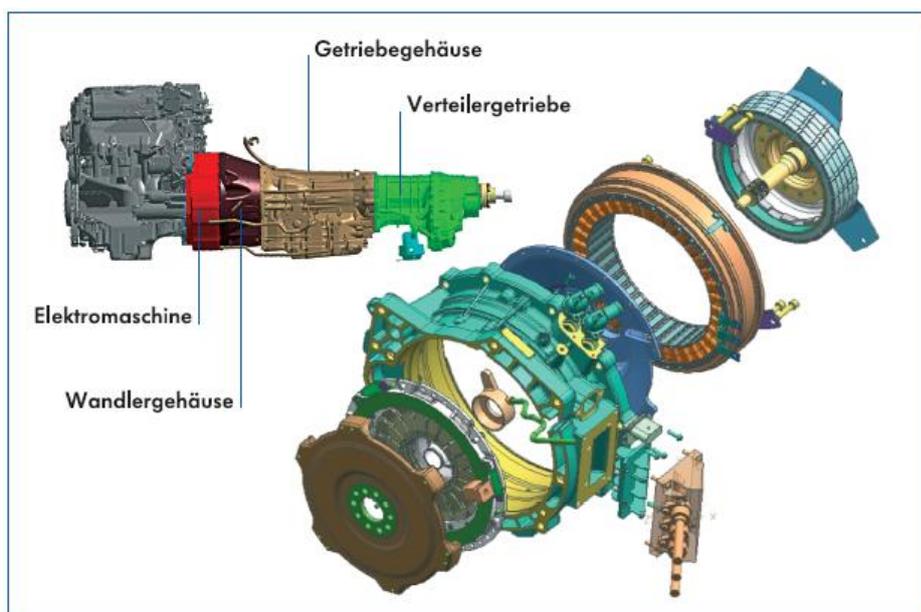


Abb. 22: Komponenten des Touareg Parallel-Hybrid Triebstranges (ohne Achsen) [35] S. 674

4.5.3 Stufenlose Getriebe

Stufenlose Getriebe können in CVT-Getriebe (Continuous variable transmission), EVT-Getriebe (Electrical variable transmission) und leistungsverzweigte Getriebe wie das Two-Mode Hybridgetriebe eingeteilt werden.

Daraus ist ersichtlich, dass sie die Basis für einige Hybridvarianten darstellen. Serielle Hybride können auch als EVT Getriebe betrachtet werden, da die Übersetzung zwischen Motordrehzahl und Raddrehzahl über den elektrischen Kreis erfolgt und stufenlos möglich ist. Beim seriellen Hybrid sind Übersetzungsverhältnisse zwischen $-\infty$ und ∞ möglich.

4.5.3.1 Two-Mode Hybridgetriebe

Das *Two-Mode*-Hybridgetriebe ist ebenfalls ein Getriebe in Planetenbauweise. Es wurde in Kooperation von *GM*, *Daimler*, *Chrysler* und *BMW* entwickelt. Diese Getriebevariante ermöglicht neben EVT-Betrieb mit leistungsverzweigung noch 4 Gänge mit fixen Übersetzungen. In diesen festen Gängen wird die Leistung rein mechanisch und dadurch mit sehr hohem Wirkungsgrad übertragen. In diesen Gängen können die Elektromotoren zusätzlich motorisch oder generatorisch zugeschaltet werden.

4.5.3.2 CVT – Getriebe

CVT-Getriebe sind ebenfalls bei Hybridfahrzeugen einsetzbar.

Ihre Vorteile sind [33]:

- Variable Übersetzung

Die Nachteile sind:

- Hochdruck Hydrauliksystem ist notwendig → höhere Verluste
- Geringerer Wirkungsgrad des CVT gegenüber anderen Getrieben
- Höhere Kosten

CVT-Getriebe können für verschiedene Hybridarchitekturen eingesetzt werden. Eine Möglichkeit ist, den Elektromotor zwischen VKM und Getriebe anzuordnen. Bei Start-Stopp Funktionen muss jedoch die Betriebsbereitschaft des Getriebes gesichert sein. Kupplung und Variator müssen auch bei VKM-Stillstand mit Öl versorgt werden. Daher ist eine elektrische Zusatzpumpe notwendig. Eine interessante Variante ist das 2-Bereichs-CVT. Dabei wird der Variator durch zwei Leistungszweige doppelt genutzt. So ermöglicht ein i^2 -Getriebe mit einer Spreizung des Variators von 3,6 eine Gesamtspreizung von 12.

5 Hybridsysteme für Nutzfahrzeuge

Eines der interessantesten Anwendungsgebiete für Hybridsysteme sind Nutzfahrzeuge (NFZ) über 3,5 Tonnen. Dies deshalb, da eines der Hauptargumente für den Kauf eines bestimmten Fahrzeuges die Gesamtkosten sind. Wenn also ein Hybridfahrzeug über die gesamte Lebensdauer geringere Kosten als ein konventionelles Fahrzeug hat, wird es einem konventionellen Fahrzeug vorgezogen werden. Dies ist wohl derzeit noch nicht der Fall, aber durch staatliche Unterstützungen wird dieser Nachteil in vielen Ländern zumindest teilweise ausgeglichen. Des Weiteren sollten die Kosten von Hybridsystemen bei einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Stückzahlerhöhung soweit sinken, dass Hybridsysteme auch ohne Förderungen kostengünstiger als konventionelle Antriebe sind.

Weitere wichtige Gründe für den Verbau von Hybridsystemen in NFZ sind die geringeren Emissionen. Neben dem allgemein bekannten Vorteil der geringeren CO₂-Emissionen und dem damit niedrigeren Kraftstoffverbrauch, haben Hybride auch geringere Schadstoffemissionen. Dadurch kann es möglich sein, zukünftige strenge Abgasvorschriften mit geringem zusätzlichem Aufwand zu erreichen. Hierfür ist jedoch eine Emissionsgesetzgebung notwendig, welche nicht nur den Motor sondern das gesamte Fahrzeug berücksichtigt.

Wie bei Hybridsystemen für PKW können Hybridsysteme für NFZ in serielle, parallele und leistungsverzweigte Systeme unterteilt werden. Bei allen 3 Systemen gibt es bereits verschiedene Anwendungen und Entwicklungen. Auffällig bei diesen Systemen ist, dass ihre Entwicklung sehr stark von Zulieferfirmen, insbesondere im Bereich der Getriebeentwicklung, getragen wird. Dies ist aufgrund der geringeren Stückzahlen auch völlig einsichtig.

In Tab. 1 (Kapitel 2.2.2) ist eine Einteilung von Nutzfahrzeughybriden nach der installierten Elektromaschinen-Leistung dargestellt. Um die Sinnhaftigkeit von Hybridsystemen in Nutzfahrzeugen zu bewerten, muss vor allem das Anwendungsgebiet des Systems betrachtet werden. Abb. 23 zeigt verschiedene Nutzfahrzeugklassen und deren Potential bei der Hybridisierung. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass ein hoher Hybridisierungsgrad nur bei sehr transientem Fahrbetrieb sinnvoll ist. Vor allem der Stadtbus mit seinen vielen Halten eignet sich für Full-Hybrid Konzepte, da sein Fahrzyklus von starken Beschleunigungen und Verzögerungen geprägt wird. Dadurch lässt sich die Rekuperation von Bremsenergie optimal einsetzen.

Des Weiteren sind Start-Stopp-Systeme aufgrund der vielen Haltestellen optimal anwendbar. Ein mittlerer Hybridisierungsgrad ist für Verteiler-LKW vorstellbar, da diese ebenfalls einen relativ transienten Fahrbetrieb aufweisen. Jedoch muss hier stark das Einsatzgebiet berücksichtigt werden. So eignen sich für städtische Ballungsräume Power-Assist Varianten, für den ländlichen und kleinstädtischen Verteilerverkehr sind Mild-Hybridvarianten vorzuziehen. Für Reisebusse und Fernverkehrs-LKW gilt ein Hybridantrieb derzeit nicht als sinnvoll, da die theoretisch möglichen geringen Treibstoffeinsparungen nicht im Verhältnis zu den hohen Kosten stehen. Jedoch sind hier Auxiliary Power Units (APU) zur Standklimatisierung und Bordnetzversorgung denkbar. Speziell der mit einem schlechten Wirkungsgrad behaftete Leerlaufbetrieb von Fernverkehrs-LKW während der Ruhezeiten der Fahrer kann dadurch verhindert werden.

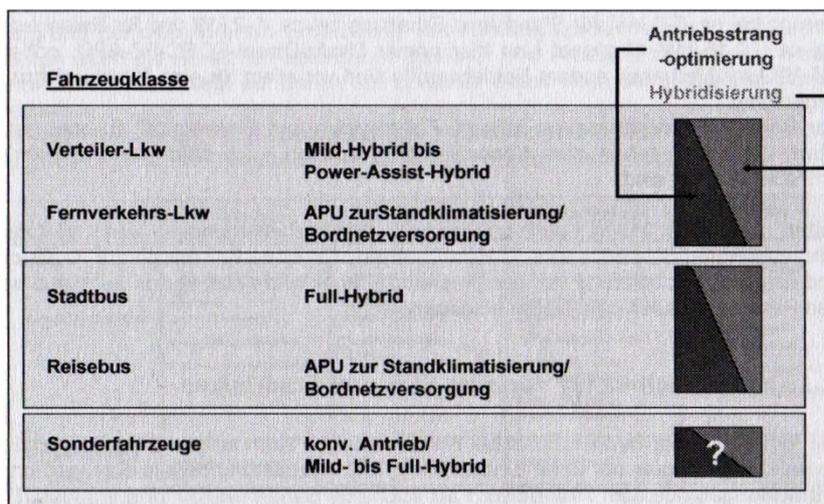


Abb. 23: Verschiedene Nutzfahrzeugklassen und deren sinnvolle Hybridisierung aus [10] S. 93

Bei Sonderfahrzeugen hängt die Sinnhaftigkeit von hybriden Antriebssystemen stark vom Einsatzgebiet ab. So gilt aber wie bei allen Anwendungen, dass die Hybridisierung sinnvoller wird, je transienter der Fahrbetrieb ist. Ein weiterer Vorteil von Hybridsystemen ist, dass sie bei Fahrzeugstillstand als Stromquelle genutzt werden können. Insgesamt fungieren Hybridsysteme auch bei Nutzfahrzeugen als Brückentechnologie zu den elektrischen Antriebssystemen. Quelle: [10]

5.1 Serielle Systeme

Serielle Systeme sind die derzeit am weitesten verbreitete Variante für Hybrid-NFZ. Sie profitiert vor allem vom relativ geringen Entwicklungsaufwand für den Fahrzeughersteller, und ermöglicht die Realisierung von Hybridantrieben mit bereits

vorhandenen Komponenten. Vor allem im Busbereich gibt es bereits seit langem Entwicklungen und Fahrzeuge die zumindest Teile des Hybridkonzeptes vorwegnehmen. So werden Oberleitungsbusse wie serielle Hybride von einem elektrischen Traktionsmotor angetrieben. Eine weitere Variante sind die dieselektrischen Antriebe. Ein Merkmal, welches serielle Hybride gegenüber anderen Varianten auszeichnet ist, dass bei ihnen Radnabenantriebe eingesetzt werden können. Somit ermöglichen serielle Hybride die Darstellung von neuen, zweckmäßigeren Fahrzeugarchitekturen.

5.1.1 Dieselektrische Antriebe

Dieselektrische Antriebe weisen eine sehr ähnliche Struktur wie serielle Hybridsysteme auf. Sie unterscheiden sich aber von diesen dadurch, dass auf die Batterie verzichtet wird. Daher sind nicht alle Vorteile des Hybridsystems realisierbar. Dieselektrische Antriebe ermöglichen jedoch einen verbrauchsoptimalen Betrieb im VKM-Kennfeld. Auch bei ihnen ist eine Auflösung des Antriebsstranges möglich.

Nachfolgend sind zwei Beispiele für dieselektrische Antriebe von *Steyr-Motors (SMO)* angeführt: Gemeinsam mit den Firmen *Viseon (vormals Neoplan)* und *ESW* wurde ein dieselektrischer Zusatzantrieb für Oberleitungsbusse entwickelt. Dieser ermöglicht ein Fahren des O-Busses außerhalb des etablierten Fahrleitungsnetzes sowie einen Betrieb der Busse während Stromausfällen. Dieses System ist derzeit in *Modena, Italien* und in *Venezuela* in zwei unterschiedlichen Ausführungen im Einsatz. In Abb. 24 ist ein Schema dieses Systems dargestellt.

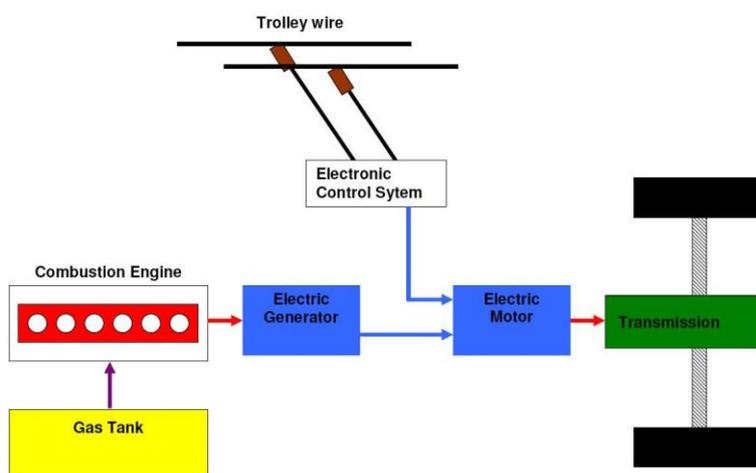


Abb. 24: O-Busfahrzeug von *Neoplan* mit zusätzlichem dieselektrischem Antrieb [5]

Ein weiteres Einsatzgebiet von dieselektrischen Antrieben sind militärische Spezialfahrzeuge. Als Beispiel soll hier nur das *SEP* Konzept eines gepanzerten

taktischen Fahrzeuges von *Hägglunds-BAE* genannt werden. Bei diesem Fahrzeug werden 2 *SMO M16* 6-Zylinder Dieselmotoren mit 3,2l und 130 kW im dieselektrischen Antrieb verbaut. Die Generatoren sind permanenterregte Synchronmaschinen. Die elektrische Leistung wird dann auf 6 Radnabenmotoren aufgeteilt. Diese sind permanenterregte Synchronmotoren mit 100kW Maximalleistung. Quelle: [36]

5.1.2 Serielle Hybridantriebe

Serielle Hybride sind vor allem in Stadtbussen sehr weit verbreitet. Sie zeichnen sich durch die Möglichkeit eines modularen Aufbaus aus. Zwei der größten Anbieter von seriellen Hybridsystemen für Nutzfahrzeuge sind *BAE-Systems* mit dem *HybriDrive* System und *Siemens* mit dem modularen *ELFA* System. Das Siemens *ELFA* System wird in den USA vor allem von der *ISE-Corporation* in deren *Thundervolt* Hybridsystemen vertrieben.

Der übliche Systemaufbau von seriellen Hybriden ist eine VKM welche direkt mit dem Generator gekoppelt ist. Dieser ist als PMSM ausgeführt. Die Traktionsmotoren sind dabei meist Asynchronmaschine und über ein Getriebe mit den Achsen verbunden. Jedoch ist zu erwarten, dass sich hier ebenfalls die PMSM durchsetzen wird. *Siemens* bietet diese bereits als Direktantrieb ohne Untersetzungsgetriebe an. Neben diesen zwei wichtigen Systemlieferanten forschen auch diverse Bushersteller wie *MAN*, *Daimler* und *Volvo* an Serienhybriden. Es ist zu erwarten, dass die PMSM in Zukunft vermehrt als Radnabenmotor eingesetzt wird. Derzeit treten hierbei jedoch neben den hohen Kosten noch Probleme technischer Natur auf. So muss die Kühlung und die Stromzuleitung der Radnabenmotoren bewerkstelligt werden. Dabei können vor allem bei gelenkten Radnabenmotoren Probleme mit den elektrischen Leitungen auftreten. Durch das benötigte aufwändige Kühlsystem sind diese Systeme mit zusätzlichen hohen Kosten verbunden.

Das *HybriDrive* System von *BAE* wird zum Beispiel von *Orion International* (*Daimler* Gruppe) eingesetzt. *Orion* hat Anfang 2008 bereits über 1300 Hybridbusse ausgeliefert. Des Weiteren sind über 70% der in Produktion befindlichen Busse Hybridfahrzeuge. In Abb. 25 aus [37] ist das *BAE Hybriddrive* System in einem *Orion VII* Stadtbuss abgebildet. In [38] wurde der Verbrauch des *Orion VII Gen. 2* Hybridbusses mit jenem eines konventionellen *Orion V* Dieselmusses im realen Stadtverkehr verglichen. Dabei erreichten die Hybridbusse eine Reichweite von 3 mpg (miles per gallon) und die

konventionellen Busse 2,33 mpg. Das entspricht einem Verbrauch von 78 l/100km für die Hybridvariante und 101 l/100km für die konventionelle Variante und somit einer Einsparung von 22%. Zu beachten ist, dass die 2. Generation der Hybridfahrzeuge einen etwas höheren Verbrauch als die 1. Generation aufweist. Dies ist laut der Studie wohl vor allem auf die Abgasrückführung zurückzuführen, welche in den konventionellen und den älteren Hybridmodellen entfällt.



Abb. 25: Das BAE HybriDrive System in einem Orion VII Stadtbus aus [37]

Die neueste Generation Orion VII NG verwendet statt der Bleibatterie einen Li-Ionen Akkumulator. In Tab. 6 aus [39] ist eine Systemübersicht der Orion VII NG Busse dargestellt. Das HybriDrive System ist auch bei einigen anderen Busherstellern wie Alexander Dennis oder New Flyer im Einsatz.

Tab. 6: Systembeschreibung des Hybriddrive-Systems für die Orion VII NG Stadtbusse

System facts and features

	Power	Specifications	Weight/size
Energy storage system	+/- 200kW peak	<ul style="list-style-type: none"> Breakthrough nano-phosphate-based lithium-ion technology High power and charge capacity Lightweight Longer life, with warranty options available Cooled with forced ambient air 	800lbs./364 kg
Propulsion control system	+/- 200kW continuous	<ul style="list-style-type: none"> Selectable acceleration and braking settings Minimal internal interconnects On-board diagnostics SAE 1939 CAN interface 	187lbs./85 kg
Traction motor	160kW (215 hp) continuous 200kW (268xhp) peak	<ul style="list-style-type: none"> Superior acceleration and gradeability Reduced maintenance Flexible for worldwide bus platforms Inherently reliable, with low life-cycle cost Easy installation 	770lbs./ 350 kg
Integrated starter/generator	200kW (265hp) continuous	<ul style="list-style-type: none"> Quieter start Eliminates starter motor and flywheel Reduced maintenance, parts count, and life-cycle cost Enables electric accessories 	315lbs./143 kg
Engine	280 hp @ 2,300 rpm	<ul style="list-style-type: none"> EPA-compliant; hybrid-certified 	6.7L
Auxiliary power system	28VDC and 208 3-phase AC	<ul style="list-style-type: none"> Eliminates hydraulics, belts, and alternators Reduces maintenance Enables electric accessories Enables engine-off operation and zero-emission mode 	150 lbs.

Das *Siemens ELFA* System ist unter anderem bei *MAN* im *Lion's City* Stadtbuss im Einsatz. In diesem Bus wird ein Ultracap-Speichersystem verwendet. Es besteht aus 12 Modulen mit je 24 Zellen und hat eine maximale Lade-/Entladeleistung von 200 kW. Der Spannungsbereich liegt zwischen 400-630 Volt und der Energieinhalt bei ca. 0,4 kWh. Die Ultracaps sind luftgekühlt.

Ein weiterer Bereich in dem serielle Hybride in Betracht gezogen werden sind militärische Fahrzeuge. Derzeit werden von verschiedensten Herstellern solche Systeme entwickelt. Unter anderem führend auf diesem Gebiet ist *BAE* mit einer Adaption des in Bussen verwendeten *HybriDrive* Antriebssystems. Einer der wichtigsten Vorteile dieser Systeme für Militärfahrzeuge ist die hohe mögliche Treibstoffeinsparung. Diese ist vor allem im militärischen Bereich von Bedeutung, da Treibstoff den Großteil des Nachschubes für im Einsatz befindliche Truppen ausmacht. Des Weiteren kann der Generator als APU genutzt werden und somit diverse Geräte betreiben.

Abb. 26 aus [40] zeigt eine Achse für Stadbusse von *ZF*. Diese ist mit Asynchronmaschinen ausgestattet, welche direkt in die Achse integriert sind. Die Elektromaschinen sind als radnahe Motoren ausgeführt und über ein Untersetzungsgetriebe mit den Rädern gekoppelt. Es ergibt sich ein sehr platzsparendes und leichtes Achssystem.

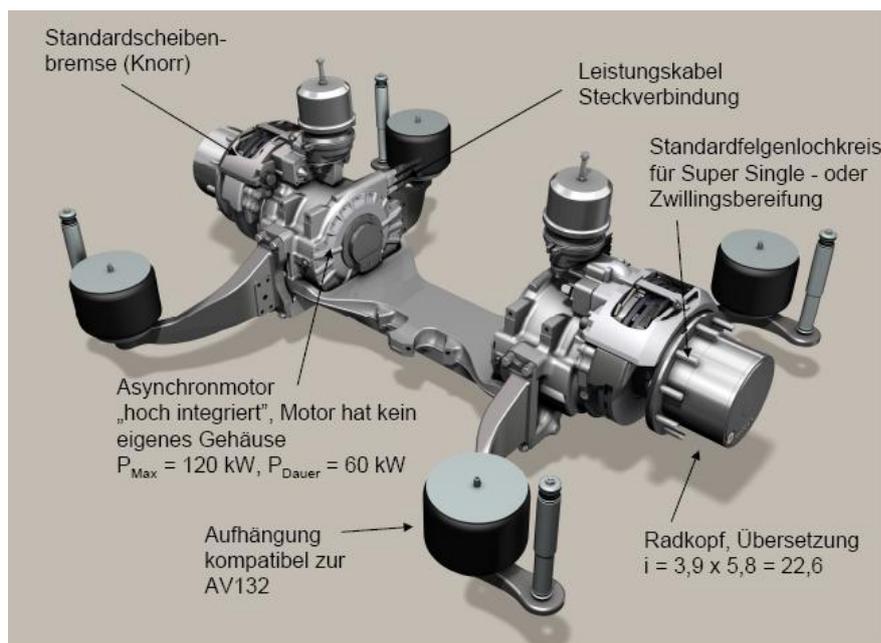


Abb. 26: Stadbusachse AVE 130 von ZF [40]

5.2 Parallele Hybridsysteme

Die Entwicklung von parallelen Systemen für Nutzfahrzeuge wird ebenfalls von mehreren Firmen vorangetrieben. Hier spielen vor allem die Zulieferer eine große Rolle,

da eine möglichst bauraumneutrale Integration der E-Maschine in das Getriebegehäuse vorteilhaft ist. Daher sind vor allem Getriebebauer an einer Entwicklung von parallelen Hybriden interessiert. Das in Abb. 27 aus [41] dargestellte Getriebe ist die Hybridversion des 6-Gang Automatikgetriebes *EcoLife* von ZF für Stadtbusse. Dabei entfällt der Wandler, die eingebaute E-Maschine liefert bis zu 120kW Leistung. Dieses Getriebe soll gleiche Fahrleistungen wie jene eines konventionellen Stadtbusses ermöglichen.



Abb. 27: EcoLife Hybrid Ready von ZF [41]

Für Verteiler-LKW wurde bei ZF das *ZF HyTronic Lite* Hybridgetriebe entwickelt (Abb. 28). Dieses Parallelhybridgetriebe beruht auf dem automatischen 6-Ganggetriebe *AS Tronic lite* und ist Bestandteil dieser Getriebefamilie.

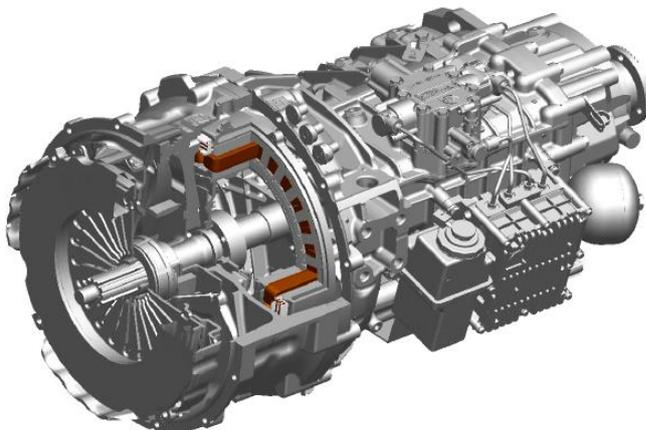


Abb. 28: ZF HY Tronic Lite [8]

Es ermöglicht die Darstellung eines Vollhybridsystems. Die Elektromaschine ist dabei als integrierter Startergenerator ausgeführt, wobei zwischen VKM und Elektromaschine eine Kupplung eingebaut ist. Diese Variante wurde gewählt, da das Segment der Verteiler-LKW sehr preissensitiv ist. Das System besteht aus dem eigentlichen

Getriebe, einer Elektromaschine sowie Wechselrichter, Batterien und der Leistungsverkabelung. Die Elektromaschine ist als PMSM in Innenläuferbauform ausgeführt und liefert 60 kW generatorische Spitzenleistung sowie ein Drehmoment von 425 Nm. Die Nennspannung der Elektromaschine beträgt 340V. Da die Maße und das Gewicht des Getriebes nur leicht über jenen der konventionellen Getriebe liegen, ist ein Einbau in Fahrzeuge, welche für konventionelle Getriebe konzipiert sind, relativ problemlos möglich. Durch ein Downsizing des Dieselmotors kann die Gewichtszunahme annähernd ausgeglichen werden. Die E-Maschine kann auch zur externen Stromversorgung eingesetzt werden. ZF gibt an, dass mit dieser Technologie bis zu 30% Kraftstoff eingespart werden kann.

5.3 Leistungsverzweigte Hybridsysteme

Leistungsverzweigte Hybridsysteme versprechen die höchsten Kraftstoffeinsparungen aller Hybridsysteme. Die Entwicklung dieser Variante und das System mit seinen 2 Elektromaschinen sind jedoch sehr kostenintensiv. Daher gibt es derzeit für leistungsverzweigte NFZ-Hybridgetriebe mit *GM-Allison* nur einen Anbieter. Abb. 29 aus [42] zeigt das *Allison Ev Drive* System.

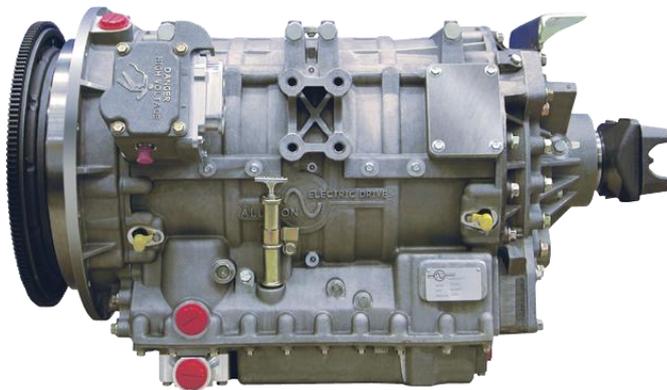


Abb. 29: Leistungsverzweigtes Hybridgetriebe *Ev Drive* von *GM-Allison* [42]

Das *EP40/50* System stellt einen sogenannten Zweibereichs-Verbund-Split-Parallelhybrid dar. Diese Bezeichnung beschreibt den Aufbau dieses Systems. Zweibereich bedeutet, dass zwei verschiedene Übersetzungsvarianten des Radsatzes möglich sind. Es ist ein niedertouriger Modus und ein hochtouriger Modus möglich. Verbund-Split bedeutet, dass das Drehmoment durch ein Mischen der Momente von VKM und Motor A sowie Motor B gebildet wird. Durch die zwei Bereiche sind niedrigere elektrische Leistungen über den elektrischen Zweig verwirklichtbar (Kapitel 2.2.1.3). Die Umschaltung zwischen den Bereichen erfolgt an einem synchronen Punkt der zwei

Bereiche. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Zweibereichs-Getriebe zwei Punkte aufweist, bei welchen die gesamte Leistung über den mechanischen Zweig fließt. In Abb. 30 ist der Aufbau des Getriebes abgebildet.

