Lehrstuhl für Mechatronik und
Elektrische Antriebssysteme
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth

Stefan Mathis

Permanentmagneterregte Line-Start-Antriebe in Ferrittechnik

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik
Band 15

SHAKER VERLAG

Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebstechnik

Permanentmagneterregte Line-Start-Antriebe in Ferrittechnik

Dipl.-Ing. Stefan Mathis
geboren in Saarbrücken-Dudweiler

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

D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	10.05.2019
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram Wellßow
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 15

Stefan Mathis

Permanentmagneterregte Line-Start-Antriebe in Ferrittechnik

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2019

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6772-9
ISSN 1866-5357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis **VII**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation . . . 1
1.2 Aufgabenstellung . . . 2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . 2

2 Konzipierung eines PMLS-Motors in Ferrittechnik **5**
2.1 Anwendungsbereiche . . . 5
2.2 Bewertungskriterien . . . 7
2.3 Magnete auf Ferritbasis . . . 8
2.3.1 Herstellung und physikalische Eigenschaften . . . 8
2.3.2 Magnetische Eigenschaften . . . 9
2.3.3 Entmagnetisierungsverhalten . . . 12
2.3.4 Einfluss der Ferritmagnete auf den Auslegungsprozess . . . 14
2.4 Statoraufbau . . . 15
2.5 Rotoraufbau . . . 16
2.5.1 Luftspaltmagnete . . . 16
2.5.2 Vergrabene Magnete . . . 17
2.6 Konzeptauswahl . . . 22

3 Elektromagnetische Modellierung **25**
3.1 Prämissen der Modellierung . . . 25
3.2 Stationäres Betriebsverhalten . . . 26
3.2.1 Elektrische Größen im statorfesten a-b-c-Koordinatensystem . . . 26
3.2.2 Elektrische Größen im rotorfesten d-q-0-Koordinatensystem . . . 27
3.2.3 Elektrische Größen im statorfesten α-β-0-Koordinatensystem . . . 30
3.2.4 Effektivwertgrößen . . . 32
3.2.5 Ersatzschaltbild des PMLS-Motors im synchronen Betrieb . . . 34
3.2.6 Drehmomentberechnung . . . 35
3.2.7 Wirkungsgradberechnung . . . 37
3.2.8 Leistungsfaktorberechnung . . . 37

3.3 Transientes Betriebsverhalten . . . 38
3.3.1 Spannungsdifferentialgleichungen . . . 38
3.3.2 Bewegungsdifferentialgleichungen . . . 39
3.4 Bestimmung der Differentialgleichungskoeffizienten . . . 41
3.4.1 OHM'sche Widerstände . . . 41
3.4.2 Haupt- und Gegeninduktivitäten . . . 43
3.4.3 Streuinduktivitäten . . . 44
3.4.4 PM-Flussverkettung . . . 48
3.4.5 Massenträgheitsmomente . . . 48

4 Thermische Modellierung 49
4.1 Prämissen der Modellierung . . . 49
4.2 Wärmewiderstandsnetzwerke . . . 50
4.2.1 Netzwerktopologie . . . 50
4.2.2 Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübergangszahl . . . 52
4.3 Ermittlung der thermischen Widerstände . . . 53
4.3.1 Nutübergangswiderstand . . . 53
4.3.2 Zahnwiderstand . . . 53
4.3.3 Jochwiderstand . . . 54
4.3.4 Jochübergangswiderstand . . . 54
4.3.5 Gehäusewiderstand . . . 54
4.3.6 Gehäuseübergangswiderstand . . . 54

