

# **SIMULATION VON HYBRIDFAHRZEUGANTRIEBEN MIT OPTIMIERTER SYNCHRONMASCHINE**

**H. Wöhl-Bruhn**

## **1 EINLEITUNG**

Eine Vielzahl von Untersuchungen hat sich bereits mit den Anforderungen an elektrische Maschinen als Antrieb in einem Elektrischen Fahrzeug (EV) beschäftigt. Die Übernahme der Fahrmotorenauslegungen auch für Hybridfahrzeuge (HEV) lag daher nahe. So basieren viele Simulationen auf den bekannten Wirkungsgradkennfeldern von Fahrmotorenauslegungen. Durch die Kombination von Verbrennungskraftmaschine (VKM) und elektrischer Maschine in einem Parallelhybridfahrzeug (PHEV) verändert sich jedoch das geforderte Eigenschaftsprofil des E-Motors, so dass zu erwarten ist, dass auch die Maschinenauslegung eines klassischen Fahrzeugantriebsmotors nicht optimal zu den Anforderungen in einem PHEV passt. In diesem Beitrag sollen neben den generell notwendigen Eigenschaften von elektrischen Maschinen im Antriebsstrang eines Fahrzeugs die unterschiedlichen Anforderungen an E-Maschinen im EV- und HEV-Einsatz in einer exemplarischen Simulation mit dem Programm PSAT<sup>®</sup> (Version 5.2) für Matlab/Simulink<sup>®</sup> herausgestellt werden. Der gezielte Entwurf der E-Maschine führt zu verbesserten Maschineneigenschaften, die für den Betrieb im PHEV optimiert sind. Der Einfluss dieser Parameter, insbesondere der Verbesserung des Wirkungsgradkennfeldes auf das Verbrauchsverhalten des Fahrzeugs, wird abschließend analysiert und das mögliche Einsparungspotenzial aufgezeigt.

## **2 E-MASCHINEN IM ANTRIEBSSTRANG VON FAHRZEUGEN**

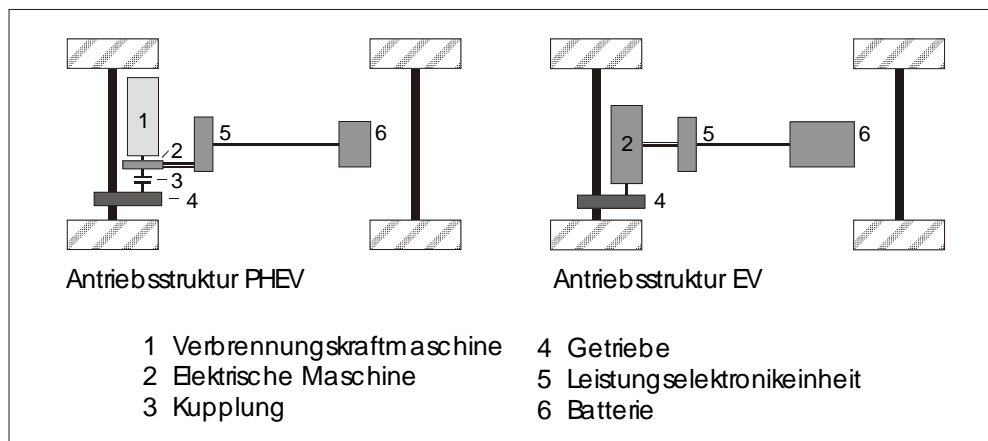
Elektrische Maschinen im Antriebsstrang von EV und HEV müssen allgemeinen Anforderungen gerecht werden. Dazu gehören:

- hoher Wirkungsgrad
- geringes Gewicht
- Wartungsfreiheit / geringer Verschleiß
- lange Lebensdauer / hohe Zuverlässigkeit
- Vibrations- / Geräuscharmheit
- hohe Schutzart
- EMV-gerechte Konstruktion (elektromagnetische Verträglichkeit)
- geringe Kosten

Neben diesen allgemeinen Anforderungen variieren die weiteren speziellen Eigenschaften bezüglich Leistung, Moment und Drehzahlbereich je nach Einsatzort der Maschine im Antriebsstrang des Fahrzeugs. Zusätzlich hat die Einsatzstelle einen starken Einfluss auf die Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte der Maschinen im Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld. Exemplarisch soll hier ein Vergleich von Häufigkeitsverteilungen der Betriebspunkte von E-Maschinen zweier aus der Praxis stammender Fahrzeuge durchgeführt werden. Dazu wurde das Betriebsverhalten der Maschine eines EV und eines PHEV simuliert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das Betriebsverhalten eines Antriebs in einem EV mit dem eines Serienhybrides verglichen werden kann.

