

Einfluss von Stromverdrängung bei elektrischen Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

David Bauer, Prof. H.-C. Reuss, Prof. E. Nolle
Labor Elektrische Antriebe und Anlagen
Hochschule Esslingen
Robert-Bosch-Straße 1
73037 Göppingen

david.bauer@hs-esslingen.de
hans-christian.reuss@ivk.uni-stuttgart.de
eugen.nolle@hs-esslingen.de

Abstract: In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss von Stromverdrängungseffekten bei elektrischen Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge am Beispiel einer in Serie produzierten Maschine untersucht. Die deutliche Relevanz dieser drehzahlabhängigen Effekte wird herausgearbeitet. Speziell durch die ungünstige Lage einzelner Drähte kann es zu einer Vervielfachung der Kupferverluste kommen. Ein entsprechendes messtechnisches Verfahren wird vorgestellt und validiert. Anhand der durchgeführten Messungen ist es möglich, den Einfluss der genannten Effekte zu bestimmen und einen Abgleich mit vorhandenen Simulationstools durchzuführen.

Formelzeichen

J	Stromdichte	σ	Elektr. Leitfähigkeit
J_0	Bessel Fkt 1.Art, 0. Ord.	μ	Permeabilität
J_1	Bessel Fkt 1.Art, 1. Ord.	$P_{V,Cu,ges}$	Gesamtkupferverluste
I	Strom	$P_{V,Cu,DC}$	klassische ohmsche Verluste
r	Radius	$P_{V,Cu,AC}$	Kupferverluste inkl. Stromverdrängung
r_0	Außenradius	k_n	Verlustverhältnis
ω	Winkelgeschw.		

1 Einleitung

70% der Deutschen würden nur dann ein Elektroauto kaufen, wenn die Reichweite mindestens 250km beträgt [Com12]. An dieser Statistik ist zu erkennen, wie entscheidend die Reichweite für die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen ist. Gleichzeitig spielt auch die Dauerleistung, welche erheblichen Einfluss auf die Fahrleistungen hat, eine wichtige Rolle. Beide Anforderungen werden unter Anderem von der Effizienz der elektrischen Maschine(n) bestimmt und damit von den entstehenden Verlustleistungen.

Wird die Verlustaufteilung innerhalb der elektrischen Maschine betrachtet, so stellen die Kupferverluste den quantitativ größten Anteil dar. Abbildung 1 zeigt deren Anteil bezogen auf die Gesamtmaschinenverluste für die später untersuchte Maschine.

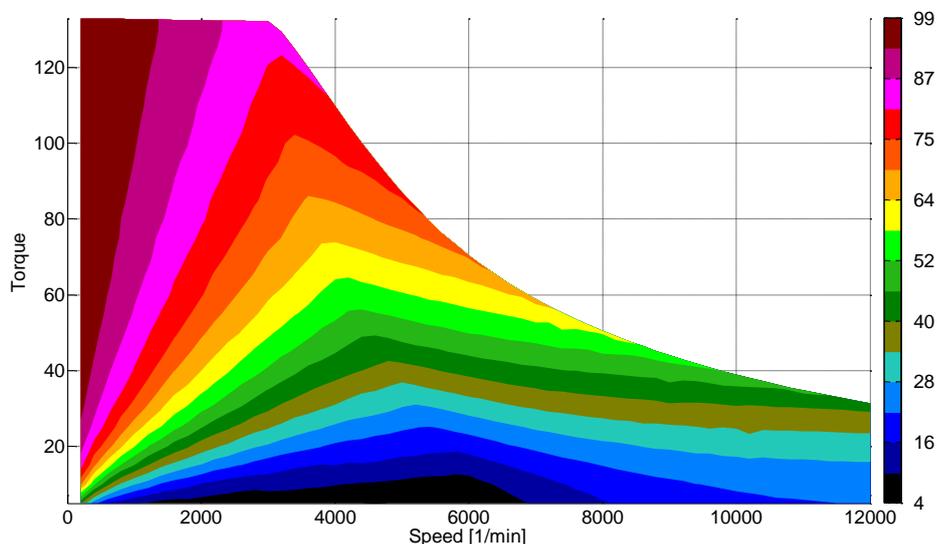


Abbildung 1: Prozentualer Anteil der Kupferverluste bezogen auf die Gesamtverluste

Durch den Trend zu hohen Drehzahlen und damit zu hohen elektrischen Frequenzen rücken wechselstromabhängige Effekte immer mehr in den Vordergrund. Hinsichtlich der genannten Kupferverluste sind Stromverdrängungseffekte zu beachten.

Innerhalb der Literatur sind diese Effekte bekannt und numerisch weitestgehend analysiert [Car07, Mül08]. Jedoch findet der Einfluss ungeeigneter Drahtlage oft keine Berücksichtigung. Falls doch, wird dieser Effekt messtechnisch nicht tiefgehend untersucht. Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden zu Beginn die relevanten Grundlagen vorgestellt, um im Anschluss die Auswirkungen der Drahtlage näher zu bestimmen. Im Vergleich zu anderen Studien wird hier ein messtechnisches Verfahren beschrieben, um die erläuterten Effekte zu messen. Die folgenden Untersuchungen finden an einem Maschinenmuster der Firma Bosch statt.

2 Wechselstromabhängige Kupferverluste

In den Wicklungen elektrischer Maschinen können unterschiedliche Stromverdrängungseffekte auftreten, welche im Allgemeinen zu höheren Stromwärmeverlusten führen. Innerhalb dieses Kapitels sollen die drei wesentlichen Verlusteffekte kurz beschrieben werden: der Skin Effekt, der Proximity-Effekt und die Kreisströme, welche aus ungeeigneter Drahtlage entstehen.

