

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 97 (2006)
Heft: 3

Artikel: Eisenverluste machen das Leben schwer
Autor: Fräger, Carsten
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857648>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Eisenverluste machen das Leben schwer

Ferromagnetische Werkstoffe beim Betrieb mit Frequenzumrichtern

Die Leistungsverluste im magnetisch aktiven Eisen sorgen für zusätzliche Erwärmung in modernen geregelten Antrieben aus Leistungselektronik und Elektromotoren. Aktuelle Untersuchungen zum Magnetisierungsverhalten liefern neue Erkenntnisse zu Verlusten und wirksamer Permeabilität.

Im magnetisch aktiven Eisen der leistungselektronischen Antriebe finden Magnetisierungsvorgänge statt, die bisher nicht schlüssig erklärt werden konnten. Durch neue Untersuchungen an einem Modell, das die Ummagnetisierungsverluste und die wirksame Permeabilität des

Carsten Fräger

Eisens genau nachbildet, können diese Verluste jetzt beschrieben werden. Durch Betrachtung der Vorgänge beim Betrieb mit einer Grundschwingung und einer hochfrequenten Schwingung werden die Vorgänge erfasst, die beim Betrieb von Elektromotoren, Trafos oder Drosseln an Frequenzumrichtern stattfinden.

In modernen Antrieben wird zur Leistungsübertragung eine gepulste Spannung verwendet. Die Spannung enthält

neben der niedrigfrequenten Grundschwingung eine Vielzahl hochfrequenter Anteile. Diese hochfrequenten Anteile erzeugen im magnetisch aktiven Eisen der Motoren zusätzliche Verluste, die den Motor erwärmen und damit den Wirkungsgrad herabsetzen. Diese Verluste haben zwei Grundursachen:

- Wirbelstromverluste
- Hystereseverluste

Die Wirbelstromverluste sind analytisch erfassbar und werden durch den spezifischen Leitwert des Eisens bestimmt. Diese werden hier nicht weiter betrachtet. Die Hystereseverluste sind weitaus schwieriger zu erfassen, da sie aus nichtlinearen und statistischen Effekten im Eisen resultieren. Sie hängen nicht nur von der aktuellen Feldstärke, sondern auch von der vorhergehenden Magne-

tisierung des Eisens ab. Diese Verluste werden im Weiteren betrachtet.

Mehrfrequente Magnetisierung

Durch die gepulste Spannung in leistungselektronischen Antrieben stellt sich ein Strom mit mehreren Frequenzanteilen ein. Der Hauptteil des Stromes hat die Grundfrequenz (im Beispiel 50 Hz), die zum Übertragen der Leistung dient. Daneben gibt es eine Vielzahl von Anteilen mit Pulsfrequenz (im Beispiel 4 kHz) sowie Summen und Differenzen aus Pulsfrequenz und Grundfrequenz sowie deren Vielfachen. Bild 1 zeigt, wie das Eisen gleichzeitig mit einer Grundfrequenz von 50 Hz und einem hochfrequenten Anteil mit 4 kHz magnetisiert wird.

Die Feldstärke $h(t)$ setzt sich dabei aus zwei sinusförmigen Anteilen zusammen:

$$h(t) = \hat{H}_{50} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \text{ Hz}) + \hat{H}_{4000} \cdot \sin(2\pi \cdot 4000 \text{ Hz})$$

Die Induktion $b(t)$ zeigt deutlich die Sättigung. Weiterhin ist zu erkennen, dass der 4-kHz-Anteil bei hohen Gesamtinduktionen deutlich kleiner ist als bei kleinen Induktionen.

