

Optimierte Finite-Elemente-Simulation von induktiven Wickelgütern:

Neues Messsystem



(Bild: Flegere – Shutterstock)

Bei der Simulation induktiver Wickelgüter ist es unerlässlich, die magnetischen Materialeigenschaften der Werkstoffe miteinzubeziehen. Allerdings sind Datensätze zur optimierten Auslegung und Modellierung von weichmagnetischen Kernen oft unzureichend. Abhilfe verspricht ein neuentwickeltes Messsystem, mit dem sich weichmagnetische Werkstoffe unter Wechsellagerung vermessen lassen.

Von Michael Owzareck und Nejila Parspour

Weichmagnetische Werkstoffe werden in der elektrischen Antriebstechnik und Leistungselektronik eingesetzt. Bei der magnetischen Simulation von induktiven Wickelgütern ist es grundsätzlich notwendig, die magnetischen Materialeigenschaften der eingesetzten magnetischen Werkstoffe unter unterschiedlichen Feldverläufen bzw. den Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte und Feldstärke sowie die weichmagnetischen Verluste zu kennen. Denn nur dadurch kann sichergestellt werden, dass das entwickelte induktive Bauelement ordnungsgemäß und zuverlässig funktioniert.

Es gibt heute eine Vielfalt an magnetischen Werkstoffen, die zur Konstruktion von elektromagnetischen Bauele-

menten verwendet werden. Diese Werkstoffe lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen.

Hartmagnetische Werkstoffe besitzen eine hohe Koerzitivfeldstärke und wer-

den z.B. als Permanentmagnete in Synchronmaschinen und Gleichstrommotoren verwendet.

Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch eine geringe Koerzitivfeldstärke und hohe Permeabilität aus. Diese finden häufig Verwendung als Kernmaterial in Transformatoren, Drosseln und Hochfrequenz-Übertragern in der Leistungselektronik. Induktive Wickelgüter besitzen als Kern einen weichmagnetischen Werkstoff, der den magnetischen Fluss verstärken und führen soll [1]. Zu den weichmagnetischen Werkstoffen zählen Stahl, Silizium-Eisen (Elektroblech), Nickel-Legierungen, amorphe Materialien, nanokristalline

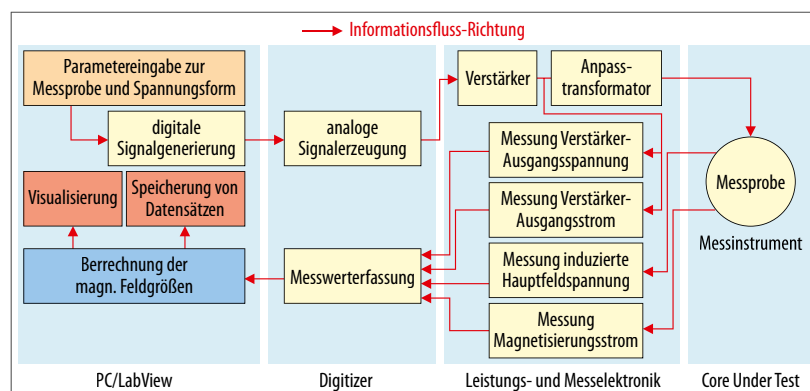


Bild 1. Informationsflussdiagramm des weichmagnetischen Messsystems.

(Quelle aller Grafiken: Block)

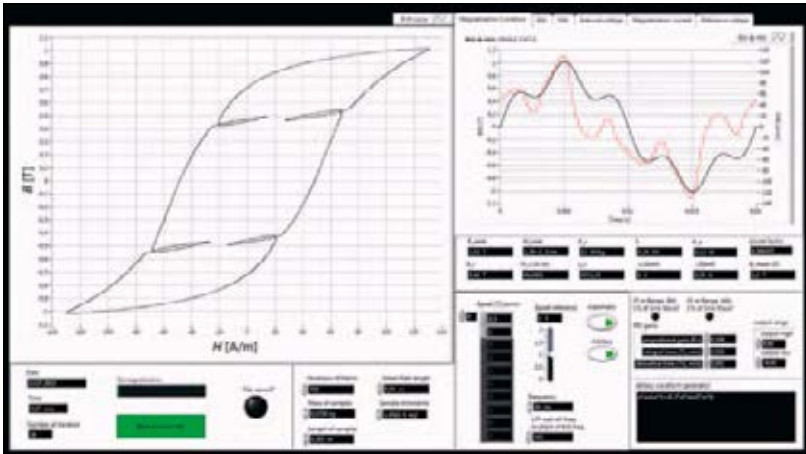


Bild 2. Messoberfläche des weichmagnetischen Messsystems.

