

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Maximilian Torsten Halwas

**Kompaktwickelprozess zur Erhöhung
der Performance von Statorn elektrischer
Traktionsantriebe**

Band 283

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Maximilian Torsten Halwas

**Kompaktwickelprozess
zur Erhöhung der Performance
von Statoren elektrischer Traktionsantriebe**

Band 283

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statorn elektrischer Traktionsantriebe

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

Dissertation

von

Maximilian Torsten Halwas, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Juli 2024
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

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 978-3-8440-9600-2

ISSN 0724-4967

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 der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), vorwiegend im Rahmen des Projekts NeWwire.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. Christian Greiner für den Prüfungsvorsitz.

Allen Mitarbeitern des Instituts, insbesondere den Kollegen der MAP und der Elektromobilität, danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit. Vor allem danke ich Marco Friedmann, Ludwig Hausmann, Felix Wirth, Felix Fraider und Wilken Wößner für die Unterstützung und ein offenes Ohr zu jeder Zeit. Ein großer Dank geht auch an meine ehemaligen Studien- und Abschlussarbeiter, sowie an die studentischen Hilfskräfte, die mich durch ihr Engagement und ihre Mitarbeit bei meiner Arbeit tatkräftig unterstützt haben. Weiterhin danke ich den Kollegen des ETI Benedict Jux und Felix Hoffmann, die mir stets mit Einfallsreichtum und Sorgfalt bei den Themen der Auslegung elektrischer Maschinen zur Seite standen. Nicht vergessen möchte ich alle Beteiligten des Projektes NeWwire und bedanke mich für die kollegiale und interessante Zusammenarbeit.

Ich danke meinen Eltern Jutta und Torsten sowie meinen Geschwistern Tristan, Henriette und Paulina für den steten Rückhalt. Mein größter Dank gilt Madeleine, die mich zu jeder Zeit und allen Belangen in diesem Vorhaben bedingungslos unterstützt hat.

Die zahlreichen CAD-Abbildungen dieser Arbeit sind in der Softwareumgebung SIEMENS NX konstruiert worden. Als formale Leitlinie liegen dieser Arbeit insbesondere die DIN 1304, DIN 1313 und DIN 1338 zugrunde.

Karlsruhe, im Juli 2024

Maximilian Halwas

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung des Kompaktwickelprozesses zum Gegenstand, der der Herstellung und gleichzeitigen Steigerung der Performance elektrischer Traktionsmaschinen dient. Zunächst werden sowohl der Stand der Technik für Traktionsantriebe (Produkt) als auch die dazugehörige Wickeltechnik (Produktionstechnik) analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse ist, dass eine Kombination aus der Hairpintechnologie und der herkömmlichen Runddrahtwickeltechnik Vorteile für Traktionsantriebe erbringen kann, diese aber noch nicht ausreichend erforscht ist. Zu diesem Zweck wird der Kompaktwickelprozess eingeführt, der sich durch die drei folgenden Merkmale des geordneten Lagenaufbaus, der kompaktierten Wicklung und einen flexiblen Wickelkopf auszeichnet. Der geordnete Lagenaufbau ist eine wichtige Voraussetzung zur Kompaktierung der Wicklung, um die durch das Verpressen von Drahtkreuzungen erzeugten Einschnürungen von Drähten zu verhindern. Die Kompaktierung der Wicklung führt zu einem erhöhten Kupferfüllfaktor und einer Steigerung der Wärmeleitfähigkeit. Die flexiblen Wickelköpfe ermöglichen die Reduktion von Verlusten, die durch das elektromagnetische Nutstrefenfeld ausgelöst werden. In der Analyse und der Entwicklung der Prozessschritte werden durch numerische Simulationen sowie durch experimentelle Versuchsreihen die Prozesskenngrößen der Wicklungsherstellung erforscht. Im Anschluss werden zwei Ansätze des Kompaktwickelprozesses entwickelt. Der sequenzielle Kompaktwickelprozess, bestehend aus dem Schablonenwickler, dem Kompaktierwerkzeug und dem Versuchsstand, dient der Untersuchung der Kompaktwicklung im Forschungsumfeld. Der integrale Kompaktwickelprozess wurde konzeptionell erarbeitet und besteht aus dem Wickelschwert sowie der Einbringvorrichtung. Die Herstellung der Wicklung konnte prototypisch mit einer Universalwickelmaschine nachgewiesen werden. Die Wirtschaftlichkeit beider Ansätze wurde durch die aufgenommenen Fertigungszeiten bewertet. Auf diesem Weg konnte nachgewiesen werden, dass der integrale Kompaktwickelprozess zur Fertigung von Statorn bei kleinen bis mittleren Stückzahlen pro Jahr grundsätzlich konkurrenzfähig sein kann. Weiterhin wurde durch simulative und experimentelle Untersuchungen der Kompaktwicklung festgestellt, dass diese im Vergleich zur Hairpinwicklung deutlich geringere Wechselstromverluste bei hohen Drehzahlen aufweist. Die thermische Leitfähigkeit der Kompaktwicklung wurde analytisch, numerisch und experimentell bestimmt und zwischen den Runddraht- und Hairpinwicklungen eingeordnet.