Für die Berechnung der Magnetisierungsvorgänge wird das Verhalten des Eisens durch das in [1], [2] beschriebene Verfahren nachgebildet. Dieses Verfahren

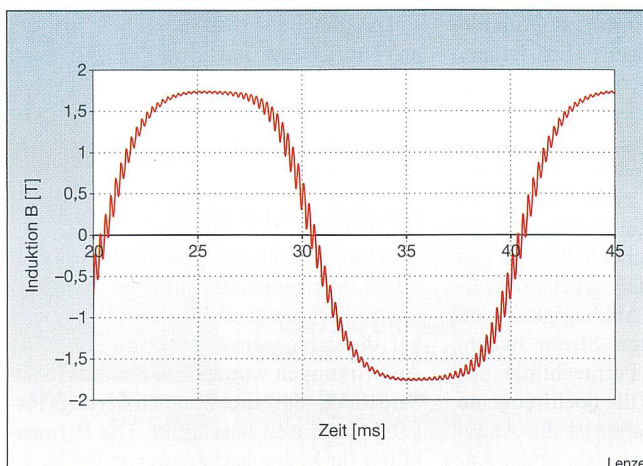


Bild 1 Zeitverlauf der Induktion bei einer Grundfrequenz von 50 Hz mit einer hochfrequenten Überlagerung von 4 kHz

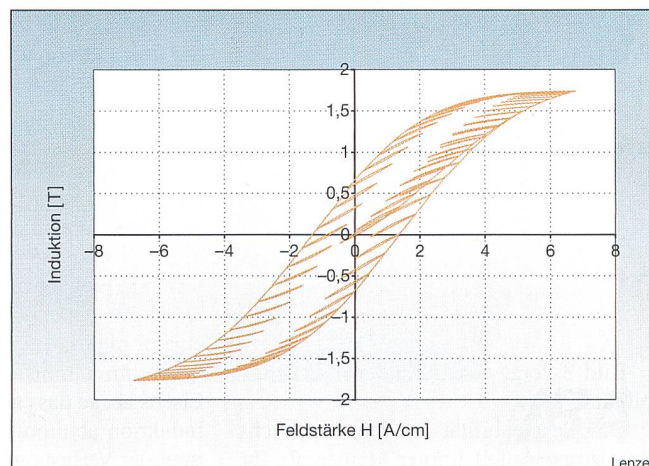


Bild 2 Hysteresekurve bei 50 Hz/4 kHz

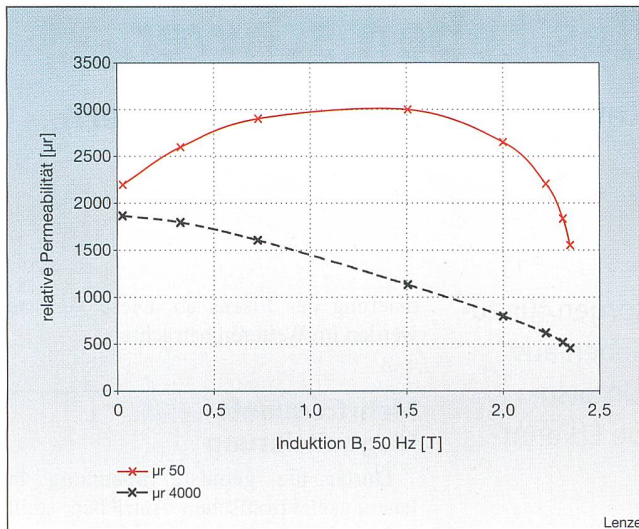


Bild 3 Permeabilität für 50 Hz und 4 kHz in Abhängigkeit von der Induktion bei 50 Hz

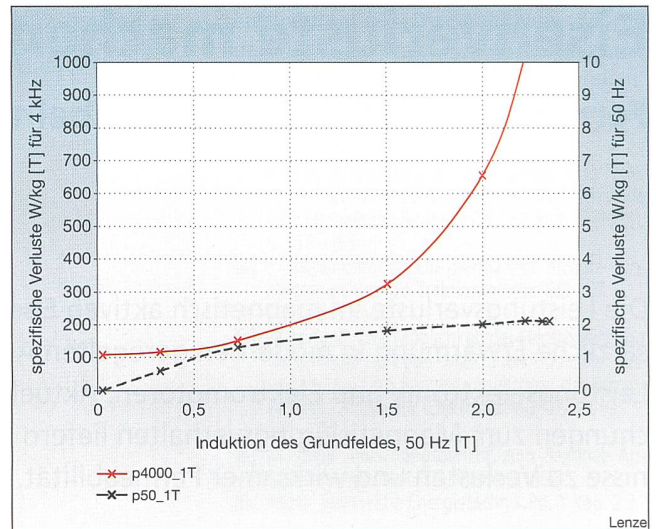


Bild 4 Spezifische Verluste für 50 Hz und 4 kHz in Abhängigkeit von der Induktion bei 50 Hz

wurde schon in [3] für die Kaskadenmaschine ausgewertet. Hier werden speziell die Vorgänge bei der Magnetisierung mit zwei stark unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden der Feldstärke berechnet, wie sie bei Umrichterspeisung von Trafos und Elektromotoren vorkommen. Mit diesem Verfahren lassen sich bisher unerklärte Phänomene beschreiben.

