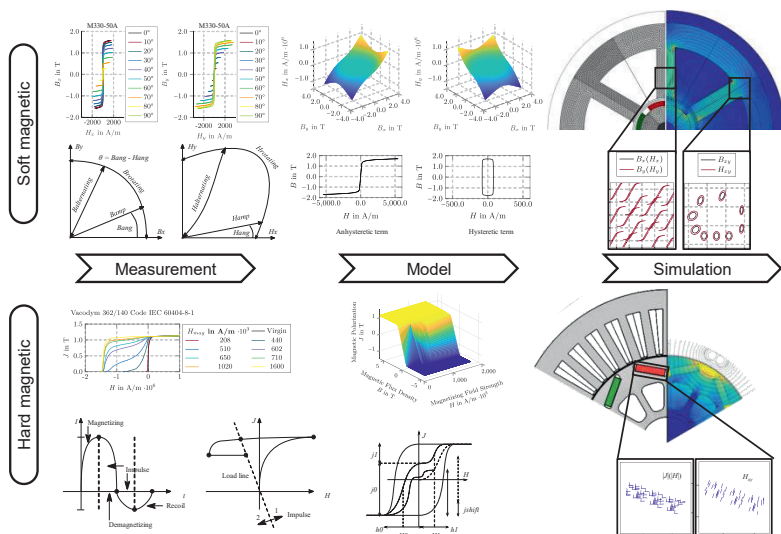


Gregor Johannes Bavendiek

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



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

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Gregor Johannes Bavendiek
M.Sc. RWTH-Aachen

aus Mechernich

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Prof. Barbara Ślusarek, Ph.D, D.Sc, Eng.

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juni 2020

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

Abstract and German "Kurzfassung"

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.

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 Entmagnetisierungscharakteristik 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.

Acknowledgment

First of all I would like to thank my doctoral supervisor Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer of the Institute of Electrical Machines (IEM) from RWTH Aachen University for his scientific and methodical support as well as the acquaintance with other scientists and participation at international conferences during the entire dissertation.

My special thanks go to my reviewer Professor Barbara Ślusarek Ph.D, D.Sc,Eng. from the Tele and Radio Research Institute in Warsaw for her scientific appraisal. The rare earth magnets used in this work were provided by Vacuumschmelze and the measurement were performed in the laboratories of Metis Measurement Systems in Leuven. My thanks to both companies for their kind support.

I thank all employees of the Institute for Electrical Machines for their constructive cooperation. The non-scientific staff in the administration, the workshop and the electronics laboratory helped with their excellent work to ensure a smoothly work flow. For the latex document template in which this thesis is written i thank my colleague Dr. Michael Schröder. In this regard, I would like to explicitly thank some colleagues for interesting joint research, which enriched this dissertation by student theses and scientific publications. On the topic of soft magnetic material a fruitful cooperation has taken place with Dr. Simon Steentjes, Mr. Benedikt Schauerte and Mrs. Nora Leuning. Especially underlined is the provision of soft magnetic measurement data and modelling approaches. The research on hard magnetic material has benefited from the enthusiastic work of some of my students and colleges. Students researches which helped within the soft magnetic material research are Mr. Adrian De Kock and Mr. Gašper Pavlič. For permanent magnet research Mrs. Jana Rötsch assisted in the measuring campaign, Mr. Jamshid Sabirov in the implementation of material models, as well as a special thank to Mr. Fabian Müller in realization of the finite element simulations. The latter, not only as a student but especially as a later colleague, stimulated an intensive scientific productivity. Other colleagues who provided valuable input for the modeling and its implementation are Dr. Mattia Fillipini, who spent half a year at the IEM as a guest PhD., and Mr. Stephan Böhmer as a prior group leader of numerical simulation at IEM.

Acknowledgement

Last but not least I would like to thank my parents and my brother, who always motivated and supported me, and my beloved wife, who enriched my work with her feedback and mental reinforcement.