(Bild: Block)

Materialien, Eisenpulver (soft magnetic composites) und Weichferrite [1].

Verfügbare Datensätze nicht ausreichend

Die Entwickler von induktiven Wickelgütern benutzen als Informationsquelle für die magnetischen Werkstoffeigenschaften die Datenblattangaben der

Werkstoffhersteller, die nach Normvorgaben die weichmagnetischen Werkstoffe vermessen. Meist werden die Kommutierungskurve, die den Zusammenhang zwischen dem Maximalwert der magnetischen Flussdichte als Funktion des Maximalwertes der magnetischen Feldstärke $B_a = f(H_a)$ beschreibt, und eine Verlustkennlinie des weichmagnetischen Kerns als Funktion des Ma-

ximalwertes der magnetischen Flussdichte verwendet, um Finite-Elemente-Programme damit zu speisen.

Heutzutage werden viele induktive Wickelgüter in leistungselektronischen Schaltungen eingesetzt, in denen magnetische Kerne unter hohen Frequenzen, nicht sinusförmigen Bedingungen und hohen Flussdichte-Amplituden arbeiten. Die Normsituation sieht nur eine Messung bei sinusförmiger Spannung bzw. magnetischer Flussdichte vor, sodass die Datenblattangaben der Werkstoffhersteller nur unter diesen Randbedingungen gemessen werden.

Spezielle Parameter, die für die Modellierung des weichmagnetischen Werkstoffs und zur Simulation von induktiven Wickelgütern in der Leistungselektronik notwendig sind, sind den Werkstoffherstellern unbekannt und daher nicht im Datenblatt vorhanden. Sie können auch nicht aus einem vorhandenen Datensatz der Werkstoffhersteller generiert werden.

Aus diesen Gründen ergeben sich so unzureichende Informations- und Da-

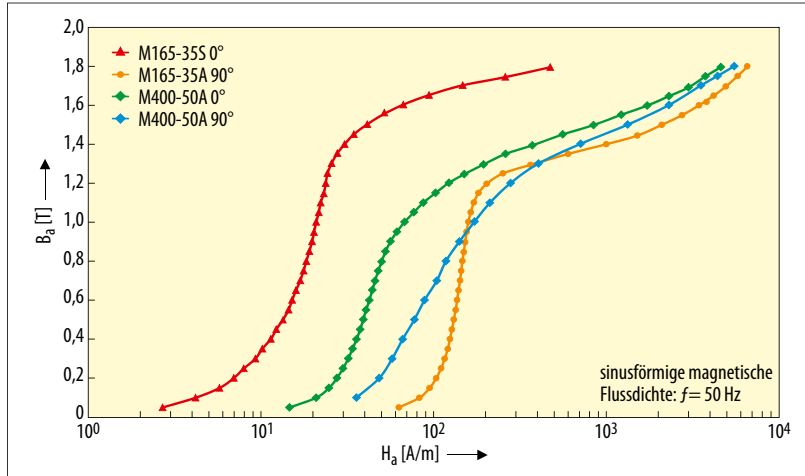


Bild 3. Einfluss der Walzrichtung auf die Kommutierungskurve.

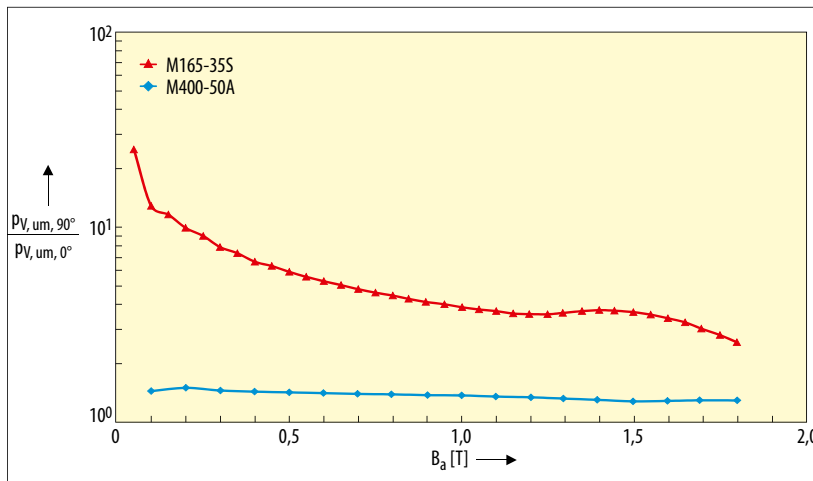


Bild 4. Einfluss der Walzrichtung auf die Ummagnetisierungsverluste.

