

SIMULATION VON HYBRIDFAHRZEUGANTRIEBEN

W.-R. Canders, A. B. Asaf Ali

Die vorgestellten Ergebnisse sind Kurzfassungen von Vorträgen zum „e-motive Expertenforum“ 07./08. September 2011, Aachen und zur HDT Tagung „Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge“, 29. November 2011.

1 EINLEITUNG

Neben den drei Hauptstrukturen eines Hybridfahrzeugantriebsstranges, wie serieller, paralleler und leistungsverzweigender Antriebsstrang, gibt es in jeder dieser Hauptstrukturen weitere Untervarianten, deren Zahl besonders bei der parallelen Struktur sehr ausgeprägt ist. Deshalb wurden innerhalb der parallelen Struktur 4 Untervarianten AT1 bis AT4 (**Bild 1.1**) mit unterschiedlichen Maschinen nach Tabelle 1.1 bestückt und mit Hilfe einer energetischen Gesamtfahrzeugsimulation verglichen.

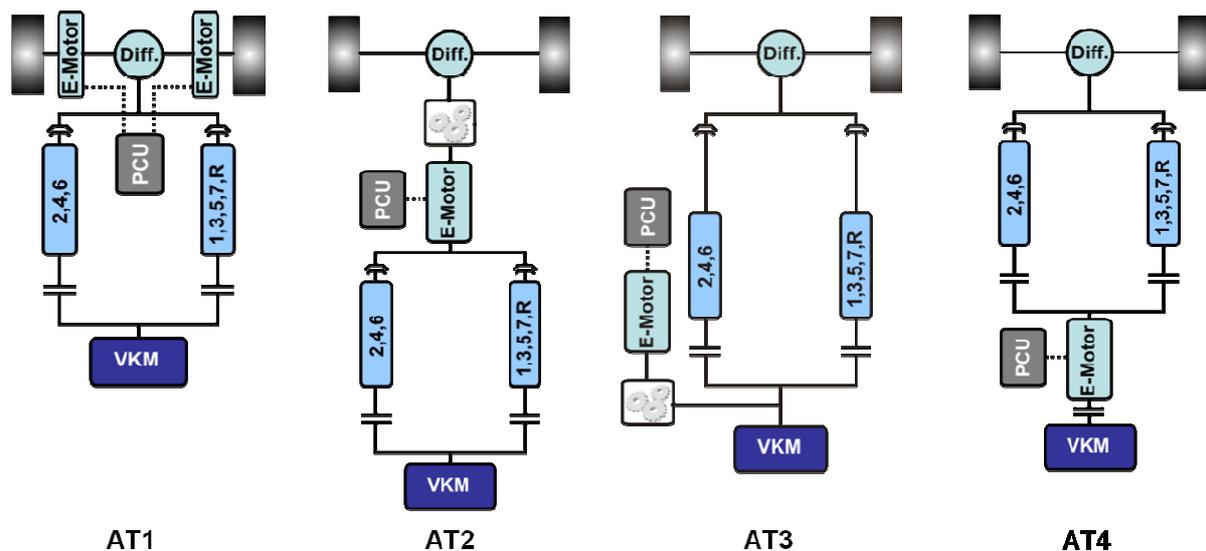


Bild 1.1: Varianten des Antriebsstranges für ein Parallelhybridfahrzeug mit 6-Gang-Doppelkupplungsgetriebe

Die Untersuchungen an der parallelen Antriebsstrangstruktur wurden zusammen mit dem Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Universität Hannover (IAL: Schwerpunkt Maschinenauslegung, IMAB: Schwerpunkt Simulation) im Rahmen des Projektes High Speed vs. High Torque (FVV/FVA 601013) durchgeführt.

Im Gegensatz hierzu ist eine serielle Struktur vergleichsweise einfach (**Bild 1.2**). Sie wurde aufgrund der Erkenntnisse aus den Untersuchungen der parallelen Strukturen beleuchtet und könnte im Stadtverkehr eine sinnvolle Alternative darstellen.

Voraussetzung für systemübergreifende Betrachtungen sind gleiche Fahrzeugdaten, gleiche Beschreibungen der Antriebsmaschinen, gleiche Verlustmodelle und eine gleiche Simula-

tionsmethodik. Ebenso muss auf einen repräsentativen Fahrzyklus zurückgegriffen werden können. Dies war hier der „Neue Europäische Fahrzyklus, NEFZ“, der einen Stadtverkehr mit relativ geringer Dynamik und einem relativ kleinen Hochgeschwindigkeitsanteil ($v_{max}=120$ km/h) darstellt und der allgemein als Vergleichsfahrzyklus herangezogen wird. Jedoch zeigten auch Simulationen mit dem FTP 75 Zyklus (höhere Dynamik, jedoch geringere Höchstgeschwindigkeit) keine erkennbare Änderung der Relationen in den Ergebnissen.

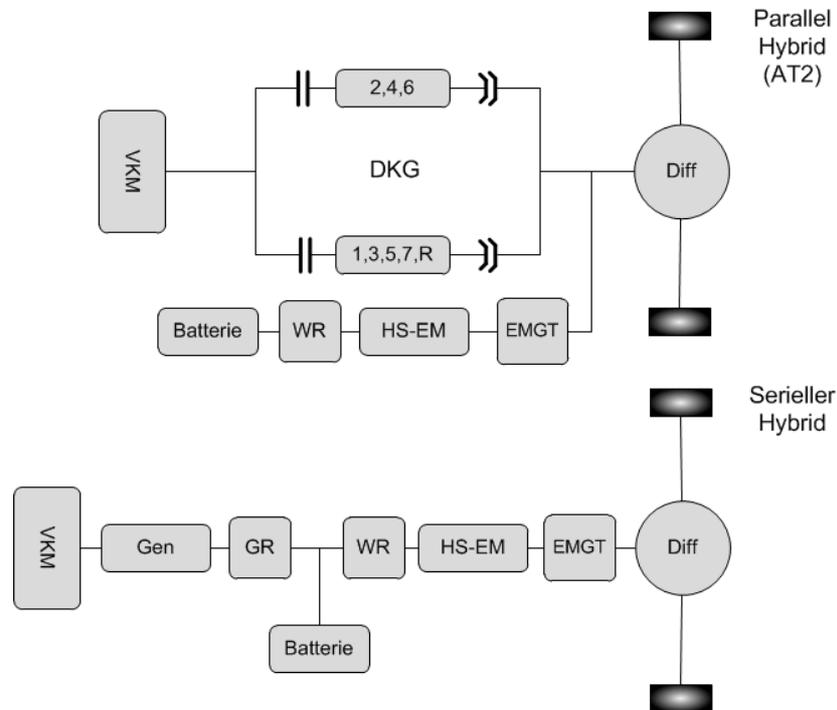


Bild 1.2: Übergang von der parallelen (AT2) auf die serielle Antriebsstrangstruktur

2 ENTWÜRFE VON E-MASCHINEN

Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die insgesamt entworfenen Maschinen.

Tabelle 1.1: Entworfenen Maschinen

Antriebsstrang	E-Maschine
AT1	<ul style="list-style-type: none"> • PMSM mit Zahnspulenwicklung (TCW) • PMSM mit Doppelstator und Zahnspulenwicklung
AT2 & AT3	<ul style="list-style-type: none"> • PMSM mit verteilter Wicklung • ASM
AT4	<ul style="list-style-type: none"> • PMSM (verteilte und Zahnspulenwicklung) • Elektrisch erregte SM • ASM

Die Maschinen wurden am IMAB und am IAL entworfen. Neben der Auslegung wurden auch die Wirkungsgradkennfelder und ggfs. auch die Schleppverluste berechnet, die neben den Konstruktionsparametern, wie Gewicht und Trägheitsmoment, in die Simulation eingehen.

Ebenso wurde für jede Maschine ein thermisches Modell erstellt, das in der Simulation mitgerechnet wird.

Die **Bilder 2.1** und **2.2** zeigen als Beispiel für die verwendete Entwurfstiefe den Magnetkreis und das Wirkungsgradkennfeld einer Maschine für AT1 (hier PMSM mit Zahnspulenwicklung). In **Bild 2.3** und **2.4** sind die Schnittabmessungen sowie die Leerlaufflussdichte und deren Fourierzerlegung dargestellt.

