



Universität Stuttgart

iew
Institut für
Elektrische Energiewandlung

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Marina Keller

Entwurf einer permanentmagnetisch erregten
Transversalflussmaschine aus Pulververbundwerkstoff
für Robotikanwendungen



Band 8

**SHAKER
VERLAG**

**Entwurf einer
permanentmagnetisch erregten Transversalflussmaschine
aus Pulververbundwerkstoff für Robotikanwendungen**

**Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor–Ingenieurs (Dr.–Ing.)
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von
Marina Keller
aus Künzelsau**

**Hauptberichterin: Prof. Dr.–Ing. Nejila Parspour
Mitberichter: Prof. Dr.–Ing. Dieter Gerling**

Tag der mündlichen Prüfung: 21.03.2019

**Institut für Elektrische Energiewandlung
der Universität Stuttgart**

2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Akademische Mitarbeiterin am Institut für Elektrische Energiewandlung der Universität Stuttgart. Besonderer Dank gebührt meiner Hauptberichterin Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, die mich bei dieser Arbeit und während meiner gesamten Tätigkeit am Institut unterstützt und gefördert hat.

Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die Übernahme des Mitberichts und das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Ein großer Dank geht an die Firma Pilz, die dieses Projekt ins Leben gerufen und finanziert hat. Die gute Zusammenarbeit mit meinen Ansprechpartnern Herrn Dr.-Ing. Christian Kramer und Herrn Roland Rupp war für den Erfolg dieser Arbeit entscheidend.

Für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung sowie für das äußerst angenehme Arbeitsklima danke ich meinen Kollegen und Kolleginnen am Institut, besonders Dr.-Ing. Manuel Gärtner, Dr.-Ing. Peter Seibold, Frieder Schuller, Marco Zimmer, Jörg Heinrich, Marcel Maier und Samuel Müller.

Bei der Entwicklung des Prototyps der Transversalflussmaschine waren die Mitarbeiter der Institutswerkstatt wesentlicher Bestandteil. Mein Dank gilt insbesondere dem Werkstattleiter Hermann Kattner.

Ebenfalls sehr unterstützt haben mich Herr Maximilian Sigl von der Firma PMG und Herr Michael Beckers von der Firma ate bei der Abklärung fertigungstechnischer Fragestellungen.

Den von mir in wissenschaftlichen Arbeiten betreuten Studierenden und den wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für ihr Engagement. Ihre wertvollen Beiträge haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders möchte ich hier Thomas Feiler, Tobias Schlittenbauer, Sascha Kälber und Zhilin Cai nennen.

Ein besonderer Dank gilt meinem Mann Steffen Keller und meiner Familie, die immer an mich geglaubt und mich stets bestärkt und motiviert haben auf meinem Weg.

Stuttgart, im Mai 2018

Marina Keller

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XVII
Abstract	XIX
1. Einleitung	1
2. Aufbau von und Anforderungen an Antriebsstränge für die Robotik	3
2.1. Stand der Technik im Bereich Leichtbau-Knickarmroboter	3
2.1.1. Bestehende Roboter	3
2.1.2. Bestehende Achsen	6
2.1.3. Motoren für die Robotik	8
2.2. Ableitung der Anforderungen an die Roboterachsen	11
2.2.1. Statisches Drehmoment	12
2.2.2. Dynamisches Drehmoment	13
2.2.3. Anforderungsdefinition	14
2.3. Designkonzept des Antriebsstrangs einer Roboter-Achse	18
3. Topologie und Entwurf einer TFPM	21
3.1. Stand der Technik im Bereich TFPM aus Pulververbundwerkstoffen	23
3.2. Grobauslegung der TFPM	29
3.3. Auslegung und Optimierung	36
3.3.1. Das parametrisierte Modell	36
3.3.2. Fertigungstechnische Rahmenbedingungen und Vorgaben	36
3.3.3. Modellierung in FEM	38
3.3.4. Optimierung	40
4. Analytische Berechnung	49
4.1. Grundlagen	51
4.1.1. Das magnetische Vektorpotential	51
4.1.2. Ebenes Feldproblem in Zylinderkoordinaten	52
4.1.3. Konforme Abbildung	53
4.2. Modellierung der TFPM	56
4.2.1. Modellierung des Strombelags	60
4.2.2. Modellierung der Remanenzfunktion	63