tensätze zur optimierten Auslegung und Modellierung von weichmagnetischen Kernen und somit der Simulation von induktiven Wickelgütern. Dieser Nachteil wird in der Praxis von Entwicklern oft durch Erfahrung, Fertigung von Musterbauten und ausgiebige Tests kompensiert.

Diese schwierige Situation hat folgende Gründe: Messverfahren, die seit langer Zeit bei kleinen Frequenzen von 50 bis 400 Hz eine gute Reproduzierbarkeit und eine nur kleine Messunsicherheit besitzen, werden bei höheren Frequenzen und nicht sinusförmigen

Bedingungen fragwürdig und ungenau. Das Erzeugen von hohen Flussdichteamplituden bei hohen Frequenzen im weichmagnetischen Kern ist zudem eine technische Herausforderung.

Neues weichmagnetisches Messsystem

Der Lösungsansatz ist hier ein selbstentwickeltes Messsystem, mit dem sich weichmagnetische Werkstoffe unter Wechsellagerung vermessen lassen. Ein Kriterium stellt hierbei der automatisierte und kontrollierte Messvorgang dar, aus dem sich die den Werkstoff charakterisierenden Größen wie Kommutierungskurve, relative Amplitudenpermeabilität, Magnetisierungsschleife, Remanenzflussdichte, Koerzitivfeldstärke und Ummagnetisierungsverluste messen lassen.

In der Fachliteratur wird auf unterschiedliche Messmethoden zur Messung von weichmagnetischen Werkstoffen verwiesen:

- LCR-Impedanz-Messbrückenverfahren,
- Messung mit einem Netzwerk- bzw. Impedanzanalysator,
- kalorimetrische Messverfahren,
- induktive Messverfahren.

Die Messung der spezifischen Werkstoffparameter mit einer LCR-Impedanzmessbrücke und die mit einem Netzwerkanalysator haben den Nachteil, dass mit diesen nur Messungen bei geringen Aussteuerungen der magnetischen Flussdichte (Rayleigh-Bereich) der Messprobe und nur unter sinusförmigen Bedingungen möglich ist. Bei der LCR-Impedanzmessbrücke werden die Verluste an einem Parallelwiderstand der Ersatzanord-

nung bei kleiner Aussteuerung gemessen. Eine Extrapolation hin zu höheren Aussteuerungen bzw. magnetischen Flussdichten ist aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit der weichmagnetischen Verluste

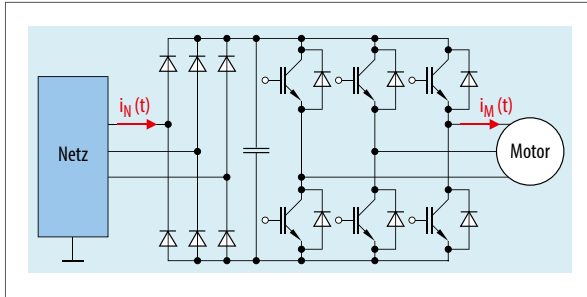


Bild 5. Typisches Antriebssystem mit Frequenzumrichter.

nicht möglich. Die größte Herausforderung stellt eindeutig die Wirkleistungsmessung dar. Kalorimetrische Verfahren sind sehr genau, aber schwierig einzurichten und zeitaufwändig. Der größte Nachteil kalorimetrischer Verfahren besteht darin, dass nur die gesamte Abwärme messbar ist. Dies bedeutet, dass nur die Summe von Wicklungsverlusten und weichmagnetischen Verlusten messbar ist. Eine Trennung dieser Verluste ist bei höheren Frequenzen aufgrund von Skin- und Proximity-Effekten in der Wicklung nicht mehr möglich. Übrig bleiben die induktiven Messverfahren, die im magnetischen Wechselfeld in Form von Messungen im Leerlaufversuch durchgeführt werden. Vorteil dieser Messverfahren ist, dass eine hohe Aussteuerung möglich ist und die Gesamtverluste eindeutig trennbar sind. Aus diesen Gründen basiert das verwendete Messsystem in Bild 1 auf dem induktiven Prinzip.