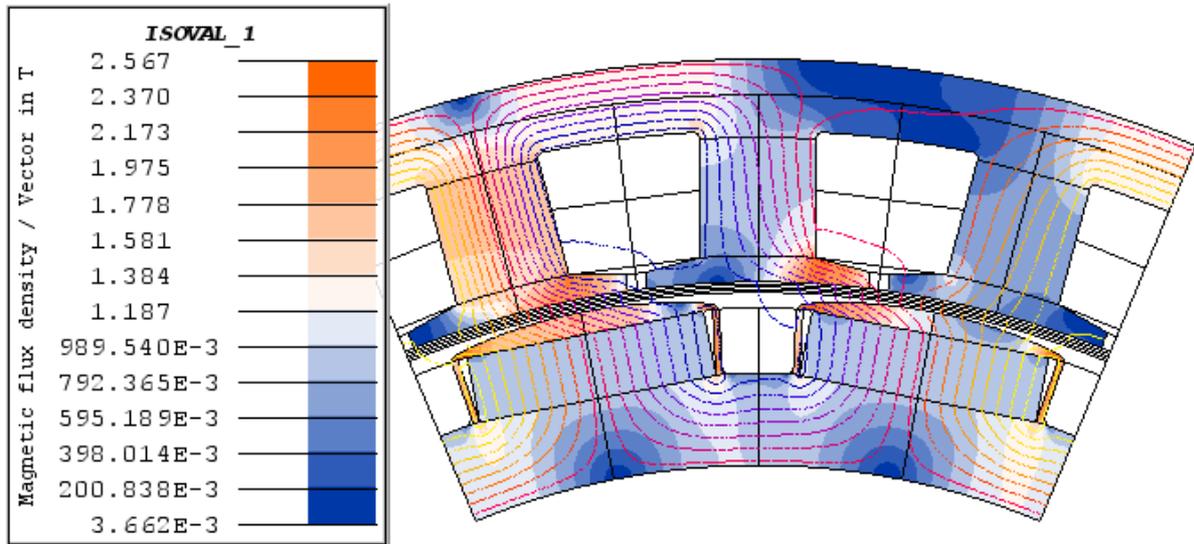


Bild 2.1: Feldverteilung und Flussdichteintensität eines radnahen Direktantriebes (AT1)

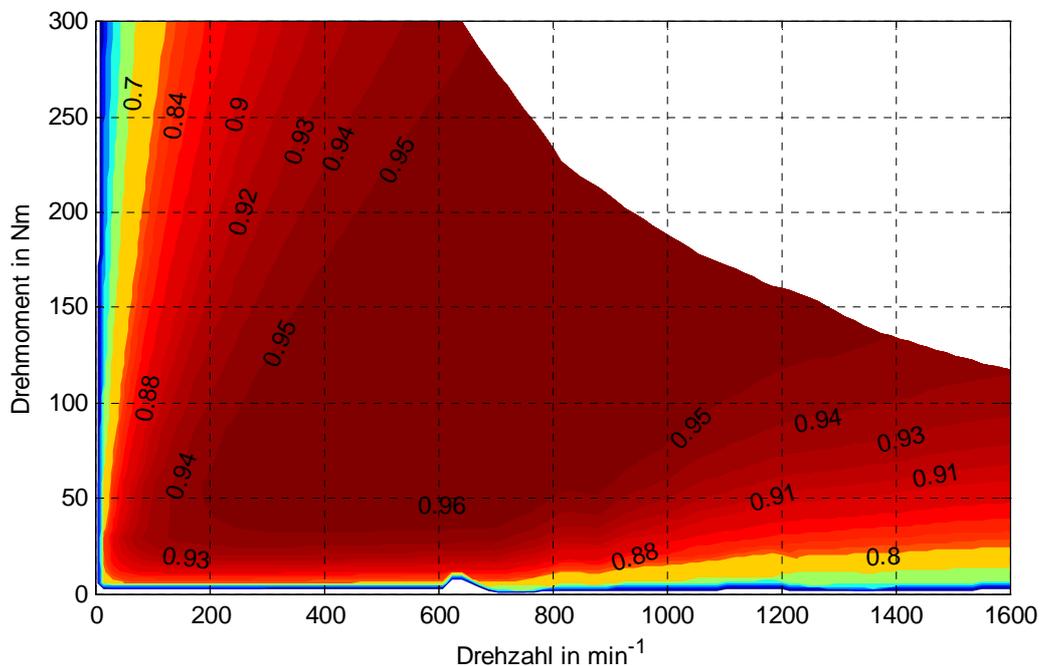


Bild 2.2 Wirkungsgradkennfeld der Maschine von Bild 2.1

Das Wirkungsgradkennfeld zeigt die typische Charakteristik der Permanentmagnet erregten Maschine mit sehr gutem Wirkungsgrad im mittleren Drehzahlbereich und dem Abfall des Wirkungsgrades zu hohen Drehzahlen infolge der Gegenerrregung zur Feldschwächung.

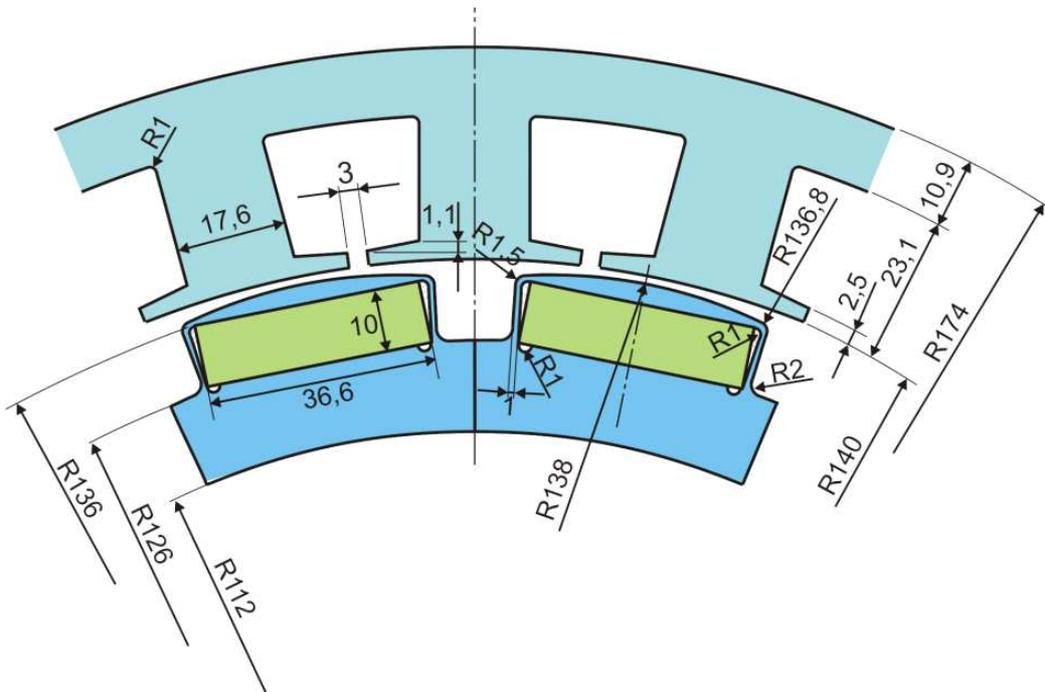


Bild 2.3: Aufbau der PPSM mit Polkappenrotor (AT1)

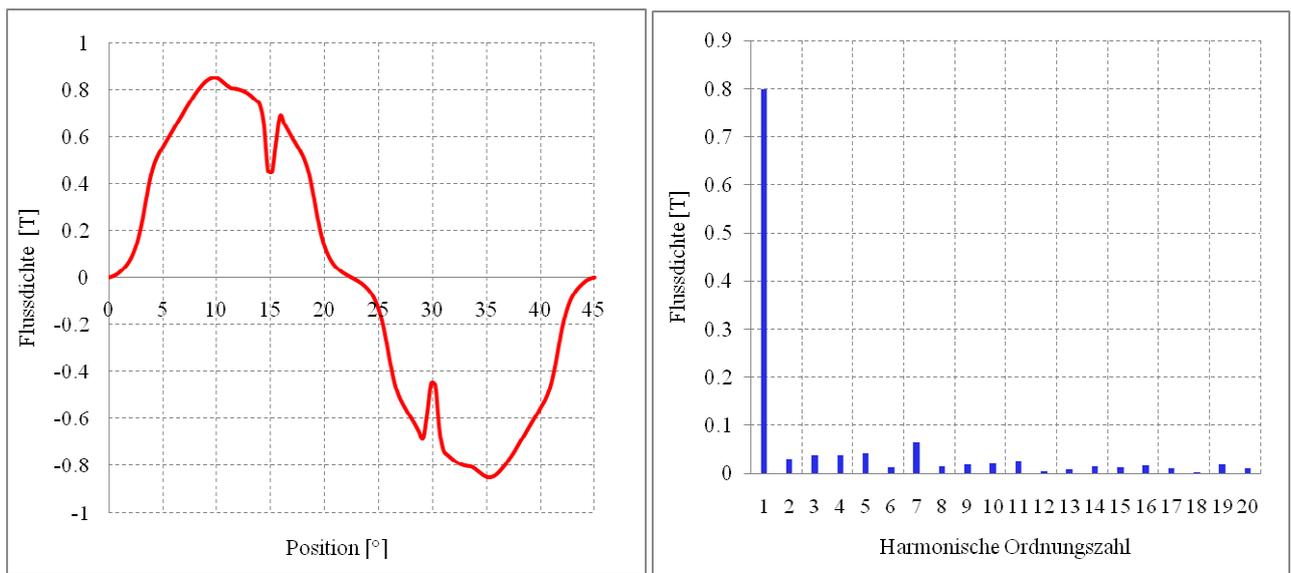


Bild 2.4: Leerlaufflussdichte im Luftspalt und Oberschwellenspektrum

Die **Bilder 2.5** und **2.6** zeigen die Drehmomentanforderungen an die E-Maschinen für die beiden Beispiele AT1 und AT4. Beide Diagramme unterscheiden sich deutlich, da im Fall AT1 das Drehmoment zum Befahren von Bordsteinkanten von 1000 Nm pro Rad von der E-Maschine aufgebracht werden muss. Für AT4 reicht die Getriebeübersetzung im 1. Gang völlig aus, um das Anfahrmoment von 1000 Nm pro Rad aufzubringen. Ein Überlastbereich braucht nicht vorgesehen zu werden. Für 120 km/h wird ein Feldschwächbereich von ca. 2:1 benötigt, was kein Problem sein sollte.