Der in Bild 1 gezeigte Zeitverlauf der Induktion lässt sich auch als Funktion der Feldstärke $b(h)$ darstellen (Bild 2). Hier sieht man, dass die hochfrequenten Magnetisierungen in das innere der Hysteresekurve hineinführen. Es bilden sich kleine Hystereseschleifen mit der hohen Frequenz. Die Steigung dieser inneren Hystereseschleifen ist kleiner als die Kurve für den niedrigfrequenten Anteil.

Aus der Fourieranalyse der Induktion lassen sich die zu den Feldstärken \hat{H}_{50} und \hat{H}_{4000} gehörigen Induktionsanteile $\hat{B}_{50\sin}$, $\hat{B}_{50\cos}$, $\hat{B}_{4000\sin}$ und $\hat{B}_{4000\cos}$ ermitteln. Das Verhältnis der Amplituden liefert die relative Permeabilität für die einzelnen Frequenzen:

$$\mu_{r50} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}_{50\sin}}{\hat{H}_{50}}$$

$$\mu_{r4000} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}_{4000\sin}}{\hat{H}_{4000}}$$

Bild 3 zeigt den Verlauf der Permeabilität.

Die Permeabilität ist für den hochfrequenten Anteil immer kleiner als für den niedrigfrequenten Anteil. Ausserdem sinkt die Permeabilität mit zunehmender

Grundinduktion stark ab. Mit den Amplituden der Cosinus-Anteile der Induktion ergeben sich die spezifischen Hystereseverluste (ρ =Dichte des Eisens):

$$P'_{50} = -\frac{1}{2\rho} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot \hat{H}_{50} \cdot \hat{B}_{50\cos}$$

$$P'_{4000} = -\frac{1}{2\rho} \cdot 2\pi \cdot 4000\text{Hz} \cdot \hat{H}_{4000} \cdot \hat{B}_{4000\cos}$$

Die Hystereseverluste sind quadratisch auf die spezifischen Verluste bei 1 T umgerechnet:

$$P'' = P' \cdot \left(\frac{1\text{T}}{\hat{B}_{\sin}} \right)^2$$

Bild 4 zeigt das Ergebnis für den hochfrequenten und den niedrigfrequenten Anteil. Hier ist deutlich zu erkennen, wie die spezifischen hochfrequenten Hystereseverluste mit zunehmender Grundinduktion extrem ansteigen. Hier ist nur der Hystereseeanteil berücksichtigt, der Wirbelstromanteil überlagert sich diesen Kurven.

Bei realen Messungen ist der Verlustanstieg im Eisen aus zwei Gründen in der Regel anhand der Leistungsaufnahme nicht zu erkennen: Vielfach überwiegen für hohe Frequenzen die Wirbelstromverluste, die nicht diese Abhängigkeit von einem niedrigfrequenten Strom haben. Weiterhin nimmt die Permeabilität des Eisens ab, so dass auch die hochfrequente Induktion abnimmt. Daher ist die Änderung der Verluste geringer, als es der Anstieg der spezifischen Verluste erwarten lässt.

Dieses Verhalten des Eisens hat Auswirkungen auf den Einsatz bei Umrichterspeisung. So ist in [4] der Anstieg der hochfrequenten Ströme bei zunehmender Belastung eines Asynchronmotors beschrieben. Dies lässt sich folgendermassen erklären: Die Höhe des hochfrequenten Stromes hängt von der Spannung des Umrichterausgangs und von der für die hohen Frequenzen wirksamen Streuinduktivität des Motors ab. Der Streufluss des Grundstromes und der hochfrequenten Ströme verläuft zum Teil durch das Statoreisen. Mit zunehmender Belastung des Motors steigt der Grundstrom und damit das zugehörige Streufeld durch das Statoreisen an. Dieser Anstieg der Induktion senkt die Permeabilität des Eisens für die hochfrequenten Ströme entsprechend Bild 3. Dadurch nimmt die wirksame Streuinduktivität für die hochfrequenten Ströme ab und die Ströme steigen mit der Belastung des Motors an.

