

# **Fahrzyklusgerechte Auslegung von Traktionsantrieben**

---

Felden, Matthias; Finken, Thomas; Hameyer, Kay

## **Abstract**

Electrical machines in hybrid electric vehicles (HEV) and electric vehicles (EV) have to meet several requirements which result from the given drive train topology, the needed functionalities and the specified drive cycle. The main requirements are similar to those for a common electrical machine. Such specifications are namely weight, construction volume, power density and reliability. To minimize the required energy of the HEV or EV, the most important requirement is a high efficiency and low weight. To reach this aim it is not crucial to accomplish a high maximum efficiency but a high overall efficiency of the whole drive train for a specified drive cycle, such as the UDDS. Therefore the choice and design of the electrical machine has to be performed with respect to this drive cycle.

Important parameters are the number of pole pairs, the ratio of stator and rotor radius and the winding configuration. For realistic results, it is essential to compare the different geometries only while guaranteeing the same electro-magnetic and thermal material stress for each parameter variation. All results und comparisons are presented with respect to the application of the electrical machine in an electric drive train. The geometries and variations as well as their advantages and disadvantages and most favorable applications are collected in a table. Furthermore a systematic approach to get the optimal geometry for a given drive train and installation space is presented.

## **Kurzfassung**

Die Anforderungen an die elektrischen Maschinen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, die sich aus den unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten und Funktionalitäten ergeben, sind sehr umfangreich. Die Hauptanforderungen entsprechen dabei durchaus den üblichen Anforderungen einer elektrischen Maschine, wie ein geringes Gewicht, ein kleines Bauvolumen, eine hohe Leistungsdichte und eine gute Zuverlässigkeit. Um den Energiebedarf des Fahrzeuges zu minimieren, ist eine wichtige Anforderung ein guter Wirkungsgrad der elektrischen Maschine. Entscheidend ist nicht der maximale Wirkungsgrad der Maschine in einem Arbeitspunkt, sondern der gemittelte Gesamt-Systemwirkungsgrad während einer Fahrt. Die elektrische Maschine muss also fahrzyklusgerecht ausgewählt und dimensioniert werden.

Wesentliche Stellgrößen für eine entsprechende Auslegung sind dabei die Polpaarzahl der Maschine, das Verhältnis von Rotor- zu Stator Durchmesser und die Wicklungskonfiguration. Essentiell bei einer Variation dieser Größen ist eine gleichbleibende elektromagnetische und thermische Materialbelastung um einen realistischen Vergleich der unterschiedlichen Designvarianten zu ermöglichen. Alle Ergebnisse und Vergleiche werden unter dem Aspekt der Anwendung im elektrifizierten An-

triebsstrang betrachtet. Eine tabellarische Übersicht über alle Geometrien und Variationen, deren Vor- und Nachteile sowie ihre zweckmäßigsten Verwendungsmöglichkeiten wird erstellt und eine Systematik erarbeitet, mit deren Hilfe für ein gegebenes Fahrzeugkonzept und dessen Anforderungen eine geeignete Geometriekombination ausgewählt werden kann.

## 1. Einleitung

Vorangetrieben durch die Klimadiskussion, welche auf Grund der voranschreitenden globalen Erderwärmung geführt wird, haben viele Staaten Maßnahmen zur aktiven CO<sub>2</sub>-Reduktion auf den Weg gebracht. Da der globale Straßenverkehr zu ca. 24% und der PKW-Verkehr in Deutschland zu ca. 14% zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß beitragen, sind auch in der Automobilindustrie neue Antriebskonzepte gefragt, welche unabhängig von fossilen Energieträgern funktionieren [1]. Elektrofahrzeuge stellen ein solches Konzept dar. Weiterhin reduzieren Elektrofahrzeuge durch die Diversifizierung der eingesetzten Primärenergieträger die Abhängigkeit der europäischen Staaten vom Öl und sind in Verbindung mit Strom aus regenerativen Energien Nullemissionsfahrzeuge. Sie reduzieren außerdem die lokalen Emissionen von Feinstaub, Lärm und Schadstoffen und fördern somit die Lebensqualität in urbanen Lebensräumen. In der Zukunft könnten sie weiterhin durch Nutzung der Batterie als Energiezwischenspeicher zu einer Verbesserung der Effizienz der Stromnetze beitragen und somit zur Anpassung der stark fluktuierenden Energiegewinnung aus regenerativen Energien an die Lastkurven der Netze beitragen.

Ziel bei der Auslegung von elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge ist es, die Gesamteffizienz des Antriebes und somit die Reichweite des Fahrzeuges zu maximieren. Da die elektrische Maschine in Automotive-Anwendungen nicht in einem Betriebspunkt betrieben wird, muss der gesamte Betriebsbereich der Maschine in Abhängigkeit von der Anwendung betrachtet werden. Dabei müssen zunächst die häufigsten Antriebsbetriebspunkte eines Fahrzyklus durch eine Fahrzeugsimulation bestimmt werden. Im Anschluss wird die elektrische Maschine so ausgelegt, dass der Betriebsbereich mit der höchsten Effizienz mit den häufigsten Betriebspunkten übereinstimmt. Hierdurch wird die verfügbare Energie der Batterie optimal ausgenutzt.

Auf Grund des limitierten Bauraumes stellt sich meist die Frage nach der in diesem Raum maximal integrierbaren Leistung. Daher soll in diesem Beitrag eine Systematik vorgestellt werden, welche bei fixierten äußeren Dimensionen einer elektrischen Maschine eine optimale Ausnutzung garantiert. Die Freiheitsgrade bei der Auslegung sind die Polpaarzahl, das Verhältnis von Stator- zu Rotorradius und der Wicklungsart. Als Randbedingungen müssen stets eine gleichbleibende elektro-magnetische und thermische Auslastung des Materials gewährleistet sein, da nur so der Magnetkreis und das Kühlsystem optimal ausgenutzt werden und ein fairer Vergleich entsteht. Aus diesem Grund beinhaltet die Analyse eine detaillierte Verlustbetrachtung von ohmschen Verlusten, Eisenverlusten und insbesondere Wirbelstromverlusten in den Permanentmagneten. Als Ergebnis der Auslegung ergeben sich somit eine optimale Polpaarzahl, ein optimaler Rotorradius und die geeignete Wicklungsart mit Hinblick auf die bereits erwähnten Fahrzeugsimulationen sowie häufigsten Betriebspunkte. In diesem Beitrag wird die Systematik am Beispiel einer PMSM veranschau-

licht. Die Eignung der Methode soll im Anschluss an einem Prototyp dieses Maschinentyps verifiziert werden.

## 2. Fahrzeugsimulation

Primäre Ziele bei der Auslegung einer elektrischen Maschine für Elektro- oder Hybridfahrzeuge sind eine hohe Leistungsdichte, geringes Bauvolumen und Gewicht, hohe Überlastfähigkeit, geringe Kosten und ein großer Drehzahlbereich. Jedoch muss für eine optimale Ausnutzung der Batterie die Effizienz des gesamten Antriebsstranges optimiert werden. Für eine optimale Auslegung der elektrischen Maschine müssen daher die häufigsten Betriebspunkte der Maschine mit dem Bereich des höchsten Wirkungsgrades übereinstimmen.