5 Analytische Simulation des stationären Betriebsverhaltens 55
5.1 Prämissen der Modellierung . . . 57
5.2 Magnetkreisberechnung . . . 57
5.2.1 Transformation der Statorgeometrie . . . 58
5.2.2 Magnetische Ersatzwiderstände . . . 60
5.2.3 Ferromagnetisches Materialverhalten . . . 63
5.2.4 Magnetische Spannungsquellen . . . 65
5.2.5 Gleichungssystem eines magnetischen Ersatznetzwerkes . . . 67
5.2.6 Lösungsverfahren für nichtlineare Gleichungssysteme . . . 70
5.2.7 Bestimmung der Flussverkettungen . . . 74
5.2.8 Hauptinduktivitäten und PM-Flussverkettung . . . 76
5.2.9 Abschätzung der Ummagnetisierungsverluste . . . 78
5.3 Arbeitspunktberechnung . . . 80
5.3.1 Der Downhill-Simplex-Algorithmus . . . 80
5.3.2 Berechnung stationärer Betriebspunkte . . . 84

6 Analytische Simulation des transienten Betriebsverhaltens 87
6.1 Prämissen der Modellierung . . . 88
6.2 Lösungsverfahren für Anfangswertprobleme . . . 89
6.3 Lastcharakteristik . . . 91
6.4 Intrittfallgrenze . . . 92
6.4.1 Einflussgrößen . . . 93
6.4.2 Bestimmung der Intrittfallgrenze . . . 94

7 Numerische Simulation mittels FEM 97
7.1 Grundlagen der FEM . . . 97
7.1.1 MAXWELL-Gleichungen . . . 97
7.1.2 Materialgleichungen . . . 98
7.1.3 Potentialformulierungen . . . 98
7.1.4 Anwendung der FEM am Beispiel der Ampere-Definition . . . 100
7.2 Simulation der PMLS-Motoren mittels FEM . . . 102
7.2.1 Modellbildung . . . 102
7.2.2 Stationäres Betriebsverhalten . . . 106
7.2.3 Transientes Betriebsverhalten . . . 108

8 Funktionsmusterauslegung 111
8.1 Randbedingungen des Auslegungsprozesses . . . 111
8.1.1 Geometrie . . . 112
8.1.2 Wicklungsaufbau . . . 113
8.1.3 Werkstoffe . . . 113
8.1.4 Betriebsparameter . . . 114
8.2 Auslegungsprozess . . . 115
8.3 Geometrie der Funktionsmuster . . . 116
8.3.1 Blechschnittgeometrie . . . 117
8.3.2 Magnetgeometrie . . . 119
8.3.3 Kurzschlusskäfig . . . 119
8.4 Wicklungsauslegung . . . 120
8.5 Schutz der Magnete vor Gegenfeldern . . . 122
8.5.1 Einfluss der Streusteggeometrie . . . 122
8.5.2 Das Entlastungspfadkonzept . . . 125
8.5.3 Dimensionierung der Entlastungspfade . . . 127
8.5.4 Vergleich von Streustegverbreiterungs- und Entlastungspfadkonzept . . . 129

8.6 Analytische Magnetkreismodelle der Funktionsmuster 131
8.6.1 Aufbau der magnetischen Netzwerke 131
8.6.2 Modellverifikation mittels FEM 134

9 Versuchsaufbau 139
9.1 Prototypenbau 139
9.2 Prüfstandsaufbau und Messkonzepte 142
9.2.1 Messung des stationären Betriebsverhaltens 142
9.2.2 Messung des transienten Betriebsverhaltens 146

10 Messtechnische Erprobung im direkten Vergleich zur Simulation 149
10.1 Untersuchungen bei fremdangetriebenem Prüfling 149
10.1.1 Induzierte Spannung 149
10.1.2 Reibungsverluste 152
10.1.3 Bremssattel 153
10.2 Stationäres Betriebsverhalten 154
10.2.1 Netzbetrieb 154
10.2.2 Umrichterbetrieb 157
10.3 Transientes Betriebsverhalten 162
10.3.1 Netzbetrieb 162
10.3.2 Umrichterbetrieb 163
10.4 Kurzunterbrechungen 167
10.4.1 Begriffsdefinition 167
10.4.2 Messtechnische Untersuchung 167
10.4.3 Diskussion der Ergebnisse 170