Das gleiche Verhalten tritt bei Drosseln an Umrichtern auf. Mit zunehmender Belastung der Drossel durch den Grundstrom nimmt die Induktivität für hochfrequente Ströme ab.

Zusammenfassung

Beim Betrieb am Frequenzumrichter treten im magnetisch aktiven Eisen Magnetfelder unterschiedlicher Frequenz auf, die sich gegenseitig beeinflussen. Die Auswirkungen wurden mit einem Modell berechnet, das die Magnetisierungsvorgänge im Eisen beschreibt. Die Permeabilität für kleine hochfrequente Felder ist stets kleiner als für die Grundschwingung und nimmt mit zunehmender Grundin-

duktion stark ab. Gleichzeitig steigen die spezifischen Hystereseverluste für das hochfrequente Feld extrem mit dem Anstieg der Grundinduktion an.

Referenzen

- [1] W. Kampczyk: Berechnung von Magnetisierungsvorgängen mit Hilfe der Néel'schen Theorie des Rayleigh-Gesetzes. Zeitung für angewandte Physik 30 (1970) H.1 S. 22-25
- [2] S. Kurz, J. Fetzer, G. Lehner: Anwendung der Methode der finiten Elemente und des Vektor-Preisach-Modells zur Berechnung ebener magnetostatischer Felder in hysteresebefahenen Medien. Archiv für Elektrotechnik 76 (1993) S. 405-415
- [3] C. Fräger: Neuartige Kaskadenmaschine für bürstenlose Drehzahlstantriebe mit geringem

Stromrichteraufwand. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 189. Düsseldorf: VDI-Verlag (1995)

- [4] H. O. Seinsch: Oberschwingungsverluste bei umrichter gespeisten Motoren. Referat beim 3. Technischen Tag der VEM-Gruppe (2004)

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. Carsten Fräger ist Leiter Product Management Servotechnik bei Lenze Drive Systems. Er studierte an der Universität Hannover Elektrotechnik. Seit 1989 ist er bei Lenze tätig, Stationen waren die Applikation Servoantriebe, die Motorenentwicklung und die strategische Entwicklung Elektromechanik. 1994 promovierte er an der Universität Hannover zum Thema Kaskadenmaschine für Antriebe mit geringem Stromrichteraufwand. An der FVA ist er in Arbeitskreisen Lineartechnik und Direktantriebe tätig. Lenze Drive Systems GmbH, D-31855 Ärzten, fraeger@lenze.de

Résumé

Les pertes dans le fer compliquent la vie

Les matériaux ferromagnétiques dans les convertisseurs de fréquence. Les pertes de puissance dans le fer magnétique actif provoquent un échauffement supplémentaire des entraînements régulés modernes comprenant l'électronique de puissance et les moteurs électriques. Des études récentes sur le comportement de magnétisation fournissent de nouvelles connaissances sur les pertes et l'efficacité de perméabilité.

IBAarau Strom AG

Zukunftsweisende Lösungen sind unser Antrieb

■ **Elektromotoren, elektrische Antriebe und Systeme halten uns permanent in Bewegung.**

Wir prüfen, beschaffen, reparieren und warten Ihre Antriebe – in der ganzen Schweiz, während 24 Stunden und 365 Tagen im Jahr.



■ **Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an unsere Spezialisten.**

Wir freuen uns auf jede neue Herausforderung.

**Rufen Sie uns an!
Telefon 062 835 03 70**

www.ibaarau.ch
servicebetriebe@ibaarau.ch

IBAarau Strom AG
Servicebetriebe
Binzmattweg 2
5035 Unterentfelden
Fax 062 835 03 80



IBA
IHR BESTER ANSCHLUSS!