Um die häufigsten Betriebspunkte zu bestimmen, werden Fahrzeugsimulationsmodelle eingesetzt (s. Bild 1). Sie verbinden Fahrzyklen, Fahrzeugdaten, Getriebedaten und Batterie sowie die Fahrzeug- und Batteriesteuerung miteinander. Die Fahrzyklen repräsentieren dabei ein Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs über der Zeit. Für eine realistische Simulation sollten mehrere Fahrzyklen, je nach Anwendung städtische, außerstädtisch und/oder Autobahnfahrzyklen, miteinander gewichtet kombiniert werden. Als Ergebnis der Fahrzeugsimulation ergeben sich Werte für den Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch, die Energiebilanz, der Batterieladestatus sowie die Betriebspunkte der elektrischen Maschine.

In diesem Beitrag sollen die typischen Betriebspunkteverteilungen als Ergebnisse einer solchen Simulation am Beispiel der Fahrzyklen EPA Urban (UDDS), Hyzem Urban, EPA Highway (HWFET) und Hyzem Motorway veranschaulicht werden (s. Bild 2). Dabei werden die Unterschiede zwischen den Fahrzyklen deutlich. Bei Stadtfahrten werden auf Grund häufiger Brems- und Beschleunigungsvorgänge die höchsten Drehmomente, insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten, benötigt. Bei Autobahnfahrten verschieben sich die Betriebspunkte durch das konstante Fahren bei hoher Geschwindigkeit hin zu höheren Drehzahlen und geringeren Drehmomenten. Je konstanter die Geschwindigkeit dabei gehalten wird, desto besser lässt sich der Bereich der häufigsten Betriebspunkte für den Fahrzyklus definieren (vgl. EPA Highway). Es wird deutlich, dass der optimale Wirkungsgradbereich der elektrischen Maschine bei reinen Stadtfahrzeugen anders als bei Fahrzeugen für Stadt- und Autobahnbetrieb bei niedrigeren Drehzahlen und höheren Drehmomenten liegen sollte. Dies muss bei der Auslegung berücksichtigt werden.

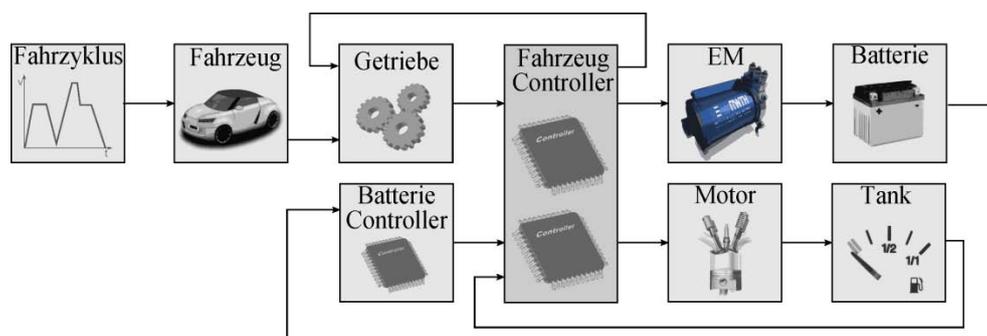


Bild 1: Fahrzeugmodell für ein paralleles Hybridfahrzeug

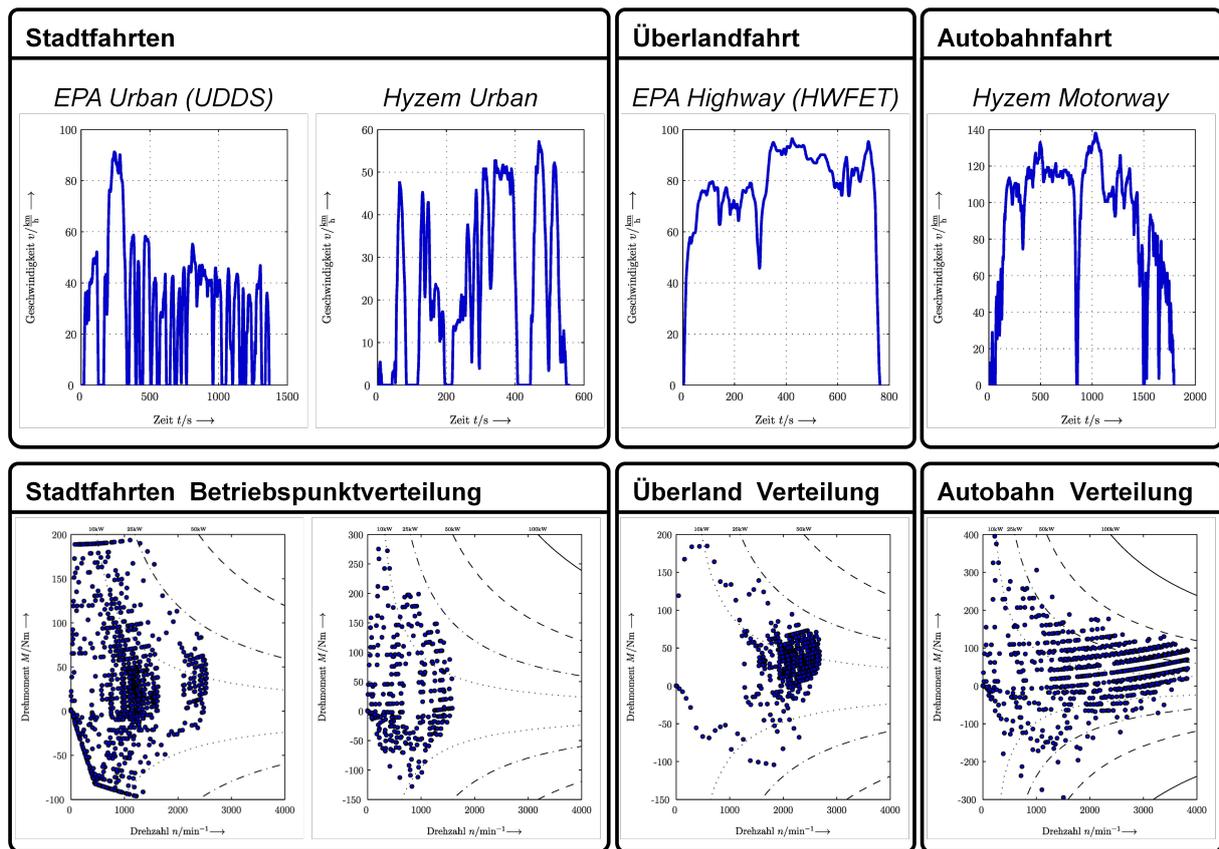


Bild 2: Fahrzyklen und resultierende Betriebspunkteverteilung

### 3. Numerische Methoden zur Berechnung einer PMSM

Um bei der Auslegung der elektrischen Maschine -hier eine PMSM- auch Sättigungs- und Streuflusseffekte zu berücksichtigen wird in diesem Beitrag eine numerische Rechenkette für ein automatisiertes Maschinendesign vorgestellt. Alle vorgestellten Simulationen wurden mit der am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen entwickelten FEM-Software iMOOSE durchgeführt [2].

Zunächst wird eine *Leerlaufrechnung* genutzt, um die Statorflussverkettung und die induzierte Spannung zu bestimmen und die Flussverteilung zu visualisieren.