### 3 SIMULATION VON EV UND PHEV

Zur Analyse der Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte von EV und PHEV wurde eine Simulation mit dem Programm PSAT für zwei aus der Praxis stammende Fahrzeuge durchgeführt. Die unterschiedlichen Antriebsstrukturen sind **Bild 1** zu entnehmen.



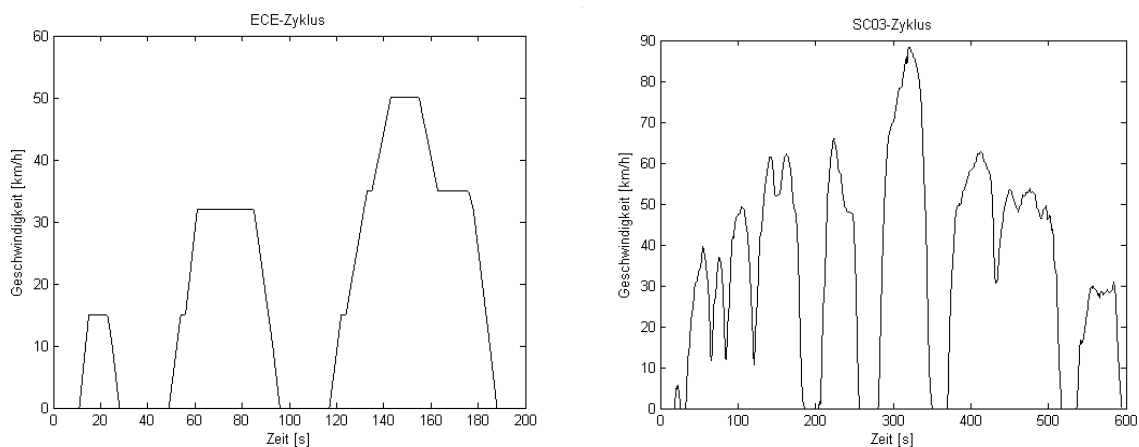
**Bild 1:** Antriebsstrukturen untersuchter Fahrzeuge

Als PHEV wurde ein Einwellenhybrid mit einem Otto-Motor und einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine (PMSM) gemäß **Tabelle 1** gewählt. Angenommen wurde weiterhin eine Anordnung, bei der die E-Maschine vor dem Getriebe fest mit der Kurbelwelle der VKM verbunden ist. Das EV dagegen ist mit einer PMSM mit einer maximalen Leistung von 74 kW und einem maximalen Moment von 370 Nm ausgerüstet. Die Daten der Fahrzeuge sind der **Tabelle 1** zu entnehmen, sie entsprechen denen realer Fahrzeuge und stammen weitgehend aus mitgelieferten Initialisierungsdaten des Programms PSAT. Lediglich die Daten des Chassis des EV wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit denen des PHEV angepasst, wobei das höhere Gesamtgewicht im Wesentlichen aus der deutlich höheren Batteriemasse resultiert.