Abstract

The present work addresses the development of the compact winding process, which is used for the production and, simultaneously, the increase of the performance of electric traction drives. At the beginning of the work, both, the state of the art for traction drives (product) as well as the associated winding technology (production technology) are analyzed. The result of this analysis is that a combination of hairpin technology and conventional round wire winding technology can provide advantages for traction drives, but this has not yet been sufficiently investigated. For this purpose, the compact winding process is introduced, which is characterized by the following three features of ordered layer structure, compacted winding and a flexible winding head. The ordered layer structure is an important requirement for compacting the winding in order to prevent wire necking induced by crimping wire crossings. The compacting of the winding leads to an increased copper fill factor and an improvement in thermal conductivity. The flexible winding heads enable the reduction of losses caused by the electromagnetic groove stray field. In the analysis and development of the process steps, numerical simulations as well as experimental test series are used to investigate the process parameters of the winding production. Subsequently, two concepts for the compact winding process are developed. The sequential compact winding process, consisting of the stencil winder, the compacting tool and the test stand, is used to investigate compact winding in a research environment. The integral compact winding process was developed conceptually and consists of the winding sword and the insertion device. The production of the winding could be demonstrated prototypically with a universal winding machine. The economic efficiency of both approaches was evaluated by the recorded production times. This way, it was possible to demonstrate that for the production of stators the integral compact winding process can be competitive for small to medium quantities per year. Furthermore, a simulative and experimental evaluation of the compact winding revealed that it has significantly lower AC losses at high rotation speeds than the hairpin winding. The thermal conductivity of the compact winding was determined analytically, numerically and experimentally, and classified between the round wire and hairpin windings.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichen	VI
1 Einleitung	2
1.1 Motivation	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Analyse	5
2.1 Grundlagen elektrischer Traktionsantriebe	5
2.1.1 Funktionsweise und Aufbau	7
2.1.2 Allgemeine Kenngrößen	10
2.1.3 Verluste und Wirkungsgrad	15
2.2 Analyse der Drehstromstatoren	28
2.2.1 Blechpaket	29
2.2.2 Statorwicklung	30
2.2.3 Nutaufbau	39
2.2.4 Wicklungsfehler, Mess- und Prüfverfahren	45
2.2.5 Ableitung entscheidender Merkmalsausprägungen von Statoren	50
2.3 Analyse der Wickeltechnik für Drehstromstatoren	52
2.3.1 Einordnung der Wickeltechnik in die Prozesskette der Statorfertigung	52
2.3.2 Begriffe und Einordnung der Wickeltechnik	54
2.3.3 Herstellung von Runddrahtwicklungen	55
2.3.4 Herstellung von Wicklungen mit Rechteckleitern	61
2.3.5 Neuartige Ansätze zur Herstellung von Statorwicklungen	66
2.3.6 Analyse der Herstellbarkeit der Wicklungsmerkmale	72
2.4 Defizit des Stands der Forschung und Technik	73
3 Zielstellung und Vorgehensweise	75
4 Vorstellung der Kompaktwicklung	79