4.2.3. Berücksichtigung der Nutzung	64
4.2.4. Berechnung des Drehmoments	70
4.3. Auswertung der Ergebnisse	71
5. Aufbau und Inbetriebnahme des Prototypen	75
5.1. Mechanische Konstruktion	75
5.1.1. Gesamtkonstruktion	75
5.1.2. Statorbau und Wicklung	77
5.1.3. Rotorkonstruktion	79
5.2. Gesamtsystem	81
6. Messungen am Prüfstand	87
6.1. Messung der Modellparameter	87
6.1.1. Induzierte Spannung	87
6.1.2. Statorwiderstand	89
6.1.3. Induktivitäten	89
6.2. Drehmoment	94
6.3. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor	100
6.4. Fazit	104
7. Zusammenfassung und Ausblick	107
A. Marktanalyse Elektromotoren	111
B. Berechnung der Drehmomente der Roboter	113
C. Netz, Parameter und Zielgrößen des FEM-Modells	121
C.1. Netz	121
C.2. Parameter der TFPM	121
C.3. Berechnung der Zielgrößen	124
D. Technische Zeichnungen	125
D.1. Technische Zeichnung des Prüfstandsaufbaus	126
D.2. Technische Zeichnung der Rotorkonstruktion	127
D.3. Technische Zeichnung der Statorhalbschale	128
E. Separation der Variablen	129
E.1. Lösung der Laplace-Gleichung mittels Separation der Variablen	129
E.2. Lösung der Poisson-Gleichung mittels Separation der Variablen	130
F. Fourierreihen	133
G. Regelsystem	135
Literaturverzeichnis	137

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
3~PWR	Dreiphasiger Pulswechselrichter
AL	Außenläufer
ASM	Asynchronmaschine
BEMF	Gegen-Elektromotorische Kraft (engl. Back Electromotive Force)
BLDC	bürstenloser Gleichstrommotor (Brushless Direct Current Motor)
CAN	Controller Area Network
DGL	Differentialgleichung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EC-Motor	elektronisch kommutierter Motor (Electronically Commutated Motor)
EG	Ellbogengelenk
ESB	Ersatzschaltbild
FEM	Finite-Elemente-Methode (Finite Element Method)
FOR	Feldorientierte Regelung
GMR	Riesenmagnetowiderstand (Giant-Magnetoiresistance)
GSM	Gleichstrommaschine
GUI	Benutzeroberfläche (Graphical User Interface)
HDG	Harmonic Drive® Getriebe
HG	Handgelenk
HS	Hybrid-Schrittmotor
IEW	Institut für Elektrische Energiewandlung

Bezeichnung	Beschreibung
IL	Innenläufer
LE	Leistungselektronik
LMG	Leistungsmessgerät
LUT	Kennfeld (Lookup-Table)
MATLAB	MATrix LABoratory
MEC	Magnetisch Äquivalenter Kreis (Magnetic Equivalent Circuit)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
MTPA	Maximales Moment pro Ampere (Maximum Torque per Ampere)
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NGR	Netzgleichrichter
OA	Oberarm
PC	Personal Computer mit einem Intel Core i5-6500 CPU @ 3,2 GHz und 16 GB RAM
PLL	Phasenregelschleife (Phase-Locked Loop)
PM	Permanentmagnet
PMSM	permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine
PWM	Pulsweitenmodulation (Pulse Width Modulation)
RFM	Radialflussmaschine
SC	Schwarz-Christoffel Transformation
Server	2 Sockets mit 8 Intel Xeon E5-2643 CPU @ 3,3 GHz und 384 GB RAM
SG	Schultergelenk
SISO	Single Input Single Output
SMC	weichmagnetischer Pulververbundwerkstoff (Soft Magnetic Composite)
SRM	geschaltete Reluktanzmaschine (Switched Reluctance Machine)
SynRM	synchrone Reluktanzmaschine (Synchronous Reluctance Machine)
TCP	Werkstückmittelpunkt (engl. Tool Center Point)
TFM	Transversalflussmaschine

Bezeichnung	Beschreibung
TFFPM	permanentmagnetisch erregte Transversalflussmaschine
THD	Gesamte harmonische Verzerrung (Total Harmonic Distortion)
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UA	Unterarm