Im Anschluss wird eine *Entmagnetisierungsrechnung* ausgeführt. Hierbei wird der maximal mögliche Strom so eingespeist, dass er ein dem Magnetfeld des Permanentmagneten genau entgegengesetztes Feld erzeugt. Dies entspricht einem Worst-Case-Szenario im Fehlerfall. Der Magnet darf dabei nicht irreversibel geschädigt werden.

Da permanenterrechte Synchronmaschinen mit vergrabenen Magneten eine magnetische Anisotropie ( $L_q \neq L_d$ ) besitzen, muss die Maschine für einen optimalen Betrieb so geregelt werden, dass neben dem Synchronmoment ebenfalls das durch die Anisotropie entstehende Reluktanzmoment ausgenutzt wird. Dies kann über die Einstellung des sogenannten Vorsteuerwinkels  $\psi$  (Winkel zwischen  $I_q$  und  $I_d$ ) geschehen. Bei dem optimalen Vorsteuerwinkel wird die Summe aus Synchron- und Reluktanzmoment und somit das Gesamtdrehmoment maximal. Der optimale Vor-

steuerwinkel sowie das maximale Drehmoment der PMSM werden in der Simulationskette über eine *Rechnung mit blockiertem Rotor* („Locked-Rotor“) ermittelt.

Im Anschluss werden numerisch die Induktivitäten  $L_q$  und  $L_d$  der PMSM als Funktion des Vorsteuerwinkels und der Laststromstärke bestimmt. Sie werden für die Regelung und somit für die Ermittlung des Betriebsbereichs der Maschine benötigt. Somit kann dann auch die Feldschwächbarkeit und die maximale Drehzahl angegeben werden.

Abschließend werden aus diversen *Betriebspunktberechnungen* die Verluste für jede Drehzahl und Last bestimmt. Die ohmschen Verluste werden dabei inklusive den Wickelkopfverlusten analytisch abgeschätzt. Die Eisenverluste ergeben sich aus der numerischen Rechnung mittels eines Separationsansatzes ([3]-[6]). Die Information über die Höhe der Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten wird aus einer transienten numerischen 3D-Rechnung gewonnen ([7]-[8]). Durch Berechnung der Verluste in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment lassen sich so Verlustkennfelder darstellen. In einem weiteren Schritt werden aus der abgegebenen Leistung und den Verlusten Wirkungsgradkennfelder bestimmt (s. Bild 4). Die Betriebspunktberechnungen geben ebenfalls Auskunft über den zeitlichen Verlauf des Drehmomentes und durch eine Transformation in den Frequenzbereich über dessen Oberwellenanteil. Bild 3 zeigt noch einmal die gesamte Simulationskette. Für eine Reduktion des numerischen Aufwandes wurde die Simulationskette mittels der Software ProMOTOR automatisiert, so dass die Charakteristiken verschiedener Maschinen-Designs unabhängig voneinander und parallel berechnet werden können [9]-[11].

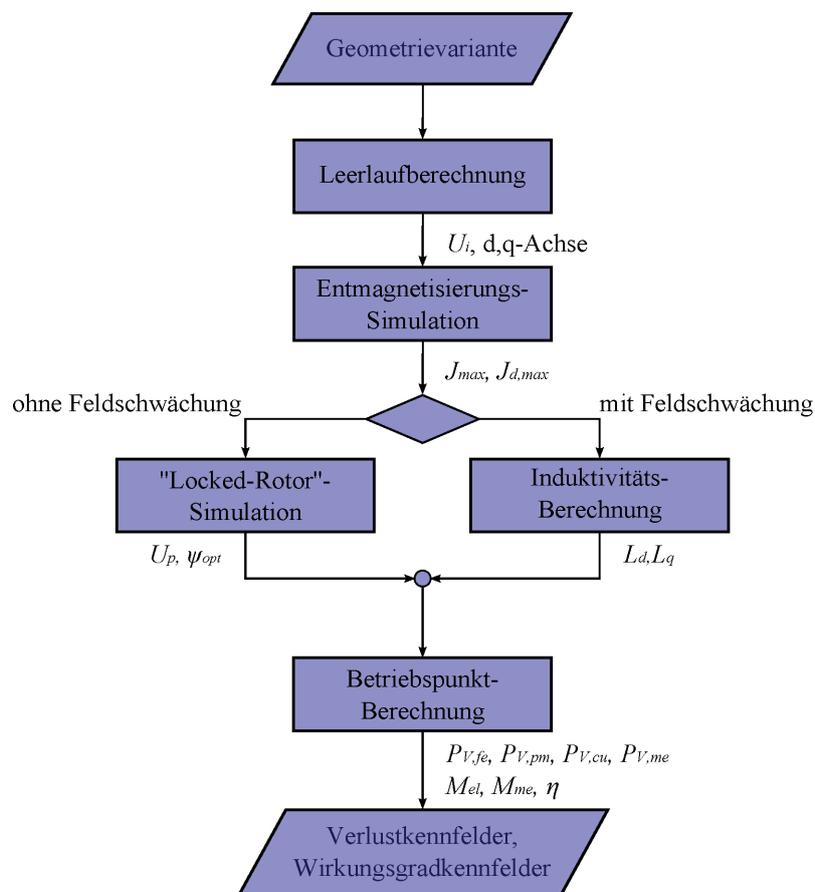


Bild 3: Automatisierte Simulationskette

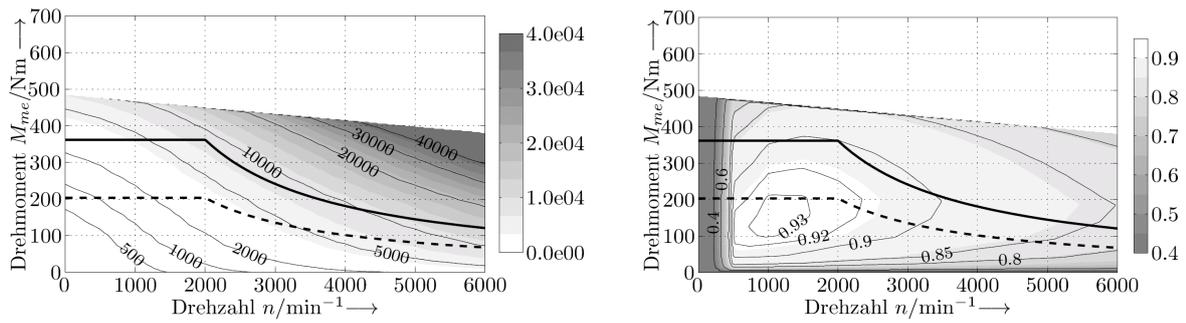


Bild 4: Exemplarisches Verlustkennfeld und Wirkungsgradkennfeld

## 4. Auslegung unter Berücksichtigung der wesentlichen Stellgrößen

Um die Auswirkungen der wesentlichen Stellgrößen einer elektrischen Maschine bei beschränktem Bauraum zu ermitteln, werden in diesem Beitrag verschiedene Geometrien einer PMSM diskutiert. Dazu wird die Maschine zunächst mit analytischen Mitteln grobausgelegt. Dabei wird ein initialer Rotorradius ermittelt, im Fall der Beispielmachine liegt er bei 78mm. Um die genauen Auswirkungen von *Polpaarzahl- und Radiusvariationen* auf die Verluste und die Drehmomentbildung zu erkennen und die optimale Variante zu ermitteln, werden im Anschluss Geometrien mit Rotorradien von 60mm bis 105mm und Polpaarzahlen von 4 bis 8 mit Hilfe der oben beschriebenen numerischen Simulationskette untersucht (s. Bild 5). Bei allen Variationen werden die Parameter für die Außenabmessungen (Statoraußendurchmesser (270mm) & Länge (160mm)) sowie die Luftspaltlänge (0.7mm) konstant gehalten.