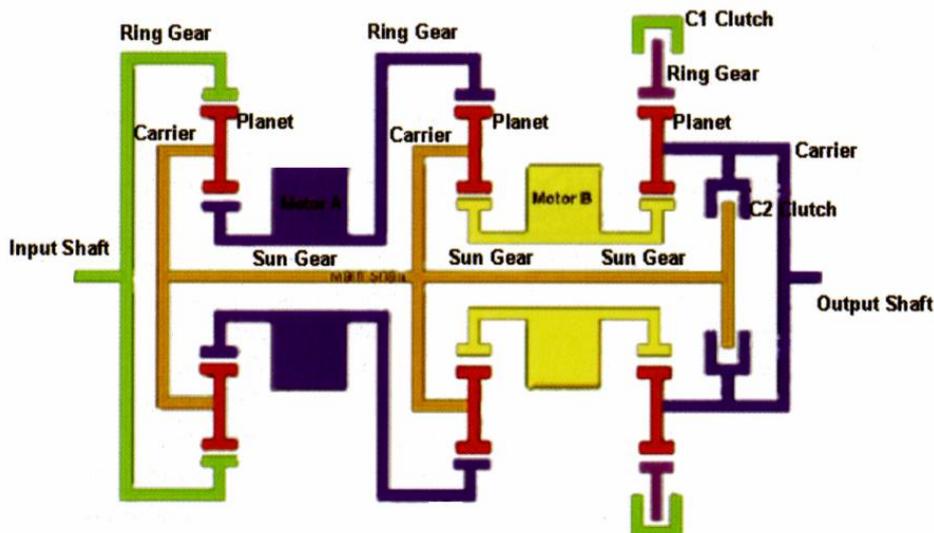


Abb. 30: Aufbau des Allison EP40 Getriebes [7] S.279

Er besteht aus 3 Planetensätzen, den 2 Elektromotoren und 2 Kupplungen. Beim Inputsplit Modus ist Kupplung C1 geschlossen und Kupplung C2 offen. Er weist eine hohe Übersetzung auf, und wird bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und hohen Beschleunigungen eingesetzt. Dabei arbeitet der Motor A als Generator und reagiert auf das Drehmoment der VKM. Motor B regelt die Ausgangsleistung des Getriebes. Der zweite Modus weist eine niedrigere Übersetzung auf und ist für höhere Fahrgeschwindigkeiten und geringere Lasten ausgelegt. Bei diesem Modus ist Kupplung C2 geschlossen und Kupplung C1 offen. Dies ergibt einen Verbund-Split-Modus bei dem Motor A als Motor und Motor B als Generator arbeitet. Quelle: [7]

Das *Ev-Drive* System bildet die Grundlage der 2-Mode-Getriebeentwicklung für PKW der *Global Hybrid Initiative* um GM. Das *Ev40* System ist vor allem für den Einsatz in Stadtbussen gedacht, die stärkere Variante *Ev50* kann in Gelenkbussen sowie im Regionalverkehr eingesetzt werden. Wobei die Stadtbussvariante die interessantere Anwendung ist, da der transiente Stadtzyklus die größten Verbrauchseinsparungen durch das Hybridsystem verspricht. Bei Verbrauchsmessungen im realen Stadtverkehr wurden mit diesem System Verbrauchseinsparungen von 20% bis 40% abhängig von Stadt und Route ermittelt [43]. Bei Chassis-Dynamometer Tests werden im selben Artikel für den Braunschweig-Zyklus Verbrauchseinsparungen von 27,6% auf 40,6 l/100km gegenüber einem Dieselbus (56,1 l/100km) angegeben.

6 Simulation eines seriellen Bushybrides

Betrachtet man nun den Stadtbus als Anwendung näher, so ergeben sich nach [7] 3 Hautanforderungen an den Antriebsstrang des Linienbusses. Diese sind „Betriebskosten“, „Fahrleistungen“ und „Umweltfreundlichkeit“. Der serielle Hybridantrieb stellt ein sehr interessantes Konzept dar, um einen Stadtbus zu entwickeln welcher diese Anforderungen optimal erfüllt. Da Stadtbusse sehr transient betrieben werden und insbesondere sehr häufige Haltestellenaufenthalte aufweisen, kann das gesamte Potential der Strategien Rekuperation und Start-Stopp ausgenutzt werden. Dies führt zu einem niedrigeren Kraftstoffverbrauch und damit zu niedrigen Betriebskosten. Des Weiteren hilft die Rekuperation, neben der Energieeinsparung, die Lebensdauer der Bremsbeläge zu erhöhen und den Wartungsaufwand zu reduzieren. Die Betriebskosteneinsparung sollte möglichst die Mehrkosten des Hybridfahrzeuges ausgleichen. Die Vorteile im Bereich der „Umweltfreundlichkeit“ des Fahrzeuges liegen aufgrund der niedrigeren Emissionen und des niedrigeren Kraftstoffverbrauches auf der Hand. Der „Leistungsbedarf“ stellt die Randbedingung dar, welche das Fahrzeug erfüllen muss und welche die Dimensionierung der Fahrzeugkomponenten bestimmt.

Bei der nachfolgenden Simulation werden fokussiert Leistungs- und Energiebedarf sowie der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges betrachtet, um Rückschlüsse auf die Eignung bestimmter Fahrzeugvarianten für den Stadtbus ziehen zu können. Bei der Auslegung des seriellen Hybridbusses ist vor allem auch die Wahl der VKM entscheidend. Daher wurden 3 verschiedene Dieselmotoren von *Steyr Motors (SMO)* modelliert und die Ergebnisse ausgewertet. Um Aussagen über das Verhalten gegenüber anderen Fahrzeugvarianten treffen zu können, wurde das Fahrzeug des Weiteren als dieselektrischer Antrieb und als Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang modelliert. Hierbei sind vor allem die Verbrauchsverbesserungen durch das Hybridsystem von Interesse. Weitere Untersuchungen befassen sich mit dem Potential von Rekuperation und Start-Stopp sowie mit den Wirkungsgraden der Komponenten.

6.1 Modellierung des Bushybriden

Die Modellierung des Busses erfolgte mit *Matlab-Simulink R2008b*, mittels *Simulink* Blöcken. Die meisten Fragen zur Modellierung mit *Matlab-Simulink* konnten über das „Hilfe-Menü“ beantwortet werden [44]. In Abb. 31 ist die oberste Ebene des Modells dargestellt. In ihm sind die einzelnen Subsysteme des Modells ersichtlich. Die einzelnen

Signale werden dabei in ein Bussystem zusammengefasst und von diesem wieder auf die einzelnen Blöcke aufgeteilt. Mittels eines m-Files werden die Daten des simulierten Fahrzeuges in das Modell eingelesen. Im Anhang 9.6 ist das m-File der Eingangsdaten des seriellen Hybridbusses mit dem Dieselmotor *SMO-M16TCA* ersichtlich. Der nachzufahrende Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeuges wird im Subsystem Fahrzyklus eingelesen. Der Block Fahrermodell gleicht die Sollwerte mit den Istwerten der Geschwindigkeit ab und berechnet die Fahr- und Bremspedalstellung. Die Betriebsstrategie berechnet daraus die Eingangsgrößen für die einzelnen Fahrzeugkomponenten, welche sich wiederum auf die Betriebsstrategie auswirken.

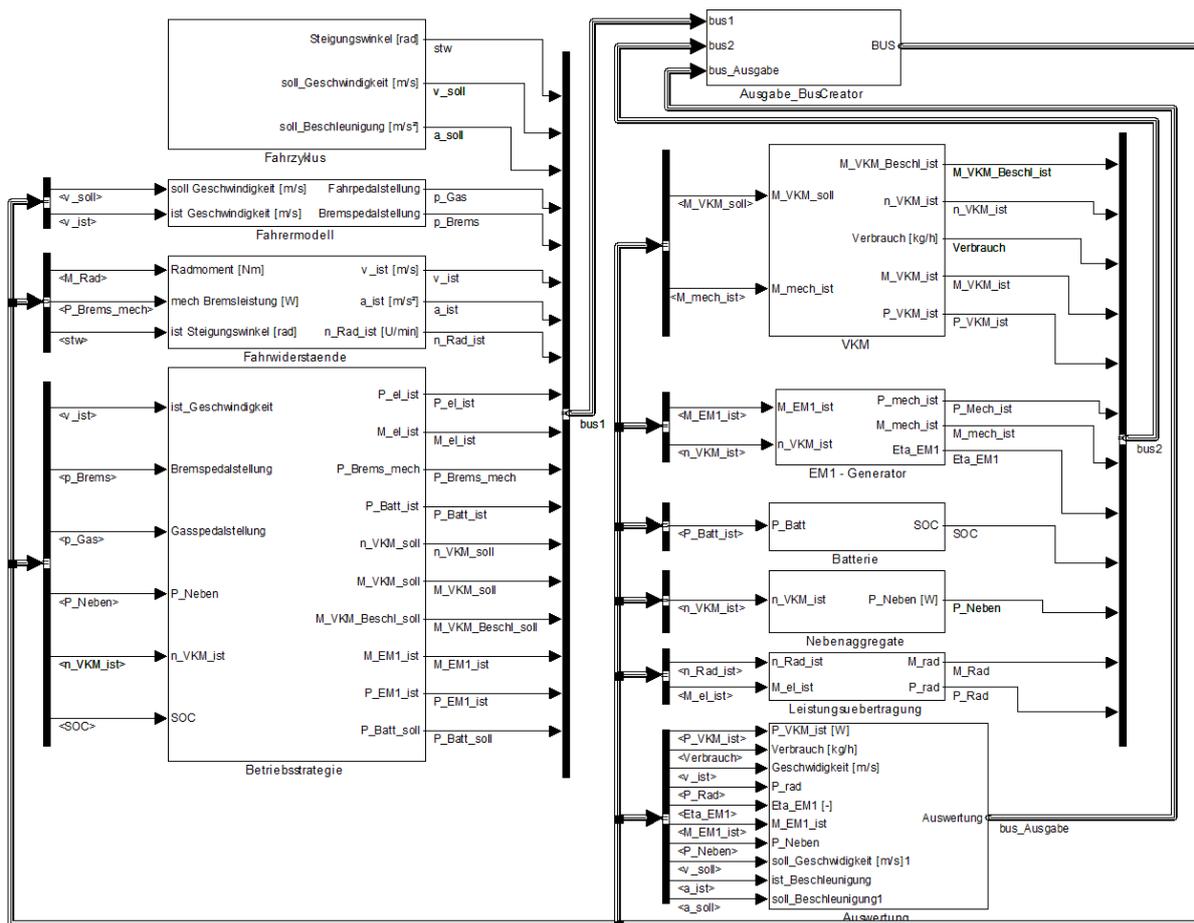


Abb. 31: Oberste Ebene des Simulationsmodells des Seriellen Hybridfahrzeuges

Die VKM wird vom Generator belastet, welcher die elektrische Leistung an die Nebenaggregate, die Batterie und die Leistungsübertragung abgibt. Über das Subsystem Leistungsübertragung, welche elektrische Übertragung, Traktionsmotor und Achsgetriebe beinhaltet, wird die Antriebsleistung auf das Rad übertragen. Im Block Fahrwiderstände wird die Leistungsabgabe an die Straße modelliert sowie die Ist-Geschwindigkeit und die Ist-Beschleunigung des Fahrzeuges berechnet. Die

Leistungsübertragung bezieht Leistung von der VKM und der Batterie und gibt bei Bremsenergieerückgewinnung Energie an die Batterie und die Nebenaggregate ab. In der Auswertung werden diverse Ausgangsgrößen wie Verbrauch und Gesamtwirkungsgrad ermittelt.

6.1.1 Fahrzeugmodell des Busses

Als Basis für das Simulationsmodell wurde der Oberleitungsbus *N6216* (Abb. 32) von *Viseon* vormals *Neoplan* gewählt. Im Anhang 9.1 ist ein Datenblatt dieses Oberleitungsbusses angefügt. Dieses Fahrzeug wurde simuliert, da *Steyr Motors* bereits mit *Viseon* zusammenarbeitet. So wurden zum Beispiel Gelenksbusse mit *SMO M16-TCA* Dieselmotoren in verschiedenen Varianten als dieselelektrischem Zusatzantrieb gebaut. Es ist zu beachten, dass der *Viseon*-Bus *N6216* mit dieselelektrischem Zusatzantrieb mit einer VKM mit 130 kW ausgestattet ist. Für die Simulation wurde jedoch der stärkere Motor mit 200 kW gewählt. Viele der im Modell verwendeten Daten beruhen auf Angaben von *Viseon* zu diesem Fahrzeug. Die nicht bekannten Größen wurden aufgrund der bekannten Daten abgeschätzt. Dazu gehören insbesondere die Trägheitsmomente und teilweise Annahmen zu den Wirkungsgraden.



Abb. 32: Oberleitungsbuss *N6216* von *Viseon* mit dieselelektrischem Zusatzantrieb

6.1.1.1 Fahrzeugdaten

In Tab. 7 sind die Fahrzeugdaten des seriellen Hybridbusses, welcher auf Basis des *Viseon* Busses modelliert wurde, dargestellt. Rollwiderstand und Luftwiderstand wurden nach [45] gewählt. Leergewicht und maximal zulässiges Gesamtgewicht beruhen auf Werten von *Viseon*, wurden aber für die jeweilige Simulationsvariante angepasst.

Für das Busmodell wurden Räder und Reifen von *Michelin* als Berechnungsgrundlage herangezogen. Der gewählte Reifen ist der Stadtbusreifen *X INCITY* mit den

Dimensionen 275/70 R22.5. Das gewählte Rad hat die Dimensionen 22.5x7.50-10. Die Trägheitsmomente von Rad und Reifen wurden aus diesen Daten überschlägig ermittelt (siehe Kapitel 6.1.2.7).

Tab. 7: Fahrzeugdaten des Seriellen Hybridbus

Fahrzeug	Serieller Hybridbus mit VKM M16 TCA
Leergewicht m_{Leer}	13970 kg
Maximal zulässiges Gesamtgewicht m_{Max}	20550 kg
Rollwiderstand f_R	0,01
Luftwiderstand c_W	0,7
Querspanntfläche A	8,21 m ²
belasteter Halbmesser des Rades r_{Rad}	0,452 m
Reifenmasse m_{Reifen}	60,8 kg
Radmasse m_{Rad}	38,5 kg

6.1.1.2 Leistungsbedarf und Fahrwiderstände

Der Leistungsbedarf stellt die Auslegungsgrundlage für den Antrieb des Bushybridens dar. Dieser setzt sich aus der benötigten Radleistung und der von den Nebenaggregaten bezogenen Leistung zusammen. Die Zugkraft, also die Summe der bezogenen Momente am Rad, die für einen bestimmten Fahrzustand benötigt wird ist die Summe der zu überwindenden Fahrwiderstände inklusive Beschleunigungswiderstand (7) (siehe [46]).

$$Z = \frac{M_R}{r} = F_R + F_L + F_{St} + F_B \quad \text{Zugkraft} \quad (7)$$

M_R Moment an der Antriebsachse

r_{Rad} belasteter Halbmesser des Rades

F_R Radwiderstand

F_L Luftwiderstand

F_{St} Steigungswiderstand

F_B Beschleunigungswiderstand

Unter Vernachlässigung des Schlupfes berechnet sich nun die Radleistung an den Antriebsrädern zu(8).

$$P_R = Z \cdot v \quad \text{Radleistung} \quad (8)$$

v Fahrgeschwindigkeit [m/s]

Der Radwiderstand des einzelnen Rades besteht vor allem aus dem Rollwiderstand. Er kann vereinfacht nach (9) berechnet werden.

$$F_R = f_R G \cos \alpha \quad (9)$$

f_R Rollwiderstandsbeiwert [-]

G Fahrzeuggewicht [N]

α Steigungswinkel [rad]

Die entgegen der Fahrtrichtung wirkenden Strömungsverluste entlang der Fahrzeuglängsachse ergeben den Luftwiderstand (10).

$$F_L = c_w A \frac{\rho}{2} v^2 \quad (10)$$

c_w Luftwiderstandsbeiwert [-]

A Querspanfläche [m²]

$\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ Luftdichte

Der Steigungswiderstand berechnet sich nach (11).

$$F_S = G \sin \alpha \quad (11)$$

Daraus ergibt sich der Leistungsbedarf des Bushybriden für Konstantfahrt ohne Berücksichtigung der Nebenaggregate (Abb. 33).

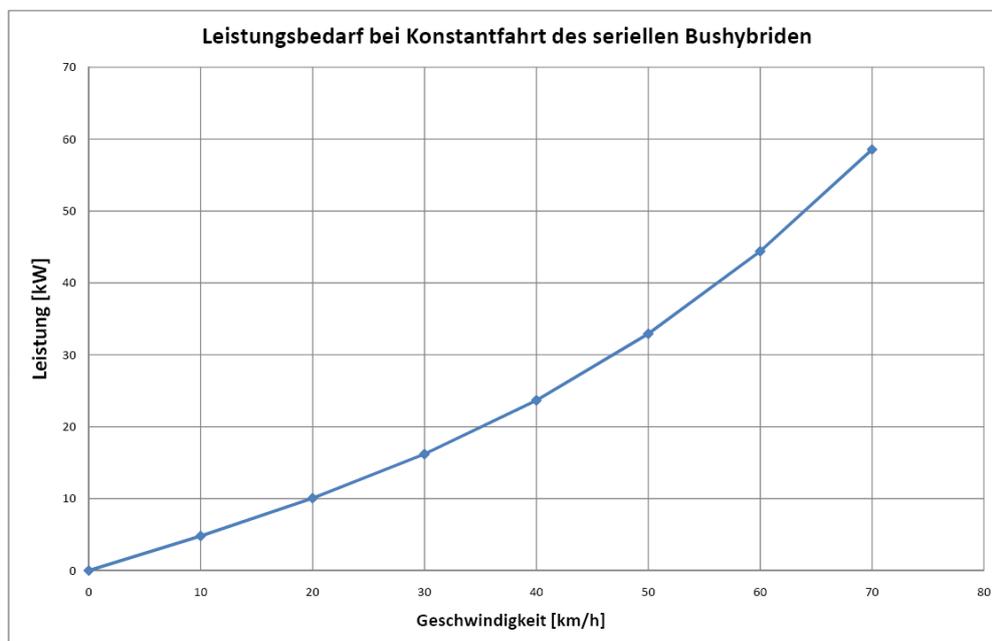


Abb. 33: Leistungsbedarf bei Konstantfahrt des seriellen Bushybridfahrzeuges

Bei der Beschleunigung des Fahrzeuges muss die Trägheit der einzelnen Massen überwunden werden. Das bedeutet, dass die gesamte Fahrzeugmasse translatorisch und alle drehenden Teile rotatorisch beschleunigt werden müssen (Abb. 34). Die Beschleunigungskraft berechnet sich nach (12).

$$F_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{R,j}}{r_j^2} \right) \cdot \ddot{x} \quad \text{Beschleunigungskraft} \quad (12)$$

m Fahrzeugmasse [kg]

$J_{R,j}$ reduziertes Massenträgheitsmoment der rotierenden Masse j [kg/m²]

$r_j = r_{Rad}$ belasteter Halbmesser des Rades [m]

\ddot{x} Fahrzeugbeschleunigung [m/s²]

Wobei sich das reduzierte Massenträgheitsmoment nach (13) berechnet.

$$J_{R,j} = i_j^2 \cdot J_j \quad \text{reduziertes Massenträgheitsmoment} \quad (13)$$

i_j Übersetzungsverhältnis zwischen rotierender Masse j und Rad

J_j Massenträgheitsmoment der rotierenden Masse j .

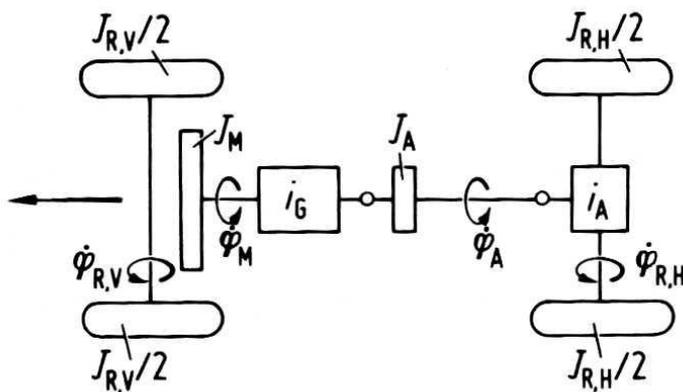


Abb. 34: Die zu berücksichtigenden rotierenden Massen

Die Ermittlung der drehenden Massen und ihrer Winkelgeschwindigkeiten gestaltet sich schwierig, da hier der gesamte Antriebsstrang berücksichtigt werden muss. Vor allem die Trägheitsmomente sind oftmals nicht bekannt. Diese werden in den Kapiteln 6.1.2.7 und 6.1.3.2 teilweise nach Annahmen ermittelt.

Die Modellierung der Fahrwiderstände erfolgte im Modell in einem eigenen Subsystem, in welchem nach der Formel (14) die Ist-Fahrzeugbeschleunigung berechnet wird. Daraus wird durch Integration die Ist-Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt.

$$\ddot{x}_{ist} = \frac{M_R - F_R + F_L + F_{St}}{r \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{R,j}}{r_j^2} \right)} \quad \text{Ist-Fahrzeugbeschleunigung} \quad (14)$$

6.1.1.3 Fahrzyklus und Energiebedarf

Die Eingangsgröße eines Fahrzeugmodells ist meist ein Fahrzyklus, welcher eine charakteristische Anwendung des Fahrzeuges wiedergibt. Da das Modell nur die Längsdynamik des Fahrzeuges, also die Fahrwiderstände berücksichtigt, sind Daten zur Querdynamik nicht notwendig. Diese Vorgehensweise ist auch bei der Bestimmung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch mittels NEDC oder ETC üblich. Für die Simulation des Bushybriden wurde der Braunschweig-Zyklus gewählt. Dieser ist ein speziell für Stadtbusse entwickelter Fahrzyklus, mit den Ausgangsgrößen Zeit in s, Geschwindigkeit in km/h sowie Beschleunigung in m/s². Steigungen sind beim Braunschweigzyklus nicht dargestellt, wurden aber ebenfalls modelliert, um die Simulation von aufwändigeren Zyklen mit dem Hybridmodell zu ermöglichen. In Abb. 35 ist der Geschwindigkeitsverlauf des Braunschweigzyklus dargestellt.

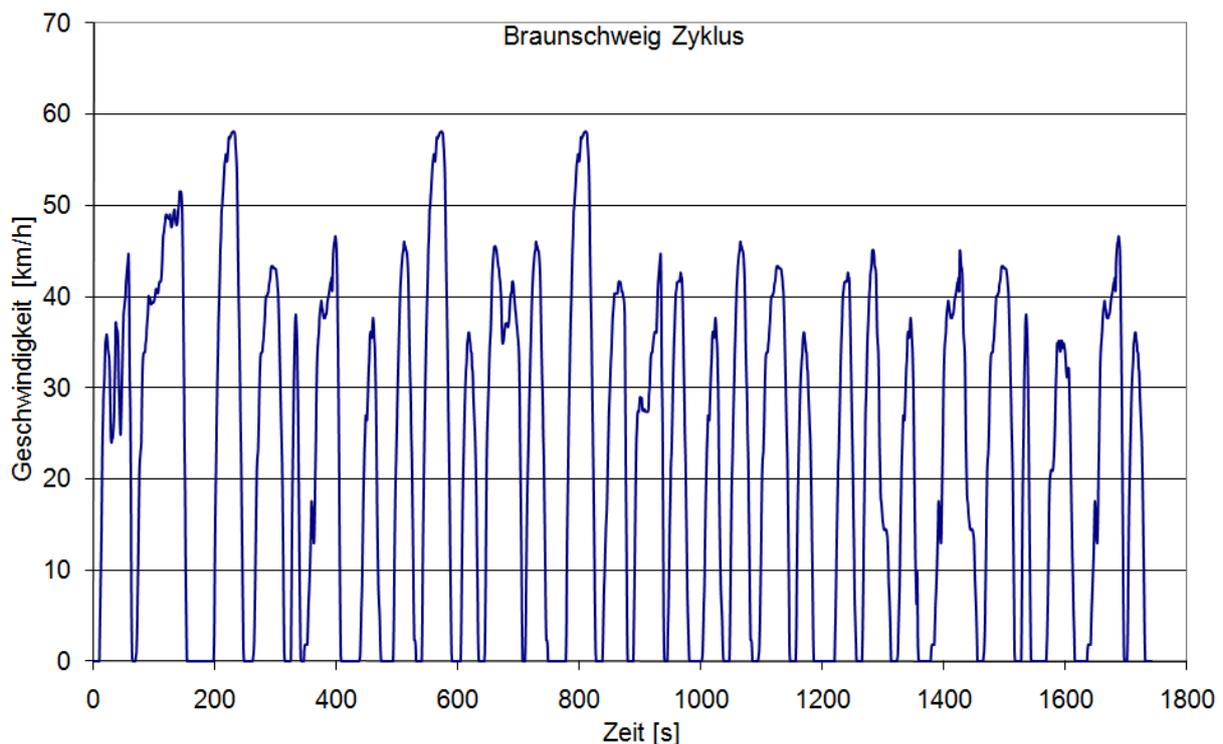


Abb. 35: Braunschweig Fahrzyklus

Aus Tab. 8 sind einige Kenndaten des Braunschweigzyklus ersichtlich.

Tab. 8: Daten des Braunschweigzyklus

Fahrzyklus	Braunschweigzyklus
Zyklusdauer	1740 s
Stillstanddauer	441 s
Fahrdauer	1299 s
Gefahrene Strecke	10,87 km
Mittlere Geschwindigkeit über der Strecke	30,13 km/h
Mittlere Geschwindigkeit über der Zeit	22,50 km/h
Anzahl der Stopps	29

Aus den Fahrwiderständen lassen sich der theoretische Gesamtenergiebedarf und die theoretische Durchschnittsleistung des Braunschweigzyklus ermitteln. Diese sind in Tab. 9 dargestellt.

Tab. 9: Energie- und Leistungsbedarf des Braunschweigzyklus

	Energiebedarf	Durchschnittsleistung
Braunschweigzyklus	$5,14 \cdot 10^7$ J	29,4 kW
Nebenaggregate	$3,48 \cdot 10^7$ J	20 kW
Gesamtbedarf des Busses	$8,60 \cdot 10^7$ J	49,4 kW
VKM - Bedarf	$14,33 \cdot 10^7$ J	82,3 kW

Daraus ergibt sich ohne Berücksichtigung des Antriebsstrangwirkungsgrades und ohne Berücksichtigung der Rekuperation ein Gesamtenergiebedarf von $8,60 \cdot 10^7$ J und eine Durchschnittsleistung von 49,4 kW. Alleine 20 kW der Leistung werden von den Nebenaggregaten verbraucht. Diese sind in Kapitel 6.1.2.4 näher beschrieben. Nimmt man nun für ein serielles Hybridfahrzeug einen Wirkungsgrad des Antriebsstranges von 60% an, so muss der Motor $14,33 \cdot 10^7$ J Energie und eine Durchschnittsleistung von 82,3 kW liefern.

6.1.2 Komponenten von seriellem Hybrid und dieselektrischem Antrieb

Nachfolgend sind die einzelnen Komponenten des seriellen Hybridantriebes und des dieselektrischen Antriebes beschrieben. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass der dieselektrische Antrieb, bis auf das Fehlen der Batterie, als baugleich wie der serielle Hybrid modelliert wurde.

6.1.2.1 Verbrennungskraftmaschine

Die VKM bildet das Antriebsaggregat des Seriellen Hybridmodells. Bei meinen Untersuchungen wurden 3 Dieselmotoren von *Steyr Motors* miteinander verglichen. Diese sind die 6-Zylinder Motoren *SMO M16TCA*, *SMO M16SCI* sowie der 4-Zylinder Motor *MO174V40*. Datenblätter und Wirkungsgraddiagramme der Motoren sind im Anhang 9.2 dargestellt. In den Wirkungsgraddiagrammen sind auch die Bestpunktlinien der Betriebsstrategie dargestellt. Der *SMO M16TCA* Motor ist ein speziell für dieselelektrische Antriebe konzipiertes Aggregat, welches auch in *Viseon* Oberleitungsbussen mit dieselelektrischem Zusatzantrieb eingesetzt wird. Dieser Motor erfüllt die Euro 3 Abgasgesetzgebung. Das Nachfolgemodell dieses Motors ist der *SMO M16SCI*, welcher höhere Momente liefert, jedoch einen niedrigeren Wirkungsgrad aufweist. Der Motor *MO174V40* ist eigentlich ein Bootsmotor, welcher jedoch hier zur Berücksichtigung eines leistungsschwächeren aber leichteren 4-Zylindermotors gewählt wurde. Dieser Motor hat ebenfalls den Nachteil niedrigerer Wirkungsgrade und liefert daher höhere Verbrauchswerte. Das Modell der VKM ist in Abb. 36 dargestellt.

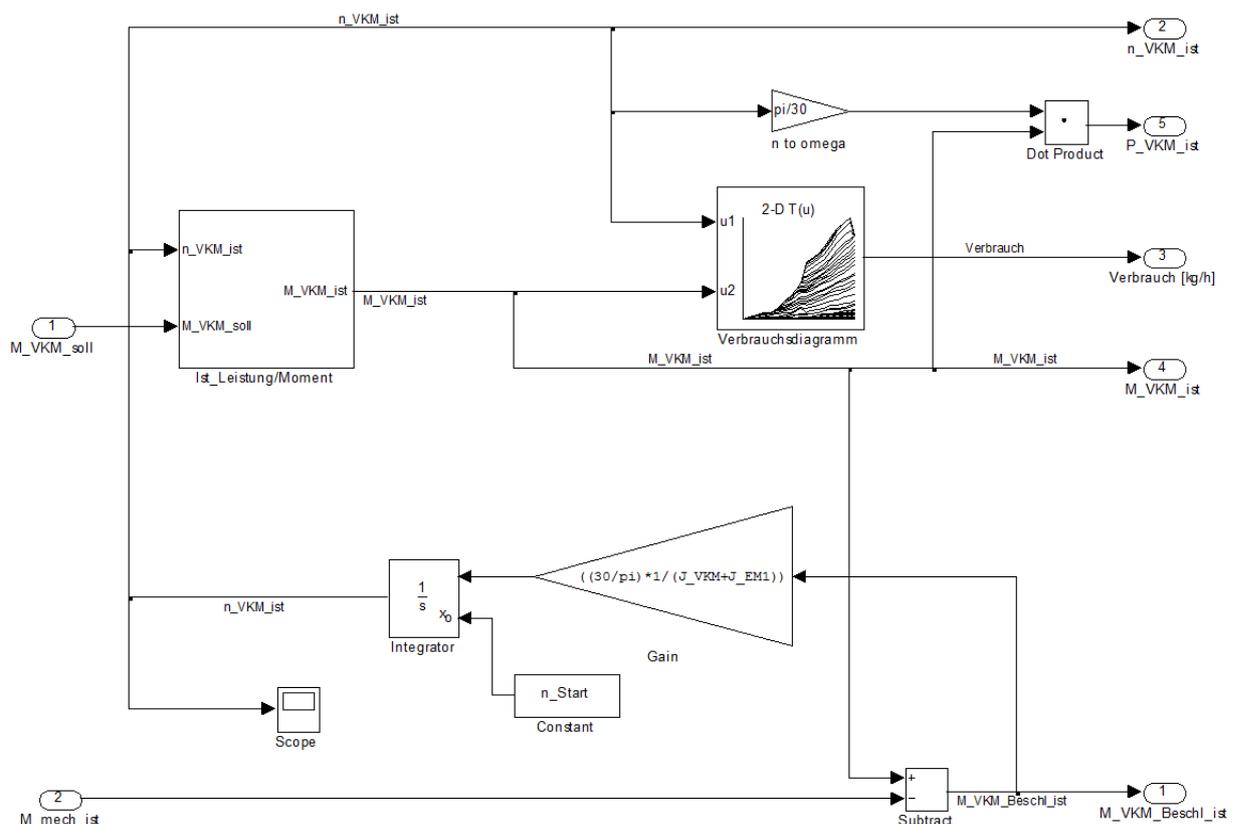


Abb. 36: VKM Matlab-Modell

Die Eingangsgrößen des VKM-Modells sind M_{VKM_soll} und M_{mech_ist} . M_{VKM_soll} beschreibt das Moment, welches durch die Verbrennung des Dieselmotors erzeugt werden soll. M_{mech_ist} ist die mechanische Leistung welche an den Generator abgegeben wird. Aus M_{VKM_soll} wird zuerst das Ist-Moment der VKM ermittelt. Dieses wird im Modell durch die statische Vollastkennlinie und das Reibmoment der VKM beschränkt. Das für die Beschleunigung der VKM zur Verfügung stehende Moment ermittelt sich zu (15).

$$M_{VKM_{Besch_ist}} = M_{VKM_{ist}} - M_{mech_{ist}} \quad \text{Ist-Beschleunigungsmoment} \quad (15)$$

Und daraus ergibt sich unter Berücksichtigung des Trägheitsmomentes von VKM und Generator die Drehzahl der VKM (16).

$$n_{VKM_{ist}} = n_{start} + \int_0^t \frac{30}{\pi \cdot (J_{VKM} + J_{EM1})} \cdot M_{VKM_{Besch_ist}} dt \quad \text{VKM Ist-Drehzahl} \quad (16)$$

n_{start} Drehzahl bei Simulationsstart

J_{VKM} Trägheitsmoment der rotierenden VKM-Teile

J_{EM1} Trägheitsmoment des Generator-Rotors

Aus Ist-Drehzahl und Ist-Moment der VKM wird im VKM-Modell noch der Kraftstoffverbrauch in kg/h ermittelt, welcher zur Verbrauchs- und Wirkungsgradberechnung benötigt wird.