Contents

Abbreviations	xiii
Symbols	xv
1 Motivation and methodology	1
1.1 Importance of hard magnetic material for electrical machines	1
1.2 Working hypotheses	2
2 State of the art	9
2.1 Ferromagnetic material properties and modeling approaches .	9
2.2 Derivation and adaptation of Finite Element Method	20
3 Vector magnetization and hysteresis of soft magnetic material	35
3.1 Characterization of electrical steel for electrical machines . . .	35
3.2 Successive modeling of anisotropy and hysteresis	44
3.3 Simulation of benchmark example, PMSM and RSST	51
4 History-dependent (de-)magnetization of hard magnetic material	69
4.1 Classification and composition of hard magnetic material . . .	69
4.2 Measurements of high-energy rare-earth permanent magnet .	72
4.3 Derivation of material models for relevant material effects . .	78
4.4 Simulation of application relevant numerical experiments . . .	108
5 Conclusions and outlook	143
Cited Literature	149
Own Publications	165
Supervised Final Theses	169
Curriculum vitae	171

Abbreviations

iMOOSE	innovative Modern Object Oriented Solver Environment
FE	Finite Elements
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
GO	Grain Oriented
IEM	Institute of Electrical Machines
ME	Maxwell Equation
NO	Non Grain Oriented
PAM	Pragmatic Algebraic Model of vector hysteresis
PM	Permanent Magnet
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
RD	Rolling Direction
RSST	Rotational Single Sheet Tester
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SST	Single Sheet Tester
T.E.A.M.	Testing Electromagnetic Analysis Method
TD	Transverse Direction

Symbols

Latin letters

A	m^{-2}	area
A	Vs/m	magnetic vector potential
B	T	magnetic flux density
B_r	T	magnetic remanence $B_r = J_r$
L	H	inductor
C	F	capacitor
D	As/m^2	electric flux density
E	V/m	electric field strength
E	J	energy
H_c	A/m	magnetic coercivity $H_{cJ} \neq H_{cB}$
H	A/m	magnetic field strength
I	A	electric current
J	T	magnetic polarization
J	A/m^2	electric current density
M	A/m	magnetization
P	As/m^2	electric polarization
Q	As	electric charge
R_e	Ω	electric resistor
R_m	$\text{A}/(\text{Vs})$	magnetic resistor
U	V	electric voltage
V	A/m	magnetic voltage
V	m^{-3}	area
t	s	time
$\vec{\alpha}_x$		form function
v	m/s	velocity
$\vec{\beta}_x$		weight function

Greek letters

Γ	boundary of region
----------	--------------------

Symbols

Ω		discretized region
Ψ_e	As	electric flux
Ψ_m or Φ	T	magnetic flux
Θ		weighting in time step algorithm
α	°	angle
χ_e		electric susceptibility
χ_m		magnetic susceptibility
ε	As/Vm	permittivity
$\mu = 1/\nu$	Vs/Am	permeability = 1/reluctivity
ω	rad/s	angular velocity
ρ	As/m ³	electric charge density
σ_F	As/m ²	electric surface charge density
σ	1/(Ωm)	conductivity
θ	°	angle between magnetic field and flux density

Indexes

X_0	in vacuum
X_{amp}	amplitude
X_{ang}	angle
X_d	derivation
X_{max}	maximal
X_{min}	minimal
X_n	normal
X_ρ	polar radial direction
X_r	relativ
X_{sat}	saturated
X_t	tangential
X_x	Cartesian x direction
X_y	Cartesian y direction
X_z	Cartesian z direction
X_φ	polar angular direction

Mathematical operators

Δx	difference
X_d	derivative
∂x	partial derivative

x'	differentiation over space
$\dot{x}$	differentiation over time
$\mathbf{e}$	unit vector
e	EULER number ($e = 2,718\,281\dots$)
j	imaginary unit ($\sqrt{-1}$)
$\mathbf{X}$	matrix
π	$\pi = 3,141\,592\dots$
$\mathbf{x}$	tensor
$\vec{x}$	vector