2.1 Skin- Effekt

Der Skin-Effekt (dt.: Hauteffekt) beschreibt die inhomogene Stromdichteverteilung innerhalb eines Leiters, welche durch einen im Leiter selbst fließenden Wechselstrom generiert wird. Der alternierende Strom ruft ein magnetisches Wechselfeld hervor, welches entsprechend dem Induktionsgesetz zu Wirbelströmen führt. Aufgrund dieser Wirbelströme kommt es zu einer Stromdichteverchiebung in Richtung des Leiterrandes. Zusätzlich führen die Wirbelströme aber auch dazu, dass innerhalb eines Leiters gegensätzlich gerichtete Stromkomponenten auftreten. Für die entstehende Verlustleistung ist die Stromdichte relevant. Abbildung 2 zeigt schematisch das Wirkprinzip.

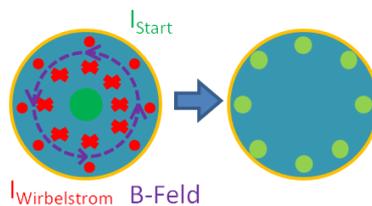


Abbildung 2: Wirkprinzip Skin-Effekt

Die Verlustzunahme infolge des Skin-Effekts kann analytisch auf Basis von Bessel-Funktionen berechnet werden. Gleichung 1 zeigt die resultierende Formel für die Stromdichte [Car07].

$$\underline{J}(\underline{\alpha} \cdot r) = \frac{\underline{\alpha} \cdot \underline{I}}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \frac{J_0(\underline{\alpha} \cdot r)}{J_1(\underline{\alpha} \cdot r_0)} \quad (1)$$

$$\text{mit: } \underline{\alpha} = (1 - j) \sqrt{0.5 \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu} \quad (2)$$

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Frequenz die Stromdichte zum Rand hin ansteigt und somit die zusätzlichen Verluste steigen.

2.2 Proximity- Effekt

Da typische Wicklungen in elektrischen Maschinen aus mehreren Leitern/Drähten ausgeführt werden, ist das globale magnetische Wechselfeld zur Berechnung der Stromdichte zu berücksichtigen. Durch die Unterbringung der Wicklung in Nuten steigt das Nutstreufeld in Richtung der Nutöffnung an [Gon14, Iwa08]. Die Beeinflussung der Stromdichte durch dieses Feld wird als „Proximity-Effekt“ (dt.: Nachbarschaftseffekt) beschrieben [Mel06]. Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine in der Nut untergebrachte Wicklung mit einer symbolisch angedeuteten Feldlinie und der resultierenden Stromdichteverteilung.

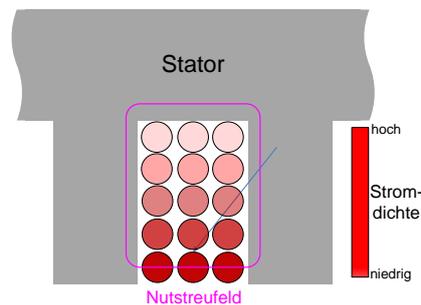


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung Nutstreufeld

2.3 Lage einzelner paralleler Drähte – Kreisströme

Aus Gründen der Fertigbarkeit und zur Verringerung der beiden oben genannten Effekte wird in der Praxis der Leiterdurchmesser verringert [Iwa08, Pop13]. Dies führt auf der einen Seite zu einer steigenden Anzahl an Drähten und auf der anderen Seite zu notwendigen Parallelschaltungen, um die Durchflutung der Maschine konstant zu halten.

Sind nun parallel verschaltete, einzelne Drähte mit unterschiedlichen Flüssen verkettet, so werden Ströme induziert, welche sich innerhalb der Parallelschaltung schließen (Kreisströme). Aufgrund dieser Ströme treten zusätzlich erhöhte Verluste in den Wicklungen auf. Abbildung 4 zeigt schematisch die erläuterte Thematik. Hierbei stellen Draht 1 und 2 einzelne, parallel verschaltete Drähte dar. Aufgrund des zur Nutöffnung ansteigenden Nutstreufelds sind die Drähte 1 und 2 mit unterschiedlichen Flüssen verkettet. Im Gegensatz zu Draht 2 ist Draht 1 mit dem gesamten Fluss verkettet. Dementsprechend wird in Draht 1 eine größere Spannung als in Draht 2 induziert. Diese Differenz treibt einen Kreisstrom innerhalb der Parallelschaltung. Problematisch ist die Tatsache, dass diese Kreisströme bei der Messung der Phasenströme nicht identifizierbar sind.

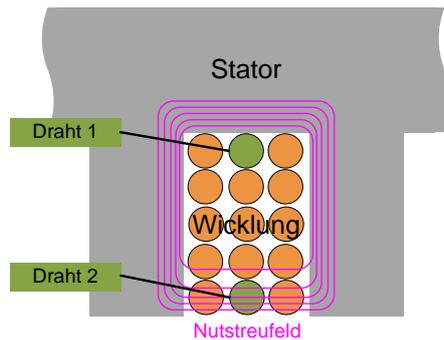


Abbildung 4: Wirkprinzip zirkulierende Ströme

2.4 Einführung Verlustverhältnis

In der Literatur wird ein Verlustverhältnis k_n eingeführt, welches ein Maß für zusätzliche Stromverdrängungsverluste darstellt [Bol09]. Dieses ist gemäß Gleichung 3 definiert. In der Literatur werden alle, durch oben genannte Effekte hervorgerufene, Zusatzverluste als AC-Verluste bezeichnet. Beträgt k_n beispielsweise 1.5, so fallen in Bezug auf die klassisch ermittelten Kupferverluste ($P_{V,Cu,DC}=I^2 \cdot R$) 50% erhöhte Verluste an.