**Tabelle 1:** Daten der Fahrzeuge

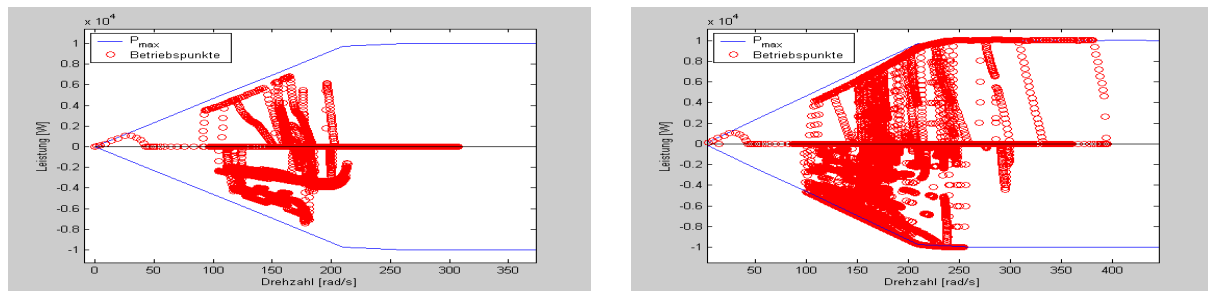
	Daten	HEV	EV
Fahrzeug	Gesamtgewicht (inkl. Zuladung)	900 kg	1028 kg
	Frontfläche	1,9 m <sup>2</sup>	1,9 m <sup>2</sup>
	cw-Wert	0,25	0,25
Ottomotor	max. Leistung	50 kW / 6700 1/min	/
	max. Drehmoment	91 Nm / 4800 1/min	
	Hubraum	995 ccm	
	Leerlaufdrehzahl	950 1/min	
	max. Drehzahl	6500 1/min	
Elektromaschine	Typ	PMSM	PMSM
	max. Leistung	10 kW / 3000 1/min	74 kW / 2000 1/min
	max. Moment	46,5 Nm / 1000 1/min	370 Nm / 500 1/min
	max. Drehzahl	7500 1/min	6300 1/min
	max. Strom	300 A	400 A
	geometrische Abmessungen	∅ ~330mm x 60 mm	keine Angaben
	Masse WR+Maschine	(15+45) kg	(16+74) kg
Getriebe	Schaltung	5 Gang und Endübersetzung	feste Übersetzung
Batterie	Batterieart	Nickelmetallhydrid	Nickelmetallhydrid
	Anzahl der Zellen in Reihe pro Module	6	12
	Anzahl der Module (Zellen alle in Reihe)	20	25
	min. Zellspannung	1 V	0,7 V
	max. Zellspannung	1,5 V	1,3 V
	min. SOC	0,2	0,3
	max. SOC	0,8	1
	Batteriekapazität	6,5 Ah	90 Ah
	Masse pro Modul	~ 1kg	11,6 kg

Zur Durchführung der Simulation wurden der ECE-Zyklus und zusätzlich der Vergleich mit dem dynamischeren SC03-Zyklus aus den USA herangezogen, die in **Bild 2** darstellt sind.

**Bild 2:** Verwendete Fahrzyklen

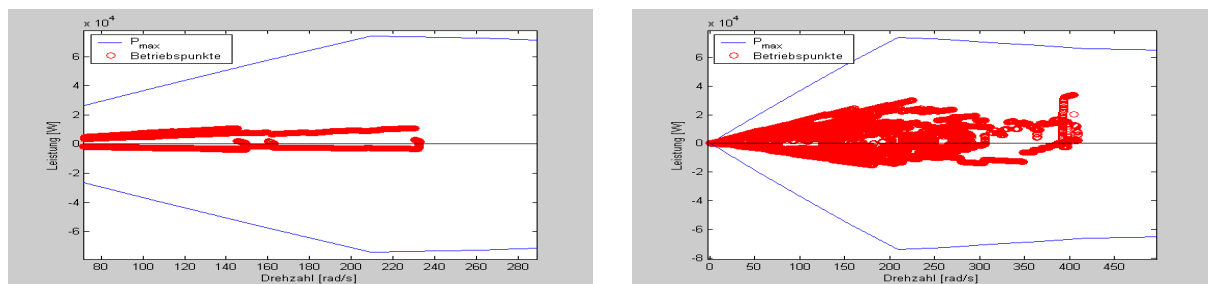
Für die folgende Betrachtung wurde die Betriebsstrategie des PHEV so gewählt, dass der gleiche Batterieladezustand (State of Charge = SoC), der vor der Simulation vorlag, auch nach der Simulation mit einer maximalen Abweichung von 0,1 % erreicht wird. Der Einsatz der Maschinen kann durch das Betriebsmanagement in bestimmten Grenzen variiert werden. In dem verwendeten Modell wurde der Einsatz der E-Maschine durch das Moment variiert, ab dem diese die VKM unterstützt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die prinzipiellen Häufungen der Betriebspunkte im Drehzahl - Drehmoment - Kennfeld durch geringe Variationen des Einsatzes der E-Maschine nicht ändern. Bei Ansicht der Kennfelder als Ergebnis dieser Simulation des PHEV für den SC03 in **Bild 3** ist festzustellen, dass sich eine Mehrzahl der Betriebspunkte im mittleren bis oberen Drehzahlbereich des Ankerstellbereiches und an der Grenze zum Feldschwächbereich befindet. Deutlich ist auch die starke

Häufung der Betriebspunkte bei maximaler Leistung, deren Entstehung vor allem durch die hinterlegte Betriebsstrategie, einer sehr frühen Unterstützung der VKM, begründet ist.



