

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> airp <u>i</u> ntechnologie
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

$n_{\text{Drahnte}}$	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 Drahnten)	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 (zusatztliche 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
$U_{\text{Sto\ss}}$	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

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Transformation im Bereich der individuellen Mobilität von konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben hin zu hybriden und letztendlich vollelektrischen Fahrzeugen ist innerhalb der letzten Jahre ein bestimmendes Thema geworden, sowohl in der Automobilindustrie als auch in der Politik. Um die CO₂- und Schadstoffemissionen bei steigender Weltbevölkerung reduzieren zu können und den restriktiven gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Erreichung des 2015 durch die Staatengemeinschaft beschlossenen 2°C Ziels zu entsprechen, ist die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten ein wichtiger Baustein. (Tschöke, Gutzmer & Pfund 2019)

Vor diesem Hintergrund steht auch die notwendige Produktionstechnik zur Herstellung elektrifizierter Antriebsstränge vor neuen Herausforderungen. Sie gilt als ein entscheidender Wettbewerbsfaktor (Fleischer, Lanza & Schulze 2019) und benötigt aktuell einen hohen Forschungsbedarf, verglichen mit der Fertigung verbrennungsmotorischer Antriebsstränge. Zwar werden seit mehr als einem Jahrhundert elektrische Industriemotoren in unterschiedlichsten Größenordnungen und Stückzahlen gefertigt, aber dennoch können die Anforderungen an die Traktionsantriebe nicht erfüllt werden, denn es werden hohe Stückzahlen mit geringen Kosten pro Stück bei besonderen Produkthanforderungen benötigt. Dazu zählt beispielsweise eine hohe Leistungsdichte, ein hoher Wirkungsgrad (geringe Verluste) oder eine geringe Drehmomentenwelligkeit. (Halwas et al. 2020b; e-mobil BW 2021, S. 127) Der aktuelle Stand der Produktionstechnik für Traktionsantriebe kann die Potenziale an deren Leistungsfähigkeiten bei gleichzeitig hohen Stückzahlen und geringen Kosten pro Stück noch nicht vollständig erfüllen. Bei elektrischen Maschinen ist im Allgemeinen – wie bei einer Vielzahl technischer Produkte – die Produktqualität insbesondere vom Herstellungsprozess abhängig. Dementsprechend ist es wichtig, einen parallelen Entwicklungsablauf zwischen Technologie, Produkt und Prozess zu berücksichtigen. (Halwas et al. 2018a)

Die vorliegende wissenschaftliche Abhandlung stellt die Entwicklung eines neuen Prozesses zur Produktion von Statorn elektrischer Traktionsantriebe unter Berücksichtigung der Produkteigenschaften dar. Dabei steht die Steigerung der produktseitigen Leistungsmerkmale im Vordergrund. Thematisch ist die Arbeit folglich im Teil der Produktionstechnik angesiedelt, der mit dem Themenfeld der Wickeltechnik

und der Auslegung elektrischer Maschinen im Umfeld der Traktionsanwendungen eine Schnittmenge bildet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist, wie in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt, aufgebaut. Die Hinführung besteht aus den ersten drei Kapiteln und mündet in der daraus hergeleiteten Konzeption der Kompaktwicklung, die das vierte Kapitel beinhaltet. In den Kapiteln fünf bis sieben wird die im Rahmen der Arbeit durchgeführte wissenschaftliche Auseinandersetzung der Kompaktwicklung vorgestellt, die den Hauptteil umfasst. Das achte Kapitel schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

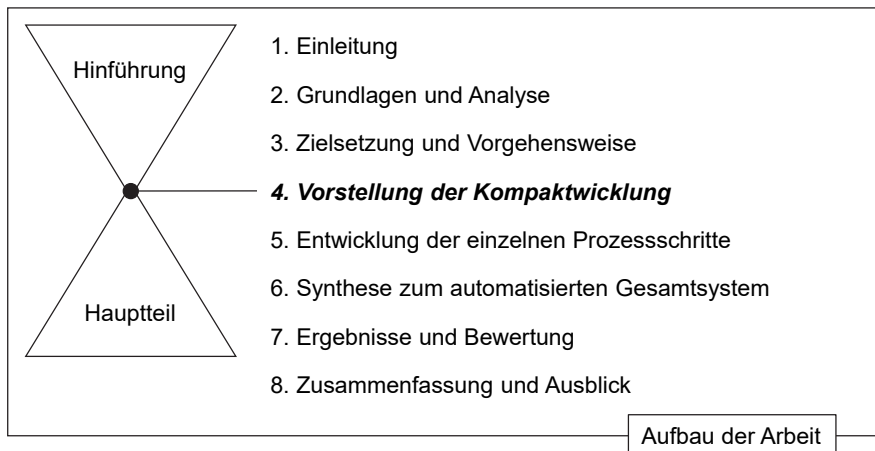


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Aufbaus der vorliegenden Arbeit.

Im zweiten Kapitel werden zunächst die Grundlagen für das Verständnis der Traktionsmaschinen, ihr Aufbau, ihre Funktion und ihre Kenngrößen erläutert. Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass in den Grundlagen ein möglichst umfassendes und allgemeingültiges Verständnis für elektrische Maschinen in ihrer Anwendung als Traktionsantriebe entwickelt wird. Die gewählten Darstellungen sind dementsprechend eine bewusste Vereinfachung und Verallgemeinerung für gängige automobiler Anwendungen, die nicht in jedem speziellen Fall im Detail der Auslegung aller Maschinentypen gerecht werden können. Vielmehr soll eine geeignete Basis zur Beschreibung der Wechselwirkungen und Zusammenhänge mit den sich anschließenden Herstellungsverfahren und -prozessen geschaffen werden. Nach der

ausführlichen Erläuterung und Diskussion der industriell eingesetzten Wickeltechnologien, wird im dritten Kapitel die Zielsetzung und Vorgehensweise aus der Analyse des zweiten Kapitels abgeleitet. Der wesentliche, aus der Analyse resultierende Bedarf, ist die Entwicklung eines neuartigen Wickelprozesses, der die Defizite der aktuell bekannten Produktionstechnologien löst. Das Zielbild des anzustrebenden Wickelprozesses wird im vierten Kapitel vorgestellt. Hier werden die drei entscheidenden Hauptmerkmale der herzustellenden Statorwicklung aufgezeigt. Im fünften Kapitel werden diese Hauptmerkmale untersucht, mit dem Ziel der Entwicklung der Teilschritte eines neuartigen Wickelprozesses. Hierbei liegt der Fokus besonders auf der Wicklungskompaktierung, dieser Prozessschritt ist für die Entwicklung des Kompaktwickelprozesses entscheidend. Nach Auswertung und Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse aus numerischen Modellen und experimentellen Versuchsreihen werden im sechsten Kapitel die Prozessschritte zu automatisierten Gesamtsystemen synthetisiert. Es werden zwei Ansätze des Kompaktwickelprozesses vorgestellt: Zum einen der sequenzielle Kompaktwickelprozess, zum anderen der integrale Kompaktwickelprozess. Die jeweiligen Anforderungen werden aufgezeigt und die Lösungskonzepte vorgestellt. Diese werden nicht nur anhand von virtuellen CAD-Modellen (computer-aided design) dargestellt, sondern auch durch erste Prototypen getestet, welche im Folgenden auch als Versuchsstände bezeichnet werden. Die Werkzeuge und Konzepte des sequenziellen Kompaktwickelprozesses aus Kapitel sechs werden bei den Experimenten im fünften Kapitel bereits verwendet. Die Inhalte der Kapitel fünf und sechs sind während der Bearbeitung des Vorhabens parallel untersucht worden und stehen in starker Wechselwirkung zueinander. Aufgrund des logischen Aufbaus wird zuerst die Analyse und Entwicklung der einzelnen Prozessschritte in Kapitel fünf dargestellt und darauf basierend die Synthese zum automatisierten Gesamtsystem im sechsten Kapitel aufgesetzt. Im siebten Kapitel wird die produktionstechnische Eignung des sequenziellen und integralen Kompaktwickelprozesses anhand der in den Versuchsständen aufgenommenen Fertigungszeiten bewertet. Das Maschinenkonzept der Kompaktwicklung für Statoren in Bezug auf das elektromagnetische und thermische Verhalten wird analysiert. Abschließend werden in Kapitel acht die Arbeitsergebnisse zusammengefasst und mögliche zukünftige Forschungstätigkeiten in diesem Themenfeld im Ausblick erörtert.

2 Grundlagen und Analyse

2.1 Grundlagen elektrischer Traktionsantriebe

Fahrzeugantriebe funktionieren als Energiewandler und können, beispielsweise bei Verwendung von Verbrennungskraftmaschinen, chemische Energie in thermische und mechanische Energie, oder, im Falle elektrischer Maschinen, elektrische Energie in mechanische Energie wandeln (Pischinger & Seiffert 2016). Elektrische Maschinen, die in Fahrzeugen für den Hauptantrieb¹ sorgen, werden als Traktionsmaschinen (Doppelbauer 2020, S. 50) oder Traktionsantriebe (Schramm et al. 2017, S. 215 f.) bezeichnet. Der aktuelle Stand der Technik kennt Mischformen aus Verbrennungskraftmaschinen und elektrischen Maschinen. Diese sind als sogenannte Hybridantriebe bei automobilen Anwendungen weit verbreitet (Tschöke, Gutzmer & Pfund 2019, S. 17). Eine ausführliche Darstellung verschiedener Antriebsstrangtopologien kann in der Grundlagenliteratur bei (Hofmann 2014), (Pischinger & Seiffert 2016), (Richnow 2016) oder (Schramm et al. 2017) nachgeschlagen werden.

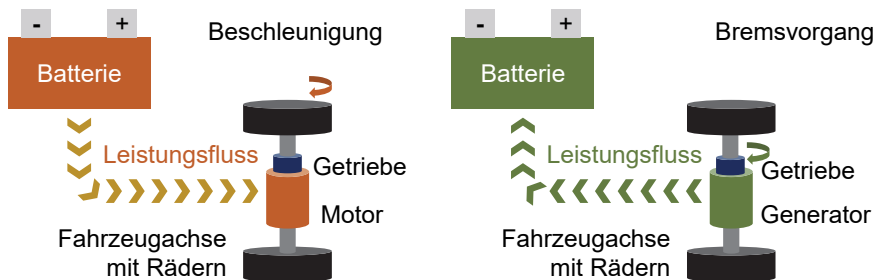


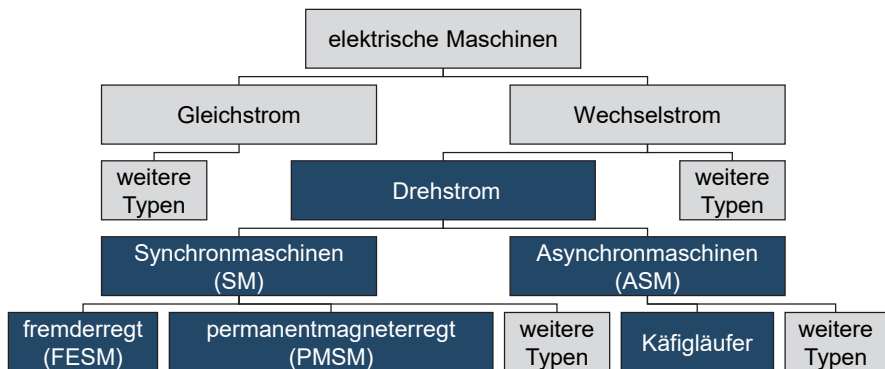
Abbildung 2-1: Traktionsmaschine als Leistungswandler: (links) motorischer Betrieb, (rechts) generatorischer Betrieb / Rekuperation.

Bei elektrischen Maschinen unterscheidet sich die Bezeichnung Motor oder Generator nach der jeweiligen Leistungsrichtung (siehe Abbildung 2-1). Wird elektrische in mechanische Energie gewandelt, wird die Maschine im motorischen Zustand betrieben und als Motor bezeichnet; im umgekehrten Betriebszustand als Generator. (Fischer 2017) Für Traktionsantriebe ist der Generatorbetrieb besonders vorteilhaft, denn die Bewegungsenergie des Fahrzeugs kann durch Nutzung des Traktionsantriebes als

¹ gemeint ist hiermit die Möglichkeit für rein elektrisches Fahren

Generator in Form elektrischer Energie zurück in die Batterie gespeist werden. Dieser Vorgang wird als Rekuperation bezeichnet und erhöht die Reichweite des Fahrzeugs wesentlich. (Karle 2020, S. 29) Im weiteren Kontext der vorliegenden Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit auf die Unterscheidung zwischen Maschinen, Antrieben, Motoren oder Generatoren verzichtet und ausschließlich von elektrischen Maschinen ausgegangen, die für die Anwendung als Traktionsantrieb geeignet sind. (vgl. Németh-Csóka 2018, S.1f.)

Im Allgemeinen sind elektrische Traktionsantriebe nach dieser Logik eine Untergruppe elektrischer Maschinen, wie in Abbildung 2-2 dargestellt. Da Fahrzeuge ihre Kraft in der Regel über Antriebsachsen und letztlich die Räder übertragen (siehe Abbildung 2-1), werden rotierende elektrische Maschinen eingesetzt (vgl. Fischer 2017; Doppelbauer 2020). Aufgrund der hohen Anforderungen an Leistungsdichte, Zuverlässigkeit, Regelbarkeit, Drehmoment- und Drehzahlverhalten, werden in vollelektrischen Fahrzeugen überwiegend Drehstrommaschinen für die Traktion verwendet (Tschöke, Gutzmer & Pfund 2019, S. 32).



■ → Verwendung bei Traktionsantrieben nach Stand der Technik

Abbildung 2-2: Einordnung der geeigneten Maschinentypen für Traktionsantriebe in die Übersicht der elektrischen Maschinen geordnet nach Funktionsprinzip. (eigene und veränderte Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 73))

Am weitesten verbreitet sind Synchronmaschinen (SM) und Asynchronmaschinen (ASM), wobei Synchronmaschinen in fremderregter (FESM) oder permanentmagneterregter (PMSM) Ausführung bei Traktionsantrieben genutzt werden (siehe Abbildung 2-2). (Doppelbauer 2020, S.189)

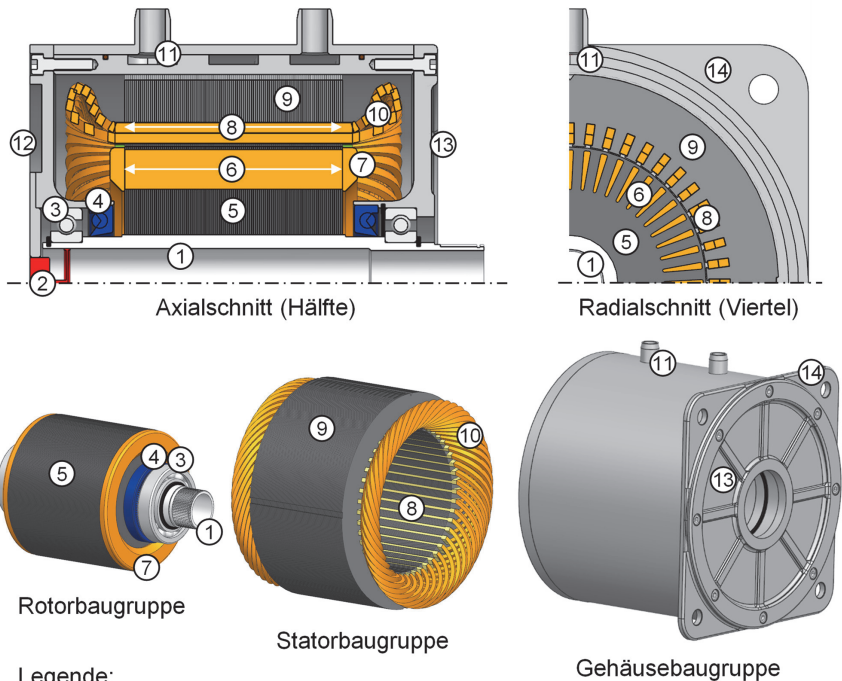
2.1.1 Funktionsweise und Aufbau

Das **Funktionsprinzip** einer Drehstrommaschine, aber prinzipiell auch jeder elektrischen Maschine im Allgemeinen, beruht auf der Kraftwirkung zwischen zwei Magnetfeldern (Marenbach, Jäger & Nelles 2020, S. 68), beziehungsweise Kraftwirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern zueinander (Doppelbauer 2020, S. 210). Die Felder weisen Magnetpole gegensätzlicher Polarität auf, sodass Anziehungskräfte zwischen den Feldern wirken. Die drei entscheidenden Kraftwirkungen bei elektrischen Maschinen zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Leistung sind die Kraftwirkungen magnetischer Felder auf stromdurchflossene Leiter (Lorentzkraft), die Grenzflächenkraft (Reluktanzkraft) und die Kraft auf Permanentmagnete. Theoretisch betrachtet, basiert die erzeugte Kraft fast ausschließlich auf der Reluktanzkraft. (Doppelbauer 2020, S.210) Für die Umsetzung der elektrischen Leistung P_{el} aus dem Produkt aus Strom I und Spannung U in eine mechanische Leistung P_{mec} , zusammengesetzt aus dem Drehmoment M und der Drehzahl n , ist es erforderlich, dass mindestens eines der beiden Magnetfelder rotiert. Dies ist, wie bereits erwähnt, auch in umgekehrter Reihenfolge möglich (siehe Abbildung 2-1, Motor und Generator).

Traktionsmotoren bestehen zur Erfüllung ihrer Funktion aus den drei Hauptbaugruppen Gehäuse, Stator und Rotor (siehe unterer Bereich Abbildung 2-3). Es wird aktuell hauptsächlich die **Radialflussmaschine** für die Traktionsmotoren verwendet, in dieser steht der magnetische Fluss senkrecht zu der Rotorachse. Axialflussmaschinen, bei denen der magnetische Fluss in Richtung der Rotorachse steht, werden aktuell zwar erforscht, jedoch nicht in Serienanwendungen eingesetzt und daher in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt (Doppelbauer 2020, S. 201). Die Komponenten aus der unteren Bildhälfte der Abbildung 2-3 sind in der oberen Hälfte als Axial- und Radialschnitt im Zusammenbau gezeigt.

Das drehende Magnetfeld, häufig als Drehfeld oder Statorfeld bezeichnet, wird bei **Drehstrommaschinen** durch einen dreiphasigen Wechselstrom in der Statorwicklung durch Bestromung der Maschine aufgebaut. Die drei Phasen des Drehstroms sind symmetrisch um 120° zueinander verschoben und werden üblicherweise mit den Großbuchstaben U, V und W bezeichnet. Drehstrom ist also eine spezifische Wechselstromart mit drei Phasen. Das zweite Magnetfeld ist das Rotorfeld und steht bei SM ortsfest zum Rotor, die Drehzahlen von Statorfeld und Rotorbewegung sind

synchron. Bei ASM hingegen ist ein Schlupf des Rotorfeldes zum Rotor vorhanden, die Drehzahl des Rotors läuft dem Statorfeld nach. (Marenbach, Jäger & Nelles 2020; Fischer 2017; Doppelbauer 2020)



Legende:

- | | |
|---------------------|--|
| 1) Rotorwelle | 8) aktive Länge der Statorwicklung |
| 2) Drehgeber | 9) Statorblechpaket |
| 3) Rillenkugellager | 10) Wickelkopf (nicht aktive Länge) der Statorwicklung |
| 4) Dichtring | 11) Gehäusemantel mit Kühlkanälen |
| 5) Rotorblechpaket | 12) Gehäusedeckel der B-Seite |
| 6) Rotorstäbe | 13) Gehäusedeckel der A-Seite |
| 7) Kurzschlussring | 14) Gehäuselasche zu Montage der Maschine |

Abbildung 2-3: Aufbau einer Traktionsmaschine, in der Ausführung als ASM. Obere Reihe: Axialschnitt (links) und Radialschnitt (rechts) der Gesamtbaugruppe. Untere Reihe (von links nach rechts): Rotor-, Stator- und Gehäusebaugruppe einzeln dargestellt. (eigene und veränderte Darstellung nach (Doppelbauer 2020, S. 200))

Das **Gehäuse** eines Traktionsantriebes ist nach außen zur Umwelt abgedichtet, um die innenliegenden Komponenten vor Verschmutzungen und schädlichen

Umwelteinflüssen zu schützen, aber auch um den Austritt von Öl und Kühlmittel zu verhindern. Das Gehäuse beinhaltet bei Einsatz einer Mantelkühlung zudem Kühlkanäle, die von einer Kühlflüssigkeit durchströmt werden. Zur Kühlung von Traktionsmaschinen werden üblicherweise Öle oder Wasser-Glykol-Gemische verwendet. Bei Traktionsmotoren ist die beschriebene Flüssigkeitskühlung im Gehäusemantel üblich. (Doppelbauer 2020, S. 45-46)

Der **Stator** ist fest im Gehäuse montiert, sodass die entstehenden Kräfte während des Betriebs über das Gehäuse an die Karosserie geleitet werden können. Zudem wird die entstehende Verlustwärme über die zylindrische Statoraußenfläche in den Kühlmantel des Gehäuses abgeführt. (Doppelbauer 2020, S. 200, f.)

Der **Rotor** ist im Gehäuse drehbar gelagert und koaxial zur Statorbohrung positioniert. Hierbei werden in der Regel Rillenkugellager eingesetzt. Die Abtriebsseite der Rotorwelle wird aus dem Gehäuse geführt und im Allgemeinen als A-Seite bezeichnet. Die gegenüberliegende B-Seite ist in der Regel geschlossen, ein Lagesensor kann angebracht sein. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass es sich in diesem Fall um einen sogenannten Innenläufer handelt, der Rotor folglich im Stator läuft. Die umgekehrte Bauform, bei der der Rotor um den Stator läuft, wird als Außenläufer bezeichnet, ändert jedoch das elektromagnetische Wirkprinzip nicht. (Doppelbauer 2020, S. 200, f.) Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grundlagen von Traktionsantrieben sowie ihre Fertigungstechnologien anhand der aktuell häufiger eingesetzten Innenläufer beschrieben; auch das verwendete Anwendungsbeispiel ist ein Innenläufer (vgl. Abbildung 2-3).

Der hier zugrunde gelegte und näher beschriebene Aufbau von Drehstrommaschinen ist den Quellen (Fischer 2017) und (Schröder 2017) entnommen, spezifische Inhalte zu Traktionsantrieben sind (Tschöke, Gutzmer & Pfund 2019), (Babel 2020), (Doppelbauer 2020) und (Stan 2020) entlehnt. Der vorgestellte mechanische Aufbau eines Traktionsantriebes aus Abbildung 2-3 wird im Laufe dieses Vorhabens als Anwendungsbeispiel genutzt und wurde dafür in einem CAD-Modell aufgebaut. Die Geometrie des Stators basiert auf der elektrischen Maschine des Forschungsprojektes **NeWire**² (Winter et al. 2021), die übrigen Komponenten wurden frei, aber in

² „NeWire“ steht als Akronym für die Abkürzung „Neuartige serienflexible Wickelverfahren für die wirtschaftliche automatisierte Fertigung von hoch performanten elektrischen Maschinen“ für ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt mit dem Förderkennzeichen 02P16A00X.

Anlehnung an den aktuellen Stand der Technik für Traktionsantriebe (Doppelbauer 2020) aufgebaut. Beachtlich ist dabei, dass die Bauformen ASM, PMSM und FESM im Rahmen der Arbeit variiert werden, um an diversen Stellen passende Beispiele geben zu können. In der realen Anwendung wäre in der Auslegung und Konstruktion dieser Maschinentypen noch weitergehend zu differenzieren.

2.1.2 Allgemeine Kenngrößen

Eine Übersicht zentraler Kenngrößen für die Beschreibung und Auslegung der Leistung von elektrischen Maschinen ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Übersicht der Leistungskenngrößen von Drehstrommaschinen; im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit als Eigenschaften der Drehstrommaschine bezeichnet. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2019) und (Halwas et al. 2020b), Formelzeichen in Anlehnung an DIN EN 60027-4:2008-03 und DIN 1304-1:1994-03)

Formelzeichen	Kenngröße	Einheit
M_{\max}	maximales Drehmoment	N·m
M_{rat}	Bemessungsdrehmoment	N·m
P_{\max}	maximale Leistung	W
P_{rat}	Bemessungsleistung	W
n_{\max}	maximale Drehzahl	1/s
n_{rat}	Bemessungsdrehzahl	1/s
Δt_S	Zeitdauer mit Überlastung	s
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{mec}	mechanische Leistung	W
P_{in}	Eingangsleistung	W
P_{out}	Ausgangsleistung	W
P_t	Verlustleistung	W
η	Wirkungsgrad	%
p_m	Leistungsgewicht	W/kg
p_v	Leistungsdichte	W/m ³

Bei der Betrachtung elektrischer Maschinen ist zu beachten, dass beispielsweise bei den Leistungsgrößen Drehmoment, Leistung und Drehzahl **Maximalwerte** und **Bemessungswerte** eingetragen sind. Eine Maschine darf grundsätzlich nur kurzzeitig (Δt_S) mit den maximalen Werten belastet werden, die Bemessungswerte hingegen

beschreiben die im Dauerbetrieb maximal zulässigen Werte, nach denen die Maschine in der Auslegung bemessen wurde (Busch 2015, S. 356). Bei Traktionsantrieben wird der Dauerbetrieb auch häufig als S1-Betrieb bezeichnet, während der Kurzzeitbetrieb S2-Betrieb genannt wird (Richnow 2016, S. 20). Die Differenz der maximalen Werte zu den Bemessungswerten wird durch die zeitliche Verzögerung der Erwärmung der Maschine während des Betriebs verursacht, denn der Wärmeeintrag wird durch die Verluste in den Komponenten in der Maschine hervorgerufen (Oechslen 2018). Eine wichtige Randbedingung ist die Temperaturgrenze, die durch Wärmeklassen (siehe Kapitel 2.2.3) der Isolierstoffe vorgegeben wird und nicht dauerhaft überschritten werden darf (Doppelbauer 2020, S.45-46). Die maximal erreichbare Drehzahl hingegen wird in erster Linie von der mechanischen Stabilität des Rotors bestimmt. Somit ist es möglich, elektrische Maschinen kurzzeitig mit Überlast zu betreiben. Weitere Grundlagen zu den Verlusten und den Zusammenhängen zwischen Leistung und Kühlung werden in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

Die in Tabelle 2-1 enthaltenen Kenngrößen – als auch darüberhinausgehende, hier nicht aufgeführte Kenngrößen – werden in dieser Arbeit als **Eigenschaften** bezeichnet, weil sie neben der Anwendung in den Berechnungen in der Auslegung auch die Leistungsfähigkeit (oder Performance) der realexistierenden Maschine als Messwerte auf dem Prüfstand beschreiben. Diese Definition ist der VDI-Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 entlehnt, dort wird eine Eigenschaft auch als „aufgrund von Beobachtungen, Messergebnissen, allgemein akzeptierten Aussagen usw. von einem Objekt festgestelltes Ergebnis“ (VDI 2221 Blatt 1:2019-11) definiert. Die weiteren für diese Arbeit entscheidenden Begrifflichkeiten sind in Tabelle 2-2 aufgelistet und werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die tiefergehenden physikalischen, elektromagnetischen Zusammenhänge wie die Maschinengleichung, sind der umfangreichen Grundlagenliteratur bei (Fischer 2017), (Müller & Ponick 2014) oder (Bolte 2018) zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Übersicht der für diese Arbeit gewählten Begriffsdefinitionen für Bezeichnungen in der Produktentwicklung. Die Beispiele wurden im Zusammenhang mit dieser Arbeit für Traktionsmaschinen ausgeführt. (eigene und erweiterte Übersicht nach (Zingel 2013; Bender et al. 2021; Albers & Wintergerst 2014; VDI 2221 Blatt 1:2019-11))

Bezeichnung	Beschreibung	Beispiel
Produkt	Materielles Erzeugnis (häufig gemeint: technisches System) oder immaterielle (Dienst-)Leistung zur Befriedigung von Bedürfnissen der adressierten Nutzer.	Traktionsmaschine
Merkmal	Charakteristikum eines Produktes, das durch den Entwickler beeinflusst werden kann.	Leitermaterial
Ausprägung	Eine spezifische Merkmalausprägung von möglicherweise vielen Ausführungsmöglichkeiten eines Merkmals. Die Ausprägung kann direkt durch den Entwickler ausgewählt werden.	Kupfer
Gestalt	Die aus der Summe aller Ausprägungen resultierende physische Struktur eines Produktes.	Reale Umsetzung eines Prototyps einer Traktionsmaschine
Funktion	Die Funktion beschreibt die Erfüllung einer Aufgabe in Abhängigkeit von Eingangs-, Ausgangsgrößen und der Gestalt des Produktes.	Wandlung von elektrischer in mechanische Energie
Gestalt - Funktion - Zusammenhang	Der Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion resultiert im Systemverhalten. Dieses kann zum Beispiel durch Matrizen, Formeln oder anderen graphischen Darstellungen abgebildet werden.	Statorwicklung \leftrightarrow magnetisches Feld
Eigenschaft	Eine Eigenschaft ist ein Attribut des Produktes, das sich aus dem Gestalt - Funktion - Zusammenhang ergibt und nicht unmittelbar durch den Entwickler beeinflusst werden kann.	Dauerleistung

Traktionsmaschinen, die in diesem Zusammenhang als **Produkt** verstanden werden, haben individuelle Ausprägungen von **Merkmalen**, die ihre Eigenschaften bestimmen und beeinflussen. Diese Merkmale können zum Beispiel grundlegende geometrische Größen sein. Die **Ausprägung** bezeichnet dementsprechend ein ausgewähltes Merkmal, die **Gestalt** bezeichnet die Summe aller Ausprägungen des Produkts. Wird

ein Input (Eingangsgröße) in das System eingebracht und daraus ein entsprechender Output (Ausgangsgröße) erzeugt, erfüllt das Produkt eine **Funktion**. Die geleistete Funktion ist stark von der Gestalt des Produkts abhängig, diese Wechselwirkung nennt sich **Gestalt - Funktion - Zusammenhang**. (Zingel 2013; Bender et al. 2021; Albers & Wintergerst 2014; VDI 2221 Blatt 1:2019-11)

Am Beispiel einer Traktionsmaschine kann der oben beschriebene Zusammenhang durch die Variation der unterschiedlichen Ausprägungen der geometrischen Merkmale (siehe Tabelle 2-3) verdeutlicht werden. Wird der Maschinendurchmesser³ vergrößert, werden sich die hiervon abhängigen Funktionen, wie etwa die Drehmomentbildung, verändern. Diese Funktionen ergeben die resultierenden Eigenschaften des Produkts Traktionsmaschine. Es ist im Fall einer vereinfachten und idealisierten Maschine bei einer Durchmesservergrößerung bei gleichbleibender Drehzahl anzunehmen, dass das Drehmoment steigt und somit auch die Leistung zunimmt. Dies ist durch die folgenden Formeln (vgl. Doppelbauer 2020, S. 210, 211) erkennbar:

$$P_{\text{mec}} = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi n \quad \text{Formel 2-1}$$

$$M \cong \frac{d}{2} \cdot \sum F \cong \frac{d}{2} \cdot z \cdot I \cdot l \cdot B \quad \text{Formel 2-2}$$

Die mechanische Leistung P_{mec} wird durch das Drehmoment M multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit ω bestimmt, letztere ist um den Faktor 2π proportional zur Dehzahl n (siehe Formel 2-1). Das Drehmoment einer elektrischen Maschine berechnet sich unter Berücksichtigung der Lorentzkraft näherungsweise aus den am halben Durchmesser $d/2$ aufsummierten Kräften F , die sich aus den mit Strom I durchflossenen Leitern z über die aktive Länge l und der Flussdichte B ergeben (siehe Formel 2-2). Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Vereinfachungen nicht allgemeingültig auf Maschinen übertragen werden können, wenn eine Leistungssteigerung oder ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden soll. Denn eine Drehmomentsteigerung ist nicht ohne ein höheres Eigengewicht der Stator-, Rotor- und Gehäusekomponenten umzusetzen. Dies verursacht zum Beispiel auch höhere Reibungs- und Luftverwirbelungsverluste. (Doppelbauer 2020, S. 230) Weiterhin sinkt die maximal erreichbare Drehzahl der Maschine, denn Oberflächengeschwindigkeiten, die die Berstdrehzahl bestimmen, nehmen bei höheren Rotordurchmessern zu.

³ Eine spezifische Maßangabe in mm ist zum Beispiel eine Ausprägung des Merkmals „Maschinendurchmesser“.

Literaturwerte für maximal zulässige Werte der Oberflächengeschwindigkeiten für Traktionsmaschinen liegen je nach Rotorbauart zwischen 100 m/s bis 140 m/s. Ein solider Stahlzylinder ist mit 240 m/s angegeben. (Doppelbauer 2020, S. 213) Elektrische Maschinen sind dementsprechend komplexe Systeme, deren Merkmalsausprägungen nicht nur die Eigenschaften beeinflussen, sondern weiterhin Wechselwirkungen zwischen ihren Merkmalen und Eigenschaften aufweisen. Um eine Leistungssteigerung ($\uparrow P_{mec}$) zu erzielen, ist es bei Traktionsantrieben nach aktuellem Stand der Technik allgemein ratsam, eine Drehzahlsteigerung anzustreben, anstatt eine Drehmomentsteigerung zu erwägen. Die Drehzahlsteigerung kann durch eine Anpassung der Getriebeübersetzung ausgeglichen werden, eine Erhöhung des Drehmoments kann nur durch eine größere Maschinengestalt, beispielsweise die Durchmessererhöhung ($\uparrow d$) realisiert werden. Dies führt dann zu einer ungünstigeren Leistungsdichte. (Doppelbauer 2020; Hofmann 2014)

Im weiteren Verlauf wird zusätzlich der Begriff **Performanceeigenschaften** verwendet. Dieser soll diejenigen Eigenschaften des Traktionsantriebes zusammenfassen, die für das Betriebsverhalten entscheidend sind. Hierzu zählen insbesondere die folgenden Eigenschaften: Bemessungsleistung, maximales Drehmoment, maximale Drehzahl, Leistungsgewicht, Wirkungsgrad, zulässige Dauer der Überlast, Verluste (stehen in Zusammenhang mit Wirkungsgrad), Drehmomentenwelligkeit und Rastmoment. (vgl. Halwas et al. 2019) Die genannten Performanceeigenschaften sollen im Rahmen dieses Vorhabens auch als Anforderungen für Traktionsantriebe gelten und jeweils möglichst groß oder klein sein.

Weiterhin ist bei den Merkmalen zu berücksichtigen, dass ihre Ausprägungen auch wesentlich durch ihre **Herstellung** bestimmt werden. Beispielsweise ist kein Fertigungsverfahren oder -prozess im Allgemeinen fähig, exakte Bauteile oder Baugruppen ohne Toleranzen herzustellen (vgl. Labisch & Wählich 2020). Diese Fertigungstoleranzen, aber auch Fertigungsfehler wie die Beschädigung der Isolation, Querschnittsveränderungen der Leiter oder zu große Leitungslängen (einige Fertigungsverfahren verursachen hohe Wickelköpfe), können zu verschlechterten Werten der Eigenschaften führen. Die beschriebenen Ausprägungen jeder Maschine bestimmen letztendlich die Qualität der Eigenschaften der Maschine und somit ihre Leistungsfähigkeit. Im Folgenden werden die vorrangigen Toleranzabweichungen der Fertigungsverfahren und -prozesse nicht betrachtet. Stattdessen wird ein neuartiger Fertigungsprozess erarbeitet, der möglichst vorteilhafte Ausprägungen der Merkmale

einer Maschine erzeugen kann. Hierfür werden im weiteren Verlauf die Eigenschaften mit Einfluss auf die Performance und die dazugehörigen Verlustmechanismen von Traktionsantrieben untersucht, um die entscheidenden Merkmale und deren Ausprägungen zu definieren. Auf der Basis dieser Analyse kann im Anschluss eine gezielte Prozessentwicklung durchgeführt werden. (Halwas et al. 2019; Halwas et al. 2020b)

Tabelle 2-3: Übersicht grundlegender geometrischer und verwandter Kenngrößen von Drehstrommaschinen; im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit gemeinsam mit anderen Kenngrößen als Merkmale bezeichnet. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2019) und (Halwas et al. 2020b), Formelzeichen orientiert an DIN EN 60027-4:2008-03 und DIN 1304-1:1994-03)

Formelzeichen	Kenngröße	Einheit
l_{Welle}	Länge der Maschinenwelle	mm
l_{Stator}	Statorlänge	mm
l_{Rotor}	Rotorlänge	mm
D_{Rotor}	Rotoraußendurchmesser	mm
d_{Stator}	Statorinnendurchmesser	mm
D_{Stator}	Statoraußendurchmesser	mm
m_{Maschine}	Gewicht der Maschine	kg

2.1.3 Verluste und Wirkungsgrad

Die gesamten **Verluste** P_t einer elektrischen Maschine ergeben sich aus der Differenz zwischen Eingangsleistung P_{in} und Ausgangsleistung P_{out} . (Doppelbauer 2020, S. 227 ff.)

$$P_t = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \qquad \text{Formel 2-3}$$

Je niedriger die Verluste P_t einer Maschine sind, desto höher ist auch der daraus errechnete **Gesamtwirkungsgrad** η . Der – rein theoretisch betrachtete – maximal erreichbare Wirkungsgrad von $\eta = 100\%$ bei $P_t = 0$ ist in einer realen Maschine nicht umsetzbar, da die Verluste nicht vollständig reduziert werden können. Allerdings kommen derzeitige elektrische Traktionsantriebe auf Wirkungsgrade zwischen 85 % bis 97 %, in entsprechend günstigen Drehmoment- und Drehzahlbereichen (Schramm et al. 2017, S. 217; Doppelbauer 2020, S. 48). Dabei ist zu beachten, dass der

Wirkungsgrad innerhalb der gleichen Maschinentypen stark von der gewählten Auslegung und dem betrachteten Betriebspunkt der entsprechenden Maschine abhängt. Vergleichsweise besitzen konventionelle Verbrennungskraftmaschinen, zum Beispiel in Form von direkteinspritzenden Dieselmotoren für Kraftfahrzeuge, maximal erreichbare Wirkungsgrade von circa 44 % (Tschöke, Mollenhauer & Maier 2018, S. 996).