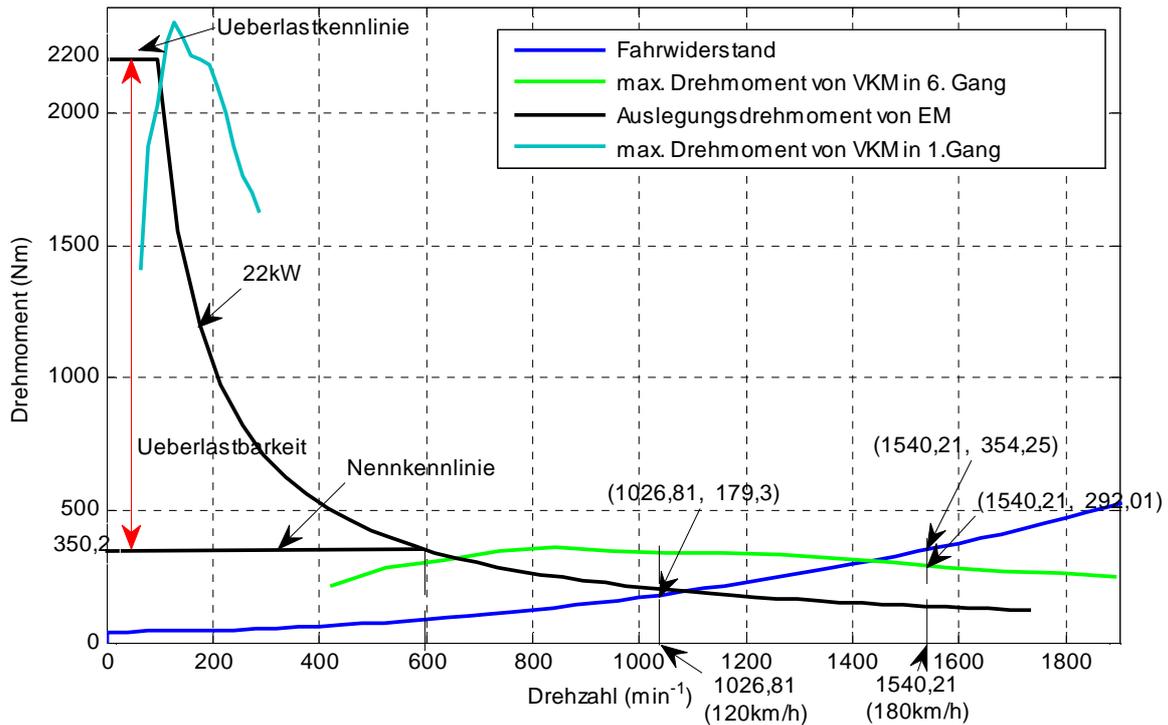


Bild 2.5: Drehmomentkurven für AT1 (2 E-Maschinen) bzw. AT2 (1 E-Maschine) = schwarz, VKM (1. und 6.Gang) = grün, Fahrwiderstand = blau)

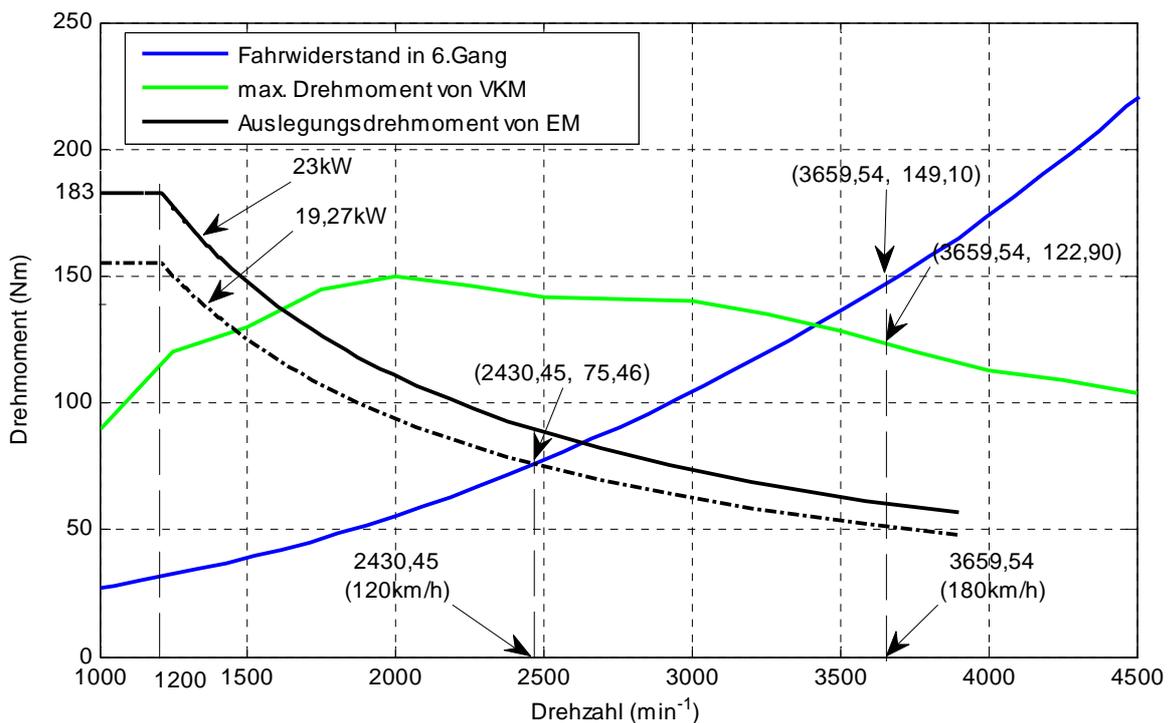


Bild 2.6: Drehmomentkurven für AT4 (1 E-Maschine) = schwarz, VKM = grün, Fahrwiderstand = blau, Nullpunkt der Abszisse unterdrückt

Oberhalb von 120 km/h wird nur mit dem Verbrennungsmotor gefahren, die E-Maschine wird jedoch mitgeschleppt und muss sowohl mechanisch als auch magnetisch für die hohe Drehzahl ausgelegt werden. Ein Betrieb mit 180 km/h ist mit der vorgegebenen VKM nicht

mehr möglich, könnte aber erreicht werden, wenn die E-Maschine im Rahmen der Batteriekapazität 25 Nm (9,6 kW) dazuliefert.

2.1 Weitere Fahrzeugspezifikationen

Es wird ein Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von ca. 1,5 t betrachtet, kleinere Variationen sind bedingt durch die Antriebe. Die Kennfelder von Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Doppelkupplungsgetriebe wurden von den Industriepartnern übernommen, genauso wie der geschwindigkeitsabhängige Rollwiderstand der Reifen. Als weitere Angaben standen die Massen und die Massenträgheitsmomente der VKM und der Getriebe zur Verfügung.

Die Bemessung der Li-Ion Batterie erfolgte gemäß der Vorgabe, dass mindestens ein NEFZ rein elektrisch gefahren werden muss, sowie nach der maximalen spezifischen Belastbarkeit. Diese wurde so gewählt, dass die Zyklientiefe des SOC eine ausreichend hohe Lebensdauer gewährleistet. Für die Batterie wurde dann ein Rechenmodell entwickelt, das den Spannungsverlauf, den Ladezustand und die Verluste wiedergibt. Das Rechenmodell wurde mit Messdaten von Li-Ionen Batteriezellen abgeglichen.

3 SIMULATIONSPROGRAMM

Mit dem Simulationsprogramm wird eine quasistationäre vorwärtsgerichtete Simulation durchgeführt, die die Energieflüsse sehr gut wiedergibt. Dynamische Vorgänge wie z. B. Schwingungen werden nicht berücksichtigt. Bei diesem vorwärtsgerichteten Simulationsmodell entspricht der Datenfluss dem realen Wirkungsweg im Fahrzeug (**Abb. 3.1**). Die wesentlichen Bedingungen sind in **Tabelle 3.1** zusammengestellt. Es wird erkennbar, dass der Ladezustand (SOC) der Batterie hier einen dominanten Einfluss hat. Das liegt auch daran, dass bei der Simulation im Zyklusbetrieb der Energieumsatz der Batterie durch Lastpunktanhebung (LPA) so gesteuert wird, dass zu Anfang und Ende des Zyklus der SOC der gleiche ist. Für die Energiebilanz hat dies den Vorteil, dass die Simulation einen kontinuierlichen Zyklusbetrieb abbildet und der gesamte Energieverbrauch aus dem Tank gedeckt wird.