$$k_n = \frac{P_{V,Cu,gesamt}}{P_{V,Cu,DC}} = \frac{P_{V,Cu,AC}}{P_{V,Cu,DC}} \quad (3)$$

3 Maschinenmuster

Für die folgende Untersuchung wird eine elektrische Maschine der Firma Bosch hinsichtlich der genannten Effekte analysiert werden. Abbildung 5 zeigt die Maschine und den dazugehörigen Blechschnitt. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Parameter der Maschine dargestellt.

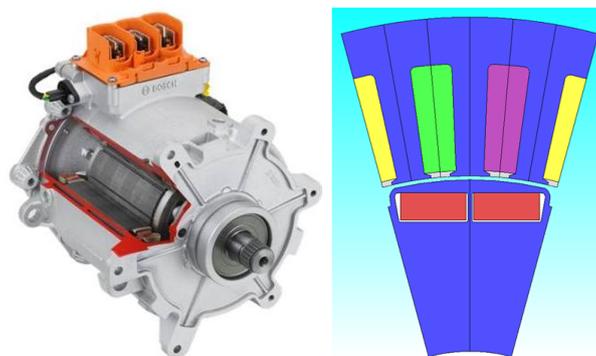


Abbildung 5: SMG 180/120 (li: Maschine, re: Blechschnitt)

Statoraußendurchmesser	180 mm	Maximales Drehmoment	200 Nm
Blechpaketlänge	120 mm	Maximale Leistung	80 kW
Magnetmaterial	NdFeB	Art der Wicklung	Einzugswicklung, verteilt
Anzahl Pole	12	Stator	geschrägt

Tabelle 1: Maschinenparameter SMG 180/120

Da die Wicklung in der weiteren Untersuchung von entscheidender Bedeutung ist, soll diese hier näher beschrieben werden:

Eine Phase besteht im vorliegenden Fall aus 3 parallelen Zweigen mit je 4 in Reihe geschalteten Spulen. Jeder Zweig besteht aus 7 parallelen Drähten. Die Wicklung ist als Zweischichtwicklung ausgeführt und je Lage wechseln sich 6 bzw. 7 Windungen ab. Somit beinhaltet jede Nut 13 Windungen. Die Drahtstärke beträgt 0,9 bzw. 0,95mm.

4 Analyse

4.1 Simulationsmodell

Um oben genannte Effekte berechnen zu können, werden im Allgemeinen 2D-FE-Modelle verwendet [Mel06, Hah10]. Hierbei ist anzumerken, dass es nötig ist jeden einzelnen Draht in der Simulation abzubilden, um dessen Stromdichte zu ermitteln.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine reale Nut im Vergleich zum Simulationsmodell.

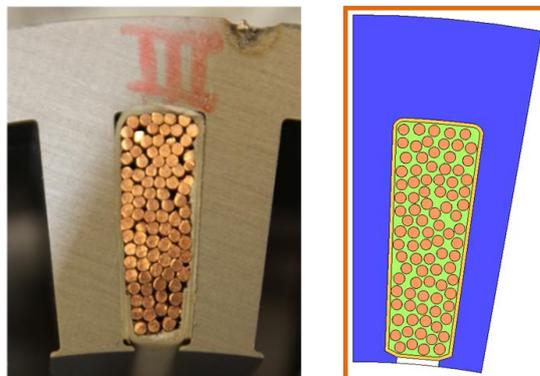


Abbildung 6: Vergleich reale Maschine <-> Simulationsmodell

Eine entsprechende Voruntersuchung hat gezeigt, dass es ausreichend ist, eine einzelne Nut zu simulieren. Die Abweichung gegenüber typischen Gesamtmaschinenmodellen unter Berücksichtigung der Einzeldrahtmodellierung beträgt laut [Mam14] maximal 7%.

4.2 Skin- & Proximity-Effekt

Im folgenden Abschnitt wird die Verlustzunahme durch den Proximity-Effekt berechnet. Der Skin-Effekt wird an dieser Stelle in der FEM-Simulation automatisch mit berücksichtigt, wobei dieser aufgrund der kleinen Drahtdurchmesser zu vernachlässigen ist. Die Parallelschaltung der einzelnen Drähte wird an dieser Stelle noch vernachlässigt.

Um den maximalen Einfluss für die untersuchte Maschine zu ermitteln, wird ein Betriebspunkt bei maximaler Drehzahl und damit maximaler elektrischer Frequenz betrachtet.

Abbildung 7 zeigt die resultierende Verlustdichte. Die Inhomogenität der Stromdichte, welche zu den erhöhten Kupferverlusten führt, ist eindeutig zu erkennen. Für den gewählten Betriebspunkt ergibt sich ein k_r von 1,32. Dies bedeutet eine Verlustzunahme von 32%.