6.1.2.2 Generator

Der Generator wurde als permanenterregte Synchronmaschine ausgelegt. Bei der Modellierung wird der Umrichter direkt beim Generator berücksichtigt.

Für die VKM-Varianten *M16 TCA* und *MO174V40* weist der Generator folgende Daten auf (Tab. 10).

Tab. 10: Daten des Generators für die Varianten M16 TCA und MO174V40

Generator	permanenterregte Synchronmaschine
Nennleistung P_{max}	205 kW
Nennspannung U_{Nenn}	750 V
Nenn- od. bewertete Drehzahl n_{bew}	3559 U/min
Maximaldrehzahl n_{max}	4200 U/min
Maximalmoment M_{max}	550 Nm
Generatormasse m_{EM1}	80 kg

Für die Variante *M16 SCI* ist ein etwas stärkerer Generator mit den folgenden Daten notwendig (Tab. 11).

Tab. 11: Daten des Generators für die Variante M16 SCI

Generator	permanentterregte Synchronmaschine
Nennleistung P_{\max}	234,6 kW
Nennspannung U_{Nenn}	750 V
Nenn- od. bewertete Drehzahl n_{bew}	3200 U/min
Maximaldrehzahl n_{\max}	4200 U/min
Maximalmoment M_{\max}	700 Nm
Generatormasse m_{EM1}	88 kg

Im Anhang 9.3 sind die Wirkungsgradkennfelder dieser beiden Generatorvarianten dargestellt. In Abb. 37 ist das *Matlab* Modell des Generators abgebildet. Dieses besteht aus einem 2-D Lookup-Table mit den Eingangsgrößen $n_{\text{VKM_ist}}$ und $M_{\text{EM1_ist}}$. $n_{\text{VKM_ist}}$ stellt die Ist-Drehzahl der VKM und $M_{\text{EM1_ist}}$ ein virtuelles, vom Generator abgegebenes, elektrisches Moment dar.

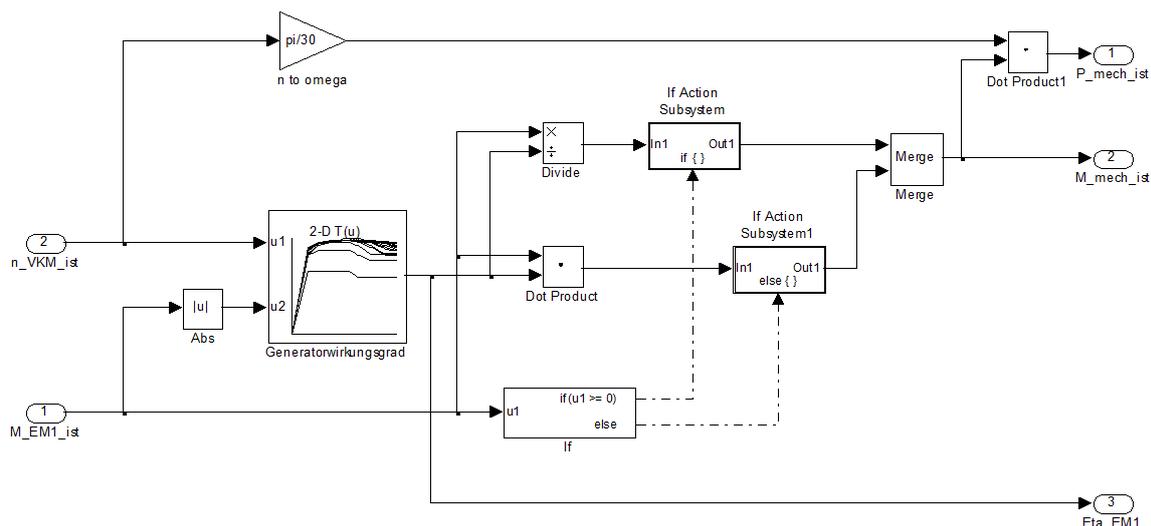


Abb. 37: Generator: Matlab-Modell

Aus diesen Größen ergibt sich die Generatorleistung zu (17):

$$P_{EM1_{ist}} = M_{EM1_{ist}} \cdot n_{VKM_{ist}} \cdot \frac{\pi}{30} \quad \text{elektrische Generatorleistung} \quad (17)$$

Das elektrische Generatormoment $M_{\text{EM1_ist}}$ vereinfacht die Modellierung wesentlich, da die elektrischen Größen Strom und Spannung im Modell nicht dargestellt wurden. Bei

einer Modellierung der Eingangsgröße als Leistung würden sich undefinierte Werte bei Stillstand der VKM ergeben. Zu beachten ist beim Generatormodell, dass bei Generatorbetrieb der Zusammenhang (18) gilt:

$$M_{mech_{ist}} = \frac{M_{EM1_{ist}}}{\eta_{EM1}} \quad \text{mechanisch abgegebene Leistung der VKM} \quad (18)$$

Bei Motorbetrieb gilt jedoch (19):

$$M_{mech_{ist}} = M_{EM1_{ist}} \cdot \eta_{EM1} \quad \text{mechanisch abgegebene Leistung der VKM} \quad (19)$$

6.1.2.3 Batterie

Als Batterie wurde ein Li-Ionen Akkumulator mit 26,4 kWh Energieinhalt und 200 kW Leistung ausgewählt. Als Basis für die Abschätzung des benötigten Energieinhaltes wurden die Daten von verschiedenen seriellen Hybridbussen verglichen. So werden bei *MAN* und *BAE* Lade- und Entladeleistungen von ca. 200kW erreicht. Die Werte des Energieinhaltes variieren in einem weiten Bereich und liegen zwischen 12 kWh bei *MAN* und über 30 kWh bei *BAE*. Dies ist vor allem aufgrund der geforderten Lebensdauer zu erklären. Pro Braunschweigzyklus mit 10,87 km Länge werden ca. 8 Batteriezyklen benötigt. Daraus ergibt sich für eine Lebensdauer der Batterie von 700.000 km eine benötigte Zyklenlebensdauer von 520.000 Zyklen. Um solch hohe Zyklenzahlen der Batterie zu erreichen, darf sich der Ladezustand der Batterie im Betrieb nur in einem Bereich von ca. 5% des SOC erstrecken ([47] Bild 8). Der Wirkungsgrad der Batterie wurde mit 95% angenommen. Die Modellierung der Batterie erfolgte nur auf der Leistungs- und Energieebene. Der elektrische Kreis wird nicht simuliert.

Der Ladezustand SOC der Batterie ergibt sich zu (20):

$$SOC = SOC_{init} + \frac{\int \eta_{Batt} \cdot P_{Batt} dt}{E_{max}} \quad \text{Ladezustand} \quad (20)$$

SOC_{init} Initialwert des Ladezustandes

$\eta_{Batt} = 1$ Batteriewirkungsgrad beim Laden

$\eta_{Batt} = 0,95$ Batteriewirkungsgrad beim Entladen

P_{Batt} Lade-/Entladeleistung der Batterie

E_{max} maximaler Energieinhalt der Batterie

Dabei ist zu beachten, dass der Wirkungsgrad der Batterie beim Entladen berücksichtigt wird. Somit wird der Wirkungsgrad beim Laden mit 1 angenommen.

6.1.2.4 Nebenaggregate

Die Leistungen der Nebenaggregate wurden basierend auf [7] S.24 und Angaben von SMO angenommen. Dabei muss zwischen Leistungsbedarf bei abgeschalteter VKM und laufender VKM unterschieden werden. In Tab. 12 sind die verschiedenen Nebenaggregate und deren Leistungsanforderung angegeben. Der Verbrauch der Nebenaggregate bei laufender VKM ist mit 20kW, jener bei abgestellter VKM ist mit 8kW angenommen. Es wird des Weiteren angenommen, dass alle Nebenaggregate elektrisch betrieben werden. Dies erhöht den Leistungsbedarf für die Nebenaggregate aufgrund des Generatorwirkungsgrades.

Tab. 12: Leistungsbedarf der Nebenaggregate

Aggregat	VKM gestoppt	VKM läuft
el. Nebenverbraucher	4 kW	8 kW
Elektroantrieb –		1 kW
Klimakompressor	3 kW	3 kW
Leistungselektronik – Lüfterdaten / Umwälzpumpe		1 kW
Hydraulikpumpe Lenkung VA	1 kW	1 kW
Luftpresser		6 kW
Summe	8 kW	20 kW

6.1.2.5 Traktionsmotor

Der modellierte Traktionsmotor beruht auf der Asynchronmaschine *7ML 3550 K/4* von *Skoda*. Die technischen Daten dieses Motors sind in Tab. 13 dargestellt.

Tab. 13: Daten der Asynchronmaschine *7ML 3550 K/4*

Motor: Asynchronmaschine	<i>Skoda 7ML 3550 K/4</i>
Nennleistung P_{\max}	210 kW
Nennspannung U_{Nenn}	420 V
Nenn-Phasenstrom I_{Nenn}	351 A
Nenn- od. bewertete Drehzahl n_{bew}	1477 U/min
Maximaldrehzahl n_{\max}	4225 U/min
Maximalmoment bei Nennwerten M_{\max}	1358 Nm
Motormasse m_{EM2}	590 kg

Es wurde auch ein Wirkungsgradkennfeld für den Traktionsmotor erstellt. Dieses beruht jedoch auf Annahmen und nicht auf Daten von Skoda. Es ist im Anhang 9.4 dargestellt.

Die Modellierung des Traktionsmotors erfolgte gleich wie jene des Generators. Die Eingangsgrößen sind ein virtuelles elektrisches Generatormoment $M_{EM2_el_ist}$ und die Raddrehzahl. Die Motordrehzahl ermittelt sich zu (21).

$$n_{EM2_ist} = n_{Rad_ist} \cdot i_{Ges} \quad \text{Motordrehzahl [U/min]} \quad (21)$$

n_{Rad_ist} Raddrehzahl [U/min]

i_{Ges} Gesamtübersetzung zwischen Rad und Motor [-]

Der Wirkungsgrad führt beim Traktionsmotor zu einer Verminderung der an das Rad abgegebenen und der durch Rekuperation aufgenommenen Leistung.

6.1.2.6 Achsgetriebe und Reduktionsgetriebe

Zwischen Traktionsmotor und Rad sind ein Reduktionsgetriebe und das Achsgetriebe angeordnet. Diese bewirken eine Übersetzung zwischen Motor und Rad. Des Weiteren sind sie wirkungsgradbehaftet. Die Übersetzungen von Reduktions- und Achsgetriebe sind:

$$i_{Red} = 1,85 \quad \text{Übersetzung des Reduktionsgetriebes}$$

$$i_{Achs} = 5,74 \quad \text{Übersetzung des Achsgetriebes}$$

Die Gesamtübersetzung ergibt sich zu (22).

$$i_{Ges} = i_{Red} \cdot i_{Achs} = 10,619 \quad \text{Gesamtübersetzung} \quad (22)$$

Der Wirkungsgrad des Achsgetriebes beträgt $\eta_{Achs} = 0,855$.

Die Trägheitsmomente der Getriebe wurden nicht gesondert berücksichtigt.

6.1.2.7 Trägheitsmoment

Die Trägheitsmomente der rotierenden Teile müssen beim seriellen Hybrid am Antrieb und am Abtrieb berücksichtigt werden. Das Trägheitsmoment der Ladegruppe (VKM + Generator), also des Antriebes, muss direkt bei der VKM als Beschleunigungswiderstand der VKM berücksichtigt werden. Das reduzierte Trägheitsmoment des Abtriebes setzt sich aus den Einzelmomenten von Traktionsmotor, Kardanwelle, Achsgetriebe, Achse sowie Räder und Reifen zusammen. Das reduzierte Trägheitsmoment am Rad berechnet sich zu (23).

$$J_{R,j} = i_j^2 \cdot J_j \quad \text{reduziertes Massenträgheitsmoment am Rad [kgm²]} \quad (23)$$

$$i_j \quad \text{Übersetzungsverhältnis zwischen rotierender Masse j und Rad}$$

$$J_j \quad \text{Massenträgheitsmoment der rotierenden Masse j.}$$

In Tab. 14 wird das Trägheitsmoment des Abtriebes für den seriellen Hybrid und den dieselektrischen Antrieb ermittelt. Daraus ergibt sich ein Drehmassenzuschlag von 11% zur Fahrzeugmasse bei der Ermittlung der Beschleunigungskraft.

Tab. 14: Trägheitsmomente am Abtrieb des seriellen Hybrid

	Trägheitsmoment	Übersetzung	reduziertes Trägheitsmoment.
	[kgm ²]	[-]	[kgm ²]
Generator	3,12	10,62	352,03
Kardanwelle	0,31	5,74	10,32
Hinterachse	0,78	1	0,78
4 Räder	2,16	1	2,16
4 Reifen	24,84	1	24,84
Ges. Trägheitsmoment [kgm ²]			395,28
reduzierte Masse [kg]			1909,54
Drehmassenzuschlagsfaktor [-]			1,11

6.1.3 Komponenten des konventionellen Antriebes

Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Hybridvarianten und einem konventionellen Antrieb zu ermöglichen, wurde auch ein konventioneller Antrieb des Busses modelliert. Dafür wurden der *M16SCI* und der *M16TCA* Dieselmotor gewählt. Der elektrische Teil entfällt beim konventionellen Antrieb gänzlich und die Leistung der Nebenaggregate wird rein mechanisch erzeugt.

6.1.3.1 Schaltgetriebe und Achsgetriebe

Für das Schaltgetriebe wurde das 6-Gang Automatgetriebe *HP 502 C* von *ZF* angenommen. Die Daten wurden aus dem Datenblatt im Anhang 9.7 entnommen. In Tab. 15 ist die Übersetzung der einzelnen Gänge und des Achsgetriebes angeführt. Die Gesamtübersetzung ergibt sich zu (24).

$$i_{Ges} = i_x \cdot i_{Achs} \quad \text{Gesamtübersetzung} \quad (24)$$

i_x Übersetzung des Ganges x

i_{Achs} Achsübersetzung

Tab. 15: Übersetzung des 6-Gang Getriebes

Gang	1	2	3	4	5	6	Achsgetriebe
Übersetzung	3,43	2,01	1,42	1	0,83	0,59	9,21
Gesamtübersetzung	31,59	18,51	13,08	9,21	7,64	5,43	-

Weitere Daten des Getriebes sind in Tab. 16 dargestellt, wobei die Massenträgheitsmomente und der Wirkungsgrad angenommen wurden.

Tab. 16: Daten des Automatikgetriebes

Schaltgetriebedaten	Automatikgetriebe
Getriebemasse m_{Get}	355 kg
MTR an der Antriebswelle $J_{\text{Get,Ein}}$	0,9 kgm ²
MTR an der Abtriebswelle $J_{\text{Get,Aus}}$	0,788 kgm ²
Getriebewirkungsgrad	0,9

Für die Gangwahl wurde eine relativ einfach Schaltstrategie modelliert. Dabei wird der Gang nur abhängig von der Fahrgeschwindigkeit gewählt (Tab. 17).

Tab. 17: Schaltstrategie des Getriebes für den M16 SCI Dieselmotor

Gang	1	2	3	4	5	6
Geschwindigkeit [km/h]	0 - 14,7	14,7 - 20,8	20,8 - 29,6	29,6 - 35,7	35,7 - 50,2	50,2 - 62,7

Für das Schaltgetriebe wurde ein Wirkungsgrad von $\eta_{\text{Get}} = 0,9$ angenommen.

Der Achsgetriebewirkungsgrad ist wie beim Hybridbus $\eta_{\text{Achs}} = 0,855$.

6.1.3.2 Trägheitsmomente

In Tab. 18 sind die Trägheitsmomente des Antriebsstranges dargestellt. Reduziert auf das Rad ergeben sich für die einzelnen Gänge die angeführten reduzierten Trägheitsmomente, sowie das auf das Rad bezogenen Gesamtträgheitsmoment und die reduzierten Massen. Daraus ergibt sich ein maximaler Drehmassenzuschlagsfaktor von $\lambda = 1,37$ welcher sehr gut mit Literaturangaben übereinstimmt [48].

Tab. 18: Trägheitsmomente des konventionellen Antriebsstranges

Gang	Trägheitsm.	i_{Ges}	reduziertes Trägheitsmoment [kgm ²]					
			1	2	3	4	5	6
VKM	0,242	$i_x \cdot i_{\text{Achs}}$	241,90	83,07	41,46	20,56	14,16	7,16
Getriebeeingang	0,900	$i_x \cdot i_{\text{Achs}}$	898,15	308,43	153,94	76,34	52,59	26,57
Getriebeausgang	0,788	i_{Achs}	66,80	66,80	66,80	66,80	66,80	66,80
Kardanwelle 2m	0,626	i_{Achs}	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11
Hinterachse 2,5m	0,783	1	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
4 Räd	2,160	1	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
4 Reifen	24,843	1	24,84	24,84	24,84	24,84	24,84	24,84
Ges. Trägheitsm.			1287,8	539,2	343,1	244,6	214,5	181,4
reduzierte Masse [kg]			6303,1	2639,2	1679,3	1197,2	1049,7	888,0
Drehmassenzuschlag			1,376	1,157	1,100	1,071	1,063	1,053

6.1.4 Fahrermodell

In Abb. 38 ist der geschlossene Regelkreis des Hybridmodells mit dem Fahrer als Regler schematisch dargestellt. Der Fahrer wurde als realer PID-Regler mit der Soll-Geschwindigkeit v_{soll} des Fahrzeuges als Sollwert und der Ist-Geschwindigkeit v_{ist} als Istwert modelliert.

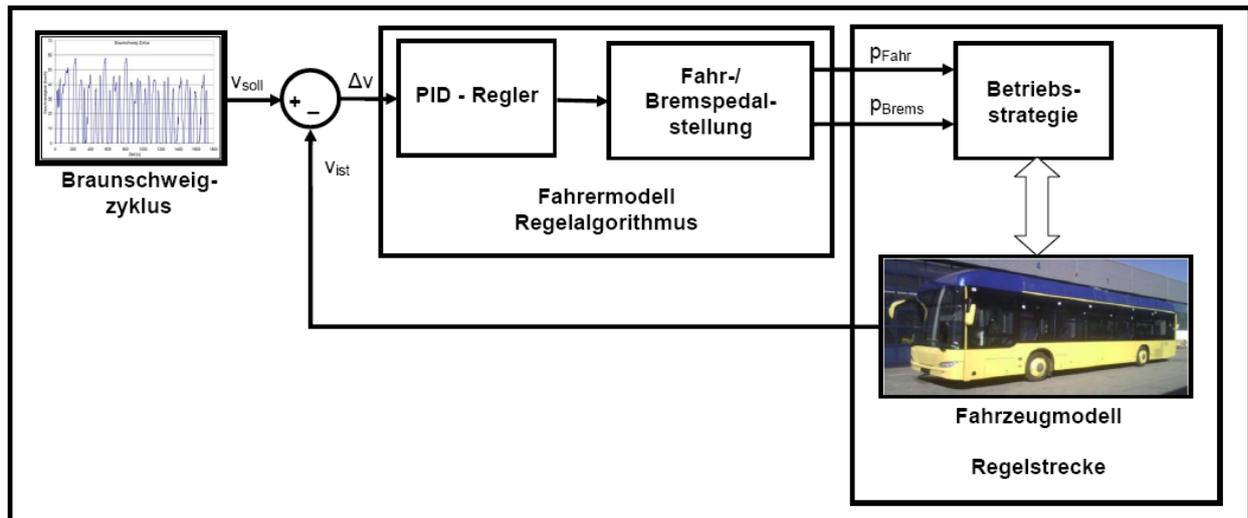


Abb. 38: Der Fahrer als Regler im geschlossenen Regelkreis

Die Ausgangsgröße des Fahrerreglers wird in die Fahr- und Bremspedalstellung umgesetzt. Wobei negative Werte die Bremspedalstellung beschreiben und positive die Fahrpedalstellung. Beide Größen sind mit 1 als Maximalwert beschränkt. Die Fahrpedalstellung wird in der Betriebsstrategie mit dem maximalen Moment des Traktionsmotors $M_{\text{max_EM2}}$ multipliziert und die Bremspedalstellung mit der maximalen Bremskraft des Fahrzeuges $F_{\text{Brems_max}}$. Dadurch werden die technischen Grenzen des Antriebs und des Bremssystems ausgedrückt. Die Regelstrecke des Fahrers besteht aus der Betriebsstrategie, welche die Leistungen zwischen VKM, Batterie, Abtrieb und Nebenaggregaten aufteilt sowie den Fahrzeugkomponenten selbst. Daher ist die Regelstrecke nichtlinear und unstetig und eine rechnerische Auslegung der Regelgrößen nicht möglich. Somit wurden die Regelgrößen experimentell für die einzelnen Modellvarianten bestimmt und der D-Anteil meist gänzlich vernachlässigt. Beim Seriellen Hybrid mit der VKM *SMO M16 TCA* sind die Werte des Reglers: $K_P = 0.4$, $K_I = 0.03$, $K_D = 0.005$ und $T_D = 0.01$. Die Übertragungsfunktion des PID Reglers ist in (25) dargestellt.

$$G_R = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D}{1+T_D s} s \quad \text{Übertragungsfunktion des realen PID-Reglers} \quad (25)$$

6.1.5 Betriebsstrategie

In Abb. 39 ist ein Überblick über die Modellierung der Betriebsstrategie abgebildet. Dabei sind die wichtigsten Subsysteme das System Betriebsarten und VKM-Steuerung. Auf diese wird in der Folge noch näher eingegangen.

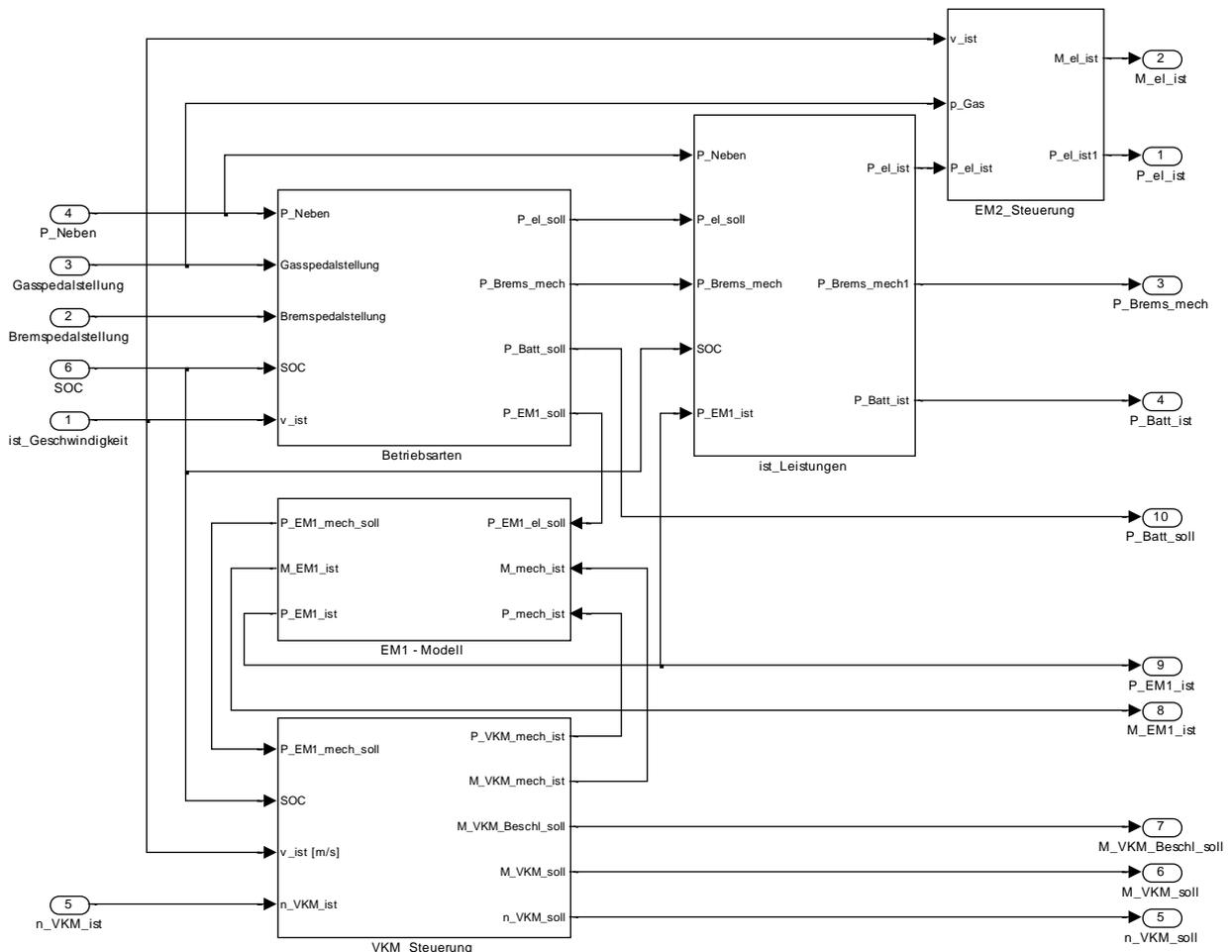


Abb. 39: Betriebsstrategie des Seriellen Bushybridfahrzeuges

Im System Betriebsarten ist die eigentliche Betriebsstrategie des Hybridantriebs hinterlegt. Hier wird die Leistung zwischen VKM, Batterie, Nebenaggregaten und Abtrieb aufgeteilt. Die VKM-Steuerung übernimmt die Regelung der VKM für eine bestimmte Leistungsanforderung. Der Block EM1-Modell stellt ein Wirkungsgradmodell des Generators dar, welches notwendig ist, um die benötigten Leistungen der VKM zu ermitteln. Das System Ist-Leistungen bestimmt schlussendlich die tatsächlichen elektrischen Leistungen, welche von Generator, Batterie oder Rekuperation geliefert werden und an die Verbraucher abgegeben werden. Hierbei ist zu beachten, dass diese Werte im Modell tatsächlich Ist Werte darstellen, welche die Erzeuger liefern müssen. Wird zum Beispiel von der VKM eine zu niedrige Leistung erzeugt, führt dies zum

Abbremsen der VKM. Es wird jedoch auch in der Betriebsstrategie überprüft, ob die Aggregate die geforderte Leistung liefern, beziehungsweise aufnehmen können.

Für die Simulation des seriellen Hybridfahrzeuges wurden die zwei Strategien „Trajektorienbetrieb“ und „ON-OFF Betrieb“ modelliert und simuliert. Diese sind jeweils im Subsystem Betriebsarten modelliert und in Kapitel 6.1.5.1 und 6.1.5.2 näher beschrieben.

6.1.5.1 Trajektorienbetrieb

Das Ziel des Trajektorienbetriebes ist es, die VKM solange wie möglich im Bestpunkt zu betreiben (Tab. 19). Näheres dazu ist in Kapitel 3.5.1.1 beschrieben.

Tab. 19: Bestpunkte der verschiedenen VKM-Varianten

VKM	<i>M16 TCA</i>	<i>M16 SCI</i>	<i>MO174V40</i>
Drehzahl n_{Best}	2550 U/min	1850 U/min	2325 U/min
Drehmoment M_{Best}	412 Nm	367 Nm	238 Nm
Leistung P_{Best}	110 kW	71 kW	58 kW

Der darüber hinaus gehende Energiebedarf wird von der Batterie zur Verfügung gestellt bzw. die überschüssige Energie an die Batterie abgegeben. Daher wird dieser Betriebszustand im Antriebsbetrieb nur vom Ladezustand der Batterie beschränkt. Fällt dieser unter einen bestimmten Grenzwert SOC_{u_Entl} so geht das Fahrzeug in reinen VKM-Betrieb über und die gesamte Leistung wird von der VKM aufgebracht. Steigt der Ladezustand über den Wert SOC_o so geht das Fahrzeug ebenfalls in reinen VKM-Betrieb über und die VKM arbeitet dann im schlechteren Teillastbereich. In diesen Bereichen wird die VKM entlang der Bestpunktlinie betrieben. In Tab. 20 sind die verschiedenen Grenzwerte der Batterie dargestellt.