**Bild 3:** Häufigkeitsverteilung bei ECE-Zyklus (links) und SC03-Zyklus (rechts):  
Leistung E-Maschine, PHEV

Im Vergleich dazu sind die Häufungen in den Kennfeldern des EV in **Bild 4** offensichtlich anders strukturiert. Hier ist deutlich eine Anhäufung von Betriebspunkten im Teillastbetrieb über einen größeren Drehzahlbereich zu erkennen, begründet durch eine feste Getriebeübersetzung der E-Maschine mit der Antriebswelle der Räder. Bei den gegebenen Zyklen wurde die maximale Leistung der Maschine nie abverlangt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass derartige Anforderungen auch im Stadtverkehr nur selten auftreten. Trotzdem muss der Antrieb für alle Lastfälle (z. B. Befahren von Parkhausrampen mit hoher Steigung oder Vollastbetrieb mit maximaler Geschwindigkeit) ausgelegt werden.



**Bild 4:** Häufigkeitsverteilung bei ECE-Zyklus (links) und SC03-Zyklus (rechts):  
Leistung E-Maschine, EV

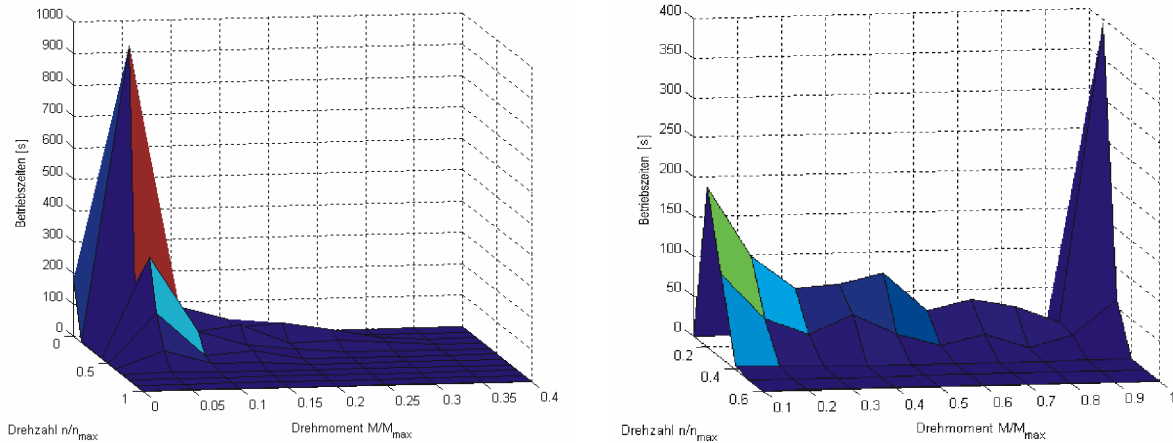
Der Vergleich der Simulationsrechnungen bestätigt die bekannte Tatsache, dass sich die Betriebsweisen der Elektroantriebe für die beiden Fahrzeuge deutlich voneinander unterscheiden. Eine Klassifizierung der Betriebspunkte nach Drehmoment, Drehzahl und Betriebsdauer quantifiziert die Unterschiede aus der Simulation noch deutlicher (**Bild 5**). Betrachtet wurde hier der generatorische Betrieb, da der Einfluss der Betriebsstrategie dort als geringer angenommen wird als im motorischen Betrieb. Der Nullpunkt wurde beim Hybridfahrzeug unterdrückt, da im Gegensatz zum EV eine sehr große Zahl von Betriebspunkten bei  $M = 0$ , z. B. im SC03-Zyklus, zu finden ist:

**EV-** Betriebsdauer mit  $M = 0$ :

180 Sekunden, d. i. 3 % der Gesamtzykluszeit

**PHEV-** Betriebsdauer mit  $M = 0$ :

4196 Sekunden, d. i. 71 % der Gesamtzykluszeit



**Bild 5:** Verteilung der Betriebszeiten im Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld bei generatorischem Betrieb im SC03-Zyklus: EV (links) und PHEV (rechts)

Damit ergeben sich für den Elektromaschinenentwurf jeweils völlig unterschiedliche Bedingungen, die in der bisherigen Literatur noch nicht ausreichend berücksichtigt worden sind. Während der Elektrofahrmotor des EV auch für Dauerbetrieb bei max. Leistung ausgelegt sein muss und gleichzeitig einen guten Teillastwirkungsgrad sowie eine hohe Kraftdichte haben sollte, muss der Elektromotor des PHEV für kurzzeitige Pulslasten (thermische Überlastbarkeit), hohe Dynamik und guten Wirkungsgrad im Bereich des maximalen Momentes ausgelegt werden. Der Dauerbetrieb bei maximaler Leistung wird dagegen durch den Verbrennungsmotor abgedeckt, der ebenfalls angepasst ausgelegt sein muss.