Für den Wirkungsgrad elektrischer Antriebe im motorischen Betrieb gilt:

$$\eta_{\text{Motor}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{el}}} \quad \text{Formel 2-4}$$

Für den Wirkungsgrad des generatorischen Betriebs gilt:

$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{mec}}} \quad \text{Formel 2-5}$$

Verluste P_v , die bei elektrischen Maschinen auftreten, lassen sich anhand der Betrachtung des Leistungsflusses durch einen Elektromotor nachvollziehen. Als Eingangsleistung P_{in} liegt die elektrische Leistung P_{el} in Form von Spannung U und Strom I an der Wicklung des Stators an. Im Stator wird die elektrische Energie zur Erzeugung des elektromagnetischen Drehfeldes genutzt, das die Energie über den Luftspalt überträgt. Dieses prägt eine Kraftwirkung auf den Rotor, dessen Ausgangsleistung P_{out} der mechanischen Leistung P_{mec} entspricht. Während der Energiewandlung werden in den Komponenten des Motors verschiedene Verluste abgezweigt.

In Abbildung 2-4 werden die Verluste eines elektrischen Antriebes an den Baugruppen Stator und Rotor entlang des Leistungsflusses durch die Maschine zusammenfassend dargestellt. Diese Darstellung der Verluste wird für die vorliegende Arbeit als hinreichend erachtet, trotzdem ist darauf hinzuweisen, dass weitere Einteilungen – wie beispielsweise nach der Verlustart (elektromagnetisch und mechanisch) – vorgenommen werden können (vgl. Bauer 2019, S.14).

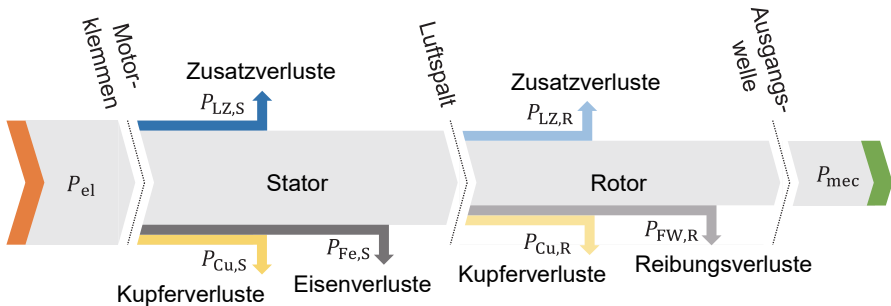


Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung des Leistungsflusses und der Verluste in den Baugruppen Stator und Rotor (eigene und veränderte Darstellung nach (Doppelbauer 2020, S. 228))

Es ergeben sich bei der Bestromung der Wicklung **Statorkupferverluste** $P_{Cu,S}$, die auch als **Stromwärmeverluste** der Statorwicklung bezeichnet werden, denn die Verluste werden in Wärme umgewandelt und müssen über die Kühlung abgeführt werden (vgl. Kapitel 2.1.2). Weil bei Stator und Rotor im Allgemeinen Kupfer das bevorzugte Leitermaterial ist, wird von Kupferverlusten gesprochen. (Oechslen 2018) Die Kupferverluste können dabei in durch Gleichstrom- und Wechselstromeffekte verursachte Anteile aufgeteilt werden. Bei der Bestromung eines Leiters mit Gleichstrom tritt eine Erwärmung durch die ohmschen Verluste ($I^2 \cdot R_g$), unter Annahme einer gleichmäßig bestromten Querschnittsfläche, auf. Nach dem ohmschen Gesetz besitzen alle elektrisch leitenden Metalle einen elektrischen Widerstand R_g , mit Ausnahme der sogenannten Supraleiter. (Pyrhönen et al. 2008, S.255; Busch 2015) Bei der Bestromung mit Wechselstrom treten neben den Wärmeverlusten durch den ohmschen Widerstand weitere Effekte auf, denn es entstehen höhere Leiterwiderstände durch inhomogene Stromdichteverteilungen aufgrund der Stromverdrängung. Die gedankliche Differenz aus Gleichstrom- und Wechselstromverlusten ist durch den Begriff der zusätzlichen Stromwärmeverluste geprägt. Zusätzliche Stromwärmeverluste werden im Wesentlichen durch den Skin-Effekt, den Proximity-Effekt und durch Kreisströme verursacht. Das Verhältnis von Wechselstromverlusten P_w zu Gleichstromverlusten P_g , beziehungsweise dem Wechselstromwiderstand R_w zum Gleichstromwiderstand R_g , ergibt den

Widerstandserhöhungsfaktor k_r (siehe Formel 2-6). Dieser beschreibt, wie anfällig ein Körper, zum Beispiel ein Kupferleiter einer elektrischen Maschine, auf die Stromverdrängung ist. Der Widerstandserhöhungsfaktor hängt von der Frequenz des Wechselstroms, den geometrischen Ausprägungen und den Materialkennwerten des Körpers ab. Auch die umgebenden Körper haben mit ihren jeweiligen Geometrien und Materialien einen Einfluss auf die Stromverdrängung. (Junginger 2016, S. 13 ff.)

$$k_r = \frac{P_w}{P_g} = \frac{R_w}{R_g} \quad \text{Formel 2-6}$$

Der **Skin-Effekt** beschreibt ein Phänomen, bei dem die Stromdichte in Richtung des Leiterrandes (Skin = Haut) höher ist als in der Mitte des Leiters, wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Ein einzelner mit Wechselstrom durchflossener Leiter ruft ein magnetisches Wechselfeld hervor. Das magnetische Wechselfeld beeinflusst die Stromdichteverteilung im selben Leiter aufgrund der Induktion von Wirbelströmen. (Pyrhönen et al. 2008, S. 256 ff.; Carstensen 2008, S. 31 ff.)

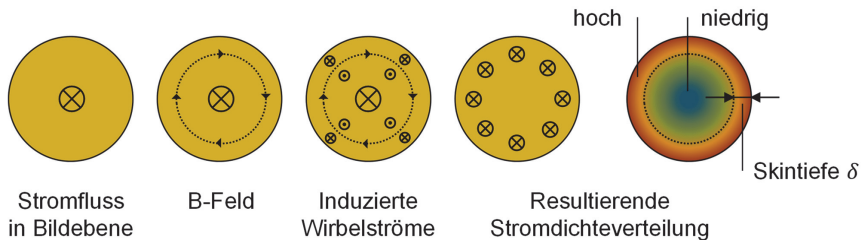


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Skin-Effekts in einem Rundleiter. (eigene Darstellung nach (Bauer 2019, S. 33))

Der Abstand vom Leiterrand bis zum Wert $1/e \approx 0,37$ des maximalen Wertes der Stromdichte wird als Skintiefe δ oder auch als Eindringmaß bezeichnet. Die Skintiefe wird durch die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ (Ivers-Tiffée & Münch 2007, S. 211), die elektrische Leitfähigkeit des Leitermaterials σ_{el} und die Frequenz f gemäß der Formel 2-7 bestimmt. (Pyrhönen et al. 2008, S. 256 ff.; Carstensen 2008, S. 31 ff.) Die angegebene Formel der Skintiefe gilt bei Rundleitern für den vereinfachten Fall, dass die Skintiefe erheblich kleiner ausfällt als der Leiterradius. (Mathis & Reibing 2017, S. 434)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma_{el} f}} \quad \text{Formel 2-7}$$

Aus dem dargestellten Zusammenhang folgt, dass die Verluste durch den Skin-Effekt mit steigender Frequenz zunehmen. Die übrigen Werte sind entweder Konstanten (π , μ_0) oder materialabhängige Größen (σ_{el}). Für technisch als elektrische Leiter geeignete Werkstoffe sind die Verläufe der Skintiefe über die steigende Frequenz bis 30 kHz in Abbildung 2-6 dargestellt. Die elektrische Leitfähigkeit σ_{el} für Leitkupfer⁴ wurde mit $58 \cdot 10^6$ S/m (DIN EN 13602:2013-09; vgl. International Annealed Copper Standard (IACS):1914-10), für Leitaluminium mit $36 \cdot 10^6$ S/m (Ivers-Tiffée & Münch 2007, S. 81) und für Silber mit $61,4 \cdot 10^6$ S/m (Böge & Plaßmann 2007, S. 227) angenommen. Im Allgemeinen beeinflusst auch die Zusammensetzung und Reinheit der Leiterwerkstoffe die elektrische Leitfähigkeit. Zum Beispiel kann eine Reduktion des Sauerstoffgehalts bis nahe 0 % im Leitkupfer die Leitfähigkeit um 2 S/m verbessern (vgl. Deutsches Kupferinstitut 2022a; Deutsches Kupferinstitut 2022b).

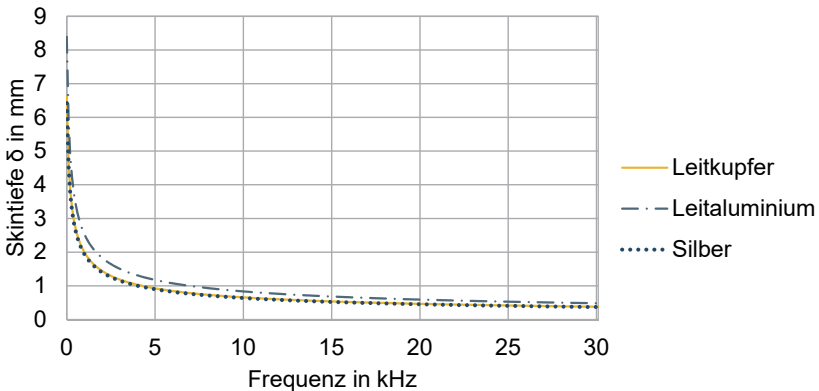


Abbildung 2-6: Abnahme der Skintiefe für Leitkupfer, Leitaluminium und Silber über steigende Frequenz des anliegenden Wechselstroms.

Es ist erkennbar, dass ab einer Frequenz von etwa 5 kHz bei Leitkupfer eine Skintiefe von 1 mm unterschritten wird. Üblicherweise werden bei den meisten

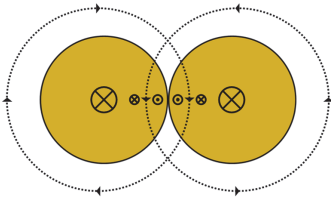
⁴ Leitkupfer und Leitaluminium bezeichnet in diesem Zusammenhang die Werkstoffe Kupfer und Aluminium für die spezielle Verwendung als elektrische Leiter.

Runddrahtwicklungen Leiterdurchmesser von circa 0,5 mm bis 2,5 mm eingesetzt (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 180), folglich bewegen sich die Leiterradien in einer ähnlichen Größenordnung wie die zu erwartenden Skintiefen. Wenn der Leiterradius kleiner oder gleich der Skintiefe ist, kann angenommen werden, dass die durch den Skin-Effekt hervorgerufenen Stromverdrängungsverluste vernachlässigbar sind. Die Verlustzunahme durch den Skin-Effekt beim gleichen Wert von Leiterradius und Skintiefe beträgt dann nur noch 2 %. (Carstensen 2008, S. 31)

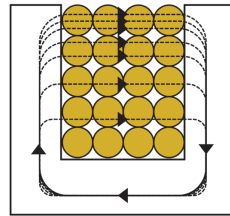
Aus dieser Betrachtung folgt, dass die Verwendung von vielen kleinen Teileitern die durch den Skin-Effekt verursachten Verluste reduziert, im Vergleich zu einem Leiter großen Querschnitts mit äquivalenter Fläche. Dementsprechend ist die Verwendung von vielen einzelnen Teileitern mit geringen Durchmessern eine Möglichkeit zur Reduktion der Verluste durch den Skin-Effekt.

Der **Proximity-Effekt** beschreibt die inhomogene Stromdichteverteilung aufgrund von Wirbelströmen innerhalb eines Leiters durch Einwirkung eines externen magnetischen Feldes (Carstensen 2008, S. 33). Dieser Effekt tritt auch auf, wenn zwei oder mehr mit Wechselstrom durchflossene Leiter nahe beieinander liegen und somit die Stromdichte im Querschnitt der Leiter gegenseitig beeinflussen (vgl. Abbildung 2-7 links). Daraus leitet sich der Name Proximity-Effekt oder auch Nachbarschaftseffekt ab. Bei elektrischen Maschinen beeinflussen sich die Leiter innerhalb einer Nut und Phase zueinander vernachlässigbar⁵, vielmehr wirken Streufelder als externe Magnetfelder auf die Leiter der Wicklung ein. Dazu zählen das Nut-, Zahnkopf-, Wicklungskopf- und Polstrefeld. (Müller, Vogt & Ponick 2008, S. 297 f.) Der Proximity-Effekt soll am Beispiel des Statornutstrefeldes weitergehend erläutert werden. Das Nutstrefeld stellt, vereinfacht ausgedrückt, einen ungewünschten Kurzschluss des magnetischen Feldes durch die Nut zwischen den benachbarten Zahnflanken dar. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der magnetische Fluss des Nutstrefeldes am Nutgrund Null beträgt und zur Nutöffnung in Richtung des Luftspaltes zum Rotor hin zunimmt, wie schematisch auf der rechten Seite der Abbildung 2-7 dargestellt. (Binder 2017, S. 285 f.) Die unteren Leiter am Nutgrund werden geringfügig vom Proximity-Effekt beeinflusst, während die oberen Leiter in der Nut nahe dem Nutschlitz am stärksten beeinflusst werden.

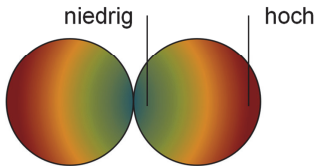
⁵ Bei Mehrschichtwicklungen mit mehreren Spulenschenkeln innerhalb einer Nut und unterschiedlichen Phasenlagen kann sich der Proximity-Effekt zwischen den Leitern einer Nut stärker bemerkbar machen.



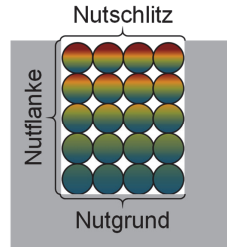
B-Felder und induzierte Wirbelströme bei benachbarten Leitern



B-Feld (Nutstreiffluss) in Nuten elektrischer Maschinen



Verluste durch Proximity-Effekt bei benachbarten Leitern



Verluste durch Proximity-Effekt in Nuten elektrischer Maschinen

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des Proximity-Effekts in benachbarten Rundleitern (links) und einer exemplarischen Statornut (rechts). (eigene Darstellung nach (Iwasaki et al. 2009; Bauer 2019, S. 33 f.))

Analog zum Skin-Effekt lassen sich die durch den Proximity-Effekt hervorgerufenen Verluste durch eine Verringerung der Leiterdurchmesser reduzieren (Iwasaki et al. 2009). Besonders aber durch die Einwirkung des Nutstreifefelds in Richtung der Nutöffnung, können die Verluste durch die Reduktion der Durchmesser nicht vollständig vernachlässigbar reduziert werden. Dementsprechend werden weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Stromwärmeverluste durch den Proximity-Effekt angewandt. Eine passende Auslegung der Nutgeometrie, besonders an der Nutöffnung, kann zur Verringerung des Proximity-Effektes in elektrischen Maschinen führen (Gonzalez & Saban 2014). Weiterhin kann der Nutstreiffluss in Querrichtung der Nutöffnung reduziert werden, wenn an den äußeren Kanten der Statorzähne in Richtung des Luftspalts eine hohe magnetische Sättigung vorliegt und dadurch die zusätzlichen Stromwärmeverluste in den Leitern der Wicklung verringert werden (Reddy, Jahns & El-Refaei 2008). Der Luftspalt bezeichnet bei elektrischen Maschinen den Spalt, der

zwischen Rotor und Stator vorhanden sein muss. Bei der Verwendung von Litzenleitern kann die Verdrehung der Teilleiter auch zur Reduktion der Wechselstromverluste durch Stromverdrängung genutzt werden (Stöck 2016; Vogt 2019; Müller, Vogt & Ponick 2008).

Neben den durch die Stromverdrängung verursachten Widerstandserhöhungen, sind häufig **Kreisströme** für weitere Stromwärmeverluste ursächlich. Kreisströme, die auch als Ausgleichsströme bezeichnet werden, treten immer dann auf, wenn verschiedene Spannungspotenziale innerhalb der elektrisch leitenden Komponenten induziert werden. Die Spannungen werden in der Regel durch die Änderung der magnetischen Flussdichte induziert, zum Beispiel in Statorwicklungen durch veränderlichen Stromfluss (Wechselstrom), Drehung des Rotormagnetfeldes oder die zeitliche Veränderung des Nutstreifflusses. Kreisströme treten insbesondere bei der Anwendung einer Dreieckschaltung der Phasen U, V und W in einer Drehstrommaschine auf. Bei Verwendung einer Sternschaltung wird dies vermieden. (Binder 2017, S. 171, S. 333 f.) Auch innerhalb der Wicklungen treten Kreisströme auf. Bei der Parallelschaltung von Wicklungszweigen in elektrischen Maschinen werden Kreisströme durch die Oberwellen induziert. Durch eine geeignete Auslegung der Polzahl, Ordnungszahl und Ausführung der parallelen Wicklungszweige können Kreisströme reduziert werden. (Oberretl 1969; Binder 2017, S. 335) Eine weitere Möglichkeit die Kreisströme in elektrischen Leitern und damit die Stromwärmeverluste zu reduzieren, stellt die Anwendung sogenannter Roebelstabwicklungen (Roebel 1912) dar. Die in den Nuten der elektrischen Maschine eingebrachten Roebelstäbe können die Kreisströme aufgrund induzierter Spannungen des inhomogenen Nutquerfeldes reduzieren. Mittels Durchlaufens der Leiter von Nutgrund zur Nutöffnung, radial zur Maschinenachse durch eine Kröpfung, werden alle Leiter gleichmäßig durch das Nutstreufeld geführt und die induzierten Spannungspotenziale reduziert. (Fischer 2017, S.341 f.; Sequenz et al. 1973, S. 70) Roebelstäbe werden nach dem aktuellen Stand der Technik besonders in großen elektrischen Generatoren eingesetzt, denn der Wicklungsaufbau ist komplex, erhöht den Fertigungsaufwand und benötigt mehr Raum in der Nut, sodass diese Wicklungsart häufig nicht bei kleineren Baureihen eingesetzt werden kann. Neuartige Ansätze mittels additiv gefertigter Roebelstäbe versuchen, den Einsatz von Roebelstäben auch in den Baugrößen von Traktionsantrieben zu ermöglichen. (Jung, Helm & Liebold 2021) Auch bei Spulen, die aus einzelnen parallelgeschalteten Leitern mit kleinen Durchmessern bestehen, können

unterschiedliche Spannungspotenziale vorliegen, was wiederum zu kleinen Kreisströmen führen kann. Hier kann eine geeignete, radial geschichtete Anordnung der parallelen Teilleiter in der Nut, ein Litzenleiter oder eine Verdrehung der einzelnen Leiter einer Teilspule im Wickelkopf zur Reduktion der Ausgleichsströme führen (van der Geest et al. 2014; vgl. Vogt 2019; Bauer 2019).

Die Messung der zusätzlichen Stromwärmeverluste durch die einzelnen zuvor beschriebenen Wechselstromeffekte in einer elektrischen Maschine kann derzeit nur in ihrer gesamtheitlichen Summe im Vergleich zu den Gleichstromverlusten vorgenommen werden. Die Anteile der beschriebenen Einzeleffekte können allerdings durch analytische oder numerische Verfahren bestimmt und durch Abgleiche validiert werden. (van der Geest et al. 2013; vgl. Bauer 2019) Untersuchungen an Baugruppen einer elektrischen Maschine, wie etwa den Spulen einer Wicklung, sind – wissenschaftlich veröffentlicht – bereits durchgeführt worden, gaben aber ebenfalls nur Auskunft über die Höhe der zusätzlichen Stromwärmeverluste oder Stromverteilungen und haben den Nachteil, dass nicht alle realen Betriebsbedingungen der Maschine abgebildet werden können. (vgl. Vogt 2019)

Die **Statoreisenverluste** $P_{Fe,S}$ setzen sich aus den Wirbelstrom- und Hystereseverlusten des Statorblechpaketes zusammen (Binder 2017, S. 42). Sie bilden die durch die dynamische Magnetisierung des Statorblechpaketes hervorgerufenen Verluste ab und werden deshalb auch als Ummagnetisierungsverluste des Stators bezeichnet (Veigel 2018, S. 18). Weil die Verluste bei elektrischen Maschinen überwiegend in den Bauteilen aus Weicheisen auftreten, werden sie Eisenverluste genannt. Abhängig vom Auftrittsort werden sie als Stator- oder Rotoreisenverluste bezeichnet. Prozentual können die gesamten Eisenverluste, also Stator- und Rotoreisenverluste summiert, bei praktischen Anwendungen von 10 % bis zu 30 % der Gesamtverluste betragen. Allerdings sind die Rotoreisenverluste im Vergleich zu den Statoreisenverlusten bei den betrachteten Drehstrommaschinentypen zu vernachlässigen. (Doppelbauer 2020, S. 221) Die Statoreisenverluste stehen allgemein in starker Abhängigkeit zum Arbeitspunkt und variieren dementsprechend. (Veigel 2018, S. 15). Die **Wirbelstromverluste** sind stark frequenzabhängig und steigen quadratisch mit der anliegenden Frequenz, weil sie durch Spannungen, induziert vom magnetischen Wechselfeld, hervorgerufen werden. Durch die Verwendung geschichteter und einseitig isolierter Bleche werden die Wirbelstromverluste in elektrischen Maschinen reduziert (vgl. Abbildung 2-8 links). Zur Isolation werden

Silikatschichten oder Lacke verwendet. Die Blechdicke hat bei Drehstrommaschinen eine Größenordnung von 0,2 mm bis 1 mm, eine Dicke in einer Größenordnung von 0,3 mm bis 0,4 mm hat sich bei Traktionsantrieben bewährt. Die Beschichtungsdicke der Isolation weist Dicken von $1\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$ auf. (Fischer 2017, S. 20 ff.; Luchscheider 2016, S. 2; Doppelbauer 2020, S.201; S. 222 f.) Bei der Ummagnetisierung ferromagnetischer Materialien, wie dem Weicheisen in Elektroblechen, wird eine sogenannte Hystereseschleife durchlaufen (siehe Abbildung 2-8 rechts). Wenn eine Feldstärke H angelegt wurde und anschließend auf null reduziert wird, bleibt eine bestimmte Flussdichte B bestehen. Diese wird als Remanenzflussdichte B_R bezeichnet und bedeutet, dass zum erneuten Aufbau des magnetischen Feldes mehr Energie benötigt wird, als beim Abbau des Magnetfeldes zurückgewonnen werden kann. Diese Verlustenergien werden als **Hystereseverluste** bezeichnet. Physikalisch vereinfacht erklärt, lassen sich die Hystereseverluste als Reibung der einzelnen Elementarmagnete innerhalb des zu magnetisierenden Materials beschreiben. Dementsprechend sind die Hystereseverluste auch proportional zur Frequenz. Weiterhin steigen die Verluste quadratisch zur maximalen magnetischen Flussdichte B . Die Hystereseverluste sind materialabhängig und können nur durch die Verwendung geeigneter Materialien beeinflusst werden. (Fischer 2017, S. 23 ff.; Doppelbauer 2020, S. 221 f.)

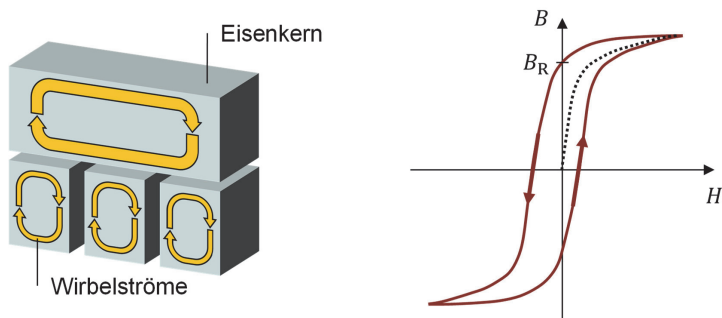


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Reduktion der Wirbelströme in beispielhaften Rechteckkörpern durch Segmentierung des Volumens (links) und Hystereseschleife bei Ummagnetisierung (rechts).

Zu **lastabhängigen Zusatzverlusten des Stators** $P_{LZ,S}$ werden unter anderem die durch Wirbelströme im Gehäuse oder Ströme an Oberflächen des Statorblechpakets

verursachten Verluste gezählt. Diese haben mit 2 % bis 5 % der Gesamtverluste einen geringen Einfluss. (Doppelbauer 2020, S. 228)

Die im obigen Abschnitt beschriebenen Verluste im Stator sind bei synchronen und asynchronen Drehstrommaschinen vergleichbar, auch wenn die Werte abhängig vom Maschinentyp variieren können. Dies liegt am prinzipiell sehr ähnlichen funktionellen Aufbau des Stators bei Drehstrommaschinen (Fischer 2017, S. 167; Doppelbauer 2020, S. 194). Bei den Rotortopologien unterscheiden sich die ASM, PMSM und FESM deutlich in Aufbau und Wirkungsweise, wie in Abbildung 2-9 dargestellt. Während die ASM kurzgeschlossene Kupfer- oder Aluminiumstäbe besitzt, die erst im Zusammenspiel mit dem Stator Drehfeld und dem vorliegenden Schlupf das Erregerfeld⁶ hervorrufen, wird bei SM das Erregerfeld durch Magnete (PMSM) oder Wicklungen (FESM) aufgebaut. Folglich differieren die einzelnen Verlustmechanismen, die im Folgenden erläutert werden. (Doppelbauer 2020, S. 185-249)

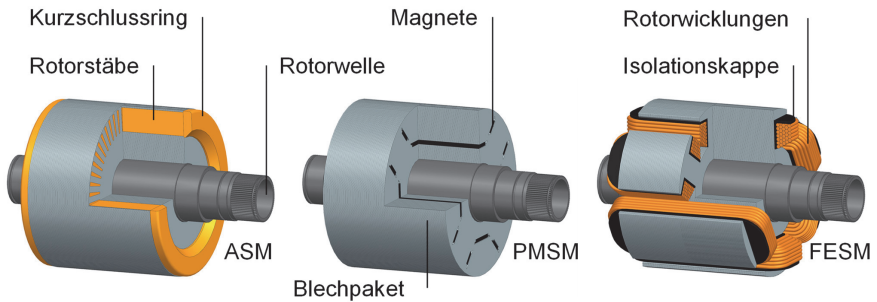


Abbildung 2-9: Vereinfachte schematische Darstellung der drei Rotortopologien mit Ausbruch (von links nach rechts) einer Asynchronmaschine (ASM), permanentenerregten Synchronmaschine (PMSM) und fremderregten Synchronmaschine (FESM).

Die **Rotorkupferverluste** $P_{Cu,R}$ treten nur bei Rotoren mit Wicklungen auf, folglich bei ASM und FESM. Bei ASM berechnen sich diese aus dem Produkt von Luftspaltleistung und Schlupf. Bei FESM ergeben sich die Verluste aus dem Erregerstrom, hauptsächlich ohne zusätzliche Wärmestromverluste, gemäß der ohmschen Verluste ($I^2 \cdot R_g$). Im Rotor einer FESM liegt im Vergleich zur Statorwicklung kein hochfrequenter Drehstrom an, sondern ein Gleichstrom. PMSM besitzen im Gegensatz dazu keine

⁶ Das Erregerfeld bezeichnet das magnetische Feld des Rotors, auch Rotorfeld genannt.

Wicklungsverluste, weil diese durch Permanentmagnete erregt werden. Allerdings sind die Magnetmaterialien elektrisch leitfähig, weshalb Wirbelströme in den Magneten auftreten. (Doppelbauer 2020, S. 228-229)

Bei Rotoren von Drehstrommaschinen treten nur vernachlässigbare **Rotoreisenverluste** $P_{Fe,R}$ auf, da bei allen genannten Drehstrommaschinen ein geringer oder gar kein Schlupf zwischen Rotordrehung und Stator magnetfeld drehung vorherrscht. Durch den geringen Schlupf liegt eine geringe Änderung des Magnetfeldes vor, weshalb die induzierten Wirbelströme vernachlässigbar sind. Allerdings führt die geometrische Anordnung der Statorzähne zu einer inhomogenen Verteilung des elektromagnetischen Luftspaltfeldes, was aufgrund induzierter Spannungen und Wirbelströme an der Rotoroberfläche **lastabhängige Zusatzverluste des Rotors** $P_{LZ,R}$ verursacht. Daher bestehen auch Rotoren – analog zu Statorblechpaketen – aus geschichteten, zueinander isolierten Blechen. Die im vorstehenden Absatz erwähnten Ummagnetisierungsverluste der Magnete werden auch den lastabhängigen Zusatzverlusten des Rotors zugeordnet. (Doppelbauer 2020, S. 221, 229)

Im Vergleich zum Stator befindet sich der Rotor in Bewegung, weshalb Verluste durch Reibung in den Lagerstellen und Verwirbelungen der umgebenden Medien verursacht werden. Diese werden auch als **Reibungs- und Lüftungsverluste** $P_{FW,R}$ bezeichnet. (vgl. DIN EN 60027-4:2008-03) Diese Verluste sind insbesondere von der entsprechenden Drehzahl abhängig. (Doppelbauer 2020, S. 228-229)

Abschließend ist bei der Betrachtung der Verluste elektrischer Maschinen zu berücksichtigen, dass noch weitere Verluste auftreten. Zum Beispiel Verluste, verursacht durch Übergangswiderstände an den Klemmen oder Luftspaltverluste, die hier nicht weiter diskutiert werden sollen. Eine weitergehende Betrachtung der Verluste mit detaillierten Angaben ist in der Fachliteratur nur in Bezug auf die entsprechend ausgelegten Maschinen zu finden und variiert stark in Abhängigkeit vom Maschinentyp, der Auslegung und ihrer Bemessung.

Tabelle 2-4 enthält eine Übersicht der erläuterten Verluste mit den Abhängigkeiten zur Frequenz und Last. Der prozentuale Anteil der einzelnen Verluste im Verhältnis zu den Gesamtverlusten wird geschätzt. Die Annahmen in Tabelle 2-4 für typische Traktionsantriebe wurden aus (Chu et al. 2014; Epskamp 2020; Doppelbauer 2020; Bauer 2019) entnommen und zusammengeführt. Zu beachten ist dabei, dass eine

vereinfachte Zusammenfassung vorgenommen wurde, die für typische, dem Stand der Technik entsprechende Traktionsantriebe gilt und dadurch einen Vergleich ermöglicht.

Tabelle 2-4: Tabellarische Darstellung der vereinfachten und verallgemeinerten Verluste einer Drehstrommaschine in typischer Anwendung als Traktionsantrieb. (Chu et al. 2014; Epskamp 2020; Doppelbauer 2020; Bauer 2019)

Verlustart	Frequenz-abhängigkeit	Last-abhängigkeit	~ Anteil Gesamtverluste
Statorkupferverluste $P_{Cu,S}$	++	++	40 % - 60 %
Statoreisenverlust $P_{Fe,S}$	++	+	10 % - 30 %
lastabh. Zusatzverluste Stator $P_{LZ,S}$	+	+	2 % - 5 %
Rotorkupferverluste $P_{Cu,R}$	/	++	20 % - 40 %
Reibungs- /Lüftungsverluste $P_{FW,R}$	++	/	2 % - 5 %
lastabh. Zusatzverluste Rotor $P_{LZ,R}$	+	+	2 % - 5 %

++ = starke Abhängigkeit; + = Abhängigkeit; / = keine Abhängigkeit; S = Stator; R = Rotor

Bei den Statorkupferverlusten $P_{Cu,S}$ ist anzunehmen, dass sich die Last proportional zum Drehmoment verhält, das ebenso proportional zur anliegenden Stromstärke ist. Somit ist der benötigte Strom bei hohen Lasten hoch und es werden mehr Stromwärmeverluste umgewandelt als bei geringer Last. Bei der Frequenzabhängigkeit ist eine starke Abhängigkeit gegeben. Zu berücksichtigen ist, dass die beschriebene Verwendung von Rundleitern letztere wesentlich reduziert, die zusätzlichen Stromwärmeverluste fallen dementsprechend nur bei größeren Drahtquerschnitten so stark wie angegeben aus (vgl. Hairpintechnologie in Kapitel 2.3.4). Bei den Statoreisenverlusten $P_{Fe,S}$, ist, wie oben beschrieben, eine starke Frequenzabhängigkeit gegeben. Die Lastabhängigkeit trifft typischerweise für Traktionsantriebe zu, denn Sättigungseffekte treten im Blechpaket zwar häufig auf, werden aber in der Literatur häufig als lastunabhängig beschrieben. Bei den lastabhängigen Zusatzverlusten, sowohl im Stator $P_{LZ,S}$ als auch Rotor $P_{LZ,R}$, beinhaltet bereits ihr Name die Lastabhängigkeit. Weil dem aber auch übrige Verluste zugeordnet werden, ist eine Frequenzabhängigkeit vermerkt. Bei Rotorkupferverlusten $P_{Cu,R}$ liegt bei der FESM Gleichstrom an der Wicklung an und die Ströme in Käfigen von ASM sind tendenziell niederfrequent. Die Stromstärke entscheidet über die umgesetzten Stromwärmeverluste, woraus die Lastabhängigkeit folgt. Die Reibungs- und Lüftungsverluste $P_{FW,R}$ des Rotors sind maßgeblich von der Drehzahl abhängig und dementsprechend frequenzabhängig.

Die in diesem Kapitel betrachteten Verlustmechanismen verdeutlichen, dass die Kupfer- und Eisenverluste im Stator, ausgehend von mindestens der Hälfte bis mehr als zwei Dritteln der Gesamtverluste, einen hohen Anteil der Verluste eines Traktionsantriebes verursachen. Bei den Rotorverlusten ist beachtlich, dass diese von den jeweiligen Maschinentopologien abhängen und entsprechend variieren, in Abhängigkeit von deren konkreter Auslegung. Weiterhin fallen die Rotorverluste mit einem Anteil von circa einem Drittel der Gesamtverluste geringer aus. Aus dieser Betrachtung (vgl. Tabelle 2-4) und unter Berücksichtigung der hier verfolgten Zielstellung der Verbesserung der Produktionstechnologie zur Steigerung der Performanceeigenschaften, soll deshalb der Fokus auf dem Stator und seiner Produktionstechnologie liegen.

2.2 Analyse der Drehstromstatoren

Drehstromstatoren bestehen generell aus zwei wesentlichen Unterbaugruppen: dem Blechpaket und der Statorwicklung, wie in Abbildung 2-10 gezeigt. Sowohl zwischen dem Blechpaket und der Wicklung, als auch zwischen den einzelnen Leitern in der Nut ist eine Isolation notwendig, die auch den Nutaufbau beeinflusst. (Doppelbauer 2020, S. 200 f.)