11 Konzeptvergleich 171
11.1 Stationäres Betriebsverhalten 171
11.1.1 Drehmomentbildung 171
11.1.2 Wirkungsgrad und Leistungsfaktor 172
11.2 Transientes Betriebsverhalten 174
11.2.1 Vorbetrachtungen 174
11.2.2 Intrittfallgrenze 176
11.2.3 Spannungsgrenze 176
11.3 Bewertung der Funktionsmuster 177

12 Zusammenfassung 179

A Anhang **181**
A.1 Streuleitwerte im Nutgebiet . . . 181
A.1.1 Streuleitwert der Statornut . . . 181
A.1.2 Streuleitwert der Rotornut . . . 182
A.2 Analytische Modellierung des Lüfterrads . . . 184
A.2.1 Die EULER'sche Turbinengleichung . . . 184
A.2.2 Bestimmung der Minderleistungszahl . . . 185
A.2.3 Geometrische Verhältnisse bei oberflächengekühlten Maschinen . . . 186
A.2.4 Druckbilanz . . . 188
A.2.5 Geförderter Volumenstrom . . . 192
A.2.6 Das Bisektionsverfahren . . . 193
A.3 Wärmeübergangswiderstand des Gehäuses . . . 195
A.3.1 Erzwungene Konvektion längs der Rippenkanäle . . . 195
A.3.2 Wärmestrahlung . . . 198
A.3.3 Natürliche Konvektion in den Störzonen . . . 199
A.3.4 Resultierender Wärmeübergangswiderstand . . . 199
A.3.5 Messtechnische Überprüfung . . . 201
A.4 Magnetische Widerstände der Funktionsmuster . . . 203
A.4.1 Statorwiderstände . . . 203
A.4.2 Rotorwiderstände #-Design . . . 204
A.4.3 Rotorwiderstände V-Design . . . 205
A.5 Magnetische Spannungsquellen der Statorwicklung . . . 207
A.5.1 Herleitung der Felderregerkurve . . . 207
A.5.2 Definition des Bestromungswinkels . . . 213
A.6 Schwungmassenanlage . . . 215
A.6.1 Motivation . . . 215
A.6.2 Polygonprofil . . . 215
A.6.3 Aufbau der Anlage . . . 216
A.6.4 Blockade des Antriebsstrangs . . . 219
A.7 Technische Zeichnungen . . . 220
A.8 Remanenzverlust aufgrund von Arbeitspunktverschiebungen . . . 226
A.8.1 Theoretische Betrachtung . . . 226
A.8.2 Messtechnische Untersuchung . . . 228
A.8.3 Diskussion der Ergebnisse . . . 230

B Literatur **233**

C Lebenslauf **245**

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
A	$\mathrm{A/m}$	Strombelag
$\vec{A}$	$\mathrm{V\,s/m}$	Magnetisches Vektorpotential
a	–	Anzahl der parallelen Zweige
a	–	Kosinuskoeffizient einer FOURIER-Reihe
B	T	Magnetische Flussdichte
B_r	T	Remanenzinduktion
b	m	Breite
b	–	Sinuskoeffizient einer FOURIER-Reihe
c	$\mathrm{N\,m/rad}$	Drehfederkonstante
c	$\mathrm{m/s}$	Strömungsgeschwindigkeit
D	m	Durchmesser
D	$\mathrm{A\,s/m^2}$	Elektrische Flussdichte
d	m	Dicke
E	$\mathrm{V/m}$	Elektrische Feldstärke
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
G	–	Allgemeine Größe (Effektivwert)
g	–	Allgemeine Größe (Momentanwert)
g	–	Ganze Zahl
H	$\mathrm{A/m}$	Magnetische Feldstärke