### 4.1 Modelle und Statorvarianten

Die beschriebene Analyse wird zusätzlich mit verschiedenen Statorvarianten durchgeführt. Untersucht werden eine Variante mit *konzentrierter Wicklung (CW)* und zwei

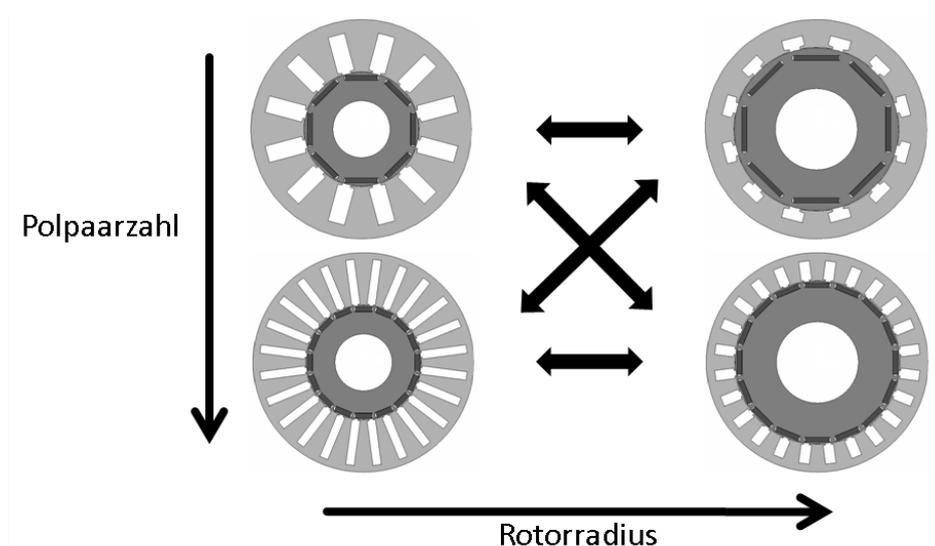


Bild 5: Matrix der Variationen über Rotorradius und Polpaarzahl

Varianten mit *verteilter Wicklung (DW)* (s. Bild 6). Die verteilte Wicklung hat einmal eine Nutzahl pro Pol und Strang von  $q=1$  und einmal eine von  $q=2$ . Jede Wicklungsart besitzt Vor- und Nachteile [12]-[14]. Konzentrierte Wicklungen haben kurze Wickelkopflängen und ermöglichen somit bei beschränktem Bauraum mehr aktive Länge der elektrischen Maschine. Zusätzlich werden die ohmschen Verluste in der Wicklung in dem Abschnitt reduziert, welcher nicht zur Drehmomentbildung beiträgt, und es kann ein hoher Kupferfüllfaktor durch vorgewickelte Spulen erreicht werden. Verteilte Wicklungen haben dagegen bessere Wicklungsfaktoren aufzuweisen, jedoch sind die Wicklungsköpfe signifikant größer und der Kupferfüllfaktor ist schlechter. Der größte Vorteil besteht darin, dass ein geringerer harmonischer Anteil im Luftspaltfluss erzeugt wird. Hierdurch können Wirbelstromverluste im Magneten signifikant reduziert werden (s. Bild 10).

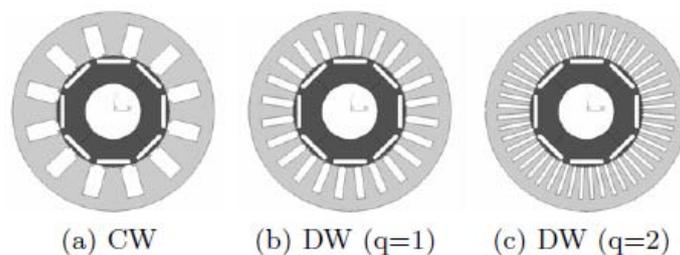


Bild 6: Statorvarianten

## 4.2 Optimale Parameterwahl

Bei den Variationsrechnungen wird für jede Polpaarzahl und jede Wicklungsart ein optimaler Rotorradius bestimmt, bei dem das Drehmoment der Maschine maximal wird. Dabei kann festgestellt werden, dass der optimale Rotorradius mit der Polpaarzahl und dem Laststrom auf Grund der Verringerung der Joch- und Zahnbreiten bzw. die Erhöhung der Stromdichte in den Statornuten zunimmt. Das Drehmoment kann jedoch nicht beliebig durch eine Erhöhung der Polpaarzahl vergrößert werden. Insbesondere müssen die Eisenverluste berücksichtigt werden, da sie mit steigender elektrischer Frequenz und somit mit steigender Polpaarzahl stark zunehmen. Wichtig ist, dass die thermischen Grenzen der elektrischen Maschine dabei niemals überschritten werden.

Für die Wahl der optimalen Polpaarzahl und des Wicklungstyps werden zunächst detaillierte Betrachtungen der Auswirkungen durchgeführt. Bei der Verlustberechnung bestätigt sich, dass die *ohmschen Verluste* bei verteilter Wicklung auf Grund der größeren Wickelkopflänge deutlich höher sind als bei einer konzentrierten Wicklung (s. Bild 7). Die *Eisenverluste* variieren, wie bereits beschrieben, deutlich mit der Polpaarzahl (s. Bild 8). Sie sind jedoch nahezu unabhängig von der Wicklungsart, da das Volumen des Statorblechs annähernd identisch ist.

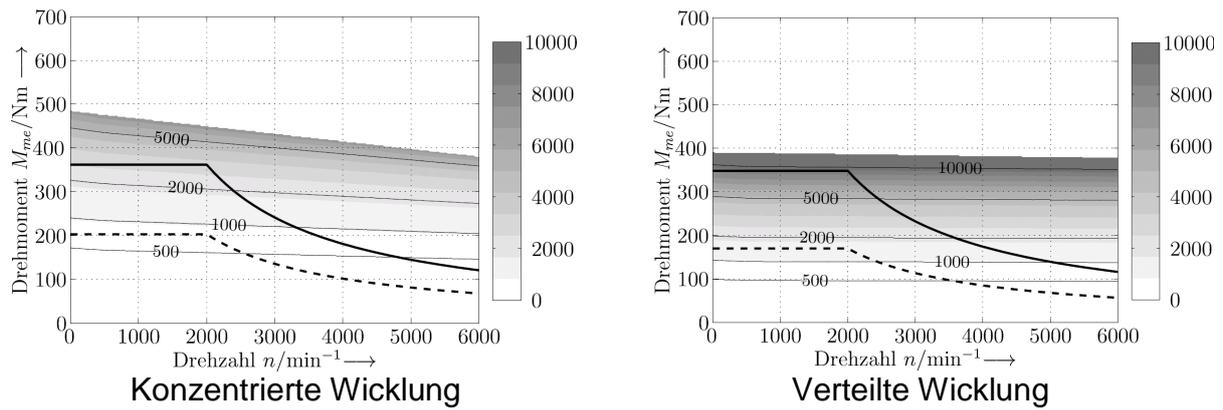


Bild 7: Ohmsche Verluste (W)