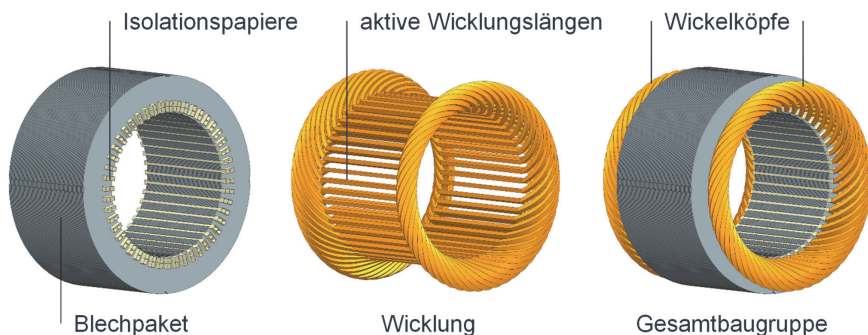


Abbildung 2-10: Darstellungen der beiden Hauptbaugruppen eines Drehstromstators: Blechpaket mit Papierisolation (links) und vereinfachter verteilter Kupferwicklung (Mitte). Die Gesamtbaugruppe ist auf der rechten Seite dargestellt. (Eigene Darstellung basierend auf (Winter et al. 2021))

2.2.1 Blechpaket

Die Statorblechpakete der Traktionsantriebe bestehen zumeist aus etwa 0,3 mm bis 0,4 mm dünnen, geschichteten, voneinander isolierten, ferromagnetischen Blechen (vgl. Kapitel 2.1.3) mit einer hohen relativen Permeabilität ($\mu_r \gg 1$). Dadurch ist das Blechpaket in der Lage, den um die Leiter erzeugten magnetischen Fluss zu lenken und die benötigte magnetische Feldstärke im Vergleich zur Luft zu reduzieren. Die Bleche bestehen aus Stahlsorten, die jeweils zwischen 2 % bis 4 % Silizium und Aluminium als Legierungsanteile besitzen. Materialien wie Kobalt- oder Nickel-Eisen haben noch bessere Eigenschaften, sind aber kostenintensiver und deshalb weniger verbreitet. (Fischer 2017, S. 20 ff.; Luchscheider 2016, S. 2; Doppelbauer 2020, S. 201; S. 219 ff.) Weiterführende normative Verweise und das Bezeichnungsschema für Elektrobleche sind in der Norm DIN EN 10106 zu finden (DIN EN 10106:2016-03). Durch die Materialauswahl und die Bauweise werden die zuvor ausführlich beschriebenen Statorisenverluste soweit als möglich reduziert (siehe Abbildung 2-11). Würde die Blechdicke weiter reduziert werden, stiege der Anteil des Isolationslacks im Verhältnis zum Weicheisen weiter an und die benötigte magnetische Feldstärke würde ebenfalls steigen.

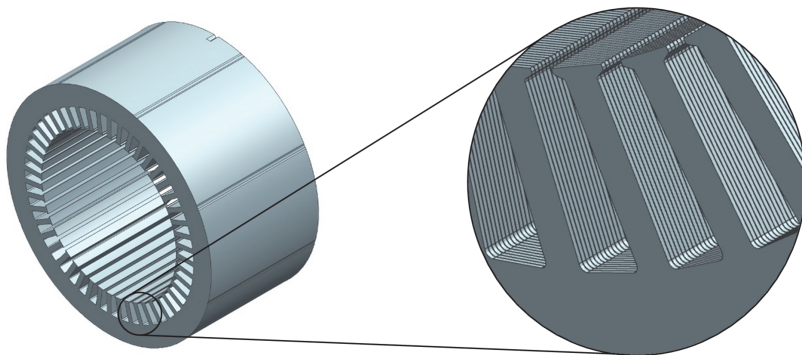


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines gesamten Statorblechpaketes im Vollblechschnitt (links) und eine Darstellung der einzelnen geschichteten Elektrobleche (rechts). (Eigene Darstellung des Blechpaketes nach (Winter et al. 2021))

Bei elektrischen Maschinen wird weiterhin ein nicht kornorientiertes Gefüge verwendet, da das Statormagnetfeld rotiert und keine gerichtete magnetische Vorzugsrichtung vorhanden ist. Eine Kornorientierung wird bevorzugt beispielsweise bei

Transformatoren eingesetzt, da dort die Magnetisierungsrichtung der Kornorientierung entspricht und die durch die Magnetisierung hervorgerufenen Verluste um bis zu 50 % reduziert werden können. (Fischer 2017, S. 24)

Prinzipiell werden die Elektrobleche mittels verschiedener Kalt- und Warmwalzprozesse zu einem Elektrobund gewalzt, das im Anschluss mit Isolationslack beschichtet wird. Daraus werden die einzelnen Bleche für die Stapelung der Stator- und Rotorblechpakete geschnitten. Die Art der Herstellung von Blechpaketen aus Blechen richtet sich prinzipiell nach ihrem jeweiligen Anwendungsfall. Unterschieden wird in der Regel zwischen der Serienfertigung und der Fertigung geringer Stückzahlen, wie beispielsweise beim Prototypenbau. Bei der Blechpaketherstellung mit hoher Stückzahl, unter anderem für Traktionsantriebe, werden Stanzverfahren zum Erzeugen der Blechschnitte genutzt. Hierbei bietet sich das Stanzpaketieren zur Verknüpfung der geschichteten Bleche im Anschluss an den Stanzprozess an. Aufgrund der hohen Werkzeug- und Anlagenkosten und der geringen Flexibilität, wird für Kleinserien und den Prototypenbau das Laserstrahlschneiden zum Vereinzeln der Bleche genutzt. Das Fügen der Bleche wird dabei mittels kleiner Schweißnähte am äußeren Radius des Blechpaketes vorgenommen. Darüber hinaus bietet die Industrie weitere Technologien und Abwandlungen der genannten Verfahren an. (Luchscheider 2016; Feldmann 2014)

In der Forschergruppe (FOR) 1897 „Verlustarme Elektrobleche für energieeffiziente Antriebe“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wurden unter anderem die Herstellung, Modellierung, Berechnung und das Materialverhalten von Elektroblechen ausführlich untersucht (Kawalla 2021). Beispielsweise wurden die Effekte des Schneidens auf die Betriebseigenschaften von Traktionsmaschinen analysiert und untersucht. Es zeigte sich dabei, dass die Reichweite von elektrifizierten Fahrzeugen um 2 bis 3 % durch den Schnittkanteneinfluss am Blechpaket verbessert werden kann. (Leuning et al. 2019) Weitere Forschungsansätze zu neuartigen Verfahren zum Schneiden der Elektrobleche, beispielsweise durch umlaufende Walzen (engl. rotary cutting), wurden auch in anderen Forschungsprojekten untersucht (Ziegler et al. 2018).

2.2.2 Statorwicklung

Die Statorwicklung ist diejenige Baugruppe des Stators einer Traktionsmaschine, die den elektrischen Strom zur Generierung des umlaufenden Drehfeldes führt. Diese dient dabei in ihren drei (Haupt-) Funktionen als (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990, S.

272): elektrischer Leiter, Wärmeleiter und Element zur Kraftübertragung⁷. Sie besteht aus einer durch das Wickelschema vorgegebenen Anzahl von Spulen. Vereinfacht formuliert, beschreibt das Wickelschema das Schaltbild der Statorwicklung, beziehungsweise den Verlauf der Kupferlackdrähte im Stator. Dafür werden die Nuten des Stators linear nebeneinander in abgewickeltem Zustand dargestellt, wie in Abbildung 2-12 gezeigt. (Fischer 2017) Diese Darstellungsform des Wickelschemas wird auch als Zonenplan bezeichnet (Babiel 2020, S. 88). Jede Spule (siehe Abbildung 2-12 links) besteht wiederum in ihren Windungen w_{sp} aus einer Anzahl voneinander isolierter, paralleler elektrischer Leiter z_{sp} aus Kupfer, die in die Nuten des Statorblechpaketes eingebracht sind. Die Kupferlackdrähte in einer Nut z_n werden auch als Teilleiter bezeichnet. Ein Strang⁸ m besteht folglich aus mehreren aneinandergereihten Spulen. Die einzelnen Spulen werden auch Teilspulen genannt, da sie nur einen Teil des Wicklungsstranges bilden. Bei Drehstrommaschinen sind dies drei Stränge. Das Ausgangsmaterial zur Erzeugung einer Spule sind in der Regel Kupferlackdrähte. Kupfer als Leitermaterial besitzt eine gute elektrische Leitfähigkeit und hat einen dementsprechend geringen ohmschen Widerstand. Im Vergleich zu den Elementen Gold und Silber, die eine vergleichbare oder sogar bessere elektrische Leitfähigkeit besitzen, ist Kupfer kostengünstiger und wird deshalb nach aktuellem Stand der Technik in den meisten Anwendungsfällen eingesetzt. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 95 ff.) Bei Statorwicklungen werden grundsätzlich zwei wesentliche Wicklungstypen unterschieden: konzentrierte und verteilte Wicklungen. Bei **konzentrierten Wicklungen** werden die einzelnen Teilspulen (siehe Abbildung 2-12 links), aus denen die gesamte Statorwicklung besteht, konzentriert um jeweils einen Statorzahn gewickelt. Dementsprechend werden konzentrierte Wicklungen auch als Zahnspulen- oder Einzelzahnwicklungen bezeichnet. **Verteilte Wicklungen** hingegen besitzen Teilspulen, die mehrere Statorzähne und damit auch Statornuten umspannen. Die Anzahl der übersprungenen Nuten wird auch als Spulenschritt γ bezeichnet, während die Spulenweite W den Abstand der beiden Spulenseiten in Millimetern angibt. (Doppelbauer 2020, S. 201 f.)

⁷ Bei der theoretischen Betrachtung der Kraftwirkung in der Statorwicklung ist beachtlich, dass die Tangentialkräfte nicht an den Leitern, sondern an den Zahnflanken angreifen. Diese werden hervorgerufen durch die Maxwell'schen Zugspannungen. (Fischer 2017, S. 28) Dennoch ist es sinnvoll, die Wicklung gegen äußere Kraftwirkungen mechanisch zu fixieren.

⁸ Ein Wicklungsstrang ist vereinfacht beschrieben eine zusammenhängende Gesamtspule aus mehreren einzelnen Teilspulen mit einem Anfang und einem Ende.

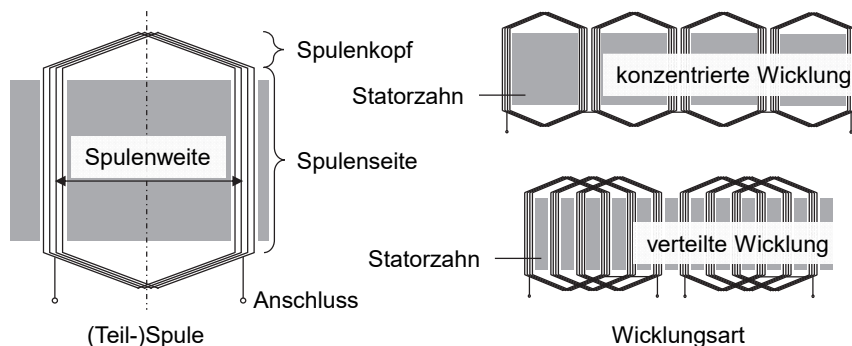


Abbildung 2-12: Vereinfachte schematische Darstellung einer Spule (links), einer konzentrierten Wicklung (oben rechts) und einer verteilten Wicklung (unten rechts). (eigene und veränderte Darstellung nach (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990)).

Bei konzentrierten Wicklungen können die Spulen direkt um einen während des Wickelvorgangs freistehenden Zahn gewickelt werden. Dabei werden die Einzelzähne bewickelt und im Anschluss zu Statorn montiert. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung sogenannter Polketten. Dabei werden die Einzelzähne miteinander verkettet bewickelt und im Anschluss zur Statorbaugruppe aufgerollt. (vgl. Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 87) Bei der Herstellung von verteilten Wicklungen werden nach aktuellem Stand der Technik zumeist Statorblechpakete im Vollblechschnitt verwendet (vgl. Abbildung 2-11). Eine Bewicklung der Nuten/Zähne in einem linear angeordneten Blechpaket mit anschließender Formung zu einem Blechpaket ist möglich (Wüterich, Liewald & Kopp 2019), allerdings ist die Fixierung der Wicklung und Montage zu einem Blechpaket eine zusätzliche Herausforderung. Die beiden möglichen Wicklungstypen der konzentrierten oder verteilten Wicklung zeigen aufgrund ihres unterschiedlichen Wickelschemas ein differenziertes Betriebsverhalten. Prinzipbedingt erzeugen konzentrierte Wicklungen harmonische Oberwellen verschiedener Ordnungszahlen und haben dadurch eine hohe Drehmomentenwelligkeit und auch die Rastmomente sind durch ihren Aufbau bedingt größer. Besonders in höheren Drehzahlbereichen verursacht dies im Betrieb zusätzliche Verluste, Vibrationen und Geräusche. Die verteilte Wicklung verhält sich deutlich ruhiger über das gesamte Drehzahlband, denn je nach Auslegung des Wickelschemas (vgl. hierzu Abbildung 2-15 und den darauf folgenden den Absatz zum Thema Sehnung), werden die harmonischen Oberwellen unterdrückt. Durch die kleinen Wickelköpfe und die kompakte Bauweise mit größeren Leiterquerschnitten können

hingegen bei konzentrierten Wicklungen in Kombination mit einer effektiven Kühlung höhere Ströme angelegt werden. Dies ermöglicht eine erhöhte Drehmomentenbildung und hat letztendlich Vorteile in Bezug auf Leistungsgewicht und maximale Leistung. (Gerling 2015; Fischer 2017; Doppelbauer 2020; Halwas et al. 2020b)

Bei den Leiterquerschnittsgeometrien und dem daraus resultierenden Nutaufbau in der Wicklung kann im Wesentlichen zwischen zwei Arten unterschieden werden: den Stab- und den Spulenwicklungen (Bälä et al. 1969, S. 329 f.). Die Abbildung 2-13 links zeigt den Unterschied der Wicklungsarten im Schnittbild. **Stabwicklungen** zeichnen sich dadurch aus, dass der Leiterquerschnitt eine große Fläche einnimmt, daher oft rechteckig oder trapezförmig gestaltet ist und die Leiteranzahl pro Nut gering ist. Die Leiter sind durch ihre große Querschnittsfläche formstabile Stäbe. (Bälä et al. 1969) Bei Traktionsmotoren sind aktuell zwei bis acht Leiter üblich (Doppelbauer 2020, S. 203). Die Leiter von Stabwicklungen werden in dieser Arbeit auch als Rechteckleiter bezeichnet. Auch die Bezeichnung Flachdraht ist gebräuchlich, da die Höhe meist deutlich geringer als ihre Breite ist. Bei **Spulenwicklungen** werden in der Regel Runddrähte mit einer hohen Leiteranzahl pro Nut und Teilspeule verwendet. Diese können, je nach Auslegung, seriell oder parallel verschaltet werden. Folglich können Spulenwicklungen durch eine Parallelschaltung mehrerer Leiter die gleiche äquivalente Kupferquerschnittsfläche wie die Rechteckleiter einer Stabwicklung erreichen. (Bälä et al. 1969) Rechteckige, hexagonale oder anderweitig geformte Leiter sind denkbar, werden aber in der Praxis nicht verwendet, da diese keine entscheidenden Vorteile bieten, während die Herstellung und Verwendung in der Wickeltechnik jedoch deutlich komplexer und damit auch kostenintensiver ist. Eine weitere Herausforderung ist, dass sich beispielsweise bei quadratischen Leitern die Handhabung schwierig gestaltet, weil die Drähte durch das Aspektverhältnis gleich oder nahe Eins zur ungewünschten Verdrehung neigen.

Werden aus einzelnen isolierten Leiterstäben mit großer Querschnittsfläche bandagierte Stäbe aus mehreren Rechteck- oder Runddrähten zu Spulen geformt, werden diese als **Formspulen** bezeichnet. Diese vorgeformten Spulen werden dann in den Stator montiert. Formspulen zeichnen sich dadurch aus, dass diese bereits vor der Montage ihre endgültige und stabile Form besitzen. (Bälä et al. 1969, S. 327, S. 347; Sequenz et al. 1973, S. 107)

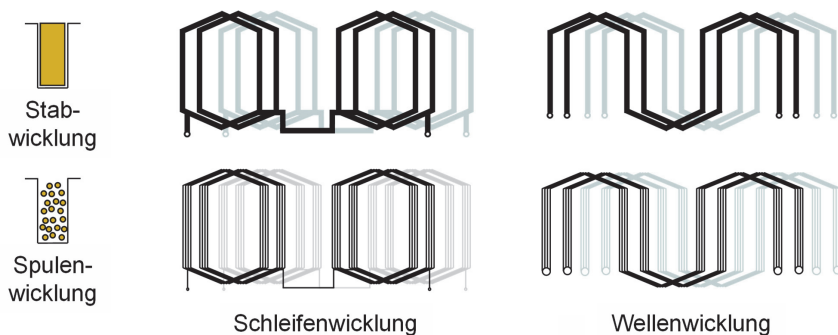


Abbildung 2-13: Vereinfachte schematische Darstellung verschiedener Wickelschemata: Schleifenwicklung (Mitte) und Wellenwicklung (rechts), bei der Verwendung von Stäben (links oben) oder einzelnen Leitern (links unten) innerhalb einer Spule. (eigene Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 90)

Bei der Verschaltung der Spulen in den Wicklungen – unabhängig davon, ob es sich um eine Stab- oder Spulenwicklung handelt – kann eine Schleifen- oder Wellenwicklung ausgeführt werden. Bei der **Schleifenwicklung** werden Spulen in direkter Nachbarschaft, also im Bereich eines Polpaares, miteinander verschaltet. Die Enden einer Spule werden zu Beginn der neuen Spule in der nächsten Nut verschaltet. Die **Wellenwicklung** hingegen verschaltet die Enden einer Spule am Beginn der sich anschließenden Spule, die sich im Bereich des nachfolgenden Polpaares befindet. (Fischer 2017, S. 45-46; Müller & Ponick 2014, S. 297 ff.) In Bezug auf die elektromagnetische Auslegung, sind Schleifen- und Wellenwicklung austauschbar. Im Bereich der Spulenseite der Wicklung (siehe Abbildung 2-12), die die elektromagnetisch aktive Länge der Wicklung bildet (siehe Abbildung 2-10), können die beiden Wickelschemata für Drehstromwicklungen in Statoren gleich ausgelegt werden.

Beachtlich ist, dass in der Produktionstechnik nicht jede Wicklungsart umgesetzt werden kann (vgl. hierzu den Abschnitt 2.3.4). Zwischen den Wicklungsarten der Schleifen- und Wellenwicklung gibt es bei der Umsetzung in der Wickelkopfform Unterschiede. In der Regel ist bei Spulenwicklungen die Wickelkopfgröße für Schleifenwicklungen kleiner, besonders wenn die Schrittweite der Spulen unterschiedlich gewählt wird. Dies wirkt sich günstig auf den ohmschen Widerstand der Wicklung aus. (Winter et al. 2021, S. 30 ff.) Die Wickelkopfformen können darüber

hinaus auf unterschiedliche Arten und Weisen ausgeprägt werden. Bei der Ausprägung wird beispielsweise zwischen der Etagen-, Schicht-, oder Kronenwicklung unterschieden. Weitere Informationen sind der entsprechenden Fachliteratur zur Wickeltechnik zu entnehmen (siehe: Bälä et al. 1969; Sequenz et al. 1973).

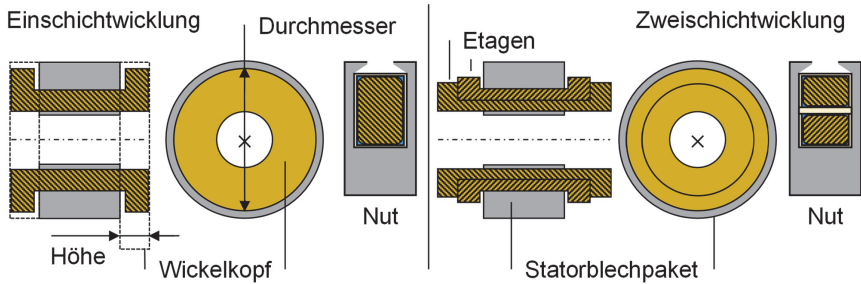


Abbildung 2-14: Vereinfachte schematische Darstellung einer geometrischen Ausprägung der Ein- und Zweischichtwicklung. Jeweils: Schnitt durch die Statorbaugruppe (links), Draufsicht des Statorwickelkopfes (Mitte) und Schnitt durch eine exemplarische Nut (rechts). (Eigene Darstellung nach (Bälä et al. 1969; Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016; Sequenz et al. 1973; Tzschentschler, Olbrisch & Jordan 1990))

In der herkömmlichen Wickeltechnik mit Runddrähten wird prinzipiell zwischen der Einschicht- und Zweischichtwicklung unterschieden. Bei der **Einschichtwicklung** (Abbildung 2-14 links) ist jeweils nur eine Spulenseite einer Spule in einer Nut eingebracht. Demensprechend belegt eine Spule jeweils zwei Nuten vollständig. Bei der **Zweischichtwicklung** (Abbildung 2-14 rechts) liegen zwei Spulenseiten jeweils unterschiedlicher Spulen in zwei Schichten übereinander in einer Nut. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 89-90) Diese Schichtung kann außerdem mit oder ohne Lagenwechsel ausgeführt werden. Der Lagenwechsel bedeutet für die Gestalt eines Wickelschemas, dass beispielsweise bei einer Zweischichtwicklung eine Spulenseite im Bereich des Nutgrunds und die andere Spulenseite im Bereich der Nutöffnung liegt (vgl. hierzu Abbildung 2-15). (Müller, Vogt & Ponick 2008, Kap. 1) Der Lagenwechsel bietet den Vorteil, dass analog zum Prinzip der Roebelstabwicklung (siehe Kapitel 2.1.3) die Kreisströme, die durch das inhomogene Nutquerfeld hervorgerufen werden, innerhalb einer Spule reduziert werden. (van der Geest et al. 2014; vgl. Vogt 2019; Bauer 2019)

Zweischichtwicklungen werden häufig mit einer sogenannten **Sehnung** ausgeführt, wie sie in Abbildung 2-15 dargestellt ist. Liegt eine Sehnung vor, dann ist die Spulenweite W kleiner als die Polteilung τ_p . Ist keine Sehnung vorhanden, besitzen die Spulenweiten den gleichen Abstand wie die Polteilung und es handelt sich um sogenannte Durchmesserspulen. (Müller, Vogt & Ponick 2008, Kap. 1; Fischer 2017, S. 44)

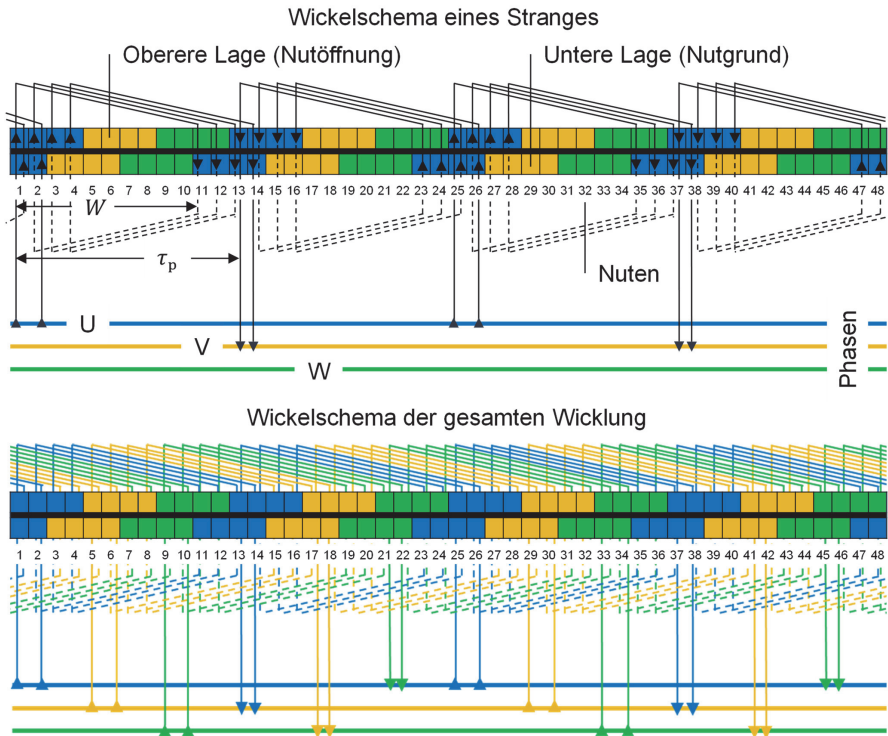


Abbildung 2-15: Darstellung des Wickelschemas einer Zweischichtwicklung mit Lagenwechsel und 10/12 Sehnung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (Winter et al. 2021) und (A_Sedlmaier 2021))

Für das in Abbildung 2-15 dargestellte Wickelschema ergibt sich eine Sehnung von $W/\tau_p = 10/12$, denn die Spulen umschließen jeweils 10 Nuten, während der Abstand zwischen den zwei Polen 12 Nuten beträgt. Der Vorteil einer gesehnerten Wicklung ist eine Felderregkurve, die sich in ihrem Verlauf der beabsichtigten Sinusform besser annähert. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 89) Daraus ergibt sich – im

Zusammenhang mit den daraus resultierenden Wicklungsfaktoren einer Wicklung – eine Unterdrückung von Oberfeldern höherer Ordnungszahlen, die zu einem besseren Betriebsverhalten führen. Neben der Reduktion der Vibrations- und Geräuschentwicklungen wird zudem auch die Leistungsabgabe verbessert. Weitere Details zur Berechnung der Wicklungsfaktoren können der Fachliteratur entnommen werden (Müller, Vogt & Ponick 2008; Fischer 2017; Binder 2017).

Der besseren Übersicht dient der obere Bereich der Abbildung 2-15, der nur die Wicklung der Phase U zeigt. Im unteren Bereich ist die vollständige Wicklung dargestellt und in Abhängigkeit vom entsprechenden Phasenanschluss farblich markiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Phase U über ihren Wicklungsstrang mit der Phase V, die Phase V über ihren Wicklungsstrang mit der Phase W und die Phase W wiederum über Ihren Wicklungsstrang mit der Phase U verbunden ist, liegt eine Dreieckschaltung vor. In Abbildung 2-15 bezeichnet die sogenannte obere Lage diejenige Spulenseite einer Teilschule, die in Richtung der Nutöffnung abgelegt ist. Die untere Lage ist dementsprechend die Spulenseite einer Teilschule, die am Nutgrund liegt. Die Phasentrennung innerhalb der Nut ist durch einen dicken schwarzen Strich gekennzeichnet.

Infolge des Wirkprinzips reagiert die ASM besonders sensitiv auf Oberwellen (Richnow 2016, S. 16). Dies liegt vor allem daran, dass das Rotorfeld in Wechselwirkung mit dem Statorfeld aufgebaut wird und dadurch die Anforderungen an das Statorfeld hoch sind. Das gilt vor allem für das Magnetfeld, das den Luftspalt durchsetzt. Im Vergleich zu den weiteren hier betrachteten Maschinentypen (PMSM, FESM) für Traktionsanwendungen bedarf es bei der ASM deshalb höchster Anforderungen an die Wicklung und deren Parameter. Aus diesem Grund wird im fortlaufenden Kontext als Anwendungsbeispiel der Stator für eine ASM aus dem Projekt NeWire gewählt, deren Wickelschema in Abbildung 2-15 dargestellt ist und deren Wicklungsparameter in Tabelle 2-5 aufgelistet sind (Winter et al. 2021; Riehm, Spieker & Fister 2020). Das gezeigte Wickelschema soll als Anhaltspunkt dienen, die notwendigen Anpassungen werden im Rahmen der nachfolgenden Entwicklung vorgenommen.

Tabelle 2-5: Verwendete Parameter des Stators im Projekt NeWire. (orientiert an der Auslegung aus (Winter et al. 2021; Riehm, Spieker & Fister 2020))

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
<i>Wicklungsparameter</i>			
Phasen (Strangzahl)	m	3	
Polpaarzahl	p	2	
Nutenzahl	N	48	
Lochzahl	q	4	
Sehnung	W/τ_p	10/12	
<i>Blechschnitt</i>			
Statoraußendurchmesser	D_{Stator}	210	mm
Statorinnendurchmesser	d_{Stator}	138	mm
Rotoraußendurchmesser	D_{Rotor}	136	mm
Nutschlitzbreite	$b_{\text{Nutschlitz}}$	2,3	mm
<i>Isolationssystem</i>			
Isolationsgrad	G	2	
Dicke Isolationspapier	d_{Isop}	0,2	mm

In der Tabelle 2-6 ist eine Übersicht der übergeordneten Merkmale einer Wicklung als Zusammenfassung dieses Kapitels dargestellt. Diese werden im Rahmen der Arbeit weiterverwendet. Dabei ist beachtlich, dass die Merkmale und die entsprechenden Ausprägungen des Wickelkopfes auch zu den Wicklungsmerkmalen zählen. Hierzu ist beispielsweise die Anzahl der Wickelkopfebene zu rechnen, wie die Zwei- oder Dreietagenwicklung. (vgl. (Vogt 2019, S. 25)) Für die Ausprägung eines Wickelkopfes gelten dennoch einige wichtige Regeln: zur Reduktion der ohmschen Verluste ist ein möglichst kleiner Wickelkopf sinnvoll, der Wickelkopf muss Kreuzungen vermeiden und eine Fertigung muss möglich sein. Darüber hinaus entstehen in den Wickelköpfen auch Streufelder, die von der Gestalt des Wickelkopfes beeinflusst werden. (Müller, Vogt & Ponick 2008)

Tabelle 2-6: Übersicht der übergeordneten Merkmale einer Wicklung mit den entsprechenden Ausprägungsmöglichkeiten. (eigene und veränderte Darstellung nach (Vogt 2019, S. 25))

Merkmal der Wicklung	Möglichkeiten der Ausprägung
Wicklungsart	konzentrierte Wicklung verteilte Wicklung
Anzahl der Schichten	Einschichtwicklung Zweischichtwicklung (Mehrschichtwicklung)
Leitergeometrie	Spulenwicklung (Runddraht) Stabwicklung (Rechteckleiter)
Wickelschema	Schleifenwicklung Wellenwicklung
Spulenweite	Durchmesserspule gesehnte Spule

2.2.3 Nutaufbau

Die Statornuten elektrischer Traktionsantriebe bestehen im Wesentlichen aus elektrischen Leitern und Isolationsmaterialien. Die Anordnung verschiedener elektrischer Isoliermaterialien (EIM) bildet das elektrische Isoliersystem (EIS), das auch außerhalb der Nut, beispielsweise in den Wickelköpfen, wirkt. Gegebenenfalls können aber in den Wickelköpfen zusätzliche oder andere EIM vorliegen. (DIN EN 60085:2008-08) Beispiele für EIMs sind die Isolationslackschichten auf den Kupferlackdrähten (vgl. Abbildung 2-16) oder die Nutgrundisolation durch Isolationspapier (siehe Abbildung 2-11). Nach der US-amerikanischen und kanadischen Richtlinie UL 1446 (ANSI/CAN/UL 1446:2020-11) gibt es eine weitere Kategorie an Komponenten in EIS, nämlich die nicht-elektrischen Isoliermaterialien (NIM). Das sind Komponenten, die primär der mechanischen oder thermischen Stabilisierung des Wicklungssystems dienen. Materialien dafür sind Phasentrenner, Verguss- oder Imprägnierharze. Im deutschen Sprachgebrauch werden die Begriffe primäre Isolation für EIM und sekundäre Isolation für NIM verwendet.

Der **Kupferlackdraht** – unabhängig davon, ob es sich um einen Rund- oder Rechteckleiter handelt – ist in der Regel mit mehreren Lackschichten isoliert, wie in der Abbildung 2-16 dargestellt. Im weiteren Kontext wird der Kupferblankdraht als Kupferleiter oder kurz Leiter bezeichnet. Der Leiter bezeichnet nur den reinen Kupferquerschnitt ohne Beschichtung. Für den Kupferlackdraht wird im Folgenden

auch die Abkürzung Draht verwendet, wie in Abbildung 2-16 gezeigt. Allgemein gilt dies sowohl für runde als auch rechteckige Leiter und Drähte.

Bei der Herstellung von Kupferlackdraht wird zur besseren und fehlerfreien Haftung der Isolationslackschicht auf den blanken Kupferleiter eine Grundlackschicht aufgetragen. Auf die Isolationslackschicht kann optional eine Funktionsschicht mit Gleitmittel oder auch Backlack aufgetragen werden. Das Gleitmittel dient der besseren Verarbeitung während der Fertigung von Wickelgütern, während der Backlack durch thermische Aktivierung zu einem festen Verbund der Kupferlackdrähte führt. Es werden regelmäßig thermoplastische Backlackschichten eingesetzt. Runddrähte werden durch sogenannte Ziehsteine gezogen, um ihre Form zu erhalten und anschließend gegläht, gereinigt und lackiert. (DIN EN 60317-0-1:2014-09; Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 105 f.) Genauere Spezifikationen von gezogenen Runddrähten zur Herstellung elektrischer Leiter sind in der DIN EN 13602 angegeben (DIN EN 13602:2013-09). Im Rahmen dieser Arbeit liegen die Runddrähte als fertiges Halbzeug vor, weiterführende Informationen über Runddrähte können der Fachliteratur entnommen werden (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016). Für die genauere Betrachtung von Rechteckleitern wird auf folgende Quellen verwiesen: (Wirth et al. 2020; Wirth, Hofmann & Fleischer 2019; Wirth et al. 2018; Wirth & Fleischer 2019).

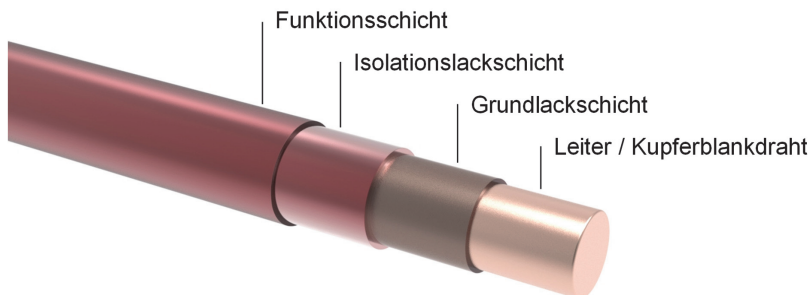


Abbildung 2-16: Vereinfachte schematische Darstellung eines Kupferlackdrahtes zur Verwendung in der Spulenwickeltechnik. (eigene und veränderte Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 106)

Als Ausgangsmaterialien für **Kupferblankdraht** wird in der Regel ETP-Kupfer oder OFE-Kupfer verwendet. ETP-Kupfer ist ein sauerstoffhaltiges Kupfer mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit und gutem Formänderungsvermögen. Allerdings ist ETP-Kupfer aufgrund seiner Sauerstoffhaltigkeit zum Schweißen oder Hartlöten mit offener

Flamme ungeeignet, da ETP-Kupfer dabei zur Versprödung neigt. (Deutsches Kupferinstitut 2022a) Für diese Anwendungen kann daher OFE-Kupfer genutzt werden, das hochreines sauerstofffreies Kupfer mit guter Schweißbarkeit ist. (Deutsches Kupferinstitut 2022b) Die herkömmlichen Isolationslackschichten setzen sich zumeist aus einer Polyesterimid-, Polyimid- oder Polyamid-Basis zusammen. Die geometrischen Toleranzen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Wickeldrähten sind in der Normreihe DIN EN 60317 spezifiziert (vgl. DIN EN 60317-0-1:2014-09). Die wichtigsten Teile der Normreihe für Runddrähte aus Kupfer mit Isolationsgraden G1 bis G3 und Wärmeklassen von 180(H) bis 200(N) sind in der Tabelle in Anhang A enthalten. Dort werden unter anderem die technischen Lieferbedingungen (beispielsweise die Nennmaße), die mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie weitere normative Verweise angegeben. Für Rechteckleiter ist diese Normreihe ebenfalls gültig, allerdings gelten andere Abschnitte der Normreihe. Aufgrund der überwiegenden Verwendung von Runddrähten in dieser Arbeit, liegt darauf der Fokus.

Der **Isolationsgrad** gibt die Schichtdicke des Lacks auf dem Kupferblankdraht an. Die Schichtdicke des Isolationslacks steigt mit zunehmender Zahl an und damit auch die Isolationswirkung. In der DIN EN 60317-0-1 sind die Grade 1, 2 und 3, als auch 1B und 2B definiert. B bezeichnet hierbei die Verwendung von Backlack. (DIN EN 60317-0-1:2014-09) Für Traktionsantriebe ist nach aktuellem Stand der Technik eine Beschichtung mit Grad 2 üblich. Ein Leiterdurchmesser von 0,71 mm, wie er im hiesigen Zusammenhang hauptsächlich verwendet wird, hat eine mittlere Durchmesserzunahme bei Grad 2 gemäß Norm von mindestens 0,053 mm. Der maximale Durchmesser des Kupferlackdrahtes beträgt 0,789 mm. Bei der Verwendung von Backlacken des Grades 2B ist die Lackschicht dicker und neben Grundschrift erfolgt eine Durchmesserzunahme durch die Backlackschicht von 0,019 mm, beim maximalen Gesamtdurchmesser des Backlackdrahtes von 0,815 mm.

Die **Wärmeklasse** eines Kupferlackdrahtes, häufiger auch als Isolierstoffklasse bezeichnet, beschreibt die maximal zulässige Temperatur am heißesten Punkt im Dauerbetrieb (Doppelbauer 2020, S. 45). Diese Wärmeklassen werden für einzelne EIM angegeben oder auch für gesamte EIS. Wenn alle EIM in einem EIS dieselbe thermische Klasse besitzen, muss das EIS dennoch geprüft werden, da sich im Zusammenspiel der unterschiedlichen EIM eine andere thermische Klasse ergeben kann. Die entsprechenden thermischen Klassen gemäß der DIN EN 60085 sind im

Anhang B mit ihren korrespondierenden Buchstabenbezeichnungen aufgelistet. In der vorliegenden Arbeit wurden die Wärmeklassen von 180(H) bis 220(R) verwendet, diese sind für Traktionsantriebe üblich.

