



Universität Stuttgart

iew
Institut für
Elektrische Energiewandlung

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

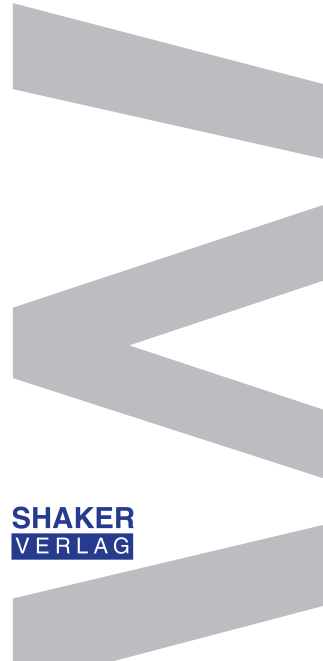
Andreas Echle

Oberwellengerechter Entwurf eines elektronisch
kommutierten Axialflussmotors für den Einsatz
in Elektrowerkzeugen



Band 18

**SHAKER
VERLAG**



**Oberwellengerechter Entwurf eines elektronisch kommutierten
Axialflussmotors für den Einsatz in Elektrowerkzeugen**

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

Vorgelegt von

Andreas Echle

aus Heilbronn

Hauptberichterin:

Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler

Tag der mündlichen Prüfung:

01.03.2023

**Institut für Elektrische Energiewandlung
der Universität Stuttgart**

2023

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Band 18

Andreas Echle

**Oberwellengerechter Entwurf
eines elektronisch kommutierten Axialflussmotors
für den Einsatz in Elektrowerkzeugen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9335-3

ISSN 2196-9213

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energiewandlung der Universität Stuttgart.

Einen besonderen Dank möchte ich meiner Hauptberichterin Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour aussprechen, die mir die Promotion ermöglichte und mich während der gesamten Zeit am Institut mit Rat und Tat unterstützte. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler für die Übernahme des Mitberichts und das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich zudem bei meinen Kollegen am Institut für die Hilfsbereitschaft, die Unterstützung sowie das äußerst angenehme Arbeitsklima. Besonderer Dank gilt Urs Pecha für die unzähligen fachlichen Diskussionen und Christian Grüner für seine uneingeschränkte Unterstützung am Prüfstand. Eure Beiträge haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Danken möchte ich auch der Institutswerkstatt um Herrn Hermann Kattner mit seinem Team Beate Haase und Markus Beesch für die Gespräche und Kommentare im Bereich der mechanischen Fertigung und darüber hinaus. Daneben möchte ich auch Evelin Eiselt und Rainer Adelhelm nennen, welche ich in meiner Zeit an der Universität immer gerne aufsuchte und um Rat fragte.

Den von mir in wissenschaftlichen Arbeiten betreuten Studierenden und den wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für ihr Engagement. Ihre fachlichen Beiträge haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders möchte ich hier Gerold Schmidt, Nina Laumer, Rongrong Zhang und Yuancong Gong nennen.

Ein persönlicher Dank gilt meiner Frau, meinen drei Kindern und meiner Familie für ihre uneingeschränkte Unterstützung und der unendlichen Geduld für ein solch zeitraubendes Vorhaben.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XVII
Abstract	XIX
1. Einleitung	1
2. Permanentmagnetisch erregte Kleinmotoren in axialer Bauform	5
2.1. Stand der Technik	5
2.2. Aufbau, Funktionsprinzip und Topologien der AFPM	7
2.3. Theoretischer Vergleich zum Radialflussmotor	10
2.3.1. Herleitung der Entwurfsgleichung der AFPM	10
2.3.2. Theoretische Potentiale des Axialflussmotors	11
2.4. Luftspaltoberwellen und deren Auswirkungen auf die Motorverluste	15
2.5. Konventionelle Beschreibung von BLDC Motoren	18
2.5.1. Schichtenmodell	19
2.5.2. Gleichstrommodell	21
3. Hoch ausgenutzte Kleinantriebe für handgeführte Elektrowerkzeuge	23
3.1. Systemübersicht	24
3.1.1. BLDC-Motoren in handgeführten Elektrowerkzeugen	25
3.1.2. Leistungselektronik	26
3.1.3. Ansteuerverfahren	27
3.2. Betriebsverhalten	29
3.2.1. Vereinfachtes Betriebsverhalten	30
3.2.2. Näherung zur Beschreibung des physikalischen Betriebsverhaltens im Dauerbetriebsbereich	31
3.3. Anforderungsdefinition	33
3.3.1. Untersuchung des Gesamtsystems	33
3.3.2. Referenzmotor	36
3.4. Eingrenzung der Arbeit	37
4. Analytische Beschreibung	39
4.1. Analytische Berechnung des elektromagnetischen Drehmoments	40