Tab. 20: Batteriegrenzwerte für den Seriellen Hybrid mit der VKM M16 TCA

Batterie	Li-Ionen Akkumulator
Maximalladung SOC_{max}	0,6
Oberer Grenzwert SOC_o	0,5875
Mittlerer Ladezustand SOC_m	0,575
Unterer Grenzwert SOC_u	0,5625
Unterer Grenzwert beim Entladen SOC_{u_Entl}	0,5625
Minimalladung SOC_{min}	0,55
Initialladung SOC_{init}	0,5875

Befindet sich das Fahrzeug im Bremsbetrieb so wird möglichst viel Bremsenergie rekuperiert und in der Batterie gespeichert, beziehungsweise für den Antrieb der Nebenaggregate genutzt. Daher ist die mögliche Rekuperationsleistung einerseits vom Traktionsmotor und dessen Eigenschaften sowie vom SOC der Batterie abhängig. Die über diese Grenzen hinausgehende notwendige Bremsenergie wird mechanisch aufgebracht. Weist das Fahrzeug beim Bremsen oder bei Fahrzeugstillstand einen sehr niedrigen SOC ($<SOC_u$) auf, so wird die Batterie zusätzlich mit der VKM bis zu SOC_m geladen.

Der Start-Stopp Betrieb ermöglicht weitere Kraftstoffeinsparungen. Wird das Fahrzeug unter eine bestimmte Grenzgeschwindigkeit (ca. 1 m/s) gebremst und keine Leistung von der VKM gefordert, so wird die VKM abgestellt. Dies vermindert die Leistungsanforderung der Nebenaggregate von 20 kW auf 8 kW. Dadurch und aufgrund der Vermeidung des Leerlaufbetriebes mit seinem schlechten Wirkungsgrad, ermöglicht der Start-Stopp Betrieb Kraftstoffeinsparungen.

6.1.5.2 ON-OFF Betrieb

Beim ON-OFF Betrieb wird die VKM völlig unabhängig von der Leistungsanforderung der Verbraucher betrieben. Die Leistungsanforderung an die VKM ist dabei nur vom SOC der Batterie abhängig. Näheres dazu siehe Kapitel 3.5.1.2. Fällt der SOC unter den Ladezustand SOC_{u_Entl} wird die Batterie über die VKM geladen, bis der Ladezustand den Wert SOC_o überschreitet. Dabei wird die VKM im Bestpunkt betrieben. Ist die Batterie wieder geladen wird die VKM abgeschaltet und das Fahrzeug mit der in der Batterie gespeicherten Energie betrieben. Die Bremsenergie rückgewinnung wird bei ON-OFF Betrieb analog zum Trajektorienbetrieb angewendet. Wobei hier zu beachten ist, dass die VKM nur dann betrieben wird, wenn die Leistung der VKM im Bestpunkt auch von der Batterie aufgenommen werden kann. Beim ON-OFF Betrieb wird die VKM-Drehzahl nicht über die Bestpunktlinie bestimmt. Hier gibt es nur zwei Zustände und zwar Stillstand und Bestpunktbetrieb.

6.1.5.3 VKM – Steuerung

Die VKM-Steuerung bestimmt aus der Sollleistung welche die VKM an den Generator liefern muss ($P_{EM1_mech_soll}$), die Drehzahl, bei welcher diese Leistung erbracht werden soll, um die VKM möglichst verbrauchsgünstig zu betreiben. Hier findet auch die

Drehzahlregelung statt, welche den Kern der VKM-Steuerung darstellt. Sie regelt das Moment welches zusätzlich benötigt wird, um die VKM zu beschleunigen.

Bei der Drehzahlwahl wird zuerst die Solldrehzahl der VKM aus der Sollleistung der VKM bestimmt. Dies erfolgt durch Bestimmung der verbrauchsgünstigsten Drehzahl für die Soll-Leistung über die Bestpunktlinie. Die Bestpunktlinien der einzelnen Motoren sind im Anhang 9.5 abgebildet. Diese Solldrehzahl n_{VKM_soll} und die ist-Drehzahl n_{VKM_ist} sind die Eingangsgrößen des Drehzahlreglers Abb. 40.

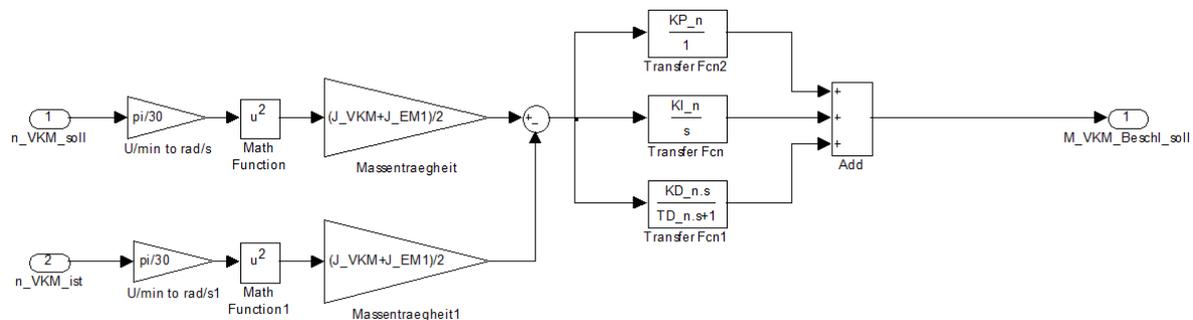


Abb. 40: offener Regelkreis des VKM-Drehzahlreglers

Es stellte sich heraus, dass eine Drehzahlregelung welche den Regelfehler direkt aus den Drehzahlen berechnet, aufgrund der sehr verschiedenen hohen Drehzahlsprünge ein unbefriedigendes Regelverhalten aufweist. Dies führte vor allem bei hohen Sprüngen zu einem langsamen Regelverhalten. Daher wurde als eigentliche Regelgrößen nicht die Drehzahlen sondern die kinetische Energie (26) bei diesen Drehzahlen gewählt.

$$E_{kin} = \frac{J_{VKM} + J_{EM1}}{2} \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{30}\right)^2 \quad \text{kinetische Energie [J]} \quad (26)$$

Der Drehzahlregler selbst ist als PID-Regler ausgeführt wobei der D-Anteil in der Simulation immer Null gesetzt wurde. Es wurden für alle Simulationsvarianten die nachfolgenden Werte verwendet: $K_P = 0,026$, $K_I = 0,0026$, $K_D = 0$ und $T_D = 0$.

Die Stellgröße des Drehzahlreglers ist das Beschleunigungsmoment $M_{VKM_Beschl_soll}$ welches die VKM aufbringen muss, um die Soll-Drehzahl zu erreichen.

Im Subsystem Momentenbestimmung der VKM-Steuerung wird schlussendlich das VKM-Moment, welches an den Generator abgegeben werden soll M_{mech_soll} mit dem Moment welches zur Beschleunigung benötigt wird $M_{VKM_Beschl_soll}$ kombiniert und die tatsächlich möglichen Werte M_{mech_ist} und M_{VKM_ist} bestimmt. Dies erfolgt durch einen Vergleich mit der Volllast- und Reibmomentkennlinie der VKM sowie der Momentenkennlinie des Generators.

6.2 Simulation und Auswertung

Die Durchführung der Simulationen erfolgte mit *Matlab-Simulink R2008b*. mit dem Solver *ode45 (Dormand-Prince)*. Dieser ist der Standardsolver in *Matlab-Simulink* und basiert auf der *Dormand-Prince* Methode, einem expliziten *Runge-Kutta*-Verfahren zur Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen. Er berechnet Lösungen welche bis zur 4. und 5. Ordnung exakt sind. Das *Dormand-Prince* Verfahren ist ein one-step Solver und berechnet die Lösung nur aus dem vorhergehenden Zeitwert. Die Schrittweite ist beim *ode45* Lösungsverfahren variabel. Die maximale Schrittweite wurde mit 0,1 und die relative Toleranz mit 10^{-5} gewählt. Minimale- und Anfangsschrittweite sowie die absolute Toleranz wurden auf auto gesetzt. Shape preservation und Zero-crossing detection wurden deaktiviert.

Quelle: [49], [50]

6.2.1 Serieller Hybridbus mit VKM M16-TCA

Die Basisvariante *M16TCA*-Hybrid, welche simuliert wurde, ist der serielle Hybridbus mit Trajektorienbetrieb und dem Dieselmotor *M16TCA*. Im Anhang 9.6 sind die Eingangsgrößen dieser Simulation abgebildet. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulation angeführt. In Abb. 41 ist der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf dieser Variante dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass das Hybridfahrzeug dem Braunschweigzyklus relativ gut folgen kann.

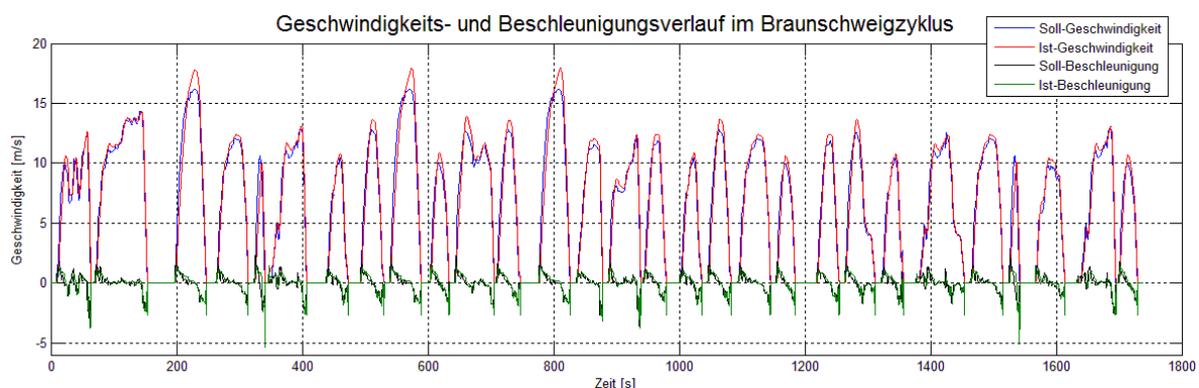


Abb. 41: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf *M16TCA*-Hybrid

In Abb. 42 ist der Zyklus von Sekunde 190 bis Sekunde 345 gezoomt dargestellt. In Abb. 43 ist die Pedalstellung des Fahrermodells im selben Zeitbereich abgebildet. Hierbei sind 2 Effekte ersichtlich, welche zu Abweichungen vom Braunschweigzyklus führen.

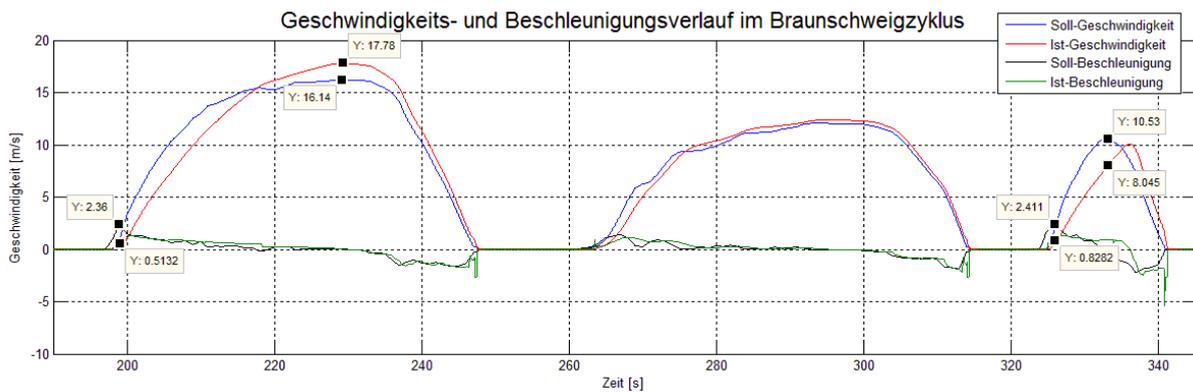


Abb. 42: Geschwindigkeitsverlauf *M16TCA*-Hybrid Sekunde 190 bis 345

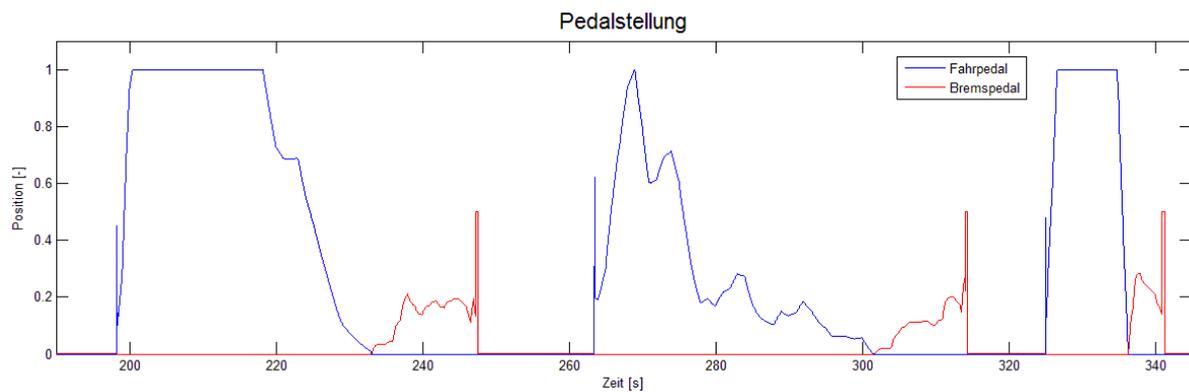


Abb. 43: Pedalstellung *M16TCA*-Hybrid Sekunde 190 bis 345

Einerseits ist die mechanische Leistung welche vom Traktionsmotor an den Abtrieb abgegeben wird bei 210 kW beschränkt. Dies bedeutet, dass der Bus die geforderten Beschleunigungswerte nicht erreichen kann. So ist die maximale Beschleunigung welche bei 6,8 m/s vom Traktionsmotor aufgebracht werden kann 1,35 m/s². Der Braunschweigzyklus fordert hier jedoch in Sekunde 326 seine maximale Beschleunigung von 2,42 m/s². In diesem Bereich treten auch die gravierendsten Abweichungen auf. So erreicht hier die tatsächliche Beschleunigung mit 0,828 m/s² nur 34% des geforderten Wertes. Dies führt zu einem starken Nacheilen der Ist-Geschwindigkeit hinter der Soll-Geschwindigkeit und daher in Sekunde 333 zu einer maximalen Geschwindigkeitsabweichung von 24%. Durch die beschränkte Beschleunigungsleistung und die Trägheit des Reglers eilt der Geschwindigkeitsverlauf beim Beschleunigen den Zykluswerten nach. Dies kann um Sekunde 225 sehr gut beobachtet werden. Hier treten hohe Werte des Fahrerreglers auf, welche über 1, und somit über dem Maximalwert des Fahrermodells liegen. Solch hohe Leistungswerte könnten vom Traktionsmotor nicht geliefert werden. Das starke Nacheilen des Reglers in diesem Bereich führt zu einem Überschwingen der Ist-Geschwindigkeit über den Sollwert des Zyklus. In Sekunde 225 tritt eine Abweichung von 10% vom Sollwert auf.

Die hier beschriebenen einzelnen Abweichungen wirken auf den ersten Blick relativ hoch, jedoch ergibt sich bei der über die Zeit gemittelte Geschwindigkeit eine vernachlässigbare Abweichung von 0,033% (Tab. 21). Daher ist der gewählte PID-Regler des Fahrermodells für diese Simulationsaufgabe ausreichend genau.

Tab. 21: mittlere Geschwindigkeit und Abweichung

Braunschweigzyklus	mittlere Geschwindigkeit
Soll-Geschwindigkeit	6,249 m/s
Ist-Geschwindigkeit	6,247 m/s
Abweichung	0,033 %

Für den oben beschriebenen Zeitbereich von Sekunde 190 bis 345 sollen noch weitere charakteristische Diagramme des seriellen Hybridfahrzeuges betrachtet werden. In Abb. 44 sind verschiedene Verläufe der Leistung dargestellt. Es ist die Leistung am Rad (blau) ersichtlich. Sie ist um die Wirkungsgrade des Abtriebs geringer als die elektrische Leistung am Traktionsmotor. Es ist zu beachten, dass der Wirkungsgrad des Traktionsmotors mit der Drehzahl und dem Drehmoment variiert. Die elektrische Leistung am Traktionsmotor und die Leistung der Nebenaggregate werden von der VKM (türkis) und der Batterie (grün) aufgebracht. Bei der Rekuperation treten negative Leistungen am Rad auf. Es ist auch ersichtlich, dass dabei die Leistung, welche bei Rekuperation in die Batterie gespeichert werden kann, um die Wirkungsgrade geringer ist als die Leistung am Rad.

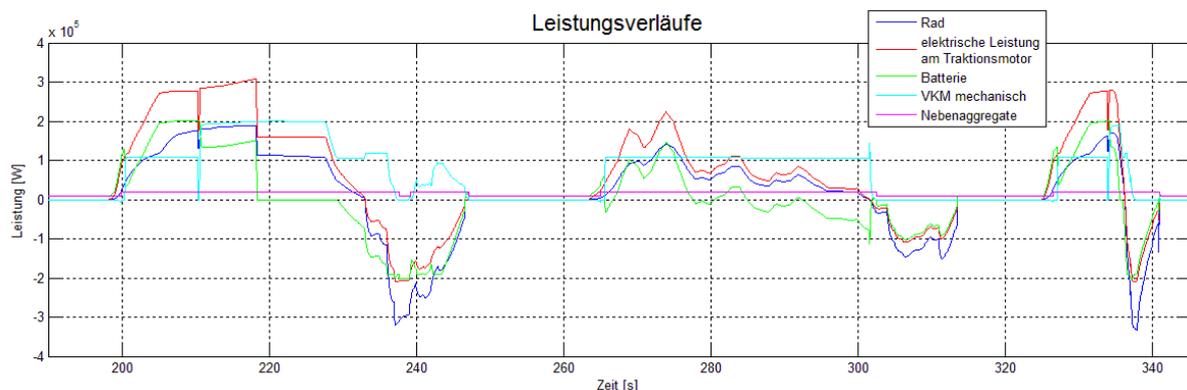


Abb. 44: Leistungsverläufe M16TCA-Hybrid Sekunde 190 bis 345

In Abb. 45 und Abb. 46 ist der Ladezustand der Batterie dargestellt. Dieser darf sich zwischen SOC = 0,6 und SOC = 0,55 bewegen. Dabei ist ersichtlich, dass die Batterie bei manchen Beschleunigungsvorgängen bis zum minimalen Ladezustand entladen wird. Der Maximalwert wird jedoch nie erreicht. Dies ist jedoch vorteilhaft, da dadurch das gesamte Rekuperationspotential ausgenutzt werden kann.

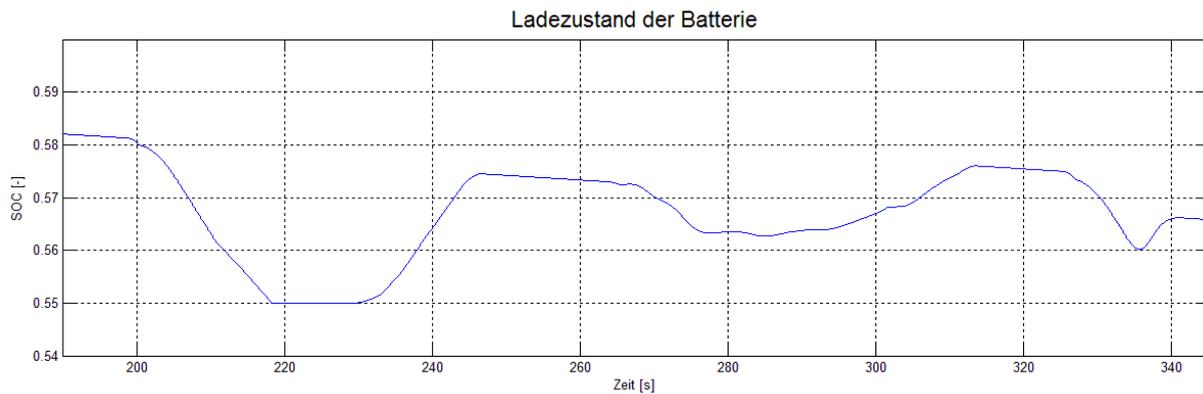


Abb. 45: Ladezustand SOC M16TCA-Hybrid Sekunde 190 bis 345

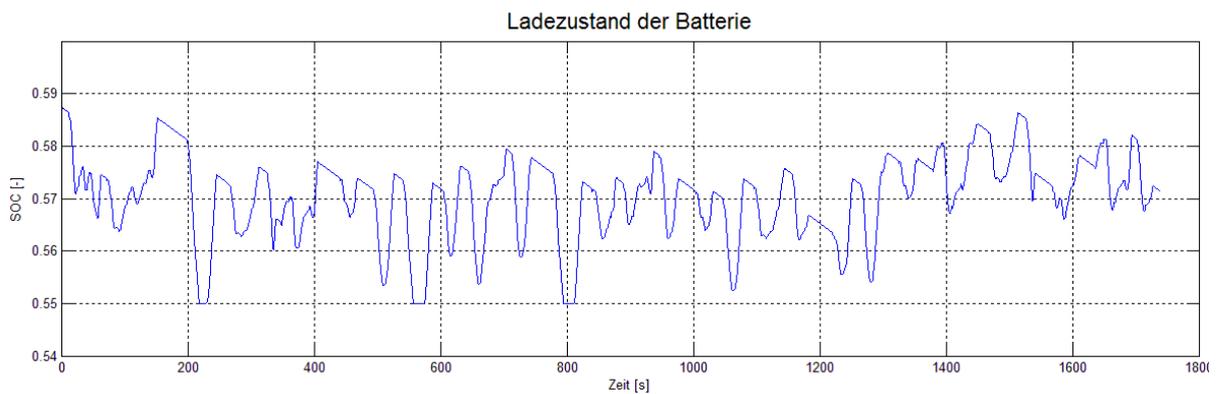


Abb. 46: Ladezustand der Batterie M16TCA-Hybrid gesamter Braunschweigzyklus

Der Drehzahlverlauf des Dieselmotors ist in Abb. 47 abgebildet. Wie gewünscht wird die VKM meist um den Bestpunkt bei 2550 U/min betrieben. Nur bei sehr hohen Leistungsanforderungen oder entladener Batterie steigt die VKM-Drehzahl auf 4000 U/min, wo sie ihre Maximalleistung liefern kann. Das Abschalten der VKM bei Fahrzeugstillstand ist ebenfalls ersichtlich. Es führt zu einer Verringerung der Leistungsanforderung durch die Nebenaggregate (Abb. 44).

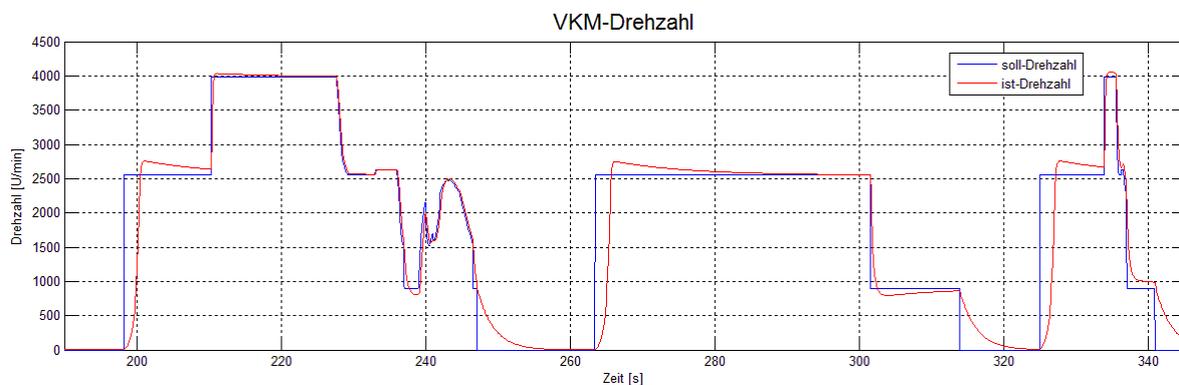


Abb. 47: VKM-Drehzahl M16TCA-Hybrid Sekunde 190 bis 345

Der gesamte Drehzahlverlauf ist in Abb. 48 dargestellt. Die VKM wird vor allem in 3 Betriebspunkten betrieben. Diese sind Volllast, Bestpunktbetrieb und abgeschaltete VKM.

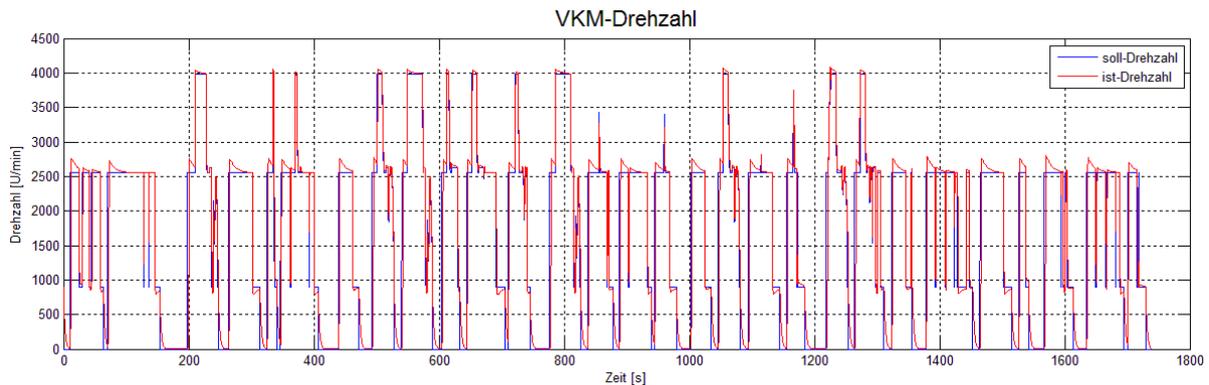


Abb. 48: VKM-Drehzahl M16TCA-Hybrid über den gesamten Braunschweig-Zyklus

In Abb. 49 ist der Momentenverlauf der VKM und in Abb. 50 der Kraftstoffverbrauch abgebildet. Das VKM-Moment beschreibt das Lastmoment des Generators plus das Moment, welches zur Beschleunigung der VKM aufgebracht wird. Hier sind wieder die verschiedenen Betriebszustände erkennbar. Vor allem beim Kraftstoffverbrauch sticht der hohe Verbrauch bei Volllast hervor.

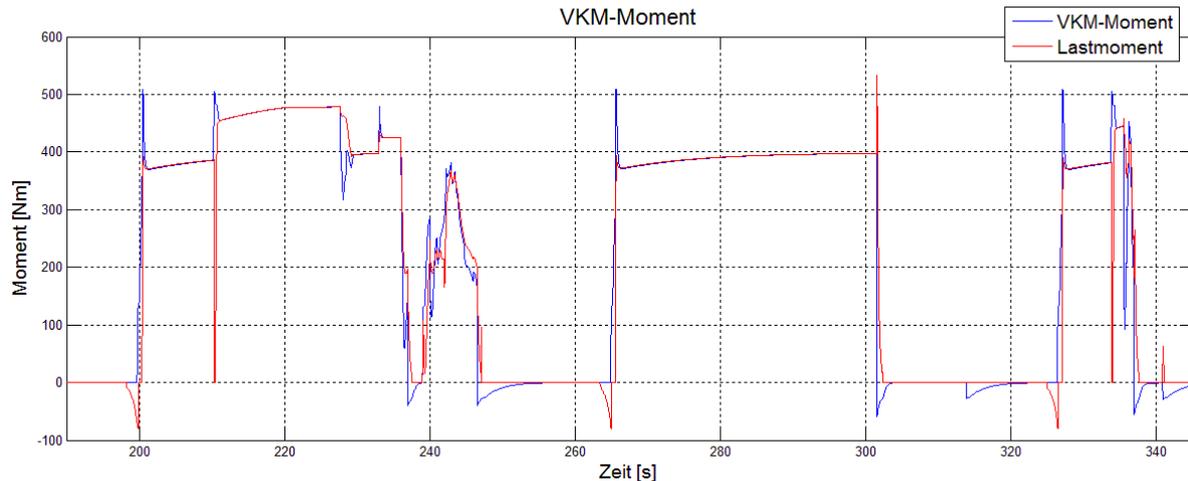


Abb. 49: VKM-Moment M16TCA-Hybrid Sekunde 190 bis 345

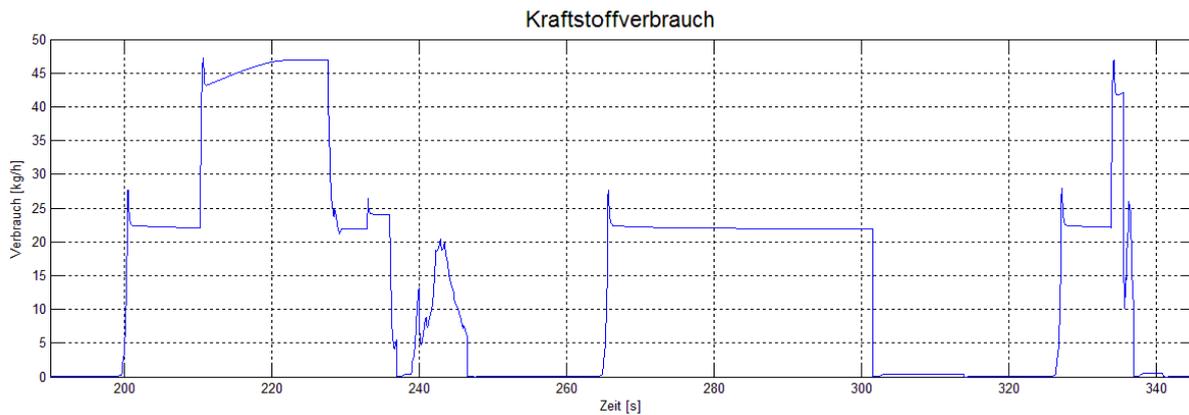


Abb. 50: Kraftstoffverbrauch *M16TCA*-Hybrid Sekunde 190 bis 345

In Abb. 51 ist die Lastpunktverteilung des Seriellen Hybrid im Muscheldiagramm des *SMO-M16TCA* Motors dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich eine starke Häufung von Betriebspunkten im Bereich des Bestpunktes bei der Bestpunktlinie befindet. Die Punkte entlang der Vollastkennlinie resultieren aus den Beschleunigungsvorgängen der VKM. Die Punkte, welche im gesamten Drehzahlbereich unter der Bestpunktlinie liegen, treten beim Abbremsen der VKM unter Last auf.