Die in der Abbildung 2-17 gezeigten **Lagenaufbauten** von Drähten in Statornuten entsprechen dem Stand der Technik bei Traktionsantrieben⁹. Drei Lagenaufbauten werden für Runddrahtwicklungen zumeist angewendet: wild, lagengenau und orthozyklisch. Bei wilden Wicklungen ist der Lagenaufbau zufällig und innerhalb einer Wicklung auch in jeder Nut unterschiedlich. Lagengenaue Aufbauten sind so angeordnet, dass die Drahtmittelpunkte übereinander liegen, während im orthozyklischen Wickelbild die Mittelpunkte von drei benachbarten Drähten ein gleichseitiges Dreieck aufspannen. (Wolf 1997, S. 23) Bei der Verwendung von Rechteckdrähten werden die Drähte mit ihrer langen Seite zum Nutgrund hin übereinandergestapelt. Dies ist eine günstige Orientierung bei der Verwendung von Rechteckdrähten. Weiterhin sind die zusätzlichen Stromwärmeverluste bei dieser Orientierung geringer als bei hochkanter Orientierung der langen Seite der Rechteckdrähte (Schiefer 2017, S. 88).

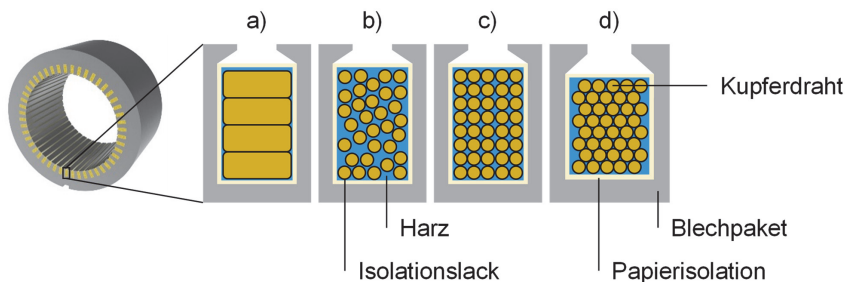


Abbildung 2-17: Darstellung von Lagenaufbauten in Statornuten nach aktuellem Stand der Technik in einer Schnittansicht: a) Rechteckleiter (bspw. Hairpinwicklung), b) wilde Wicklung, c) lagengenaue Wicklung und d) orthozyklische Wicklung.

Ein wichtiger Parameter zur Bewertung der Güte einer in die Nut montierten Wicklung ist der **Füllfaktor**. Er gibt an, zu wieviel Prozent eine Nutfläche mit den entscheidenden

⁹ Im weiteren Umfeld der elektrischen Antriebe sind vielfältige Abwandlungen oder ganz andere Ausprägungen denkbar. Bei Spezialanwendungen ist darüber hinaus fast jede Ausprägung möglich.

Leitern oder Drähten gefüllt ist. Es kann hierbei zwischen dem elektrischen k_{el} und dem mechanischen Füllfaktor k_{mec} unterschieden werden (Halwas et al. 2020a):

$$k_{el} = \frac{A_{\text{Leiter,Nut}}}{A_{\text{Nut}}} = \frac{\frac{d_{\text{Leiter}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_{\text{Leiter}} \cdot 2}{A_{\text{Nut}}} \quad \text{Formel 2-8}$$

$$k_{mec} = \frac{A_{\text{Draht,Nut}}}{A_{\text{Nut,iso}}} = \frac{\frac{d_{\text{Draht}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_{\text{Drähte}} \cdot 2}{A_{\text{Nut,iso}}} \quad \text{Formel 2-9}$$

Der elektrische Füllfaktor beschreibt dabei das Verhältnis der Leiterfläche $A_{\text{Leiter,Nut}}$ zu der zur Verfügung stehenden Fläche in der Nut A_{Nut} . Der mechanische Füllfaktor setzt dagegen die gesamte Drahtfläche $A_{\text{Draht,Nut}}$, also Leiter mit Isolationslack, zur isolierten Nutfläche $A_{\text{Nut,iso}}$ ins Verhältnis. Für die Auslegung wird in der Regel der elektrische Füllfaktor angegeben, denn die Leiterfläche ist der elektromagnetisch aktive und damit entscheidende Anteil in der Nut. Zur Bewertung von Herstellungsverfahren für Wicklungen ist es allerdings üblich, den mechanischen Füllfaktor heranzuziehen. Dieser liegt stets über dem elektrischen Füllfaktor und kann theoretisch 100 % erreichen. Bei der Analyse der in Abbildung 2-17 dargestellten Wicklungsarten ergeben sich die unter Tabelle 2-7 dargestellten Füllfaktoren. Hierbei ist zwischen den theoretisch berechneten und den im realen Herstellprozess erreichbaren Werten des Füllfaktors zu unterscheiden. Bei den theoretischen Werten ist die Fläche innerhalb einer gedanklich unendlich ausgedehnten Wicklung berücksichtigt, die realen Werte beziehen die Begrenzung durch die Nutflanken mit ein. Es ist ersichtlich, dass die orthozyklische Wicklung in der Theorie den höchsten mechanischen Füllfaktor besitzt, gefolgt von der lagengenauen Wicklung. Die wilde Wicklung lässt sich prinzipiell nicht analytisch mit einer geometrischen Herleitung berechnen und wird daher eher als Erfahrungswert mit maximal 70 % angegeben. Die lagengenaue Wicklung schneidet bei der realistischen Anwendung sogar 2 % besser ab, als die orthozyklische Wicklung (siehe hierzu Anhang C). Dies lässt sich durch die Leerstellen der orthozyklischen Wicklung an den Nutflanken erklären. (Halwas et al. 2020a) Bei der Verwendung von Rechteckdrähten, wie sie bei Formspulen eingesetzt werden, sind mechanische Füllfaktoren nahe 100 % denkbar, dafür sind allerdings insbesondere die Toleranzen der Kantenradien in der realen Anwendung entscheidend, sodass sich bei größeren Drahtabmessungen Füllfaktoren von maximal 95 % ergeben. Je kleiner die Rechteckdrähte werden, desto geringer wird auch der Füllfaktor. Dies hängt mit den

verhältnismäßig größeren Toleranzen der Drahtnormung DIN EN 60317-0-2 zusammen. (Wirth, Hofmann & Fleischer 2019)

Tabelle 2-7: Theoretisch berechenbare und in der Anwendung erreichbare mechanische Füllfaktoren für die verschiedenen Lagenaufbauten in Nuten von Traktionsantrieben. (Halwas et al. 2020a; Wirth, Hofmann & Fleischer 2019)

Wicklungsart	k_{mec} Berechnung	k_{mec} Anwendung
Hairpinwicklung	~ 100 %	< 95 %
wilde Wicklung		< 70%
lagengenaue Wicklung	~ 78,5 %	78,5 %
orthozyklische Wicklung	~ 90,7 %	76,5 %

Als Faustformel in der Wickeltechnik gilt, dass etwa 10 % an Verbesserung des Füllfaktors den Wirkungsgrad um circa 1 % verbessern (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 109). Der Hintergrund dafür ist zum einen die Erhöhung des elektromagnetisch aktiven Leitermaterials. So ist bei größerem Leiterquerschnitt bei gleichbleibender Wicklungstopologie, Stromstärke und Spannung der resultierende Gleichstromwiderstand reduziert. Zum anderen erhöht ein gesteigerter Füllfaktor von Leitern in der Nut prinzipiell ihre Wärmeleitfähigkeit, denn Kupfer hat im Vergleich zu den übrigen Materialien eine bessere Wärmeleitfähigkeit in der Nut, im Gegensatz zu Isolationspapier, Imprägnations- oder Vergussharz. (Staton, Boglietti & Cavagnino 2005) Der Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem elektrischen Füllfaktor wurde in experimentellen Untersuchungen bereits hergeleitet (Staton, Boglietti & Cavagnino 2005, S. 622), wie in Abbildung 2-18 dargestellt. In diesem Anwendungsfall wurden für die Modellbildung wilde Wicklungen mit Kupferleitern als Grundlage angenommen.

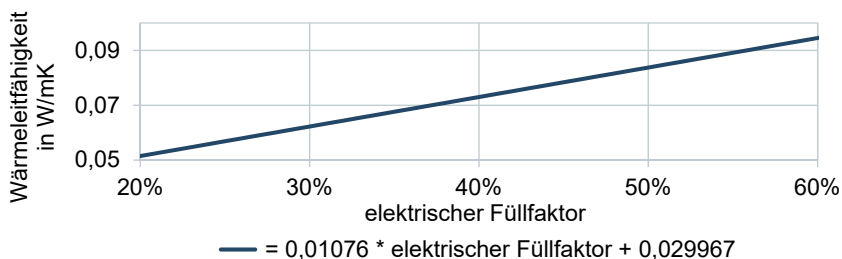


Abbildung 2-18: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zum elektrischen Füllfaktor eines Statornutmodells für wilde Lagenaufbauten. (eigene Darstellung nach Staton, Boglietti & Cavagnino 2005)

Das thermische Verhalten eines Traktionsantriebs, insbesondere eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit in der Wicklung, ist ein wichtiger Faktor, denn die Energiewandlung ist mit Verlusten behaftet, die wiederum in Form von Wärme abgeführt werden müssen (vgl. Stromwärmeverluste in Kapitel 2.1.3). Je höher die Wärmeabfuhr aus der Nut ist, umso stärker kann die Statorwicklung mit Strom durchflossen werden, was zu höheren Werten der maximalen Leistung und Bemessungsleistung führt. Daraus ergibt sich eine verbesserte Leistungsdichte. Bei PMSM sind die Wicklungseigenschaften für die maximale Leistung entscheidend, während die Bemessungsleistung von den Rotor- und Magneteigenschaften bestimmt wird. Bei ASM hingegen sind die maximale Leistung und die Bemessungsleistung stark von der Statorwicklung abhängig. Zusätzlich kann die durch Stromwärmeverluste hervorgerufene Temperaturentwicklung zu Schäden oder Alterung an verschiedenen Stellen führen. (Halwas et al. 2021, S. 1) Bereits im Jahr 1930 wurde die thermische Alterung von Transformatoren durch die Montsinger-Regel beschrieben (Montsinger 1930). Diese lässt sich auf die Alterung von Isolationssystemen elektrischer Maschinen übertragen und besagt, dass sich die Lebensdauer für jeden Schritt in Höhe von 8 K über der definierten thermischen Klasse (vgl. Anhang B) halbiert. Bei der Reduktion der Betriebstemperatur um 8 K unter die Schwelle der thermischen Klasse wiederum verdoppelt sich die Lebensdauer. Je nach Quelle differiert die Spanne des Temperaturfensters von 6 K bis 10 K (Doppelbauer 2020; Németh-Csóka 2018).

Auch das **Nut- und Zahnkopfdesign** kann verschiedene Einflüsse auf die Performance der Traktionsantriebe haben, wird aber an dieser Stelle nicht weiter analysiert. Prinzipiell ist aber die Ausprägung von Zahnköpfen für eine homogener verteilte Felderregerkurve hilfreich, denn der Einsatz von Zahnköpfen führt zu einer geringeren Drehmomentenwelligkeit und weniger Rastmoment. (Halwas et al. 2019; Halwas et al. 2020b) Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden unterschiedliche Nutgeometrien und Lagenaufbauten mit Ihrem Einfluss auf den Füllfaktor analysiert (vgl. A_Woy 2021). Es konnte gemäß Anhang C eine optimale Nutgeometrie schlussgefolgert werden.

2.2.4 Wicklungsfehler, Mess- und Prüfverfahren

Elektrischen Maschinen können typische Wicklungsfehler aufweisen, die unter anderem durch eine mangelhafte Herstellung verursacht werden können. Diese sind in den Spalten der Tabelle 2-8 abgebildet und teilen sich auf in abweichende

Phasenwiderstände, drei verschiedene Kurzschlussarten (Windungs-, Phasen- und Körperschluss), Verschaltungsfehler, nicht korrekte Windungszahlen, Schwachstellen in der Isolation und Isolationsfehler. Entsprechende Mess- und Prüfverfahren zur Charakterisierung und Detektion dieser Fehler sind in den einzelnen Zeilen dargestellt. Eine Eignung des jeweiligen Mess- oder Prüfverfahrens zur Detektion und Charakterisierung der entsprechenden Wicklungsfehler ist dabei mit einem Kreuz gekennzeichnet. Im folgenden Abschnitt werden nacheinander die Mess- und Prüfverfahren erläutert und die detektierbaren beziehungsweise charakterisierbaren Wicklungsfehler beschrieben.

Tabelle 2-8: Übersicht der möglichen Wicklungsfehler über die Mess- und Prüfverfahren zur Charakterisierung und Detektion der entsprechenden Fehlertypen. (Sell-Le Blanc et al. 2019)

Prüfverfahren	Wicklungsfehler							
	Phasenwiderstand	Windungsschluss	Phasenschluss	Körperschluss	Verschaltungsfehler	Windungszahl	Schwachstellen in der Isolation	Isolationsfehler
Wicklungswiderstand	x							
Isolationswiderstand			x	x				x
Stoßspannungsprüfung		x	x	x	x	x		
Teilentladungsfestigkeit							x	x
Isolationsfestigkeit			x	x				x

Mit der Messung des elektrischen Widerstands können sowohl der (ohmsche) Wicklungswiderstand als auch der Isolationswiderstand bestimmt werden. Prinzipiell dient die Messung des **Wicklungswiderstands** der Feststellung, ob die Phase nicht unterbrochen ist und der Widerstand dem vorgegebenen Wertebereich entspricht. Die Wicklungswiderstände einzelner baugleicher elektrischer Maschinen variieren in einem so großen Toleranzbereich, dass regelmäßig keine Detektion der Kurzschlüsse zwischen einzelnen Spulenwindungen (Windungsschluss) oder kleinere Drahtverjüngungen durchgeführt werden kann. Die Verwendung eines stark abweichenden Drahtdurchmessers könnte jedoch durch die Messung des Wicklungswiderstandes auffallen. (Sell-Le Blanc et al. 2019) Aufgrund zu hoher Drahtzugkräfte während des Wickelvorgangs kann der Drahtdurchmesser auch

ungewollt verringert werden. (Hofmann 2020, S. 24 ff.). Durch die Messung des **Isolationswiderstands** kann festgestellt werden, ob ein Kurzschluss zwischen den Phasen (Phasenschluss) oder den Wicklungen und dem Statorblechpaket (Körperschluss) vorliegt, was gleichzeitig auch das Vorliegen eines Isolationsfehlers zur Folge hätte. (Sell-Le Blanc et al. 2019)

Kurzschlüsse innerhalb einzelner Windungen von Teileleitern einer Spule (Windungsschlüsse) können durch eine **Stoßspannungsprüfung** detektiert werden. Es können mit der Stoßspannungsprüfung weiterhin Phasenschlüsse, Körperschlüsse oder Verschaltungsfehler festgestellt und auch die korrekte Anzahl der Windungen pro Teilspule überprüft werden. Kurzschlüsse in der Wicklung können dauerhaft sein oder spannungsabhängig auftreten. Bei einem dauerhaften Windungsschluss, kann davon ausgegangen werden, dass das betreffende Isolationsmaterial so stark beschädigt ist, dass die Leiter in direktem elektrischem Kontakt zueinanderstehen. Spannungsabhängige Kurzschlüsse in Wicklungen treten hingegen erst bei hohen Spannungswerten auf. Dabei führen Isolationsbeeinträchtigungen wie Fehlstellen (engl. Pinholes) in der Lackschicht der Drähte zu elektrischen Überschlügen. Wenn zufällig zwei Pinholes zweier Drähte über einem Luftspalt in der Wicklung gegenüberliegen, kann die Strecke dieses Spaltes ab einem gewissen Spannungsniveau überwunden werden. Damit können durch die Stoßspannungsprüfung auch spannungsabhängige Kurzschlüsse detektiert werden. Um eine Stoßspannungsprüfung durchzuführen, wird der in Abbildung 2-19 schematisch dargestellte Aufbau verwendet. Dabei wird zuerst ein Kondensator durch eine Hochspannungsgleichstromquelle auf einen definierten Spannungswert geladen. Während der Stoßspannungsprüfung wird der Schaltkontakt stoßartig von der zu prüfenden Wicklung geschlossen (in Abbildung 2-19 schematisch als Spule dargestellt) und der elektromagnetische Schwingkreis zwischen Wicklung und Kondensator beginnt zu schwingen. Die zwischen beiden Messpunkten aufgenommene Oszillationskurve gleicht dabei einer gedämpften Sinuswelle, da innerhalb jeder Schwingungsperiode Verluste auftreten. Die gedämpfte Schwingung wird durch den Spitzenwert U_{\max} , die Scheitelzeit T_p und die Rückhalbwertszeit T_2 charakterisiert. Zur Bewertung einer Wicklung kann die gemessene Schwingungskurve direkt mit der eines bekannten Gutteils verglichen werden. Weicht die Schwingungskurve um einen vordefinierten prozentualen Grenzwert ab, so liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Defekt in der Wicklung vor. Die Art des Defekts kann anschließend nur durch die zerstörende

Prüfung und optische Untersuchung der Wicklung herausgefunden werden. (Sell-Le Blanc et al. 2019; Schon 2016; Lahrman, Lahrman & Granitza 2015)

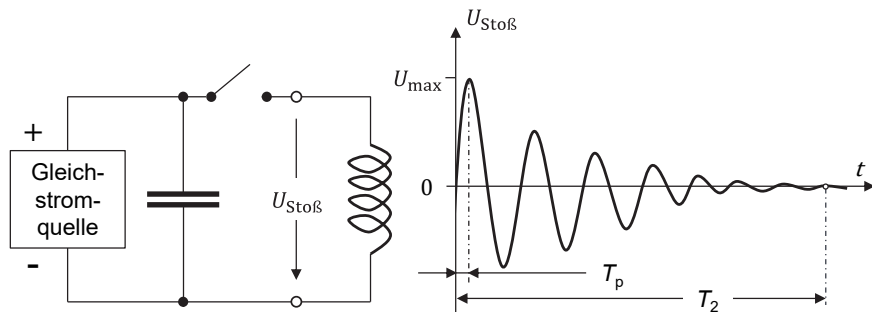


Abbildung 2-19: Schematische Darstellung des Aufbaus eines elektromagnetischen Schwingkreises (links) der Stoßspannungsprüfung und der gedämpften Sinuswelle (rechts) der resultierenden schwingenden Schaltstoßspannung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (Sell-Le Blanc et al. 2019; Schon 2016; Lahrman, Lahrman & Granitza 2015))

Durch Messung der Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen kann die **Teilentladungsfestigkeit** bestimmt werden. Teilentladungen sind kleine und räumlich begrenzte elektrische Entladungen, die auftreten, wenn die Feldstärke den kritischen Wert der Stoßionisation überschreitet. Diese lokalen Entladungen werden auch als unvollkommene Durchschläge bezeichnet, da die Isolationsfestigkeit noch nicht vollständig zerstört ist. Treten Teilentladungen allerdings häufig und über längere Zeiträume auf, weiten sich die Schwachstellen der Isolation aus. Dabei können eine weitere Spannungserhöhung oder Alterungsvorgänge bei anhaltenden Teilentladungsvorgängen zu Isolationsfehlern führen. Zu beobachten ist, dass die Spannungswerte, bei denen erstmalig Teilentladungen innerhalb einer isolierten Wicklung auftreten (Teilentladungseinsetzspannung), höher sind, als die dazugehörigen Spannungswerte, bei denen die Teilentladung mit abnehmender Spannung wieder aussetzt (Teilentladungsaussetzspannung). Die Schwachstellen der Isolation werden dementsprechend bereits durch kurzzeitige Teilentladungen geschädigt. Die Teilentladungsmessung wird im hiesigen Zusammenhang in Kombination mit der Stoßspannungsprüfung durchgeführt. Die Stromstöße der Stoßspannungsprüfung werden genutzt, um mit einer Messsonde mögliche Teilentladungen zu detektieren. Bei den Teilentladungseinsetzspannungen kann

zwischen der Einsetzspannung U_{PDIV} (PDIV = partial discharge inception voltage) und der wiederholenden Einsetzspannung U_{RPDIV} (RPDIV = repetitive partial discharge inception voltage) unterschieden werden. Das erstmalige Auftreten einer einzelnen Teilentladung ab einem bestimmten Spannungsniveau wird als U_{PDIV} gekennzeichnet. Die technische Spezifikation DIN IEC/TS 61934 sieht ein Vorgehen der Messung der Teilentladungsfestigkeit vor, je Spannungsstufe werden mehrere Stromimpulse geprüft. Wenn pro Spannungsstufe mehr als 50 % der geprüften Stromimpulse eine Teilentladung aufweisen, ist die U_{RPDIV} erreicht. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche wurden je Spannungsstufe mindestens sechs Stromimpulse angelegt. Analog gilt dieses Vorgehen auch für die Teilentladungsaussetzspannungen, dabei ist zwischen der Aussetzspannung U_{PDEV} (PDEV = partial discharge exinction voltage) und der wiederholenden Aussetzspannung U_{RPDEV} (RPDEV = repetitive partial discharge exinction voltage) zu unterscheiden. Beim stufenweisen Senken des Spannungsniveaus setzt allerdings zuerst die U_{RPDEV} vor der U_{PDEV} aus. (DIN IEC/TS 61934:2012-09; Sell-Le Blanc et al. 2019; Schon 2016; Lahrmann, Lahrmann & Granitza 2015)

Die **Isolationsfestigkeit**, die auch als Spannungsfestigkeit oder Durchschlagsfestigkeit bezeichnet wird, beschreibt denjenigen Spannungswert U_{d} , bei dem die Isolation versagt und ein elektrischer Durchschlag stattfindet. Hierbei sinkt der Isolationswiderstand schlagartig. Dieser vollständige Durchschlag zerstört die Isolation irreversibel und die geprüfte Wicklung ist nichtmehr funktionsfähig. Folglich ist die Prüfung der Isolationsfestigkeit auf den maximalen Spannungswert ein zerstörendes Verfahren, das für die Qualifizierung und Erforschung von Wicklungen eingesetzt werden kann. In der Produktion wird bei der Prüfung von Wicklungen in der Regel ein Mindestwert abgeprüft, bei dem das Isolationssystem nicht durchschlagen darf und somit entweder als Gutteil oder als Ausschuss zu bewerten ist. (Sell-Le Blanc et al. 2019)

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Messungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit an einem universellen Wicklungsprüfgerät des Typ MTC-2 der Schleich GmbH durchgeführt. Der Prüfplatz ist unter Anhang D abgebildet. (vgl. Lahrmann, Lahrmann & Granitza 2015)

2.2.5 Ableitung entscheidender Merkmalsausprägungen von Statorn

Die Merkmale und ihre entsprechenden Möglichkeiten zur Ausprägung von Statorn elektrischer Traktionsantriebe, die in den vorangestellten Kapiteln 2.1 und 2.2 eingeführt und beschrieben sind, werden in Bezug auf Ihre Auswirkungen auf die Performanceeigenschaften analysiert. Dieses Vorgehen soll es im Folgenden ermöglichen, die entscheidenden Merkmalsausprägungen zu identifizieren und im Anschluss daran, die Wickeltechnologien unter diesen Gesichtspunkten zu bewerten. Hierfür wurde eine Matrix zur Darstellung der Zusammenhänge erarbeitet, wie in Tabelle 2-9 gezeigt. Im Kontext der Arbeit werden die Merkmalsausprägungen der Statorbaugruppe – insbesondere der Statorwicklung – fokussiert, in anderen Veröffentlichungen zu diesem Thema wurden auch weitere Baugruppen der Traktionsantriebe behandelt (Halwas et al. 2019; Halwas et al. 2020b).

In den Spalten der Tabelle 2-9 sind die Merkmalsausprägungen von Statorbaugruppen aufgeführt. Diese sind nach der Vorstellungsreihenfolge im vorangegangenen Kapitel von links nach rechts aufgelistet. In den einzelnen Zeilen sind die wesentlichen Eigenschaften der resultierenden Maschinen eingetragen (angelehnt an Halwas et al. 2019). In den entsprechenden Feldern können die Wechselwirkungen der Ausprägungen angegeben werden; die als starker Einfluss (3) oder Einfluss (1) quantifiziert und sich positiv (+) oder negativ (-) auf die Eigenschaften auswirken können. Am unteren Ende der Tabelle werden die Bewertungspunkte betragsmäßig aufsummiert, um die Gesamtstärke des Einflusses eines Merkmals auf die Performance des Traktionsantriebes abschätzen zu können. Dieser Ansatz ist am Vorgehen der Nutzwertanalyse orientiert (vgl. VDI 2225 Blatt 3:1998-11). Die Nutzwertanalyse ist eine heuristische Methode, mit dem Ziel, eine systematische Ergebnisfindung herbeizuführen, möglichst ohne dabei subjektive Entscheidungen treffen zu müssen. (Halwas et al. 2019; Halwas et al. 2020b)

Tabelle 2-9: Matrix zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Performanceeigenschaften (Zeilen) und den Merkmalen (Spalten) von Traktionsantrieben. (eigene und veränderte Darstellung nach (Halwas et al. 2019))

	konzentrierte Wicklung	verteilte Wicklung	Einschichtwicklung	Zweischichtwicklung (geseht)	Spulenumwicklung	Stabwicklung	Füllfaktor (hoch)	Wickelkopfgröße (klein)	freies Nutdesign	freies Zahnkopfdesign
Bemessungsleistung P_{rat}	-1	+1	-1	+1			+1		+1	+1
maximales Drehmoment M_{max}	+1	-1	+1	-1	-3	+3	+1		+1	+1
maximale Drehzahl n_{max}	-1	+3			+3	-3				+1
Leistungsgewicht p_m	+3	-1	+1	-1			+1	+1	+1	+1
Wirkungsgrad η							+3	+1	+1	+1
Zeitdauer mit Überlastung Δt_s							+3			
Stromwärmeverluste (DC) P_g						-3	+3	+3		
zus. Stromwärmeverluste (AC) P_w						+3	-3	+3	+1	
Eisenverluste P_{Fe}									+3	+1
Drehmomentenwelligkeit	-3	+3	-3	+3						+3
Rastmoment	-3	+3								+3
Punktesumme (Betrag)	12	12	6	6	12	12	15	6	7	12

+3 = stark positiver Einfluss, +1 = positiver Einfluss, -1 = negativer Einfluss, -3 = stark negativer Einfluss

Zusammenfassend kann mit Hilfe der Tabelle 2-9 resümiert werden, dass die Merkmalsausprägungen von Traktionsantrieben einen großen Einfluss auf ihre Performanceeigenschaften haben. Für rein elektrisches Fahren und damit für Traktionsantriebe, ist als Wicklungsart die verteilte Wicklung der konzentrierten Wicklung zu bevorzugen. Die Drehmomentenwelligkeit und das Rastmoment sind deutlich geringer, zudem können höhere Drehzahlen gefahren werden. Das ist insofern vorteilhaft, weil im Vergleich zu hybriden Fahrzeugen bei elektrischen Fahrzeugen ein Getriebe mit einer, oder wenn, dann nur mit wenigen, Gangstufen eingesetzt wird. Für die Schichtung der Spulenseiten in der Nut ist es deshalb sinnvoll, eine Schichtung mit Lagenwechsel und Sehnung vorzusehen, um das Betriebsverhalten weiter zu verbessern. Bei der Entscheidung des Einsatzes von

Stab- oder Spulenwicklungen ist keine eindeutige Entscheidung zu treffen. Im günstigsten Fall wäre eine Kombination aus hoher Querschnittsfläche mit einzelnen Teileleitern der Spulenwicklung zu wählen, um die Vorteile beider Ansätze zu vereinen. Bezüglich des Füllfaktors sind stets hohe Werte anzustreben. Zur Reduktion der Stromwärmeverluste und das für Traktionsantriebe maßgebende Leistungsgewicht ist ein kurzer Wickelkopf entscheidend. Zusätzlich ist ein kleinerer Bauraum in der Länge des Traktionsantriebes bei kleinen Wickelköpfen erforderlich. Ein freies geometrisches Nutdesign kann zu einem besseren magnetischen Fluss im Statorblechpaket führen und die Eisenverluste, den Wirkungsgrad sowie die Leistungsdichte verbessern. Darüber hinaus ist die Ausprägung eines Zahnkopfes, beziehungsweise die Möglichkeit einer freien Gestaltung des Zahnkopfesdesigns, für Traktionsantriebe relevant. Davon wird die Drehmomentenwelligkeit und das Rastmoment beeinflusst, aber auch die Leistungsfähigkeit über die Bemessungsleistung, das Drehmoment, die Drehzahl, den Wirkungsgrad und das Leistungsgewicht verbessert. (Halwas et al. 2019; vgl. hierzu Doppelbauer 2020; Hofmann 2014; Halwas et al. 2020b)

2.3 Analyse der Wickeltechnik für Drehstromstatoren

2.3.1 Einordnung der Wickeltechnik in die Prozesskette der Statorfertigung

Nachfolgend ist auf die einzelnen Wickeltechniken nach dem Stand der Technik und Forschung einzugehen. Da diese im Fokus der Arbeit stehen, soll jedoch in der gebotenen Kürze zunächst anhand der Abbildung 2-20 auf die Prozesskette der Statorfertigung eingegangen werden und aufgezeigt werden, an welcher Stelle die Wickeltechnik verortet ist. Der Anteil der Statorfertigung beträgt etwa 35 % der Gesamtkosten einer elektrischen Maschine und ist damit die teuerste Baugruppe der Elektromotorenproduktion (Kampker 2014, S. 147).

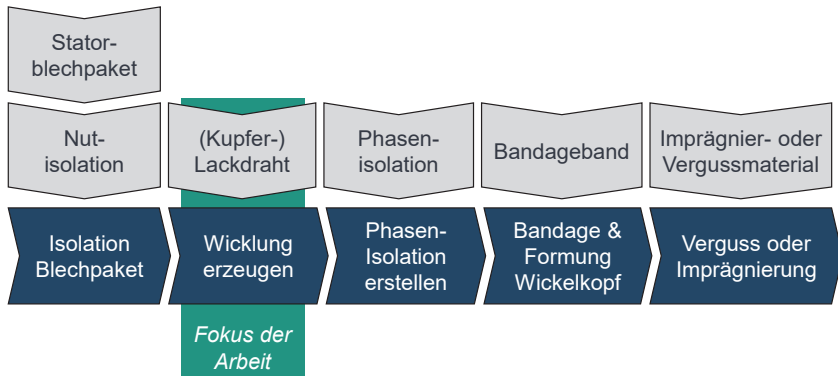


Abbildung 2-20: Schematische Übersicht der Prozesskette der Statorfertigung. Blau gekennzeichnet sind die einzelnen Prozessschritte, grau die zu verarbeitenden Halbzeuge und Materialien. (eigene und veränderte Darstellung nach (Vogt 2019, S. 19))

Zu Beginn der Statorfertigung ist es notwendig, die Statorblechpakete mit einer Nutisolation zu bestücken (siehe Abbildung 2-20 links). Diese dient als EIM, erhöht die Spannungsfestigkeit und verhindert beim Betrieb des Antriebs einen Körperschluss. Derzeit dienen regelmäßig Nutisolationspapiere bei der automatisierten Bewicklung von Statoren in Vollblechschnitten als EIM, da die gestanzten oder gelaserten Blechpakete scharfe Kanten besitzen. Diese führen bei direktem Kontakt mit den Kupferlackdrähten zu Abschälungen der Lackisolation und dadurch zu unmittelbaren Defekten in der Wicklung. Auf der Oberfläche des Nutisolationspapiers können die Kupferlackdrähte hingegen ohne Beschädigungen in die Nut gleiten. In anderen Verfahren, die beispielsweise mit segmentierten Einzelzähnen arbeiten (siehe Kapitel 2.3.3 Linearwickelverfahren), werden neben Nutisolationspapieren häufiger auch Kunststoffumspritzungen oder Kunststoffkappen eingesetzt. Im nächsten Schritt wird dann die Wicklung in den Stator eingebracht. Die Herstellung der Wicklung unter Einsatz verschiedener Wickeltechnologien wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Dabei sind die isolierten Wickelkörper und der Kupferlackdraht als Halbzeuge angenommen. Die Erstellung der Phasenisolation, die Bandagierung und die Formung des Wickelkopfes werden hauptsächlich bei verteilten Runddrahtwicklungen vorgenommen. Es ist wichtig, die verschiedenen Phasen, die sich im Wickelkopf kreuzen und die zumeist die größten Spannungsdifferenzen in der Wicklung aufweisen, voneinander zu isolieren und den Wickelkopf im Anschluss zu

formen. Bei verteilten Runddrahtwicklungen können die Wickelköpfe stark auskragen. Um einen etwas kompakteren Bauraum im Gehäuse zu erreichen, ist die Formung und Bandagierung der Wickelköpfe notwendig. Im Anschluss findet die Imprägnation oder der Verguss der Wicklung statt. Die eingesetzten Harze zählen zu den NIM und dienen der mechanischen Stabilität (Vermeidung von Reibung zwischen den Drähten durch Fixierung), der thermischen Anbindung und teilweise auch der elektrischen Isolation. Insoweit kann, unter anderem, von einer Erhöhung der Teilentladungsfestigkeit und einer geringeren Alterung ausgegangen werden. Dies wird mit der Verdrängung der Luft durch die Polymere der eingesetzten Harze ermöglicht. (Kampker 2014, Kap. 4)

2.3.2 Begriffe und Einordnung der Wickeltechnik

Vorliegend wird die Herstellung synonym zur **Produktion** verstanden, die sich aus Fertigungs-, Montage- und Handhabungsschritten zusammensetzen kann. Als **Verfahren** werden die unter Abbildung 2-21 dargestellten Fertigungsverfahren nach DIN 8580 bezeichnet (vgl. DIN 8580:2003-09). In diesem Schema ist die Wickeltechnik dem „Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper“ (DIN 8580:2003-09) der Gruppe 4.5.1. zuzuordnen. Im angegebenen weiterführenden normativen Verweis der DIN 8593-5 zählt das Wickeln mit Draht zur Gruppe 4.5.1.6, das als „Fügen eines Innenteiles mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil“ (DIN 8593-5:2003-09) definiert ist.

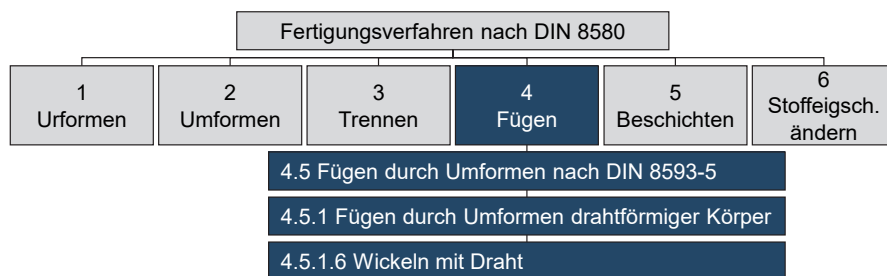


Abbildung 2-21: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 mit Fokus auf das Wickeln mit Draht nach DIN 8593-5. (eigene und veränderte Darstellung nach (DIN 8580:2003-09; DIN 8593-5:2003-09))

Im Gegensatz dazu soll ein **Prozess** als ein aus verschiedenen Verfahren zusammengesetzter Ablauf definiert werden. Dies können Fertigungsverfahren nach DIN 8580 sein, aber auch Handhabungs- oder Montageschritte. Die VDI-Richtlinie

VDI 2860 beschreibt die Teilfunktionen des Handhabens und bietet ausführliche Symbolbilder für lösungsneutrale Teil-/Funktionen (VDI 2860:1990-05).

2.3.3 Herstellung von Runddrahtwicklungen

Bevor in diesem Kapitel auf die Herstellung von Runddrahtwicklungen einzugehen ist, soll noch erwähnt werden, dass die im Anschluss erläuterten Verfahren prinzipiell auch mit anderen Querschnittsformen Verwendung finden könnten. Unter Runddrähten sind grundsätzlich Leiter mit kreisförmigen Abmessungen zu verstehen, es könnten theoretisch aber auch rechteckige, trapezförmige, hexagonale oder anders geformte Querschnitte verarbeitet werden. Da komplexere Querschnitte in der Herstellung kostenintensiver sind (Halwas et al. 2020b) und auch die Wickeltechnologien bei der Verarbeitung angepasst werden müssten, werden nach dem aktuellen Stand der Technik außer Rund- und Rechteckdrähten andere Formen nur in Spezialanwendungen oder in der Forschung eingesetzt.

Das kinematisch am einfachsten aufgebaute Verfahren zur Herstellung von Runddrahtwicklungen ist das **Linearwickelverfahren**. Hierbei wird der zu bewickelnde Spulenkörper auf einer drehbaren Spindel montiert. Der Draht wird durch einen düsenförmigen Drahtführer während der Rotation des Spulenkörpers mittels einer Linearbewegung verlegt (siehe Abbildung 2-22). Für den Wickelvorgang ist die sogenannte Terminierung des Drahtes notwendig, womit die Fixierung des freien Drahtendes auf dem Spulenkörper gemeint ist. Aus der linearen Bewegung des Drahtführers zur Spindelachse folgt die Namensgebung Linearwickeln. Prinzipbedingt können mit diesem Verfahren für Statoren nur Einzelzähne konzentriert bewickelt werden¹⁰. Es können wilde, lagengenaue und orthozyklische Lagenaufbauten hergestellt werden. Hierbei sind während des Wickelns die Parameter des Drahtzugs, der freien Drahtlänge, der Spindeldrehzahl, der Verlegegeschwindigkeit sowie der Vor- und Nachlauf der Verlegedüse anzupassen. (Dobroschke 2011; Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 182 ff.)