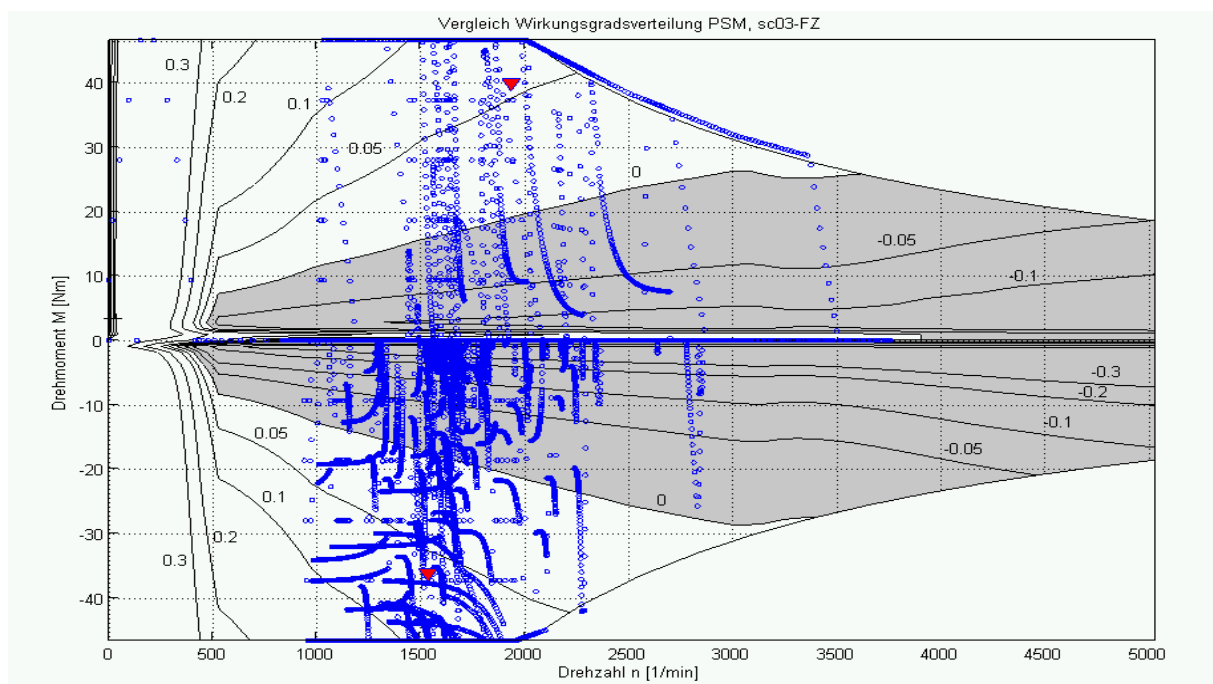
## 4 GEZIELTER ENTWURF DER E-MASCHINE

Aus der Simulation des PHEV ist zu erkennen, dass die elektrische Maschine oft sowohl motorisch als auch generatorisch im Teillastbereich betrieben wird. Die Entwurfsmethode muss also darauf abzielen, die Maschine so auszulegen, dass die maximale Leistung gewährleistet wird und gleichzeitig im Teillastbetrieb ein optimierter Wirkungsgrad vorliegt. Um einen Referenzpunkt bei der Auslegung der Maschine zu bekommen, wird jeweils für Motor- und Generatorbetrieb der mittlere Betriebspunkt der Maschine für jeden simulierten Fahrzyklus berechnet. Trennt man alle motorischen Betriebspunkte von den generatorischen, wird ein gewichteter Mittelwert für beide Betriebsarten nach Gleichung (1) und (2) bestimmt:

$$M_m = \frac{\sum_i M_i \cdot t_i \cdot P_{mech_i}}{\sum_i t_i \cdot P_{mech_i}} \quad (1)$$

$$\omega_m = \frac{\sum_i \omega_i \cdot t_i \cdot P_{mech_i}}{\sum_i t_i \cdot P_{mech_i}} \quad (2)$$