4.1	Definition der drei Merkmale der Kompaktwicklung	79
4.2	Definition des Prozessablaufs	83
5	Entwicklung der einzelnen Prozessschritte	85
5.1	Geordneter Lagenaufbau	85
5.1.1	Spezifikation der Kompaktspulen	86
5.1.2	Darstellung des Versuchswerkzeugs	86
5.1.3	Experimentelle Versuchsreihen	88
5.2	Kompaktierung der Wicklung	94
5.2.1	Analyse und Voruntersuchungen	94
5.2.2	Simulative Parameterstudie	105
5.2.3	Aufbau der Versuchswerkzeuge	116
5.2.4	Experimentelle Versuchsreihen	119
5.2.5	Parameterraum der Einflussgrößen für die Wicklungskompaktierung	142
6	Synthese zum automatisierten Gesamtsystem	144
6.1	Sequenzieller Kompaktwickelprozess	147
6.1.1	Schablonenwickler	148
6.1.2	Kompaktierwerkzeug	152
6.1.3	Versuchsstand	152
6.2	Integraler Kompaktwickelprozess	158
6.2.1	Wickelschwert in NWS/S	158
6.2.2	Wickelschwert und Einbringvorrichtung	166
7	Ergebnisse und Bewertung	173
7.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand von Fertigungszeiten	173
7.2	Numerische Verlustanalyse der Kompaktwicklung	179
7.3	Thermische Analyse der Kompaktwicklung	188
8	Zusammenfassung und Ausblick	205
8.1	Zusammenfassung	205
8.2	Ausblick	206
Publikationsliste		I

Literaturverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	XXXIII
Tabellenverzeichnis	XLIV
Anhang	XLVII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AC	Wechselstrom (<u>a</u> lternating <u>c</u> urrent)
ASM	<u>A</u> synchro <u>n</u> maschine
CAD	rechnergestützte Konstruktion (<u>c</u> omputer- <u>a</u> ided <u>d</u> esign)
DB	<u>D</u> raht <u>b</u> reite
DC	Gleichstrom (<u>d</u> irect <u>c</u> urrent)
DFG	<u>D</u> eutsche <u>F</u> orschungsgemeinschaft
DH	<u>D</u> raht <u>h</u> öhe
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung
EIM	<u>e</u> lektrisches <u>I</u> solier <u>m</u> aterial
EIS	<u>e</u> lektrisches <u>I</u> solier <u>s</u> ystem
FEA	<u>F</u> inite- <u>E</u> lement- <u>A</u> nalyse
FEM	<u>F</u> inite- <u>E</u> lement- <u>M</u> ethode
FESM	<u>f</u> remderregte <u>S</u> ynchro <u>n</u> maschine
FF	<u>F</u> üll <u>f</u> aktor
FG	<u>F</u> üll <u>g</u> rad
FOR	<u>F</u> orschungsgruppen der Deutschen Forschungsgemeinschaft
GUI	grafische Benutzeroberfläche (<u>g</u> raphical <u>u</u> ser <u>i</u> nterface)
HP	<u>H</u> air <u>p</u> intechnologie
IB	<u>I</u> solations <u>b</u> reite
IH	<u>I</u> solations <u>h</u> öhe
iK	<u>i</u> ntegraler <u>K</u> ompaktwickelprozess
IPC	Internationale Patentklassifikation (<u>i</u> ntenational <u>p</u> atent <u>c</u> lassification)
LB	<u>L</u> eiter <u>b</u> reite
LH	<u>L</u> eiter <u>h</u> öhe
LR	<u>L</u> eiterradius