¹⁰ Durch den Einsatz von polierten Werkzeugen zur Drahtführung können außengenutete Spulenkörper, wie Rotoren für Gleichstrommotoren, erzeugt werden. Für Rotoren in der Größenordnung von Traktionsmaschinen kommt diese Verfahrensvariation nicht zur Anwendung, da die zu bewegende Masse der Maschinenkomponenten die Werkzeugmassen um ein Vielfaches übersteigen würde.

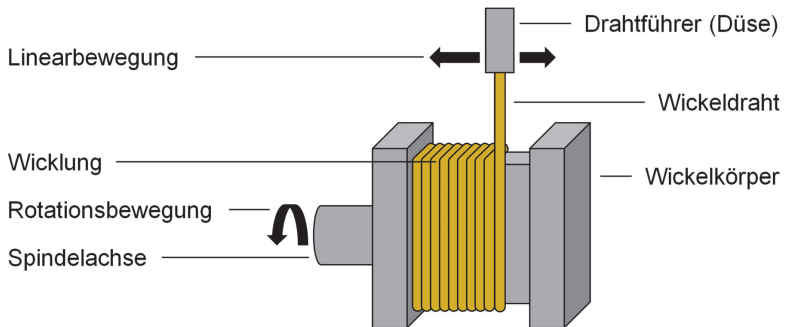


Abbildung 2-22: Vereinfachte schematische Darstellung des Linearwickelverfahrens auf einem unrunder Spulenkörper.

Nach aktuellem Stand der Forschung und Technik bestehen die Herausforderungen beim Linearwickeln in den hohen Aspektverhältnissen von Breite zu Höhe bei unrunder Spulenkörpern, den hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Spindel und Anwendungsfällen von kleinen ($< 0,2$ mm) oder großen (> 2 mm) Drahtquerschnitten. Die zur Lösung dieser Herausforderungen notwendigen Parameter, Modellierungen und experimentellen Untersuchungen sind Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen (Weigelt et al. 2019; Bönig et al. 2014; Hofmann et al. 2018; Sell-Le Blanc 2016; Bönig et al. 2015). Das Linearwickelverfahren wird häufig in der Grundlagenforschung zur Wickeltechnologie verwendet, um die gewonnenen Erkenntnisse auf die kinematisch komplexeren Wickelverfahren und -prozesse zu übertragen (siehe Dobroschke 2011).

Im Gegensatz zum Linearwickelverfahren wird beim **Flyerwickelverfahren** die gesamte Verlegeeinheit, die als Flyerarm bezeichnet wird, um den Spulenkörper rotiert und zugleich linear bewegt (siehe Abbildung 2-23). Mit Hilfe zusätzlicher beweglicher und polierter Werkzeuge als Führungselemente des Drahtes, kann die Drahtführung so beeinflusst werden, dass neben wilden auch lagengenaue und orthozyklische Lagenaufbauten hergestellt werden können. Aufgrund der notwendigen Längen- und Breitenabmessungen der Verlegeeinheit und der Werkzeuge beim Flyerwickeln, entsteht im Vergleich zur alleinigen Rotation des Spulenkörpers beim Linearwickelverfahren eine höhere Massenträgheit der zu bewegenden

Komponenten¹¹. Daraus können geringere Wickelgeschwindigkeiten resultieren, soweit die Leistungskennzahlen der Antriebsachsen gleichbleiben. Bei der Statorfertigung werden analog zur Linearwickeltechnik ausschließlich konzentrierte Wicklungen erstellt¹², auch wenn theoretisch eine Bewicklung von Statoren im Stern-Joch-Design denkbar wäre. Aufgrund der höheren Komplexität und der, aus den geringen Wickelgeschwindigkeiten folgenden, geringeren Produktivität des Flyerwickelns, ist das Linearwickeln bei der Fertigung von Einzelzahnwicklungen zu bevorzugen. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 196 ff.) Bei alleiniger Betrachtung der Kinematik sind die Zusammenhänge vom Linearwickeln auf das Flyerwickeln übertragbar, unter Einbeziehung der Größen der Dynamik ergeben sich dementsprechend abweichende Modelle. Beispielsweise ist das Schwingungsverhalten der Anlage oder die freie Weglänge des Drahtes zwischen Spulenkörper und Düse als andersartig anzunehmen.

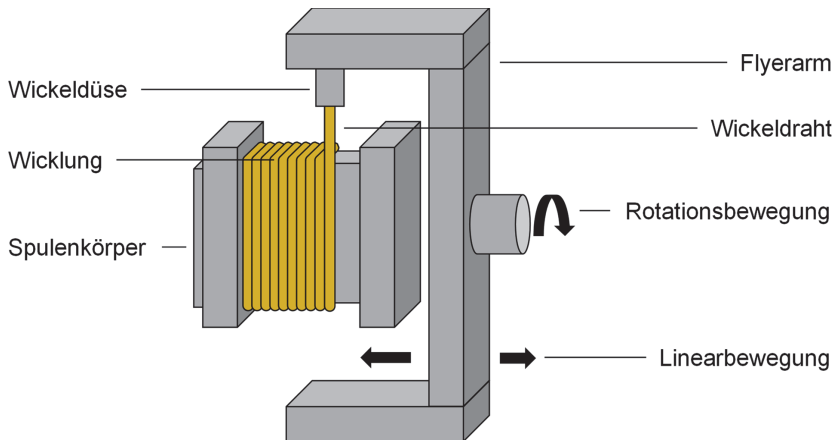


Abbildung 2-23: Vereinfachte schematische Darstellung des Flyerwickelverfahrens auf einem ungerundeten Spulenkörper.

Das **Nadelwickelverfahren** bezeichnet diejenigen Wickelverfahren, bei denen der Drahtführer mit komplexeren Bewegungen um den Spulenkörper geführt wird (siehe

¹¹ Dies ist nur für konzentrierte Wicklungen auf einfachen Spulenkörpern zutreffend, wie sie bei Statoren von Traktionsmaschinen auftreten. Bei der Fertigung von größeren Spulenkörpern, wie Rotoren von Gleichstrommaschinen, kehrt sich die Argumentation um und eine Fertigung im Flyerwickeln ist günstiger als im Linearwickelverfahren.

¹² Auch bei der Flyerwickeltechnik können durch den Einsatz polierter Werkzeuge verteilte Wicklungen auf außengenutzten Spulenkörpern hergestellt werden. Diese sind aber nicht bei den Baugrößen von Traktionsmotoren in Verwendung.

Abbildung 2-24). Oft wird der Spulenkörper dabei zusätzlich um eine Rotationsachse gedreht. Eine maximale Ausbaustufe der zulässigen Düsenbewegungen in alle drei Raumrichtungen, sowohl translatorisch als auch rotatorisch, ist möglich. Allerdings sind für die meisten Anwendungen drei translatorische und eine rotatorische Achse des Drahtführers in Kombination mit einer Rotationsachse des Spulenkörpers ausreichend, weil dadurch bereits alle benötigten Bahnen des Drahtführers abgefahren werden können. Dementsprechend werden Nadelwickelverfahren herkömmlich auch als Hub-Schwenk-Wickelverfahren bezeichnet (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990, S. 318 f.).

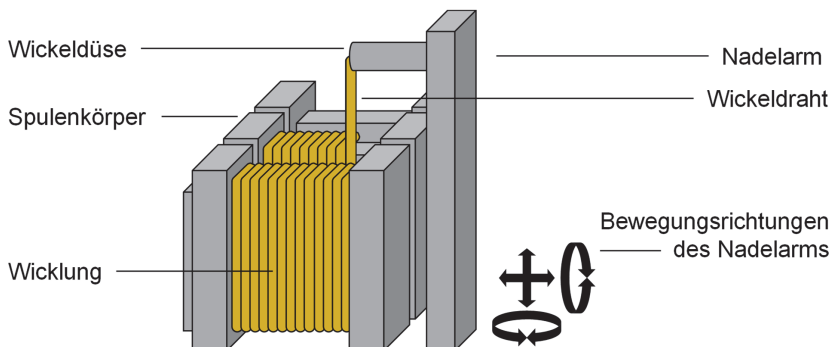


Abbildung 2-24: Vereinfachte schematische Darstellung des Nadelwickelverfahrens auf unrunde Spulenkörper.

Mit Hilfe von Werkzeugen im Wickelkopfbereich ist es möglich, verteilte Statorwicklungen in der Baugröße von Traktionsantrieben und mit darüberhinausgehenden Abmessungen herzustellen. (Hagedorn & Lüttge 2012) Dabei werden zumeist wilde Lagenaufbauten erzeugt. Abgesehen von Zweischichtwicklungen mit Lagenwechsel, können ansonsten nahezu alle Statorwicklungen mittels des sehr flexiblen Nadelwickelverfahrens hergestellt werden. Rotorwicklungen für FESM werden nach aktuellem Stand der Technik ebenfalls mit der Nadelwickeltechnik erzeugt, hierbei sind orthozyklische Lagenaufbauten umsetzbar. Herausforderungen bei der Nadelwickeltechnik sind die zu überwindenden Wegstrecken vom Drahtfass zum Wickelkörper und die dafür benötigten Umlenkeinheiten. So entstehen bei einer konstanten Bremskraft durch die Drahtbremse beim dynamischen Wickelprozess Drahtzugkraftschwankungen an der freien Weglänge des Drahtes zwischen Wickelkörper und Drahtdüse. Im ungünstigsten Fall kann der Wickeldraht durch

Anlegen zu hoher Drahtzugkräfte reißen oder bei zu geringen Drahtzugkräften seine Führung verlieren. (siehe Hofmann 2020)

Die **Einziehtechnik** ist ein zusammengesetzter Prozess aus einem der drei bereits vorgestellten Wickelverfahren und dem sogenannten Einziehen. Hierdurch werden vorzugsweise verteilte Wicklungen in Statorn mit Vollblechschnitt eingezogen. Als Wickelverfahren kommen in aktuellen Anwendungen das Linear- oder das Flyerwickelverfahren zum Einsatz, in Abhängigkeit davon, ob die Wickelschablone oder die Drahtführung rotiert. Eine Wickelschablone bezeichnet ein Werkzeug, das zur Erzeugung sogenannter Luftspulen dient. Darunter sind die reinen Kupferdrahtwicklungen ohne Spulenkörper zu verstehen. Wenn keine zusätzlichen Maßnahmen wie die Fixierung durch Kabelbinder oder Backlack vorgenommen werden, ist die Herstellung eines geordneten Lagenaufbaus unmöglich, es liegt dann immer eine Spule mit wildem Lagenaufbau vor. Die Luftspulen werden im Anschluss in das Einziehwerkzeug eingelegt. Dieses besteht aus der Innennadel, der Außennadel und dem Einziehpilz (siehe Abbildung 2-25). Danach wird das Statorblechpaket auf das Einziehwerkzeug gesteckt, der Einziehpilz fährt nach oben durch den Stator und zieht die Wicklungen in diesen ein. Als letzter Schritt vor der Entnahme des Werkzeugs werden die Deckschieber zum Verschluss der Nuten eingeschoben. Der Einziehschritt benötigt nur wenige Sekunden.

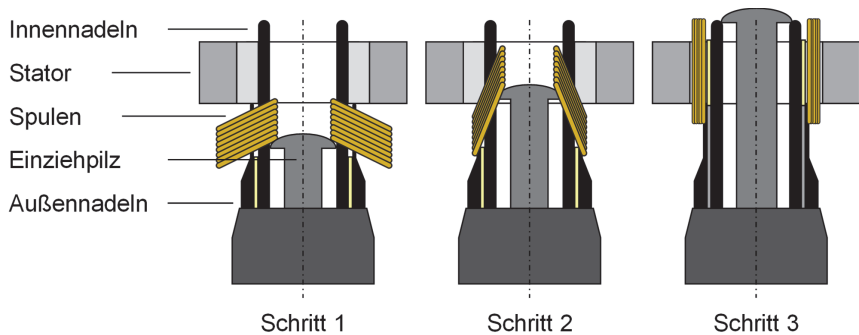


Abbildung 2-25: Vereinfachte schematische Schnittdarstellung der Schritte des Einziehvorgangs zuvor gewickelter Spulen in ein Statorblechpaket. (eigene Darstellung nach (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990, S. 339))

Mit der Einziehtechnik können verteilte Wicklungen in geschlossene Statorn mit einer Blechpaketlänge von bis zu 1000 mm mit einer hohen Varianz an Nutenzahlen,

Drahtdurchmessern, Spulenabmessungen, Statorinnen- und Statoraußendurchmessern eingezo-gen werden (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990, S. 352). Für jede Bauform wird allerdings ein separat anzufertigendes Werkzeug benötigt. Es können prinzipbedingt keine Mehrschichtwicklungen mit Sehnung hergestellt werden. In der industriellen Fertigung kommt oft die Einziehtechnik zur Fertigung verteilter Runddrahtwicklungen zur Anwendung, bis zu 80 % der Statoren werden mit verteilter Wicklung und Vollblechschnitt eingezo-gen (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 222). Als Konsequenz aus der weit verbreiteten Anwendung der Einziehtechnik für verteilte Wicklungen wurden auch die ersten Statoren für Traktionsantriebe unter Verwendung der Einziehtechnik hergestellt. Allerdings haben Einziehwicklungen auch einige entscheidende Nachteile. Es sind, ähnlich dem Nadelwickelverfahren, keine Zwei- oder Mehrschichtwicklungen mit Lagenwechsel herstellbar. Die Spulen sind beim Einziehvorgang hohen Beanspruchungen ausgesetzt, enthalten Kreuzungen und können bei falscher Auslegung verklemmen und sogar reißen. Dies führt zu geringen Füllfaktoren. Weiterhin erfordern die Wickelköpfe der Statorwicklung prozessbedingt große Weglängen, damit die Werkzeuge eingreifen können. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016; Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990) Forschungsarbeiten zur Nachbildung der Drahtspannungen und der Reduktion derselben durch Geometrieänderungen am Einziehwerkzeug wurden durchgeführt (Hofmann et al. 2016), allerdings konnten die Nachteile der Einziehtechnik nach aktuellem Stand der Technik nicht vollständig ausgeräumt werden und es sind auch keine neuartigen Ansätze bekannt, die weitere Potenziale zur Lösung dieser Herausforderungen aufzeigen.

Bei der händischen Bewicklung von Statoren elektrischer Maschinen wird herkömmlicherweise die ***händische Träufelwickeltechnik*** angewandt. Träufeln ist der Begriff für das Vereinzeln der Drähte einer zuvor teilautomatisiert erzeugten Luftspule mit anschließendem Einlegen in die Statornut (siehe Abbildung 2-26). Nach der Wicklung der Luftspulen auf einem sogenannten Schablonenwickler, werden die aus verschiedenen Teilspulen bestehenden Spulen mittels wiederverwendbarer Kabelbinder fixiert, in den Stator eingelegt und in die vorgesehenen Statornuten eingeträufelt. Während des Wickelprozesses werden Werkzeuge zur Einbringung und Fixierung der Drähte in die Nuten verwendet, auch wird der Wickelkopf durch mechanische Bearbeitung geformt. Die Werkzeuge sind zumeist aus weichen Materialien wie Holz oder Kunststoff, damit der Lackdraht nicht beschädigt wird.

Erfordern die Verwendungszwecke der Werkzeuge eine höhere Festigkeit, wie etwa bei Träufelnadeln oder Nutzenstemmern, wird Metall eingesetzt. Diese sind an ihren Funktionskontaktflächen poliert und haben keine scharfen Kanten.

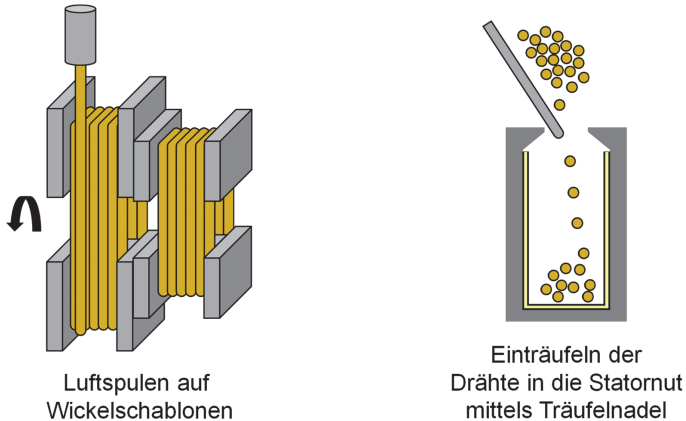


Abbildung 2-26: Vereinfachte schematische Darstellung der Träufelwickeltechnik. Erstellung der Luftspulen auf einem Schablonenwickler (links) und Einträufeln der Wicklung in der Schnittansicht (rechts).

Die Träufelwickeltechnik ist das flexibelste Verfahren, mit dem nahezu jede Statorwicklung hergestellt werden kann. Dabei sind nur sehr geringe Stückzahlen wirtschaftlich lohnenswert, wie es beispielsweise bei der Prototypenfertigung oder Spezialanwendungen vorkommt. Die Qualität der Wicklung ist bei fachgerechter Umsetzung sehr hoch und es können Wicklungen mit hohen Füllfaktoren und geringen Drahtbeanspruchungen erzeugt werden. Ebenfalls können die Wickelköpfe im Optimalfall für verteilte Wicklungen auf die minimal erforderliche Länge verkürzt werden. Allerdings entstehen hohe Kosten, weil der Vorgang sehr zeitaufwändig ist. Auch kann es zu Schwankungen in der Produktqualität kommen, da jeder Prozessschritt aufgrund der manuellen Fertigung individuell ist. (Peter et al. 2017; Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016; Fleischer, Haag & Hofmann 2017)

2.3.4 Herstellung von Wicklungen mit Rechteckleitern

Bei der Herstellung großer Generatoren und sonstiger großer elektrischer Maschinen (Leistungsklassen > 1 MW) ist die Verwendung von Rechteckleitern mit hohen Querschnittsflächen üblich. Bei diesen Anwendungen werden Kupferstäbe zu

Formspulen, häufig in Diamantspulenform, geformt und mittels sogenannter Einbindemaschinen mit Isolationsband umwickelt. Diamantspulen haben diesen Namen wegen ihrer diamantähnlichen Form. In solchen Einbindemaschinen rotiert ein Einbindering um die Spulenschenkel mit dem Bandrollenpaar, das mit dem Isolationsband bestückt ist¹³. Diese, meist mehrere Meter abmessenden, Spulen werden abschließend in den Stator montiert. (Tzscheuschler, Olbrisch & Jordan 1990) Es handelt sich um händische Verfahren mit Unterstützung von Spezialmaschinen, die zwar zu einem gewissen Teil automatisierbar sind, aber nur für kleine Stückzahlen von Motoren mit großen Abmessung geeignet sind. Hohe Stückzahlen kleinerer Maschinen im Kilowattbereich werden nur in Spezialanwendungen auf diese Art gefertigt. Bisher sind nur wenige neuartige Ansätze zur Herstellung an Statorwicklungen bekannt, die sich an dieser Fertigungstechnologie orientieren (vgl. Kapitel 2.3.5).

Ein etablierter Prozess zur Verarbeitung von Rechteckdrähten, insbesondere zur Fertigung von Traktionsantrieben, ist die **Hairpintechnologie**. Diese Technologie wird neben dem Einsatz in der Fertigung von Traktionsantrieben überwiegend bei Startergeneratoren¹⁴ in konventionell mit Verbrennungsmotoren angetriebenen Kraftfahrzeugen eingesetzt. Bei der Hairpintechnologie wird die Wicklung aus gebogenen formstabilen Segmenten, bestehend aus jeweils einem Rechteckdraht, hergestellt. Die Segmente ähneln einem umgekehrten U oder einer Haarnadel (engl. Hairpin). Die Hairpins werden zu einer vollständigen Wicklung zusammengefügt und verschaltet. Die Hairpintechnologie besteht im Wesentlichen aus den Schritten der Formgebung (1), dem Setzen (2), dem Einbringen (3), dem Twisten (4), dem Kontaktieren (5) und dem Isolieren (6) der Hairpins, wie in Abbildung 2-27 schematisch dargestellt. Die Formgebung (1) erfolgt mittels Richtens der Drähte, der Abisolation an den Verschweißstellen, dem Zuschneiden der Drahtstücke und dem Biegen in die gewünschte Hairpinform. Das Richten der Drähte geschieht in einem Richtwerk, in dem der Draht durch gegenüberliegende Rollen läuft und begradigt wird. Die Abisolation kann mechanisch durch Werkzeuge oder optisch durch Laserstrahlung umgesetzt werden. Die Trennung in einzelne Drahtstücke erfolgt in der Regel durch Schneidwerkzeuge. Beim Biegen der Hairpins können unterschiedlichste Verfahren eingesetzt werden, in der industriellen Anwendung ist insbesondere die

¹³ vergleichbar mit der Ringkernwickeltechnik

¹⁴ Ein Startergenerator ist eine Kombination aus Anlasser und Lichtmaschine. Nach dem Start des Verbrennungsmotors generiert die Maschine elektrische Leistung für das Bordnetz des Kraftfahrzeugs.

beschädigungsfreie Umformung der Kupferlackdrähte bei einer möglichst geringen Toleranzabweichung wichtig. Beim Setzen (2) werden die Drähte in eine Schablone eingesteckt, damit die geordneten Hairpins im nächsten Schritt durch ein Einbringwerkzeug in den Stator eingebracht (3) werden können. Da in der Regel Lagenwechsel der Leiter ausgeführt sind, ist wegen der Kreuzungen im Wickelkopf ein vorheriges Setzen der Hairpins in eine Schablone notwendig. Die Schablone bewirkt vor dem Einbringvorgang ein Eindrehen der Hairpins zu einem geschlossenen Kranz. Bei diesem lassen sich die Hairpins nicht mehr einzeln herausziehen oder einstecken. Der Kranz wird anschließend von einer Seite in das Statorblechpaket eingeschoben. Anschließend werden die Hairpins auf der Rückseite getwistet (4) und verschweißt (5). Die Schweißpunkte bestehen aus blankem Kupfer und müssen abschließend isoliert werden (6). (Wirth et al. 2020; Wirth, Hofmann & Fleischer 2019) Mittels der Hairpintechnologie werden üblicherweise verteilte Wicklungen hergestellt, die zwei bis zwölf Leiter pro Nut aufweisen. (vgl. Doppelbauer 2020, S. 203) Der Vorteil der Hairpintechnologie ist insbesondere der hohe Automationsgrad, der durch die formstabilen rechteckigen Kupferlackdrähte ermöglicht wird. Dies bedeutet gleichzeitig aber auch, dass nur eine Massenproduktion wirtschaftlich ist. Bei der Fertigung von kleinen Serien, oder auch variantenreichen Maschinentypen ist die Hairpintechnologie nicht vorzugswürdig. Das ist einer der Gründe, warum die Hairpintechnologie in der Fertigung von Industriemotoren in der Vergangenheit keine tragende Rolle einnehmen konnte. (Doppelbauer 2020, Kap. 7.5.1.3) Zur Verbesserung der Hairpintechnologie und Lösung der beschriebenen Defizite, werden aktuell verschiedene Forschungsprojekte durchgeführt (Fleischer et al. 2021; Gläsel et al. 2020).

Eine Variation der Hairpintechnologie ist die Verwendung sogenannter **I-Pins** anstelle von Hairpins. (Doppelbauer 2020, Kap. 7.5.1.3) Der Prozessablauf der beiden Pintypen ist weitestgehend identisch, mit dem Unterschied, dass die I-Pins gerade und nicht U-förmig gebogen sind. Daraus ergeben sich aus fertigungstechnischer Sicht die Vorteile, dass das Biegen in der Formgebung (1) entfällt und auch das Setzen (2) nicht notwendig ist. Die geraden I-Pins können direkt axial in den Stator eingeschoben werden. Nachteilig ist hingegen die notwendige Twistung und Kontaktierung an beiden Wickelkopfseiten, da die Schweißstellen grundsätzlich eine Schwachstelle und damit eine Fehlerquelle darstellen und zum anderen die getwisteten Wickelköpfe mit Verschweißung einen größeren Bauraum benötigen als die gebogene Seite des Hairpin-Wickelkopfes.

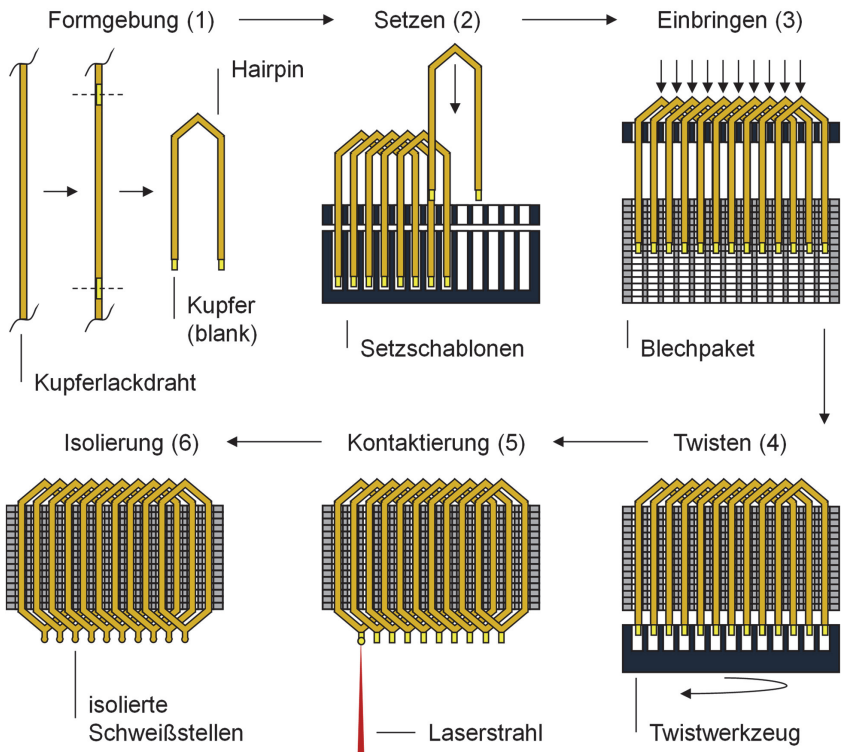


Abbildung 2-27: Vereinfachte schematische Darstellung des Prozessablaufs der Hairpintechnologie zur Herstellung verteilter Wicklungen für Traktionsantriebe. (eigene und veränderte Darstellung nach (Wirth et al. 2020))

Eine außerdem bekannte Abwandlung der Hairpintechnologie ist die **kontinuierliche Hairpintechnologie** (siehe Abbildung 2-28). Diese vermeidet die Twistseite des Stators, indem vorgebogene Wickelmatten in den Stator eingebracht werden. Bei der kontinuierlichen Hairpintechnologie ist der Formgebungs- und der Einbringschritt wesentlich komplexer als bei der herkömmlichen Hairpintechnologie, weil die Wicklungsstränge nicht segmentiert werden, sondern aus einem zusammenhängenden Drahtstück gebogen werden. Die erzeugten Drahtgeflechte aus Endlosmaterial werden Wickelmatten genannt. Weil das Wickelschema der kontinuierlichen Hairpintechnologie prinzipbedingt nur als Wellenwicklung ausgeführt wird, ist in diesem Zusammenhang auch von der Wellenwickeltechnologie die Rede. Das ist allerdings missverständlich,

weil auch die Hairpin- und I-Pintechnologie in der praktischen Anwendung bei Traktionsantrieben hauptsächlich als Wellenwicklung ausgeführt sind. (Ghahfarokhi et al. 2021; Xue et al. 2021) Deshalb soll im Kontext dieser Arbeit der Begriff Wellenwicklung nur für die Wicklungsart im Sinne des Wickelschemas verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.2 Wellenwicklung). Die kontinuierliche Hairpintechnologie lässt sich in die in Abbildung 2-28 gezeigten zwei wesentlichen Prozessschritte unterteilen: die Erzeugung der Wickelmatte (1) und deren Einbringung in den Stator (2). In industriellen Serienanlagen sind diese Prozessschritte innerhalb einer Anlage automatisiert verkettet. (Sadiku & Witt 2009) Die Umsetzung beider Prozessschritte der kontinuierlichen Hairpintechnologie sind mit unterschiedlichen Konzepten umsetzbar und beinhalten je nach Konzept weitere Zwischenschritte. Erste Konzepte zur Erzeugung der Wickelmatte stammen auch bei der kontinuierlichen Hairpintechnologie aus dem Bereich der Startergeneratoren (Leame 1993). Bei diesen Herstellungsprozessen wird die Wickeldüse um die Wickelschablone gedreht. Aktuellere Konzepte, die auch in den Größenordnungen von Traktionsantrieben verwendet werden, sehen vor, dass die Wickelschablone, häufig auch als Wickelschwert bezeichnet, rotiert und die parallel verlaufenden Rechteckdrähte so zur Wickelmatte verwoben werden (Haggenmüller & Dreier 2019; Sadiku & Witwer 2015; vgl. Lüttge 2018). Das Prinzip der Erzeugung der Wickelmatte ist prinzipiell ähnlich, lediglich die technische Umsetzung der Anlagen variiert, häufig abhängig vom Hersteller. Vor Erzeugung der Wickelmatten werden die Drähte analog zur Hairpintechnologie gerichtet. Das Einbringen der Wickelmatte in den Stator kann durch das sequenzielle Einschieben der Spulenseiten der Wickelmatte in die Nuten und ein anschließendes Verdrehen der Nuten realisiert werden, wie aus Abbildung 2-28 ersichtlich (Lüttge 2015). Denkbar ist auch der Einsatz eines außengenuteten zylinderförmigen Einbring- oder Übergabewerkzeugs, das die Wickelmatte aufnimmt, in die Statorbohrung eingefahren werden kann und durch eine Expansion von Schiebern die gesamte Wickelmatte in einem Schritt in den Stator schiebt (Sadiku & Witt 2009). Nachteilig bei der Anwendung von Vollblechschnitten und dieser Wickeltechnologie ist das Erfordernis rechteckiger Statornuten, die zudem keine Zahnköpfe besitzen dürfen. Auch ist der Komplexitätsgrad der kontinuierlichen Hairpintechnologie im Vergleich mit den in Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 gezeigten Wickeltechnologien nach dem Stand der Technik am höchsten. Dafür ist aber auch der Automatisierungsgrad, beziehungsweise das Potenzial zur Serien- und

Massenfertigung am größten, das ist bei Traktionsantrieben vorteilhaft. (Fleischer, Haag & Hofmann 2017; A_Sedlmair 2021)

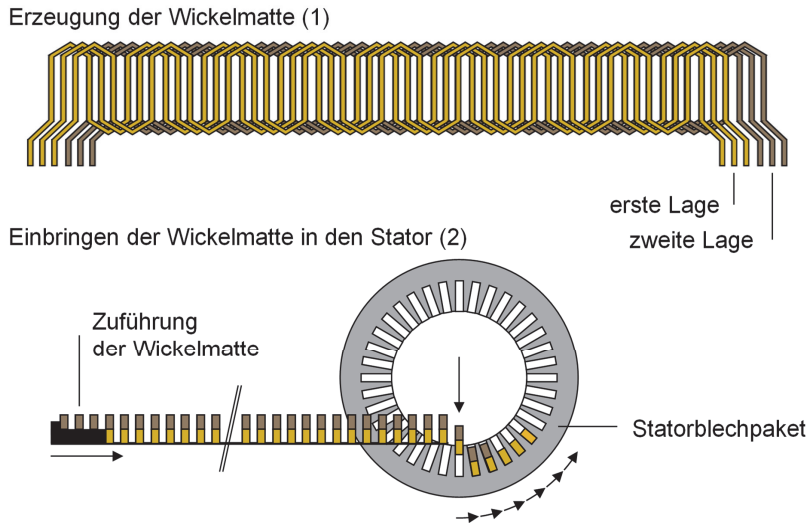


Abbildung 2-28: Vereinfachte schematische Darstellung der Prozessschritte der kontinuierlichen Hairpintechnologie zur Herstellung verteilter Wicklungen für Traktionsantriebe. (eigene schematische Darstellung nach (Sadiku & Witt 2009; Lüttge 2015))

2.3.5 Neuartige Ansätze zur Herstellung von Statorwicklungen

Als neuartige Ansätze zur Herstellung von Statorwicklungen sollen diejenigen Verfahren und Prozesse zu deren Herstellung zusammengefasst werden, die derzeit noch nicht großflächig in industriellen Anwendungen umgesetzt wurden. Es werden neuartige Lösungsmöglichkeiten zur Herstellung von Statorwicklungen in der Serie oder Forschungsansätze dargestellt. Diese können entweder in Patenten oder wissenschaftlichen Veröffentlichungen recherchiert werden. Für die Patentrecherche nach Herstellungsverfahren für Statorwicklungen ist es zunächst äußerst hilfreich, die internationale Patentklassifikation (IPC) zu identifizieren. Dabei ist die Gliederung in absteigender Reihenfolge von Sektion, Klasse, Unterklasse, Haupt- und Untergruppe zu beachten. (A_Ochmann 2018) Für „Verfahren oder Geräte, besonders bei der Herstellung, dem Zusammenbau, der Wartung oder der Reparatur von dynamoelektrischen Maschinen“ (Deutsches Patent- und Markenamt 2022) ist die

Hauptgruppe unter dem IPC-Symbol **H02K 15/00** klassifiziert. Die Untergruppen 04 bis 95 beinhalten die Erzeugung und Montage von Wicklungen, die Untergruppe 02 enthält die Herstellung von Ständer- oder Läuferkörpern, während die Untergruppen 10 bis 16 weitere Prozesse wie Isolation, Halterung oder Auswuchten enthalten. (Deutsches Patent- und Markenamt 2022; vgl. Offenburger 2017) An dieser Stelle ist eine vollständige Patentrecherche nicht zielführend, vielmehr werden ausgewählte Ansätze aus Patenten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen dargestellt.

Als eine neuartige Prozesskette für die Herstellung von Runddrahtwicklungen ist das **automatisierte Träufelwickeln** zu nennen (Sell-Le Blanc et al. 2020). Bei diesem werden die Runddrahtwicklungen zunächst auf eine Schablone gewickelt, die einen kollabierbaren Kern enthält, damit die Spulenrolle nach dem Wickelvorgang auf ein Übergabewerkzeug geschoben werden kann. Von diesem Übergabewerkzeug wird die Wicklung auf einen zylinderförmigen Einbringdorn übergeben, der im Anschluss in die Statoröffnung fährt und die Wicklung in den Stator durch eine radiale Schieberbewegung in die Nuten des Statorblechpaketes durch den Nutschlitz einzieht. Dieser – dem händischen Träufelwickeln nachempfundene, aber vollständig automatisierte – Vorgang wurde von einigen kommerziellen Herstellern in der Wickeltechnik für die Erzeugung von Zweischichtwicklungen mit Lagenwechsel vorgestellt. (Sell-Le Blanc et al. 2020; Parati 2022; Winter et al. 2021; Noji 2015; Lüttge et al. 2018) Das beschriebene Einbringverfahren der automatisierten Träufelwickeltechnologie ist dem Prinzip der kontinuierlichen Hairpintechnologie (vgl. Kapitel 2.3.4) sehr ähnlich. Ein geordneter Lagenaufbau der Runddrahtwicklung ist mit automatisierten Träufelwickeltechnologien begrenzt möglich, es kann die Anordnung gewollter Bereiche, sogenannter Zonen, erzielt werden (Sell-Le Blanc et al. 2020). Die Drahtbeanspruchung insbesondere an den Übergangsstellen der Werkzeuge stellt eine erhebliche Herausforderung dar, auch sind Serienanlagen im aktuellen Stand der Technik nicht bekannt. Ein großer Nachteil dieser Technologien sind der große Werkzeugbedarf und ihre geringe Flexibilität. Allerdings ist es im Vergleich zur Einziehtechnik möglich, hohe Füllfaktoren durch wenige Drahtkreuzungen in der aktiven Nutlänge zu erzielen und Wicklungen mit Lagenwechsel herzustellen. Eine weitere Herausforderung beim Einbringvorgang ist der enge Nutschlitz, vor allem bei ausgeprägten Zahnköpfen. Dafür werden nach aktuellem Stand der Technik neue Konzepte für die Gestaltung des Blechpaketes entwickelt. Trenn- oder formbare Blechpakete ermöglichen eine Montage der Wicklung mit besserer Zugänglichkeit und

größerem nutzbaren Bauraum außerhalb der Statorbohrung (Parati 2022; Wüterich, Liewald & Kopp 2020; vgl. Wüterich, Liewald & Kopp 2019). Weitere Forschungsansätze zur automatisierten Handhabung der Drähte beim Einbringen in Vollblechschnitte (Halwas et al. 2018b) als auch dem gesamten Wickelvorgang wurden bereits erwähnt (Kühl 2014; Kühl & Franke 2015; Kühl & Franke 2013; Kühl, Franke & Lebender 2016).