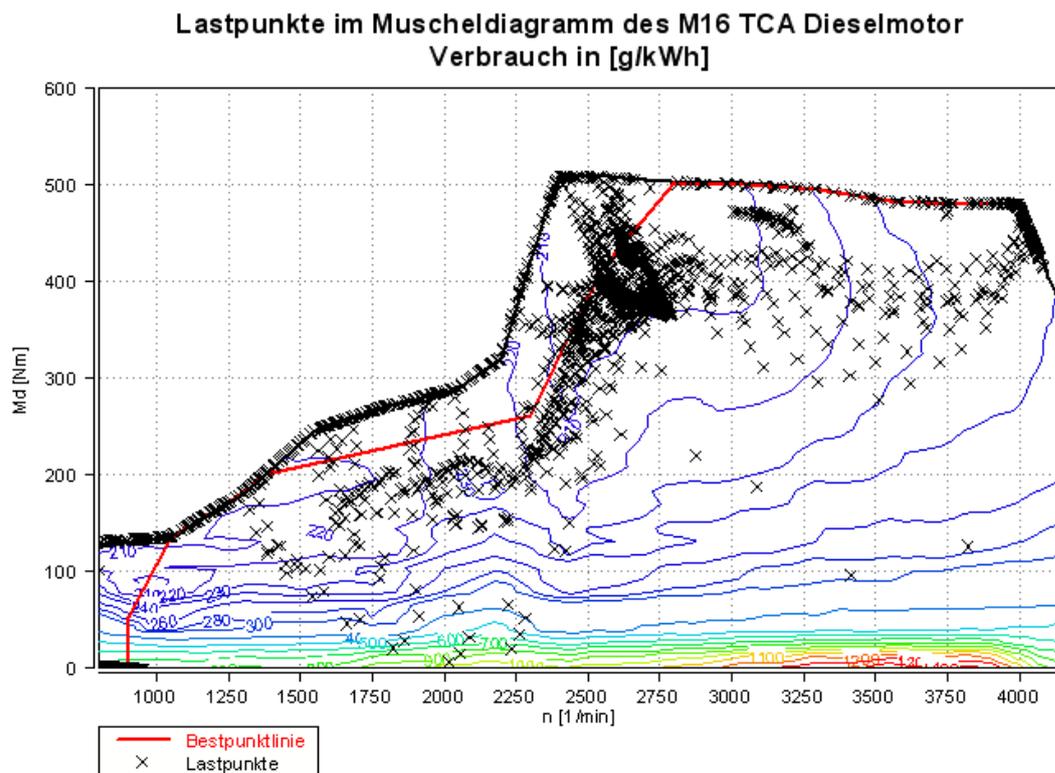


Abb. 51: Lastpunkte im Verbrauchskennfeld [g/kWh] des Dieselmotors *M16TCA*

Diese Abweichungen von der Bestpunktlinie lassen sich durch die Betriebsstrategie erklären. Diese versucht das mechanische Lastmoment genau bei der Bestpunktlinie zu liefern und addiert bzw. subtrahiert danach das Moment welches für Beschleunigung bzw. Bremsung der VKM benötigt wird. Der Bereich unter 800 U/min ist in dieser Darstellung nicht ersichtlich. In diesem Bereich liegen aufgrund des Start-Stopp Modus ebenfalls viele Lastpunkte.

Betrachtet man nun das Lastkollektiv im VKM-Kennfeld (Abb. 52) so können die häufigsten Betriebsbereiche der VKM ermittelt werden. Dabei ist ersichtlich, dass die VKM 23,6% der Zeit abgeschaltet ist. Des Weiteren wird sie über 18% der Zeit unter 1250 U/min betrieben. In diesen Bereich fällt auch der Leerlauf mit 900 U/min. Der wichtigste Betriebsbereich mit 37,8% Häufigkeit liegt um den Bestpunkt der VKM (Tab. 23). Rund um diesen Bereich treten weiter kleinere Maxima auf. Der dritte wichtige Betriebsbereich ist der Bereich um die Maximaldrehzahl von 4000 U/min und der Maximalleistung mit 6,7%.

Prozentuelle Lastpunktverteilung der VKM M16TCA im Hybridbus

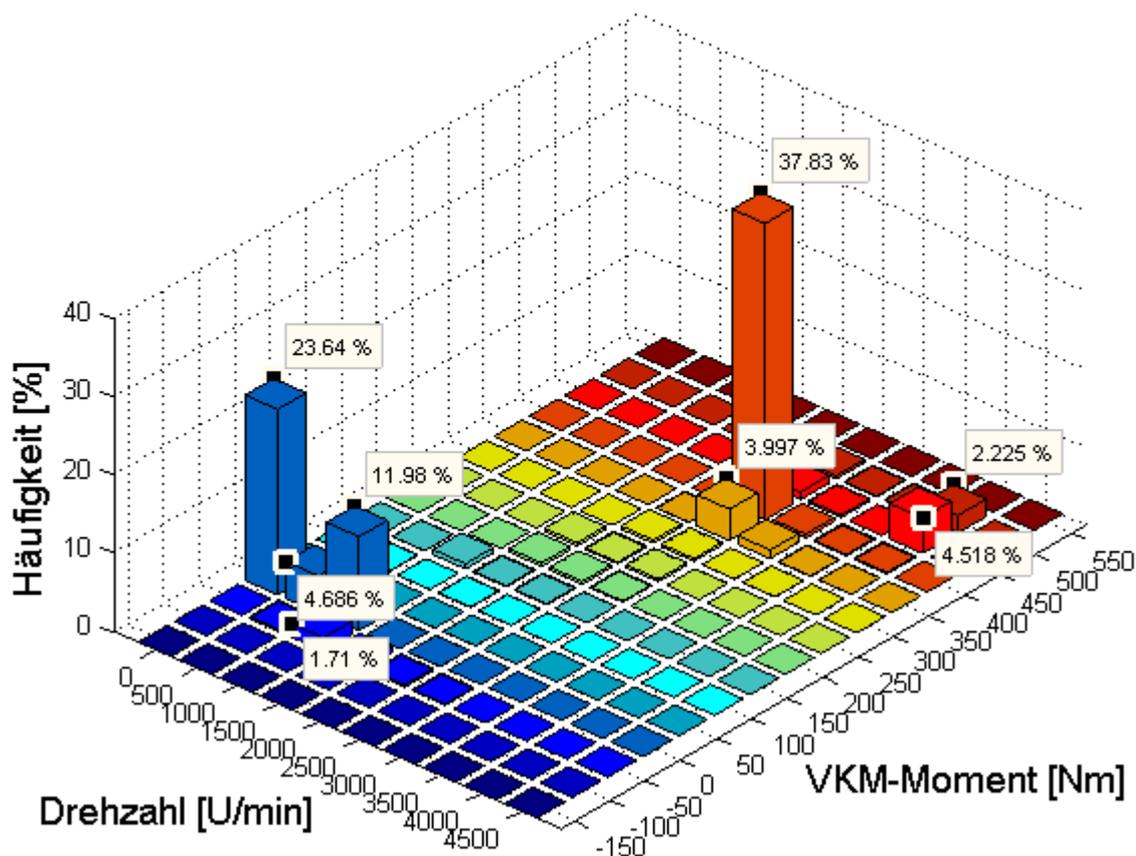


Abb. 52: Zeitliches Lastkollektiv der VKM des M16TCA-Hybrid

6.2.1.1 Leistungsbedarf des Seriellen Hybridbusses

In Tab. 22 sind der Energie- und der mittlere Leistungsbedarf der verschiedenen Verbraucher, sowie die Energie- und mittlere Leistungserzeugung der Erzeuger dargestellt.

Tab. 22: Energie- und mittlere/r Leistungsbedarf bzw. -erzeugung der einzelnen Komponenten

Komponente /Funktion	Energiebedarf	mittlerer Leistungsbedarf
Rad / Abtrieb	$6,446 \cdot 10^7$ J	37,2 kW
Nebenaggregat	$2,666 \cdot 10^7$ J	15,3 kW
Rekuperation am Rad	$-3,982 \cdot 10^7$ J	-22,9 kW
Nutzbare Rekuperationsenergie bezogen auf das Rad	$-1,521 \cdot 10^7$ J	-8,7 kW
VKM-Leistung	$-1,123 \cdot 10^8$ J	-64,5 kW
Kraftstoff (chemische Energie)	$-2,812 \cdot 10^8$ J	-161,6 kW

Der Energiebedarf am Rad des Seriellen Hybridbusses beträgt $6,466 \cdot 10^7$ J, jener der Nebenaggregate beträgt $2,666 \cdot 10^7$ J. Dieser wird durch die chemische Energie des Kraftstoffes sowie durch Rekuperation abgedeckt. Der Wirkungsgrad der Rekuperation wird in Kapitel 6.2.2.1 für dieses System berechnet und beträgt 38,2%. Dadurch ergibt sich die wesentlich geringere Energiemenge welche wieder am Rad nutzbar ist. Aufgrund der hohen rekuperierten Energiemenge steht jedoch eine Durchschnittsleistung von 8,7 kW durch Rekuperation „gratis“ zur Verfügung. Die durchschnittliche Leistung, welche von der VKM erzeugt werden muss beträgt 64,5 kW. Dies stellt auch eine absolute Minimalleistung dar, welche die VKM liefern muss. Jedoch muss dabei beachtet werden, dass bei Dauerbetrieb der VKM die Nebenaggregate das System mit einer Leistungsanforderung von 20 kW belasten und nicht nur mit 15,3 kW wie im simulierten Hybridfahrzeug. Daher muss diese Minimalanforderung auf ca. 70 – 75 kW erhöht werden. Betrachtet man nun den gewählten Bestpunkt der VKM mit den Werten aus Tab. 23 so ist ersichtlich, dass die VKM *M16TCA* im Bestpunkt diese Anforderungen erfüllt und sogar eine Leistungsreserve aufweist. Daher ist ein Bestpunktbetrieb sinnvoll einsetzbar und somit gute Verbrauchswerte erreichbar.

Tab. 23: Werte des Bestpunktes der VKM SMO-M16TCA

VKM	<i>SMO-M16TCA</i>
Drehzahl im Bestpunkt n_{Best}	2550 U/min
Drehmoment im Bestpunkt M_{Best}	412 Nm
Leistung im Bestpunkt P_{Best}	110 kW

6.2.2 Verbrauch der Busvarianten mit der VKM M16TCA

6.2.2.1 Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlich hoher Hybridfunktionalität

Der Verbrauch des Seriellen Hybridbusses wurde in der Simulation ermittelt und mit verschiedenen anderen Varianten verglichen. Dabei wurde der Verbrauch nach (27) berechnet.

$$K = \frac{\int B_H / 3600 dt}{\int v dt} \cdot \frac{10^5}{\rho_D} \quad \text{Verbrauch [l/100 km]} \quad (27)$$

B_H Verbrauch in [kg/h]

v Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

$\rho_D = 0,832 \text{ kg/l}$ Dichte des Dieselmotorkraftstoffes bei 15°C

Bei den Varianten mit Batterie muss zusätzlich noch die Veränderung des Ladezustandes der Batterie berücksichtigt werden (28).

$$K_{zus} = (SOC_{init} - SOC_{end}) \cdot E_{Batt} \cdot \frac{b_{e_Gen}}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{1}{\rho_D \cdot 1000} \cdot \frac{100}{s} \quad (28)$$

K_{zus} Zusatzverbrauch der Batterie [l/100km]

SOC_{init} Initilladung der Batterie [-]

SOC_{end} Endladung der Batterie [-]

$E_{Batt} = 9,504 \cdot 10^7 \text{ J}$ maximaler Energieinhalt der Batterie

$b_{e_Gen} = 230 \text{ g/kWh}$ spezifischer Verbrauch der Ladegruppe

$s = 10,87 \text{ km}$ Fahrstrecke des Zyklus

Als spezifischer Verbrauch der Ladegruppe wurde mit 230 g/kWh ein Wert nahe am Bestpunkt angenommen. Nimmt man als Initialwert des Ladezustandes 0,60 und als Endwert 0,55, die Werte an, zwischen denen sich der SOC bewegen darf, so ergibt sich ein maximaler Mehrverbrauch von $K_{zus} = 3,36 \text{ l/100km}$.

Zuerst soll der Trajektorienbetrieb des seriellen Hybrides mit dem Motor SMO M16 TCA mit Varianten dieser Betriebsstrategie verglichen werden. Als Basis für den Verbrauchsvergleich dient dabei der dieselelektrische (DE) Antrieb. Die weiteren Varianten stellen serielle Hybridfahrzeuge im eigentlichen Sinn dar. Bei ihnen wird durch die Betriebsstrategie jedoch nur eine geringere Funktionalität zugelassen.

In Tab. 24 sind die verschiedenen Varianten der Verbrauchssimulation aufgeführt.

Tab. 24: Varianten des Seriellen Hybriden M16 TCA

Variante	Funktionalität
DE - Antrieb	Lastpunktverschiebung, keine Batterie
DE mit Batterie	Lastpunktverschiebung, Pufferspeicherung, keine Rekuperation, kein Start - Stopp
DE mit Batterie und Start - Stopp	Lastpunktverschiebung, Pufferspeicherung, Start-Stopp, keine Rekuperation
DE mit Batterie und Rekuperation	Lastpunktverschiebung, Pufferspeicherung, Rekuperation, kein Start-Stopp
Serieller Hybrid Trajektorienbetrieb	volle Funktionalität

In Abb. 53 sind der Kraftstoffverbrauch und die Kraftstoffeinsparung gegenüber dem dieselektrischem Antrieb dargestellt. Der dieselektrische Antrieb erreicht dabei einen Verbrauch von 97,59 l/100 km. Es ist des Weiteren ersichtlich, dass in der untersuchten Fahrzeugkonfiguration der Einbau einer Batterie, ohne Ausnutzung des Potentials von Rekuperation und Start-Stopp, keine Einsparungen ermöglicht.

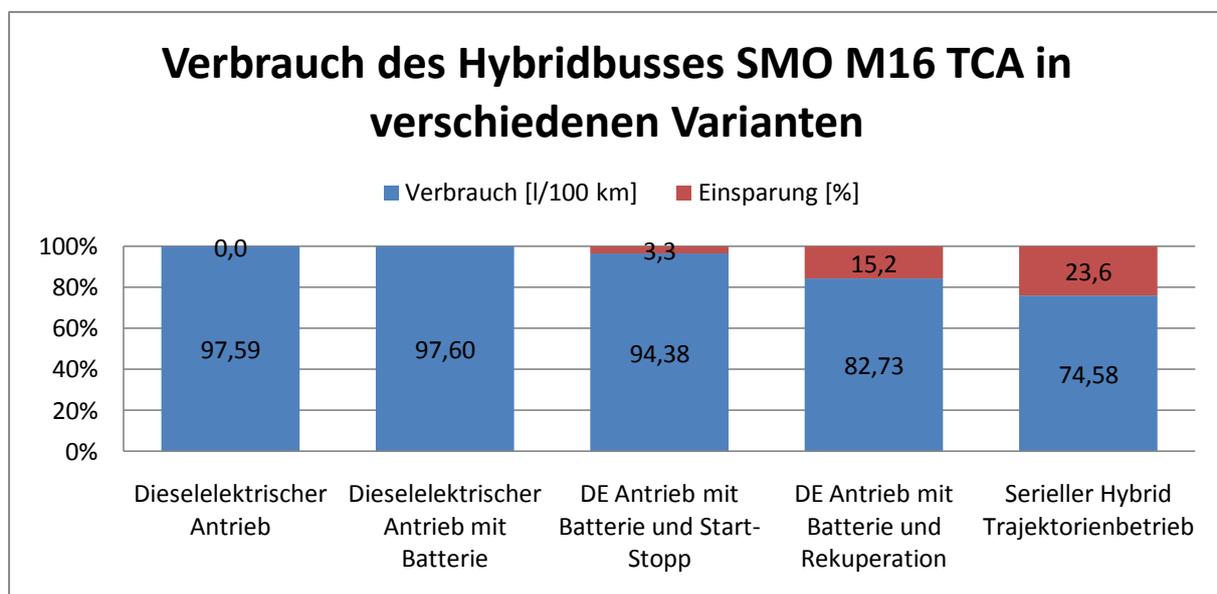


Abb. 53: Kraftstoffverbrauch der Hybridvarianten des SMO M16 TCA-Hybrids

Die Anwendung der Start-Stopp Strategie bringt eine Kraftstoffeinsparung von 3,3 %. Dies wird durch die geringere Leistungsanforderung der Nebenaggregate bei abgeschalteter VKM erreicht. Es sind keine höheren Einsparungen zu beobachten, da der dieselektrische Antrieb im Leerlauf aufgrund der hohen Leistungsanforderungen durch die Nebenaggregate sehr gute Wirkungsgrade aufweist.

Die Rekuperation birgt bei diesem Konzept das wesentlich höhere Einsparpotential. Sie ermöglicht gegenüber dem dieselektrischen Antrieb eine Verbrauchsminderung von 15,2 %. Diese Einsparungen werden vor allem erreicht, da der Serielle Hybrid einen

sehr leistungsstarken Traktionsmotor aufweist. Dadurch kann ein hoher Anteil der Bremsenergie rekuperiert werden. Der über die Leistung gemittelte Wirkungsgrad der Asynchronmaschine im seriellen Hybrid ergibt sich nach (29) mit 74,9%. Dies ist ein eher niedriger Wert, welcher durch den schlechten Wirkungsgrad der Asynchronmaschine bedingt ist.

$$\bar{\eta}_{EM2} = \frac{\int |P_{EM2_el}| \cdot \eta_{EM2} dt}{\int |P_{EM2_el}| dt} \quad \text{mittlerer Wirkungsgrad der EM2} \quad (29)$$

$|P_{EM2_el}|$ Betrag der elektrischen Leistung [W]

η_{EM2} Wirkungsgrad der Asynchronmaschine EM2 [-]

Daraus kann der Prozentsatz der rekuperierten Energie, welcher wieder für den Antrieb des Fahrzeuges genutzt werden kann, berechnet werden (30). Diese Energie steht „gratis“ zur Verfügung.

$$\eta_{Rek} = \eta_{Achs}^2 \cdot \eta_{EM2}^2 \cdot \eta_{Ue}^2 \cdot \eta_{Batt} = 38,2\% \quad \text{Rekuperationswirkungsgrad} \quad (30)$$

Der Wirkungsgrad der Rekuperation ist mit 38,2 % relativ niedrig. Dies ist vor allem durch den schlechten Achsgetriebewirkungsgrad und den niedrigen Wirkungsgrad der Asynchronmaschine bedingt. Bei der Berechnung des Rekuperationswirkungsgrades wurden die Nebenaggregate nicht berücksichtigt, da sie nur ca. 20% der erzeugten elektrischen Energie verbrauchen und somit einen relativ geringen Einfluss haben. Des Weiteren ist der errechnete Rad-Rad Wirkungsgrad leichter mit anderen Fahrzeugen vergleichbar.

Betrachtet man nun abschließend den Seriellen Hybriden selbst, so ergibt sich ein Verbrauch von 74,58 l/100 km. Er weist eine Verbrauchseinsparung von 23,6% auf. Diese übersteigt sogar die kombinierten Einsparungen von Start–Stopp und Rekuperation um 5,1%.

Aus den angeführten Untersuchungen ist klar ersichtlich, dass ein Serieller Hybrid wesentlich niedrigere Verbrauchswerte als ein einfacher dieselektrischer Antrieb ermöglicht. Diese Einsparungen sind hauptsächlich durch Rekuperation und zu einem geringeren Anteil durch Start-Stopp Betrieb erreichbar.

6.2.2.2 Untersuchung verschiedener Fahrzeug- und Betriebsstrategievarianten

In Abb. 54 werden die Verbräuche der verschiedenen Fahrzeugvarianten mit der VKM SMO M16TCA miteinander verglichen. Dabei ist der konventionelle Antrieb eine Variante mit mechanischem Antriebsstrang und Automatikgetriebe. Die Balken für den

Seriellen Hybrid beschreiben den Hybridbus mit der Strategie Trajektorienbetrieb. Der ON-OFF Betrieb ist die zweite untersuchte Betriebsstrategie.

Bei diesem Vergleich ist ersichtlich, dass der dieselektrische Antrieb den schlechtesten Wirkungsgrad aufweist. Der konventionelle Antriebsstrang erreicht mit 84,57 l/100km einen um immerhin 13,3% besseren Verbrauch. Des Weiteren ermöglicht der serielle Hybrid Verbrauchseinsparungen gegenüber dem konventionellen Antrieb. Der Trajektorienbetrieb ermöglicht einen Verbrauch von 74,58 l/100km und damit eine Einsparung gegenüber dem konventionellen Antrieb von 11,8%.

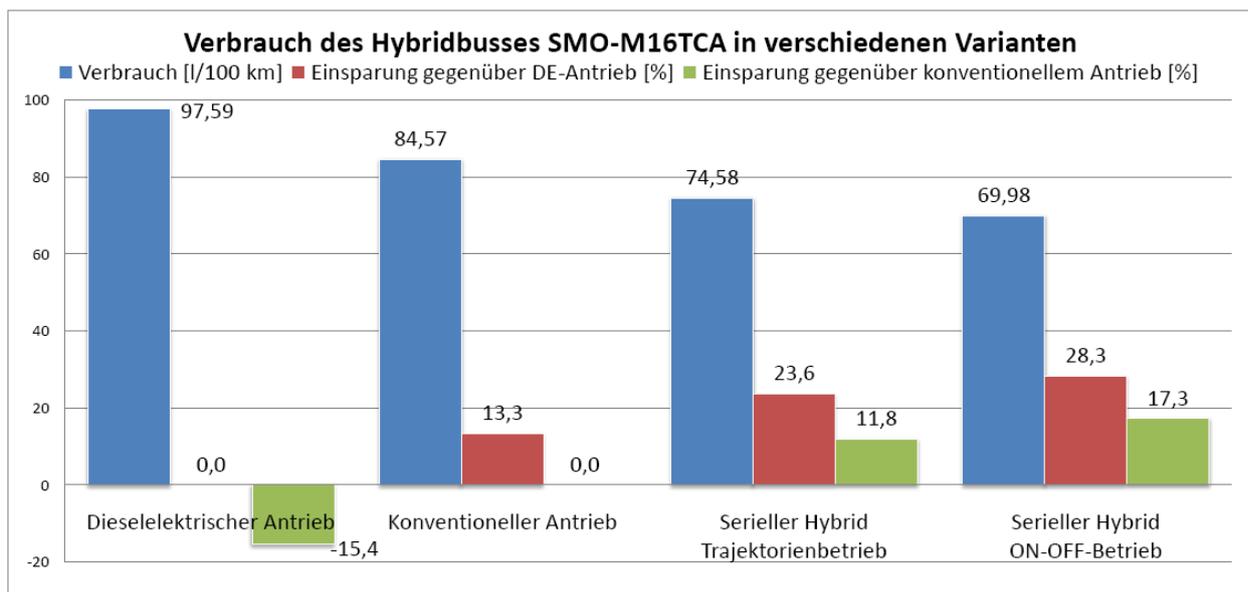


Abb. 54: Verbrauch des Busses mit verschiedenen Fahrzeugvarianten und SMO-M16TCA VKM

Der ON-OFF Betrieb erreicht einen Verbrauch von 69,98 l/100km und damit sogar noch höhere Einsparungen von 17,3 %. Die erreichten Werte der Verbrauchseinsparung sind jedoch deutlich niedriger als die erhofften und auch erwarteten Werte. So werden von Herstellern Einsparungen in Kundenzyklen von bis zu 30% angegeben. Dies kann, neben den Unterschieden der Zyklen, wohl vor allem auf die gewählten Wirkungsgrade im Abtrieb zurückgeführt werden. So wird die Asynchronmaschine bei einem mittleren Wirkungsgrad von nur 74,9% betrieben. Dies stellt insbesondere im Vergleich zu PMSM einen sehr niedrigen Wert dar.

6.2.2.3 Auswirkung der Komponentenwirkungsgrade auf den Verbrauch

Nimmt man nun einen Wirkungsgrad des Achsantriebes von $\eta_{\text{Achse}} = 95,5\%$ an und erhöht den Wirkungsgrad der Asynchronmaschine über den gesamten Betriebsbereich um 3%, so ergeben sich wesentlich höhere Wirkungsgrade der Leistungsübertragung. Dies wirkt sich vor allem positiv auf die Rekuperation aus und es ergibt sich folgendes

Bild (Abb. 55). Hierbei wurde der konventionelle Antrieb mit dem ON-OFF Betrieb verglichen. Kann der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine um 3% über den gesamten Betriebsbereich erhöht werden steigt die Verbrauchseinsparung gegenüber dem konventionellen Antrieb von 17,2% auf 22,3 %. Bei Verbesserungen des Achsgetriebes und einem resultierenden Achsgetriebewirkungsgrad von 95,5% lassen sich sogar 25,8% Kraftstoff gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang mit verbesserten Achswirkungsgrad einsparen. Dies liegt darin begründet, dass sich der Achswirkungsgrad beim seriellen Hybrid aufgrund der Rekuperation mehrmals auswirkt. Kann bei dieser Variante noch zusätzlich der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine erhöht werden ergeben sich Verbrauchsverbesserungen von 30,4%.

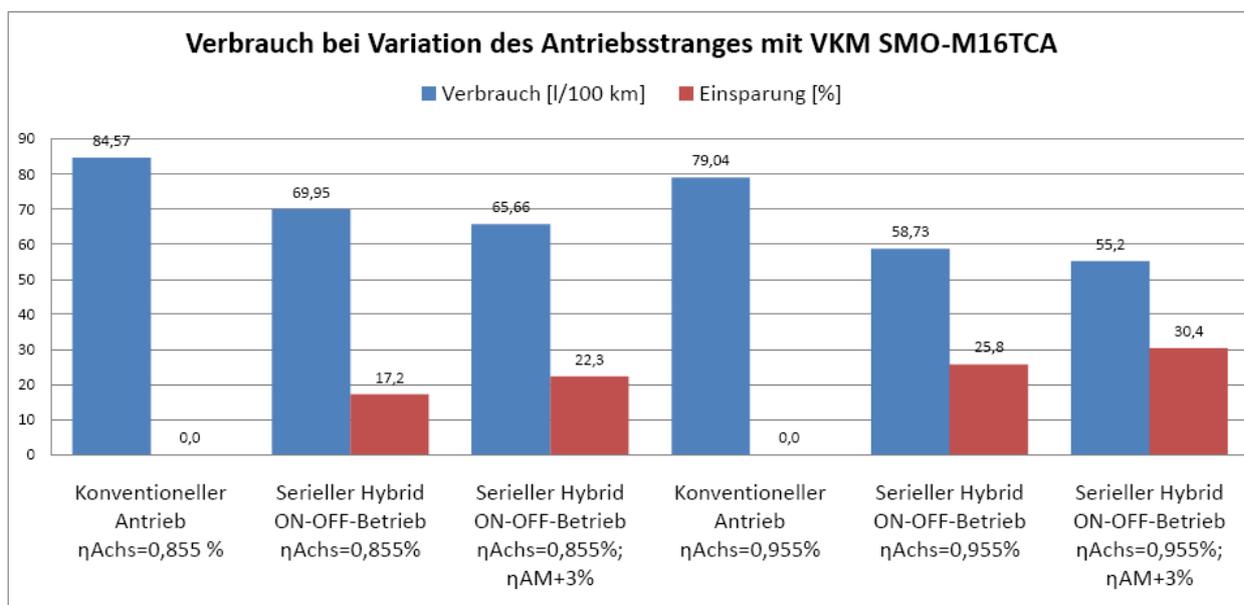


Abb. 55: Verbrauch bei Variation der Antriebsstrangwirkungsgrade

Zusätzliche Kraftstoffeinsparungen sind zusätzlich durch eine weitere Anpassung und Verfeinerung des ON-OFF Betriebes möglich. Aufgrund der guten Ergebnisse der ON-OFF Betriebes wird dieser im nächsten Kapitel noch etwas näher betrachtet.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Batterie auf den Verbrauch des Fahrzeuges betrachtet. Wird statt der im Modell verwendeten Li-Ionen Batterie eine NiMH Batterie verbaut, so hat das gravierende Auswirkungen auf den Wirkungsgrad des Batteriesystems. Dieser fällt dadurch von 95% auf nur 70%. Die Erhöhung des Fahrzeuggewichtes wird bei dieser Simulation vernachlässigt. Mit der NiMH Batterie steigt der Kraftstoffverbrauch des seriellen Hybriden mit Trajektorienbetrieb auf 84,57 l/100km. Dies ist ein um 13,4 % höherer Verbrauch als bei der Variante mit Li-Ionen Batterie und stellt keine Verbrauchsverbesserung gegenüber dem konventionellem Antrieb dar.