Dabei ergibt sich das mittlere Moment ( $M_m$ ) bzw. die mittlere Drehzahl ( $\omega_m$ ) durch die mit der mechanischen Leistung der E-Maschine ( $P_{mech}$ ) gewichtete Aufsummierung der Momente pro Simulationsschritt  $i$  ( $M_i$ ) bzw. Drehzahlen pro Simulationsschritt  $i$  ( $\omega_i$ ), wobei jeder Simulationsschritt einer Zeitdauer von  $t_i$  entspricht. Der mittlere Betriebspunkt gilt als Orientierungspunkt bei der Auslegung der Maschine. In **Bild 6** wird das Kennfeld des Maschinenentwurfs am Beispiel einer verbesserten PMSM mit einer für diese Applikation am Markt erhältlichen PMSM verglichen. In der Graphik enthalten sind die Betriebspunkte des SC03 (Kreise) und der mit den Gl. (1) und (2) berechnete mittlere Betriebspunkt jeweils für den motorischen und generatorischen Bereich (Dreieck). Weiße Flächen markieren Bereiche, in denen die optimierte Maschine einen besseren Wirkungsgrad besitzt, graue Bereiche solche mit einem schlechteren Wirkungsgrad. Deutlich zu erkennen ist die Verbesserung des Kennfeldes in Bereichen mit maximalem Moment, die relativ häufig auftreten.



**Bild 6:** Differenzkennfeld PMSM mit SC03-Fahrzyklus - Betriebspunkten

## 5 SIMULATIONEN MIT ENTWORFENEN MASCHINEN

### 5.1 Allgemeines

Für die Simulation der verbesserten Maschinen wurden Initialisierungs- und Berechnungsdateien der Simulationssoftware unter anderem dahin gehend erweitert, dass zur Berechnung der Verluste für den motorischen und generatorischen Fall der E-Maschine auf die jeweiligen Kennfelder zurückgegriffen werden kann. Verluste des Wechselrichters wurden mit 2 % der Maschinenleistung angenommen.

## 5.2 Untersuchung von Eigenschaften der E-Maschine

Zur Optimierung der elektrischen Maschine wurden drei Eigenschaften der Maschine untersucht: Zunächst wurde der Einfluss der Masse auf den Gesamtenergieverbrauch des Fahrzeugs betrachtet. Durch die Masse des Rotors auf der Kurbelwelle wurde nachfolgend zusätzlich der Einfluss der Änderung des polaren Trägheitsmoments auf den Verbrauch abgeschätzt. In einem letzten Schritt wurde die Auswirkung der gezielten Veränderung der Wirkungsgradkennfelder durch Optimierung untersucht. Unterstellt wurde dabei das Auftreten eines Zielkonfliktes: Im Allgemeinen hat eine Maschine mit einer höheren Masse infolge einer großzügigeren Dimensionierung des Eisenkreises und Erhöhung der Kupfermasse prinzipiell einen höheren Wirkungsgrad. Allerdings bedeutet eine höhere Masse auf der Kurbelwelle auch höhere Verluste, die durch die Notwendigkeit der Beschleunigung der Masse in translatorischer und rotatorischer Richtung während des Betriebes begründet sind. Im Folgenden werden die Randbedingungen der Simulationen und deren Ergebnisse vorgestellt.

## 5.3 Einfluss der Masse auf den Gesamtverbrauch

Der Einfluss der Masse der E-Maschine wurde angesichts des Verhältnisses zur Gesamtfahrzeugmasse als sehr gering angenommen. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde die Betriebsstrategie dahingehend verändert, dass der SoC beim Start und zum Ende der Simulation 70 % betrug, einschließlich einer Abweichung von maximal  $\pm 0,6$  %. Es wurde weiterhin ein Maschinenentwurf in die Simulation eingebettet, bei dem lediglich die Maschinenmasse (Stator und Rotor) variiert wurde, ohne andere Parameter von Fahrzeug oder Maschine zu verändern. Die Maschinenmasse wurde zwischen 20 kg und 39 kg variiert, zusätzlich wurde ein konstantes Gewicht für den Wechselrichter von jeweils 15 kg angenommen. Als Testzyklus wurde der dreimalige Durchlauf des dynamischeren SC03-Zyklus gewählt mit einer Gesamtdauer von 1782 s. Trotz der Annahme eines Einflusses der E-Maschinenmasse auf den Gesamtverbrauch konnten die Simulationsergebnisse keine signifikante Veränderung des Kraftstoffverbrauches zeigen.