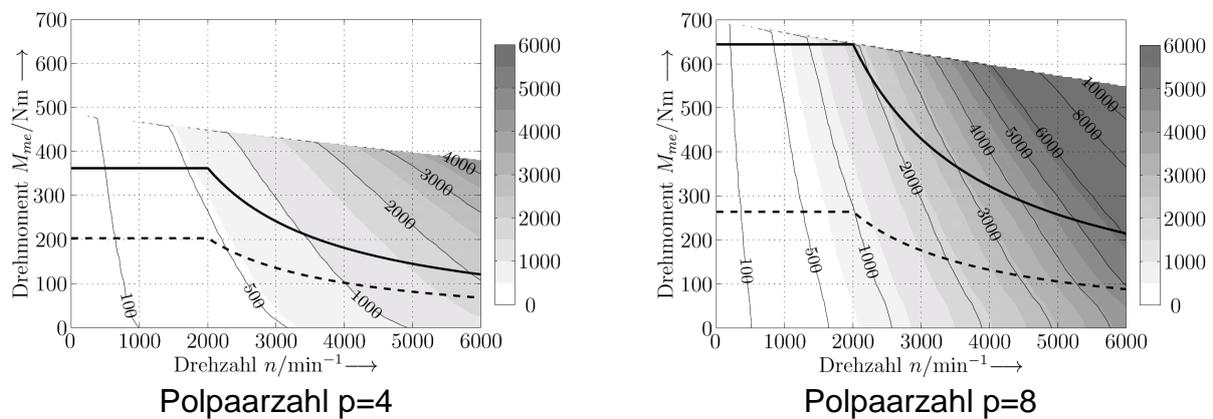


Bild 8: Eisenverluste (W)

Die Wirbelstromverluste in den Magneten sind abhängig von einer gewählten Segmentierung (s. Bild 9). Die Segmentenanzahl  $N_{a,seg}$  gibt dabei an, wie viele Magnetabschnitte in axialer Richtung auf dem Rotor montiert werden. Mit steigender Anzahl der Segmente sinken die Verluste, da sich die Wirbelströme schlechter ausbreiten können. Aus Kostengründen bei der Montage wird in diesem Beitrag mit vier Segmenten gerechnet.

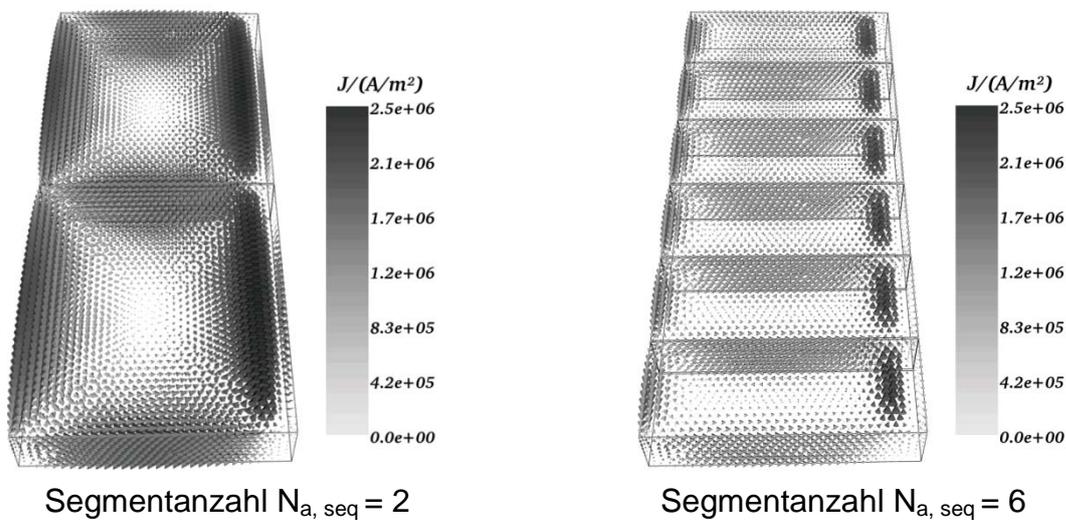


Bild 9: Einfluss der Segmentierung auf die Wirbelströme in Permanentmagneten

Die Wirbelstromverluste sind abhängig von der Drehzahl ( $\sim f^2 \sim (n * p)^2$ ) und dem Laststrom der Maschine. Sie steigen jedoch nicht mit der Polpaarzahl, da mit steigender Polpaarzahl die Magnetbreite ( $w_{PM} \sim 1/p$ ) abnimmt, was dem Effekt einer Segmentierung entspricht. Einen großen Einfluss auf die Höhe der Wirbelstromverluste hat jedoch die Wicklungsart. Bei verteilten Wicklungen sind die Verluste um einen Faktor 20 kleiner als bei einer konzentrierten Wicklung (s. Bild 10). Der Grund hierfür sind die größeren Schwankungen der magnetischen Flussdichte im Magneten.

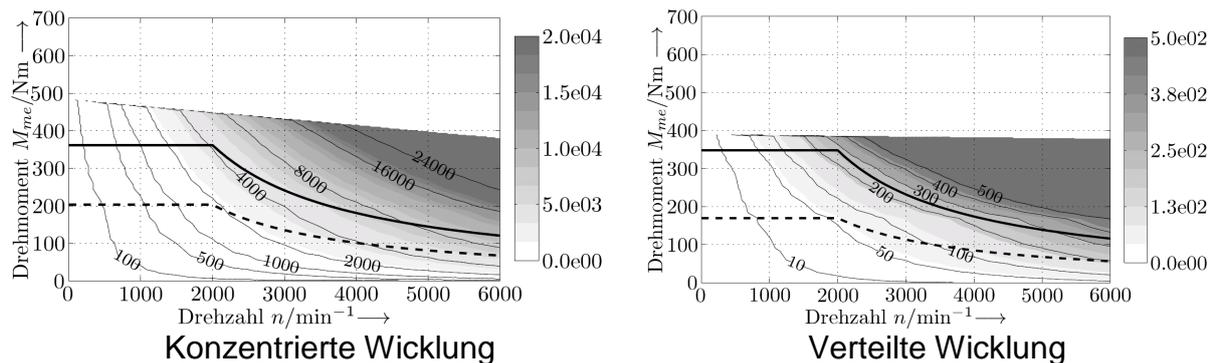


Bild 10: Wirbelstromverluste (W)