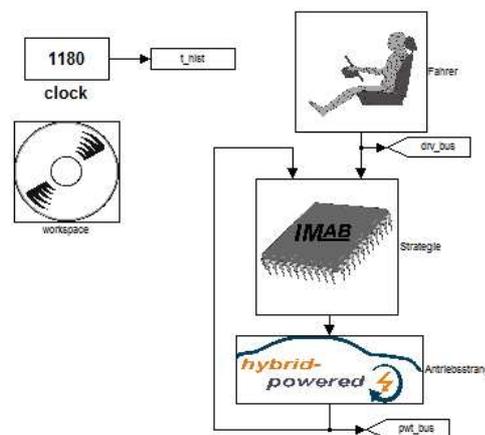


Bild 3.1: Struktur einer vorwärtsgerichteter Fahrzeugsimulation

Voraussetzungen für die Lastpunktanhebung: Die aktuelle Drehmomentanforderung ist kleiner als das entsprechende optimale Drehmoment der VKM und das Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit.

Tabelle 3.1: Betriebsstrategie

Betriebsfälle	
Halten	<ul style="list-style-type: none"> ● VKM Start-Stopp ● E-Anfahren
Verzögerung El. u. hydr. Bremse	<ul style="list-style-type: none"> ● Rekuperation ● VKM ausgeschaltet und abgekoppelt ● Strategie nach SOC
Beschleunigung	<ul style="list-style-type: none"> ● VKM + EM, Strategie nach SOC
Fahrt mit konst. Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ● VKM , ggfs. mit Lastpunktanhebung ● Strategie nach SOC

Die in diesem Programm als Standard verwendete Schrittweite beträgt 10 ms. Die Grundblöcke sind Fahrer, Strategie und Antriebsstrang.

Das Fahrermodell äußert den Fahrwunsch entsprechend dem Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus. Aus dem Vergleich der Soll- und Ist-Geschwindigkeit in einem Geschwindigkeitsregler wird das Sollantriebsmoment an der Antriebsachse aus den Fahrwiderständen, die aus Rollwiderstand, Luftwiderstand, Steigungskraft und Beschleunigungskraft bestehen, berechnet und als Eingang in den Strategieblock eingegeben. Über den Fahrzyklus werden der Kraftstoffverbrauch und die benötigte elektrische Energie des Fahrzeugs ermittelt und das Fahrverhalten analysiert.

Der Strategieblock besteht aus zwei Teilblöcken, der eine ist ein Begrenzungsblock, in dem die Kapazität bzw. die relevanten Parameter einzelner Komponenten wie z. B. des Verbrennungsmotors, der Batterie und der E-Maschine begrenzt werden. Der andere ist der Signalerzeugungsblock. In diesem Teilblock werden die Befehle für alle Komponenten im Antriebsstrang unter Berücksichtigung der laufenden Strategie generiert. Die Befehle für die einzelnen Komponenten werden in den Antriebsstrangblock eingegeben.

In **Bild 3.2** ist das Antriebsstrangmodell des Fahrzeugs dargestellt. Die Komponenten werden miteinander durch die Energieflüsse verschaltet. Für jede Komponente des Antriebsstrangs werden die Ein- und Ausgangsgröße bezüglich der systematischen Beschaltung nach der Bondgraphentheorie aufgebaut. Wegen der Eindeutigkeit der Struktur der Modellbildung bzw. der Definition der Schnittstellen der einzelnen Komponenten sind die Komponenten sehr einfach auszutauschen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil des Antriebsstrangmodells.

Zur Überprüfung der thermischen Rechenmodelle für die E-Maschinen und der Stabilität der Simulation wurde ein Betrieb des Fahrzeugs gemäß dem „India Urban cycle“ simuliert, der Leistungsanforderungen an das Fahrzeug stellt, die mit dieser Fahrzeugauslegung nicht erfüllbar sind und so zu einer Überlastung des Antriebsstranges führt. Sowohl die Stabilität der Simulation als auch der erwartete definierte Abbruch der Simulation aufgrund des Erreichens der maximalen Wicklungstemperatur konnten nachgewiesen werden.

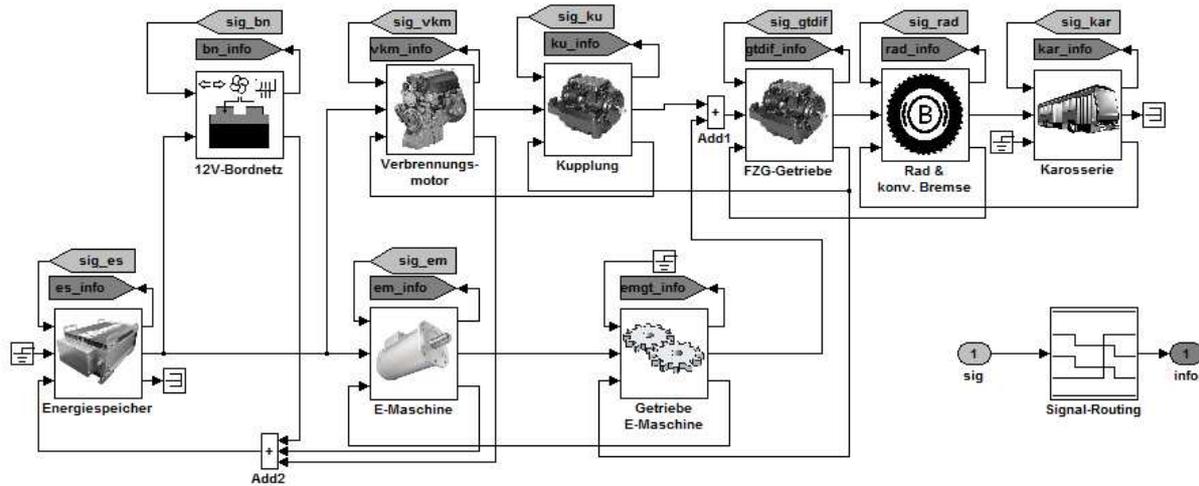


Bild 3.2: Antriebsstrangmodell mit einzelnen Komponentenmodellen

4 ENERGIEVERBRAUCH UND ANTRIEBSSTRANGWIRKUNGSGRAD

Aus der Fülle der während der Simulationen gewonnenen Daten seien hier nur die wesentlichsten Ergebnisse zusammengestellt.

Die **Bilder 4.1** und **4.2** zeigen den Vergleich der energetischen Wirkungsgrade der Antriebsstränge sowie der einzelnen Maschinen innerhalb eines Antriebsstranges. Man erkennt im Hybridbetrieb keine nennenswerten Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen, wenn überall Permanentmagnet erregte Maschinen eingesetzt werden. Die Abweichungen der einzelnen Konfigurationen untereinander dürften unter der Genauigkeitsgrenze der verwendeten Modelle liegen.

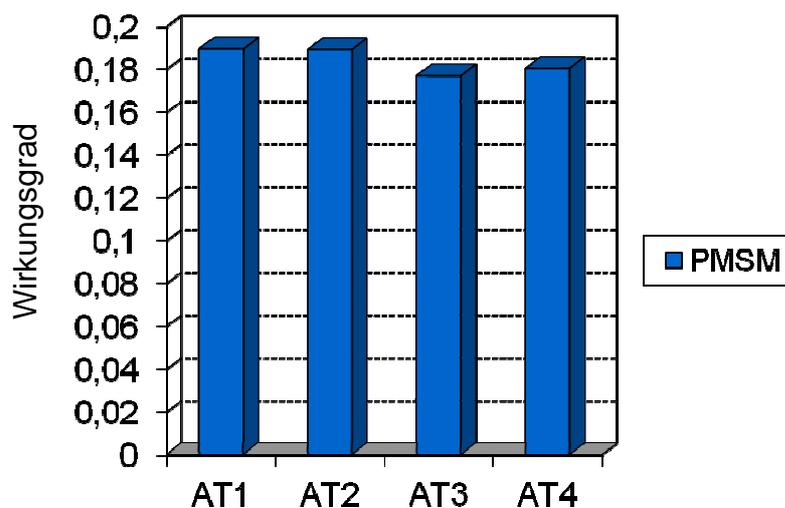


Bild 4.1: Energetischer Wirkungsgrad der einzelnen Antriebsstränge im NEFZ

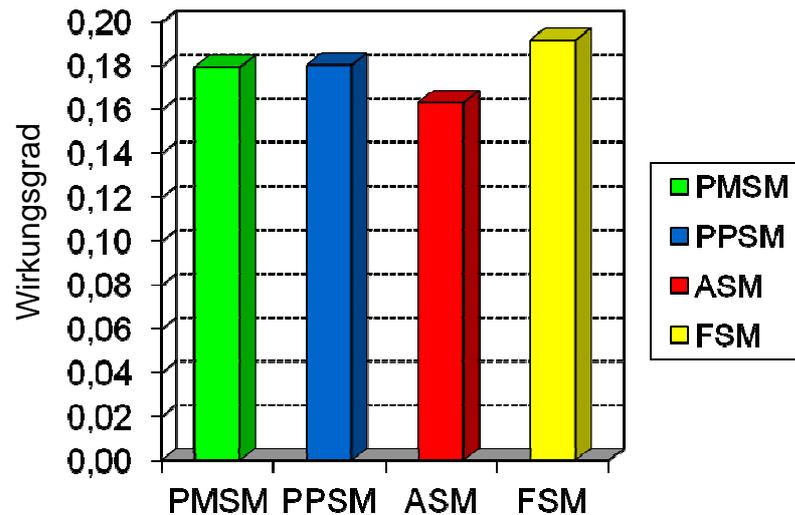


Bild 4.2: Energetischer Wirkungsgrad für AT4 mit unterschiedlichen E-Maschinen im NEFZ