Ansätze zur Herstellung von Spulen und Maschinenprototypen verteilter Wicklungen mit Spulengeometrien ähnlich der **Diamantspulen** aus dem herkömmlichen Generatorenbau wurden im Projekt „Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe“ (HeP-E) entwickelt (Risch et al. 2016). Dabei werden die Spulen zunächst mittels eines universellen Nadelwicklers (Risch et al. 2016) oder einer Wickelvorrichtung (Vogt 2019) gewickelt, in einem Presswerkzeug verpresst und anschließend in den Stator montiert. Der indirekte Wickelprozess außerhalb der Spule ermöglicht das Verpressen der Spule in einem Presswerkzeug in Kombination mit Backlack. Weiterhin ist das Umspritzen der Spule mit Kunststoff zur stabilen Formgebung möglich. Um den Erhalt der Zahnköpfe zu ermöglichen, werden die Zähne während des Montagevorgangs der Spulen formschlüssig in das Statorjoch montiert. Zusätzlich können die Drähte in der Spulenseite und / oder dem Spulenkopf verdrillt werden. Die so produzierten Spulen wurden mit Hilfe einer LCR-Messung und einer Stromzangenmessung vermessen. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass ein erhöhter Nutzfüllfaktor bis zu einer Frequenz von 220 Hz eine geringfügige Verringerung der Verluste bewirkte. Ab 400 Hz sind jedoch die frequenzabhängigen Verluste dominierend, eine Verdrillung der Drähte innerhalb der Spulen kann diese deutlich reduzieren. Eine Verdrehung der parallelen Drähte pro Windung auf einer Seite des Spulenkopfes bietet deshalb den besten Kompromiss zwischen Aufwand und Verlustminimierung. Weitere Verdrillungen reduzieren die Verluste zwar, allerdings mit einem vernachlässigbaren Anteil. (Vogt 2019; Risch et al. 2016; Risch 2016)

Neuartige Weiterentwicklungen der herkömmlichen Hairpintechnologie in Bezug auf die Reduktion der Wechselstromverluste werden mit dem Oberbegriff **Leitersegmentierung** bezeichnet. Dazu zählen zum Beispiel Litzenhairpins, zusammengefasste Hairpins und Hairpins mit unterschiedlichen Leiterquerschnitten (vgl. bspw. Moya et al. 2022; Seong 2017; Nehl & Fatemi 2019). Im Vergleich zu Runddrahtwicklungen ist es sinnvoll, besonders die Litzenhairpins zu betrachten. Diese werden daher im folgenden Abschnitt näher untersucht.

Eine bekannte und naheliegende Kombination aus der Hairpintechnologie und den Wicklungen mit Rundleitern sind die sogenannten **Litzenhairpins**, die aus Formlitzen bestehen (Riedel et al. 2022; Stöck 2016). Dabei ist die haarnadelähnliche Gestalt der Formlitzen (Litzenhairpins) analog der Verwendung von Rechteckleitern innerhalb der Hairpintechnologie denkbar, jedoch werden viele einzelne verseilte Runddrähte pro Hairpin verwendet. Um die U-Biegung zu vermeiden (das Biegeverhalten der Litzen durch die jeweils andere Positionierung der Einzeldrähte unterliegt großen Schwankungen) ist die Verwendung von I-Pins zu bevorzugen (Stöck 2016, S. 111). Die gesamte Prozesskette unterscheidet sich prinzipiell in einem wesentlichen Prozessschritt von der herkömmlichen Hairpintechnologie: Die Vorbereitung der einzelnen Litzenhairpins, die im Vergleich dazu aus weiteren, teils komplexeren Prozessschritten besteht. Hierzu zählt das Verseilen, Walzen und Ablängen der Formlitzen, aber auch die Entfernung der Isolation an beiden Enden der Litze. Prinzipiell haben die Formlitzen eine gerade und stabile Form, allerdings neigen die abisolierten Enden dazu, aufzuspleißen. Dies ist besonders beim Einschieben in den Stator ein erheblicher Nachteil. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Enden der Litzen formstabil miteinander zu verbinden. Diese Verbindung dient nicht nur der mechanischen Formstabilität, sondern auch der elektrischen Kontaktierung. Deshalb ist nach dem Einbringen der Litzenhairpins in den Stator nur noch die elektrische Kontaktierung der Enden an der Kontaktstelle notwendig, denn die einzelnen Litzenleiter bleiben elektrisch verbunden. Eine mechanische und elektrische Verbindung der Formlitzen vor dem Einbringen kann beispielsweise durch Widerstandsschweißen mit einer Hülse vorgenommen werden. Dabei wird gleichzeitig die Lackisolation abgetragen, wodurch ein Prozessschritt zur Entfernung der Isolation entfällt. (Riedel et al. 2022; Stöck 2016) Denkbar sind weitere Verfahren, wie etwa das Crimpen und Schweißen mittels Ultraschall. Beim Twisten der Formlitzen nach der Einbringung in den Stator können wiederum Vorrichtungen analog zur Hairpintechnologie verwendet werden (Stöck 2016, S. 116), auch wenn gegebenenfalls eine exaktere Führung benötigt wird. Durch die bessere Wärmeleitfähigkeit, einen höheren Füllfaktor in der Wicklung sowie kürzere Wickelköpfe konnte in der Forschung eine Steigerung der Leistungsdichte um 20 % im Vergleich zur Einzugswicklung des gleichen Typs nachgewiesen werden. (Stöck 2016, S. 134)

Eine Abwandlung der beschriebenen Litzenhairpins ist die Verwendung von **Litzen in der kontinuierlichen Hairpintechnologie**. Erste Ansätze weisen die Umsetzbarkeit

nach (Born et al. 2022a; Born et al. 2022b). Dabei liegt der Fokus nicht nur auf der Substitution der Rechteckleiter durch Litzen, sondern auch auf der adaptierten Litzenherstellung. Der weitgehende Wegfall der Schweißstellen im Wickelkopf der kontinuierlichen Hairpintechnologie stellt eine deutliche Verbesserung für die Verwendung von Litzen dar. (Born et al. 2022a; Born et al. 2022b)

Bei konzentrierten Wicklungen sind Ansätze für die Herstellung ***konisch geformter Einzelzahnspulen*** bekannt. Prinzipiell zählt hierzu auch die Bewicklung von Einzelzähnen mittels der im Kapitel 2.3.3 genannten Wickelverfahren mit Runddrähten. Konisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Spulen in Richtung Nutgrund breiter sind als in Richtung der Nutöffnung. Behandelt werden an dieser Stelle aber lediglich die neuartigen Ansätze, bei denen zwischen umformenden und urformenden Verfahren zu unterscheiden ist. Bei neuartigen umformenden Wickelprozessen werden die geraden Leiter mit rundem oder rechteckigem Querschnitt entweder zuerst in die Spulenform gebogen und dann in einem Presswerkzeug in die endgültige Form gepresst (Petrell, Braun & Hirt 2018) oder vor dem Biegeprozess durch sequenzielles Verpressen der Leiter in die gewünschte Querschnittsform gebracht und im Anschluss in die Spulenform gebogen (Linnemann et al. 2019). Beide Vorgehensweisen beinhalten kritische Stellen in der gewickelten Spule, wie etwa zu enge Biegeradien oder Übergänge von umgeformten zu nicht umgeformten Abschnitten, die allerdings durch die korrekten Prozessparameter kontrolliert werden können (Bach et al. 2021; Petrell et al. 2019b). Beim Vergleich des elektrischen Kupferfüllfaktors der Formspule mit einem herkömmlich gewickelten, aus Runddrähten bestehenden Einzelzahn, kann eine Verbesserung von ~ 53 % auf ~ 71 % erzielt werden (Petrell et al. 2019b). Auch sind diese Verfahren prinzipiell für eine wirtschaftliche Produktion geeignet (Petrell et al. 2020; Linnemann et al. 2019). Allerdings konnte durch experimentelle Versuchsreihen nachgewiesen werden, dass, beginnend bei einer logarithmischen Dehnung in Höhenrichtung φ_h von - 0,65, starke Beschädigungen entstehen, wie etwa Risse in der Lackschicht von Kupferlackdrähten (Petrell et al. 2019a, S. 3). Aus diesem Grund wird bei der Umformung der Leiter zu konisch geformten Einzelzahnspulen die Isolation der Leiter erst nach dem Pressschritt vorgenommen. Dieses Vorgehen ist auch bei der Herstellung von urgeformten Spulen nötig. Das herkömmliche Gießen, als bekanntes urformendes Verfahren, kann zur Herstellung von Spulen aus Kupfer oder Aluminium mittels verlörener Formen aus Schaum herangezogen werden (Gröninger et al. 2014). Nach der Entnahme der Gusskerne ist die Kompression der Spulen

notwendig, damit diese die finale Form erreichen. Eine wesentliche Herausforderung beim Gießen ist die Gewährleistung der erforderlichen Qualität der Spulen. Hierzu zählen beispielsweise ihre Porosität, mögliche Fehlstellen etwa durch Luft einschüsse, Materialverunreinigungen, die Homogenität der Kristallstruktur oder das Schwindmaß. All diese Qualitätskriterien haben Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Spule, insbesondere auf ihre Leitfähigkeit. Entsprechende Versuche haben ergeben, dass – bei korrekter Durchführung – Spulen mit guten elektrischen Eigenschaften erzeugt werden können.¹⁵ (Gröninger et al. 2014; Gröninger et al. 2011)

Mit Hilfe **additiver Fertigungsverfahren**¹⁶ eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten zur Herstellung von Wicklungen. Besonders vorteilhaft ist dabei die Möglichkeit der freieren Formgestaltung der Wicklungen im Vergleich zu klassischen Wickelverfahren auf Basis von Lackdraht. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen zum Beispiel die integrierte Herstellung von Roebelstäben (Jung, Helm & Liebold 2021), komplexen Spulengeometrien mit Hohlstrukturen für Kühlkanäle (Wu, El-Refaie & Al-Qarni 2021a; Wu & El-Refaie 2020a; Wu, El-Refaie & Al-Qarni 2021b; Wu & El-Refaie 2020b) oder Spulenformen zur gezielten Reduktion von AC-Verlusten (Simpson & Mellor 2018; Simpson et al. 2020; Simpson, Tighe & Mellor 2019; Ayat et al. 2020). Mit Hilfe des 3D-Multimaterialdruckverfahrens, das aus einem Extrusionsverfahren von metallischen und keramischen Pasten mit anschließendem Sinterprozess besteht, konnte eine komplette Reluktanzmaschine ohne Wickelköpfe hergestellt werden (Michel 2018). Dieses Verfahren kann für die Herstellung einzelner Spulen in geschalteten Reluktanzmaschinen eingesetzt werden (Lorenz, Rudolph & Werner 2018a; Lorenz, Rudolph & Werner 2018b). Der entscheidende Vorteil der metallisch-keramischen Bauteile liegt in ihrer hohen Temperaturbeständigkeit. Während in den üblichen Wärmeklassen maximal 180°C (H) bis 220°C (R) herrschen dürfen, können die Spulen bis 400°C und die geschaltete Reluktanzmaschine bis zu 700°C belastet werden. Durch den Einsatz bekannter (Bräuer et al. 2012) und neuer Verfahren der additiven Fertigung im Bereich des Elektromaschinenbaus ist mit weiteren neuartigen Bauteilen und weiteren Möglichkeiten ihrer Anwendung zu rechnen. Allerdings ist zu beachten, dass

¹⁵ Dennoch ist anzumerken, dass im Bereich des Elektromaschinenbaus die bekannten Qualifizierungen gemäß der unter Kapitel 2.2.3 genannten Normreihe DIN EN 60317 spezifiziert sind. Wenn bei der Umformung der Drähte eine Anpassung der Normreihen möglich ist, gegebenenfalls durch erweiterte Prüfverfahren, ist bei der Urformung der Spulen die gesamte Grundlage der DIN EN 60317 als nichtmehr zutreffend anzusehen, was für die kommerziellen Hersteller vorerst mit hoher Wahrscheinlichkeit ein großes Hemmnis zur Umsetzung in der Serienproduktion darstellt.

¹⁶ Häufig auch als 3D-Druck bezeichnet. (Umgangssprache)

sich das Anwendungspotenzial der additiven Fertigungsverfahren nach heutigem Stand der Technik auf die individualisierte Produktion beschränkt (Lachmayer, Lippert & Fahlbusch 2016, Kap. 7.3). Die additive Fertigung taugt derzeit nicht zur Massenproduktion und wird nur im Falle besonderer Anforderungen bei Spezialanwendungen eingesetzt. Auch ist die notwendige Materialvielfalt der Metalle wie etwa Weicheisen und Kupfer, über Kunststoffe wie Polyamid, bis hin zu Kapton, in einem Verfahren derzeit noch nicht verarbeitbar (Lachmayer & Lippert 2017; Gibson, Rosen & Stucker 2015).

2.3.6 Analyse der Herstellbarkeit der Wicklungsmerkmale

In der Tabelle 2-10 sind die im aktuellen Stand der Technik eingesetzten Verfahren in den Zeilen aufgelistet. Prinzipiell sind alle Verfahren und Prozesse teil- oder vollautomatisierbar. In der industriellen Anwendung hängt der Automatisierungsgrad regelmäßig von der Stückzahl und der erforderlichen Variantenflexibilität ab. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016) Die bereits eingeführten Merkmalsausprägungen der Performanceeigenschaften wurden nach der durchgeführten Bewertung aus Kapitel 2.2.5 in die Spalten eingetragen. Die rot markierten Kreuze stellen Merkmalsausprägungen dar, die in der Fertigung nicht sinnvoll erscheinen und darüber hinaus in einigen Fällen auch prinzipbedingt nicht herstellbar sind. Die Abstufungen in der Bewertung werden analog zu Kapitel 2.2.5 gewählt.

Bei der Betrachtung der Tabelle 2-10 ist in Bezug auf nicht mögliche oder herstellbare Merkmalsausprägungen eine Blockbildung auffällig. Die klassischen, automatisierten Verfahren zu Herstellung von Spulenumwicklungen (Linearwickeln, Flyerwickeln, Nadelwickeln und Einziehen) sind danach nur bedingt für die Verwendung von Rechteckdrähten geeignet. Auch ist es weder möglich, verteilte Wicklungen herzustellen, noch sind die Verfahren geeignet, gesehnte Zweischichtwicklungen zu erzeugen. Bei der ansonsten sehr flexiblen händischen Träufelwickeltechnik ist es ebenfalls nicht sinnvoll, profilierte Leiter einzusetzen. Im Gegensatz dazu steht die Hairpintechnologie, die für die Herstellung und Handhabung von Rechteckleitern spezialisiert ist. Die gesehnten Zwei- oder Mehrschichtwicklungen sind die dabei gängigen Wicklungsarten.

Tabelle 2-10: Matrix zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Wickeltechnologien (Zeilen) und den Merkmalen (Spalten) von Traktionsantrieben. (eigene und veränderte Darstellung nach (Halwas et al. 2019))

	Füllfaktor (hoch)	konzentrierte Wicklung	verteilte Wicklung	Spulenwicklung	Stabwicklung	freies Zahnkopfdesign	freies Nutdesign	Einschichtwicklung	Zweischichtwicklung (gesehnt)	Wickelkopfgröße (klein)
Einfluss auf Eigenschaften*	1	2			3	4				
Linearwickelverfahren	+3	+3	X	+3	+1	+1	-1	+3	X	+3
Flyerwickelverfahren	+3	+3	X	+3	X	-1	-1	+3	X	+3
Nadelwickelverfahren	-1	+3	+3	+3	X	-1	+1	+3	X	+1
Einziehtechnik	-3	-3	+3	+3	X	-1	+1	+3	X	-3
händisches Träufelwickeln	+1	+1	+3	+3	X	+1	+3	+3	+3	+1
Hairpintechnologie	+3	-1	+3	X	+3	+3	-3	+1	+3	+1
kont. Hairpintechnologie	+3	X	+3	X	+3	-3	-3	+1	+3	+3

+3 = gut/bevorzugt erreichbar/umsetzbar, +1 = erreichbar/umsetzbar, -1 = bedingt erreichbar/umsetzbar, -3 = schlecht/durch hohen Aufwand erreichbar/umsetzbar, X = nicht möglich/herstellbar; *nach Kapitel 2.2.5, von Rang 1 = hoher Einfluss zu Rang 4 = geringerer Einfluss

2.4 Defizit des Stands der Forschung und Technik

Aufgrund der umfassenden und hochentwickelten industriellen Anwendung der Blechverarbeitung im Stand der Technik und der bekannten ausführlichen wissenschaftlichen Untersuchungen, insbesondere zum Materialverhalten und den Einflüssen der Schnitt- und Stanverfahren, kann kein zusätzliches Potenzial zur Leistungssteigerung von Traktionsmaschinen durch produktionstechnische Maßnahmen bei der Blechpaketherstellung identifiziert werden. Es lässt sich vielmehr feststellen, dass die Statorwicklung auf die Leistungsentwicklung eines Traktionsantriebs einen entscheidenden Einfluss hat. Der Aufbau der Wicklung wird bei der Auslegung durch die beschriebenen Parameter festgelegt, in der Fachliteratur sind weitere Faktoren bekannt (Müller, Vogt & Ponick 2008; Fischer 2017). In Bezug auf den Nutaufbau lässt sich zusammenfassen, dass entscheidende Merkmale des Nutaufbaus, wie etwa der Füllfaktor, Einfluss auf die Performanceeigenschaften haben,

wie beispielsweise die Leistungsdichte und den Wirkungsgrad. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Aufbau der Statorwicklungen von Traktionsantrieben im Rahmen dieser Arbeit weiterführend zu untersuchen. Es ist insbesondere zu untersuchen, welcher Nutaufbau zur möglichst optimalen Merkmalsausprägung führt und dabei die bestmöglichen Eigenschaften des Traktionsantriebs erzeugt.

Um die Performanceeigenschaften eines Traktionsantriebes mit Hilfe einer angepassten Wickeltechnologie zu verbessern, soll dabei die These zugrunde gelegt werden, dass eine Drehzahlsteigerung zur Leistungssteigerung führt. Das wesentliche **Defizit nach dem aktuellen Stand der Technik** ist die unzureichende Reduktion der zusätzlichen Stromwärmeverluste in der Wicklung bei erhöhten Drehzahlen. Diese Reduktion soll durch Anpassungen in der Wickeltechnologie ermöglicht werden, unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen bei elektrischen Traktionsantrieben.

Der Fokus dieser Arbeit liegt dementsprechend auf der Herstellung der Wicklung und der Vermeidung zusätzlicher Stromwärmeverluste. Ein anderer möglicher Ansatz zur Leistungssteigerung elektrischer Maschinen ist es, die Abfuhr der Verlustwärme zu verbessern und dadurch den Motor mit einer höheren Bemessungsleistung auslegen zu können. Hierzu zählen die Verwendung von Öl anstatt Wasser als Kühlmittel oder eine direktere Kühlung der Wicklung, beispielsweise eine Nutinnenkühlung anstatt einer Mantelkühlung. Auch hier können neuartige Herstellungsprozesse erarbeitet werden, zum Beispiel über das massenfertigungstaugliche Spritzgussverfahren. Hierzu existieren bereits vielversprechende Forschungsarbeiten und -projekte (Reuter et al. 2021; Langheck et al. 2018; Schiefer 2017; Reuter, Berg & Doppelbauer 2021), sodass diese Forschungsfragen zum Kühlkonzept nicht weiter behandelt werden sollen. Eine Kombination der im Folgenden erarbeiteten Wicklungsart mit neuartigen Kühlkonzepten ist in Zukunft allerdings vorstellbar.

3 Zielstellung und Vorgehensweise

Die unzureichende Reduktion der zusätzlichen Stromwärmeverluste bei Wicklungen mit hohem Kupferfüllfaktor soll in dieser Arbeit durch die Entwicklung eines Wickelprozesses ermöglicht werden, der die Defizite im derzeitigen Stand der Forschung und Technik beseitigt, indem die Stab- und die Spulenwicklung in einer günstigen Kombination vereint werden (siehe Abbildung 3-1). Die daraus resultierende **Zielstellung** ist die Erarbeitung eines neuartigen Wicklungsaufbaus, der diese Kombination mit dem Fokus auf den Nutaufbau realisiert.

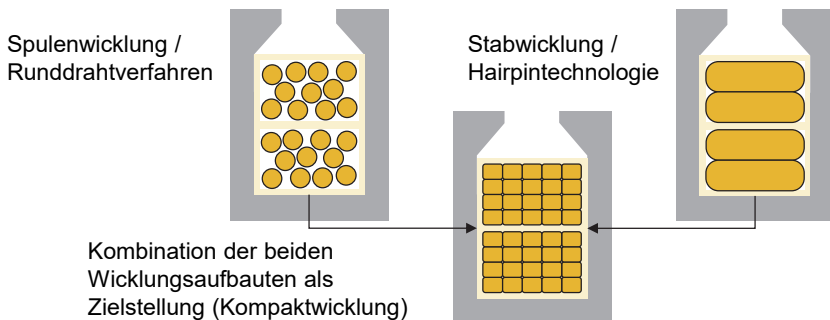


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zielstellung (Kompaktwicklung).

Zur Kombination der Stab- und Spulenwicklung bei Traktionsantrieben liegen zwei Vorgehensweisen nahe, einerseits die Optimierung der Hairpintechnologien sowie andererseits die Weiterentwicklung der Runddrahtwickelverfahren und -prozesse. Die Hairpintechnologie kann durch segmentierte Hairpins weiterentwickelt werden, wie in Kapitel 2.3.5 bereits beschrieben. Dabei entstehen komplexe Leiter- und Produktionstechnologien, die den Vorteil formstabiler Hairpinleiter mit guter Eignung bei der Automatisierung aufheben. Zusätzlich steigt der Kontaktierungsaufwand der segmentierten Hairpinleiter. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit ein von der Runddrahtwicklung ausgehender neuartiger Wickelprozess erarbeitet werden. Dabei dienen die industriell großflächig und kostengünstig herstellbaren Rundleiter als Ausgangsmaterial für die Wicklung. Zur Erhöhung des Füllfaktors steht dabei die Kompaktierung der Wicklung im Vordergrund. Daraus folgt die Namensgebung des neuartigen Wickelprozesses, der daraus resultierende kompakte Wicklungsaufbau in der Nut (siehe Abbildung 3-1) wird deshalb als **Kompaktwicklung** bezeichnet. Hierbei sollte die Wicklung weiterhin verteilt und mit mehreren Schichten gesenkt ausgeführt sein.

Es ist vorteilhaft, wenn der Zahnkopf möglichst frei gestaltet werden kann und auch die Nutgeometrie nicht begrenzt ist. Auch sind möglichst kurze Wickelköpfe erstrebenswert. Dafür ist die Übertragung der Fertigungsprinzipien der kontinuierlichen Wellenwicklungstechnologie auf die Herstellungsverfahren der Runddrahtwicklungen notwendig. Das dafür erforderliche Grundlagenwissen zur Kompaktierung der Runddrahtwicklung und der korrelierenden produktionstechnischen Konzepte für deren Umsetzung, wird im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitet.

Die **Vorgehensweise** zur Erreichung der obigen Zielsetzung orientiert sich an der Produktentwicklungsmethodik. Diese umfasst das notwendige Wissen beim Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme sowie Vorgehensmodelle und Methoden. (Gerst 2002, S. 10) Die Produktentwicklung ist dabei ein Bestandteil des Produktentstehungsprozesses im gesamten technischen Produktlebenszyklus, wie in Abbildung 3-2 gezeigt. (VDI 2221 Blatt 1:2019-11)

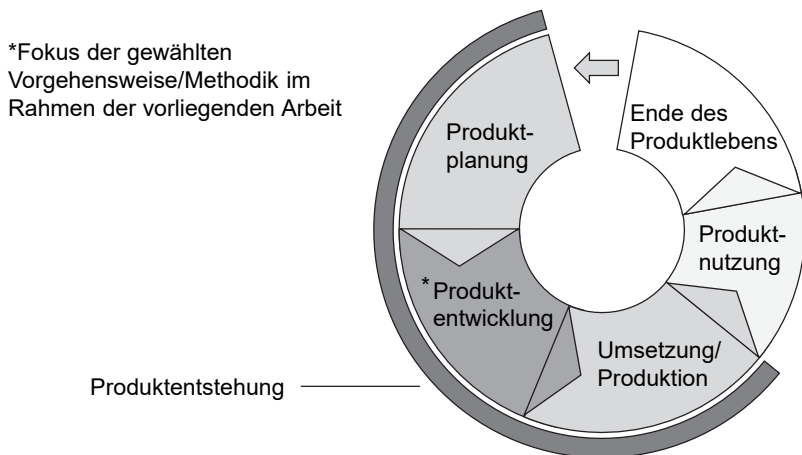


Abbildung 3-2: Darstellung des technischen Produktlebenszyklus. (eigene Darstellung nach (VDI 2221 Blatt 1:2019-11))

Die angewandten Modelle und Methoden der Produktentwicklung werden verwendet, um unter Berücksichtigung der Randbedingungen¹⁷, eine möglichst optimale Lösung zu Erarbeiten. Im Umfeld der industriellen Anwendung könnte die möglichst optimale

¹⁷ Je nach Unternehmen können sich beispielsweise verschiedene Lösungskonzepte aufgrund der unternehmenseigenen Randbedingungen als vorteilhaft erweisen.

Lösung zu einer Steigerung der Effizienz führen und folglich eine höhere Wirtschaftlichkeit bei Zielerreichung haben (Gerst 2002, S. 2). Mitentscheidend ist aber auch die Vermeidung von Fehlentwicklungen (Gerst 2002, S. 4).

Innerhalb der Produktentwicklungsmethodik kann das systematische Lösen von Problemen mit Hilfe eines formalisierten Vorgehenszyklus beschrieben werden. Dabei unterstützen die bekannten und zweckmäßigen Abläufe den Übergang des menschlichen Denkens vom intuitiven und unbewussten „Normalbetrieb“ hin zu einem methodenbewussten und diskursiven „Rationalbetrieb“. (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 83-86) Ein Problem stellt dabei die Überführung eines Anfangszustandes in einen End- oder Zielzustand dar, wobei sowohl der Zielzustand und/oder dessen Erreichung unbekannt sind. (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 68) Die Begrifflichkeiten des Vorgehenszyklus und des Problemlösungszyklus werden im Kontext dieser Arbeit nicht weiter unterschieden und sollen die formalisierte Abfolge von Arbeitsschritten zur Lösung von Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben darstellen. Diese bestehen methodisch grundsätzlich aus den folgenden drei Schritten (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 108):

- I. Aufgabe (Problemstellung) klären,
- II. Lösungen suchen und darstellen sowie
- III. Lösungen auswählen (ggf. verwirklichen).

In der praktischen Anwendung haben sich bei der Problemlösung im Rahmen unterschiedlichster Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben diverse Vorgehensweisen entwickelt, die sich ähneln und die drei obigen Schritte beinhalten. Beispiele hierfür sind der Problemlösungszyklus der Systemtechnik (VDI 2221:1993-05), der Vorgehenszyklus IPE Ehrlenspiel (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017), der allgemeine Lösungsprozess nach Pahl/Beitz (Bender et al. 2021), das Münchner Vorgehensmodell MVM (Lindemann 2009, S. 46 ff.) oder der Problemlösungszyklus im Mikrozyklus (VDI 2206:2004-06). (vgl. Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 122)

Die in dieser Arbeit angewandte Vorgehensweise ist an dem Problemlösungszyklus im Mikrozyklus nach VDI 2206:2004-06 orientiert. Diese VDI-Richtlinie hat die „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ (VDI 2206:2004-06) zum Gegenstand und ist daher für die Entwicklung des angestrebten Vorhabens passend. Entwicklungsgegenstand ist dabei in erster Linie ein neuartiger Wickelprozess, der in der Umsetzung der Fertigungstechnologie ein mechatronisches System darstellt.

Infolge der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produktionsprozess und herzustellendem Produkt, nämlich der Wicklung eines Traktionsantriebs, wird der neuartige Ansatz des Product-Production-CoDesigns beachtet (Schäfer et al. 2021; Albers et al. 2022). Bei der Problemstellung ist zu beachten, dass mit dem Ziel der Kompaktwicklung in Kapitel 4 der Endzustand des herzustellenden Produktes bekannt und vorgegeben ist. Dementsprechend ist die Produktionstechnik zu analysieren und zu entwickeln. In der Bewertung wird immer auch das herzustellende Produkt Traktionsantrieb berücksichtigt. Das Vorgehen und die Zuordnung der einzelnen Kapitel zu den Schritten des Problemlösungszyklus ist in der Abbildung 3-3 illustriert. Auch sind die drei wesentlichen Schritte der Zielsuche, Lösungssuche und Lösungsauswahl zusammenfassend dargestellt. Dabei ist der hiesige Ansatz bis zum konkreten Lösungsvorschlag ausgearbeitet. Eine weitere, serienreife Umsetzung des entwickelten Prozesses ist im universitären Umfeld des wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bisher noch nicht vorgesehen.

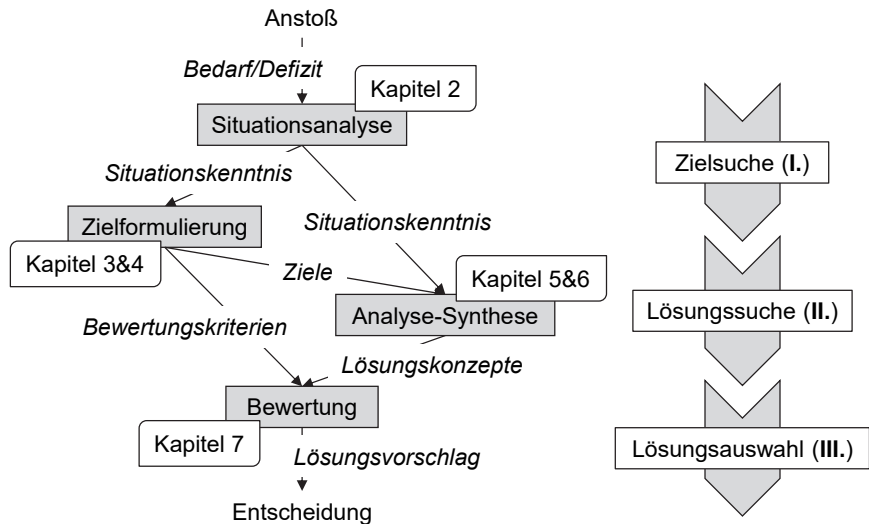


Abbildung 3-3: Der Aufbau und die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit ist angelehnt an den Problemlösungszyklus nach VDI 2206:2004-06 (links) mit den drei allgemeinen Schritten des Vorgehenszyklus (rechts) in der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 108). (eigene und veränderte Darstellung nach (Gerst 2002, S. 11))

4 Vorstellung der Kompaktwicklung

Die in diesem Kapitel vorgestellte Konzeption des Kompaktwickelprozesses wurde im Rahmen der Tätigkeiten des Autors am wbk Institut für Produktionstechnik entwickelt. Mehrere Veröffentlichungen wurden vom Autor selbst oder unter seiner Mitwirkung publiziert. Dieses Kapitel ist an diese Veröffentlichungen angelehnt. (Halwas et al. 2020a; Halwas, Wirth & Fleischer 2021; Winter et al. 2021)

4.1 Definition der drei Merkmale der Kompaktwicklung

Die drei anzustrebenden Merkmale der Kompaktwicklung sind: ein geordneter Lagenaufbau, die Kompaktierung der Runddrähte und ein flexibler Wickelkopf. In der Abbildung 4-1 wird ein dreidimensionales Schnittbild des angestrebten Wicklungsaufbaus in der Nut eines Statorblechpakets dargestellt, bevor im Einzelnen auf die drei entscheidenden Merkmale genauer eingegangen wird. Es werden neben den obigen drei Merkmalen außerdem Hypothesen aufgestellt, weshalb diese Merkmale für die Kompaktwicklung nicht nur vorteilhaft, sondern sogar notwendig sind. Die Hypothesen werden im fünften Kapitel auf ihre Validität hin überprüft.

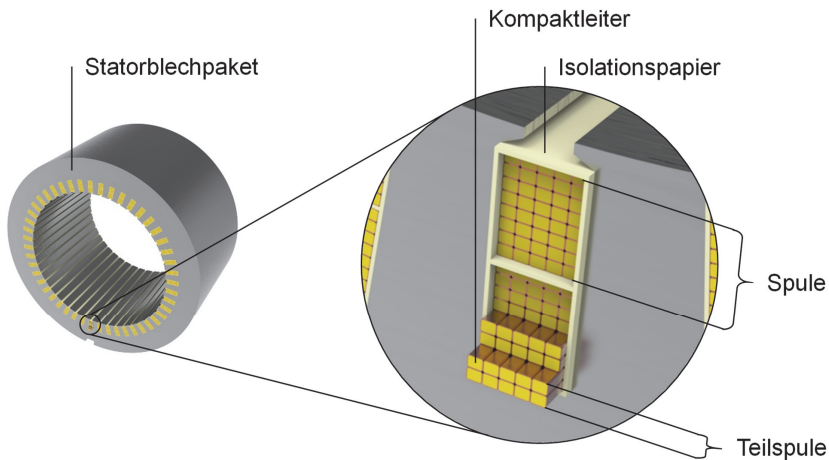


Abbildung 4-1: Idealisierte Darstellung des kompaktierten lagengenauen Aufbaus als Zielbild der Kompaktwicklung (Schnittdarstellung im Statorblechpaket).

(1) Geordneter Lagenaufbau

Der **Lagenaufbau** der Kompaktwicklung zeichnet sich durch eine Anordnung aus, bei der die Kupferlackdrähte in einem geordneten Schema abgelegt sind. Der wichtigste Grund für einen geordneten Lagenaufbau ist die im nächsten Abschnitt beschriebene Kompaktierung der Wicklung. Die Hypothese ist, dass Drahtkreuzungen bei der Verpressung einer Wicklung zu Drahtquetschungen führen, die höhere ohmsche Verluste verursachen und sogar Defekte hervorrufen können. (Sell-Le Blanc et al. 2019; Halwas, Wirth & Fleischer 2021) Die Drähte sollen sich beim geordneten Lagenaufbau so berühren und in der Nut angeordnet sein, dass die Drähte beim Kompaktierungsvorgang nicht aus ihrer Lage verrutschen können und die initiale Nutfläche mit einem hohen mechanischen Füllfaktor ausgenutzt wird. Ein Beispiel hierfür ist die unter Abbildung 4-2 dargestellte lagengenaue Wicklung. Dementsprechend kommt eine wilde Wicklung nicht in Frage, weil es sich dabei um einen ungeordneten Wicklungsaufbau handelt. Die Auswahl des Nutaufbaus der initialen Wicklung als Grundlage für den Kompaktierschritt (2) wird genauer in Kapitel 5.2.2 untersucht.

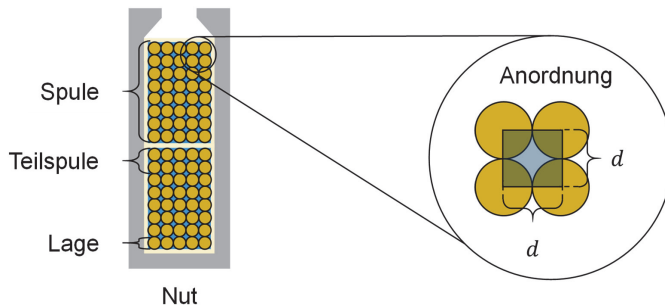


Abbildung 4-2: Darstellung eines geordneten Lagenaufbaus in einer schematischen Statornut. Als geordneter Lagenaufbau wird eine definierte geometrische Anordnung bezeichnet, in diesem Fall der lagengenaue Nutaufbau. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass die Drahtmittelpunkte quadratisch angeordnet sind, mit einer Kantenlänge des Drahtdurchmessers d . (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2021))

(2) Kompaktierung der Wicklung

In der vorliegenden Arbeit wird die **Kompaktierung** einer Wicklung aus ursprünglich runden Teilleitern so definiert, dass sich diese aus zwei Schritten zusammensetzt: nämlich der Komprimierung und der Verpressung. (vgl. Halwas et al. 2021) Die Komprimierung bezeichnet die Erhöhung der Packungsdichte, ohne wesentliche plastische Verformungen der Kupferlackdrähte in ihrem Querschnitt (vgl. Abbildung 4-3 links). Prinzipiell werden in diesem Schritt die Leerstellen geschlossen und so der Füllfaktor erhöht. Die Drähte in ihrer dreidimensionalen Form werden mindestens elastisch verformt, sodass die Komprimierung ohne Fixierung weitestgehend zurückfedert. Ein geringer plastischer Anteil kann vorliegen, soll hier allerdings vernachlässigt werden. Bei der Verpressung der Wicklung werden die Kupferlackdrähte plastisch deformiert. Im Anschluss an den Verpressvorgang kommt es beim Entspannen zu einer elastischen Rückfederung des kompaktierten Drahtbündels. In der Abbildung 4-3 ist dies am Beispiel eines ursprünglich runden Drahtes dargestellt. Bei der angestrebten Kompaktwicklung ist infolge des geordneten Lagenaufbaus (siehe Abbildung 4-2) von einem größeren Anteil der Verpressung beim Kompaktierschritt auszugehen.