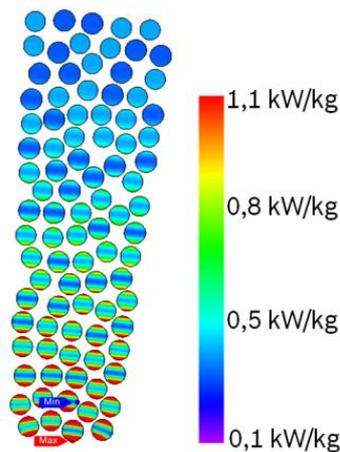


Abbildung 7: Verlustdichte bei 12000U/min u. 183,86A eff., ohne Parallelschaltung, reiner Skin- und Proximityeffekt

Mit der klassischen Berechnungsmethode ergeben sich für alle Fälle identische Verluste, da keine wechselstromabhängigen Effekte berücksichtigt werden. Befinden sich die Drähte an geeigneten Positionen („gute“ Drahtlage), so steigt das Verlustverhältnis nur um 1% gegenüber dem reinen Proximity-Effekt. Wird allerdings der „schlechte“ Fall betrachtet, so ergibt sich eine Vervielfachung der Kupferverluste. Es ergibt sich eine Verlustzunahme von 480% gegenüber der klassischen Methode und 335% gegenüber der „guten“ Drahtlage. An dieser Stelle ist zu erkennen, dass die klassische Berechnungsmethode für derartige Maschinen nicht ausreichend ist.

5 Messung

Wie bereits beschrieben, stellt der Proximity-Effekt einen in der Literatur gut untersuchten Effekt dar. Zusatzverluste durch Kreisströme werden dagegen oft unterschätzt bzw. nicht beachtet. Zusätzlich finden derartige Analysen oft nur auf Basis von FEM- Simulationen statt. Spezielle Messungen, welche die genannten Effekte in elektrischen Maschinen konkret untersuchen, werden oft nicht durchgeführt [Gee14]. Stattdessen werden vielmals nur Messungen durchgeführt, welche die Gesamtmaschinenverluste liefern [Lu 04]. Der Rückschluss auf einzelne Stromverdrängungseffekte ist an dieser Stelle sehr schwierig, da alle in der Maschine wirksamen Verlustmechanismen gleichzeitig auftreten. Eine exakte Verlusttrennung ist somit nicht möglich.

Innerhalb dieser Untersuchung soll eine Messung gezeigt werden, mit deren Hilfe auftretende Kreisströme gemessen werden können. Des Weiteren soll die Messung dazu dienen, die entsprechende Simulation abgleichen zu können.

5.1 Idee

Um den exakten Einfluss der Drahtlage messtechnisch erfassen zu können, werden zwei identische Maschinen aufgebaut, welche sich allein durch die Lage der einzelnen Drähte unterscheiden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Differenz zwischen beiden Maschinen allein auf Kupferverluste/ Kreisströme zurückzuführen ist.

Zusätzlich werden die einzelnen Drähte eines Stranges aus der Maschine geführt, um deren Ströme getrennt zu messen. Somit ist es, im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, möglich eventuell auftretende Ausgleichsströme direkt zu messen. Werden nur Phasenströme gemessen, so können derartige Ströme nicht detektiert werden.

Um Stromüberschwingungen mit hohen Frequenzen, welche üblicherweise durch den PWR-Betrieb generiert werden, zu vermeiden, wird die Maschine im Kurzschluss vermessen.

5.2 Umsetzung Messaufbau

Um zeitaufwendige 3D Rechnungen vermeiden zu können, werden die Statorn in diesem Fall nicht geschrägt ausgeführt. Die in Abb. 8 dargestellten Testfälle waren fertigungsbedingt nicht realisierbar. Abbildung 9 zeigt die letztendlich im Musterbau umgesetzten Drahtlagen und beispielhaft einen Ausschnitt der fertig bewickelten Maschine („schlechter“ Fall). Abbildung 10 stellt den schematischen Messaufbau dar, während Abbildung 11 den realen Messaufbau im Labor in Göppingen zeigt.

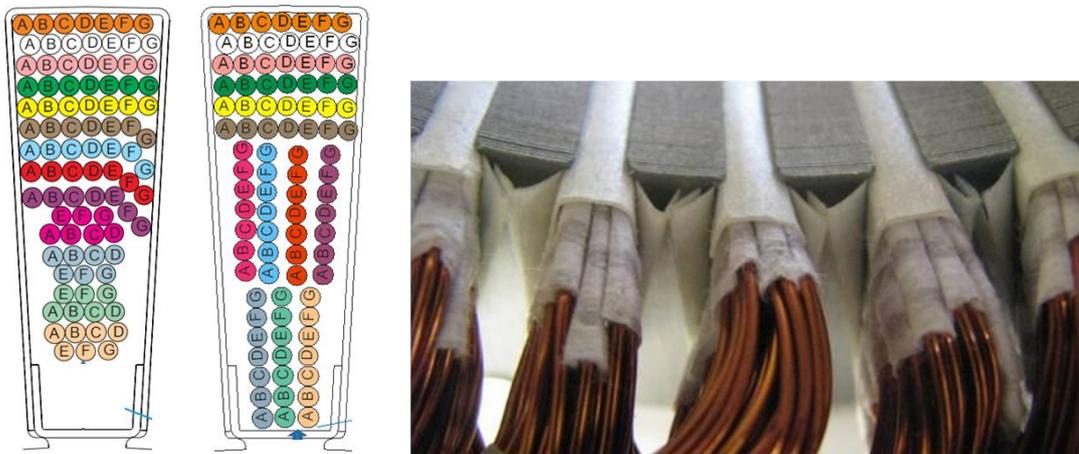


Abbildung 9: Umgesetzte Drahtanordnungen (li: Guter Fall, Mi: Schlechter Fall, re: Fertig eingezogene Wicklung (schlechter Fall))