Das Messverfahren

Der Informationsfluss startet mit der Eingabe, welche Art von Messprobe gemessen werden soll, und der Eingabe von Geometrie- und Werkstoffparametern. Auch die Eingabe der Spannungsform ist erforderlich, mit der die Mess-

probe magnetisiert werden soll. Nach der Eingabe dieser Randparameter erfolgt eine digitale Spannungsformgenerierung in Form eines Array. Nach der Generierung des Spannungsform-Array wechselt der Informationsfluss die Bausteingruppe hin zu dem Baustein „Digitizer“. Hier wird mit Hilfe eines D/A-Umsetzers eine analoge Spannung erzeugt. In der Baugruppe „Leistungs- und Messelektronik“ verstärkt ein Industrieverstärker diese Spannung. Anpasstransformatoren filtern mögliche Gleichanteile des Magnetisierungsstromes und sorgen somit dafür, dass keine Gleichstrom-Vormagnetisierung vorhanden sein kann. An der Messprobe liegt nun diese Spannung primärseitig an. Der Informationsfluss geht von der Messprobe zurück in die Baugruppe „Leistungs- und Messelektronik“, wo mit Hilfe von Messelektronik die Spannungen und Ströme an der Messprobe und am Verstärkerausgang gemessen werden. Der Informationsfluss wechselt nun die Baugruppe zu „Digitizer“, wo mit Hilfe eines A/D-Umsetzers die Messwerte erfasst werden. Die Informationsflusskette endet wieder in der Startbaugruppe der Software. Hier werden nun aus dem Magnetisierungsstrom und der

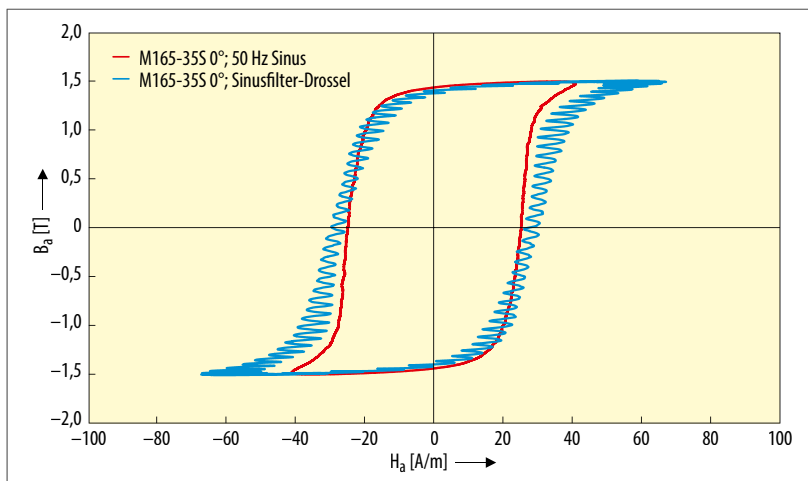


Bild 6. Einfluss der Stromform auf die dynamische Magnetisierung.

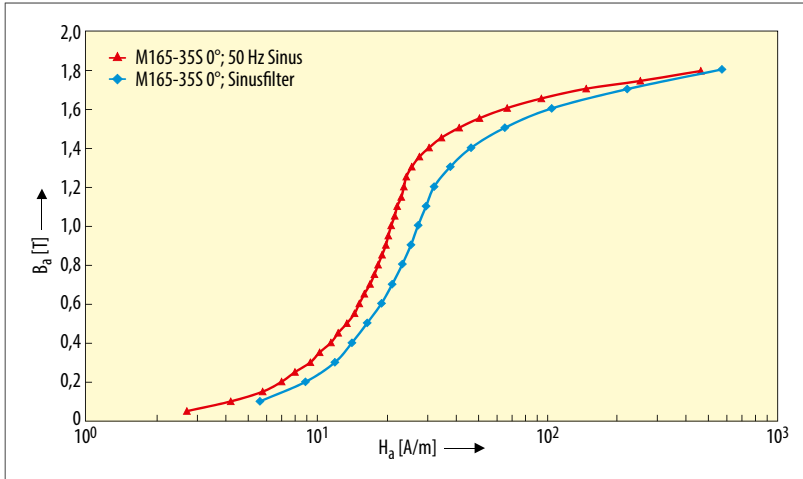


Bild 7. Einfluss der Stromform auf die Kommutierungskurve.