Die Benachteiligung der ASM hat unterschiedliche Ursachen. Bei AT4 zeigt die Lage der Betriebspunkte im Wirkungsgradkennfeld, dass die Maschine in einem günstigen Kennfeldbereich betrieben wird (Schaltstrategie des Getriebes), zudem weist die ASM auch keine Schleppverluste auf. Tatsächlich ist die wesentliche Ursache für den höheren Energieverbrauch im höheren Gewicht und dem größeren Trägheitsmoment der Maschine begründet, da die Polpaarzahl mit Rücksicht auf den Blindleistungsbedarf hier niedriger gewählt werden musste. Bei AT2 sind Gewicht und Trägheitsmoment mit dem der PMSM vergleichbar, jedoch liegen die Betriebspunkte im NEFZ wegen der festen Übersetzung in einem ungünstigen Kennfeldbereich, was auch durch fehlende Schleppverluste nicht kompensiert wird. Ideal für die ASM wäre hier eine Kopplung mit einem Zweigangetriebe, das dafür sorgt, dass sich bei jeder Geschwindigkeit eine günstige Betriebspunktlage ergibt.

Gleichzeitig schneidet die fremderregte Maschine sehr gut ab, obwohl sie schwerer ist, als die übrigen Maschinen. Dies liegt im Wesentlichen an dem sehr günstigen Teillastwirkungsgrad, der mit dieser Maschine erreichbar ist und der über die Erregung optimiert werden kann sowie an den fehlenden Schleppverlusten. **Bild 4.3** zeigt beispielhaft, dass die Lage der Betriebspunkte z. B. für die fremderregte Synchronmaschine überwiegend im Teillastbereich bei kleinen Drehmomenten liegt.

In **Bild 4.4** fällt auf, dass der Wirkungsgrad der VKM für die einzelnen Maschinen tendenziell gegenläufig zum Antriebstrangwirkungsgrad ist. Erstaunlich ist auch, dass bei Konfiguration AT1 die um 70 kg höhere Fahrzeugmasse nicht nachteilig zu Buche schlägt. Genauere Betrachtungen zeigen, dass in den Phasen für die Lastpunktanhebung im Vergleich z. B. zu AT2 von der VKM ein höheres Moment gefordert wird, was zu günstigeren Betriebspunkten im Wirkungsgradkennfeld führt und so der höhere Energiebedarf infolge des höheren Antriebsgewichtes kompensiert wird.

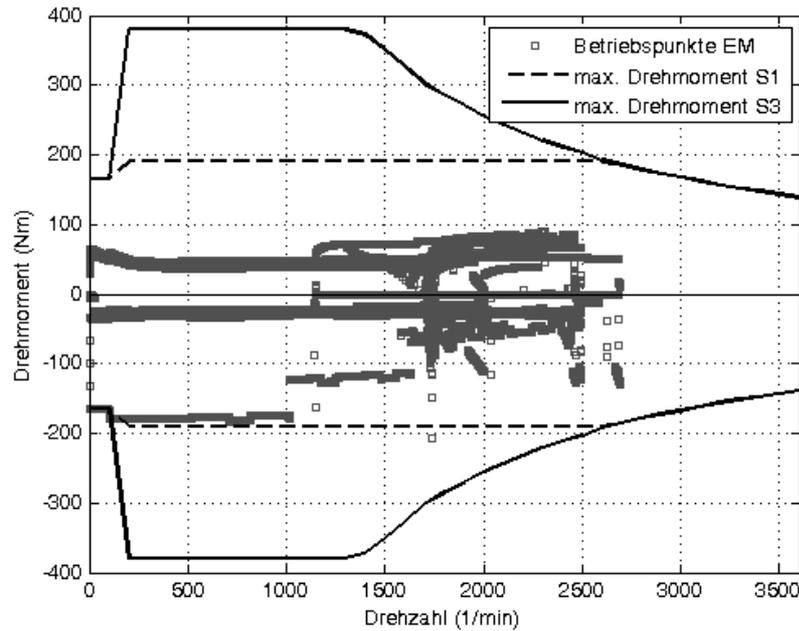


Bild 4.3: Lage der Betriebspunkte für AT4, fremderregte Synchronmaschine (FSM)

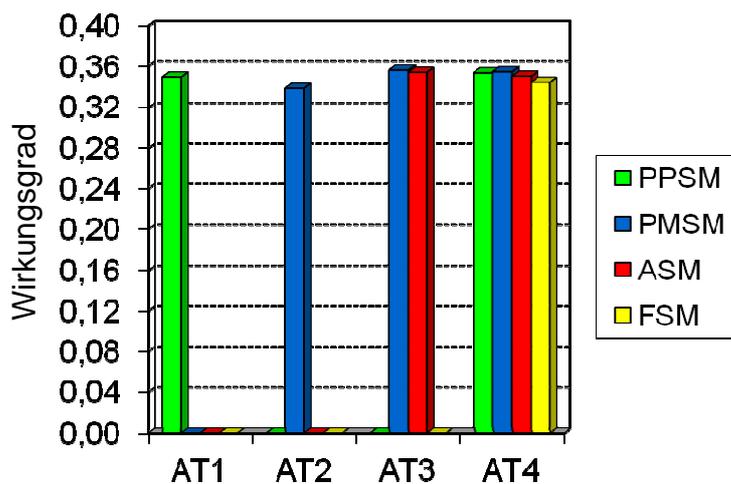


Bild 4.4: Wirkungsgrad der VKM für die Antriebsstränge AT1 bis AT4

Ein ähnlicher Effekt ist auch bei AT3 und AT4 erkennbar, wo die höheren Verluste im Antriebsstrang ebenfalls durch die Lastpunktanhebung kompensiert werden müssen, so dass auch hier der Wirkungsgrad der VKM ansteigt. Dies unterstreicht auch eine Betrachtung der Betriebspunkte der VKM (**Bild 4.5**), bei der deutlich wird, dass die meisten Betriebspunkte noch einen erheblichen Abstand zur betriebsoptimalen Linie (BOL) aufweisen.

Solange also die VKM als Haupt-Verlustquelle im Wirkungsgrad durch die LPA noch angehoben werden kann, lassen sich Effizienz Nachteile in den übrigen Komponenten des Antriebsstranges weitgehend kompensieren. Dies gilt auch für andere Zyklen. Eine knappere Auslegung der VKM scheidet dagegen aus, da sonst die Anforderungen an den Hochgeschwindigkeitsbetrieb nicht erfüllt werden können. Somit ist die VKM für den Stadtverkehr beim

Parallelhybrid-Antriebsstrang stets überdimensioniert mit einer entsprechend ungünstigen Lage der Betriebspunkte und einem entsprechend großen Potential zur Wirkungsgradverbesserung durch Lastpunktanhebung, das jedoch nur teilweise genutzt werden kann.

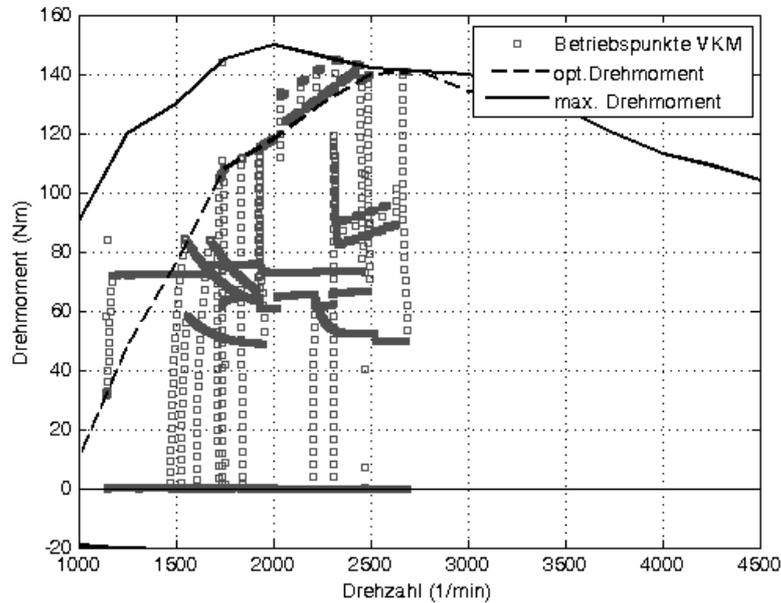


Bild 4.5: Typische Lage der Betriebspunkte der VKM

Bei rein elektrischer Fahrt zeigt sich, dass die Verluste im Doppelkupplungsgetriebe zu einer deutlichen Benachteiligung der Varianten AT3 und AT4 führen, besonders wenn eine zusätzliche Trennkupplung am Ausgang des Schaltgetriebes verhindert, dass das Getriebe bei AT1 und AT2 während elektrischer Fahrt mitgeschleppt wird. Dies kann durch den guten Wirkungsgrad der FSM zwar numerisch kompensiert werden, würde jedoch bei einer FSM in AT1 und AT2 wiederum zur gleichen Relation führen.