6.2.3 Der ON-OFF Betrieb beim *M16TCA*-Hybrid

Wie in 6.2.2.2 bereits gezeigt, ermöglicht der ON-OFF Betrieb die niedrigsten Verbrauchswerte. Die VKM wird bei dieser Strategie, mit Ausnahme der Rekuperation, unabhängig vom derzeitigen Fahrzustand betrieben. Sie wird dabei nur zum Laden der Batterie eingesetzt. In Abb. 56 ist der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf des Busses dargestellt. Dabei ist feststellbar, dass das Fahrzeug diesem Verlauf sehr gut folgen kann. Nur bei den Beschleunigungen auf Höchstgeschwindigkeit (z.B. um Sekunde 220) kann der Bus die Sollwerte nicht erreichen. Betrachtet man nun in diesem Bereich den SOC der Batterie (Abb. 57) so ist ersichtlich, dass hier die Batterie vollständig entladen ist und somit die gesamte Leistung von der VKM zur Verfügung gestellt werden muss. Da die VKM nur im Bestpunkt betrieben wird ist damit die Leistung mit 110 kW beschränkt.

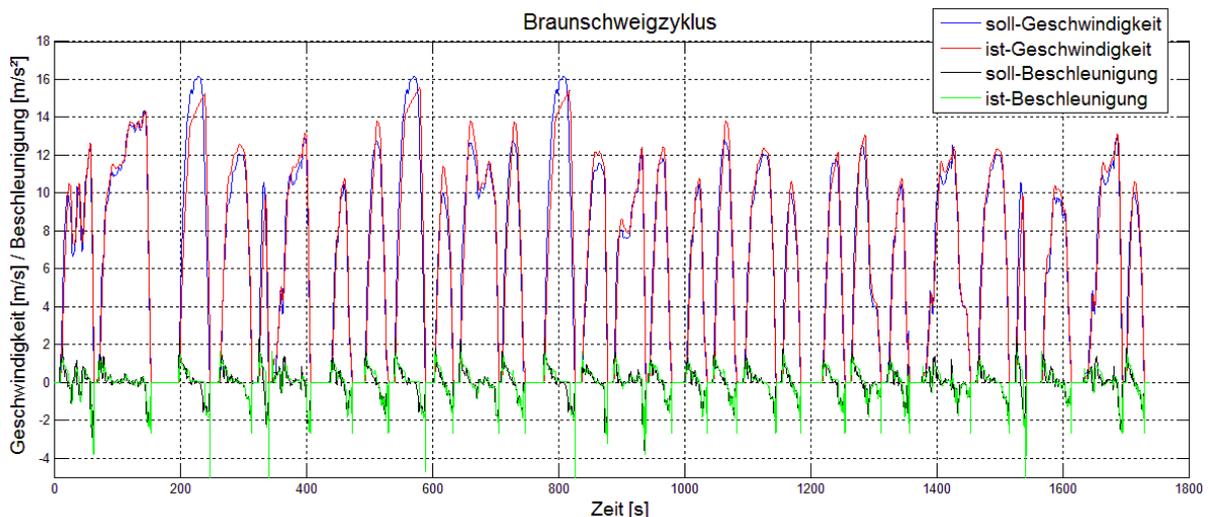


Abb. 56: Geschwindigkeitsverlauf des *M16TCA*-Hybrid mit ON-OFF Betrieb

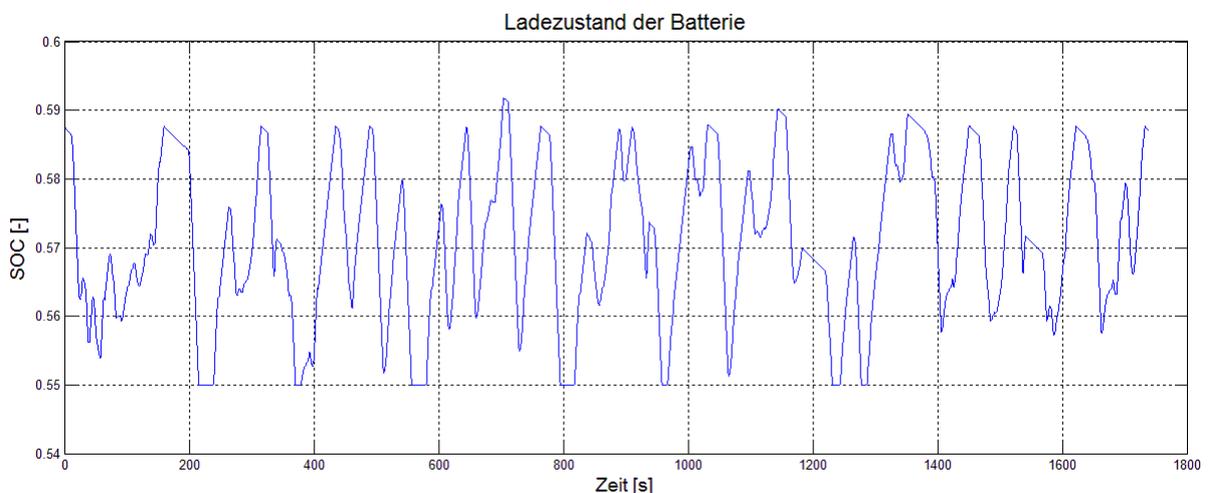


Abb. 57: SOC Verlauf des *M16TCA*-Hybrid mit ON-OFF Betrieb

In den Bildern Abb. 58 und Abb. 59 sind Drehzahl- und Momentenverlauf der VKM ersichtlich. Dabei ist der ON-OFF Betrieb sehr gut erkennbar. Vergleicht man diesen Verlauf noch mit dem Verlauf des Ladezustandes so sieht man, dass die Batterie bei abgeschalteter VKM bis zu einem festgelegten Minimalwert entladen wird. Bei diesem wird die VKM gestartet und im Bestpunkt betrieben bis die Batterie einen Maximalwert erreicht oder Rekuperation angewendet wird.

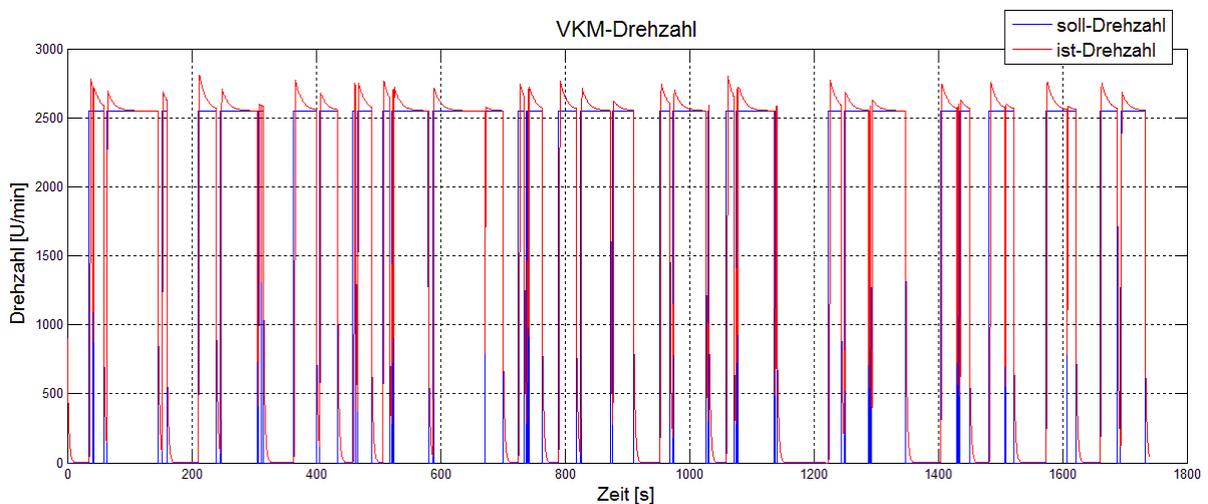


Abb. 58: VKM-Drehzahlverlauf des *M16TCA*-Hybrid mit ON-OFF Betrieb

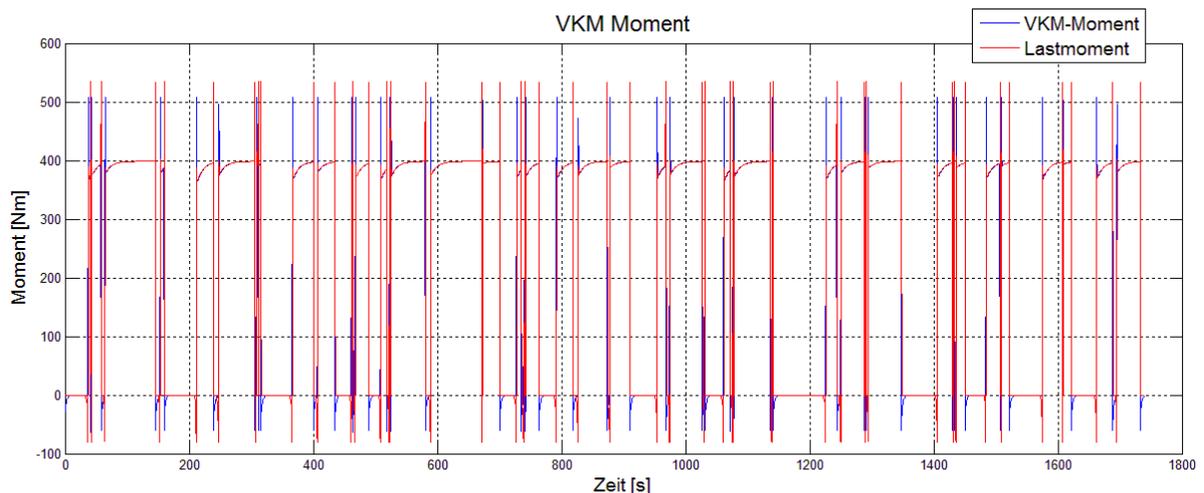


Abb. 59: Momentenverlauf des *M16TCA*-Hybrid mit ON-OFF Betrieb

6.2.4 Verbräuche der verschiedenen VKM- und Antriebstrangvarianten

Wie bereits ausgeführt wurde, werden auch 3 verschiedene VKM-Varianten auf deren Eignung für dieses Hybridfahrzeugkonzept untersucht. In Abb. 60 sind die Verbrauchswerte und Gesamtwirkungsgrade dieser Varianten dargestellt. Der Gesamtwirkungsgrad wurde nach (31) berechnet.

$$\eta_{Ges} = \frac{\int \max_0(P_{Rad}) + P_{Neben,Nutz} dt + (SOC_{init} - SOC_{end}) \cdot E_{Batt}}{\int B_H / 3,6 dt / H_u} \quad \text{Gesamtwirkungsgrad} \quad (31)$$

$\max_0(P_{Rad})$	Am Rad abgegebene Leistung [W]
$P_{Neben,Nutz} = 8000W$	Nutzarbeit der Nebenaggregate [W] (Kap. 6.1.2.4)
SOC_{init}, SOC_{end}	Initial- bzw. Endladung der Batterie [-]
$E_{Batt} = 9,504 \cdot 10^7 J$	maximaler Energieinhalt der Batterie
B_H	Verbrauch in [kg/h]
H_u	unterer Heizwert des Dieselkraftstoffes [J/g]

Aus Abb. 60 ist ablesbar, dass die Variante mit der VKM *M16TCA* und ON-OFF Betrieb die besten Verbrauchswerte bei einem Gesamtwirkungsgrad von 28,56 % liefert. Die Variante mit dem Motor *M16SCI* erreicht bei direktem Vergleich der Varianten um ca. 4 Liter schlechtere Werte. Hier wird beim dieselelektrischen Antrieb der schlechteste Gesamtwirkungsgrad von 19,88 % bei einem Verbrauch von 102,7l/100km erreicht. Der Motor *MO174V40* wird nur als serieller Hybrid mit den anderen Varianten verglichen. Dieser Motor ermöglicht aufgrund seiner niedrigen Motorleistung keinen Betrieb mit ON-OFF Betrieb, dieselelektrischem Antrieb oder konventionellen Antriebsstrang. Er erreicht mit Trajektorienbetrieb einen Verbrauch von 85,19 l/100km und damit einen um 23,41% schlechteren Wert als bei der verbrauchsgünstigsten Variante serieller Hybrid mit ON-OFF Betrieb und VKM *M16TCA*.

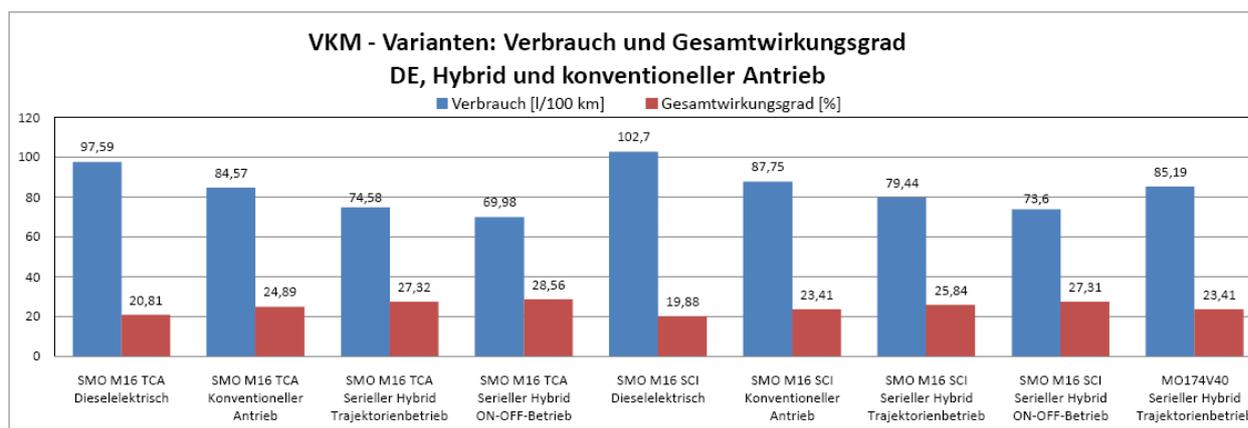


Abb. 60: Verbrauch und Gesamtwirkungsgrad der untersuchten VKM-Varianten

6.2.5 Bewertung und Vergleich der verschiedenen VKM-Varianten

6.2.5.1 Steyr Motors M16TCA

Betrachtet man zuerst die VKM-Variante *SMO M16TCA* und deren gewählten Bestpunkt im Verbrauchskennfeld der Ladegruppe so ist ersichtlich, dass dieser Punkt

geringfügig vom tatsächlichen Bestpunkt abweicht (Abb. 61). Dies ist deshalb der Fall, da in der Simulation der Bestpunkt der VKM ohne Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrades gewählt wurde. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Bestpunktlinie sich recht gut an die Verbrauchsminima hält. Sie wurde unter Berücksichtigung des Generators erstellt. Aus diesem Bild kann geschlossen werden, dass eine Verschiebung des Bestpunktes auf $P_{\text{Best}} = 132,3 \text{ kW}$, $M_{\text{Best}} = 468 \text{ Nm}$ und $n_{\text{Best}} = 2700 \text{ U/min}$ vor allem bei ON-OFF Betrieb weitere Verbesserungen ermöglichen könnte. Trotz des um über 5% besseren Wirkungsgrades der Ladegruppe lässt sich dadurch jedoch nur eine geringfügige Verbrauchsreduzierung von 69,95 l/100km auf 69,36 l/100km oder 1% Einsparung realisieren.

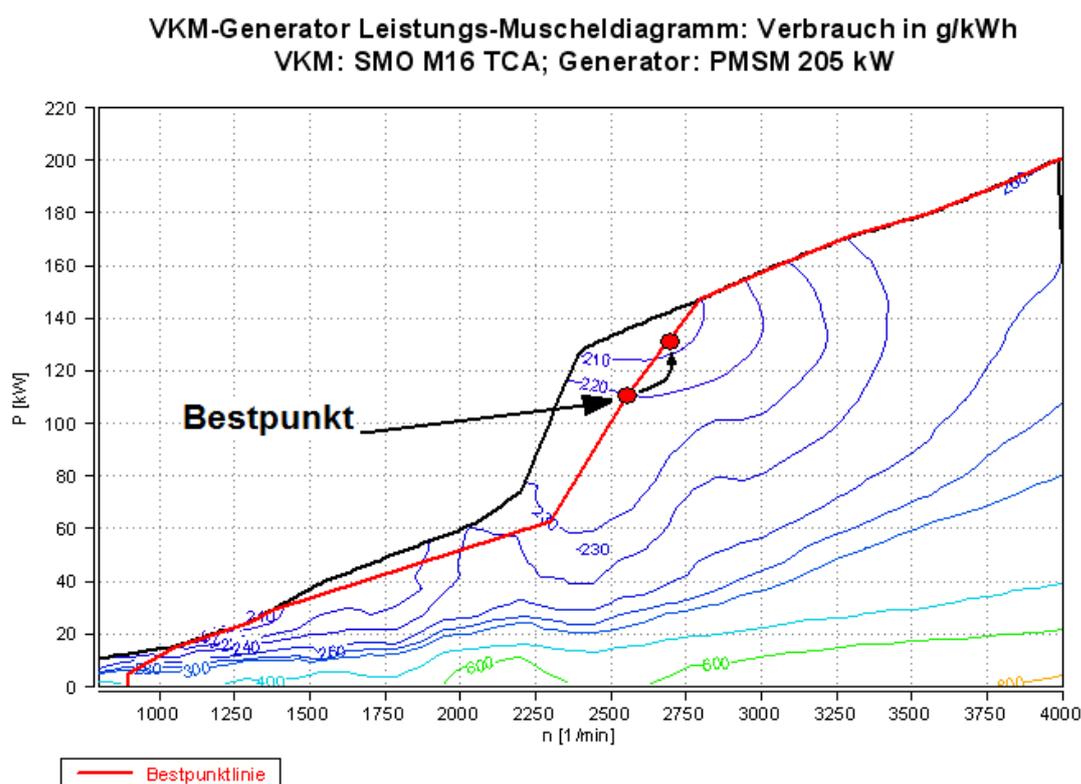


Abb. 61: Bestpunkt der Variante *M16 TCA* im Leistungs-Muscheldiagramm der Ladegruppe

6.2.5.2 Steyr Motors M16SCI

Bei der zweiten VKM-Variante *M16SCI* sind die Verbräuche trotz modernerem Motor schlechter als bei der Variante *M16TCA*. Dies kann wohl einerseits auf die gezielte Abstimmung des *M16TCA* für die dieselektische Anwendung und andererseits auf den etwas schlechteren Wirkungsgrad des SCI zurückzuführen sein. In Abb. 60 ist ersichtlich, dass die Verbrauchswerte bei der ON-OFF-Strategie um 6,3 % niedriger sind als mit der VKM *M16TCA*. Wird nun das Leistungs-Verbrauchskennfeld der

Ladegruppe Abb. 62 betrachtet, so sind insgesamt die etwas schlechteren Wirkungsgrade ersichtlich. Des Weiteren liegt der Bestpunkt bei dieser Variante bei wesentlich niedrigeren Leistungen (Tab. 25). Dieser Wert liegt mit 71kW sehr nahe an der benötigten mittleren Leistung des Hybridbusses von 70 – 75 kW (Kapitel 6.2.1.1). Dadurch ist im Bestpunkt keine Leistungsreserve gegenüber der mittleren Leistung vorhanden und die VKM muss länger in Betriebsbereichen mit schlechtem Wirkungsgrad betrieben werden. Des Weiteren sind dadurch nur kürzere Zeiten mit Stopp-Betrieb möglich.

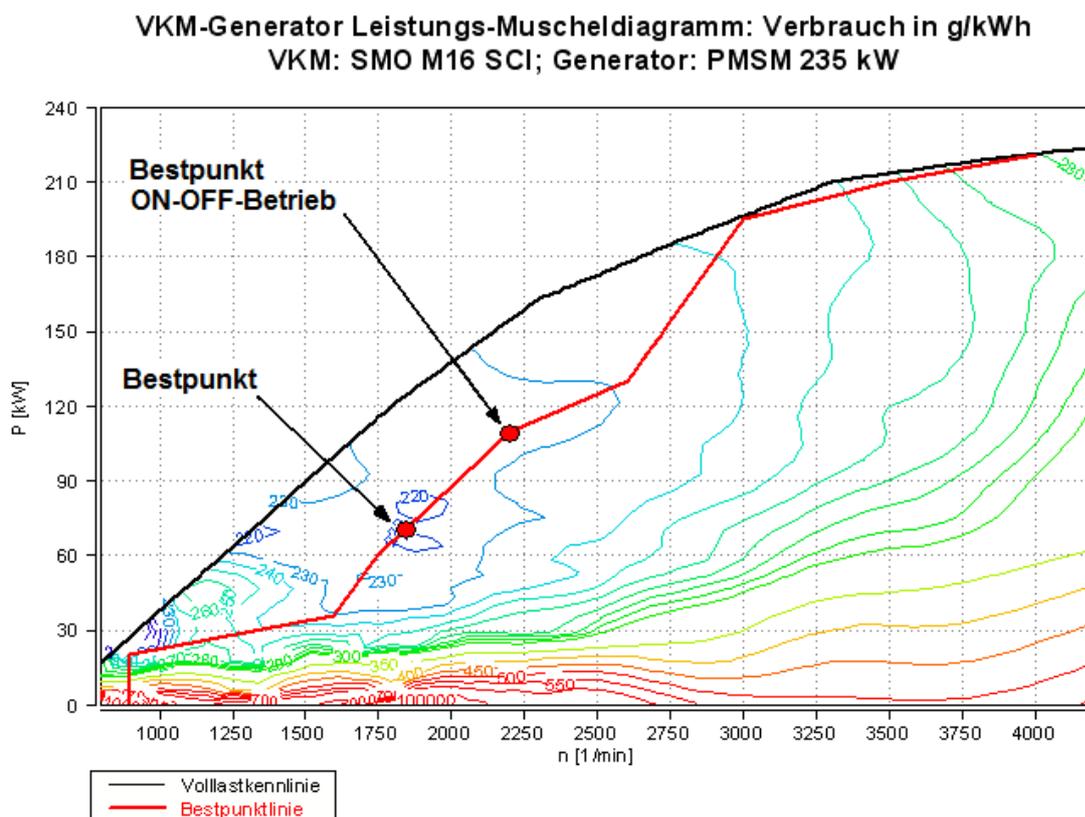


Abb. 62: Bestpunkt der Variante M16 SCI im Leistungs-Muscheldiagramm der Ladegruppe

Tab. 25: Bestpunkt der Ladegruppe mit der VKM M16SCI

VKM SMO-M16SCI	Bestpunkt	Bestpunkt ON-OFF-Strategie
Drehzahl im Bestpunkt n_{Best}	1850 U/min	2200 U/min
Drehmoment im Bestpunkt M_{Best}	367 Nm	478 Nm
Leistung im Bestpunkt P_{Best}	71 kW	110 kW

Betrachtet man nun die zeitliche Häufigkeit der Lastpunkte (Abb. 63), ergibt sich eine etwas andere Verteilung der Last als beim TCA (Abb. 52). So ist der Anteil unter 750 U/min welcher der abgestellten VKM und dem Auslaufen der VKM in den Stillstand

entspricht beim *SCI* mit ca. 22% um 6% niedriger als beim *TCA*. Des Weiteren wird der *SCI* nur 33% der Zeit im Bestpunkt betrieben. Dieser Wert liegt beim *TCA* bei knapp 38%. Der *SCI* wird im Volllastpunkt während 9,4 % der Zeit betrieben und es tritt eine relativ hohe Häufigkeit an Lasten zwischen Volllast und Bestpunkt auf. Mit 7% bei Volllast weist der *TCA* hier niedrigere Werte auf. Insgesamt ist daraus erkennbar, dass der Zeitanteil bei dem der *SCI* in wirkungsgradschlechteren Kennfeldbereichen betrieben wird, wesentlich höher ist als beim *TCA*. Der *TCA* weist den Vorteil von höheren Anteilen im Bestpunkt und bei abgeschalteter VKM auf. Daher ist die Lage des Bestpunktes wahrscheinlich der Haupteinflussfaktor für den höheren Verbrauch und wirkt sich stärker als der schlechtere Wirkungsgrad der VKM aus. Beim Betrieb des *SCI*-Motors mit ON-OFF Betrieb muss der Lastpunkt erhöht werden, da sonst der Betriebspunkt des Motors zu niedrig liegen würde und das Fahrzeug bei entladener Batterie die starken Beschleunigungen und hohen Geschwindigkeiten nur unzureichend bewerkstelligen könnte. Dies führt jedoch zu zusätzlichen Wirkungsgradnachteilen des *SCI*-Antriebes im ON-OFF-Betrieb.

Prozentuelle Häufigkeitsverteilung der Lastpunkte
im VKM M16 SCI Hybridbus

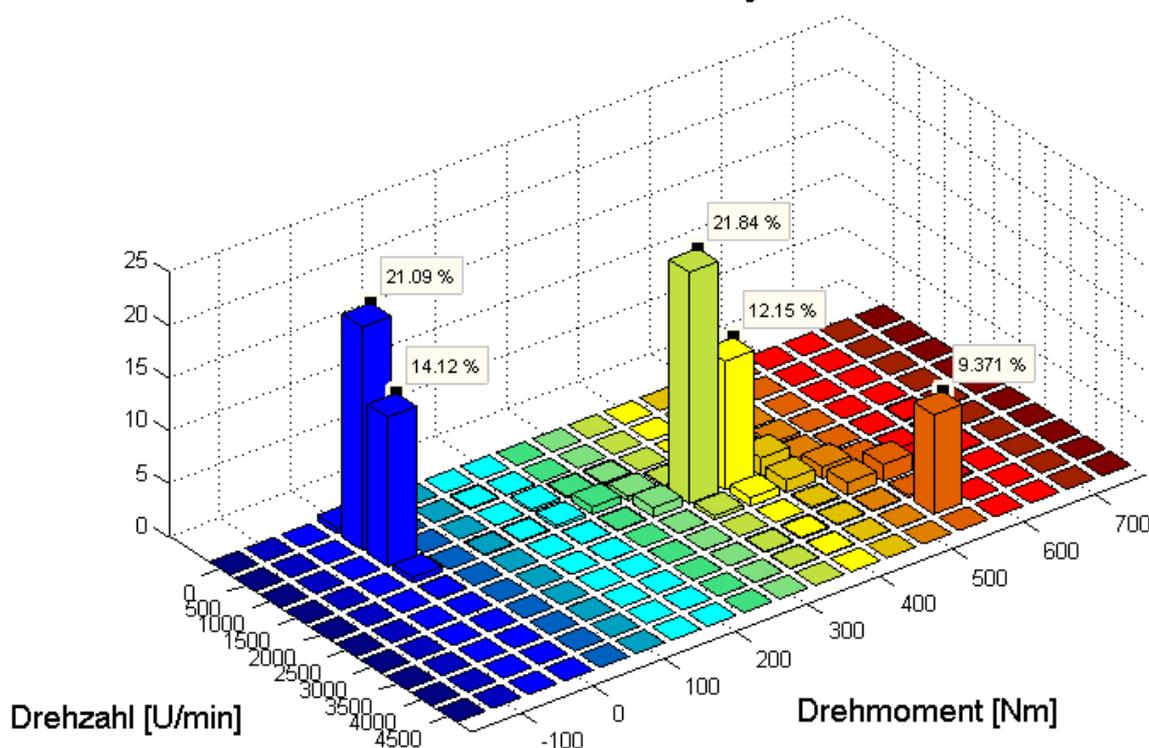


Abb. 63: Lasthäufigkeit der VKM M16SCI im Seriellen Hybridantrieb

6.2.5.3 Steyr Motors MO174V40

Der dritte untersuchte Motor ist der *SMO MO174V40* dessen Bestpunkt bei den Werten in Tab. 26 liegt. Dieser Punkt mit einer Leistung von 58 kW ist niedriger als die mittlere geforderte Leistung von 70 – 75 kW. Daher tritt der für den *M16 SCI* Motor beschriebene Effekt des höheren Zeitanteiles von Betriebspunkten mit schlechtem Wirkungsgrad bei diesem Motor noch stärker auf. Des Weiteren sind die Wirkungsgrade dieses Motors über das gesamte Kennfeld schlechter als bei den Vergleichsmotoren. Auch wenn man diesen Nachteil ausgleichen würde und trotz des etwas geringeren Motorengewichts, kann dieser Motor aufgrund der niedrigen Bestpunktleistung nicht die Verbräuche der anderen beiden Aggregate erreichen.

Tab. 26: Bestpunkt des Motors MO174V40

VKM	<i>SMO-MO174V40</i>
Drehzahl im Bestpunkt n_{Best}	2325 U/min
Drehmoment im Bestpunkt M_{Best}	238,2 Nm
Leistung im Bestpunkt P_{Best}	58 kW

Die ON-OFF-Betriebsstrategie ist bei diesem Motor nicht anwendbar, da die Bestpunktleistung zu niedrig ist. In Abb. 64 ist der Geschwindigkeitsverlauf dieser Strategie abgebildet und es ist ersichtlich, dass das Fahrzeug der soll-Geschwindigkeit nicht folgen kann (z.B. Sekunde 220).

