

Michael Reinlein

**Simulation der Eisenverluste und
des Magnetisierungsbedarfs unter
Berücksichtigung von Fertigungs-
einflüssen in Induktionsmaschinen**

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 13

**SHAKER
VERLAG**



Simulation der Eisenverluste und des Magnetisierungsbedarfs unter Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen in Induktionsmaschinen

M. Eng. Michael Reinlein

geboren in Kitzingen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Kaiserslautern, 2018

D 386

Datum der mündlichen Prüfung: 15.10.2018

1. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
Dekan des Fachbereichs	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 13

Michael Reinlein

**Simulation der Eisenverluste und des
Magnetisierungsbedarfs unter Berücksichtigung
von Fertigungseinflüssen in Induktionsmaschinen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6357-8

ISSN 1866-5357

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente elektrische Antriebs- und Maschinenkonzepte“ am Institut ELSYS an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Andreas Kremser, der diese Arbeit ermöglichte. Die hilfreiche Kritik während der gesamten Arbeit hat zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Gerhard Huth möchte ich für das entgegengebrachte Vertrauen gegenüber einem externen Promovierenden danken. Die unkomplizierte Zusammenarbeit mündete in einer klaren methodischen Vorgehensweise für unterschiedlichste Problemstellungen innerhalb dieser Arbeit.

Allen Kollegen der Arbeitsgruppe am Institut ELSYS danke ich für die kollegiale und angenehme Zusammenarbeit. Namentlich herausheben möchte ich meinen Kollegen Martin Regnet für die tolle Zusammenarbeit. Ein herzlicher Dank geht an Prof. Dr. Dietz für die zahlreichen Diskussionen und seine Hilfsbereitschaft. Unserer guten Seele am Institut Frau Lühring danke ich für die unermüdliche und manchmal nicht einfache Unterstützung bei organisatorischen Angelegenheiten.

Ich möchte mich bei allen Industriepartnern im Rahmen der Projekte „Berechnung der Zusatzverluste in Induktionsmaschinen“, „improves M“ und „impACT B“ bedanken. Die Zusammenarbeit und Unterstützung habe ich als nicht selbstverständlich angesehen.

Meiner Familie gilt mein herzlichster Dank. Besonders hervorheben möchte ich meine Eltern und meine Partnerin Simone, die mich während meiner gesamten Promotionszeit unterstützten.

Nürnberg, im März 2018

Michael Reinlein

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen.....	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen Magnetismus in Festkörpern	4
2.1 Magnetismus auf Atomebene.....	4
2.2 Weissche Bezirke und Blochwände.....	5
2.3 Elementarprozesse der Magnetisierung.....	5
2.4 Zusammenhänge der Feldgrößen des Magnetfelds	6
2.5 Drehende und wechselnde Magnetisierung.....	7
2.6 Weichmagnetische Werkstoffe.....	8
2.7 Ummagnetisierungsverluste	9
2.7.1 Hystereseverluste.....	9
2.7.2 Klassische Wirbelstromverluste	9
2.7.3 Anomale Wirbelstromverluste.....	10
3 Werkstoff Elektrolech.....	11
3.1 Klassifizierung.....	11
3.2 Korngrößen und chemische Zusammensetzung	13
3.3 Fertigungsschritte Elektrolechpaket	14
3.4 Standardverfahren zur messtechnischen Untersuchung	15
3.4.1 Messsystem zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften	15
3.4.2 Ringmagnetisierung.....	16
3.4.3 Einzelstreifentester	17
3.4.4 Epsteinrahmen	18
3.4.5 Prüfmittel-Fähigkeitsanalyse	19
4 Berechnung des magnetischen Kreises	24
4.1 Ersatzschaltbild zur Bestimmung der magnetischen Flüsse.....	24
4.2 Einfache Magnetkreisrechnung	25
4.2.1 Luftspalt.....	26
4.2.2 Statorjoch.....	27
4.2.3 Rotorjoch	28
4.2.4 Zähne	29