## 5.4 Einfluss des Trägheitsmoments auf den Gesamtverbrauch

Zur Untersuchung des Einflusses der Veränderung der polaren Trägheit wurden die gleichen Randbedingungen für die Simulation wie bei der Überprüfung des Einflusses der Masse unterstellt. Zusätzlich zur Veränderung der Masse wurde die Änderung des polaren Trägheitsmoments der Rotoren in die Berechnung integriert. Die auf diesem Weg berechneten Trägheiten betragen zwischen  $0,0688 \text{ kgm}^2$  und  $0,1342 \text{ kgm}^2$ . Nach Simulation eines dreifachen SC03-Zyklus wurde festgestellt, dass eine Veränderung des Kraftstoffverbrauches erkennbar ist. Veränderungen lagen im Bereich von ca. 4 %. Einen zusätzlichen Einfluss auf die Wirkung der Massenträgheit hat die Schaltstrategie des Fahrzeugs. Die Drehzahl der VKM betrug maximal nur ca. 4000 1/min, zusätzlich ist aus **Bild 6** zu erkennen, dass ein Großteil der Betriebszustände im Bereich zwischen 1000 und 2000 1/min liegen. Ein sport-

licheres Fahrverhalten könnte hier zu deutlicheren Veränderungen bezüglich des Einflusses des polaren Trägheitsmomentes auf den Kraftstoffverbrauch führen. Für die Auslegung der E-Maschine sollte ein Kompromiss zwischen guten Fahreigenschaften des Fahrzeuges und verbessertem Wirkungsgrad der E-Maschine gefunden werden.

## 5.5 Einfluss durch gezielte Veränderung des Kennfeldes

Zur Überprüfung des Einflusses geänderter Kennfelder mit der Verschiebung hoher Wirkungsgrade hin zu Bereichen mit großer Häufigkeit von Betriebspunkten wurden die Kennfelder aus den Entwürfen herangezogen. Zusätzlich zu den jeweiligen Kennfeldern wurden die tatsächlichen Massen und Trägheiten der Maschinen in der Simulation berücksichtigt, um Auswirkungen dieser je Maschine unterschiedlichen Parameter in die Simulationsergebnisse einfließen zu lassen. Simuliert wurde diesmal jeweils über den SC03 und den ECE-Zyklus. Um eine möglichst fundierte Entscheidung bezüglich der Eignung der Maschine für die gegebene Antriebsstruktur und für das gegebene Fahrzeug zu treffen, wurde für die E-Maschine eine separate Energiebilanz aufgestellt. Für Simulationsschritte mit der Zeitdauer  $t_i$  mit generatorischen Zuständen der E-Maschine (Index j) wurde die Energie aus der VKM in die E-Maschine ( $P_{mech}$ ), für motorische Zustände (Index k) die Energie aus der Batterie in die E-Maschine ( $P_{el}$ ) aufsummiert. Aus der Gesamtsumme der in der E-Maschine umgesetzten Energie und der in der Maschine über die Kennfelder berechneten Verluste ( $P_{verl}$ ), wurde ein energetischer Wirkungsgrad berechnet, der für die gegebene Fahrzeugkonstellation fahrzyklus- und betriebsstrategieabhängig ist (Gl. 3). Für drei PMSM-Entwürfe fasst **Tabelle 2** die Ergebnisse zusammen.

$$\eta = \frac{\left( \sum_j P_{mech} \cdot t_j + \sum_k P_{el} \cdot t_k \right) - \sum_i P_{verl} \cdot t_i}{\sum_j P_{mech} \cdot t_j + \sum_k P_{el} \cdot t_k} \quad (3)$$

**Tabelle 2:** Vergleich Wirkungsgrade E-Maschinen

PMSM	leicht	mittel	schwer	standard
$\eta_{SC03}/\eta_{ECE}$ [%]	88,6/89,6	89,9/90,4	90,7/91,2	82,9/86,3