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_I	A/m	Strombelag
A_z	V s/m	z-Komponente des magnetischen Vektorpotentials
a_0	–	Fourier-Koeffizient für Gleichanteil
a_n	–	Fourier-Koeffizient des geraden Anteils der n -ten Harmonischen
a_s	m	Länge des Luftspalts zwischen den Statorhälften
a_{Str}	m	Abstand zwischen den einzelnen Strängen
\vec{a}	m/s ²	Beschleunigungsvektor
A_{WF}	m ²	Querschnitt des Wickelfensters
a_{WS}	m	Abstand des Wickelfensters zum Stator
a_{ZsR}	m	Abstand der Statorzahnspitze zum Statorring
\vec{A}	V s/m	magnetisches Vektorpotential
B	T	Betrag der magnetischen Flussdichte
b_N	m	Nutbreite gemessen an der Statorluftspaltoberfläche
b_n	–	Fourier-Koeffizient des ungeraden Anteils der n -ten Harmonischen
b_{PM}	rad	Breite des Permanentmagnets
$b_{PM,\%}$	–	Breite des Permanentmagnets bezogen auf τ_p , Polbedeckung
B_R	T	Remanenzinduktion
B_r	T	Radialkomponente der magnetischen Flussdichte
$B_{R,r}$	T	Radialkomponente der Remanenzinduktion
$B_{R,t}$	T	Tangentialkomponente der Remanenzinduktion
B_t	T	Tangentialkomponente der magnetischen Flussdichte
\vec{B}	T	magnetische Flussdichte
b_Z	rad	Breite des Statorzahns
$b_{Z,\%}$	–	Breite des Statorzahns bezogen auf τ_p
b_{Zs}	m	Breite der Statorzahnspitze
C_{Esson}	V A min/m ³	Esson'sche Zahl

Symbol	Einheit	Beschreibung
d_a	m	Außendurchmesser des Aktiveils
d_δ	m	Luftspaltdurchmesser
$d_{\delta, \%}$	–	Luftspaltdurchmesser bezogen auf d_a
d_i	m	Innendurchmesser des Stators
\vec{D}	A s/m ²	elektrische Flussdichte
\vec{F}	N	Kraftvektor
H	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke
$H_{c,B}$	A/m	Koerzitivfeldstärke der Flussdichte
h_{Ioch}	m	Höhe des Rückschlusses im Stator
h_{PM}	m	Höhe des Permanentmagneten
$H_{PM,max}$	A/m	maximal auftretender Volumenmittelwert der magnetischen Feldstärke im Permanentmagnet
h_{RP}	m	Höhe des Rotorpakets
$h_{Stator,eff}$	m	effektive Höhe des Stators (ohne Luft um Wicklung)
h_{Stator}	m	Höhe des Stators
$h_{Steg,Rotor}$	m	Höhe des Steges zwischen den Magneten im Rotor
H_t	A/m	Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke
\vec{H}	A/m	magnetische Feldstärke
h_{WF}	m	Höhe des Wickelfensters
$h_{WF, \%}$	–	Höhe des Wickelfensters bezogen auf l_{St}
h_Z	m	Höhe des Statorzahns
$h_{Z, \%}$	–	Höhe des Statorzahns bezogen auf $h_{Stator,eff}$
h_{Zs}	m	Höhe der Statorzahnspitze
I	kg m ²	Massenträgheitsmoment
I_{Arm}	kg m ²	Massenträgheitsmoment des Roboterarms
I_B	A	Bezugswert des Statorstroms
i_d	A	Anteil des Statorstromraumzeigers in d-Richtung
i_q	A	Anteil des Statorstromraumzeigers in q-Richtung
I_{EM}	kg m ²	Massenträgheitsmoment des elektrischen Antriebs
I_{Ges}	kg m ²	gesamtes Massenträgheitsmoment der Roboterachse am Abtrieb
\mathbf{I}	kg m ²	Massenträgheitstensor
I_N	A	Nennstrom
$I_{PWR,max}$	A	maximaler Effektivwert des Stroms in einem Zweig des 3~PWRs

Symbol	Einheit	Beschreibung
I_{Str}	A	Strangstrom
\vec{J}	A/m ²	Vektor der elektrischen Stromdichte
J_0	A/m ²	Effektivwert der eingepprägten Stromdichte auf dem Wickelfenster
K_B	–	Bezugsfaktor der Normierung
k_{BEMF}	–	Anteil der BEMF an der Strangspannung im Nennpunkt
k_{Cu}	–	Kupferfüllfaktor des Wickelfensters
K_R	–	Bezugsfaktor der Normierung
k_{radial}	–	radiales Verhältnis der Höhe des Wickelfensters zur Jochhöhe
k_s	–	Stapelfaktor der Rotorblechung
$k_{\text{verkettet}}$	–	Anteil des Luftspaltflusses, der mit der Statorwicklung verkettet ist
K_ω	–	Bezugsfaktor der Normierung
l	m	Länge einer Strecke
l_{aktiv}	m	aktive Länge
L_d	H	Längs-Induktivität
$L_{d,\text{diff}}$	H	differentielle Längs-Induktivität
$L_{dq,\text{diff}}$	H	differentielle Kreuzverkopplungs-Induktivität
L_q	H	Quer-Induktivität
$L_{qd,\text{diff}}$	H	differentielle Kreuzverkopplungs-Induktivität
$L_{q,\text{diff}}$	H	differentielle Quer-Induktivität
\vec{L}	kg m ² /s	Drehimpulsvektor
M	N m	Drehmoment
m	kg	Masse
M_1	N m	Drehmoment der einsträngigen Maschine
M_3	N m	Drehmoment der dreisträngigen Maschine
m_3	kg	Masse der dreisträngigen Maschine
\overline{M}_3	N m	mittleres Drehmoment der dreisträngigen Maschine
$M_{3,p2p}$	N m	Amplitude der Drehmomentenwelligkeit der dreisträngigen Maschine
$M_{3,p2p,\%}$	%	relative Drehmomentenwelligkeit der dreisträngigen Maschine
m_{HZ}	kg	Masse eines Hohlzylinders
M_i	N m	inneres Drehmoment