4.2.	Theorie der quasi-stationären magnetischen Felder	41
4.2.1.	Durchflutungsgesetz	41
4.2.2.	Induktionsgesetz	42
4.2.3.	Magnetische Energie und Koenergie	42
4.3.	Theorie der Wicklungsfunktion	44
4.3.1.	Definition der Windungs- und Wicklungsfunktion	46
4.4.	Permanentmagnetbehafteter Kreis	48
4.4.1.	Korrekturfaktoren der analytischen Berechnung	49
4.4.2.	Arbeitspunkt der PMe	51
4.4.3.	Die Remanenzflussdichtefunktion	53
4.4.4.	Energie und Kräfte im PM-erregten Kreis	54
4.5.	Analytische Beschreibung von Zahnspulenwicklungen	57
4.5.1.	Konstruktion der Wicklungsfunktion	57
4.5.2.	Zonungsfaktor der Wicklungsfunktion 1. Art	60
4.5.3.	Zonungsfaktor der Zahnspulen 2. Art	62
4.5.4.	Durchflutungsverteilung bei nicht sinusförmiger Anregung	65
4.5.5.	Induzierte Spannung	68
4.5.6.	Elektromagnetisches Drehmoment	71
5.	Entwurf und Realisierung eines Prototypen	75
5.1.	Entwurfsprozess	76
5.2.	Grobentwurf des Motors	79
5.3.	FE-gestützte Optimierung	83
5.3.1.	Sensitivitätsanalyse und Optimierung	83
5.3.2.	Dynamisches Motorverhalten	91
5.3.3.	Vergleich zum Entwurf und Schlussfolgerung	99
5.4.	Aufbau des Prototypen	99
5.4.1.	Fertigung von Axialflussmotoren: Stand der Technik und Herausforderungen	99
5.4.2.	Gesamtkonstruktion des Prototypen	101
5.4.3.	Konstruktion und Fertigung der Baugruppe Stator	103
5.4.4.	Konstruktion und Fertigung der Baugruppe Rotor	104
6.	Inbetriebnahme und Vermessung	107
6.1.	Prüfstand	107
6.2.	Betriebsverhalten des Prototypen	110
6.2.1.	BEMF und Spannungskonstante	110
6.2.2.	Strom-Drehmoment-Verhalten	110
6.2.3.	Motorkennlinie	113
6.3.	Motorverluste	114
6.3.1.	Energiebilanz der elektromechanischen Energiewandlung	115
6.3.2.	Wirkungsgradkennfeld	116
6.3.3.	Separation der Einzelverluste	116
6.3.4.	Inneres Wirkungsgradkennfeld	118

6.4. Fazit	120
7. Zusammenfassung und Ausblick	121
A. Zusätze zu den PM-erregten Kleinmotoren mit axialer Bauform	125
A.1. Konturkarte der doppelseitigen AFPM	125
A.2. Marktanalyse Axialflussmotoren	125
B. Zusätze zur analytischen Berechnung	129
B.1. Geometrische Umrechnungsformeln	129
B.2. Bestimmung der Korrekturfaktoren	129
B.3. Berechnung der Stranginduktivitäten	131
B.4. Elektrische Motorparameter der Co-Simulation	133
B.4.1. Induktivitätsverlauf	133
B.4.2. BEMF-Verlauf	133
C. Zusätze zur Prüfstandsarbeit	135
C.1. Vermessung des Referenzmotors	135
C.2. Messdatenauswertung	136
C.2.1. BEMF des Referenzmotors	136
C.2.2. Verlustleistung des Referenzmotors im Leerlauf	136
C.2.3. Wirkungsgradkennfelder des Referenzmotors	137
C.3. Prüfstandsautomatisierung	138
D. Zusätze zur Konstruktion des Prototypen	141
D.1. Konstruktion und Baugruppen	141
D.2. Technische Zeichnungen	142
Literaturverzeichnis	147