Diese Wirkungsgrade weisen aus, wie geeignet die Entwürfe für den Einsatz in der zugrunde gelegten Antriebskonfiguration sind. In ihnen ist der Einfluss von Masse und Trägheit der Maschine auf den Betrieb im Fahrzyklus, nicht aber der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs enthalten. Ebenfalls wurde der Energiegewinn, der aus der Optimierung des Kennfeldes der E-Maschine resultiert, berechnet. Dieser kann zu einer Abschätzung von Verbrauchseinsparungen dienen. Zur Abschätzung des Energiegewinns durch Kennfeldverbesserung der optimierten Maschine kann die Energiedifferenz zwischen den Verlusten der Maschine berechnet werden. Dazu wurde zunächst ein mittlerer Wirkungsgrad der VKM aus den Zyklen von 25 % bestimmt. Verglichen wurde beispielhaft die Differenz der Energieverluste während des SC03-Zyklus der Maschinen, welcher einem gefahrenen Weg von 5,739 km entspricht.



Die Energiedifferenz wurde auf 100 km hochskaliert und anschließend der Energiegewinn berechnet, der sich in Liter/100 km darstellt. Diese Betrachtung erfolgt unter der Prämisse, dass die so eingesparte Energie von der VKM nicht erzeugt werden muss und direkt zum Antrieb oder von Verbrauchern genutzt werden kann. Die Umrechnung wird durch **Tabelle 3** zusammengefasst:

**Tabelle 3:** Abschätzung Einsparung Kraftstoffverbrauch durch Kennfeldoptimierung

<b>Energieeinsparung für SC03-Zyklus</b>	PMSM-St.	opt. PMSM
Umgesetzte Energie [Ws]	6,852E+05	6,910E+05
Verluste [Ws]	1,167E+05	0,638E+05
<b>Energiedifferenz durch Optimierung [Ws]</b>	<b>5,285E+04</b>	
Energieentnahme aus Tank $\eta_{VKM} = 0,25$ [Ws]	2,114E+05	
Energiedifferenz in Benzin [kg]	0,0050	
Energiedifferenz in Benzin [l]	0,0065	
<b>Energiedifferenz in Benzin [l/100km]</b>	<b>0,1126</b>	

Das Ergebnis aus **Tabelle 3** zeigt, dass die gezielte Veränderung des Kennfeldes der E-Maschine ein Einsparungspotential für den Gesamtverbrauch des Fahrzeugs darstellt. Gemessen an dem Gesamtverbrauch des Fahrzeugs von 3,2 l/100 km im SC03-Zyklus beträgt die Kraftstoffeinsparung in diesem Beispiel immerhin 3,1 %. Weitere Vergleichsrechnungen mit anderen E-Maschinen zeigen, dass das Einsparungspotential bis zu 6 % betragen kann.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht wurden Anforderungen an elektrische Maschinen im Antriebsstrang von Elektro- und Parallelhybridfahrzeugen generell und für vorgegebene Einbaustellen untersucht. Anhand zweier exemplarischer Fahrzeuge wurden die Unterschiede der Häufigkeitsverteilungen der Betriebspunkte aufgezeigt, die als Basis zur Auswahl des Maschinentyps und des Maschinenentwurfes verstanden werden müssen. Es zeigt sich, dass zwischen beiden Anwendungen deutliche Unterschiede bezüglich spezifischer Belastung und der häufigsten Drehzahlen vorliegen. Eine Gegenüberstellung der Entwurfsergebnisse von optimierter und Standard-PMSM für den Hybridantrieb zeigt, dass in der gezielten Optimierung der Maschine ein erkennbares Einsparpotenzial besteht. Die Simulationsergebnisse zur Untersuchung des Zielkonfliktes E-Motorenmasse – Wirkungsgrad bestätigen die Annahme, dass der Einfluss der Masse der E-Maschine keinen signifikanten Einfluss auf den Verbrauch des Fahrzeugs hat. Die Massenträgheit des Rotors darf dagegen nicht vernachlässigt werden. Je geringer sie ist, desto mehr Verbrauchseinsparung ist möglich. Der Zielkonflikt zeigt, dass für eine gute Maschine ein optimiertes Kennfeld bei gleichzeitig niedriger Rotorträgheit das größte Einsparpotenzial auf der elektrischen Seite bietet. In zukünftigen Untersuchungen sollen mit Hilfe der Simulationsrechnungen auch Einflüsse der Betriebsstrategie der Maschinen, des Verhältnisses von VKM-Leistung zur E-Maschinenleistung und unterschiedliche Maschinentopologien mit gezielten Entwürfen untersucht werden.