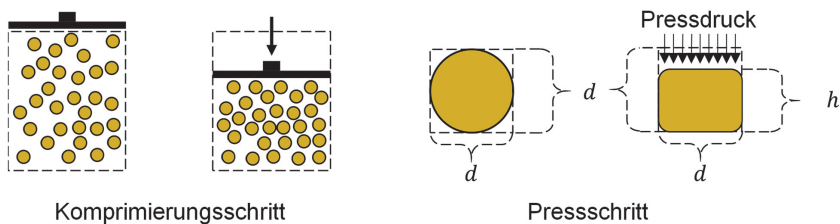


Abbildung 4-3: Darstellung der schematischen Kompaktierung. Schematische Komprimierung einer Wicklung (links) und schematische Verpressung eines Runddrahtes (rechts) mit initialem Durchmesser d und umgeformter Höhe h . (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a))

(3) flexibler Wickelkopf

Der geordnete Lagenaufbau und die Wicklungskompaktierung sollen innerhalb der aktiven Nutlänge im Statorblechpaket vorliegen. Die in den Nuten vorliegenden Kupferlackdrähte sollen mit der jeweils anderen Spulenseite durch einen **flexiblen Wickelkopf** verbunden sein. Dies ermöglicht die anschließende Formung des Wickelkopfs, wie es nach dem Stand der Wickeltechnik üblich ist. Damit werden ein geringerer Raumbedarf im Gehäuse und eine bessere Wärmeleitfähigkeit durch weniger Luft einschlüsse gewährleistet. Weiterhin sind Verdrehungen und Verdrehungen der Drahtlagen im flexiblen Wickelkopf gemeint, die auch als Twistungen bezeichnet werden. Auf diesem Wege können nicht nur reguläre Spulenanordnungen (siehe Abbildung 4-4 rechts oben) von beiden Spulenseiten erzeugt werden, sondern es lassen sich auch permutierte Spulenaufbauten (siehe Abbildung 4-4 rechts unten) herstellen. Der permutierte Lagenaufbau der beiden Spulenseiten ist am Aufbau von Roebelstäben orientiert und soll der Reduktion von Kreisströmen dienen.

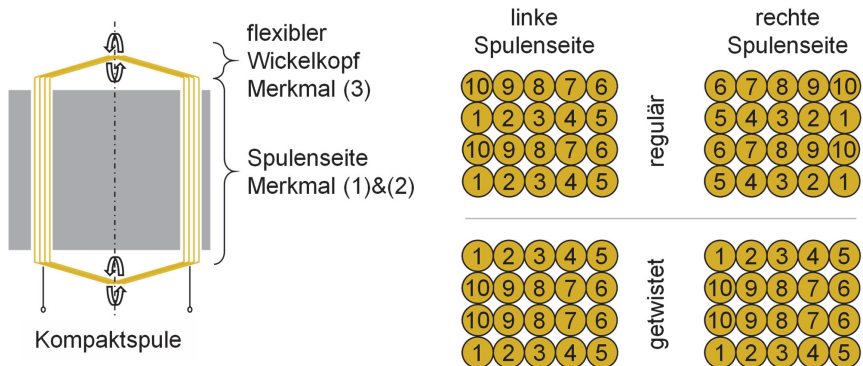


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des flexiblen Wickelkopfes (links) und der Lagerstrukturen (beispielhafte Schnittdarstellung) bei ungetwistem (rechts oben) und getwistem Wickelkopf (rechts unten). (Eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a; Halwas, Wirth & Fleischer 2021))

4.2 Definition des Prozessablaufs

Der beabsichtigte Prozessablauf für die Erstellung der Kompaktwicklung ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Hierbei ist der Kompaktwickelprozess in den Gesamtzusammenhang der Prozesskette der Statorfertigung eingeordnet und ähnlich wie die Einziehtechnik, das Träufelwickeln und die beiden Hairpintechnologien als ein Prozess – bestehend aus mehreren Verfahren – zu verstehen. Die Kompaktwicklung zeichnet sich dabei durch die in Kapitel 4.1 beschriebenen Merkmale aus. Ob ein Vollblechschnitt, eine Stern-Joch-Bauweise, Einzelzähne oder sonstige Konzepte der Statorbauweise angewandt werden, ist damit noch nicht festgelegt. Der Kompaktwickelprozess kann hierbei entweder als direkter oder indirekter Wickelprozess konzipiert werden.

Der **direkte Kompaktwickelprozess** erzeugt die geordnete Wicklung, oder zumindest die betreffenden geordneten Teilspulen der Wicklung, direkt in den Statornuten. Anschließend findet die Kompaktierung im Stator oder an den Statorkomponenten statt. (Halwas, Wirth & Fleischer 2021)

Beim **indirekten Kompaktwickelprozess** hingegen wird die Wicklung außerhalb der Statornuten hergestellt und auch außerhalb der Statorbaugruppe kompaktiert. Hierfür ist nach der Erzeugung der Spulen eine Fixierung der Drähte wichtig, um die Ordnung der Drähte im lagengenauen Aufbau bis hin zum Pressvorgang beibehalten zu können. Im Anschluss wird die Wicklung in das Statorblechpaket oder auf die Statorkomponenten aufgebracht. (Halwas, Wirth & Fleischer 2021)

Der eindeutige Vorteil der indirekten Vorgehensweise ist die freie Zugänglichkeit der formstabilen Spulen oder Wicklungsstränge, wodurch die Untersuchung des Kompaktiervorgangs wesentlich erleichtert wird. Auch hat sich in Vorarbeiten gezeigt, dass beim direkten Kompaktwickelprozess, bei Einsatz einer Papierisolation und Vollblechschnitten die mechanische Versagensgrenze dieser Komponenten beim Kompaktierschritt so gering ist, dass eine Verbesserung der Füllfaktoren kaum möglich ist (Sell-Le Blanc et al. 2019). Aus diesem Grund steht der indirekte Kompaktwickelvorgang in dieser Arbeit im Fokus.

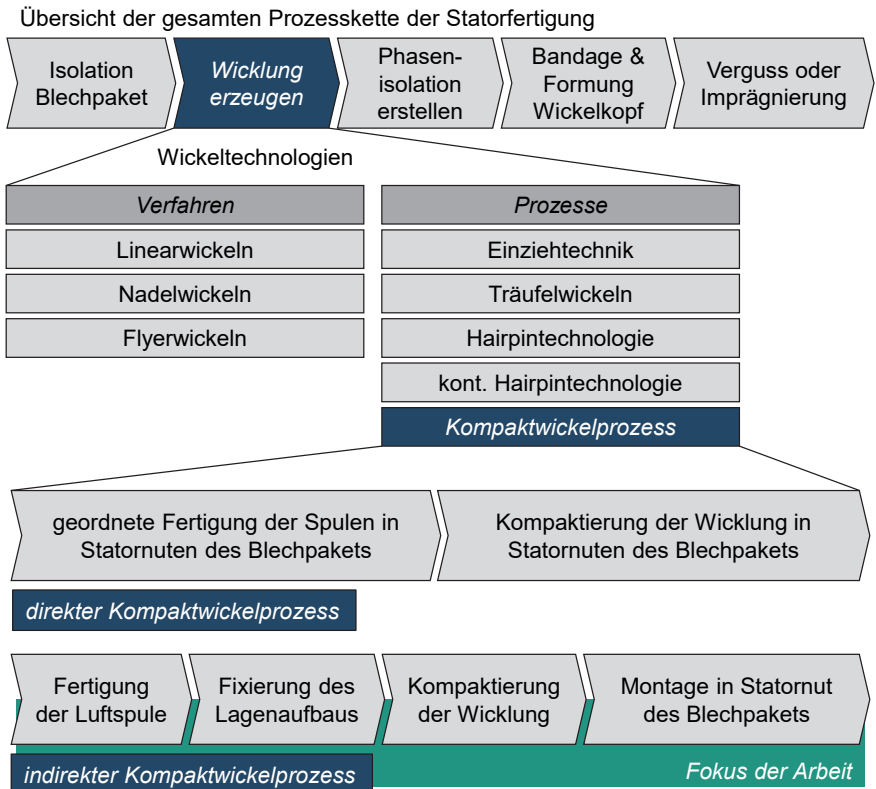


Abbildung 4-5: Darstellung des Prozessablaufs für den direkten und indirekten Kompaktwickelprozess.¹⁸

¹⁸ In der Darstellung der aufgeführten Verfahren und Prozesse werden die nach dem aktuellen Stand der Technik angewandten Wickeltechnologien berücksichtigt. Nach dem Stand der Forschung gibt es viele weitere vielversprechende Ansätze, die allerdings nicht in flächendeckender Anwendung umgesetzt sind.

5 Entwicklung der einzelnen Prozessschritte

Die Entwicklung der einzelnen Schritte des indirekten Kompaktwickelprozesses erfolgt anhand der drei in Kapitel 4.1 vorgestellten Merkmale. Dabei ist in chronologischer Reihenfolge auf die Merkmale einzugehen. Kapitel 5.1 behandelt die Herstellung des geordneten Lagenaufbaus (1). Dafür wurden experimentelle Versuchsreihen durchgeführt. In Kapitel 5.2 wird die Kompaktierung der Wicklung (2) simulativ und experimentell untersucht. Auf Basis der hohen Komplexität eines flexiblen Wickelkopfes (3) und der Wicklungskompaktierung als Schlüsselement des Kompaktwickelprozesses, konnte die Herstellung des Wickelkopfes nicht so tiefgehend analysiert werden, wie die Wicklungskompaktierung. Auch kann der flexible Wickelkopf nicht umfassend bewertet werden. Aus diesem Grund ist die Herstellung des flexiblen und verdrillbaren Wicklungskopfes als konzeptionelle Entwicklung anzusehen, zu der Lösungsansätze im Rahmen der Entwicklung des Schablonenwicklers in Kapitel 6.1.1 entwickelt werden.

5.1 Geordneter Lagenaufbau

Aufgrund der besonderen Herausforderung, dass es sich bei Spulen aus Kupferlackdraht um biegeschlaflige Körper handelt, die nach Entnahme aus der Wickelschablone ihre Ordnung und geometrische Form verlieren, ist eine Fixierung der Drähte innerhalb des indirekten Kompaktwickelprozesses notwendig. Zur Bewältigung dieser Herausforderung ist nach aktuellem Stand der Technik der Einsatz von Backlack als thermoplastische Schicht auf den Kupferlackdrähten bekannt. Durch thermische Aktivierung dieser Lackschicht können zuvor gewickelte Spulen auf einer Wickelschablone zu körperlosen Verbackspulen verbunden werden, was auch als bonding bezeichnet wird. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 43 f.) Diese besitzen eine beschränkte Formstabilität. Bei den verwendeten Drähten (vgl. nächster Absatz) ist beispielsweise eine Haftkraft von 150 N in einem Temperaturfenster von 0° bis 75° Grad Celsius nach DIN EN 60851-3/7-2 angegeben (Essex Furukawa Magnet Wire 2020). Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von körperlosen Verbackspulen ist die Anwendung des Nasswickelverfahrens, bei dem keine thermische Aktivierung notwendig ist, sondern das Bonding durch chemische Reaktionen hervorgerufen wird. Die Wicklung wird nass erstellt und durch das Entweichen der Lösemittel härtet der Lack aus. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 238 f.)

5.1.1 Spezifikation der Kompaktspulen

Bei der Herstellung der Kompaktspulen wurde Backlackdraht, spezifiziert nach DIN EN 60317-38 (vgl. Anhang A), mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und Grad 2B des Typs Magnebond CAB-200 von Essex Furukawa verwendet (siehe Essex Furukawa Magnet Wire 2020). Der gemessene elektrische Widerstand der verwendeten Drähte beträgt dabei $0,043 \Omega/\text{m}$, beim Leitermaß von 0,708 mm bis 0,709 mm des Kupfers und einem Außenmaß von 0,807 mm bis 0,808 mm. Um den lagengenauen Wicklungsaufbau zu erzeugen, ist die Herstellung der Teilspulen mit jeweils zehn Kupferlackdrähten (zwei Drahtlagen mit je fünf Drähten) vorgesehen, so wie in Abbildung 5-1 dargestellt. Die Spulenseite hat hierbei eine Länge von 170 mm und die Wickelkopflänge beträgt 33 mm, gemessen jeweils an der Innenseite. Diese Spulenkonfiguration wird fortan als Rohling für die Kompaktspule verwendet. Die unkompaktierten Versuchsspulen (siehe Abbildung 5-1) werden nach der Fixierung an den beiden Spulenseiten kompaktiert (siehe Kapitel 5.2), die daraus resultierende Spule wird als Kompaktspule bezeichnet.

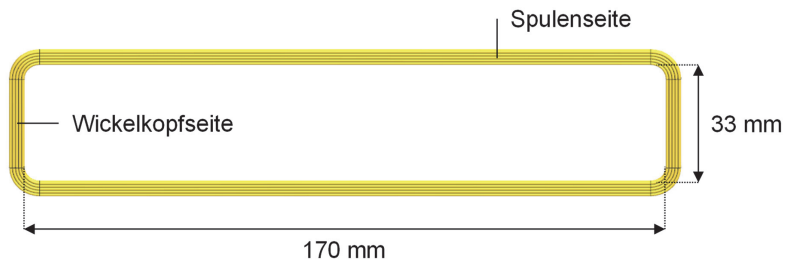


Abbildung 5-1: CAD-Darstellung der geplanten Versuchsspulen mit lagengenauer Wicklung zur Untersuchung des Kompaktwickelprozesses.

5.1.2 Darstellung des Versuchswerkzeugs

Um im Rahmen der Versuchsreihen eine flexible Herstellung mehrerer Varianten von Spulenkörpern zu ermöglichen, wurde im mechanischen Aufbau eine möglichst einfache Konstruktion umgesetzt. Prinzipiell besteht das Versuchswerkzeug (siehe Abbildung 5-2) aus zwei Nutplatten, die über einen Nutplattenfuß mittels Langlöchern mit der Grundplatte verschraubt werden. Ein Abstandshalter dient der Einstellung des korrekten Abstands zwischen den Nutplatten. An den Außenseiten der Nutplatten können manuell Fixierstempel angeedrückt werden, um die Drähte zu fixieren. Alle

Komponenten sind aus Aluminium hergestellt. Die Nuten in der Nutplatte sind so ausgelegt, dass fünf Drähte in zwei Lagen nebeneinander liegen. Hier sind je Nutplatte vier Nuten eingefräst, sodass pro Durchgang vier Versuchsspulen hergestellt werden können. (A_Norouzi 2020)

Zielführend für die Fertigung ist eine möglichst kurze Verbackdauer, um die Fertigungszeit zu reduzieren. Daher sind möglichst hohe Leistungen zu erzielen. Die Schwierigkeit beim Versuchswerkzeug ist die Überhitzung an den Wickelkopfseiten durch gute thermische Isolation und geringe Temperaturen in der Spulenseite in den Nutplatten. Aluminium wurde aufgrund der kostengünstigen und guten Bearbeitbarkeit gewählt. Auch Stahl oder andere Metalle hätten in dieser Hinsicht Nachteile. Für bessere thermische Isolationseigenschaften könnten beispielsweise hitzebeständige Kunststoffe wie etwa Teflon verwendet werden. Allerdings ist die Festigkeit von Kunststoffen geringer und dadurch ist auch die Verschleißfestigkeit niedriger als bei polierten Metalloberflächen. Daher ist für die angestrebte Konstruktion der Werkstoff Aluminium als geeigneter Kompromiss ausgewählt worden.

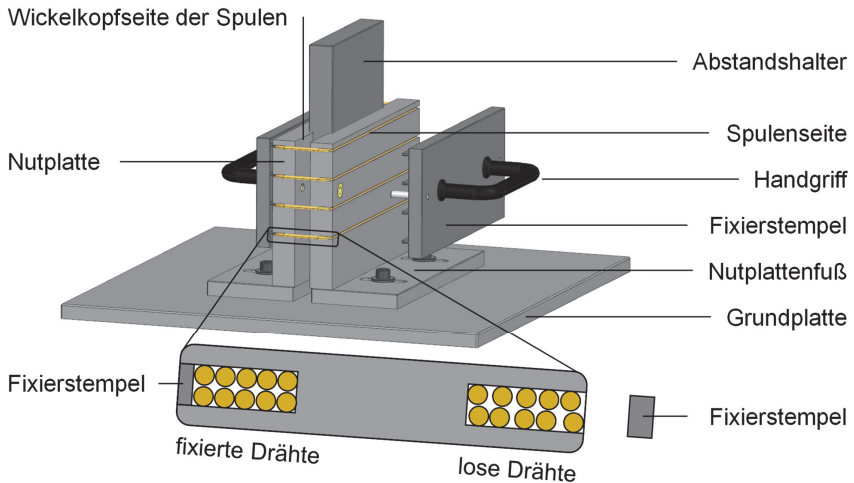


Abbildung 5-2: Darstellung des Versuchswerkzeugs als CAD-Modell mit Beschriftungen und Schnittansicht. (Eigene Darstellung nach (A_Norouzi 2020))

Zur thermischen Aktivierung können nach dem Stand der Technik prinzipiell drei Verfahren eingesetzt werden: die Applikation von heißer Luft, das Verbacken in einem

Ofen und das elektrische Aufheizen durch Bestromung. In Tabelle 5-1 sind die drei Verbackverfahren anhand relevanter Kriterien gegenübergestellt und bewertet worden. (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S.238 f.) Auf Basis dieser Gegenüberstellung ist das elektrische Aufheizen zu präferieren.

Tabelle 5-1: Bewertung der verschiedenen Verbackverfahren zum Bonding körperloser Verbackspulen. (Orientierung an (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 239) mit Adaption auf das vorliegende Forschungsumfeld)

Bewertungskriterium	Heißluft	Ofen	elektrisches Aufheizen
Verbackqualität	0	++	++
Wiederholgenauigkeit	-	++	++
Prozesszeit	0	--	++
Automatisierungspotenzial	+	-	++

++ = sehr gut, + = gut, 0 = neutral, - = schlecht, -- = sehr schlecht

Zur Einbringung der elektrischen Leistung in die Versuchsspulen wurde ein Labornetzgerät (Vollcraft HPS-13030) mit einem Spannungsbereich von 1 V bis 30 V und einer einstellbaren Stromstärke von 0 A bis 30 A verwendet. In den im nächsten Abschnitt 5.1.3 durchgeführten Versuchen wurde die Stromstärke auf den jeweils gewünschten Wert begrenzt und es wurde die sich infolge des elektrischen Widerstands ergebende Spannung eingeregelt.

5.1.3 Experimentelle Versuchsreihen

Grundlegende Herstellerangaben für die Verarbeitung des Magnebond CAB-200 von Essex-Furukawa sind: eine empfohlene Verbacktemperatur zwischen 190°C bis 230°C, ein möglichst präziser Energieeintrag und eine geringe Anpresskraft zwischen den Drähten innerhalb der körperlosen Verbackspulen (Essex Furukawa Magnet Wire 2020). Weiterhin ist beim elektrischen Heizen folgender empirischer Zusammenhang angegeben (Essex Furukawa Magnet Wire 2020):

$$70m = R_g I^2 t_{\text{Verback}}$$

Formel 5-1

Hierbei ist die siebzigfache Masse m in Gramm der Drahtspule gleich dem Produkt aus Gleichstromwiderstand R_g in Ohm, Quadrat der Stromstärke I in Ampere und Verbackdauer t_{Verback} in Sekunden. Bei dieser Betrachtung ist beachtlich, dass sich der ohmsche Widerstand und die Spulenmasse bei gleichem Durchmesser proportional zur

Drahtlänge verhalten. Dadurch haben nach Formel 5-1 lediglich die Stromstärke, die Verbackzeit und der Drahtdurchmesser einen veränderlichen Einfluss auf das Verbackverhalten. Aus diesem Grund ist eine Darstellung der empfohlenen Stromstärken über die Verbackzeit verschiedener Drahtdurchmesser in den Graphen der Abbildung 5-3 gezeigt. Die Drähte der herzustellenden Verbackspulen haben einen Leiterdurchmesser von 0,71 mm und ein Gewicht von durchschnittlich 15,4 g. Angenommen wurde ein konstanter Widerstand von $0,1725 \Omega$ bei Raumtemperatur von 20°C . Dieser berechnet sich aus der reinen Drahtlänge einer Spule von 4,06 m mit zehn Windungen und einem gemessenen Widerstand von $0,0425 \Omega/\text{m}$. Eine Vermessung der Spulen nach der Fertigstellung hat diesen Wert bestätigt, ein Mittelwert von $0,18 \Omega$ wurde gemessen, die Differenz von $0,0075 \Omega$ lässt sich durch die Kontaktwiderstände der Klemmen und Anschlusslängen der Drähte zu den Spulen erklären.

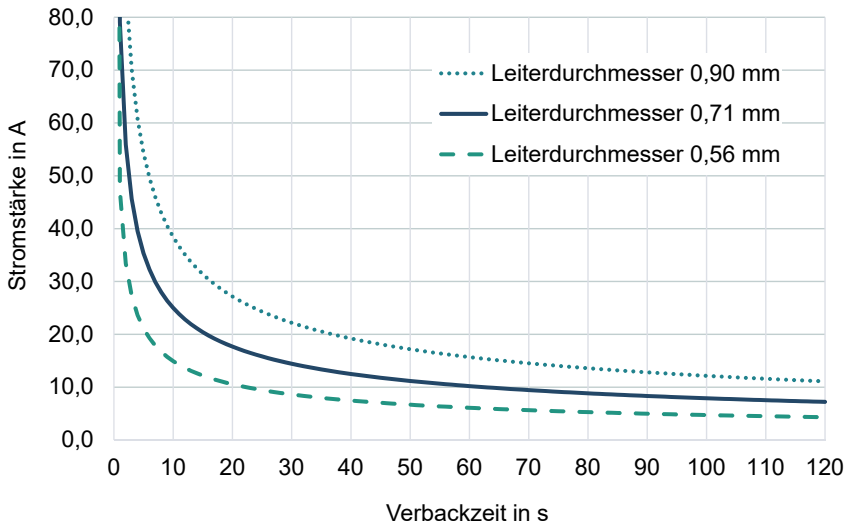


Abbildung 5-3: Darstellung der empfohlenen Stromstärken in A über die Verbackzeit in s für die Kupferleiter mit den Leiterdurchmessern von 0,56 mm, 0,71 mm und 0,90 mm nach Formel 5-1.

Die Formel 5-1 berücksichtigt keine Geometrievarianzen der herzustellenden Spulen oder die Dissipation von Wärmeenergie an die Umgebung. Da aber eine Besonderheit der herzustellenden, lagengenauen Spulen (siehe Abbildung 5-1) eine große

Oberfläche ist¹⁹, ist davon auszugehen, dass beim hier eingesetzten, nicht vorgewärmten Versuchswerkzeug (siehe Abbildung 5-2), ein großer Anteil der eingebrachten Wärmeenergie direkt durch die Nutplatte aus Aluminium an die Umgebung abgeführt wird. Dies ist auf die bereits beschriebenen guten Wärmeleitfähigkeiten des Aluminiums zurückzuführen. Dadurch ist eine geringere Temperaturentwicklung während des Verbackens in der Spule zu erwarten. Dies hat sich in den anschließenden Verbackversuchen, die in der Tabelle 5-2 aufgelistet sind, bestätigt. Zur Vermeidung des hohen Aufwands, die Temperaturen während der Versuche im Inneren der Spulen zu messen, wurde auf eine Temperaturmessung verzichtet und die eingebrachte Leistung aus dem Produkt von Spannung und Stromstärke gemessen. Anschließend wurde die resultierende Spulenqualität visuell geprüft. Es wurden für die Verbackversuche nur Spulen ausgewertet, die keinen Wickelfehler aufweisen. Zur Erreichung eines guten Verbackergebnisses muss die Stromstärke im Vergleich zu den empfohlenen Werten aus Formel 5-1 um mindestens 50 % erhöht werden.

Tabelle 5-2: Darstellung der Ergebnisse der Wickel- und Verbackversuche bei der Herstellung lagengenaue Wicklungen. (Eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Scholz 2021))

Stromstärke in A	26	27	28	29	30	31
Spannung in V	7	8	8	9	10	10
Leistung in W	187	213	235	261	291	319
Verbackzeit 15 s	-	-	-	i.O.	i.O.	i.O.
Verbackzeit 30 s	-	-	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Verbackzeit 45 s	-	-	i.O.	i.O.	i.O.	x
Verbackzeit 60 s	-	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	x
Verbackzeit 90 s	-	i.O.	i.O.	i.O.	x	x
Verbackzeit 120 s	i.O.	i.O.	i.O.	x	x	x
Verbackzeit 150 s	i.O.	i.O.	x	x	x	x
Verbackzeit 300 s	i.O.	i.O.	x	x	x	x

i.O.= Spule in Ordnung; - = nicht verklebt; x = Spulenseite verklebt aber Wickelkopfseite verbrannt

Aufnahmen der korrekt hergestellten Spulen sind in Abbildung 5-4 dargestellt. Diese haben an der Spulenseite eine durchgehend lagengenaue Ordnung, bei der die Drähte zueinander formstabil verbacken sind. An den Übergängen zu den Wickelkopfseiten

¹⁹ Diese wird durch eine Kombination aus einer geringen Windungszahl und einer möglichst großen umspannten Fläche hervorgerufen.

und in den Wickelköpfen sind keine Verfärbungen zu erkennen, die durch zu hohe thermische Beanspruchungen verursacht wären.

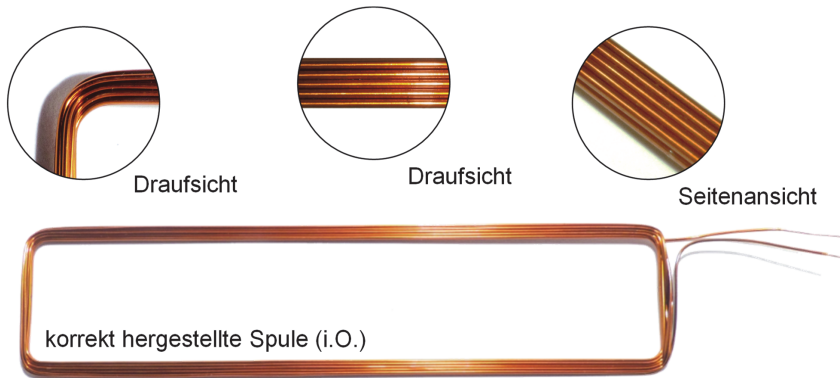


Abbildung 5-4: Aufnahme und Ausschnitte der korrekt hergestellten Spulen. (Eigene Darstellung nach Aufnahmen entnommen aus (A_Scholz 2021))

Nicht korrekt verbackene Spulen werden hauptsächlich durch drei Grundereignisse verursacht: Wickelfehler, keine ausreichende Formstabilität oder Stellen mit thermisch zersetzter (verbrannter) Isolation. Wickelfehler in der Spulenseite entstehen hauptsächlich durch zuvor eingebrachte Kreuzungen im Wickelvorgang. Nicht formstabil verbackene Spulenseiten resultieren aus zu geringer Temperaturentwicklung während des Verbackens und lassen auf einen zu geringen Energieeintrag schließen. Ein zu hoher Energieeintrag macht sich besonders an den Wickelkopfseiten durch dunkel verbrannte Stellen bemerkbar. Die freiliegenden Wickelköpfe können Wärmeenergie schlechter ableiten als zum Beispiel die Spulenseiten in den Nuten der Aluminium-Nutplatte. Die Aluminiumflanken in den Nutplatten leiten die Wärmeenergie unerwünscht gut in die Umgebung ab. Deshalb ist die Temperaturentwicklung in den Spulenseiten geringer als in den Wickelkopfseiten. Eine ungleiche Temperatureinwirkung ist die Folge. Die beschriebenen Fehler sind in Abbildung 5-5 in Form einer Fehlzustandsbaumanalyse nach DIN EN 61025 dargestellt.

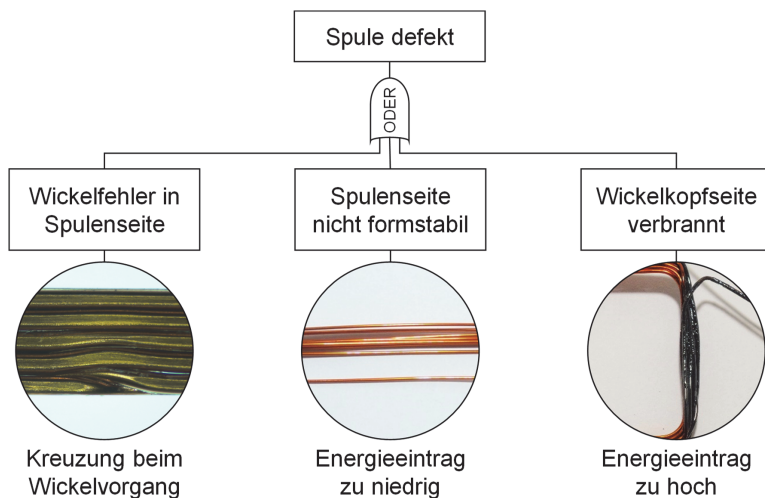


Abbildung 5-5: Fehlzustandsbaumanalyse nach DIN EN 61025 (DIN EN 61025:2007-08) für das Hauptereignis defekter Spulen.

Die in den Verbackversuchen verwendeten Energieeinträge sind in Abbildung 5-6 dreidimensional über die Leistung und die Verbackzeit dargestellt. Die mit einem schwarzen Rahmen umrandete Fläche markiert dabei ungefähr den Bereich geeigneter Parameter, die für die fehlerfreie Herstellung von körperlosen Verbackspulen gefunden wurden. Da die Abfuhr der Wärme und die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ivers-Tiffée & Münch 2007, S. 70) hier nicht berücksichtigt wird, ist dies eine gute Näherung für die in diesem Vorhaben verwendeten Spulen.

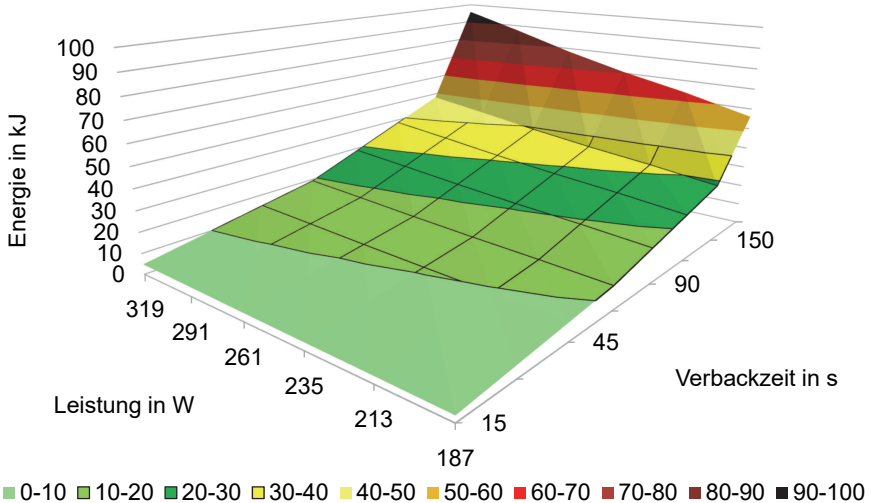


Abbildung 5-6: Eingebroughte Energie in kJ über Leistung in W und Verbackzeit in s. Die mit schwarzem Rahmen umrandeten Energiebereiche von 10 bis 40 kJ sind für das Verbacken von den vorliegenden Spulen geeignet.

Weil der spezifische elektrische Widerstand temperaturabhängig ist und bei steigender Temperatur auch der Widerstand größer wird (Ivers-Tiffée & Münch 2007, S. 70), wurde auf Basis der durchgeführten Wickel- und Verbackversuche eine spezielle Fertigungsstrategie entwickelt: Die Spule wird zu Beginn mit angeschraubten Fixierstempel für 33 s mit 29,6 A bei 9,4 V erwärmt und danach mit abgezogenem Fixierstempel um weitere 15 s mit 29,6 A bei 10,6 V bestromt. (A_Scholz 2021) Der Fixierstempel ist vereinfacht beschrieben in angeschraubten Zustand ein ungewolltes Kühlelement, das durch die Wärmeleiteigenschaften des Aluminiums Wärmeenergie besser abführt als Luft. Der Fixierstempel wird benötigt, um die Drähte aneinander zu drücken und die korrekte Form zu erhalten (siehe Abbildung 5-2). Nach der Demontage des Fixierstempels steigt die Temperatur in der Spulenseite, und der Widerstand steigt von $0,32 \Omega$ auf $0,35 \Omega$ an, woraus eine Leistungssteigerung von 280 W auf 315 W folgt. Somit konnte zum einen eine zeitliche Optimierung erreicht werden, denn ein Verbacken bei einer Stromstärke von 29 A mit guten Spulen benötigt circa 60 s. Zum anderen wurde eine gute Spulenqualität mit guter Formstabilität in den Spulenseiten und ohne Verfärbungen in der Wickelkopfseite erreicht. Die auf diese Art hergestellten Spulen werden in Kapitel 5.2 für die Kompaktierversuche verwendet.

5.2 Kompaktierung der Wicklung

5.2.1 Analyse und Voruntersuchungen

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, setzt sich die Wicklungskompaktierung aus der Komprimierung und der Verpressung zusammen. In der Fachliteratur gibt es hierbei aktuell keine einheitliche Verwendung der Begrifflichkeiten (Kulan, Baker & Widmer 2017; vgl. Vogt 2019; Jack et al. 1999), auch wird nicht eindeutig zwischen der Komprimierung, Verpressung oder Kompaktierung unterschieden. Deshalb ist bei der Betrachtung der Fachliteratur, der Patente, der Forschungsprojekte oder sonstiger Quellen im Folgenden immer von der Wicklungskompaktierung die Rede, die die Wicklungskomprimierung und -verpressung umfasst.

Unter dem Abschnitt 2.3.5 sind neuartige, bereits bekannte Wickeltechnologien dargestellt. Diese beinhalten teilweise eine Wicklungskompaktierung. Darüber hinaus gibt es aber weitere Ansätze zur Herstellung von kompaktierten Wicklungen, insbesondere bei der Verwendung von Runddrähten als Halbzeug, die im folgenden Abschnitt kurz zusammengefasst werden (vgl. Sell-Le Blanc et al. 2019). Die entscheidenden und veröffentlichten Kenngrößen der Publikationen sind in der Tabelle 5-3 zusammengestellt.

5.2.1.1 Wissenschaftliche Publikationen zur Wicklungskompaktierung

Bereits im Jahr 1989 wurde das Verhalten der Kompaktierung von Backlackdrähten für hochperformante elektrische Spulen untersucht und in einer **wissenschaftlichen Publikation** veröffentlicht (Boesel 1989). Es wurden die Einflüsse verschiedener Wickeltechnologien, Lagenaufbauten, Spulenformen, Drahtzugkräften und Bondingtemperaturen auf die erzeugten Spulen untersucht. Der Füllfaktor, die Formstabilität und die Maßhaltigkeit der Spulen standen dabei als Zielgrößen im Fokus. (Boesel 1989)

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Übersicht der entscheidenden Werte für die Kompaktierung von Runddrahtwicklungen aus der Literatur.