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
3~PWR	Dreiphasiger Pulswechselrichter
3D	Dreidimensional
AFIR	Axialflussmotor mit internem Rotor (engl.: Axial Flux Internal Rotor)
AFPM	Permanentmagnetisch erregter Axialflussmotor
BEMF	Gegen-Elektromotorische Kraft (eng. Back Electromotive Force)
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor
CAD	Computer-Aided Design
Co-Simulation	Multiphysikalische Simulation mit schwacher Kopplung
DGL	Differentialgleichung
ECS	Schaltkreisberechnung (engl. Electronic Circuit Simulation)
ESB	Elektrisches Ersatzschaltbild
FE	Finite Elemente
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GM	Gleichstrommotor
KS	Koordinatensystem
LE	Leistungselektronik
LUT	Lookup-Table
MEC	Magnetisch Äquivalenter Kreis (Magnetic Equivalent Circuit)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

Abkürzung	Beschreibung
PM	Permanentmagnet
PWM	Pulsbreitenmodulation (Pulse Width Modulation)
RFPM	Permanentmagnetisch erregter Radialflussmotor
RM	Referenzmotor
S235JR	Werkstoffbezeichnung für warmgewalzten unlegierten Baustahl
Single-Sided	Einseitige Topologie (engl.: Single-Sided Topology)
SMC	Soft Magnetic Composite
TORUS	Axialflussmotor mit internem Stator
WF	Wicklungsfunktion
WFA	Wicklungsfunktions Theorie (Winding Function Approach)
WSB	Wirbelstrombremse
ZSW	Zahnspulenwicklung

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	–	Anzahl an parallel geschalteten Spulengruppen, Geometriefaktor
A_δ	m^2	Luftspaltfläche
A_I	A/m	Strombelag
$A_{I,\bar{r},\text{peak}}$	A/m	Spitzenstrombelag auf dem mittleren Luftspaltdurchmesser
$A_{I,\text{in}}$	A/m	Strombelag auf dem Innendurchmesser
$A_{I,\text{in,peak}}$	A/m	Spitzenstrombelag auf dem Innendurchmesser
A_M	m^2	Magnetpolfläche
$A_{\tau_p,\text{Stator}}$	m^2	Statorpolfläche
A	Vs/m	Magnetisches Vektorpotential
A_Z	m^2	Statorzahnquerschnittsfläche
B_δ	T	Radialkomponente der Luftspaltinduktion
\bar{B}_δ	T	Mittlere Luftspaltinduktion
B_M	T	Flussdichte im Permanentmagneten
b_N	mm	Nuttschlitzbreite
B_R	Vs/m^2	Remanenzinduktion
b_{WF}	m	Breite Wickelfenster
c_G	–	Übersetzungsverhältnis Getriebe
d_{Draht}	mm	Drahtdurchmesser
d_δ	m	Mittlerer Luftspaltdurchmesser
d_{in}	m	Innendurchmesser aktiver Teil
d_{out}	m	Außendurchmesser aktiver Teil
e	–	Eulersche Zahl
E_A	V	Effektive Ankerspannung
e_x	V	Zeitwert der induzierten Spannung im Strang x
H	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke

Symbol	Einheit	Beschreibung
h_g	m	Effektive Luftspatlänge Ersatzreluktanz
H_M	A/m	Feldstärke im Magneten
$H_{c,B}$	A/m	Koerzitivfeldstärke der Flusssdichte
H_δ	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke im Luftspalt
h_{Rj}	m	Rotorjochhöhe
h_M	mm	Permanentmagnethöhe
h_{pSc}	m	Höhe Polschuh
$h_{g,i}$	m	Ideelle Luftspatlänge
I	A	Effektivwert des elektrischen Stromes
I_0	A	Effektiver Leerlaufstrom
I_A	A	Ankerstrom
i_a	A	Strom im Strang a
I_B	A	Effektiver Strangstrom
i_b	A	Strom im Strang b
i_c	A	Strom im Strang c
$I_{F,WSB}$	A	Effektivwert des Erregerstroms der WSB
$I_{Fe,0}$	A	Eisenverluststrom im Leerlauf
I_S^*	A	Abgeschätzter effektiver Stillstandsstrom
i_{sp}	A	Spulenstrom
j	–	Imaginäre Einheit
k_C	–	Carter Faktor
k_{Cu}	%	Kupferfüllfaktor
k_D	–	Verhältnis Innen- zu Außendurchmesser
k_E	mVs / rad	Spannungskonstante des Gleichstrommodells
k_e	mVs / rad	Spannungskonstante der induzierten Strangspannung
k_M	mNm / A	Drehmomentkonstante
k_S	–	Sättigungsfaktor
L_A	Ω	Ankerinduktivität
L_a	Ω	Stranginduktivität von Strang a
l_{akt}	m	Aktive Länge Blechpaket
l_{Fe}	m	Länge einer Strecke in Eisen
M	N m	Drehmoment
m	–	Strangzahl

Symbol	Einheit	Beschreibung
M_{el}	N m	Elektromagnetisches Drehmoment
$M_{el,S}^*$	N m	Elektromagn. Stillstands-Drehmoment
M'_{el}	N m	Abgeschätztes elektromagnetisches Drehmoment
M_M	N m	Motormoment
M_S	N m	Stillstands-Drehmoment
M_{screw}	N m	Schraubenmoment
M_v	N m	Verlustmoment
$M_{WSB,max}$	Nm	Maximales Bremsmoment der Wirbelstrombremse
N_w	–	Aktiv im Eingriff befindliche Windungszahl eines Stranges
N	–	Windungszahl
\mathbf{n}	–	Normalenvektor
n	$1/\text{min}$	Drehzahl
n_0	$1/\text{min}$	Leerlaufdrehzahl
n_M	$1/\text{min}$	Motordrehzahl
n_{screw}	$1/\text{min}$	Schraubendrehzahl
N_{sp}	–	Windungszahl einer Spule
n_{sp}	–	Windungsfunktion einer Spule
\bar{n}_{sp}	–	Mittelwert Windungsfunktion einer Spule
p'	–	Polpaarzahl einer Urwicklung
p	–	Polpaarzahl
P_{ab}	W	Abgegebene Leistung
P_{el}	W	Elektrische Wirkleistung
P_{mech}	W	Mechanische Leistung
P_v	W	Verlustleistung
$P_{v,0}$	W	Verlustleistung im Leerlauf
$P_{v,Cu}$	W	Verlustleistung in elektrischen Leitern, Kupferverluste
$P_{v,Fe}$	W	Eisenverluste
P_{vL}	W	Lüftungsverluste
P_{vLE}	W	Verlustleistung in der Leistungselektronik
P_{vMech}	W	Mechanische Verlustleistung
P_{vR}	W	Reibungsverluste
P_{vWir}	W	Wirbelstromverluste