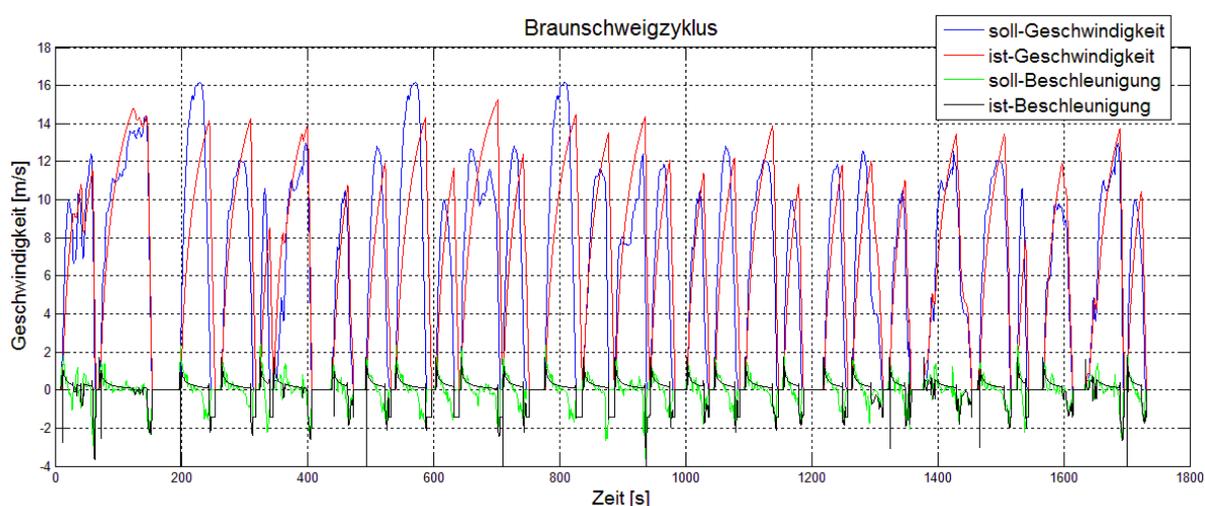


Abb. 64: Geschwindigkeitsdiagramm bei ON-OFF Betrieb des *MO174V40* Motors

7 Zusammenfassung

Hybridsysteme sind eine zunehmend attraktive und vom Markt angenommene Antriebsvariante für Fahrzeuge. Sie bieten vor allem die Vorteile niedriger Verbrauchs- und Emissionswerte. Können sie mit annehmbaren Kosten produziert werden, so werden sie sich immer mehr am Fahrzeugmarkt durchsetzen. Dies gilt insbesondere für das Nutzfahrzeugsegment, bei welchem die Gesamtkosten eines der entscheidenden Verkaufsargumente darstellen.

Geht man näher auf die Komponenten des Hybridfahrzeuges ein, so stellt sich heraus, dass der Ottomotor zwar das Antriebsaggregat mit dem höchsten Verbrauchseinsparungen ist. Der Dieselmotor kann jedoch aufgrund seiner besseren Wirkungsgrade die niedrigsten Gesamtverbräuche erreichen. Des Weiteren kann das Hybridsystem zu einer Vereinfachung der Abgasnachbehandlung führen. Um diesen Vorteil auch bei Nutzfahrzeugen nutzen zu können müssen bei der zukünftigen Gesetzgebung nicht nur die Motoren sondern das Gesamtfahrzeug bei der Emissionsbestimmung betrachtet werden. Im Bereich der Elektromaschine gibt es einige interessante Varianten. Wobei sich bei einem Vergleich die permanenterregte Synchronmaschine aufgrund der hohen Wirkungsgrade und Leistungsdichten als die geeignetste für Hybridanwendungen herausgestellt hat. Jedoch ist insbesondere die Asynchronmaschine ebenfalls von großer Bedeutung bei Hybridfahrzeugen.

Gerade auch im Nutzfahrzeugbereich gibt es diverse Entwicklungen von seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybriden. Hierbei ist vor allem der Stadtbus mit seinem transientem Fahrzyklus als Anwendung interessant. Beim Stadtbus kann der serielle Hybrid seine Vorteile optimal zur Geltung bringen. Er bietet das höchste Rekuperationspotential aller Hybridvarianten und ermöglicht eine freie Drehzahl- und Drehmomentenwahl der Verbrennungskraftmaschine. Des Weiteren kann er als einzige Variante mit Radnabenmotoren als alleiniger Radantrieb ausgeführt werden. Dies ermöglicht neue Fahrzeugarchitekturen und wesentliche Fortschritte in der Niederflurtechnik. Jedoch sind auch paralleler und leistungsverzweigter Hybrid interessante Varianten für den Stadtbus. Insbesondere der leistungsverzweigte Hybrid könnte niedrigere Verbräuche als der serielle Hybrid ermöglichen.

Um nähere Aussagen über den seriellen Hybridbus treffen zu können wurde dieser modelliert und simuliert. Dabei wurden aufbauend auf einem Stadtbus von *Viseon* verschiedene Varianten untersucht. Hierbei wurden 2 6-Zylinder und ein 4-Zylinder

Dieselmotor von *Steyr-Motors* sowie 2 unterschiedliche Betriebsstrategien untersucht. Diese Varianten wurden des Weiteren mit einem konventionellen Bus und einem dieselektrischen Bus verglichen. Die betrachteten Strategien sind der Trajektorienbetrieb, bei welchem der Motor möglichst entlang seiner Bestpunktlinie betrieben wird, und der ON-OFF Betrieb. Beim ON-OFF Betrieb wird der Motor abhängig vom Ladezustand der Batterie im Bestpunkt betrieben oder abgestellt. Der Hybridbus kann mit allen untersuchten Varianten betrieben werden, wobei sich beim leistungsschwächsten Motor *SMO-MO174V40* gewisse Einschränkungen zeigen.

Dabei bietet der 6-Zylinder Motor *SMO-M16TCA* mit ON-OFF Betrieb mit 69,98l/100km den niedrigsten Verbrauch. Dies bedeutet eine Verbrauchseinsparung von 28,3% gegenüber dem dieselektrischen Antrieb und 17,3% gegenüber dem konventionellen Antrieb. Der Trajektorienbetrieb ist mit 74,58 l/100km deutlich schlechter als der ON-OFF Betrieb. Aufgrund seiner engeren Kopplung von Leistungsbedarf und Leistungserzeugung ist er jedoch die üblichere Variante im Stadtbuss. Bei dieser Variante kann auch festgestellt werden dass, die Rekuperation mit 15,2% Einsparung den Hauptanteil an der Verbrauchsminderung gegenüber dem dieselektrischen Antrieb ermöglicht. Der Start-Stopp Betrieb ermöglicht nur eine Einsparung von 3,3%. Der 6-Zylindermotor *M16SCI* hat einen bei wesentlich niedrigeren Leistungen liegenden Bestpunkt als der Motor *M16TCA*. Dieser liegt hier nur bei 71 kW und damit nahe am Leistungsbedarf des Fahrzeuges. Dies führt zu wesentlich höheren Volllast- und niedrigeren Motorstoppanteilen und damit kombiniert mit dem etwas schlechteren Wirkungsgrad zu einem höheren Verbrauch. Der 4-Zylindermotor *MO174V40* ist nur mit Trajektorienbetrieb anwendbar. Aufgrund seines niedrigen Bestpunktes und der schlechteren Wirkungsgrade weist er den schlechtesten Verbrauch auf.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der serielle Hybrid eine sehr interessante Variante für den Stadtbuss ist, welche hohe Verbrauchseinsparungen ermöglicht. Vor allem der ON-OFF Betrieb stellte sich aufgrund seines niedrigen Verbrauches als eine interessante Variante heraus, welche weiter untersucht werden sollte. Jedoch hat auch der übliche Trajektorienbetrieb seine unbestreitbaren Vorteile. Bei der Dieselmotorauslegung für Hybridfahrzeuge muss ein besonderes Augenmerk auf die Leistungsanforderung der Verbraucher und die Lage des Bestpunktes des Motors gelegt werden. Weiter Verbesserungen des Gesamtsystems und höhere Wirkungsgrade erscheinen jedoch sinnvoll, um noch niedrigere Verbräuche zu ermöglichen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Katja Patzdernik et al., "Emissionstrends 1990-2007," Umweltbundesamt Österreich, Wien, 2009.
- [2] Jürgen Schneider et al., "Klimaschutzbericht 2009," Umweltbundesamt Österreich, Wien, 2009.
- [3] (2009, June) Hybrid Synergy Drive - Hybridfahrzeug-Die Definition der UNO. [Online]. www.hybridsynergydrive.com/de/un_definition.html
- [4] Eckhard Kirchner, *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben*. Springer-Verlag: Berlin, 2007.
- [5] Rafael Fölsche, *Dynamische Anforderungen an die Verbrennungskraftmaschine im Hinblick auf Dieselelektrische Antriebe - Diplomarbeit*. Graz: FH Joanneum Graz, 2009.
- [6] Peter Hofmann, *Hybridfahrzeuge, Vorlesungsskriptum*. Wien: TU-Wien, 2008.
- [7] Ralph Pütz et al., *Linienbus-Verkehrssysteme mit elektrischem Fahrantrieb*, verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Ed. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, 2007.
- [8] Martin Lamke, Frank-Detlef Speck, and Jürgen Hägele, "Modulare Nkw-Getriebefamilie von Handschalt- bis zu Hybridausführung," in *VDI-Bericht 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008.
- [9] Ferit Küçükay and Norbert Scholz, "Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosantriebe für Hybridfahrzeuge," in *Haus der Technik Band 80: Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge*, Heinz Schäfer, Ed. Renningen: expert verlag, 2007.
- [10] Stefan Kerschl and Gerald Lexen, "Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge," in *Haus der Technik Band 52 - Hybridfahrzeuge*, Burghard Voß, Ed. Renningen: expert-Verlag, 2005.
- [11] I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, and A. Engstle, "Der Hybridisierungsgrad

- kombinierter Traktionsantriebe als charakteristische Entwurfs- und Bewertungsgröße," in *VDI-Berichte 1963: Elektrisch-mechanische Antriebssysteme*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006.
- [12] Bernhard Geringer, *Verbrennungskraftmaschinen Vertiefung, Vorlesungsskriptum*. Wien: TU-Wien, 2005/06.
- [13] Bernhard Gerl, *Innovative Automobilantriebe*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2002.
- [14] Zi-Qiang Zhu and David Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4*, pp. 746-765, April 2007.
- [15] Klaus Hofer, *Elektrotraktion*. Berlin: VDE Verlag, 2006.
- [16] Wolfgang Amrhein, *Elektrische Antriebstechnik 1, Vorlesungsskriptum*. Linz: Johannes Kepler Universität Linz, 2004.
- [17] Gerhard Babel, *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [18] Erich Rummich, *Grundlagen der Elektrotechnik für MB und WI-MB, Unterlagen zur Vorlesung*. Wien: TU-Wien, 2004.
- [19] Harald Neudorfer, "Vergleich unterschiedlicher Antriebssysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge," in *Haus der Technik Band 80 - Neue elektrische Antriebskonzepte*, Heinz Schäfer, Ed. Renningen: expert Verlag, 2007.
- [20] Harald Neudorfer. (2007, Oct.) Hybridantriebe für Automobile - Chancen und Risiken. PDF-Dokument.
- [21] Wolfgang Amrhein, *Elektrische Antriebstechnik 2, Vorlesungsskriptum*. Linz: Johannes Kepler Universität Linz, 2004.
- [22] Otmar Bitsche and Günter Gutmann, "Systems for hybrid cars," *Journal of Power Sources*, no. 127, pp. 8-15, 2004.

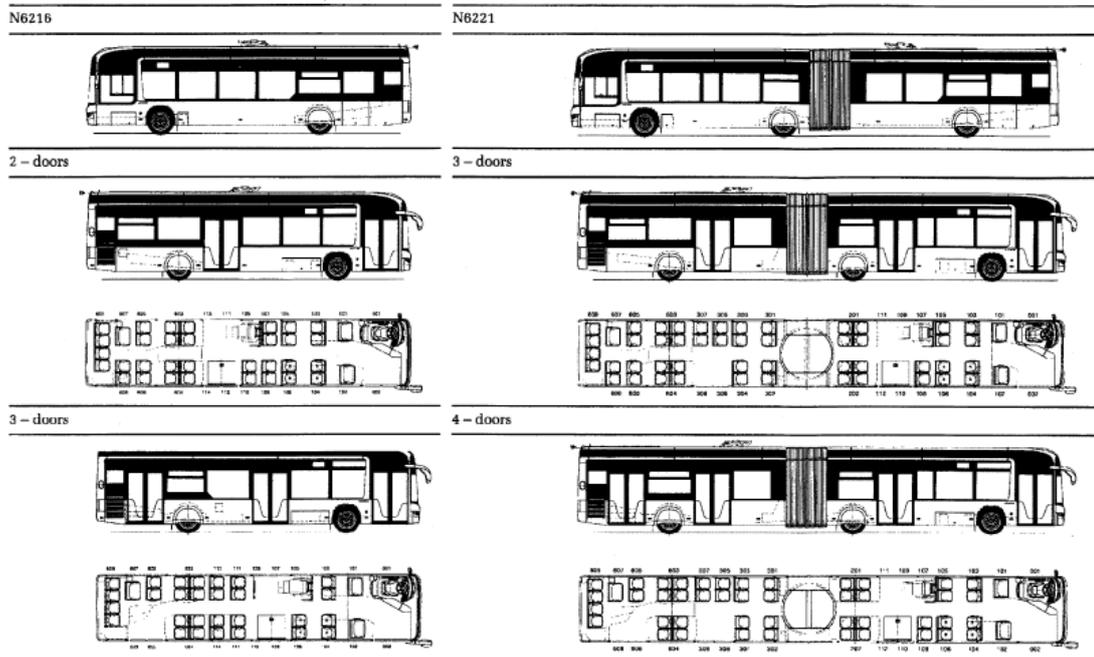
- [23] Andreas Schuster, *Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen, Diplomarbeit*. Wien: TU-Wien, 2008.
- [24] Friedrich Alfred Fördermayr, *Analysis of rechargeable energy storages for hybrid electric vehicles, Diplomarbeit*. Wien: TU-Wien, 2008.
- [25] Eckhard Karden, Serve Ploumen, Birger Fricke, Ted Miller, and Kent Snyder, "Energy storage devices for future hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 168, pp. 2-11, 2007.
- [26] M. Waidhas. (2004, Jan.) Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren. [Online]. www.zvei-be.org/veranstaltungen/ultracaps/
- [27] Andreas Jossen and Wolfgang Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Neusäß: Ubooks Verlag, 2006.
- [28] Thomas Neumann, "Die elektrifizierung des Antriebsstrages - Chancen und Herausforderungen für die Automobilindustrie," in *30. Wiener Motorensymposium*, vol. 697, Wien, 2009.
- [29] Arnold Lamm et al., "Lithium-Ionen-Batterie - Erster Serieneinsatz im S 400 Hybrid," *ATZ 07-08/2009 Jahrgang 111, Titelthema*.
- [30] (2009, June) HYBRID-AUTO.INFO. [Online]. www.hybrid-autos.info
- [31] Andreas Falk and Volker Wachenfeld, "DC/DC-Wandler: Schnittstelle zwischen Batterie und Antrieb," in *Haus der Technik Band 52 - Hybridfahrzeuge*, Burghard Voß, Ed. Renningen: expert Verlag, 2005.
- [32] S. Rinderknecht and U. Knödel, "Evolution und Zukunftspotential von PKW-Getrieben in Vorgelegebauweise," in *VDI-Berichte 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
- [33] U. D. Grebe, "GM's Advanced Propulsion Technology - Solutions for Efficiency Improvements and Energy Diversity," in *VDI-Berichte 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.

- [34] A. Moser, M. Schäfer, and F. Günter, "High Efficiency DualTronic - Effizienz Dynamik Komfort - Die ideale Ergänzung für Hybridantriebe," in *VDI-Berichte 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
- [35] D., Philipp, K. Heilenkötter and B. Stiebels, "Der Triebstrang des Touareg Hybrid," in *VDI-Berichte 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
- [36] (2009, Apr.) army-technology.com. [Online]. www.army-technology.com/projects/sep/
- [37] BAE Systems. (2007, Apr.) AFVI. [Online]. www.afvi.org/2007ConferencePresentations/presentations/03apr07/BAE_Systems_Presentation_AFVI_April_2007.pdf
- [38] Robb A. Barnitt, "In-Use Performance of Hybrid Electric, CNG and Diesel Buses at New York Transit," SAE, SAE 2008-01-1556, 2008.
- [39] BAE Systems. (09, Apr.) BAE Systems/Daimler bus fact sheet. [Online]. www.baesystems.com/EISProductSites/Hybriddrive/ProductLiterature/index.htm
- [40] Axel Michael Müller, "Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge - Systeme und elektrische Komponenten," in *Vortragsfolie Elektrotechnische Kolloquium, E-Antriebe*, Darmstadt, 2008.
- [41] ZF. (2009, Apr.) Mit ZF-Hybridgetriebe in die "Grüne Zone". [Online]. www.zf.com/corporate/de/press/press_releases_/products_press/products_detail_14538785.jsp
- [42] GM-Allison. (2009, Apr.) Leader in Hybrid Technology. [Online]. www.nctransit.org/documents/Alternative%20Fuel%20Technology_Allison.ppt
- [43] Peter K. Chiang, "Two-Mode Urban Transit Hybrid Bus In-Use Fuel Economy Results from 20 Million Fleet Miles," *SAE Technical Paper Series, 2007-01-0272*, Apr. 2007.
- [44] MathWorks Inc., "Simulink Help," 2008.

- [45] Robert Bosch GmbH, *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch 26. Auflage*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [46] Manfred Mitschke, *Dynamik der Kraftfahrzeuge Band A: Antrieb und Bremsung*. Berlin: Springer, 1995.
- [47] Oliver Vollrath, Neil Armstrong, Jürgen Schenk, Otmar Bitsche, and Arnold Lamm, "S400 BlueHYBRID - erstes Hybridfahrzeug mit Li-Ionen-Technologie," in *30. Internationales Motorensymposium - Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 697*, Hans Peter Lenz, Ed. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009.
- [48] Erich Hoepke, *Nutzfahrzeugtechnik - Grundlagen, Systeme, Komponenten*, Stefan Breuer, Ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [49] MathWorks Inc. (2008) Simulink Help: ODEs : Differential Equations.
- [50] (2009, Aug.) Wikipedia: Dormand-Prince method. [Online]. en.wikipedia.org/wiki/Dormand-Prince
- [51] Steyr Motors GmbH,. Steyr, 2009.
- [52] Anton Müller and Werner Weck, "Magnet-Motor-Systeme für Hybridantriebe mit hohen Anforderungen," in *Haus der Technik Band 52 - Hybridantriebe*, Burghard Voß, Ed. Renningen: expert Verlag, 2005.
- [53] Michael Fister, "Serienanforderungen an die elektrische Maschine im Hybridfahrzeug," in *Haus der Technik Band 52 - Hybridfahrzeuge*, Burghard Voß, Ed. Renningen: expert Verlag, 2005.
- [54] Michael Böckl and Bernat Rius-Sambeat, "Auslegung des elektrischen Antriebs und Auswirkung auf die Betriebsstrategie bei einem Parallelhybrid," in *Haus der Technik Band 52 - Hybridfahrzeuge*, Burghard Voß, Ed. Renningen: expert Verlag, 2005.

9 Anhang

9.1 Datenblatt VISEON Oberleitungsbus



Vehicle dimension		
N6216		N6221
5875 mm	Wheelbase	5105 / 5055 mm
11950 mm	Overall length	17950 mm
2550 mm	Overall width	2550 mm
3500 mm	Overall height	3500 mm
11090 mm	Min. turning diameter	12000 mm
General dimensions		
2076 mm	Track, front	2076 mm
1826 mm	Track rear	1826 mm
2700 mm	Overhang front	2700 mm
3375 mm	Overhang rear	3375 mm
7°	Angle of approach in front/ rear	7°
1200 mm	door width	1200 mm
1900 mm	door height	1900 mm
2320 mm	Interior height	2320 mm
340 mm	Entrance step height front	340 mm
340 mm	Entrance step height rear	340 mm
370 mm	Floor height (of ground)	370 mm
280 mm	Ground clearance	280 mm
Technical loads		
13500 kg	Weight of unloaded vehicle	19500 kg
20200 kg	Permissible total weight	33200 kg
7200 kg	Perm. front axle load (tech.)	7200 kg
-	Perm. middle axle load (tech.)	13000 kg
13000 kg	Perm. rear axle load (tech.)	13000 kg
Number of seats and standees		
~ 35 +1	Seated passengers	~ 51 +1
~ 55 at 8 person/m2	Standing places	~ 110 at 8 person/m2
~ 90	Total	~ 160
! Subject for technical modifications and amendments !		



Drive Train		
Traction equipment		
	· Traction Motor	one 3 phase asynchronous motor up to 240kW
	· Position of Traction motor	left behind 2nd axle , drives 2nd axle
	· Traction System:	Trolleybus traction system with IGBT-Technology
	· Different Brands possible:	Vossloh-Kiepe, Bombardier
Axles		Steering
	· Type	low floor rigid axles
	· Model	MAN
	· Brake type	auto ventilated disc, pneumatic
		· Type
		ZF 8098 Servocom; hydraulic
		· Steering Pump
		permanently driven ac-motor
Wheels		Suspension
	· Wheel size	275 / 70 R 22.5
		· Type of spring
		Full air suspension with ECAS leveling system
Body configuration		
Framework	Framework of special bus steel - quality M22. Together with cataphoresic covering it gives highest corrosion resistance	
Exterior paneling	The vehicle is paneled with 1 mm Zn-coated sheet metal on both sides	
Interior paneling	Wheel housings are of stainless steel sheet metal. Front and rear walls are made of polyester and are glued onto framework.	
Passenger doors	2 - 4 double doors right side, actuated via door control. Modular construction of the door control with correspondence to the master-slave-system. Doors are high voltage electrically insulated	
Glazing	· The single piece windscreen is made of color laminated safety glass and glued - in · The back window pane is a single - piece, glued - in, made of thermally insulated and color safety glass	
Side windows	· Side window panes are glued - in, made of thermally insulated and color safety glass · The driver's compartment window pane is heated for rearview mirror sight, the sliding part is in horizontal direction	
Bus interior	· The driver's cabin is closed from the back with transparent upper glazing · Installed VDV dashboard with clearly arranged instruments and switches. Space for 2 radio devices in DIN size is foreseen · The steering wheel is adjustable for inclination and height · Roller blind on entire front window, also on drivers side window · Vertical interior protection with partially floor covering up to seat mounting, covering up to window rail in laminated fiberboard · Standee surface along the entire bus on low floor level. Passenger in water-resistant plywood, covering as from anti-slipping plasticized PVC material	
Seats / Stanchions	· Drivers Seat: pneumatic suspension, adjustable in height and inclination, with headrest and adjustable backrest, moving forward-back, seat-belt · Passengers seats: plastic bucket seats with upholstery seating cushion for high comfort · Stanchions are throughout entire bus, contrast color, variable request and information buttons, so as provision for ticketing basements (tbd.)	
Other equipment	Fire extinguisher, first aid kit, service kit, safety hammers for glazing, rear view mirrors	
Bus exterior	· Front and rear-end, wheel covers in sheet molded compound SMC · outside rearview mirrors, heated, electrical adjustable · Sideflip-arm and easily de- and remountable	
Electric equipment	· integrated CAN-Bus System, 24-Volts, integrated lightning elements installed in bus ceiling	
Ventilation/ Heating	· Vent channels integrated in bus ceiling, roof vent and adequate opening windows	
Options	· climatization and heating, waterbased convection heaters, heating vents, A/C w/ o heating, System in various combinations (tbd.) · different door systems, layouts, seating/ standee combinations (tbd.)	

9.2 Daten der Steyr Motors Dieselmotoren

9.2.1 Datenblatt

Tab. 27: Datenblatt der untersuchten Dieselmotoren

Engine type	M16 TCA	M16 SCI	MO174V40
Cylinder	6	6	4
Application	LDV, HDV	HDV	
Displacement l	3,2	3,2	2,13
Bore / Stroke mm	85 / 94	85 / 94	85 / 94
Max. Power kW/HP	200 / 272	220 / 300	125 / 169
at speed 1/min	4000	4000	4000
Max Torque Nm	500	680	335
at speed 1/min	2400	2200	2550
Weight dry kg	260	290	(258kg Marine) 200
Min. fuel. cons. g/kWh	205	205	210