4.2.5 Magnetisierungsstrom	30
4.3 Erweiterte Magnetkreisrechnung	31
4.3.1 Knotenpotentialverfahren	31
4.3.2 Einfluss der Sättigung auf das Luftspaltfeld	34
4.3.3 Rotorjoch	38
5 Analytische Ansätze zur Bestimmung der Eisenverluste	43
5.1 Übersicht	43
5.2 Verlustmodelle	44
5.3 Bestimmung der Materialkennwerte	48
5.4 Fazit	53
6 Auswertung einer großen Anzahl von Prüffeldmessungen	55
6.1 Leerlaufmessung	55
6.2 Zusatzverluste	57
6.3 Erkenntnisse	59
7 Einfluss Pressverband Welle-Läuferblechpaket	63
7.1 Aktueller Forschungsstand	63
7.2 Messtechnische Untersuchung	64
7.2.1 Versuchsaufbau	64
7.2.2 Druck	65
7.2.3 Zug	69
7.2.4 Reversibilität im elastischen Spannungsbereich	73
7.2.5 Wellenstahl	74
7.3 Mechanische Betrachtungen	75
7.3.1 Analytik	75
7.3.2 Numerik	81
7.3.3 Vergleich von Analytik und Numerik	81
7.4 Elektromagnetische Betrachtungen	82
7.4.1 Analytik	82
7.4.2 Numerik	83
7.4.3 Auswirkungen auf Magnetisierungsstrom	84
7.5 Fazit	88

8	Einfluss Schnittkanten	89
8.1	Stand der Technik und Forschung	89
8.2	Messtechnische Untersuchung	93
8.2.1	Versuchsaufbau	93
8.2.2	Tafelblechscherer	94
8.2.3	Drahterodieren	99
8.2.4	Wasserstrahlschneiden.....	102
8.2.5	Laserstrahlschneiden	107
8.2.6	Stanzen mit scharfem Werkzeug	112
8.2.7	Stanzen unter Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes.....	116
8.2.8	Analyse der Werkstoffeigenschaften.....	119
8.2.9	Fazit	120
8.3	Elektromagnetische Betrachtungen	122
8.3.1	Analytik	123
8.3.2	Numerik	131
8.3.3	Vergleich von Analytik und Numerik	134
8.4	Verifikation der Ergebnisse anhand einer großen Anzahl von Prüffeldmessungen ..	136
9	Zusammenfassung und Ausblick	142
A	Anhang.....	145
A.1	Chemische Zusammensetzung und Kennwerte Wellenstähle	145
A.2	Lichtmikroskopische Aufnahmen Verschleißversuch	146
A.3	Daten der Beispielmaschinen.....	150
10	Literaturverzeichnis	151

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

A	Fläche
A	Abweichung
α	Temperaturkoeffizient elektrischer Widerstand
α_l	Längenausdehnungskoeffizient
α_R	Zuspitzungsfaktor als Folge der Jochsättigung
α_p	Gesamtabplattungsfaktor
α_Z	Abplattungsfaktor als Folge der Zahnsättigung (klassisch nach W. Nürnberg)
c	Steifigkeitskonstante
B	magnetische Flussdichte
b_{aRr}	Äußere Jochhöhe
b_{iRr}	Innere Jochhöhe
b_{sRr}	Stegbreite zwischen axialen Kühlschlitzen im Rotor
b_{rs}	Nutslitzbreite Rotor
b_{ss}	Nutslitzbreite Stator
C_{SE}	Steinmetz-Koeffizient
D	Durchmesser
δ	Luftspalt
E	elektrisches Feld
E_M	Elastizitätsmodul
η	Wirkungsgrad
η_{Zus}	Konstante für zusätzliche anomale Wirbelströme
F	Kraft
f	Frequenz
G	Leitwert
G_{Korn}	Korngrößenkennzahl
G_R	Glättung

