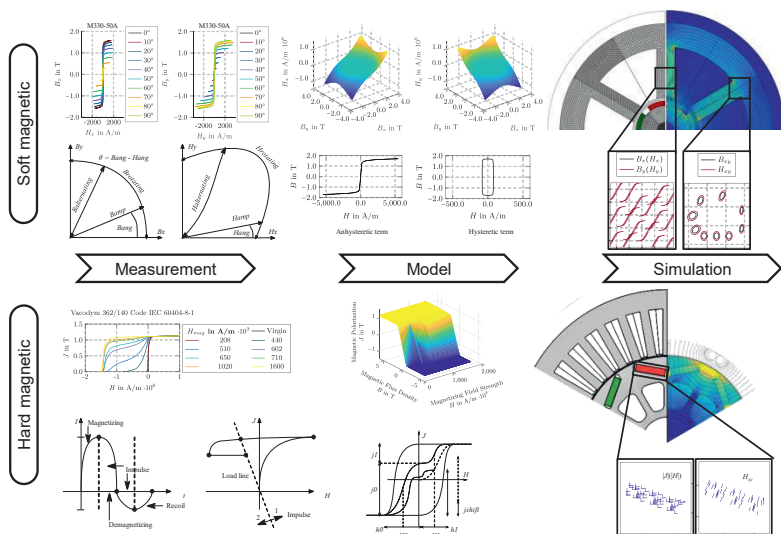


Gregor Johannes Bavendiek

A contribution to the electromagnetic Finite Element Analysis of soft and hard magnetic materials in electrical machines



Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 41

Gregor Johannes Bavendiek

**A contribution to the electromagnetic Finite Element
Analysis of soft and hard magnetic materials in
electrical machines**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen
RWTH Aachen
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7567-0

ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Kurzfassung von Herrn Gregor Bavendiek, M.Sc., der eingereichten Dissertation

"Ein Beitrag zur elektromagnetischen Finite-Elemente-Analyse von weich- und hart- magnetischen Materialien in elektrischen Maschinen"

Damit die Ausnutzung elektrischer Maschinen weiter gesteigert werden kann ist eine genaue Kenntnis der späteren Eigenschaften bereits in der Designphase wünschenswert. Dafür ist eine elektromagnetische Simulation notwendig die zum einen auf grundlegenden elektromagnetischen Zusammenhängen, wie den Maxwell-Gleichungen, und zum anderen auf Modellen spezieller, beispielsweise materialabhängiger, Effekte, beruht. Insbesondere die Eigenschaften der eingesetzten Materialien haben einen starken Einfluss auf die erreichbare Effizienz und Leistungsdichte einer elektrischen Maschine. Die Genauigkeit der Finite-Elemente-Analyse als vorherrschende Lösungsmethode für elektromagnetische Simulationen in der Zeit- und Raumdomäne hängt in erster Linie von der gewählten Diskretisierung ab. Auch wenn sich diese auf modernen Computern erheblich steigern lässt, bringt dies keinen Gewinn an Genauigkeit, wenn die angewandten Materialmodelle die Effekte eines Materials nicht ausreichend abdecken. Aus diesem Grund existieren zwar verschiedenste Materialmodelle, welche jedoch auch Einschränkungen und Vereinfachungen unterworfen sind, die die Berücksichtigung relevanter Effekte in der Simulation einschränken. Insbesondere eine einfache Betrachtung von Anisotropie und Hysterese ist eine Herausforderung. Deswegen wird eine allgemeine Methodik für die Berücksichtigung von magnetischem Material in der Finite-Elemente-Methode diskutiert und dafür geeignete Materialmodelle aus dem Stand der Technik weiterentwickelt. Der Schwerpunkt liegt auf Modellen mit empirischen Gleichungen und physikalischen Parametern, die direkt aus Messungen extrahiert werden können. Auch ein direkter Gebrauch von Messdaten in der Simulation wird verfolgt. Dieser Ansatz bietet einen guten Kompromiss zwischen Anwendbarkeit und zuverlässiger Bewertung. Der Nutzen wird durch die Betrachtung von Simulationsbeispielen relevanter technischer Anwendungen unterstrichen.