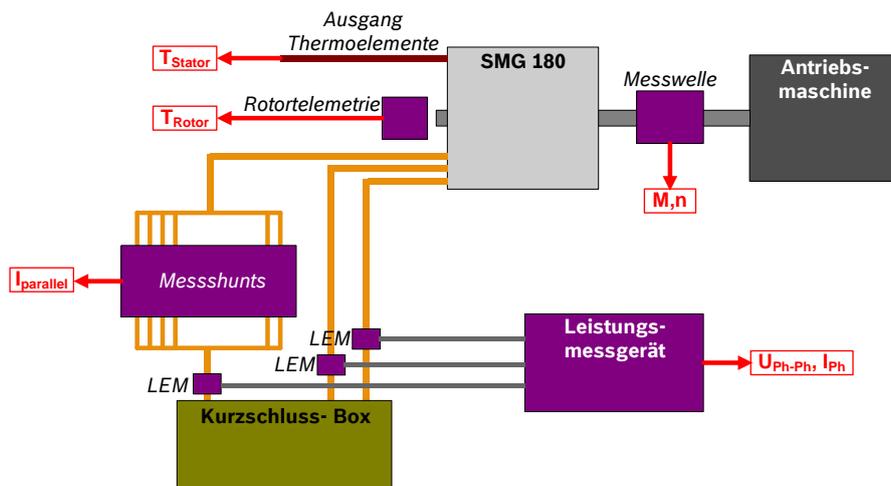


Abbildung 10: schematischer Messaufbau

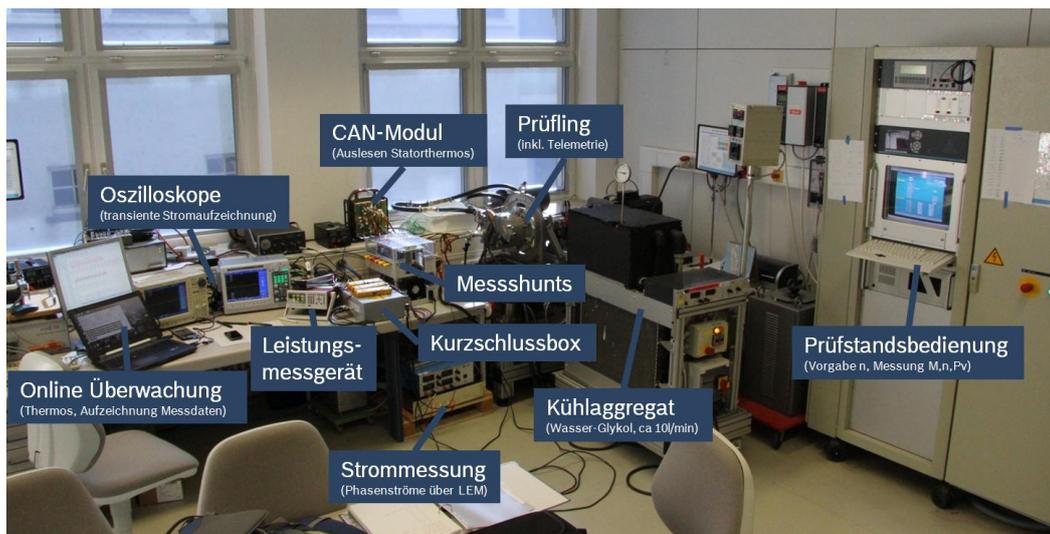


Abbildung 11: Messaufbau an der HS Esslingen in Göppingen

Für die Messung der Strom-Zeit-Verläufe innerhalb der einzelnen Drähte werden „Messshunts“ (50 mOhm) verwendet, an welchen die Spannung abgegriffen wird. Um eventuellen Temperatureinflüssen entgegen zu wirken werden die Shunts auf großen Kühlkörpern montiert, welche durch einen Lüfter gekühlt werden. Abbildung 12 zeigt die entsprechende, selbstgebaute Messeinrichtung.

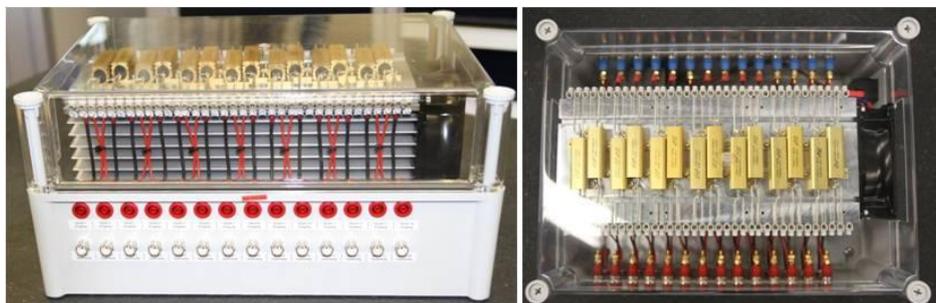


Abbildung 12: Eigenkonstruktion zur Strommessung

Mit Hilfe zweier synchronisierter Oszilloskope werden die Ströme aufgezeichnet. Mehr als 50 in der Maschine verbaute Thermoelemente zeichnen die Temperaturen auf. 8 Temperatursensoren liefern über eine Telemetrieinheit Magnet- und Lagertemperaturen. Weitere Messeinrichtungen (LEM-Wandler, Leistungsmessgeräte, ...) messen Phasenströme, Spannungen, Drehmomente und Drehzahlen.

