

# Ummagnetisierungsverluste in hartmagnetischen Werkstoffen hochdynamischer elektrischer Industrieantriebe

## VerInA

**Projekt:** Ummagnetisierungsverluste in hartmagnetischen Werkstoffen hochdynamischer elektrischer Industrieantriebe (VerInA)

**Laufzeit:** 01.03.2015 bis 30.09.2017

**Gesamtprojektkosten:** 166.000,00 €

**Davon Förderung:** 166.000,00 €

**Projektleiter:**

Prof. Dr. Andreas Kremser

Institut ELSYS

Technische Hochschule Nürnberg

Georg Simon Ohm

In der EU Verordnung 640/2009 werden Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung („Öko-design“) von Elektromotoren formuliert. Die internationale Norm IEC 60034-30 enthält Effizienzklassen für Elektromotoren. In der Industrie bedeutet dies konkret, Stromeinsparungen zu erzielen. Elektrische und elektronische Systeme müssen stets energetisch optimiert werden, um eine Steigerung der Wirkungsgrade und somit Energieeffizienz zu realisieren. In Deutschland sind elektrische Antriebe auf industrieller Ebene für 70 % des Stromverbrauchs verantwortlich. Die Einsatzgebiete der permanenten Synchronmaschinen (PMSM) nehmen dabei sowohl im Bereich größerer Leistungen als auch bei Kleinantrieben stetig zu. Um die Energiebilanz der PMSM zu verbessern, ist eine ausreichende Genauigkeit bei der Verlustberechnung erforderlich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts VerInA wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem die Verluste einer PMSM bereits bei der Maschinenauslegung hinreichend genau bestimmt und damit eine Steigerung der Energieeffizienz sowie erhebliche Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden können.

tische Feldstärke und die magnetische Flussdichte bestimmt werden können, was über die Flächenbestimmung der Hystereseschleife die Ermittlung der Magnetverluste ermöglicht.

Nach grundlegenden Untersuchungen wurden die dabei gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse auf das Problem der Verlustbestimmung in der elektrischen Maschine übertragen. Zunächst erfolgte die analytische Beschreibung der verlustursachenden Oberfelder im Luftspalt einer PMSM mit oberflächenmontierten Magneten. Anschließend wurde eine hybride Methode, bestehend aus 2D-FEM-Rechnung und analytischem Verlustansatz, und eine rein analytische Berechnungsmethodik genutzt. Verluste in den Magneten können mit Hilfe dieser Methoden in einer wesentlich kürzeren Zeitdauer im Vergleich zu einer 3D-FEM-Rechnung bestimmt werden. Es zeigte sich, dass sich diese Methode unter den gegebenen Randbedingungen auch auf elektrische Maschinen mit vergrabenen Magneten anwenden ließ. Abschließend galt es eine Methodik einzuführen, mit welcher die Magnetverluste in der elektrischen Maschine messtechnisch nachgewiesen werden können.

## Ziele

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein (semi-)analytisches Berechnungsmodell mittels eines geeigneten Software-Tools zu erarbeiten. Darüber hinaus sollte eine Methode entwickelt werden, mit welcher die Verluste in den Permanentmagneten messtechnisch nachgewiesen werden können. Der Fokus lag hierbei auf der (teil-)analytischen Berechnung der Magnetverluste.

## Projektverlauf

Zunächst wurden die Verluste in Permanentmagneten aufgrund homogener magnetischer Wechselfelder betrachtet. Nach einer Beschreibung der Verlustmechanismen in hartmagnetischen Werkstoffen erfolgte die Vorstellung eines geeigneten analytischen Wirbelstromverlustberechnungsansatzes für Permanentmagnete. Die Verifikation der Ergebnisse wurde dabei anhand von 3D-Finite-Elemente-Methoden-Rechnungen (FEM) durchgeführt. Zudem wurden die Ergebnisse des analytischen Modells mit Hilfe einer eigens entwickelten Messanordnung messtechnisch verifiziert. Der Magnet wird dabei von zwei konzentrischen Spulen umgeben, so dass gleichzeitig die magne-

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der hybriden Berechnungsmethodik zeigten im Vergleich zur 3D-FEM-Rechnung eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der höher berechneten Flussdichteamplituden liefert die (semi-)analytische Berechnung größere Verluste als die hybride Methode. Für eine grobe Verlustabschätzung ist die (semi-)analytische Berechnung jedoch einsetzbar. Der Vorteil liegt hier in der signifikant geringeren Berechnungsdauer – im Vergleich zur 3D-FEM-Rechnung. Die relative Zeitersparnis der analytischen Rechnung beträgt über 99 %, die der hybriden Methodik über 95 %. Die Anwendung beider Berechnungsmethoden ist für die Auslegungsphase einer elektrischen Maschine deshalb wesentlich besser geeignet. Aufgrund der dreidimensionalen Problemstellung war die Durchführung einer reinen 2D-FEM-Rechnung an dieser Stelle nicht möglich.