NeWire	<u>N</u> euartige serienflexible <u>W</u> ickelverfahren für die <u>w</u> irtschaftliche automatisierte Fertigung von hoch performanten <u>e</u> lektrischen Maschinen (Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung)
NIM	<u>n</u> icht-elektrisches <u>I</u> solier <u>m</u> aterial
NWS/S	Universalnadelwickelmaschine (Herstellerbezeichnung)
PDEV	TE-Aussetzspannung (<u>p</u> artial <u>d</u> ischarge <u>e</u> xtinction <u>v</u> oltage)
PDIV	TE-Einsetzspannung (<u>p</u> artial <u>d</u> ischarge <u>i</u> nception <u>v</u> oltage)
PMSM	<u>p</u> ermanent <u>m</u> agneterregte <u>S</u> ynchron <u>m</u> aschine
PEEQ	äquivalente plastische Dehnung (<u>p</u> lastic <u>e</u> quivalent strain)
RH	Luftfeuchte (<u>r</u> elative <u>h</u> umidity)
RPDEV	wiederholende TE-Aussetzspannung (<u>r</u> epetitive <u>p</u> artial <u>d</u> ischarge <u>e</u> xtinction <u>v</u> oltage)
RPDIV	wiederholende TE-Einsetzspannung (<u>r</u> epetitive <u>p</u> artial <u>d</u> ischarge <u>i</u> nception <u>v</u> oltage)
VDI	<u>V</u> erein <u>D</u> eutscher <u>I</u> ngenieur <u>e</u>
sK	<u>s</u> equenzieller <u>K</u> ompaktwickelprozess
SM	<u>S</u> ynchron <u>m</u> aschine
SPS	<u>S</u> peicherprogrammierbare <u>S</u> teuerung
TE	<u>T</u> eil <u>e</u> ntladung

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Fläche	mm ²
A_{Draht}	Querschnittsfläche eines Drahts	mm ²
$A_{\text{Draht,Nut}}$	Querschnittsfläche aller Drähte in einer Nut	mm ²
A_{Leiter}	Querschnittsfläche eines Leiters	mm ²
$A_{\text{Leiter,Nut}}$	Querschnittsfläche aller Leiter in einer Nut	mm ²
A_{Nut}	Querschnittsfläche einer Nut	mm ²
$A_{\text{Nut,iso}}$	Querschnittsfläche einer isolierten Nut	mm ²
A_{Probe}	Querschnittsfläche einer Probe	mm ²
$b_{\text{Nutschlitz}}$	Nutschlitzbreite	mm
b_{Probe}	Breite einer Probe	mm
B	Flussdichte	T
B_{DKW}	Breite des Drahtes nach Kompaktierung	mm
B_{HP}	Breite des Hairpindrahtes	mm
B_{NKW}	Nutbreite der Kompaktwicklung	mm
B_{NHP}	Nutbreite der Hairpinwicklung	mm
B_r	Remanenzflussdichte	T
d	Durchmesser	mm
d_{Draht}	Drahtdurchmesser	mm
d_{Isop}	Isolationspapierdicke	mm
$d_{\text{Lack,HP}}$	Schichtdicke Isolationslack (Hairpinwicklung)	mm
$d_{\text{Lack,KW}}$	Schichtdicke Isolationslack (Kompaktwicklung)	mm
d_{Leiter}	Leiterdurchmesser	mm
d_{Stator}	Statorinnendurchmesser (Statorbohrung)	mm
D_{Kupfer}	Drahtdurchmesser vor Kompaktierung	mm
D_{Rotor}	Rotoraußendurchmesser	mm
D_{Stator}	Statoraußendurchmesser	mm

e	Eulersche Zahl	
f	Frequenz	Hz \triangleq 1/s
F	Kraft	N
F_{Press}	Presskraft	kN
FG_{Lack}	Füllgrad des Isolationslacks (Draht)	%
FG_{NIM}	Füllgrad des nicht-elektrischen Isoliermaterials	%
FG_{Papier}	Füllgrad des Isolationspapiers	%
G	Isolationsgrad	
H	Feldstärke	V/m
H_{DKW}	Höhe des Drahtes nach Kompaktierung	mm
H_{HP}	Höhe des Hairpindrahtes	mm
H_{NKW}	Nuthöhe der Kompaktwicklung	mm
H_{NHP}	Nuthöhe der Hairpinwicklung	mm
I	elektrische Stromstärke	A
k_{el}	elektrischer Füllfaktor	%
k_{mec}	mechanischer Füllfaktor	%
k_{r}	Widerstandserhöhungsfaktor	%
l	Länge	mm
l_{Probe}	Länge einer Probe	mm
l_{Rotor}	Rotorlänge	mm
l_{Stator}	Statorlänge	mm
l_{Welle}	Länge der Maschinenwelle	mm
m	Strangzahl	
m_{Maschine}	Gewicht der elektrischen Maschine	kg
M	Drehmoment	N·m
M_{max}	maximales Drehmoment	N·m
M_{rat}	Bemessungsdrehmoment	N·m
n	Drehzahl	1/s