5.3 Durchgeführte Messungen

Zu Beginn müssen maschinenspezifische Parameter bestimmt werden. Die folgende Aufzählung zeigt die Parameter und deren Bestimmung:

- Wickelkopf- & Kabelwiderstand: Mit Hilfe einer Vier-Leiter-Messung wird der Gesamtwiderstand ermittelt. Da die Länge des Aktivteils und der verwendeten Verlängerungskabel bekannt ist, kann der Wickelkopf Widerstand analytisch bestimmt werden. Daraus ergeben sich für den Wickelkopf ergeben sich 8,1 und für das Verlängerungskabel 4,8 mOhm
- Remanenz der Magnete: Auf Basis durchgeführter Leerlaufversuche bei gleichzeitiger Spannungsmessung kann die Remanenz der Magnete überprüft werden. Im gemessenen Beispiel liegt die Remanenz der Magnete ca. 5% unterhalb des Datenblattwerts
- Wickelkopfinduktivität: Durch iterative Vorgehensweise kann die Wickelkopfinduktivität bestimmt werden. Hierbei muss der simulierte Strom dem gemessenen Kurzschlussstrom entsprechen. Für die untersuchte Maschine beträgt sie 24 μH . Vergleiche mit analytischen Formeln zeigen Abweichungen im Bereich kleiner 25%. Dies stellt unter Berücksichtigung der vielen unbekannt Parameter und den daraus resultierenden getroffenen Annahmen in der Analytik eine gute Näherung dar. Es muss hierbei immer beachtet werden, dass die Streuinduktivität von vielen Faktoren abhängig ist (z.B.: Verprägung, Abstand zum Wickelkopf, Drahtlage)

Abbildung 13 zeigt die gemessenen Leerlaufspannungen und -verluste der beiden Maschinen im Vergleich. Wie zu erkennen ist ergeben sich zwischen den Maschinen nahezu keine Unterschiede, was aufgrund der alleinigen Differenz bzgl. der Drahtlage zu erwarten war.

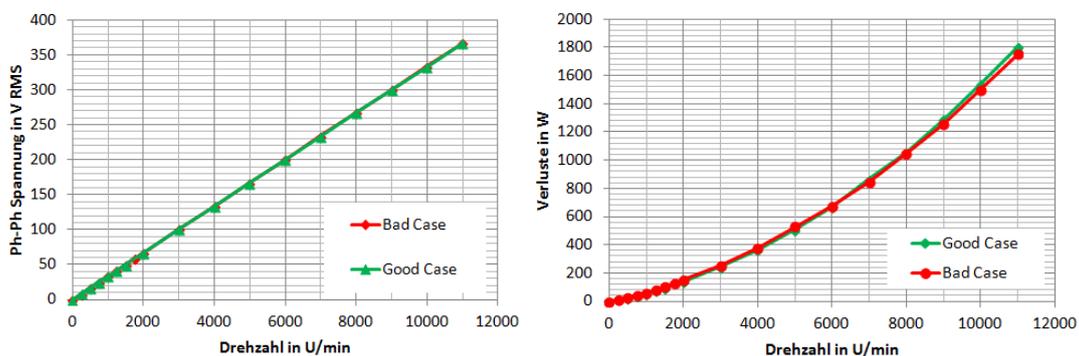


Abbildung 13: Vergleich der Leerlaufspannungen (li.) und -verluste (re.)

Abbildung 14 stellt die gemessenen Verluste im Kurzschluss über der Drehzahl dar. Hierbei wird, beginnend bei 1500 U/min, in äquidistanten Zeitschritten die Drehzahl bis 11000 U/min erhöht.

Es ist zu erkennen, dass die Maschine mit der „schlechten Drahtlage“ deutlich höhere Verluste aufweist. Bei maximal gemessener Drehzahl treten bis zu 3kW erhöhte Verluste auf. Aufgrund der unterschiedlichen Verlustleistungen ergeben sich innerhalb der Maschine unterschiedliche Temperaturen, welche einen Simulationsabgleich anhand dieser Messungen schwierig gestalten. Aus diesem Grund werden drei Drehzahlpunkte bei „kalter“ Maschine ($\vartheta=20^\circ$) angefahren, um zum Einen einen konkreten Vergleich zu ermöglichen und zum Anderen in der Simulation nötige temperaturabhängige Materialeigenschaften besser definieren zu können. Abbildung 14 zeigt die gemessenen Punkte bei $n= 1500, 6000$ und 11000 U/min. Abbildung 15 zeigt die gemessenen Stromverläufe bei diesen Drehzahlen, sowohl für den „guten“, als auch für den „schlechten“ Testfall. Die Abhängigkeit der Kreisströme von der Drahtlage ist eindeutig zu erkennen.

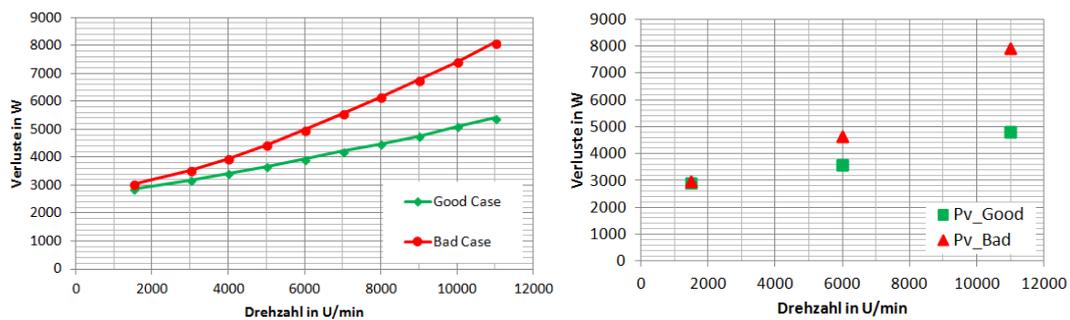


Abbildung 14: Kurzschlussverluste links: als Kennlinie, rechts: einzelne Punkte bei Starttemperatur