Bei dem Vergleich der Topologien muss darauf geachtet werden, dass zum einen die Zahnbreiten und Jochdicken im Stator so gewählt werden, dass die *elektromagnetische Belastung* im Statorblech für alle Varianten gleich bleibt. Nur so kann das verfügbare Bauvolumen optimal genutzt werden. Weiterhin müssen die *thermischen Grenzen* des gewählten gemeinsamen Kühlsystems der Varianten berücksichtigt werden. Hierzu gilt es drei Grenzen zu beachten: Zunächst dürfen die Gesamtverluste in der elektrischen Maschine im Nennbetrieb nicht die maximal abführbaren Verluste an der Manteloberfläche der Maschine überschreiten. Nur so ist gewährleistet, dass die Verluste auch dauerhaft abgeführt werden können. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Verluste im Rotor zu einem wesentlichen Teil über den Luftspalt abgeführt werden müssen, welcher einen großen thermischen Widerstand darstellt und die Wärme nur schlecht leitet. Daher sind die maximalen Rotorverluste limitiert. Im Fall einer PMSM sind hier insbesondere die Wirbelstromverluste in den Magneten zu beachten. Eine dritte thermische Grenze entsteht in den Statornuten. Hier müssen die ohmschen Verluste der Wicklung über die Nutwand und deren Isolation abgeführt werden. Es ist wichtig, dass die Temperatur niemals soweit ansteigt, dass die Isolation geschädigt wird und damit deren Lebensdauer stark reduziert wird. Aus den thermischen Grenzen kann sich ergeben, dass bestimmte Parametervariationen (zum Beispiel mit hoher Polpaarzahl) nur bei reduziertem Nennstrom dauerhaft betrieben werden können. Die thermischen Grenzen können jedoch durch die Wahl des Kühlsystems verschoben werden. Zur Auswahl steht neben der Luftkühlung eine direkte oder indirekte Wasser- oder Ölkühlung. Bild 11 zeigt die möglichen Betriebsbereiche zweier elektrischer Maschinen mit verschiedenen Wicklungsarten unter Berücksichtigung der maximal abführbaren Verlustwärme. Es ist zu erkennen, dass durch die erhöhten Wirbelstromverluste bei konzentrierter Wicklung insbesondere bei hohen Drehzahlen die thermische Grenze früh erreicht wird.

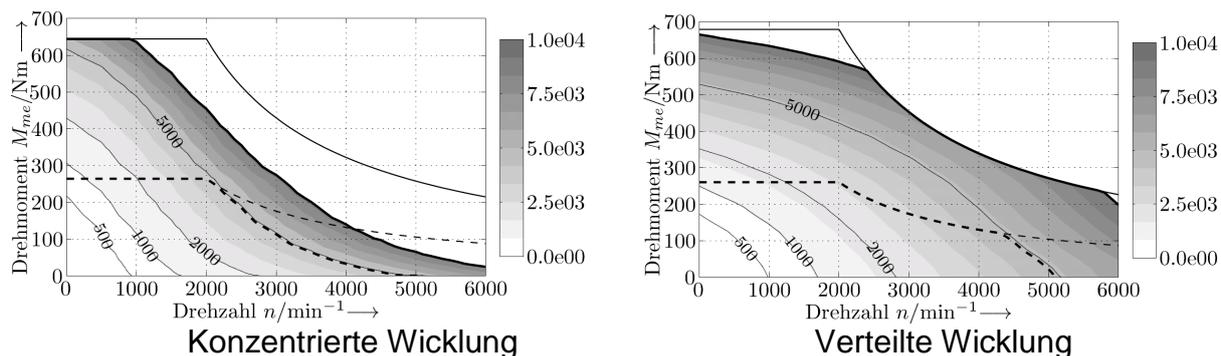


Bild 11: Maschinenkennfelder unter Beachtung der thermischen Grenzen

Mit Hilfe der ermittelten Verluste und Leistungen unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen können nun die Wirkungsgradkennfelder für alle Kombinationen aus Polpaarzahl, Rotorradius und Wicklungsart erstellt werden. Bild 12 zeigt die Kennfelder der Variante mit verteilter Wicklung und Polpaarzahl  $p=4$  mit optimalem Rotorradius in Kombination mit den in der Fahrzeugsimulation ermittelten Betriebspunkten des Hybridfahrzeugs. Durch einen Vergleich der *Gesamteffizienz* der jeweiligen Auslegungsvariante in Kombination mit dem Fahrzyklus kann eine optimale Auslegung angegeben werden.

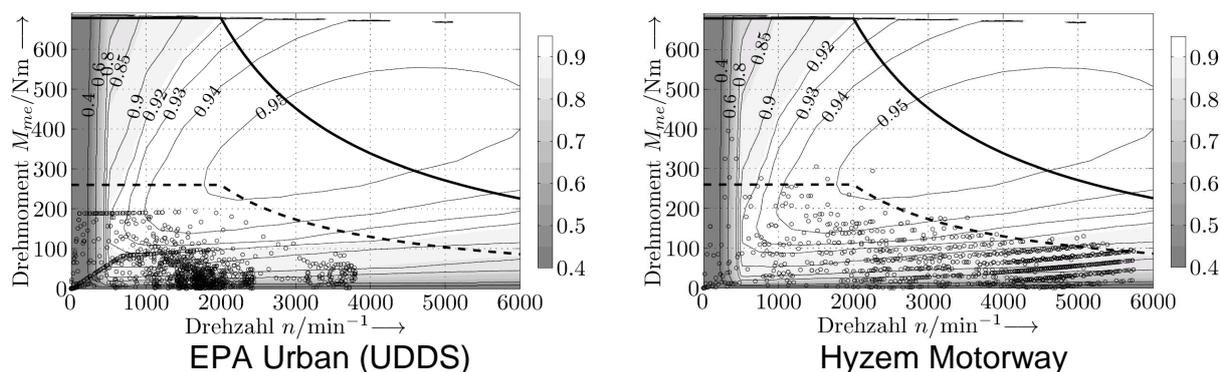


Bild 12: Wirkungsgradkennfelder mit Betriebspunktverteilung

### 4.3 Endgültige Bestimmung der optimalen Geometrie

Tabelle 1 fasst die Gesamteffizienzen aller Variationen für alle Fahrzyklen noch einmal zusammen. Hiermit kann die Geometrievariante mit der höchsten Gesamteffizienz für den gewünschten Fahrzyklus ausgewählt werden (markierte Werte). Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile der untersuchten Wicklungsarten anhand charakteristischer Maschinengrößen zusammen.

Bei Fahrzeugen mit besonders hohen Ansprüchen an einen kompakten Aufbau der Maschine sollte die konzentrierte Wicklung stets bevorzugt werden, da die kurzen Wickelkopflängen eine höhere Leistungsdichte ermöglichen. Weiterhin ist die konzentrierte Wicklung von Vorteil bei dem Einsatz in Fahrzeugen für eher niedrige Geschwindigkeiten, da die ohmschen Verluste geringer sind. Verteilte Wicklungen haben dagegen Vorteile bei hohen Geschwindigkeiten, da sie die Wirbelstromverluste

in den Magneten reduzieren. Durch eine Erhöhung der Polpaarzahl kann bis zu einem gewissen Punkt die Ausgangsleistung erhöht werden. Jedoch steigen auch die Gesamtverluste, so dass besonders bei hohen Geschwindigkeiten die thermischen Grenzen sehr limitierend sein können.