$n_{\text{Drähte}}$	Drahtanzahl	
n_{Leiter}	Leiteranzahl	
n_{max}	maximale Drehzahl	1/s
n_{rat}	Bemessungsdrehzahl	1/s
N	Nutenzahl	
p	Polpaarzahl	
p_m	Leistungsgewicht	W/kg
p_{Press}	Pressdruck (Stempelfläche zu Drähten)	N/mm ² \triangleq MPa
p_v	Leistungsdichte	W/m ³
P	Leistung	W
$P_{\text{Cu,R}}$	Rotorkupferverluste	W
$P_{\text{Cu,S}}$	Statorkupferverluste	W
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{Fe}	Eisenverluste	W
$P_{\text{Fe,R}}$	Rotoreisenverlust	W
$P_{\text{Fe,S}}$	Statoreisenverluste	W
$P_{\text{FW,R}}$	Reibungs- und Lüftungsverluste	W
P_g	Gleichstromverluste (Stromwärmeverluste)	W
P_{in}	Eingangsleistung	W
$P_{\text{LZ,R}}$	Rotorzusatzverluste (lastabhängig)	W
$P_{\text{LZ,S}}$	Statorzusatzverluste (lastabhängig)	W
P_{max}	maximale Leistung	W
P_{mec}	mechanische Leistung	W
P_{out}	Ausgangsleistung	W
P_{rat}	Bemessungsleistung	W
P_t	Gesamtverluste einer elektrischen Maschine	W
P_w	Wechselstromverluste (zusätzliche Stromwärmeverluste)	W
q	Lochzahl	

\dot{Q}	Wärmefluss	W
r_{DKW}	Kantenrundung Draht (Kompaktwicklung)	mm
r_{HP}	Kantenrundung Draht (Hairpinwicklung)	mm
R_{g}	ohmscher Gleichstromwiderstand	Ω
R_{w}	Wechselstromwiderstand	Ω
R_{th}	thermischer Widerstand	K/W
Δt_{S}	Zeitdauer mit Überlastung	s
t_{Verback}	Verbackdauer	s
T	Auftragszeit	min
T_2	Rückhalbwertszeit	s
T_{p}	Scheitelzeit	s
ΔT	Temperaturdifferenz	K
U	elektrische Spannung	V
U_{d}	Durchschlagsspannung	V
U_{max}	maximaler Spannungswert	V
U_{PDEV}	TE-Aussetzspannung	V
U_{PDIV}	TE-Einsatzspannung	V
U_{RPDEV}	wiederholende TE-Aussetzspannung	V
U_{RPDIV}	wiederholende TE-Einsatzspannung	V
$U_{\text{Stoß}}$	Stoßspannung	V
w_{sp}	Spulenwindungszahl	
W	Spulenweite	mm
y	Spulenschritt	
z	Leiteranzahl	
z_{n}	Leiteranzahl je Nut	
z_{sp}	parallele Teileiter je Spule	
z_{v}	Verteilprozentsatz	%
δ	Skintiefe	mm

η	(Gesamt-) Wirkungsgrad	%
$\eta_{\text{Generator}}$	Wirkungsgrad im generatorischen Betrieb	W
η_{Motor}	Wirkungsgrad im motorischen Betrieb	W
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$\lambda_{\text{th,axial}}$	Wärmeleitfähigkeit in axialer Richtung der Nut	W/(m·K)
$\lambda_{\text{th,radial}}$	Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung der Nut	W/(m·K)
$\lambda_{\text{th,res}}$	resultierende Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
μ_0	magnetische Feldkonstante	N/A ²
μ_r	relative Permeabilität	H/m
π	Kreiszahl	
σ_{el}	elektrische Leitfähigkeit	S/m
τ_p	Polteilung	
φ_h	logarithmische Dehnung in Höhenrichtung	
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