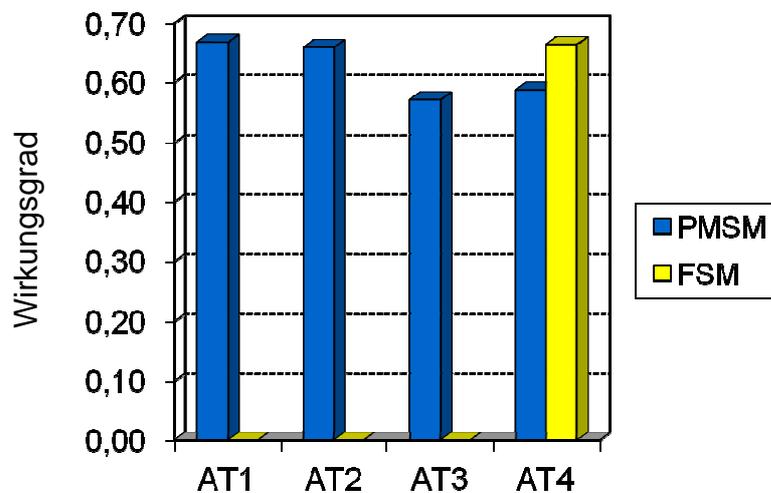


Bild 4.6: Antriebsstrangwirkungsgrad bei elektrischer Fahrt mit PMSM und FSM

Zweckmäßig ist es offenbar, den elektrischen Energiefluss auf kürzestem Weg mit einem Minimum an Getriebestufen zum Rad zu führen.

Der mittlere Antriebsstrangwirkungsgrad (vom Tank zum Rad) aller betrachteten Konfigurationen muss mit ca. 18% gegenüber dem Wirkungsgrad der VKM, die bei 33..35% liegt, als relativ niedrig eingestuft werden. Die Differenz sind Verluste im Antriebsstrang. Dies erlaubt jedoch einen Verbrauch von 4,5 l auf 100 km im Zyklusbetrieb, was für ein 1,5 t Fahrzeug nach heutigen Maßstäben immerhin als gut bezeichnet werden muss. Der für die VKM im Stadtzyklusbetrieb relativ gute Wirkungsgrad wird nur durch die Lastpunktanhebung erreicht, die im Vergleich zu einem reinen verbrennungsmotorischen Betrieb für eine bessere Lage der Betriebspunkte im Wirkungsgradkennfeld sorgt.

Da im Antriebsstrangwirkungsgrad auch Verluste enthalten sind, die zur Versorgung der Nebenverbraucher (Bordnetz, Kühlwasserpumpen, Klimaanlage, etc.) dienen, eröffnet sich hier weites Feld zur Optimierung der Verlustbilanz. Gleichzeitig dürfen die gewonnenen Ergebnisse nur als vergleichbar zu Simulationen mit gleichen Antriebstrangverlustmodellen eingestuft werden.

5 ÜBERLEGUNGEN ZUR VERBESSERUNG DES ENERGETISCHEN WIRKUNGSRADES

Aus den gewonnenen Ergebnissen können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Antriebsstrangkonfigurationen, bei denen der elektrische Energiepfad so kurz wie möglich ist, sind leicht im Vorteil.
- In der Gesamtbilanz ergeben sich im Hybridbetrieb jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Antriebsstrangvarianten. Somit rücken unabhängig von der Antriebsstrangtopologie Kostenfragen in den Vordergrund. Eine einfache Materialkostenbetrachtung zeigt, dass hochtourige Maschinen mit Getriebe weniger teure Werkstoffe (Kupfer, Neodym, Dysprosium, etc.) enthalten als langsamlaufende Direktantriebe. Bei der Gewichtsbilanz dagegen ist der Unterschied nur gering, da das Getriebegewicht die Gewichtsvorteile der hochtourigen Maschine weitgehend kompensiert.
- Das Gewicht der Elektromaschinen ist gegenüber dem Teillastwirkungsgrad und den Schleppverlusten als zweitrangig einzustufen, solange der höhere Energieverbrauch des schwereren Antriebsstranges durch einen besseren Wirkungsgrad der VKM bei der Lastpunktanhebung kompensiert werden kann. Die Trägheitsmomente spielen wegen der hohen Dynamik im Antriebsstrang jedoch eine wichtige Rolle.
- Im Antriebsstrang treten an sehr vielen Stellen verlust erzeugende Elemente auf, die von den Energien teilweise zweimal durchlaufen werden. Hier ist eine Optimierung erforderlich, um die Wirkungsgraddifferenz zwischen VKM und Rad zu reduzieren.

Trotz der Lastpunktanhebung ist die Lage der Betriebspunkte der VKM teilweise weit von der BOL entfernt. Dies liegt an der nicht freien Wahl von Drehzahl und Moment und nicht zuletzt auch an der Forderung nach einer gewissen Höchstgeschwindigkeit und der dafür erforderlichen Leistung, die zu einer Überdimensionierung des Motors bezüglich des Stadtbetriebs führt. Hier wäre ein rein leistungsgekoppeltes System wie die serielle Antriebsstrangstruktur im Vorteil, die zudem eine Reihe weiterer Gestaltungsfreiheitsgrade bietet. Auch die Verlustmechanismen im Antriebsstrang ließen sich deutlich einfacher reduzieren. Kupplungen und DK-Getriebe werden durch Generator und Gleichrichter ersetzt (**Bild 1.2**). Die serielle Struktur gestattet ein sehr flexibles Baukastensystem vom Hochleistungsfahrzeug bis zum reinen Elektrofahrzeug, indem man nur die Leistung einzelner Komponenten variiert und diese austauscht.

Ausgehend von den Fahrzeugdaten und der Datenbasis der Parallel-Hybridstruktur wurde deshalb eine serielle Hybridstruktur untersucht. Um eine Vergleichbarkeit zu den Simulationen des Parallelhybrids zu erhalten, wurden die gleichen Komponenten und Rechenmodelle wie vorher verwendet. So bleibt der Verbrennungsmotor erhalten, er kann 49 kW max. Leistung abgeben. Damit ist genug Leistung vorhanden, um die für 160 km/h erforderlichen 38,7 kW am Rad aufzubringen. Aufgrund der Wirkungsgradkette wird die VKM dann mit einer Leistung von 45,8 kW statt 42,9 kW beim Parallelhybrid belastet.

Eine Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit 160 km/h über längere Zeit ist bei den heutigen Verkehrsverhältnissen schon als optimistisch einzuschätzen, so dass der höhere Verbrauch bei max. Geschwindigkeit nicht sehr stark zu Buche schlägt, somit ist die Fahrzeugauslegung nicht praxisfern. Jedoch muss hier eine Schwäche des rein seriellen Konzeptes konstatiert werden, die im fehlenden mechanischen Durchtrieb Motor - Rad begründet ist. Abhilfe wäre hier mit einer im Vollastfall zuschaltbaren mechanischen Verbindung zum Differential ähnlich wie in [3] möglich.

Als Fahrtrieb wird auf die Untervariante der Konfiguration AT2 mit hochtourigem Zentralmotor 40 kW, 20000 1/min, Getriebeübersetzung zum Rad $i = 11,2$ zurückgegriffen. Dies ermöglicht einen kompakten und kostengünstigen Hauptantrieb. Der Fahrmotor hat genügend Überlastreserve – wegen der Randbedingung 2000 Nm an der Achse zum Befahren von Bordsteinkanten – um auch thermisch die erforderliche maximale Leistung sowohl für die Höchstgeschwindigkeit (am Rad 38,7 kW, elektrisch 40,3 kW) als auch für den Beschleunigungsvorgang von 0 auf 100 km/h in 15 sec (64 kW) aufzubringen. Damit haben beide Fahrzeuge gleiche Fahrleistungen. Auch die Batterie soll vorerst unverändert mit 2,28 kWh Energieinhalt erhalten bleiben. Dementsprechend wird auch das Batteriemodell übernommen.

Der Generator muss im Wesentlichen für zwei Betriebspunkte ausgelegt werden. Betrieb mit verbrauchsoptimaler Drehzahl bei 20..22 kW (Wirkungsgrad von 42..44%) und Vollastbetrieb mit maximaler Drehzahl 4500 1/min. Hierfür ist eine fremderregte oder eine hybrid erregte Synchronmaschine zweckmäßig, mit der auch gleichzeitig die Zwischenkreisspannung geregelt werden kann.