Als weichmagnetisches Material wird Elektroband betrachtet und dessen Anisotropie und Hysterese anhand von ein und zweidimensionalen Messungen diskutiert. Besonders hervorgehoben wird die Abweichung im Phasenwinkel, die nur mittels zweidimensionaler Messungen zwischen der magnetischen Flussdichte und der Magnetfeldstärke zu bestimmen ist. Ein Modell der anisotropen Magnetisierung ohne Hysterese wird hergeleitet sowie ein vektoriell-pragmatisches algebraisches Modell von Hysterese mit verbesserter Anisotropie. Die Simulationen des T.E.A.M.-Problems 32 als auch die der zu Grunde liegenden Messaufbauten mit den Messungen stimmen gut überein. Das Simulationsbeispiel einer segmentierten Permanentmagnet-Synchronmaschine unter Berücksichtigung der Anisotropie zeigt den starken lokalen Einfluss der Anisotropie auf die Magnetfeld- und Flussdichteverteilung.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf hartmagnetischem Material, insbesondere hochenergetischen Seltenerd-Permanentmagneten, da sie für verschiedene elektrische Maschinen die vielversprechendste Wahl sind. Im Gegensatz zu weichmagnetischen Materialien sind Effekte wie Anisotropie und Hysterese viel ausgeprägter. Detaillierte Messreihen werden an den Permanentmagnetproben mittels eines Impulsmagnetometers durchgeführt. Die Messungen werden durch empirische Gleichungen mit physikalischen Parametern nachmodelliert. Dabei fließt die starke Abhängigkeit der Magnetisierungsgeschichte in die Modellierung der Hysterese ein. Daher wird die Abhängigkeit der Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsscharakteristik von der Magnetisierungsfeldstärke ausgiebig gemessen und modelliert. Das abgeleitete konsistente Modell für die Magnetisierung und Entmagnetisierung von Permanentmagneten wird für eine vollständige Hysterese erweitert, die kleinere Schleifen während nicht vollständiger Magnetisierungsprozesse abdeckt. Das Modell ermöglicht es, das Magnetfeld und die resultierende Magnetisierung eines Permanentmagneten während und nach einem beliebigen transienten Magnetisierungsprozess vorherzusagen. Die Eigenschaften des Modells werden an beispielhaften anwendungsrelevanten numerischen Simulationen diskutiert, wie z. B. einer einzelnen Magnetisierspule, einer Post-Assembly-Magnetisierung einer Synchronmaschine mit Sammler oder V-förmiger Magnetanordnung, sowie der In-Situ-Magnetisierung einer Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten. Die numerischen Beispiele veranschaulichen, welche Fragen anhand des Modells für die Simulation untersucht werden können, wie z.B. die Bestimmung der Erreichung des erforderlichen Magnetisierungsfeldes unter Berücksichtigung lokaler Feldverzerrungen durch Selbstentmagnetisierung und Wirbelströme. Das Modell bildet die Grundlage für weitere detailreiche Forschungen, z.B. zur verbesserten Auslegung von Magnetkreisen von Synchronmaschinen mit variablen Magnetfluss, In-Situ- und Post-Assembly-Magnetisieren.

Abstract from Mr. Gregor Bavendiek, M.Sc., of the PhD thesis

"A contribution to the electromagnetic Finite Element Analysis of soft and hard magnetic materials in electrical machines"

In order to further increase the utilization of electrical machines, it is desirable to have precise knowledge of the later characteristics already in the design phase. This requires an electromagnetic simulation based on fundamental electromagnetic relationships, such as the Maxwell equations, on the one hand, and on models of special effects, such as material-dependent effects, on the other. In particular, the properties of the materials used have a strong influence on the achievable efficiency and power density of an electrical machine. The accuracy of finite element analysis as the predominant solution method for electromagnetic simulations in the time and space domain depends primarily on the selected discretization. Even if this can be significantly increased on modern computers, this does not bring any gain in accuracy if the applied material models do not sufficiently cover the effects of a material. For this reason, different material models exist, but they are also subject to restrictions and simplifications that limit the consideration of relevant effects in the simulation. Especially a simple consideration of anisotropy and hysteresis is a challenge. Therefore, a general methodology for the consideration of magnetic material in the finite element method is discussed and suitable state of the art material models are further developed. The focus is on models with empirical equations and physical parameters that can be extracted directly from measurements. A direct use of measurement data in simulation is also pursued. This approach offers a good compromise between applicability and reliable evaluation. The benefit is underlined by the consideration of simulation examples of relevant technical applications.

As a soft magnetic material electrical steel is considered and its anisotropy and hysteresis are discussed on the basis of one- and two-dimensional measurements. The deviation in the phase angle, which can only be determined by means of two-dimensional measurements between the magnetic flux density and the magnetic field strength, is particularly emphasized. A model of anisotropic magnetization without hysteresis is derived as well as a vectorial pragmatic algebraic model of hysteresis with improved anisotropy. The simulations of the T.E.A.M. problem 32 as well as those of the underlying measurement setups agree well with the measurements. The simulation example of a segmented permanent magnet synchronous machine under consideration of anisotropy shows the strong local influence of anisotropy on the magnetic field and flux density distribution.

A special focus of the work is on hard magnetic material, in particular high-energy rare earth permanent magnets, as they are the most promising choice for various electrical machines. In contrast to soft magnetic materials, effects such as anisotropy and hysteresis are much more pronounced. Detailed series of measurements are performed on the permanent magnet samples using a pulse magnetometer. The measurements are modelled by empirical equations with physical parameters. The strong dependence of the magnetization history is concerned into the modelling of the hysteresis. Therefore, the dependence of the magnetization and demagnetization characteristics on the magnetization field strength is extensively measured and modelled. The derived consistent model for the magnetization and demagnetization of permanent magnets is extended for a complete hysteresis covering inner loops during incomplete magnetization processes. The model allows to predict the magnetic field and the resulting magnetization of a permanent magnet during and after any transient magnetization process. The properties of the model are discussed using numerical simulations such as a single magnetizing coil, a post-assembly magnetization of a synchronous machine with collector or V-shaped magnet arrangement, and the in-situ magnetization of a synchronous machine with surface magnets. The numerical examples illustrate which questions can be investigated using the simulation model, e.g. the determination of the achievement of the required magnetization field under consideration of local field distortions by self-demagnetization and eddy currents. The model forms the basis for further detailed research, e.g. for the improved design of magnetic circuits of synchronous machines with variable magnetic flux, in-situ and post-assembly magnetization.