Zur Validierung des analytischen Verlustberechnungsmodells wurde zusätzlich zu 3D-FEM-Rechnungen ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut, mit dem sich die Verluste in Magneten aufgrund homogener und zeitlich veränderlicher Felder messtechnisch nachweisen ließen. Hierfür wird mittels eines Eisenkreises ein zeitlich veränderlicher Fluss durch einen Permanentmagneten geleitet. Mit einer Doppelspulenordnung konnte der zeitliche Verlauf des Induktionsfeldes und der magnetischen Feldstärke ermittelt werden. Auf Basis der Definition

von Ummagnetisierungsverlusten waren die Magnetverluste somit messbar. Die Wirbelstromverluste wurden als Funktion der Frequenz und der Induktion gemessen. In beiden Fällen zeigte der Vergleich zum analytischen Modell eine gemittelte relative Abweichung von unter 9 %. Damit wurde das analytische Verlustberechnungsmodell mittels FEM-Rechnungen und Messungen verifiziert und konnte für die Verlustuntersuchungen in der elektrischen Maschine verwendet werden. Ein wichtiger Parameter für die analytische Berechnung der Magnetverluste ist die elektrische Leitfähigkeit der Permanentmagnete. Diese geht linear in die Verluste ein. Die Angabe dieses Parameters in den Datenblättern der Hersteller erfolgt jedoch lediglich innerhalb eines Wertebereichs. Der Unterschied zwischen größtem und kleinstem Wert beträgt rund 15 %. Eine Messanordnung mit Vier-Leiter-Methode wurde aufgebaut und eine Fehlerabschätzung durchgeführt. Mittels der Wirbelstrommessung wurde der Unterschied der mittleren Leitfähigkeit zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Magneten untersucht.

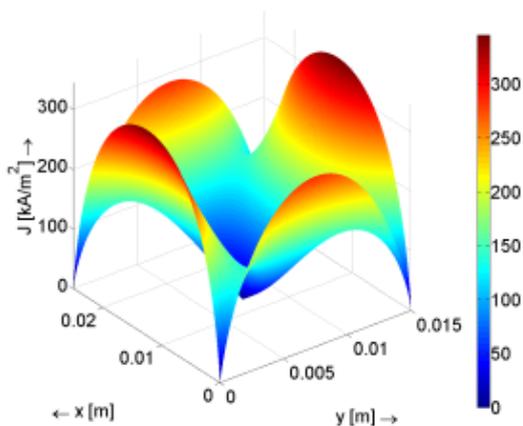


Abb. 1: Analytisch berechnete Verteilung der Wirbelstromdichte

Die Ursache für die Entstehung von Flussänderungen in den Magneten einer PMSM sind im Luftspalt asynchron zum Rotor umlaufende Felder. Würde lediglich das Grundfeld betrachtet werden, entstünden keine sich zeitlich ändernden magnetischen Flüsse in den Magneten und somit nach dem Induktionsgesetz auch keine Verluste. Im Forschungsprojekt wurden analytische Berechnungsansätze betrachtet, mit denen das Luftspaltfeld annähernd beschrieben werden kann. Somit sind, unter Berücksichtigung von Koordinatentransformationen, die verlustverursachenden Frequenzkomponenten bestimmbar. Weiter wurden im analytischen Berechnungsmodell Oberfelder aufgrund der diskreten Wicklungsverteilung über den Bohrungsumfang der elektrischen Maschine und der Einfluss der Ständernutung auf das Stator- und Rotorfeld berücksichtigt. Da in der betrachteten Maschine keine Schalenmagnete, sondern Quadermagnete verbaut waren, konnte der geometrische Luftspalt nicht als konstant angenommen werden. Aus diesem Grund wurde ein erweiterter Luftspalt eingeführt, mit dem das Berechnungsergebnis verbessert werden konnte. Für das Messverfahren zur Bestimmung der Verluste in Mag-

Projektleiter  
 Prof. Dr. Andreas Kremser  
 Telefon: 0911/5880 1409  
 E-Mail: andreas.kremser@th-nuernberg.de

Institut ELSYS  
 Technische Hochschule Nürnberg  
 Georg Simon Ohm

[www.th-nuernberg.de](http://www.th-nuernberg.de)

neten im Betrieb der Maschine wurde eine indirekte Methode gewählt. Als Basis diente die Definition der Wärmeleistung. Zur Verifikation der Berechnungsmodelle wurden vier Betriebspunkte untersucht und die Verluste mittels des eingeführten Messverfahrens bestimmt. Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu untersuchen, wurde ein Betriebspunkt mehrmals gemessen. Innerhalb einer bestimmten Genauigkeit konnten die Messergebnisse wiederholt werden.

Es zeigte sich, dass sich die Messergebnisse quantitativ mit den Simulationsergebnissen hinsichtlich der Drehzahlabhängigkeit, jedoch nicht hinsichtlich der Lastabhängigkeit, decken. Die Messergebnisse legten nahe, dass ein großer Teil der Verluste durch die Oberschwingungen im Strom verursacht wird. Die Frequenzen dieser Oberschwingungen befinden sich in der Größenordnung der Umrichter-Taktfrequenz und derer Vielfachen. Um diese in der 3D-FEM-Simulation nachzubilden, ist eine Vielzahl an Simulationsschritten je elektrischer Periode erforderlich. Aufgrund der sehr hohen Berechnungszeit ist dies nicht praktikabel umsetzbar. Um den Einfluss der Stromoberschwingungen auf die Verluste im Permanentmagneten auszuschließen, wurde die vorgestellte Messmethode im Betrieb mit einer Sinusspeisung umgesetzt und durchgeführt. Dies bot den Vorteil, dass die Abhängigkeit zur Last ohne den Einfluss der Stromoberschwingungen untersucht werden konnte. Ein rein sinusförmiger Strom kann mit einer endlichen Anzahl an Simulationsschritten gut nachgebildet werden, wodurch die 3D-FEM-berechneten Verluste unter zur Messung vergleichbaren Rahmenbedingungen bestimmt wurden.

## Fördergeber

Bayerisches Staatsministerium für  
 Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



## Projektpartner aus der Wissenschaft



## Projektpartner aus der Industrie

Siemens AG