Das Trägheitsmoment des Aggregates spielt bei dem nun stark phlegmatisierten Betrieb der VKM keine Rolle mehr.

Der Generator mit Gleichrichter geht in die Gewichtsbilanz des Fahrzeugs ein. Da das verhältnismäßig schwere Doppelkupplungsgetriebe (DKG, 75 kg) entfällt, schlägt jedoch nur das Differenzgewicht zu Buche, das nach **Tab. 5.1** hier sogar negativ ist, so dass sich ein Gewichtsvorteil von 15 kg zugunsten der seriellen Struktur ergibt.

Tabelle 5.1 : Auslegungsdaten des Generators

Bauart:	Fremderregte Synchronmaschine	
Max Leistung @ bei max. Dehzahl	48 kW @ 4500 1/min	
Nennleistung	21 kW	
Nenndrehzahl	2000 1/min	
Nennspannung im Zwischenkreis Ud	350 V, Gleichrichterbrücke	
Strangspannung	143 V	
Gesamtmasse aktiv	44 kg / Konstruktion ca. 15 kg	
Verluste und Wirkungsgrad	@ 48 kW, 4500 1/min	@ 21 kW, 2000 1/min
Statorverluste	1900 W	384 W
Rotorverluste	250 W	784 W
Wirkungsgrad Stator	0,97	0,98

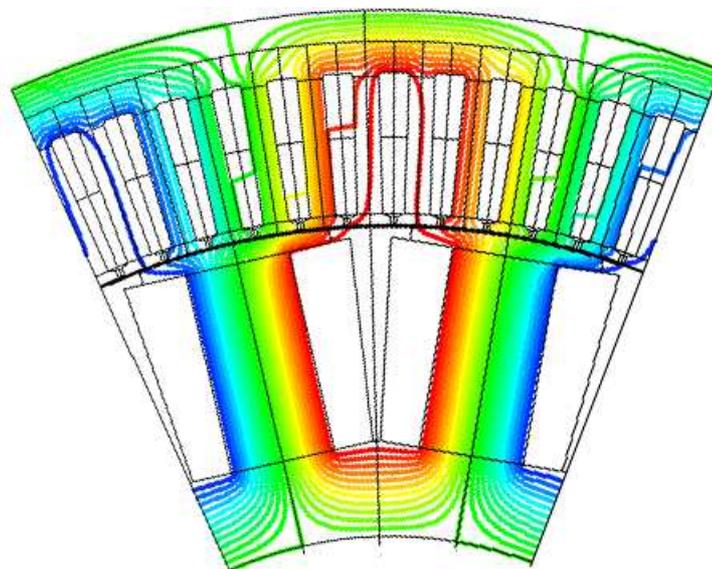


Bild 5.1: Feldlinienbild des Generators, verteilte Wicklung

Die Erregerverluste werden aus der Batterie geliefert und tauchen deshalb im Wirkungsgrad des Generators nicht auf. Sie werden in der Simulation als zusätzliche Batteriebelastung berücksichtigt und müssen natürlich über einen zusätzlichen Energieverbrauch der VKM abgedeckt werden.

6 SIMULATION EINES SERIELLEN HYBRIDFAHRZEUGES

Die Simulationsrechnungen zeigen sehr schnell, dass es zweckmäßig ist, die VKM mit geringer Dynamik zu betreiben und die Arbeitsphasen so lang wie möglich zu gestalten (**Bild 6.1**). Mit der regelbaren Erregung kann die Zwischenkreisspannung mit einer definierten Hysterese eingestellt werden, ohne teure DC-DC Wandler einzusetzen. Damit lassen sich alle Energieflüsse einfach steuern (vgl. [2]). Da für die Spannungsregelung keine hohe Dynamik gefordert wird, kann im Generator eine leichte bürstenlose Erregerinrichtung verwendet werden.

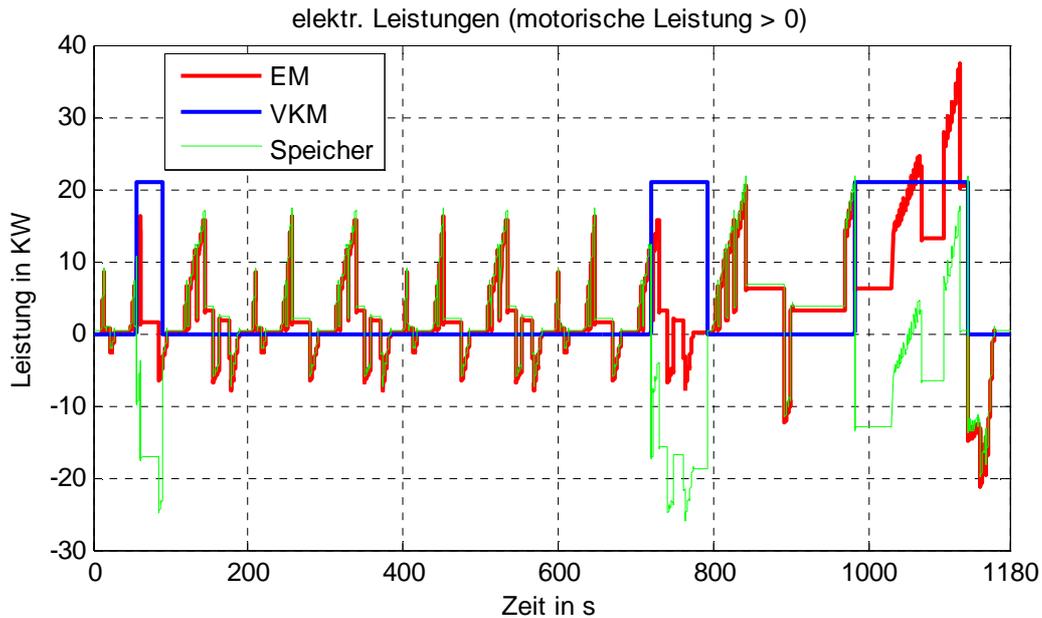


Bild 6.1: Leistungsaufteilung im NEFZ für die serielle Struktur

Die Länge der Arbeitsphasen zum Nachladen der Batterie kann über ein breiteres SOC-Fenster (hier 6% gewählt) eingestellt werden. Weiter sollte die Ladestrategie so sein, dass die Spannungslage der Batterie möglichst hoch bleibt, bewährt hat sich hier ein SOC-Fenster zwischen 70 und 80% (**Bild 6.2**).

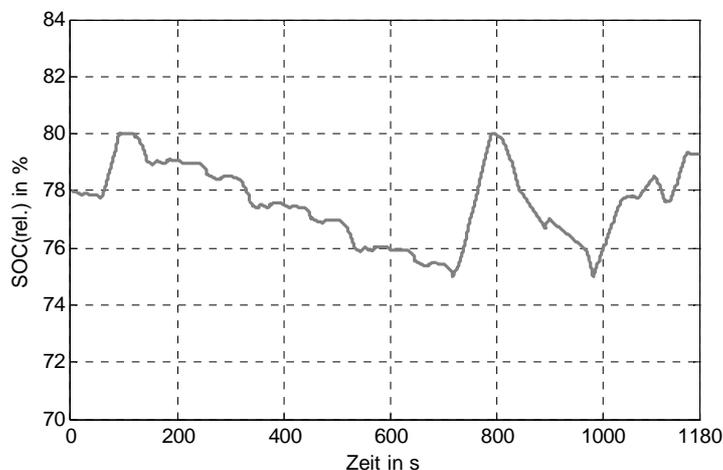


Bild 6.2: Serielle Struktur, SOC Verlauf im NEFZ

Die Simulation zeigt, dass mit der seriellen Struktur beim gleichen Fahrzeug eine deutliche Steigerung des Antriebsstrangwirkungsgrades auf 22,61 % und damit eine Verbrauchsabsenkung auf 3,51 l/100 km erreichbar ist, was im Wesentlichen auf die günstigere Lage der Betriebspunkte der VKM (**Bild 6.3**) zurückzuführen ist, die nun einen mittleren Wirkungsgrad von 38,58 % im Stadtzyklus erreicht. Dieser Wert wird sonst nur bei Nutzfahrzeugen mit entsprechend aufwändigem Getriebe erreicht. Da die Generatorverluste im Stadtzyklus mit ca. 2-4% kleiner als die im DKG (ca. 8%) sind, reduzieren sich auch die Verluste im Antriebsstrang.

Im praktischen Betrieb entfällt die Bedingung, nach jedem Zyklus den SOC auszugleichen. Hier wird man das SOC Fenster etwas größer aufziehen und längere Laufzeiten der VKM einstellen, was den Wirkungsgrad des Antriebsstranges weiter verbessert.