	Paralleler Hybrid			Serieller Hybrid		
	NEDC	UDDS	HWFET	NEDC	UDDS	HWFET
CW-p4	0.735	0.764	0.806	0.859	0.778	0.783
CW-p6	0.716	<b>0.767</b>	<b>0.823</b>	0.780	0.725	0.713
CW-p8	0.697	0.765	0.822	0.756	0.689	0.670
DW-q1-p4	0.743	0.737	0.700	0.910	0.856	0.877
DW-q1-p6	<b>0.770</b>	0.765	0.795	<b>0.920</b>	0.848	0.853
DW-q1-p8	0.700	0.740	0.777	0.867	0.796	0.792
DW-q2-p4	0.740	0.744	0.700	0.917	<b>0.863</b>	<b>0.882</b>
DW-q2-p6	0.701	0.710	0.744	0.877	0.813	0.808
DW-q2-p8	0.650	0.696	0.735	0.822	0.761	0.744

Tabelle 1: Gesamteffizienz in Abhängigkeit der Geometrie und des Fahrzyklus

	CW		DWq1		DWq2	
	4	8	4	8	4	8
Polpaarzahl p						
Nennmoment $M_{n,el}$	++	++	--	-	-	--
Nennleistung $P_n$	++	++	--	-	-	--
Max. Strom $I/I_n$	0	++	++	++	++	++
Maximalmoment $M_{max}$	++	++	+	++	++	++
Maximalleistung $P_{max}$	++	++	+	++	++	++
Rastmomente	-	-	--	--	-	-
Drehmomentwelligkeit	0	0	--	--	++	-
Magnetmasse $m_{PM}$	--	-	++	++	++	++
Magn. Ausnutzung $P_n/m_{PM}$	0	+	++	++	++	++
Max. Wirkungsgrad $\eta_{max}$	+	0	++	++	++	++
Therm. Betriebsgrenzen	+	0	++	++	++	++

Tabelle 2: Bewertung der Wicklungsarten anhand charakteristischer Maschinengrößen bei p=4 und p=8

## 5. Prototypaufbau und Validierung der Ergebnisse

Um die Ergebnisse der Simulation zu verifizieren, wurde ein Prototyp der PMSM gebaut (s. Bild 13). Bei der Maschine handelt es sich um eine achtpolige PMSM mit vergrabenen Magneten und konzentrierter Wicklung. Dies geschah im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes „Europa Hybrid – Innovativer PKW Hybridantrieb für Europa“. Die Maschine wurde am Prüfstand vermessen und es wurde ein Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen durchgeführt.

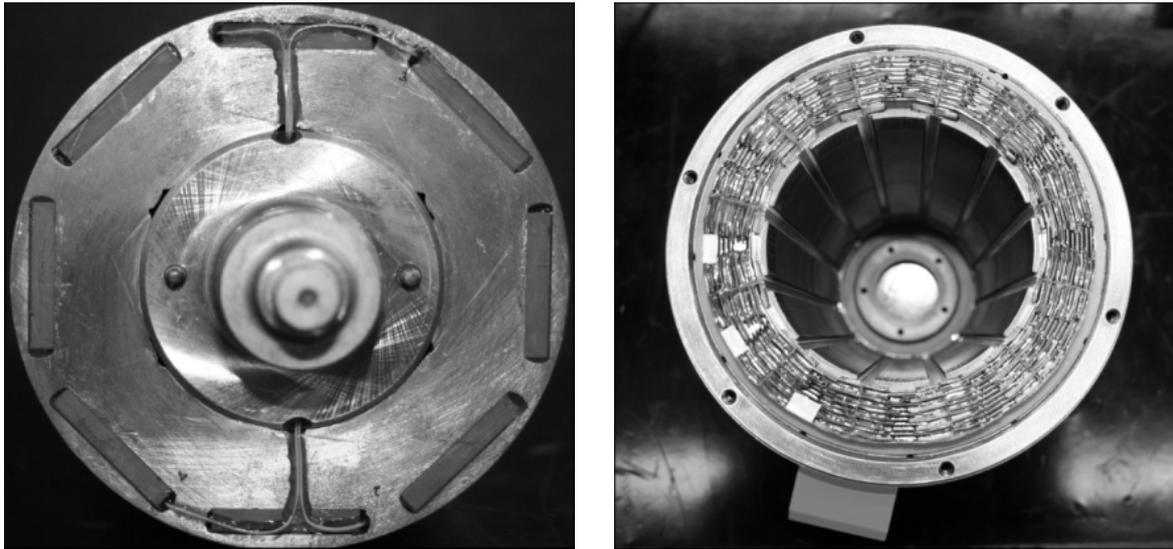


Bild 13: Rotor und Stator des Prototyps der PMSM

Bild 14 zeigt den Vergleich der Ergebnisse für den Leerlauf und unter Last. Bei der Leerlaufmessung wird die betriebswarme Maschine durch die Lastmaschine angetrieben. An den Klemmen wird dabei die induzierte Spannung gemessen. Die maximale Abweichung zwischen der Simulation und der Messung beträgt 1.8%. Bei der Messung der Betriebspunkte wird die Maschine drehzahl geregelt und das Drehmoment über eine momentengeregelte zweite Maschine eingestellt. Die Messungen wurden im Grunddrehzahlbereich von  $500 \text{ min}^{-1}$  bis  $4500 \text{ min}^{-1}$  bis zu einem Drehmoment von  $85 \text{ Nm}$  durchgeführt. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Messung liegt bei niedrigen Drehzahlen und Drehmomenten bei 4,7% und ab einer Drehzahl von  $400 \text{ min}^{-1}$  liegt die Abweichung unter 1%.

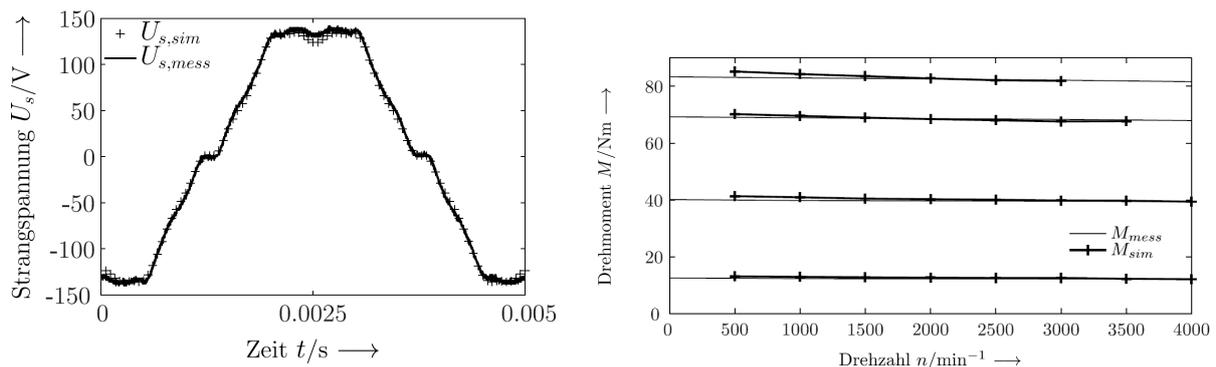


Bild 14: Leerlauf und Lastmessung

Ein Wirkungsgradkennfeld des elektrischen Antriebs wurde ebenfalls gemessen (s. Bild 15). Auch hier sind nur geringe Abweichungen von maximal 2% zu erkennen. Jedoch ergeben sich Unterschiede bei der Verteilung der Wirkungsgrade. Auf Grund der Abweichungen von bis zu 5% muss daher angenommen werden, dass die numerisch berechneten Verluste bei niedrigen Drehzahlen zu groß und bei hohen Drehzahlen zu niedrig sind. Im größten Teil des betrachteten Betriebsbereiches beträgt

die Abweichung jedoch weniger als 2%. Das Verfahren eignet sich also zur effizienten und genauen Bestimmung der optimalen Motorauslegung unter Berücksichtigung der häufigsten Betriebspunkte im Hybrid- oder Elektrofahrzeug. So kann die Reichweite des Fahrzeuges maximiert und die Batterie optimal ausgenutzt werden.