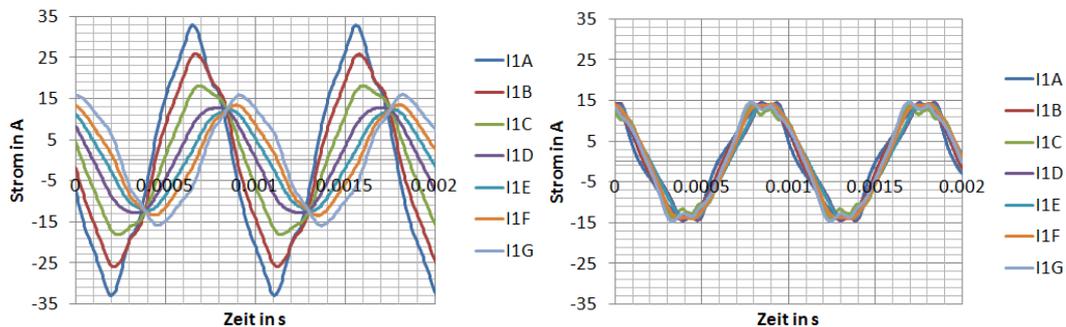


Abbildung 15: Gemessene Strom-Zeit-Verläufe beim guten und schlechten Testfall bei 11000 U/min (li: schlecht, re: gut)

5.4 Abgleich Messung – Simulation

Um die Messung simulativ nachbilden zu können, wird das Simulationsmodell entsprechend der realen Drahtlage der Mustermaschinen nachgebildet. Da der Kurzschlussstrom transient ermittelt wird, ist ein komplettes Symmetriemodell der Maschine notwendig. Die Drahtlage wird entsprechend Abb. 9 im Simulationsmodell angepasst. Unter Berücksichtigung der unter 5.3 genannten Maschinenparameter kann nun das Verlustdelta zwischen beiden Maschinen, sowie der Stromverlauf verglichen werden.

Abbildung 16 zeigt das Verlustdelta, hervorgehend aus Abbildung 14 und den rechnerisch ermittelten Unterschied zwischen den beiden Maschinen.

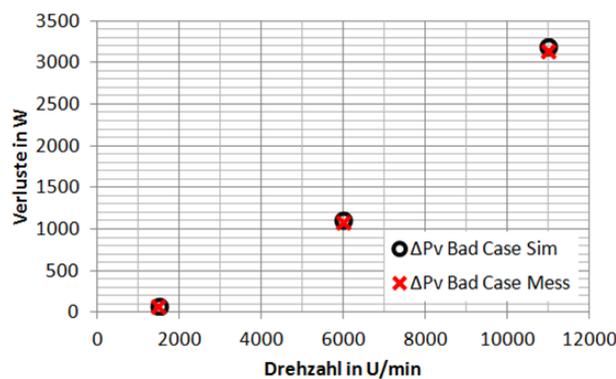


Abbildung 16: Abgleich der Verlustdifferenz

Wie zu erkennen ist liegen die Punkte nahezu übereinander. Eine maximale Abweichung von kleiner 75 W ist zu erkennen. Der Abgleich der Strom-Zeit-Verläufe soll an dieser Stelle am Beispiel der „schlechten“ Drahtlage dargestellt werden. Wie auch hier zu sehen ist, stimmen die Stromverläufe nahezu überein.

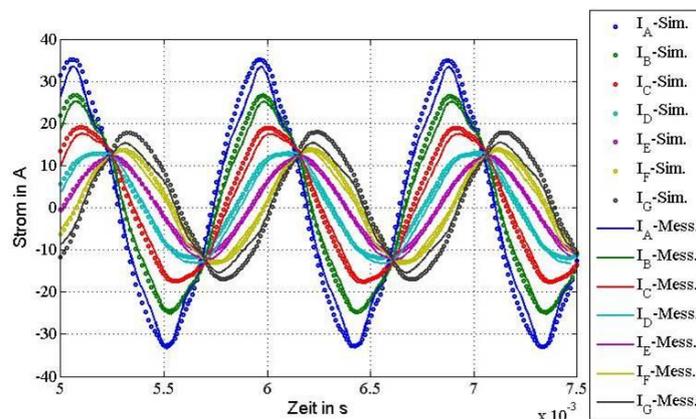


Abbildung 17: Abgleich der Strom-Zeit-Verläufe, „Schlechter Fall“

Erkennbare Unterschiede zwischen Messung und Simulation könnten durch folgende Effekte entstehen:

- leichte Abweichungen in der Drahtlage
- Fertigungseinflüsse
- Temperaturunterschiede
- Aufteilung Wickelkopfinduktivität

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Dokument wurde eine elektrische Maschine der Firma Bosch hinsichtlich der Stromverdrängungseffekte untersucht.