Symbol	Einheit	Beschreibung
m_K	kg	Masse einer Kugel
M_{\max}	N m	maximales Drehmoment
M_N	N m	Nenn Drehmoment
M_{Rast}	N m	Rastdrehmoment
M_{Rbg}	N m	Reibdrehmoment
m_{VZ}	kg	Masse eines Vollzylinders
M_{w}	N m	Widerstandsdrehmoment
N	–	Windungszahl
n	min^{-1}	Drehzahl
n_{Eck}	min^{-1}	Eckdrehzahl
N_{\max}	–	maximale Windungszahl
N_{\min}	–	minimale Windungszahl
n_N	min^{-1}	Nenn Drehzahl
P	W	elektrische Wirkleistung
P_{mech}	W	mechanische Leistung
P_N	W	Nennleistung
R_1	Ω	Widerstand eines Stranges
r_δ	m	Luftspaltradius
$R_{\text{m},\delta}$	A/V s	magnetischer Widerstand des Luftspalts
$R_{\text{m,PM}}$	A/V s	magnetischer Widerstand des Permanentmagneten
R_N	m	Radius am Nutgrund
R_R	m	Rotorradius
R_S	m	Statorradius
\vec{r}	m	allgemeiner Ortsvektor im Raum
r_{WF}	m	Abrundung am Stator zum Wickelfenster
t	s	Zeit
T_a	s	Abtastzeit des Regelsystems
t_{Joch}	m	Tiefe des Statorjochs
t_{Str}	m	aktive Länge eines Stranges
t_{WF}	m	Tiefe des Wickelfensters
$t_{\text{WF},\%}$	m	Tiefe des Wickelfensters bezogen auf t_{Str}
t_Z	m	axiale Länge des Statorzahns
$t_{Z,\%}$	m	axiale Länge des Statorzahns bezogen auf t_{Str}
U	V	Effektivwert der elektrischen Spannung
U_B	V	Bezugswert der Statorspannung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\hat{u}_{\text{BEMF,N}}$	V	Amplitude der BEMF-Spannung im Nennbetrieb
u_d	V	Anteil des Statorspannungsraumzeigers in d-Richtung
u_q	V	Anteil des Statorspannungsraumzeigers in q-Richtung
U_{ZK}	V	Zwischenkreisspannung
\dot{i}_G	–	Getriebeuntersetzung
V_3	m ³	Bauvolumen der dreisträngigen Maschine
$V_{3,\text{PM}}$	m ³	Magnetvolumen der dreisträngigen Maschine
V_{Bohrung}	m ³	Bohrungsvolumen
$V_{\text{Cu,zp}}$	m ³	Kupfervolumen eines Polpaares
$V_{\text{Fe,zp}}$	m ³	Elektroblechvolumen eines Polpaares
$V_{\text{PM,zp}}$	m ³	Volumen der Permanentmagnete eines Polpaares
$V_{\text{SMC,zp}}$	m ³	SMC-Volumen eines Polpaares
z_p	–	Polpaarzahl
z_{Pol}	–	Vorgegebener Pol der Regler-Übertragungsfunktion in der z-Ebene
α	1/s ²	elektrische Winkelbeschleunigung
α_{Cu}	1/K	Temperaturkoeffizient von Kupfer
β_N	rad	mechanischer Winkel der Nutbreite
γ	rad	laufender Betrachtungswinkel im Luftspalt einer Maschine
γ_{el}	rad	laufender elektrischer Betrachtungswinkel im Luftspalt einer Maschine
γ_M	rad	mechanischer Winkel der Mitte der Statornut
δ	m	Luftspalthöhe
ε_{el}	rad	elektrischer Rotorlagewinkel bezogen auf Statorstrang U
$\varepsilon_{\text{mech}}$	rad	mechanischer Rotorlagewinkel bezogen auf Statorstrang U
η	–	Wirkungsgrad
$\hat{\theta}_I$	A	Amplitude der magnetischen Durchflutung der Statorwicklung
θ_{PM}	A	Magnetische Durchflutung der PMe
λ	–	Leistungsfaktor