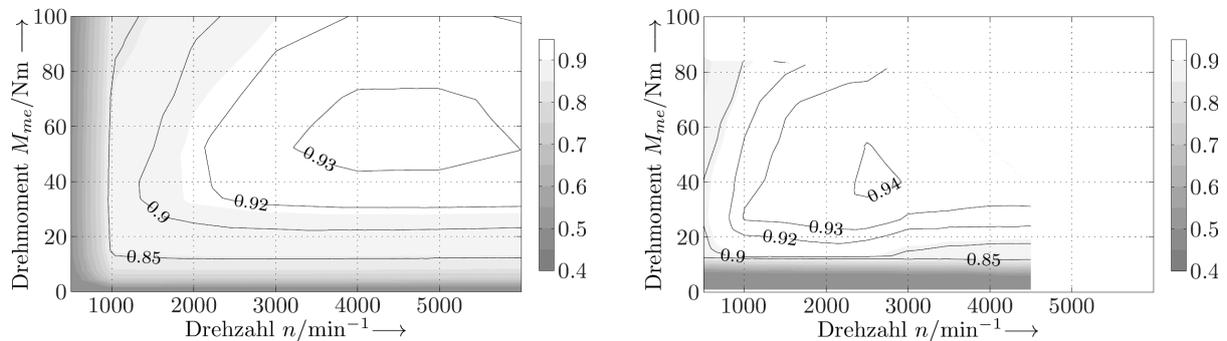


Bild 15: Wirkungsgradkennfelder: Simulation (links) und Messung (rechts)

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Um elektrische Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge optimal auszulegen, muss neben einer hohen Leistungsdichte, kleinem Volumen und geringem Gewicht insbesondere eine hohe Effizienz des Antriebes im Bereich der häufigsten Arbeitspunkte erreicht werden. In diesem Beitrag wird eine Systematik für die Auslegung der elektrischen Maschine vorgestellt. Zunächst werden die Betriebspunkte über eine Fahrzeugsimulation für verschiedene Stadt- und Autobahnzyklen ermittelt. Im Anschluss werden Wirkungsgrad- und Verlustkennfelder für verschiedene Maschinengeometrien am Beispiel einer PMSM mit vergrabenen Magneten durch die Anwendung einer automatisierten numerischen Simulationskette bestimmt. Dabei wird detailliert auf die ohmschen Verluste, die Eisenverluste und die Wirbelstromverluste in den Magneten eingegangen. Stellgrößen sind dabei die Polpaarzahl, der Rotorradius sowie die Wicklungsart. Die äußeren Abmessungen sind dabei konstant. Über die Gesamteffizienz der jeweiligen Geometrie bei gegebenem Fahrzyklus kann so die optimale Geometrie für die Anwendung bestimmt werden. Die simulierten Ergebnisse werden abschließend durch Messungen an einem Prototypantrieb validiert und zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung.

In zukünftigen Arbeiten sollten die verlustbeschreibenden Berechnungsmethoden weiter verbessert werden, um eine genauere Wirkungsgradberechnung zu ermöglichen. Weiterhin sollten auch die thermischen Grenzen an Hand detaillierter thermischer Modelle genauer bestimmt werden. Als Hilfestellung und zur Validierung können weitere Messungen mit Temperaturoaufzeichnungen am Prototyp vorgenommen werden. Hierfür wurden Thermoelemente in den Magnetaschen und an den Wickelköpfen angebracht. Da in Elektrofahrzeugen aus verschiedenen Gründen nicht nur die PMSM als Antrieb in Frage kommt, bietet es sich an, die vorgestellte Rechenkette auch für andere Maschinenarten wie die Asynchronmaschine, die geschaltete Reluktanzmaschine oder die fremderregte Synchronmaschine zu implementieren. Hiermit können die optimalen Designparameter auch für diese Maschinentopologien ermittelt werden.

## Literatur

- [1] Umweltbundesamt [Hrsg.], Workshop on "Climate Change and Environmental Issues in Transportation", Brüssel, 2007.
- [2] Institut für elektrische Maschinen, RWTH Aachen University, "Das FEM-Paket iMOOSE",  
Internet: [http://www.iem.rwth-aachen.de/aw/cms/IEM/Zielgruppen/forschung/~vgq/computational\\_electromagnetics/?lang=de](http://www.iem.rwth-aachen.de/aw/cms/IEM/Zielgruppen/forschung/~vgq/computational_electromagnetics/?lang=de), 2011.
- [3] D. Schmidt, M. van der Giet, K. Hameyer, "Improved iron-loss prediction by a modified loss-equation using a reduced parameter identification range.", in IEEE 20<sup>th</sup> International Conference on Soft Magnetic Materials, SMM, 2011.
- [4] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 1 p.621-630, January 1988.
- [5] G. Bertotti, A. Boglietti, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, F. Fiorillo, M. Lazzari, "An improved estimation of iron losses in rotating electrical machines.", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, p. 5007-5009, November 1991.
- [6] M. Herranz Gracia, E. Lange and K. Hameyer, "Numerical Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a modified Post-Processing Formula.", Proc. of 16th COMPUMAG, Aachen, 2007.
- [7] C. Kaehler, G. Henneberger, "An Eddy-current computation in the claws of synchronous a claw-pole alternator in generator mode.", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, p. 1201-1204, March 2002.
- [8] C. Kaehler, G. Henneberger, "Eddy-current computation on a one pole-pitch model of a synchronous claw-pole alternator.", COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, v 22, n 4, p 834-846, 2003.
- [9] M. Schoning and K. Hameyer, "Virtual product development for electrical motors," in IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, IEMDC, vol. 2, 2007, pp. 949-952.
- [10] M. Hafner, T. Finken, M. Felden, and K. Hameyer, "Automated Virtual Prototyping of Permanent Magnet Synchronous Machines for HEVs," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 5, pp. 1018-1021, May 2011.
- [11] Institut für elektrische Maschinen, RWTH Aachen University, "ProMotor - Eine Software Bibliothek für den virtuellen Produktentwicklungsprozess elektrischer Maschinen",  
Internet: [http://www.iem.rwth-aachen.de/aw/cms/IEM/Zielgruppen/forschung/~vgq/computational\\_electromagnetics/?lang=de](http://www.iem.rwth-aachen.de/aw/cms/IEM/Zielgruppen/forschung/~vgq/computational_electromagnetics/?lang=de), 2011.
- [12] J. Cros, P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings.", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, Issue 2, p. 248-253, June 2002.
- [13] B. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadziselimovic, I. Zagradisnik, A. Hamler, M. Trlep, "Permanent magnet synchronous motor with exterior-rotor: Distributed or concentrated windings motor performance comparison.", COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 25, Issue 3, p. 721 - 726, 2006.
- [14] K. Yamazaki, Y. Fukushima, M. Sato, "Loss Analysis of Permanent-Magnet Motors With Concentrated Windings Variation of Magnet Eddy-Current Loss Due to Stator and Rotor Shapes.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, Issue 4, p. 1334-1342, July 2009.