induzierten Hauptfeldspannung die magnetischen Feldgrößen digital berechnet. Die bereits oben genannten magnetischen Messgrößen werden in der Bedienungssoftware der entwickelten Software visualisiert (Bild 2).

Mit diesem weichmagnetischen Messsystem lassen sich die Einflüsse der magnetischen Anisotropie, der Ummagnetisierungsgeschwindigkeit dB/dt und der Form des Magnetisierungsstroms messen und somit auch in der Finite-Elemente-Simulation berücksichtigen, indem die gemessenen Datensätze der Simulations-Software zur Verfügung gestellt werden.

Einflussfaktoren auf Werkstoffeigenschaften

Um sich besser an die vorherrschenden Betriebsbedingungen anpassen zu können, sind im Laufe der Jahre viele unterschiedliche Elektroblechsorten entstanden. Durch den steigenden Siliziumanteil im Eisen erhöht sich der spezifische Widerstand des Elektroblechs und ist damit ein wesentlicher Faktor zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten. Das Elektroblech gehört zu der Werkstoffgruppe der Metalle und ist somit ein polykristalliner Werkstoff.

Einfluss magnetischer Anisotropie unter sinusförmigen Bedingungen

Je nach Herstellungsprozess und den daraus resultierenden magnetischen Eigenschaften ist zwischen kornorientiertem und nicht kornorientiertem Elektroblech zu unterscheiden. Für technische Anwendungen, bei denen gleichwertige Eigenschaften in alle Magnetisierungsrichtungen gegeben

sein müssen, sind isotrope Werkstoffe vorteilhaft [2]. Hier liegen alle Kristallite regellos in der Blechebene verteilt, sodass von nicht kornorientiertem Elektroblech gesprochen wird. Bei leistungselektronischen Anwendungen, bei denen es auf besonders geringe Ummagnetisierungs-Verluste des induktiven Wickelguts ankommt und erhöhte Anforderungen an die relative Amplitudenpermeabilität gestellt werden, kommt kornorientiertes Elektroblech zum Einsatz. Beim kornorientiertem Elektroblech bewirkt die einheitliche Orientierung der Kristallite ein stark anisotropes Materialverhalten. Somit muss die relative Amplitudenpermeabilität als Tensor aufgefasst werden:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix} \cdot \vec{H}$$

In Bild 3 sind Kommutierungskurven für die Elektroblechsorten M400-50A (nicht

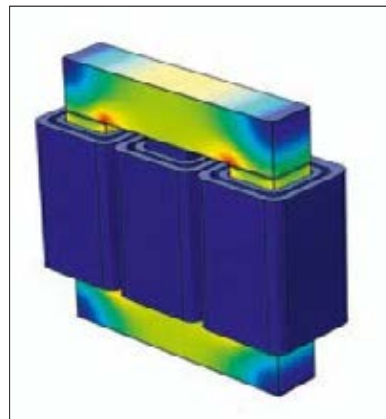


Bild 8. Simulationsmodell einer 3-Phasen-Sinusfilterdrossel.

(Bild: Block)

kornorientiert) und M165-35S (kornorientiert) für eine normative Messung nach DIN EN 60404-2 dargestellt. Die Kommutierungskurve wird benötigt, um bei der Finite-Elemente-Simulation den weichmagnetischen Kern zu modellieren. In 0° Walzvorzugsrichtung weisen die Elektroblechsorten eine höhere Amplitudenpermeabilität auf. Die Werkstoffhersteller geben meist für kornorientierte Elektroblechsorten nur Kommutierungskurven für die 0°-Walzvorzugsrichtung an. Um die magnetische Sättigung eines induktiven Wickelguts optimal zu simulieren, wird aber auch die 90°-Kommutierungskurve zur Simulation benötigt.