Symbol	Einheit	Beschreibung
Q'	–	Anzahl Zeiger einer Urverteilung
Q	–	Nutzahl
q	–	Lochzahl
q_n	–	Lochzahl Nenner
q_z^+	–	Anzahl positiver Spulen
q_z^-	–	Anzahl negativer Spulen
q_z	–	Lochzahl Zähler
R_A	Ω	Ankerwiderstand
R_a	Ω	Strangwiderstand von Strang a
r_δ	m	Mittlerer Luftspaltradius
R_i	Ω	Anker-Vorwiderstand
$R_{m,Fe}$	A/V_s	Magnetischer Widerstand von Eisen
$R_{m,PM}$	A/V_s	Magnetischer Widerstand des Magneten
$R_{m,\delta}$	A/V_s	Magnetischer Widerstand des Luftspalts
r_{out}	m	Außenradius aktiver Teil
\mathbf{r}	–	Raumvektor
\mathbf{t}	–	Tangentialvektor
t	s	Zeit
t_p	–	Anzahl der Urwicklungen
T_{th}	K	Allgemeine Temperatur
t_{uv}	–	Anzahl an Urverteilungen
U_{ZK}	V	Zwischenkreisspannung
V_δ	m^3	Luftspaltvolumen
W_{mag}	J	Magnetische Feldenergie
w_{mag}	J	Magnetische Feldenergiedichte
W'_{mag}	J	Magnetische Koenergie
w'_{mag}	J	Magnetische Koenergiedichte
$w'_{mag,\delta}$	J	Magnetische Koenergiedichte im Luftspalt
X	–	Anzahl Nutschritte positiver zu negativer Spule
Y	–	Anzahl Nutschritte gezonter Spulen
α_N	rad	Nutwinkel
α_{NSc}	%	Poldeckungsfaktor Stator

Symbol	Einheit	Beschreibung
α_{pSc}	rad	Zahnwinkel
α_Z	rad	Zeigerwinkel
β_I	rad	Stromlückwinkel
β_{kM}	rad	Magnetischer Kommutierungswinkel
β_L	rad	Rotorlagewinkel
β_N	rad	Nutöffnungswinkel
β_S	rad	Spulenweitewinkel
β_M	rad	Rotorsehnungswinkel
γ	rad	Statorgebundener mechanischer Umlaufwinkel
δ	m	Geometrische Luftspaltlänge
η	–	Wirkungsgrad
η_G	–	Wirkungsgrad Getriebe
Θ	A	Magnetische Durchflutung
θ	rad	Winkelversatz der Stränge
ϑ	rad	Mechanischer Polradwinkel
θ_x	rad	Phasenverschiebung von Strang x
λ	–	Korrekturfaktor beim Vergleich der Entwurfsgleichungen
μ_0	$V^s / A \cdot m$	Permeabilität des Vakuums
$\mu_{r,Fe}$	–	Relative Permeabilität im weichmagn. Werkstoff
$\mu_{r,M}$	–	Relative Permeabilität im PM
ν	–	Ordnungszahl der Stromschwingung
ξ_{kM}	–	Kommutierungsfaktor
ξ_I	–	Strom-Lückfaktor
ξ_M	–	Rotorfaktor
ξ_Z^+	–	Zonungsfaktor positive Spulen
ξ_Z^-	–	Zonungsfaktor negative Spulen
ξ_n	–	Nutschlitzfaktor
ξ_s	–	Sehnungsfaktor
ξ_{sM}	–	Rotorsehnungsfaktor
ξ_w	–	Wicklungsfaktor
ξ_z	–	Zonungsfaktor
π	–	Kreiszahl

Symbol	Einheit	Beschreibung
ρ	C/m^3	Elektrische Raumladungsdichte
σ	–	Streuiziffer
ν	–	Ordnungszahl der Ortswellen
τ_N	mm	Nutteilung
Φ	V s	Magnetischer Fluss
Φ_δ	V s	Magnetischer Luftspaltfluss
Φ_M	V s	Magnetischer Magnetfluss
Ψ	V s	Flussverkettung
$\hat{\Psi}_M$	Wb	Scheitelwert der Flussverkettung der PM
Ω	$1/s$	Mechanische Winkelgeschwindigkeit
ω	$1/s$	Elektrische Winkelgeschwindigkeit
$\underline{\mathcal{B}}_\delta$	T	Komplexer Luftspaltinduktionsverlauf
$\underline{\mathcal{B}}_M$	T	Komplexer Flussdichteverlauf im Magneten
$\underline{\mathcal{B}}_R$	$V s/m^2$	Komplexe Remanenzfunktion
$\underline{\mathcal{F}}_M$	A	Komplexe Durchflutungsverteilung PM-erregt
$\underline{\mathcal{F}}_w$	A	Komplexe Durchflutungsverteilung stromerregt
$\underline{\mathcal{H}}_\delta$	A/m	Komplexer Feldstärkeverlauf im Luftspalt
$\underline{\mathcal{H}}_M$	A/m	Komplexer Feldstärkeverlauf im Magneten
$\underline{\mathcal{N}}$	–	Wicklungsfunktion
\mathcal{V}_δ	A	Magnetische Luftspaltspannung
\mathcal{V}_M	A	Magnetische Spannung im PM
\mathbb{N}	–	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{U}	–	Menge der ungeraden natürlichen Zahlen
\mathbb{Z}	–	Menge der ganzen Zahlen