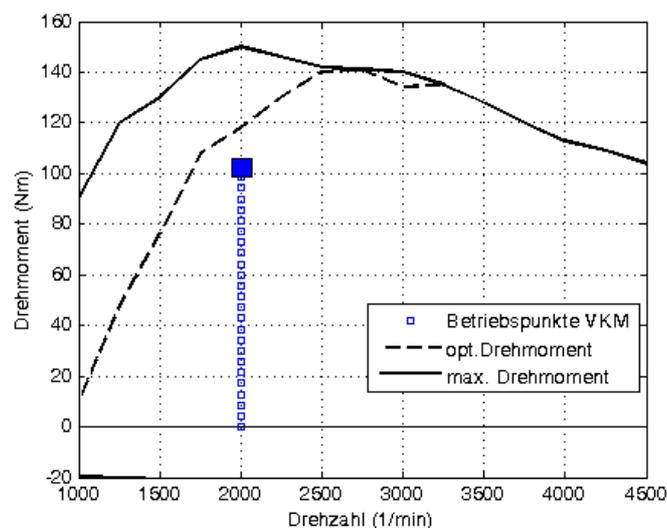


Bild 6.3: Betriebspunkte der VKM in der seriellen Struktur

Gerade für den Stadtverkehr könnte man den elektrischen Fahrmotor noch stärker in Richtung Teillastwirkungsgrad optimieren, was sowohl beim Antrieb als auch beim Bremsen Vorteile hätte. Dieses Optimierungsziel liegt im Widerstreit mit der Forderung nach gutem Verbrauch bei hohen Geschwindigkeiten, so dass der hier gewählte Kompromiss auch anders gestaltet werden kann.

Ebenso besteht noch Potential, indem man die Einzelverluste optimiert. Aus dem Sankey Diagramm (**Bild 6.4**) ist erkennbar, dass die größten Verluste natürlich in der VKM entstehen, deshalb zeigen Maßnahmen, die die Energiewandlung verbessern bzw. die VKM entlasten besonders viel Wirkung. Beispielsweise könnten die Nebenaggregate elektrisch und nur bei Bedarf angetrieben werden, statt sie über den Riementrieb der VKM mitzuschleppen (riemenloser Motor). Weitere Ansatzpunkte sind dort zu finden, wo der Energiefluss vorwärts und rückwärts durchläuft, z. B. in Fahrmotor und Wechselrichter.

Die Bordnetzlast wurde in beiden simulierten Strukturen mit einem konstanten Energiebedarf angesetzt, so dass die Vergleichbarkeit gegeben ist. Der gesamte Energiebedarf des Bordnetzes könnte jedoch über ein Energiemanagement gesteuert und optimiert werden, was zurzeit auch Gegenstand anderer Forschungsvorhaben ist.

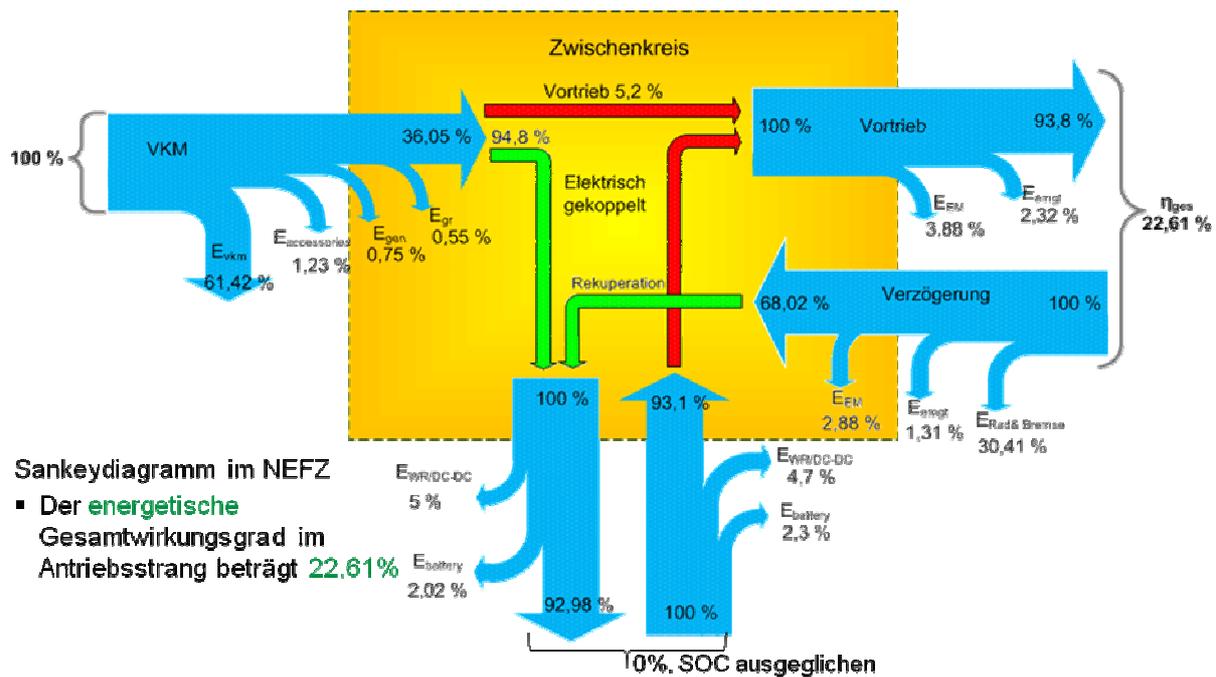


Bild 6.4: Sankey Diagramm für die serielle Struktur im NEFZ

Will man eine Spitzengeschwindigkeit von 180 km/h erreichen, ist dies durch Boosten aus der Batterie für kurzzeitige Überholvorgänge möglich. Der Leistungsbedarf am Rad von 58,8 kW erfordert dann eine Fahrmotorleistung von 61,3 kW_{mech} und 63,8 kW_{el}. Vom Generator werden 46,6 kW geliefert, so dass aus der Batterie 17,2 kW entnommen werden müssen. Dies wäre für knapp 100 sec möglich. Der Fahrmotor muss nun der höheren thermischen Belastung angepasst werden und wird entsprechend um 13 kg schwerer. Auch das Getriebe dürfte wegen des höheren Momentes etwas schwerer werden. Die Auswirkung auf den Verbrauch im Stadtbetrieb ist wegen der geringen Massendifferenz jedoch marginal.

Alternativ könnte man die Batterie vergrößern und die VKM zu einem Range Extender schrumpfen lassen, der dann zu noch günstigeren Kraftstoffausnutzungen kommen könnte. Da von der VKM keine Dynamik mehr verlangt wird, könnte sie stärker in Richtung Kraftstoffverbrauch optimiert werden. Hier nimmt man dann eine niedrige Dauergeschwindigkeit und eine abgesenkte stark zeitlich begrenzte Höchstgeschwindigkeit in Kauf.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung verschiedener paralleler Antriebsstränge mit Hilfe einer energetischen Gesamtfahrzeugsimulation zeigt, dass keiner signifikante energetische Vorteile aufweist. Die Antriebsstrangwirkungsgrade (Tank to wheel) liegen alle bei ca. 18%, was einem Verbrauch von 4,5 l Diesel auf 100 km entspricht. Betrachtet man den rein elektrischen Fahrbetrieb, ergeben sich Vorteile für Strukturen, bei denen die E-Maschinen auf kürzestem Weg mit dem

Rad verbunden sind. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass wegen der marginalen Unterschiede eher Kostenfragen als Effizienzfragen dominant sein dürften.

Eine Verbesserung des Antriebsstrangwirkungsgrades gelingt, indem man die gleichen Komponenten in einer seriellen Fahrzeugstruktur anordnet, wobei zusätzlich ein Generator mit Gleichrichter benötigt wird. Dafür fällt das 6 Gang DK-Getriebe weg. Der Antriebsstrangwirkungsgrad lässt sich infolge besserer Wahlmöglichkeit für die Betriebspunkte der VKM nun auf 22,6 % steigern, was einer Verbrauchsabsenkung auf 3,5 l/100 km entspricht.

Danksagung: Die hier vorgestellten Arbeiten zum Parallelhybrid wurden im Rahmen der CO₂ Initiative gefördert (FVA/FVV Projekt 601013)

Literatur

[1]	W.-R.Canders, A.B. Asaf Ali <i>Simulation und Vergleich von Antriebsstrukturen für Hybridfahrzeuge</i> Haus der Technik Tagung, Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid – und Elektrofahrzeuge, 28.-29.11.2011, München Haus der Technik Fachbuch 121, Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid – und Elektrofahrzeuge, expert Verlag, ISBN 978-3-8169-3100-3
[2]	W.-R.Canders, A.B. Asaf Ali, K. Han (NTH, IMAB) P. Jurczys, B. Ponick (NTH, IAL), "High Torque vs. High Speed (FVA/FVV Projekt 601013), Vergleich von Triebstrangkzepten für Hybridfahrzeuge", e-motive, Expertenforum "Elektrische Fahrzeugantriebe", 7.,8.Sept. 2011, Aachen
[3]	Firmenpublikation Getrag, <i>Boosted range extender</i> , http://www.heise.de/autos/artikel/Boosted-range-extender-drei-Antriebe-in-einem-881580.html