Kernverluste lassen sich mit finiten Elementen nur schwer simulieren, da sich nur die klassischen Wirbelstromverluste direkt simulieren lassen. Die Ummagnetisierungsverluste $P_{V,um}$ sind aber die Summe aus Hystereseverlust $P_{V,H}$, klassischem Wirbelstromverlust $P_{V,W}$ (für homogenes Materialvolumen) und mikroskopischem Wirbelstromverlust $P_{V,A}$ (Berücksichtigung der Domänenstruktur) [3].

$$P_{V,um} = P_{V,H} + P_{V,W} + P_{V,A} = f \cdot V_{Kern} \cdot \oint H dB$$

$$= f \cdot V_{Kern} \cdot \int_0^T H(t) \cdot \frac{dB(t)}{dt} dt$$

Auch die Ummagnetisierungsverluste besitzen eine Abhängigkeit von dem Verhältnis der Magnetisierungsrichtung zur Walzvorzugsrichtung. In Bild 4 sind die spezifischen Ummagnetisierungsverluste der 90°-Magnetisierungsrichtung zur Walzrichtung normiert auf die 0°-Magnetisierungsrichtung zur Walzvorzugsrichtung als Funktion des Maximalwertes der magnetischen Flussdichte für eine normative Messung nach DIN EN 60404-2 bei sinusförmiger Spannung und 50 Hz dargestellt.

Um das induktive Wickelgut thermisch optimal auslegen zu können, muss auch der Einfluss der magnetischen Anisotropie auf die Ummagnetisierungsverluste mitsimuliert werden. Wo beim nicht kornorientierten Elektroblech der Einfluss zwischen den Magnetisierungsrichtungen nur 20 bis 30 % liegt, ist bei kornorientiertem Elektroblech mehr als das Dreifache der Ummagnetisierungsverluste in 90° Magnetisierungsrichtung zu erwarten. Um die Ummagnetisierungsverluste zu simulieren, kann der Ansatz aus [4] verwendet werden.

Um das elektrische und magnetische Verhalten des induktiven Wickelguts optimiert für die spätere Anwendung auszulegen und zu dimensionieren, bietet es sich an, auch unter diesen Betriebsbedingungen bzw. Magnetisierungsströmen zu simulieren. Vorteilhaft ist es, wenn auch die magnetischen Eigenschaften des eingesetzten weichmagnetischen Kernmaterials für diese leistungselektronische Stromform als Datengrundlage zur Finite-Elemente-Simulation vorhanden sind. In **Bild 5** ist ein typisches Antriebssystem mit Frequenzrichter dargestellt. Um u.a. die Flankensteilheit der Motorspannung zu reduzieren, werden Filterkonzepte bestehend aus Induktivität und Kapazität zwischen Frequenzrichter und Motor eingesetzt.

Der Magnetisierungsstrom $i_M(t)$ der Filterdrossel ist nun nicht mehr sinusförmig und die Werkstoffeigenschaften entsprechen nicht mehr der normativen Messung und den Datenblattangaben der Werkstoffhersteller. In **Bild 6** ist ein Vergleich der dynamischen Magnetisierungsschleife zwischen der normativen Messung unter sinusförmigen Bedingungen und der Messung unter leistungselektronischen Bedingungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ummagnetisierungsverluste unter realen Bedingungen steigen, da diese direkt proportional zum Flächeninhalt der dynamischen Magnetisierungsschleife sind (Gleichung 2). Auch die Sättigungsfeldstärke steigt in der realen Anwendung aufgrund der höheren Ummagnetisierungsgeschwindigkeit dB/dt , was einen Einfluss auf das Sättigungsverhalten der Filterdrossel hat.

Bild 7 zeigt den Einfluss der Stromform auf die Kommutierungskurve und

somit auch den Einfluss auf die relative Amplitudenpermeabilität. Mit dieser Datenbasis lässt sich eine optimierte Simulation im Vergleich zum Prototyp erreichen.

Die Finite-Elemente-Simulation

Durch eigene weichmagnetische Messungen lassen sich die Einflüsse der magnetischen Anisotropie, des Stanzens und die Form des Magnetisierungsstroms bzw. die Ummagnetisierungsgeschwindigkeit in der Finite-Elemente-Simulation berücksichtigen. **Bild 8** zeigt ein Simulationsmodell einer typischen 3-Phasen-Drossel mit einem kornorientierten Elektroblech der oben beschriebenen Anwendung.