Es zeigte sich, dass aufgrund der hohen Drehzahlen und den damit verbundenen hohen elektrischen Frequenzen in derartigen Motoren für Hybrid- und Elektrofahrzeuge Stromverdrängungseffekte zwingend zu berücksichtigen sind. Alleine durch den Proximity-Effekt treten bei maximaler Drehzahl bis zu 32% erhöhte Kupferverluste auf. Für den Fall einer verteilten Wicklung, welche aufgrund ihres niedrigen Oberfeldanteils häufig verwendet wird, spielt die Lage der einzelnen, parallel verschalteten Drähte eine entscheidende Rolle. Im Falle einer „radialen Anordnung“ kann es, wie im gemessenen Beispiel gezeigt, zu einer Vervielfachung der Kupferverluste kommen. Dies führt zu deutlichen Wirkungsgradeinbußen, einer sinkenden Dauerleistung und evtl. zu einer Schädigung bzw. einem vorzeitigen Ausfall der Maschine. Innerhalb der vorliegenden Untersuchung wurde eine Möglichkeit vorgestellt, anhand derer die genannten Effekte messtechnisch nachgewiesen werden können. Hierfür wurden zwei Maschinen aufgebaut, welche sich rein durch die Drahtlage unterscheiden. Des Weiteren ist es möglich, die Strom-Zeit-Verläufe in jedem einzelnen Draht zu messen und auszuwerten.

7 Ausblick

Um im nächsten Schritt genauere Temperaturvorhersagen machen zu können, ist die Lokalität der Verluste, sowie deren Skalierung über die Temperatur von entscheidender Bedeutung. Abbildung 18 zeigt beispielhaft die über die mittlere Nuttemperatur aufgetragenen gemessenen Verlustleistungen.

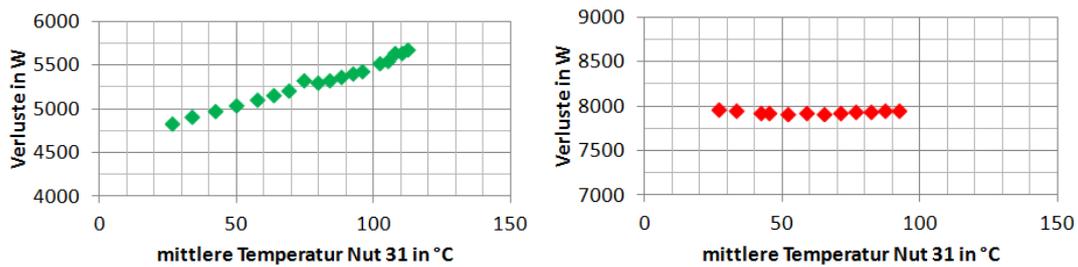


Abbildung 18: Verlustverhalten über die Nuttemperatur, „guter“ (li.) und „schlechter“ (re.) Fall, im Kurzschluss, bei 11000 U/min

Während im „guten“ Fall die Verluste, so wie aus der klassischen Theorie bekannt, nahezu linear ansteigen, lässt sich im „schlechten“ Fall nahezu keine Verluständerung feststellen. Dies deutet auf eine unterschiedliche Verlustskalierung der durch Stromverdrängung hervorgerufenen Verluste hin. Um diesen Effekt in der Verlustskalierung nachzubilden werden in der Literatur erste, verbesserte Skalierungsformeln vorgestellt, welche jedoch rein für den Proximity-Effekt gelten. Diese skalieren jeweils über die mittlere Kupfertemperatur [Wro12a, Wro12b]. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollte die Untersuchung an dieser Stelle fortgeführt werden, um in Zukunft die Genauigkeit entsprechender Temperaturvorhersagen zu erhöhen.

8 Literaturverzeichnis

- [Com12] Commerz Finanz GmbH: Europa Automobilbarometer 2012- Elektroautos aus der Sicht europäischer Konsumenten, 2012
- [Car07] Christian Carstensen: Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines, Dissertationsschrift, RWTH Aachen, 2007
- [Mül08] G. Müller, K. Vogt, B. Ponick: Berechnung elektrischer Maschinen, 6. Auflage, Wiley-VCH, 2008
- [Gon14] D.A. Gonzalez, D.M. Saban: Study of the Copper Losses in a High-Speed Permanent-Magnet Machine with Form-Wound Windings, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.61, 2014
- [Iwa08] S. Iwasaki, Z.Q. Zhu, J. Bremner: Influence of PWM on the Proximity Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines, IEEE, 2008
- [Mel06] H. Mellor, R. Wrobel, N. McNeill: Investigation of Proximity Losses in a High Speed Brushless Permanent Magnet Motor, IEEE, 2006

- [Pop13] M. Popescu, D. Staton, D. Dorrell, D. Hawkins: Study of the Thermal Aspects in Brushless Permanent Magnet Machines Performance, IEEE, 2013
- [Bol09] I. Boldea, S.A. Nasar: The Induction Machine Design Handbook 2nd Edition, 2009
- [Hah10] S. Hahlbeck, D. Gerling: Impact of slot geometry and rotor position on AC armature losses of Interior PM Synchronous Machines, IEEE, ICEM, 2010
- [Mam14] P. Mamuschkin: Wicklungsdesign einer elektrischen Maschine unter Berücksichtigung von Stromverdrängungseffekten für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Masterthesis, Hochschule Osnabrück, 2014
- [Gee14] M. van der Geest, H. Polinder, J. A. Ferreira: Influence of PWM switching frequency on the losses in PM machines, IEEE, ICEM, 2014
- [Lu 04] Tong Lu: Weiterentwicklung von hochtourigen permanenterregten Drehstromantrieben mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen und experimentellen Untersuchungen, Dissertationsschrift, TU Darmstadt, 2004
- [Wro12a] R. Wrobel, A. Mlot, H. Mellor: Contribution of End-Winding Proximity Losses to Temperature Variation in Electromagnetic Devices, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No.2, 2012
- [Wro12b] R. Wrobel, A. Griffo, H. Mellor: Scaling of Copper Loss in Thermal Modeling of Electrical Machines, IEEE, 2012