9.2.2 Steyr Motors M16TCA

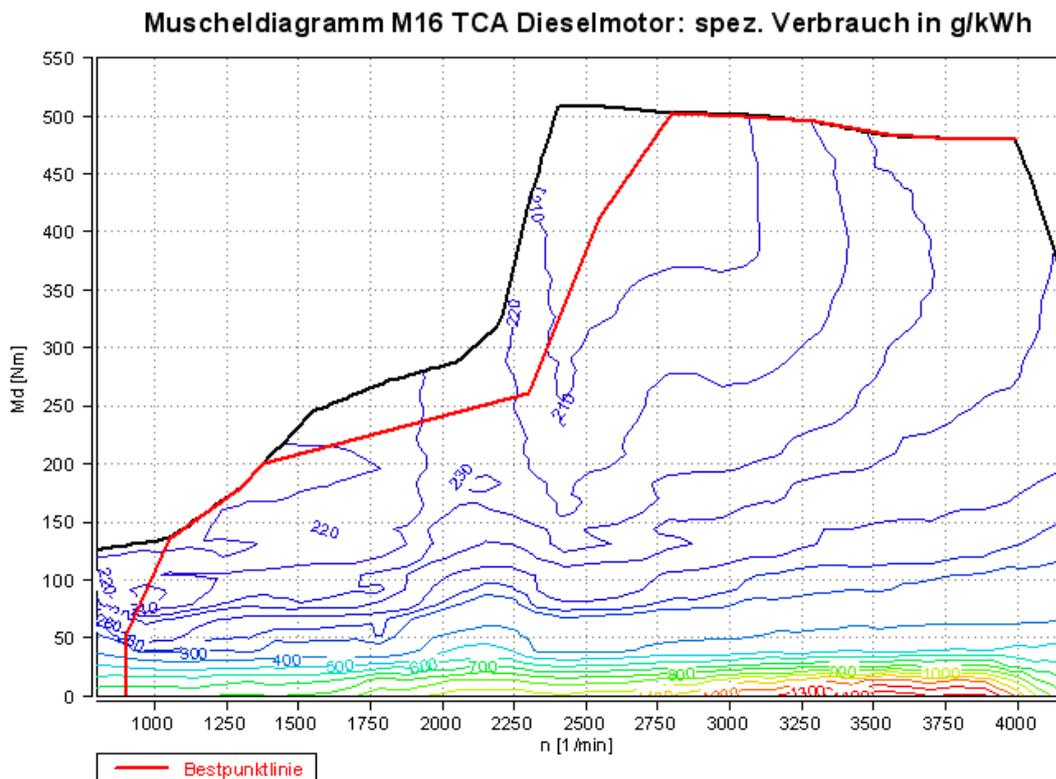


Abb. 65: Muscheldiagramm des Motors SMO-M16TCA

Leistungs-Verbrauchskennfeld M16 TCA Motor: Verbrauch in kg/h

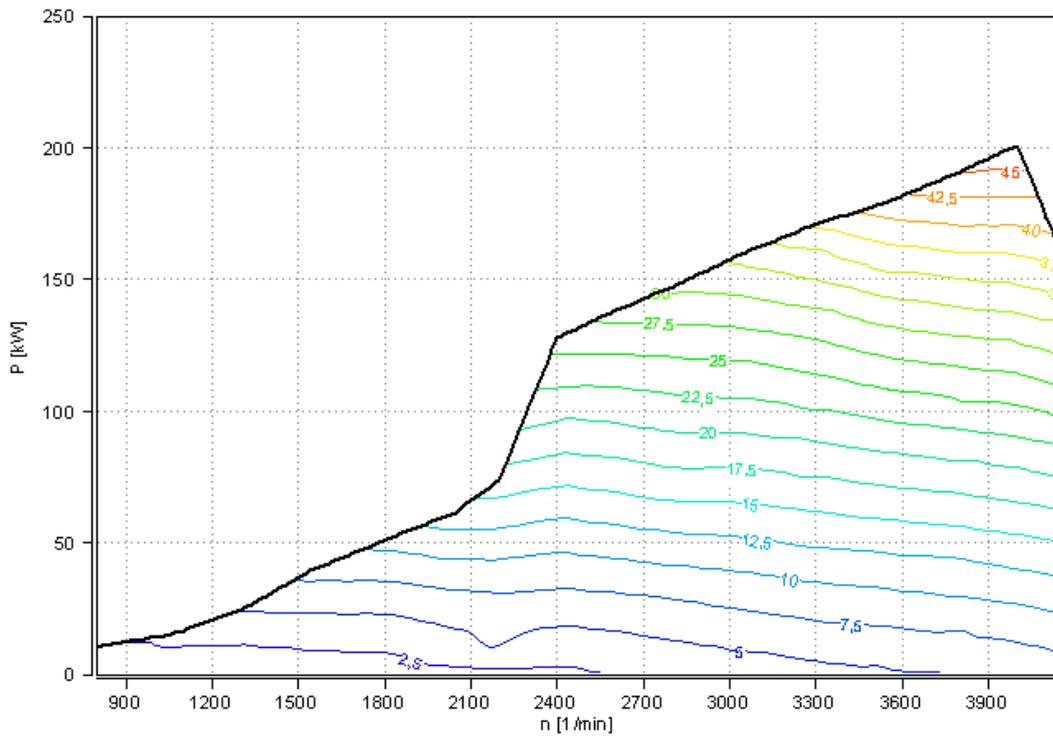


Abb. 66: Verbrauchskennfeld des Motors SMO M16 TCA

Willans-Linien M16 TCA Dieselmotor bei konstanter Drehzahl in U/min

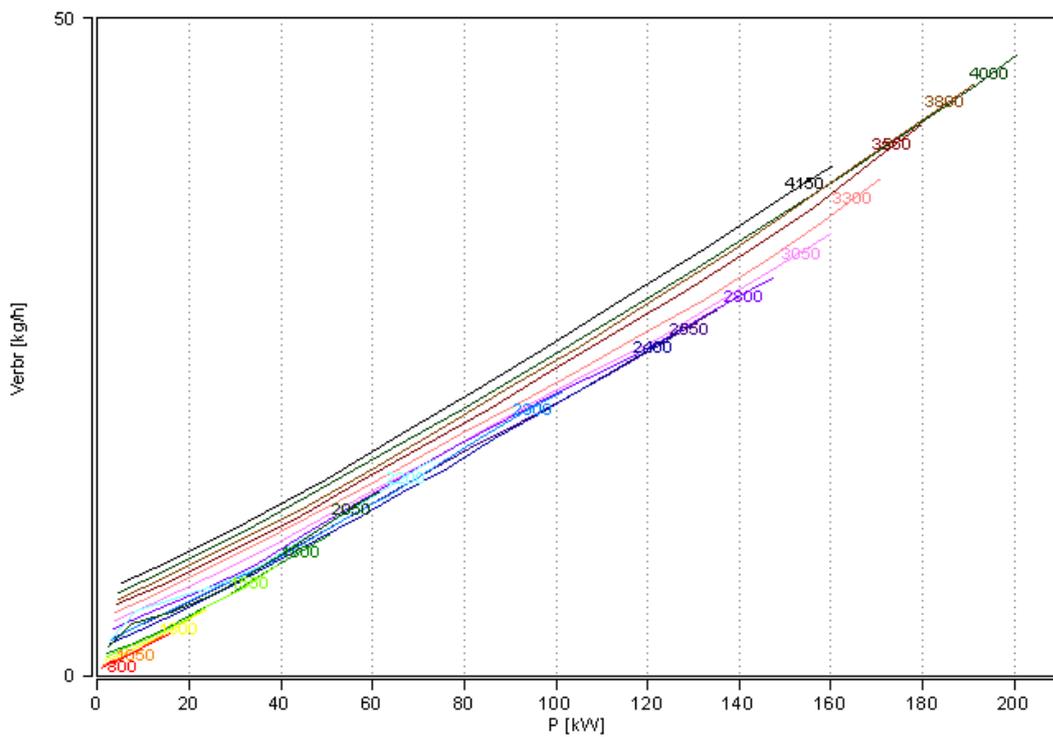


Abb. 67: Willans-Linien des Motors SMO M16 TCA

9.2.3 Steyr Motors M16SCI

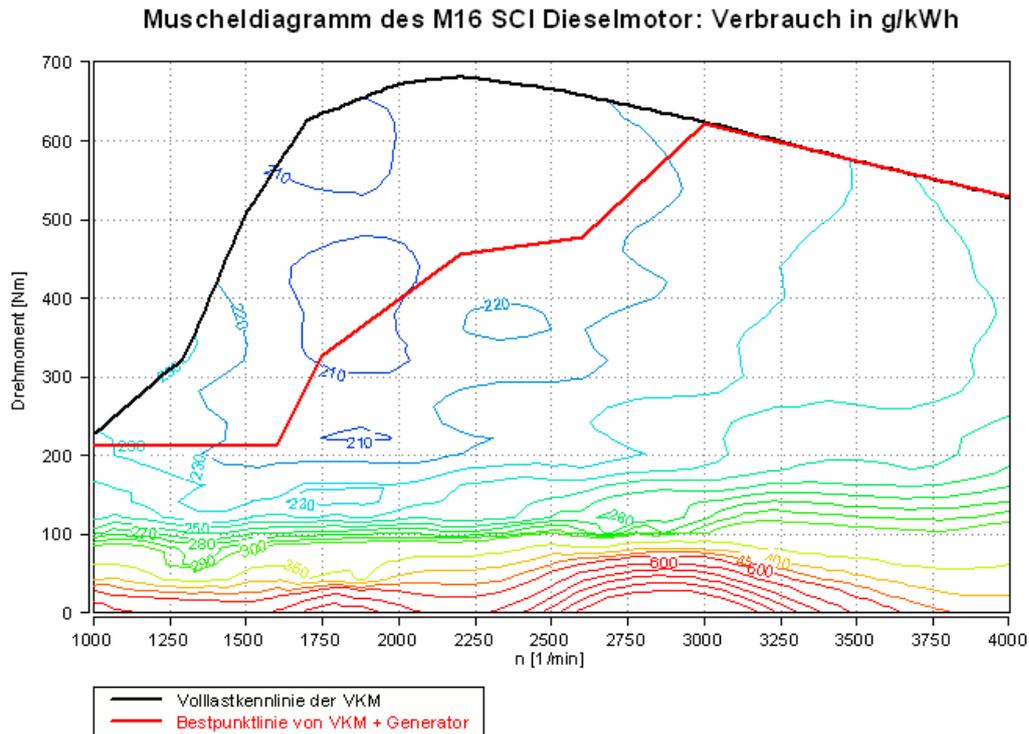


Abb. 68: Muschediagramm des Motors *SMO-M16SCI*

9.2.4 Steyr Motors MO174V40

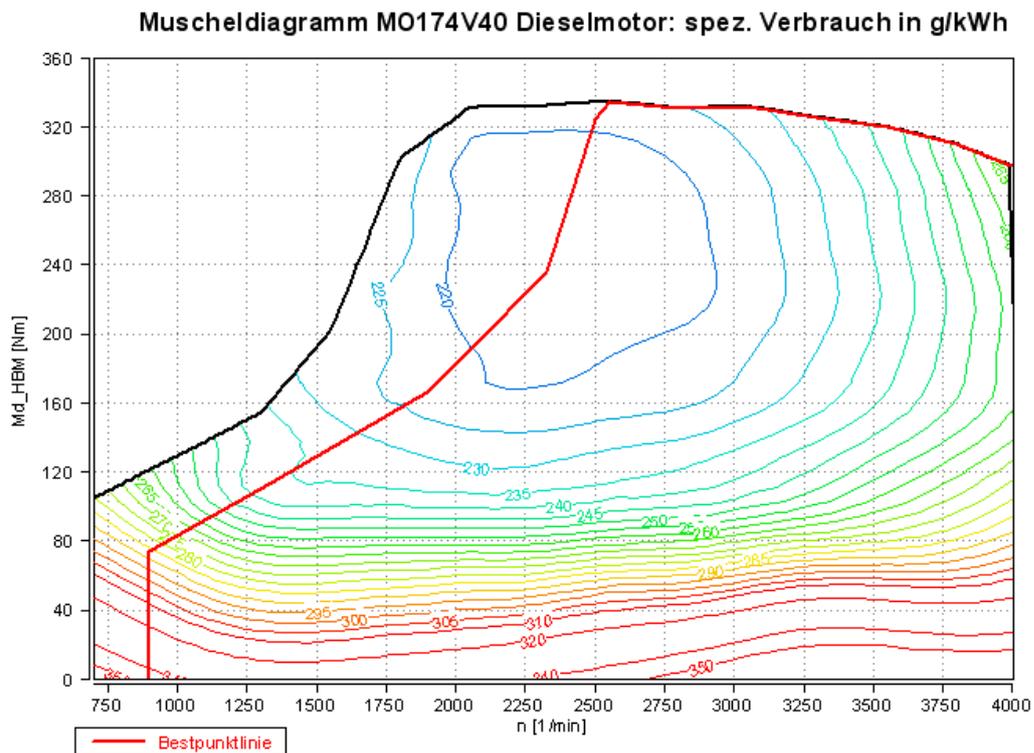


Abb. 69: Muschediagramm des Motors *SMO-MO174V40*

9.3 Generatordiagramme

9.3.1 Generator 205 kW

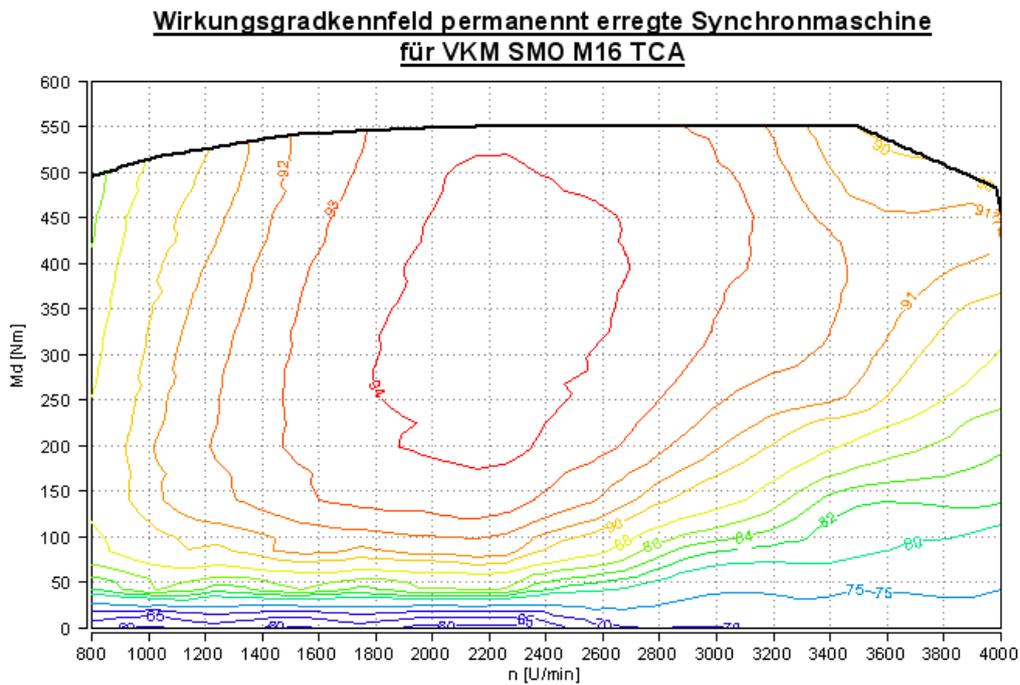


Abb. 70: Wirkungsgradkennfeld des PMSM-Generators mit 205 kW

9.3.2 Generator 234,6 kW

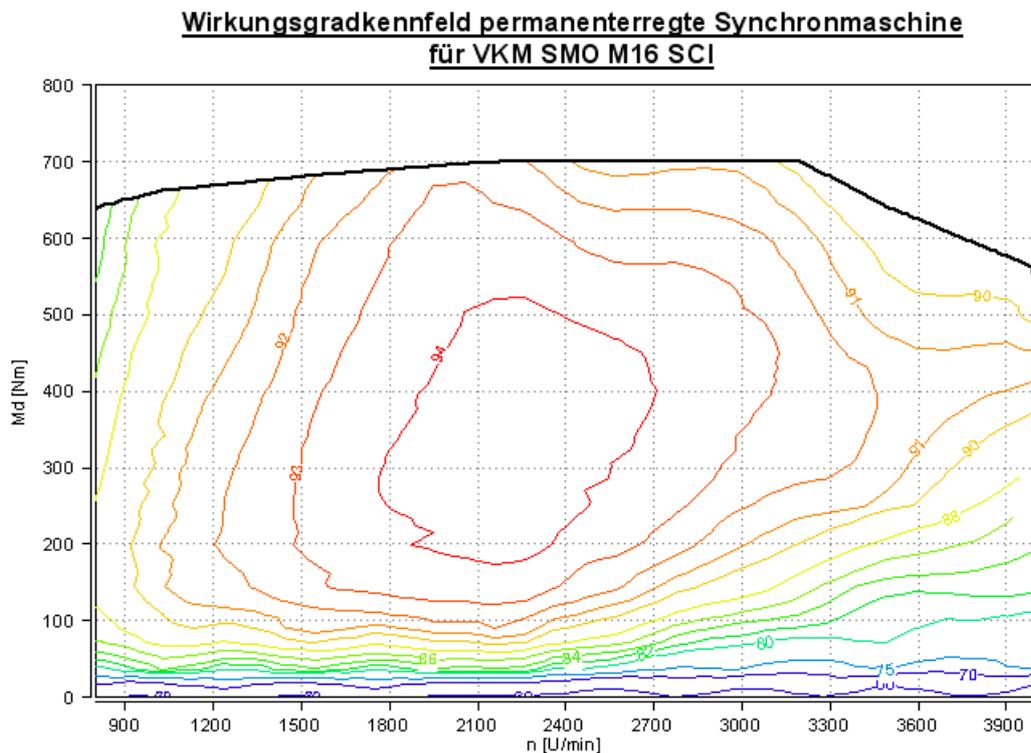


Abb. 71: Wirkungsgradkennfeld des PMSM-Generators mit 234,6 kW

9.4 Wirkungsgradkennfeld des Traktionsmotors

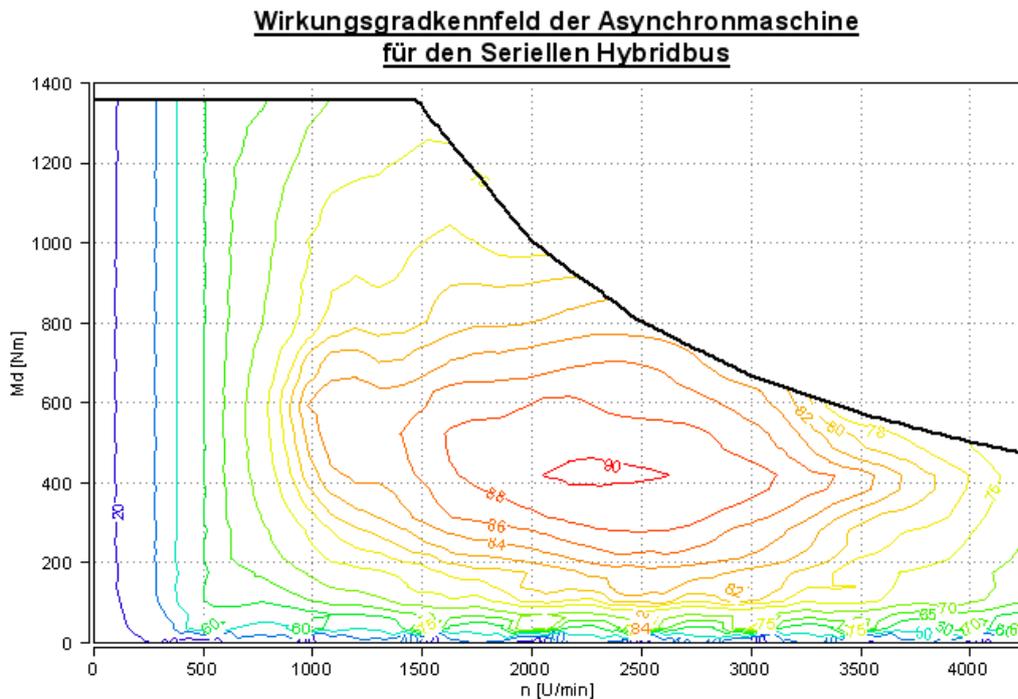


Abb. 72: Angenommenes Wirkungsgradkennfeld des Traktionsmotors

9.5 Bestpunktlinien der Ladegruppen

9.5.1 SMO M16 TCA + Generator 205kW

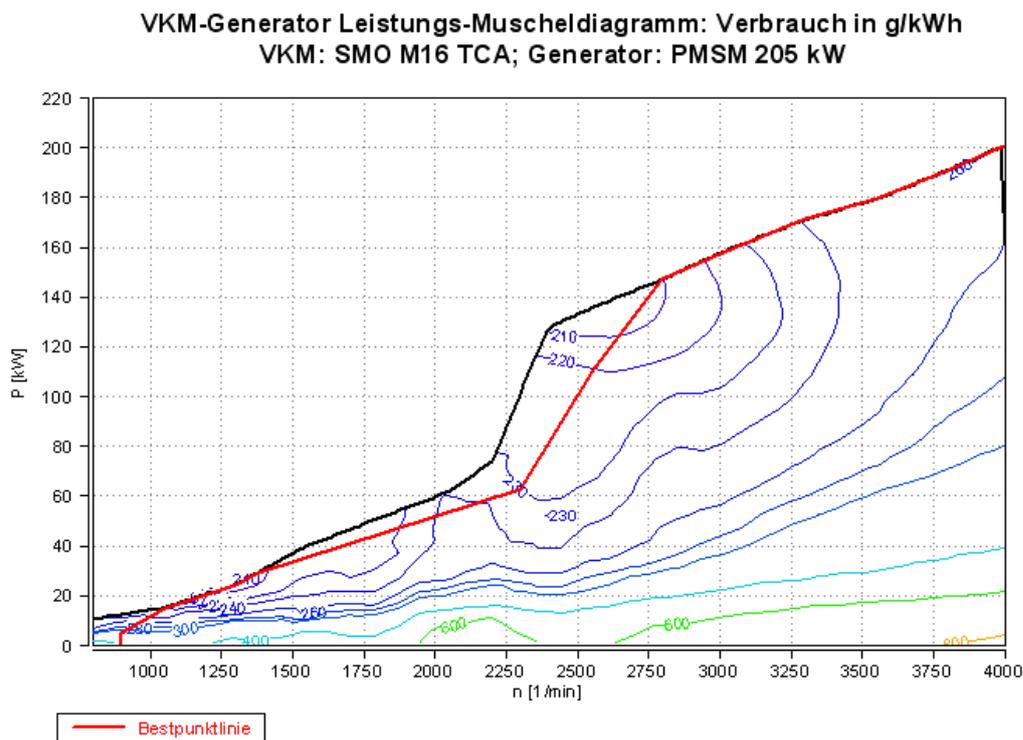


Abb. 73: Leistungs-Muscheldiagramm der Ladegruppe mit der VKM M16 TCA

9.5.2 SMO M16 SCI + Generator 234,6 kW

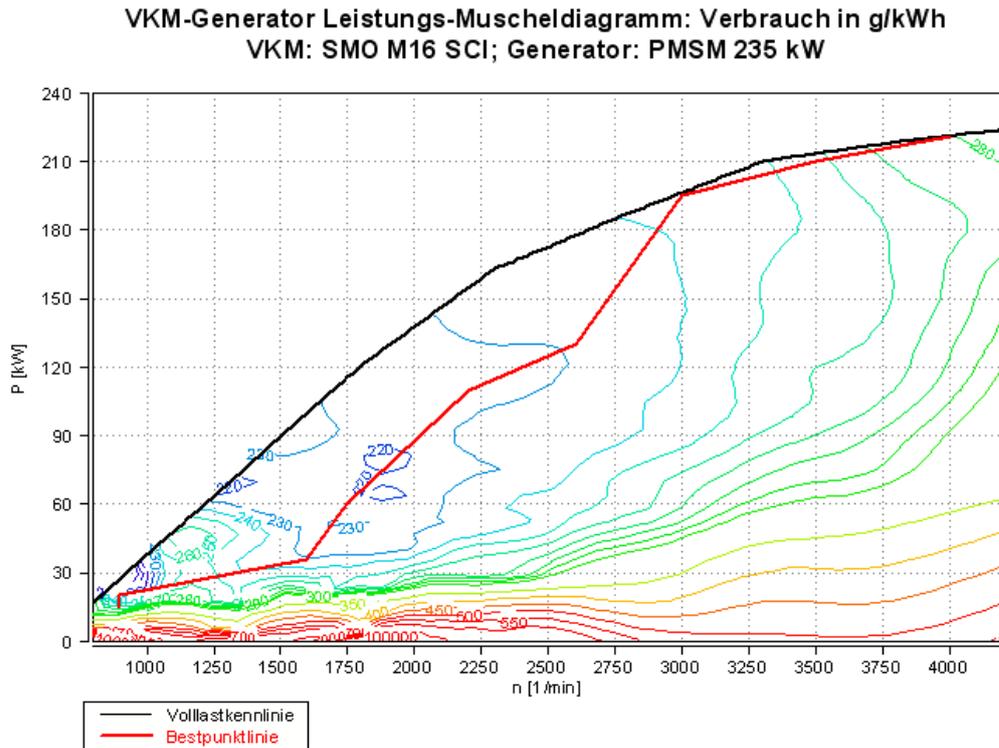


Abb. 74: Leistungs-Muscheldiagramm der Ladegruppe mit der VKM M16 SCI

9.5.3 SMO MO174V40 + Generator 205 kW

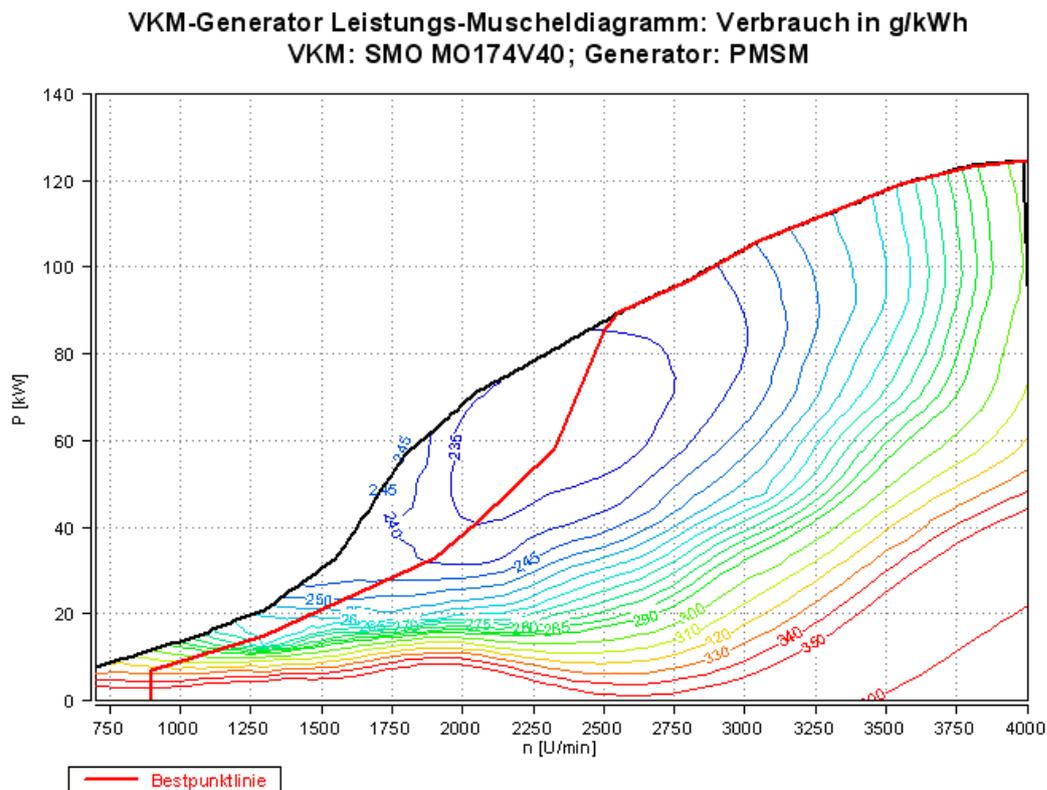


Abb. 75: Leistungs-Muscheldiagramm der Ladegruppe mit der VKM MO174V40

9.6 m-File der Eingangsgrößen des M16 TCA Hybridmodells

```
clc
```

```
load Braunschweig.mat
load TCA_Bestpunktlinie.mat
load TCA_VKM_Volllast_Moment.mat
load TCA_Verbrauch.mat
load TCA_Reibmoment.mat
load TCA_Eta_EM1.mat
load TCA_Eta_EM2.mat

%Generator EM1:
    %mittlerer Wirkungsgrad [-]:
    EtaEM1 = 0.91;
    %Maximaldrehzahl [U/min]:
    nmax_EM1 = 4200;
    %Maximalleistung [W]:
    Pmax_EM1 = 205000;
    %bewertete Drehzahl [U/min]:
    nbew_EM1 = 3559;
    %maximales Moment [Nm]:
    Mmax_EM1 = 550;

    %Batterie:
    EtaBat = 0.95;

    % elektrische Übertragung
    EtaUe = 0.99;

%Verbrennungskraftmaschine:
    %Bestpunkt:
    nBest = 2550;
    Mbest = 412;
    Pbest = Mbest*nBest*pi/30;
    %Maximalleistung [W]:
    Pmax_VKM = 200000;
    nmax_VKM = 4000;

%Batteriestatus:
    %max. Energieinhalt [J]:
    Emax = 95.04*10^6;
    %max. Lade/Entladeleistung [W]:
    Pmax_Batt = 200000;
    %State of charge - Ladezustand:
    SOCmax = 0.6;
    SOC_o = SOCmax - 0.0125;
    SOCmin = 0.55;
    SOC_u = SOCmin + 0.0125;
    SOC_u_Entl = SOCmin + 0.0125;
    SOC_m = (SOCmax + SOCmin)/2;
    SOCinit = 0.5875;

%Elektromotor EM2 SKODA 7ML 3550 K/4:
    %Wirkungsgrad [-]:
    EtaEM2 = 0.8;
    %Maximaldrehzahl [U/min]:
    nmax_EM2 = 4225;
    %Maximalleistung [W]:
    Pmax_EM2 = 210000;
```

```

%Nenn Drehzahl [U/min]:
nbew_EM2 = 1477;
%maximales Moment [Nm]:
Mmax_EM2 = 1358;

%Achsantrieb:
%Wirkungsgrad:
EtaAchs = 0.855;
%Uebersetzung Reduktionsgetriebe:
i_Red = 1.85;
%Uebersetzung Achsgetriebe:
i_Achs = 5.74;
%Gesamtuebersetzung:
i_Ges = i_Red*i_Achs;

%Fahrzeugdaten Neoplan N6216 (Standardfahrzeug):
%Leergewicht [kg]:
mLeer = 13970;
%maximales Gesamtgewicht [kg]:
mMax = 20550;
%Gesamtgewicht bei halber Beladung [kg]:
mges = (mLeer + mMax)/2;
%Massentraegheitsmoment der VKM (ESW 200kW Motor) [kgm2]:
J_VKM = 0.2424;
%Massentraegheitsmoment der EM1 (Generator ISKRA 170kW):
J_EM1 = 0.52;
%Massentraegheitsmoment der EM2:
J_EM2 = 3.12;
%Massentraegheitsmoment des Abtriebs:
J_Abt = 43.25;
%Reifen: 275/70 R22,5 X INCITY von Michelin:
%Belasteter Halbmesser [m]:
r_Rad = 0.452;
%Rollwiderstand:
fRoll = 0.01;
%Luftwiderstand [-]:
cW = 0.7;
%Gesamthoehe [m]:
hFz = 3.5;
%Bodenfreiheit [m]:
fFz = 0.28;
%Fahrzeugbreite [m]:
bFz = 2.55;
%Querspantflaeche [m2]:
A = (hFz-fFz)*bFz;
%Luftdichte [kg/m3]:
rhoLuft = 1.2041;

%Nebenaggregate [W]:
P_Neben_on = 20000;
P_Neben_off = 8000;

%Betriebsstrategie:
%Startdrehzahl [U/min]:
n_Start = 900;
%maximale Leistungsabgabe [W]:
P_Gas_max = 200000;
%maximale Bremskraft [N] bezogen auf das Fahrzeug:
F_Brems_max = 100000;
%Leerlaufdrehzahl [U/min]:
nLeer = 900;

```

```
%Drehzahlregler:  
  KP_n = 0.026;  
  KI_n = 0.0026;  
  KD_n = 0.;  
  TD_n = 0.;
```

```
%Fahrermodell:  
  KP = 0.4;  
  KI = 0.03;  
  KD = 0.005;  
  TD = 0.01;
```

```
%Kraftstoffdaten Diesel nach BGI. II Nr.417/2004 "Aenderung der  
Kraftstoffverordnung" Anhang VII:
```

```
%Dichte des Dieselkraftstoffes bei 15°C [kg/l]:  
rhoDiesel = 0.832;  
%unterer Heizwert Diesel [J/g]:  
Hu_Diesel = 42.3*10^3;
```

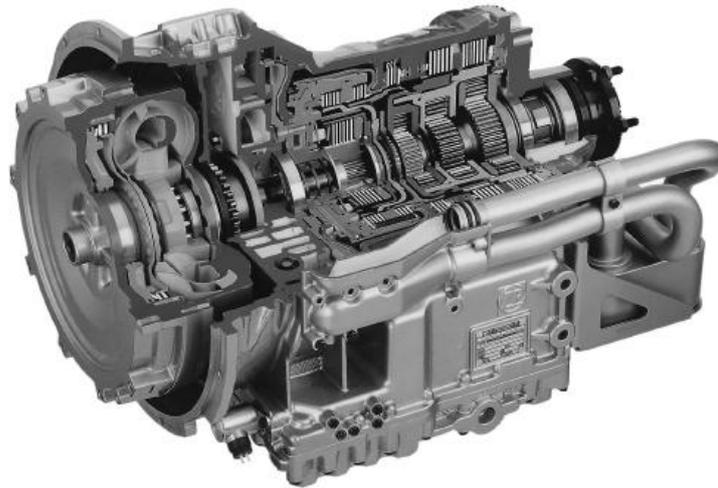
9.7 Datenblatt des Automatgetriebes HP 502 C von ZF



HP 502 C
 HP 592 C
 HP 602 C

ZF-Ecomat 2 / ZF-Ecomat 2 plus
 + EST 146 / EST 147 (Bus)

ZF-Automatgetriebe für Stadt-, Linien- und Reisebusse



- Durch den Einsatz der elektronischen Schaltautomatiken (EST146/EST147) bietet das System ein Höchstmaß an Schaltkomfort, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer – mit oder ohne Integration in Fahrzeug-CAN-Systeme
- Kommunikationsfähigkeit der Schaltautomatik mit elektronischen CAN-Systemen (SAE J 1939 und anderen)

Bau- reihe	Gang- zahl	Max. zul. Eingangs- drehzahl [min ⁻¹]	Max. Masse (t) bei Motomoment DIN 70020/ISO 1585 [Nm]			Übersetzungen							Masse ²⁾ [= kg]
			Stadtbus	Gelenkbus	Reisebus	Gang							
						1	2	3	4	5	6	R	
HP 502 C	5	2 800	19 t	28 t	26 t	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	–	4.84	355
	6	2 800 ¹⁾	1100 Nm	1050 Nm	1100 Nm	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	0.59		
HP 592 C	5	2 800	24 t	28 t	26 t	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	–	4.84	357
	6	2 800 ¹⁾	1250 Nm	1250 Nm	1250 Nm	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	0.59		
HP 602 C	5	2 650	24 t	28 t	26 t	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	–	4.84	368
	6	2 650 ¹⁾	1600 Nm	1600 Nm	1600 Nm	3.43	2.01	1.42	1.00	0.83	0.59		

1) bei $i = 0,59$; $n_{max} = 2\,000\text{ min}^{-1}$

2) Getriebe mit Retarder und Ölkühler (ohne Öl)
 Ölefüllmenge bei Erstbefüllung: ca. 30 dm³