H_{cB}	A/m	Remanenzbezogene Koerzitivfeldstärke
H_{cJ}	A/m	Polarisationsbezogene (intrinsische) Koerzitivfeldstärke
h	m	Höhe
I	A	Strom (Effektivwert)
i	A	Strom (Momentanwert)
i	–	Zählvariable
J	T	Magnetische Polarisation
J	$\mathrm{kg\,m^2}$	Massenträgheitsmoment
$\mathbf{J}$	A/(V s)	JACOBI-Matrix
j	–	Zählvariable
k	–	Dimensionslose Konstante
k_c	–	CARTER-Faktor
L	H	Induktivität (allgemein)
l	m	Länge
M	N m	Drehmoment
M	H	Gegeninduktivität
M	–	Menge
m	–	Strangzahl
N	–	Nutenzahl
n	$\mathrm{s^{-1}}$ oder $\mathrm{min^{-1}}$	Mechanische Drehzahl
n	–	Zählvariable
o	–	Ordnung
P	W	Leistung
p	$\mathrm{N/m^2}$	Druck
p	–	Polpaarzahl
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
q	C	Elektrische Ladung
q	–	Lochzahl
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R_m	A/(V s)	Magnetischer Widerstand

R_{th}	K/W	Thermischer Widerstand
$\mathbf{R}_{\mathrm{m}}$	A/(V s)	Widerstandsmatrix
Re	–	REYNOLDS-Zahl
$\vec{r}$	m	Rotationsachse
s	m	Weg
T	K oder °C	Temperatur
$\vec{T}$	A/m	Elektrisches Vektorpotential
$\mathbf{T}$	–	Transformationsmatrix
t	s	Zeit
U	V	Spannung (Effektivwert)
u	V	Spannung (Momentanwert)
u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
v	m/s	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
w	–	Strangwindungszahl
x	–	Funktionsargument
y	–	Funktionswert
z	–	Anzahl

Griechische Formelzeichen

Zeichen	**Einheit**	**Beschreibung**
α/β	1/K	Temperaturkoeffizient
α	$\mathrm{W/(m^2\,K)}$	Wärmeübergangszahl
$\alpha/\beta/\gamma$	rad	Winkel
Γ	N m/(s rad)	Drehdämpfung
Δ	–	Differenz
δ	m	Luftspalt, kleiner Abstand
δ''	m	Fiktiver Luftspalt
ε	–	Kleine Differenz
ε	F/m	Permittivität

ε_r	–	Spezifische Permittivität
η	–	Wirkungsgrad
Θ	A	Magnetische Durchflutung
ϑ	K	Temperaturdifferenz
κ	$1/(\Omega\,\mathrm{m})$	Elektrische Leitfähigkeit
λ	–	Leistungsfaktor
λ	$\mathrm{W}/(\mathrm{m\,K})$	Wärmeleitfähigkeit
μ	N/A^2	Permeabilität
μ_r	–	Spezifische Permeabilität
μ_{LR}	–	Minderleistungszahl des Lüfterrads
ν	–	Drehfeldpolpaarzahl
ν	m^2/s	Kinematische Viskosität
Ξ	–	Vorzeichenindikator
ξ	–	Dimensionsloser Beiwert
ρ	$\mathrm{A\,s}/\mathrm{m}^3$	Ladungsdichte
ρ	kg/m^3	Massendichte
τ	m	Teilung
Φ	Wb	Magnetischer Fluss
φ	rad	Elektrischer Winkel
φ	V	Elektrisches Skalarpotential
Ψ_{PM}	Wb	Flussverkettung der Permanentmagnete
ψ	Wb	Flussverkettung (allgemein)
σ	–	Ummagnetisierungsverlustkoeffizient
σ	–	Streuleitwert
Ω	A	Magnetisches Skalarpotential
ω	rad	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