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein permanentmagnetisch erregter bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) in axialer Bauform für den Einsatz in einem handgeführten Elektrowerkzeug untersucht. Hierzu wird ein Referenzmotor in der Anwendung Akku-Bohrschrauber messtechnisch analysiert und klassifiziert, und es werden Anforderungen abgeleitet. Zum Nachweis der Machbarkeit wird ein Prototyp-Motor fertigungstechnisch realisiert, auf einem Prüfstand vermessen und dessen Einsatz bewertet.

Der entwickelte Entwurfsprozess des Prototypen basiert auf einem Grobentwurf mit anschließender numerischer Optimierung des magnetischen Kreises. Hierbei werden Kommutierungseffekte und deren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten mittels Näherungen berücksichtigt. Das messtechnisch ermittelte Betriebsverhalten des Prototypen verifiziert abschließend die Ergebnisse aus den analytischen Ansätzen wie auch der numerischen Feldberechnung.

Die eingeführten analytischen Berechnungsmethoden beschäftigen sich ausgiebig mit der oberwellengerechten Beschreibung von Luftspaltfeldern elektrischer Maschinen mit blockförmigen Stromverläufen. Es wird ein wichtiger Beitrag zur Modellierung elektromagnetischer Luftspaltkräfte in permanentmagnetisch erregten Maschinen geleistet. Hierzu wird im Detail auf die energetischen Verhältnisse im magnetischen Kreis eingegangen, und es werden die Auswirkungen bei deren Änderung auf die resultierenden Kräfte aufgezeigt, bewertet und analytisch geschlossen hergeleitet.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse, Berechnung und Fertigung von hoch ausgenutzten Motoren in axialer Bauform. Aufgrund der geringen Anzahl an realisierten Aufbauten im Bereich $<1\text{kW}$ leistet diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Bewertung, Einordnung und Diskussion des axialen Motorkonzepts im Vergleich zum konventionellen BLDC Motor.

Abstract

In this thesis, a permanent-magnet excited brushless DC-Motor (BLDC) with an axial design is investigated for using in a hand-held power tool. For this purpose, a reference motor, in the application cordless drill, is analyzed by measurement, classified and requirements are derived. To prove the feasibility, a prototype-motor is built up, measured on a test bench and its use evaluated.

The design process of the prototype is based on an analytical design with subsequent numerical optimization of the magnetic circuit. Commutation effects and their effects on the operating behavior are taken into account by means of approximations. The operational behavior of the prototype, determined by measurement, finally verifies the results from the analytical approaches as well as the numerical field calculation.

The introduced analytical calculation methods deal extensively with the harmonic description of air gap fields of electrical machines with block-shaped current waveforms. An important contribution is made to the modeling of electromagnetic air gap forces in permanent magnet excited machines. For this purpose, the energetic conditions in the magnetic circuit are dealt with in detail and the effects of their change on the resulting forces are shown, evaluated and analytically derived.

This thesis deals with the analysis, calculation and production of high utilization motors in axial design. Due to the small number of realized setups in the range $<1\text{kW}$, this work makes an important contribution to the evaluation, classification and discussion of the axial motor concept in comparison to the conventional BLDC motor.