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\underline{\Lambda}_{\delta n}$	–	Normierte Luftspaltpermeanz
μ_0	V s/A m	Permeabilität des Vakuums
μ_r	–	relative Permeabilität
$\mu_{r,PM}$	–	relative Permeabilität des Permanentmagneten
$\mu_{r,Rot}$	–	relative Permeabilität des Rotor-Elektroblechs
$\mu_{r,SMC}$	–	relative Permeabilität des SMC
π	–	Kreiszahl
ρ_{Cu}	g/cm ³	Dichte von Kupfer
ρ_{Fe}	g/cm ³	Dichte von Eisen
$\rho_{M,m}$	N m/kg	Drehmomentdichte pro kg
$\rho_{M,V}$	N m/cm ³	Drehmomentdichte pro cm ³
ρ_{NdFeB}	g/cm ³	Dichte von NdFeB
ρ_{SMC}	g/cm ³	Dichte von SMC
ρ_P	W/kg	Leistungsdichte
σ	N/m ²	Flächenschub
$\underline{\underline{\sigma}}$	N/m ²	Maxwellscher Spannungstensor
τ	rad	Zeitkonstante
ϑ	°C	Temperatur
τ_N	m	Nutteilung
τ_p	m	Polteilung definiert an der Statoroberfläche
$\hat{\Phi}_{PM}$	V s	Amplitude des die Statorwicklung durchsetzenden Permanentmagnetflusses im Leerlauf
$\hat{\Phi}_{Stator}$	V s	Amplitude des Statorflusses eines Polpaars
ψ_d	V s	Anteil der magnetischen Statorflussverkettung in d-Richtung
ψ_q	V s	Anteil der magnetischen Statorflussverkettung in q-Richtung
$\hat{\psi}_{PM}$	V s	Amplitude der vom Permanentmagneten hervorgerufenen Flussverkettung in der Statorwicklung
Ω	1/s	mechanische Winkelgeschwindigkeit
ω	1/s	elektrische Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz
ω_B	1/s	Bezugswert der Statorwinkelgeschwindigkeit
$\vec{\Omega}$	1/s	Vektor der mechanischen Winkelgeschwindigkeiten

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine dreiphasige permanentmagnetisch erregte Transversalflussmaschine unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen für den Einsatz als Achsantriebsmotor einer Roboterachse entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Abklärung von in der Robotik geltenden Anforderungen und Rahmenbedingungen sowie die Bewertung der Vor- und Nachteile eines Einsatzes von Transversalflussmaschinen in dieser Anwendung werden diskutiert und abgewogen.

Darüber hinaus wurde eine Prototyp-Maschine ausgelegt, mittels analytischer Berechnungsmethoden und finiter Elemente simuliert und berechnet und schließlich aufgebaut und am Prüfstand in Betrieb genommen und vermessen.

Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Konzipierung und Dimensionierung von Antriebssträngen in der Robotik. Das vorgestellte Entwurfs- und Berechnungsverfahren vermittelt zudem ein Vorgehensmodell zur Entwicklung permanentmagnetisch erregter Transversalflussmaschinen kleiner Leistung über die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit hinaus.

Aufgrund der bisher sehr geringen Anzahl praktisch realisierter Transversalflussmaschinen aus Pulververbundmaterial liefern die vorgestellten Messergebnisse einen wichtigen Beitrag für die Bewertung, Einordnung und Diskussion des Transversalflusskonzepts und den Einsatz von Pulververbundwerkstoffen im Elektromaschinenbau.

Abstract

In this work, a three phase permanent magnetic excited transverse flux machine as drive motor of a robot axis is designed, constructed and operated using powder composite materials. The clarification of requirements and boundary conditions applicable in robotics as well as the evaluation of the advantages and disadvantages of using transversal flux machines in this application are discussed and evaluated.

Further, a prototype machine was designed and simulated by means of analytical calculation and finite elements method. The prototype machine was operated and measured on a test bench.

Hence, this work contributes to the concept design and dimensioning of drive trains in robotics. The presented design and calculation method also provides a model approach for the development of permanent magnetic excited transverse flux machines of small power beyond the specific purpose of this work.

Due to the very low number of practically implemented transverse flux machines made of powder composite material, the presented results give an important contribution to the evaluation, classification and discussion of the transverse flux concept and the use of powder composite materials in electrical machine construction.