Zeichen	Beschreibung
0	Ausgangs- oder Anfangswert
0	Nullkomponente
1	Lüftereintrittsseite
1	Stator
2	Lüfteraustrittsseite
2	Rotor
∞	Unendliche Schaufelzahl
AM	Analytisches Modell
AP	Arbeitspunkt
APB	Arbeitspunktberechnung
a/b/c	Elektrische Phase
a	Anfang
a	Außen
ax	Axial
Cu	Kupfer
d	d-Achsenkomponente
E	Einzel
E1	Ebene E1
E2	Ebene E2
e	Ende
el	Elektrisch
ep	Entlastungspfad
Fe	Elektroblech
Fe	Ummagnetisierung (eines Ferro- oder Ferrimagnetikums)
FEM	Finite-Elemente-Methode
G	Gehäuse
geo	Geometrisch
ges	Gesamt
H	Haube

h	Haupt
hyst	Hysterese
i	Indexvariable
i	Induziert
i	Innen, Inneres
iso	Isoliert
J	Joch
J	Trägheitsmoment
j	Indexvariable
KU	Kurzunterbrechung
kr	Kreisring
L	Last, Lastmaschine
LR	Lüfterrad
l	Laminar
l	Leiter
M	Masche
MKB	Magnetkreisberechnung
m	Mitte, Mittel
N	Nut
NR	NEWTON-RAPHSON
n	Indexvariable
nosyn	Nicht synchron
nz	Nut-Zahnkopf
o	Offen
ow	Oberwelle
PM	Permanentmagnet
p	Grundwelle
p	Polrad, Polpaar
puls	Pulsung
q	q-Achsenkomponente
R	Kühlrippe

r	Bemessungswert
reib	Lager- und Lüfterverluste
ri	Kurzschlussring
s	Schlitz
seg	Segment
st	Stab
str	Strahlung
str	Stranggröße
stz	Störzone
syn	Synchron
t	Turbulent
th	Thermisch
theo	Theoretisch
U	Umgebung
u	Umfangskomponente
v	Verlust
verk	Verkettet
vol	Volumetrisch
W	Motorwelle
w	Wicklung
wb	Wirbelstrom
wk	Wickelkopf
x	Indexvariable
Z	Zahn
ZR	Zeitrelais
z	Zonung
zk	Zahnkopf
δ	Luftspalt
Θ	Magnetische Durchflutung
ν	Drehfeldpolpaarzahl
σ	Streuung

Konstanten

Zeichen	Wert	Beschreibung
e	$2,72\ldots$	EULER'sche Zahl
π	$3,14\ldots$	Kreiszahl
ε_0	$8,85\ldots\,\mathrm{A\,s\,m/V}$	Elektrische Feldkonstante
μ_0	$4\cdot\pi\cdot10^{-7}\mathrm{N/A^2}$	Magnetische Feldkonstante

Mathematische Operatoren

Zeichen	Beschreibung
ln	Logarithmus
sgn	Signum
max	Maximum
sin	Sinus
cos	Kosinus
tan	Tangens
arctan	Arkustangens
$\Im$	Imaginärteil
$\Re$	Realteil
$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator: $\left(\frac{\partial}{\partial x_1},\ldots,\frac{\partial}{\partial x_n}\right)$
$f'(x)$	Ableitung von $f(x)$ nach x
$\overline{g}$	Mittelwert von g
$\underline{g}$	Komplexe Größe
$\vec{g}$	Vektorgröße
g'	Bezogene Größe
$\hat{g}$	Amplitude, Maximalwert
$\dot{g}$	Ableitung von g nach der Zeit t
j	Imaginäre Einheit

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AH	Achshöhe
Al	Aluminium
AM	Analytisches Modell
AP	Arbeitspunkt
ASM	Asynchronmotor
CAD	„Computer Aided Design“, Rechnergestütztes Design
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung
Fa.	Firma
FEM	Finite-Elemente-Methode
GLW	Ganzlochwicklung
GSM	Gleichstrommaschine
IE	„International Efficiency“, Internationale Effizienzklasse
IEC	„International Electrotechnical Commission“, Internationale Elektrotechnische Kommission
KU	Kurzunterbrechung
LF	Lastfall
LS	„Line-Start“, Netzanlauffähigkeit
MKB	Magnetkreisberechnung
PM	Permanentmagnet
SE	Seltene Erden