Durch die beschriebenen Materialdatensätze wurde die Induktivität der Drossel simuliert und anschließend mit der Induktivität eines Prototyps in der Anwendung verglichen (**Bild 9**).

Typisch für Induktivitäten mit kornorientiertem Elektroblech als Kernmaterial ist das ungleichmäßige Sättigungsverhalten aufgrund der starken magnetischen Anisotropie. Dieses magnetische Verhalten zeigt auch das Simulationsergebnis. Die relative Abweichung zwischen Simulation und Messung am Prototyp kann durch selbst gemessene Materialdatensätze minimiert werden.

Abweichungen minimieren

Für die magnetische Simulation von induktiven Wickelgütern wird die Kommutierungskurve für verschiedene Magnetisierungsrichtungen benötigt. Diese kann bereits im Finite-Elemente-Programm vorhanden sein. Es ist aber

nicht bekannt, für welche Messfrequenz und mit welchem Messverfahren diese ermittelt wurde. Die Simulation der Ummagnetisierungsverluste ist ohne zusätzliche spezifische Werkstoffparameter unmöglich.

Die Abweichung zwischen Simulationsergebnissen und Messungen an Prototypen kann minimiert werden, wenn der Einfluss der magnetischen Anisotropie und der Einfluss der Stromform der leistungselektronischen Anwendung mit berücksichtigt wird. *ag*

Literatur

- [1] Heck, C.: *Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung*. Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg, 2. Auflage, 1975.
- [2] Fish, G. E.: *Soft magnetic materials*. Proceedings of the IEEE, Volume 78, Number 6, Juni 1990.
- [3] Bertotti, G.: *Hysteresis in magnetism*. Academic Press, Inc, San Diego (CA), 1998.
- [4] Owzareck M., Parspour. N.: *Simulation of a 3-phase common- and differential mode inductor on a four-limb core*. PCIM 2015, Nürnberg. VDE Verlag.



Michael Owzareck

hat an der Technischen Universität Braunschweig studiert und arbeitet seit 2013 in der Grundlagenforschung bei der Block Transformatoren & Elektronik GmbH. Seine Tätigkeits-

schwerpunkte dort sind die Entwicklung von analytischen und numerischen Verfahren zur Beschreibung magnetischer und thermodynamischer Kreise und die Entwicklung von Messsystemen zur Beschreibung von magnetischen Werkstoffen und induktiver Wickelgüter in der Leistungselektronik. Seit 2015 ist er externer Doktorand an der Universität Stuttgart.

Michael.Owzareck@Block.eu



Nejila Parspour

studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte im Bereich der elektrischen Maschinen. Nach der Promotion arbeitete sie als Projektmanagerin bei Philips Industrial X-Ray Systems in Hamburg. Von 2001 bis 2007 war sie Oberingenieurin am Institut IALB an der Universität Bremen. Seit Oktober 2007 ist sie Professorin am Institut für elektrische Energiewandlung an der Universität Stuttgart.

info@iew.uni-stuttgart.de

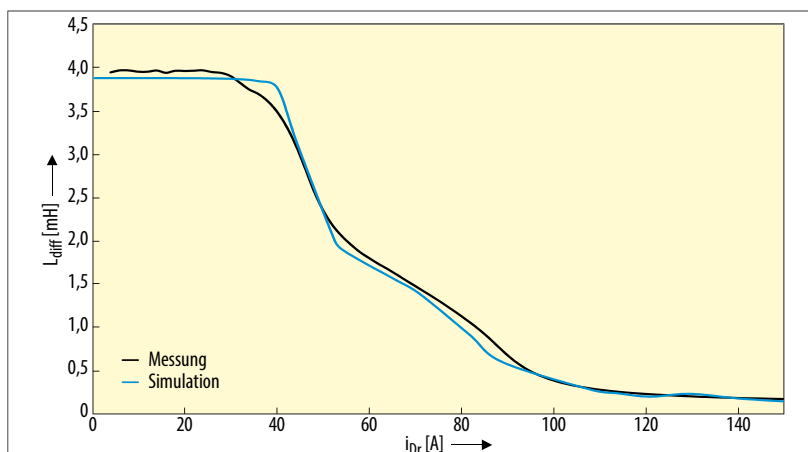


Bild 9. Vergleich zwischen gemessener differenzieller Induktivität am Prototyp und der Simulation.