g	Rang
H	magnetische Feldstärke
I	Strom
J	Polarisation
J_{Strom}	Stromdichte
K	Nachgiebigkeitskonstante
k	Zuschlagsfaktor, Verhältnis
k_c	Carterscher Faktor
k_H	Zuschlagsfaktor Magnetisierungsbedarf
$k_{p_{\text{Fe}}}$	Zuschlagsfaktor Eisenverluste
k_R	Sättigungsgrad Joch
k_{RE}	Rückenentlastungsfaktor
k_{Rsf}	Wechselkorrekturfaktor für Nut und Zahn
$k_{\text{Rück}}$	Rückwirkungsfaktor
k_Z	Sättigungsgrad Zähne
κ	elektrische Leitfähigkeit
l	Länge
l_{Fe}	magnetisch wirksame Eisenlänge
l_i	magnetisch wirksame Länge
λ	Magnetostriktion
M	Drehmoment
m	Masse
m_a	magnetisch aktive Masse
μ_r	relative Permeabilität
μ_{Reib}	Haftreibwert
N	Anzahl
N	Nutzahl
n	Drehzahl
ν	Polpaarzahlen der Wicklungsoberfelder

v_N	Querkontraktionszahl Nabe
v_W	Querkontraktionszahl Welle
P	Leistung
p	mechanische Spannung
p	Polpaarzahl
p	spezifische Leistung
φ	Potential
Φ	magnetischer Fluss
Q	Durchmesser Verhältnis
R	Widerstand
R_z	Rautiefe
r	Radius
ρ	Dichte
S_f	geforderte Sicherheit
s	Schlupf
σ	Materialkennwert Eisenverluste
σ	mechanische Spannung
T	Temperatur
T_{Ani}	Anisotropie
T_N	Toleranzmaß Nabe
T_W	Toleranzmaß Welle
τ	Teilung
θ	Durchflutung
U	Spannung
V	magnetischer Spannungsabfall
X_{hs}	Hauptreaktanz
$X_{\sigma\text{NS}}$	Nutstreuung
$X_{\sigma\text{S}}$	Stirnkopfstreuung
$X_{\sigma\text{dvs}}$	doppelt verkettete Streuung

ξ	Wicklungsfaktor
$Z_{\max}$	maximaler Blechversatz
z_s	Leiter je Strang

Indizes

a	außen
be	bearbeitet
F	Fuge
Fe	Eisen
G	Gesamt
H	Hysteresse
i	innen
ind	induziert
irr	irreversibel
kor	Korrektur
KS	Kühlschlitze
m	magnetisch wirksam
m	Masse
max	maximal
mec	mechanisch
min	Minimum
μ	Permeabilität
N	Nenn-
nor	Normal
OV	Oberflächenverluste
P	Pulsation
prim	primär
R	Rücken, Joch
r	Rotor
rad	radial

reib	Reibung
ru	Rutsch
RZ	Randzone
S	Sehnung
s	Stator
sek	sekundär
sf	spannungsfrei
Str	Streifen
tan	tangential
W	Welle
W	Wirbelstrom
Z	Zahn
zu	zugeführt
Zus	Zusatz

Allgemeine Konstanten

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	magnetische Feldkonstante
$\pi = 3,1415 \dots$	Kreiszahl

Symbolische Konstanten

$\frac{dx}{dy}$	Ableitung der Größe x nach y
$\hat{x}$	Amplitude
dx	differentielle Größe
Δx	Differenz
$\bar{x}$	Mittelwert
$\underline{x}$	komplexe Größe

Abkürzungen

Al	Aluminium
CDW	C.D. Wälzholz

Co	Kobalt
CPM	Classical Preisach Model
Cu	Kupfer
DE	Drahterodieren
DPM	Dynamic Preisach Model
ER	Epsteinrahmen
Fe	Eisen
GSE	Generalized Steinmetz
HD	Herstellerdaten
iGSE	Improved Generalized Steinmetz
IM	Induktionsmaschine
LSS	Laserstrahlschneiden
MSE	Modified Steinmetz
Ni	Nickel
NSE	Natural Steinmetz
OPM	Oberflächen-Preisach-Model
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
rGSE	Redefined Generalized Steinmetz
SE	Steinmetz
Si	Silizium
SST	Einzelstreifentester
SW	Stanzwerkzeug
TBS	Tafelblechschere
TK	thyssenkrupp
TRD	to rolling direction
V	Vanadium
V	Verschleiß
WSS	Wasserstrahlschneiden