Quelle	Methoden	p_{Press} in MPa	resultierende Füllfaktoren	Einfluss der Kompaktierung
(Boesel 1989)	theoretische Erörterungen	-	-	↑ Füllfaktor ↑ Formstabilität ↑ Maßhaltigkeit
(Jack et al. 1999)	Vermessung der Prototypen	400 – 450 max. 800	80 % (elektr.) 82 % (elektr.)	↑ Füllfaktor (16 %) ↑ Wärmeleitung ↑ Drehmoment ↑ Dauerleistung
(Asokan 2004)	FEM Experimente	207 586	79% (elektr.) 90 % (elektr.)	↓ Teilentladungen ↓ Durchschläge ↑ Füllfaktor
(Jaksic 2011)	Konzeptstudie	-	-	↑ Füllfaktor ↑ Wärmeleitung ↓ Teilentladungen
(Widmer, Martin & Mecrow 2015; Widmer et al. 2014)	Vermessung der Prototypen	250	75 % (elektr.)	↑ Füllfaktoren ↑ Wärmeleitung ↓ Stromwärme- verluste
(Kulan, Baker & Widmer 2017; Kulan, Baker & Widmer 2016; Kulan et al. 2016)	FEA (Untersuchung der Umformung und des thermischen Verhaltens)	200 - 800	-	↑ Füllfaktoren ↑ Wärmeleitung ↓ Stromwärme- verluste
(Vogt 2019; Risch et al. 2016)	FEA / Machbarkeits- nachweis	max. ~ 360	61 % (elektr.)	↑ Füllfaktoren ↓ zusätzliche Stromwärme- verluste
(Stöck 2016)	Vermessung von Formlitzen	-	80 % (elektr.)	↑ Wärmeleitung ↑ Leistungsdichte
(Sell-Le Blanc et al. 2019)	Kompaktierung und Vermessung von einzelnen Spulen	100 - 360	70 % (mech.) 80 % (mech.) 90 % (mech.)	↑ Füllfaktoren ← Widerstand ↓ Isolationspapier

↑ = Erhöhung/Verbesserung, ↓ = Verringerung/Verschlechterung, ← = Konstanz/Beständigkeit

Zehn Jahre später, im Jahr 1999, wurde das Maschinenkonzept eines Servomotors mit Permanentmagneten und konzentrierten Einzelzähnen mit kompaktierten Wicklungen vorgestellt (Jack et al. 1999). Bei diesem Motordesign bestehen die Einzelzähne des Maschinenkonzepts nicht aus einem gestapelten Blechpaket, sondern aus verpressten, pulverbasierten Eisenkernen. Bei der Wicklungskompaktierung konnten hohe (elektrische) Kupferfüllfaktoren in einem Bereich von 80 % beim angelegten Pressdruck von 400 - 450 MPa erreicht werden. Als Ausgangslage wurde ein orthozyklischer Aufbau mit Runddrähten gewählt. Es wurde festgestellt, dass Pressdrücke bis zu 800 MPa keine Schäden an der aus Polyimid bestehenden Drahtisolation verursachen. Ohne die Anwendung der Kompaktierung lag der elektrische Füllfaktor demgegenüber nur bei 64 %. Somit konnte eine Verbesserung des Füllfaktors um 16 % durch die Kompaktierung erreicht werden. Die Wicklungen wurden zur Kompaktierung allerdings vor der Montage auf den Einzelzahn verpresst. Daher blieb die Nutisolation, bestehend aus einem Polyimidfilm und Silikonkleber, vom Kompaktiervorgang ausgeschlossen. Es wurden Prüfstandtests mit drei Maschinentypen zum Vergleich durchgeführt, hierbei hatte eine Maschine einen konventionellen Aufbau aus Blechpaketen und unverpressten Spulen, eine zweite Maschine pulverbasierte Eisenkerne ohne verpresste Spulen und eine dritte Maschine pulverbasierte Eisenkerne mit verpresster Wicklung. Der Vergleich der drei hergestellten Maschinen zeigt, dass sich der Wärmewiderstand durch den Einsatz kompakterter Wicklungen verringert, was zu einem höheren Drehmoment an der thermischen Grenze führt. (Jack et al. 1999)

Die Einflüsse von kompaktierten Wicklungen auf die elektrische Belastung zwischen den Leitern wurden 2004 mittels der Finiten-Element-Methode (FEM) untersucht (Asokan 2004). Es konnte gezeigt werden, dass zur Verbesserung der Durchschlags- und Teilentladungsfestigkeit die Vermeidung von spitzen Winkeln wirkungsvoll ist, denn an diesen Stellen entstehen die höchsten Spitzen des elektrischen Feldes. Dementsprechend wirkt sich eine Kompaktierung von Runddrähten einer orthozyklischen Wicklung zu einer hexagonalen Querschnittsform vorteilhaft auf die Teilentladungsfestigkeit aus. Weiterhin sind für eine hohe Teilentladungsfestigkeit Lufteinschlüsse in kompaktierten Wicklungen zu vermeiden. Zusätzlich wurden Lackdrähte mit bis zu 690 MPa verpresst, ohne dass Schäden in der Isolation entstanden. Bei Wicklungen ohne Kompaktierung konnte ein maximaler elektrischer Füllfaktor von 78,6 % erreicht werden, mit einem Pressdruck von 586 MPa konnte ein elektrischer Füllfaktor von bis zu 90 % erzielt werden. Somit lag die Verbesserung des

Füllfaktors bei ungefähr 11,4 %. Eine Verformung der initial runden Leiter zu einer hexagonalen Form war bereits bei 207 MPa festzustellen. (Asokan 2004)

Ein weiterer Ansatz zur Maximierung der Füllfaktoren wurde in einer Konzeptstudie vorgestellt (Jaksic 2011). Hier wurden bestehende Methoden und theoretische Konzepte zur Verbesserung des Füllfaktors gegenübergestellt. Die beschriebenen Verbesserungen sind die manuelle Wicklung und profilierte Drähte. Neuartige Verbesserungen der Füllfaktoren sind durch mechanische Nachbearbeitungsverfahren, thermoplastisches Spritzgießen, hydromechanisches Formen oder Explosionsumformung möglich. (Jaksic 2011)

Motiviert durch die Anwendung von elektrischen Maschinen als Antrieb, sowohl für das elektrifizierte Fliegen, als auch automobiler Anwendungen, wurden Maschinenkonzepte für PMSM mit konzentrierten Einzelzahnwicklungen aus Aluminiumdrähten mit dem Isolationsgrad 2 H entwickelt und getestet (Widmer, Martin & Mecrow 2015; Widmer et al. 2014). Dabei zeigte sich, dass die Wärmeleitfähigkeit erhöht und die Stromwärmeverluste reduziert werden konnten, verursacht durch höhere Füllfaktoren infolge der Kompaktierung. Weiterhin erwies sich, dass die bekannten Drücke von 400 MPa bei Kupferdrähten auf 250 MPa reduziert werden können, wenn Aluminiumdrähte verwendet werden. Im Anschluss an diese Entwicklungen wurden FEA durchgeführt (Kulan, Baker & Widmer 2017; Kulan, Baker & Widmer 2016; Kulan et al. 2016). Hierbei wurden orthozyklische Lagenaufbauten im Hinblick auf ihr Umformverhalten und ihre Wärmeleitfähigkeit analysiert. Im Rahmen der Simulationen traten keine Beschädigungen der Drahtisolation auf. (Kulan, Baker & Widmer 2017; Kulan, Baker & Widmer 2016; Kulan et al. 2016; Widmer, Martin & Mecrow 2015; Widmer et al. 2014)

Im Rahmen **eigener Voruntersuchungen** (Gemeinschaftsveröffentlichung und Abschlussarbeit mit Beteiligung des Autors: (Sell-Le Blanc et al. 2019, A_Jäger 2019)) wurden wilde Wicklungen in der typischen Ausprägung innerhalb verteilter Statorwicklungen von Traktionsantrieben untersucht. In vier verschiedenen Versuchsreihen (A, B, C und D) wurden die Faktoren Pressdruck, Leiterdurchmesser, Windungszahl und Isolationsgrad untersucht. Der Einfluss dieser Faktoren wurde auf die Zielgrößen Füllfaktorverbesserung, elektrischer Widerstand, Teilentladungseinsetzspannung und Durchschlagsspannung hin ausgewertet. Hierbei wurde ein Versuchsaufbau gemäß Anhang E verwendet. In den Nuten wurde vor der Wicklungsmontage Isolationspapier eingelegt. In den Versuchsreihen A und B konnten

die erwartbaren Einflüsse bestätigt werden: Der Füllfaktor ist abhängig vom Pressdruck und steigt bei zunehmendem Pressdruck. Eine Erhöhung des Leiterdurchmessers führt zu einer Abnahme des elektrischen Widerstands, wohingegen eine Windungszahlsteigerung den Widerstand erhöht. Eine Erhöhung des Isolationsgrades erhöht auch die Teilentladungseinsetzspannung. Zusätzlich nimmt gemäß der Normreihe DIN EN 60317 (DIN EN 60317-0-1:2014-09) die Isolationsdicke bei einem steigenden Leiterdurchmesser zu, weshalb auch eine steigende Teilentladungseinsetzspannung über den steigenden Leiterdurchmesser festzustellen ist (bei gleichbleibenden Isolationsgrad G). Weniger offensichtlich ist es allerdings, dass die Steigerung der Windungszahl bei gleichem Leiterdurchmesser die Füllfaktorverbesserung reduziert. Dies liegt an der Ableitung der Presskräfte über die Nutflanken, sodass auf die am Nutgrund befindlichen Drähte weniger Pressdruck eingepreßt wird und dort eine geringere Kompaktierung vorliegt (vergleiche hierzu auch den Klemmfaktor (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 219)). In Bezug auf die gesamte Nut ergibt dies einen geringeren Füllfaktor. Ein Wert des Pressdrucks von unterhalb 250 MPa ergibt keinen signifikanten Einfluss auf den elektrischen Widerstand. Um die Prozessgrenzen zu testen, wurde in den letzten beiden Versuchsreihen C und D der Pressdruck von 0 MPa bis 360 MPa stufenweise um 18,8 MPa erhöht. Der Wert von 18,8 MPa entspricht dabei einer Presskraft von 1 t auf der genutzten Stempelfläche von etwa 520 mm². Innerhalb der Versuchsreihe C wurde dies bei jeweils einer Spule durchgeführt, wobei insgesamt drei Spulen getestet wurden. Da jedoch davon auszugehen ist, dass jede Spule infolge der zahlreichen Pressschritte eine gewisse Vorschädigung aufweist und dadurch die Isolationsfestigkeit bei steigenden Pressdrücken nachlässt, wurde für die Versuchsreihe D jeweils eine neue Spule verwendet. Jede Stufe wurde dreifach getestet. Dementsprechend ist die Versuchsreihe D aussagekräftiger und wird im Folgenden näher betrachtet. Die Ergebnisse aus Versuchsreihe D sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Der Widerstand R_{el} über die Spanne von 0 MPa bis 360 MPa steigt von 873 Ω auf 900 Ω an, was einer Erhöhung von 3 % entspricht. Gleichzeitig findet eine Erhöhung des mechanischen Füllfaktors von 55 % auf 80 % statt. Die RPDIV in V hat bei steigendem Pressdruck eine abnehmende Tendenz. Beachtlich ist dabei, dass die Messabweichungen der Teilentladungseinsetzspannungen eine relativ hohe Standardabweichung besitzen. In der gemittelten Trendlinie liegt die RPDIV bei 250 MPa trotzdem noch bei 1500 V, was bei einer Maschine mit 400 V Bemessungsspannung einen ausreichenden

Sicherheitsfaktor von 3,75 ergibt. Wesentlich kritischer ist das Auftreten von Isolationsfehlern (Körperschlüsse). Das liegt daran, dass die Isolationspapiere sehr druckempfindlich sind und ab einem Pressdruck von 200 MPa bereits Risse aufweisen (siehe schwarz markierte Ovale in Abbildung 5-7 rechts unten). Dementsprechend ist es bei der Fertigung der Kompaktwicklung sinnvoll, das Isolationspapier nicht während des Pressvorgangs zu verwenden, sondern erst im Anschluss einzulegen. Dies setzt einen Kompaktiervorgang außerhalb der Nut in einem Presswerkzeug voraus. Eine Untersuchung mittels Schliiffbildern der Lackschichtdicken auf den Leitern zeigte keine entscheidende Reduktion der Isolationschicht durch die Kompaktierung.

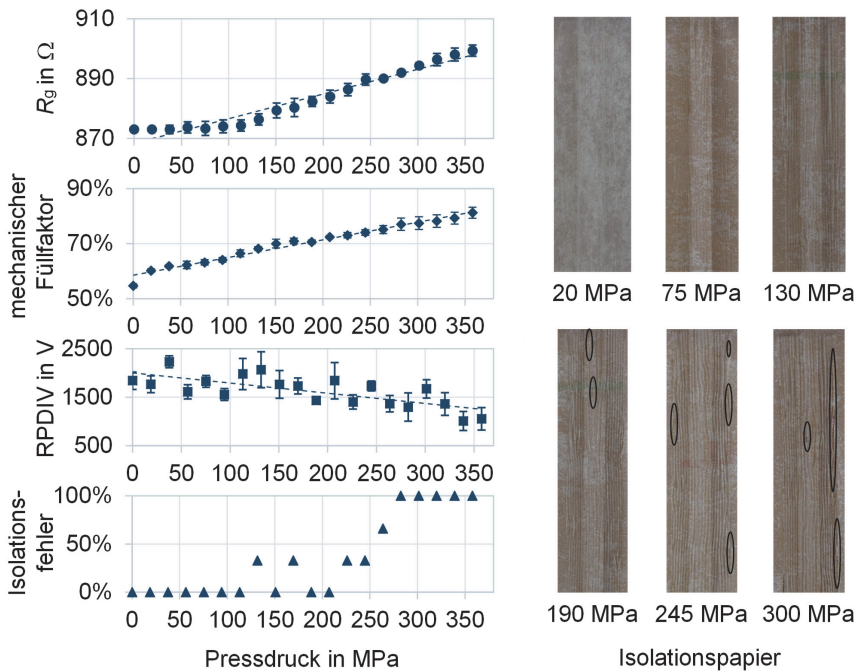


Abbildung 5-7: Darstellung der Ergebnisse aus Versuchsreihe D. Elektrischer Widerstand R_g in Ω , RPDIV in V, mechanischer Füllfaktor und Auftretenshäufigkeit von Isolationsfehlern über den Pressdruck in MPa inklusive der gemessenen Standardabweichung (links). Aufnahmen der kompaktierten Isolationspapiere der Pressdrücke von 20 bis 300 MPa mit schwarz markierten Beschädigungen der Isolationspapiere (rechts). (eigene Darstellung nach (Sell-Le Blanc et al. 2019))

5.2.1.2 Patente zur Wicklungskompaktierung

Um weitere Informationen und mögliche Ausprägungen für die Umsetzung der Wicklungskompaktierung in der Produktentwicklung und Produktionstechnik von elektrischen Maschinen im Allgemeinen zu erhalten, können **Patente** als wichtige Quelle herangezogen werden. Eine ausführliche Patentrecherche (siehe Sell-Le Blanc et al. 2019, S. 4) hat ergeben, dass bereits seit 1952 „Verfahren zur Herstellung der Wicklung elektrischer Maschinen“ (Heering 1952) mit Kompaktierungsschritten bekannt sind (siehe Abbildung 5-8 B). Bestehend aus ursprünglich runden Drähten, werden die Wicklungen durch die Kompaktierung derart verformt und verdichtet, dass der Füllfaktor möglichst hoch ist. Die Kompaktierung in den recherchierten Patenten wird häufig entweder direkt durch einen Stempel in der Nut (siehe Abbildung 5-8 A, (Houtman 1970; Weisse & Sell-Le Blanc 2019)) oder durch einen Stempel außerhalb der Nut mit Führungselementen realisiert (siehe Abbildung 5-8 B, (Matsubara et al. 1983; Heering 1952; Bermond 1970)). Die zusätzlichen Führungselemente und die Bewegung des Pressstempels außerhalb der Nut verhindern den entstehenden Leerraum nach dem Pressen durch den Stempel. Es folgten zahlreiche weitere Patentanmeldungen, meistens mit dem Ziel der Füllfaktorerrhöhung. Hinzu kommt zumeist der Anspruch, einen Nutverschluss durch die Umformung der eingepressten Leiter (siehe Abbildung 5-8 C, (Fasola & Nicolini 1997)) oder des Blechpaketes im Zahnkopfbereich (siehe Abbildung 5-8 D, (Arendes et al. 2003; Koga 2013)) zu erzeugen. Die Anwendungen zielen auf Statoren, als auch auf Rotoren mit eingelegter Wicklung. In der Abbildung 5-8 sind die beschriebenen Hauptkonzepte in vier Gruppen von A bis D aufgeteilt. Die exakten Patente variieren dabei jeweils leicht in ihren geometrischen Ausprägungen und Merkmalen, die in unterschiedlichen Kombinationen ausgeführt sind. Es reicht hier aus, diese vier Hauptgruppen zu unterscheiden. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang, dass infolge der Etablierung der kontinuierlichen Hairpintechnologie (Stroebe & Scheffele 2004; Kreuzer et al. 2003; Bilteryst et al. 2017) und der automatisierten Träufelwickeltechnologie (Sell-Le Blanc et al. 2020; vgl. Parati 2022), noch viel Potenzial für die Integration der Kompaktierung vorhanden ist.

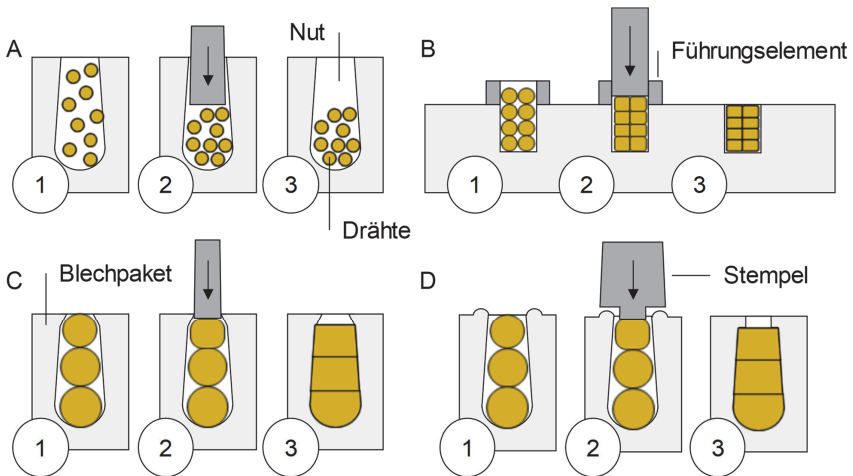


Abbildung 5-8: Übersicht der vereinfachten schematischen Zusammenstellung bekannter Konzeptumsetzungen für das Kompaktieren von Wicklungen in Patenten in vier Übergruppen (A bis D). Darstellung als Schnittansicht durch die Nuten: (1) vor Kompaktierschritt, (2) Kompaktierschritt und (3) finale Form der Wicklung.

5.2.1.3 Bewertung der Analyse und Voruntersuchungen

In der Analyse der wissenschaftlichen Publikationen zum Kompaktieren von lackisolierten Runddrahtwicklungen werden zwei Aspekte besonders deutlich: Die Kompaktierung von Kupferlackdrähten zu funktionsfähigen Spulen für elektrische Traktionsantriebe ist möglich, allerdings wurden hierbei hauptsächlich konzentrierte Einzelzahnspulen mit geordnetem (orthozyklischem) Lagenaufbau und verteilte Wicklungen mit wildem Lagenaufbau untersucht. In einer Vielzahl der Patente hingegen wird der Aufbau der Wicklung und der Lage nicht genauer spezifiziert. Es muss aber unbedingt bedacht werden, dass für eine Patentanmeldung keine Machbarkeit nachgewiesen werden muss. Im hiesigen Kontext sollen daher für die detailliertere Betrachtung die wissenschaftlichen Publikationen als weiterer Anhaltspunkt dienen. Da hier aber verteilte Wicklungen im Vordergrund stehen, wurden eigene Voruntersuchungen durchgeführt (Sell-Le Blanc et al. 2019). Dabei wurden mehrere Testserien an Modellnuten mit lackisolierten Runddrähten und Isolationspapier als weiteres EIM durchgeführt, um die Einflüsse auf die Wicklungskompaktierung bestimmen zu können. Als Einflussfaktoren wurden der Pressdruck, der Drahtdurchmesser, die Windungszahl und der Isolationsgrad gewählt, während die

Zielgrößen Füllfaktor, ohmscher Widerstand, Teilentladungseinsetzspannung und Isolationsfestigkeit gemessen wurden. Es wurden Pressdrücke bis über 300 MPa auf die Wicklung aufgetragen, bei denen der mechanische Füllfaktor auf bis zu 95 % gesteigert werden konnte. Unkompaktiert lag dieser nur bei etwa 65 %. Dabei zeigte sich, dass die Kompaktierung von Kupferlackdrähten in wildem Lagenaufbau zu funktionsfähigen Spulen führt. (Sell-Le Blanc et al. 2019) Allerdings wurde im Rahmen der eigenen Versuche auch festgestellt, dass die Nutgrundisolation beim Pressvorgang sehr leicht beschädigt werden kann, weil die eingesetzten Papiere oder Folien sehr druckempfindlich sind und ab ungefähr 200 MPa so stark beschädigt werden, dass sie ihre Isolationsfestigkeit verlieren (Sell-Le Blanc et al. 2019; Mayer et al. 2019). Die erwarteten Ergebnisse, dass nämlich größere Leiterdurchmesser und Windungszahlen jeweils zu höheren ohmschen Widerständen, steigende Pressdrücke zu höheren Füllfaktoren und dickere Isolationslackschichten zu einer höheren Isolationsfestigkeit führen, wurden erzielt. Es zeigte sich außerdem, dass aufgrund weniger Hohlräumen kleinere Drahtdurchmesser bei gleichbleibender Nutgeometrie ein besseres Potenzial für die Kompaktierung bieten. Die Widerstandserhöhung ist über die Presskraft messbar und steigt ab einem Druck von 150 MPa an, ist allerdings nicht signifikant. Für die Teilentladungsfestigkeit konnte experimentell nachgewiesen werden, dass diese zu Beginn der Kompaktierung – also im Bereich der Komprimierung – gleichblieben und sogar leicht anstiegen. Im Bereich der Verpressung war anschließend ein Abfall der Teilentladungsfestigkeit und auch der Isolationsfestigkeit festzustellen. Das ist, wie bereits beschrieben, auf die Beschädigung des EIM in Form des Isolationspapiers zurückzuführen. (Sell-Le Blanc et al. 2019) Daraus lässt sich ableiten, dass eine Kompaktierung der Lackdrähte ohne Anliegen des Isolationspapiers bei hohen Pressdrücken anzustreben ist.

5.2.1.4 Materialkennwerte der Kupferlackdrähte

Um zur Kompaktierung verteilter Wicklungen weiterführende grundlegende Erkenntnisse zu gewinnen, wurde die Analyse der Wicklungskompaktierung unter Anwendung zweier Methoden durchgeführt. Es wurde eine Parameterstudie mittels der FEM vorgenommen, mit dem Ziel, den möglichen Parameterraum abzugrenzen. Insbesondere sollte der Einfluss des Lagenaufbaus auf die Kompaktierung untersucht werden. Weil in den Simulationsstudien der Fokus auf dem umformtechnischen Verhalten der Kupferdrähte lag und die Isolation nicht mit abgebildet werden konnte, wurden experimentelle Versuchsreihen durchgeführt.

Besonders für die numerische Analyse sind die eingegebenen Materialparameter entscheidend. Detaillierte Untersuchungen für runde Kupferlackdrähte wurden bereits durchgeführt (Komodromos, Lobbe & Tekkaya 2017), wobei der Schwerpunkt auf dem Linearwickelverfahren lag. Die sich daraus ergebenden Werte für Dichte, Elastizitätsmodul und Poisson-Zahl werden in dieser Arbeit als Referenzwerte verwendet. Die angenommenen Werte der Materialeigenschaften von Kupferlackdrähten sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Die Reibungskoeffizienten in korrespondierenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Kulan, Baker & Widmer 2016; Vogt 2019) sind mit 0,1 für die Reibung zwischen den Drähten und 0,2 für die Reibung zwischen Draht und Werkzeugoberfläche angegeben, der Hintergrund dieser Annahmen wurde nicht weiter spezifiziert. Eine andere Arbeit (Demiri 2014) untersuchte das Gleitverhalten von Kupferlackdrähten in Elektromotoren genauer und gab niedrigere Werte an, so dass für die folgenden Untersuchungen ein Reibungskoeffizient von 0,05 für die Kontakte von Draht zu Draht und 0,1 für Draht-zu-Werkzeug-Kontakte gewählt wurde. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022, S. 1811)

Tabelle 5-4: Materialkennwerte für die untersuchten Kupferlackdrähte (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Bezeichnung	Materialkennwert	Einheit
Dichte	8,94	g/cm ³
E-Modul	99	GPa
Querkontraktionszahl	0,34	dimensionslos
Reibwert (Draht zu Draht)	0,05	dimensionslos
Reibwert (Draht zu Werkzeug)	0,1	dimensionslos

Die plastischen Werkstoffeigenschaften werden experimentell nach den Richtlinien für Zugversuche an metallischen Werkstoffen bei Raumtemperatur gemäß DIN EN ISO 6892-1 charakterisiert (DIN EN ISO 6892-1:2020-06). Die Untersuchung wurde auf einer 10 kN-Zugprüfmaschine der ZwickRoell GmbH & Co. KG durchgeführt und basiert auf einer Traversenmessung. Unter Bezugnahme auf den Anhang C.2 (Probenmaße) der Norm sowie den Einbauraum der Einspannvorrichtung wurden die Abmessungen der Probe auf 150 mm Messlänge und 250 mm Gesamtlänge festgelegt. Die gemessenen Zugkraftverläufe für die zehn Runddrahtproben mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und dem Isolationsgrad 2 sind in Abbildung 5-9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Messabweichungen der einzelnen Proben bis über 60 % der Dehnung vernachlässigbar klein sind.

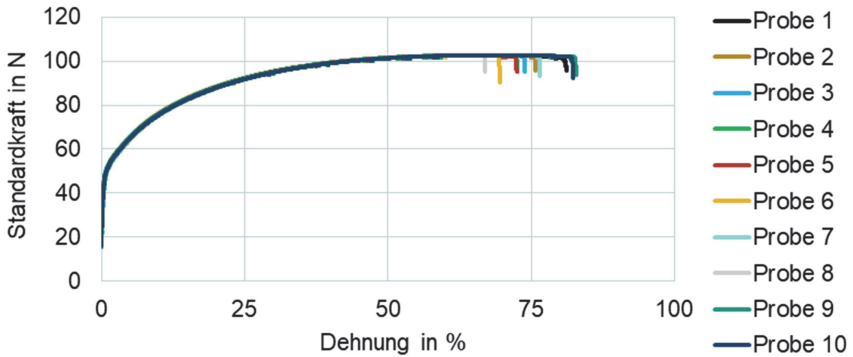


Abbildung 5-9: Gemessene Standardkraft in N über die Dehnung in % der zehn Runddrahtproben mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und Grad 2.

Der daraus berechnete Mittelwert der Fließkurven der untersuchten zehn Proben ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Für die Extrapolation wurde das Hockett-Sherby-Gesetz angewandt. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022, S.1811) Zur weiteren Untersuchung wurden diverse Isolationsgrade, Isolationslackarten und Leiterdurchmesser vermessen, wie in Anhang Y dargestellt. Die untersuchten Drähte verhalten sich ähnlich und sollen hier deshalb nicht näher differenziert werden.

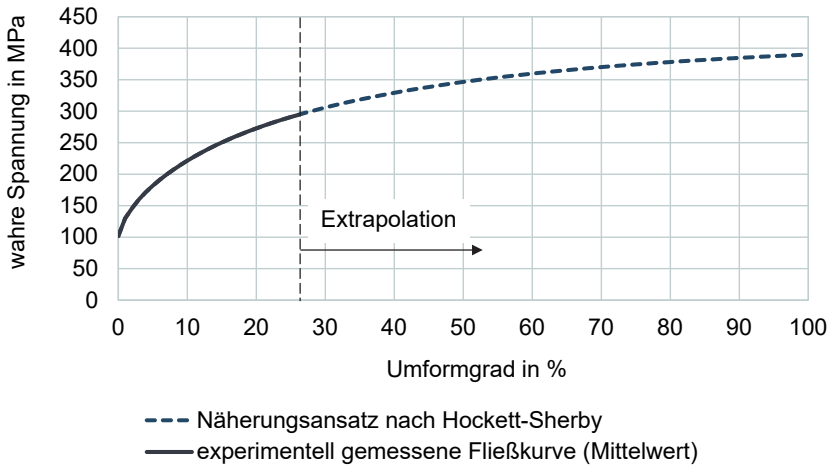


Abbildung 5-10: Gemittelte Fließkurve der zehn Runddrahtproben mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und Grad 2. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

5.2.2 Simulative Parameterstudie

Das in diesem Unterkapitel behandelte Thema wurde im Rahmen einer Veröffentlichung des Autors (Halwas, Wirth & Fleischer 2022) während seiner Tätigkeit am wbk Institut für Produktionstechnik erarbeitet. Die hier verwendeten Inhalte basieren darauf und sind teilweise erweitert worden.

5.2.2.1 Festlegung der Faktoren, Faktorstufen und Zielgrößen

Zu Beginn der numerischen Untersuchung wurde eine grundlegende Analyse der Eingangs- und Ausgangsgrößen auf das System der Wicklungskompaktierung vorgenommen. Wie es in der Versuchsplanung üblich ist, wurden die Eingangsgrößen, auch Parameter genannt, in Steuergrößen und Störgrößen unterteilt, wie in der Tabelle 5-5 dargestellt. Die Steuergrößen sind bekannte und beeinflussbare Größen, die Faktoren genannt werden, wenn sie auf verschiedenen Stufen in der Versuchsreihe variiert werden. Störgrößen sind nicht beeinflussbar und häufig auch unbekannt, dennoch können diese einen Einfluss auf das System haben. Messbare Größen, die als Ergebnis aus der Funktion des Systems folgen, sind die Zielgrößen und werden auch als Qualitätsmerkmale bezeichnet. (Siebertz, van Bebber & Hochkirchen 2017, S. 3 f.)

In der vorliegenden Parameterstudie ist im Speziellen zwischen zwei Parameterarten zu unterscheiden: Größen, die bei den Experimenten der Wicklungskompaktierung und in den Simulationsmodellen abgebildet werden können (experimentell), sowie Größen, die nur in der numerischen Modellbildung und Auswertung eine Rolle spielen (numerisch), nicht aber bei der realen Wicklungskompaktierung. Die in Tabelle 5-5 kursiv dargestellten Zielgrößen können im aufgebauten Simulationsmodell nicht ausgewertet werden, die gewählten Faktoren für die Parameterstudie sind unterstrichen dargestellt. Die ausgewählten Faktoren sind in Vorstudien (vgl. hierzu auch Sell-Le Blanc et al. 2019) als Steuergrößen mit entscheidendem Einfluss auf die Zielgrößen identifiziert worden. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der möglichen Parameter bei der Wicklungskompaktierung von Runddrahtwicklungen bestehend aus Kupferlackdraht (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

	Steuergrößen	Störgrößen	Zielgrößen	
experimentell	Presskraft/Pressdruck	(Luft-) Feuchtigkeit Umgebungstemperatur Drahttoleranzen Spulenkörpertoleranzen Messunsicherheit Wiederholgenauigkeit Oberflächeneigenschaften	Elektr. Widerstand ²⁰	
	Leiterdurchmesser		Teilentladungsfestigkeit	
	Isolationsgrad		Isolationsfestigkeit	
	Nutgeometrie		Gleichstromverluste	
	Windungszahl		Wechselstromverluste	
	<u>Anzahl der Drahtlagen</u>			
	<u>Lagenaufbau</u>			Presskraft
	Anzahl Drahtkreuzungen			Füllfaktor
	3D-Form (Nutverlauf)			Spannungen
	Reibwerte			Dehnungen
	<u>Stempelweg</u>			Verschiebungen
	Werkzeuggeometrie			Flächenpressung
	Werkzeugtemperatur			Rückfederung
Materialeigenschaften		geom. Spulenform		
Lackbeschichtungsart		Fehlstellen (Isolation)		
Isolationspapier				
numerisch	Elementgröße	Modellvereinfachungen		
	Elementtyp	Elementgröße		
	Massenskalerung	Elementtyp		
	Zeitschrittweite	Massenskalerung		
	Solvtyp	Zeitschrittweite		
		Solvtyp		

Die drei ausgewählten Faktoren mit den jeweiligen drei Faktorstufen sind in der Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Übersicht der gewählten Faktoren und Faktorstufen für die Parameterstudie. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Faktor	Faktorstufe
Anzahl der Drahtlagen	zwei Drahtlagen (\triangleq 10 Drähte)
	vier Drahtlagen (\triangleq 20 Drähte)
	acht Drahtlagen (\triangleq 40 Drähte)
Lagenaufbau	wilde Wicklung
	lagengenaue Wicklung orthozyklische Wicklung
Stempelweg	7 % der initialen Wicklungshöhe
	14 % der initialen Wicklungshöhe
	21 % der initialen Wicklungshöhe

²⁰ Spulenwiderstand, Wicklungswiderstand oder Isolationswiderstand

Die **Drahtlagen** wurden mit zwei, vier und acht Lagen ausgeführt, sodass sich die Anzahl jeweils verdoppelte. Hierbei enthält eine Drahtlage je fünf nebeneinander liegende Drähte innerhalb der geordneten Lagenaufbauten (vgl. Tabelle 5-7). Bei der wilden Wicklung hingegen wird nur die entsprechende Drahtanzahl variiert, es ist keine eindeutige Lage vorhanden. Für die **Lagenaufbauten** werden die wilde, lagengenaue und orthozyklische Wicklung als Faktorstufen untersucht. Der **Stempelweg** wird individuell je Versuchsaufbau über die initiale, noch unverpresste, Wicklungshöhe normiert und über 7 %, 14 % und 21 % verschoben. Dies ist notwendig, weil die unterschiedlichen Lagenaufbauten verschiedene Wicklungshöhen besitzen und durch die Normierung ihre Vergleichbarkeit hergestellt werden soll. Dabei wurde der maximale Stempelweg auf Basis einer vereinfachten theoretischen Überlegung festgelegt: Beim Verformen eines ursprünglich runden Körpers zu einem Rechteck bei konstanter Breite, entspricht die resultierende Höhe dem 0,785-fachen des anfänglichen Durchmessers. Die Herleitung hierfür ist in Anhang F ausführlich dargestellt. Gerundet ergibt dies 79 % der ursprünglichen Wicklungshöhe, dementsprechend wird ein Stempelweg von 21 % benötigt, normiert auf die Anfangshöhe der Wicklung. Bei der Verformung des lagengenauen Wicklungsaufbaus ohne Querkontraktion in axialer Richtung würde eine Wicklung von 100 % mechanischem Füllfaktor erzeugt werden. Beim orthozyklischen Lagenaufbau würde ein theoretischer mechanischer Füllfaktor von 98 % erreicht werden, da der mechanische Füllfaktor der orthozyklischen Wicklung in einer Rechtecknut nur 77 % anstatt 79 % beträgt (vgl. hierzu Anhang C). Bei der wilden Wicklung können derartige theoretische Überschlagsrechnungen nicht durchgeführt werden, weil aber die wilde Wicklung eine größere Ausgangshöhe besitzt, wird aufgrund der Normierung auch einem größeren Stempelweg Rechnung getragen. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)

Die **Zielgrößen**, die nach der Durchführung der numerischen Simulationen ausgewertet werden, sind:

- die von Mises Vergleichsspannung,
- die äquivalente plastische Dehnung (PEEQ),
- die elektrischen Füllfaktoren und
- die weiteren sichtbaren Effekte,

wie beispielsweise die geometrischen Veränderungen, die aus den erzeugten Falschfarbenbildern ersichtlich sind. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)

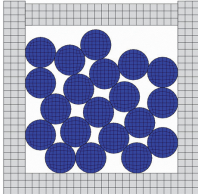
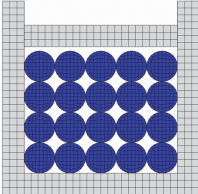
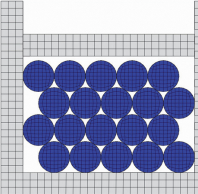
5.2.2.2 Aufbau des Simulationsmodells

In der Tabelle 5-7 sind der Aufbau und die gewählten Parameter des Simulationsmodells aufgelistet. Als Solver wurde ABAQUS/Explicit von Dassault Systems ausgewählt, da von großen Umformgraden der Kupferleiter ausgegangen wird. Als Elementtyp wurde der mit der Abkürzung C3D8R²¹ bezeichnete Typ verwendet. Als Kontakttyp wurde der penalty contact ausgewählt. (siehe Dassault Systems 2022) Zur Identifikation der Größenordnungen für die Elementgröße der Drähte, der Zeitschrittweite und der Massenskalierung wurden Konvergenzstudien durchgeführt. Daraus folgen die in Tabelle 5-7 aufgelisteten Parameter. Diese stellen einen guten Kompromiss aus kurzer Rechenzeit und adäquaten Ergebnissen dar.

Die geometrischen Gegebenheiten der Nuten sind durch den Leiterdurchmesser von 0,71 mm vorgegeben. Um eine orthozyklische Wicklung aufbauen zu können, ist es erforderlich, die Nut um die Länge des Leiterradius zu verbreitern. Die wilde Wicklung wurde zum Vergleich genauso breit wie die lagengenaue Wicklung ausgeführt. Weil die Stempelwege über die initiale Wicklungshöhe normiert sind, sind die Variationen der Nutbreiten zu vernachlässigen.

²¹ Abkürzungen übersetzt: **C** = Kontinuum, **3D** = dreidimensional, **8** = acht Knoten, **R** = reduziert integriert

Tabelle 5-7: Aufbau des Simulationsmodells und gewählte Parameter. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

	wilde Wicklung	lagengenaue Wicklung	orthozyklische Wicklung
Solvartyp	explizit	explizit	explizit
Elementtyp	C3D8R	C3D8R	C3D8R
Elementgröße der Drähte	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Elementgröße des Werkzeugs	0,16 mm	0,16 mm	0,16 mm
Kontakttyp	penalty contact	penalty contact	penalty contact
Zeitschrittweite	0,1 s	0,1 s	0,1 s
Massenskalierung	256	256	256
Stempelweg	0,129 bis 1,306 mm	0,099 bis 1,193 mm	0,093 bis 1,053 mm
Nutbreite	5x0,71 mm = 3,55 mm	5x0,71 mm = 3,55 mm	5,5x0,71 mm = 3,91 mm
Nutlänge	25 mm	25 mm	25 mm
Simulationsmodell mit vier Lagen			

5.2.2.3 Auswertung und Bewertung der Simulationsergebnisse

Nach Durchführung des Berechnungsschrittes nach den zuvor beschriebenen Simulationsmodellen, ist die Betrachtung von Falschfarbenbildern zur Gewinnung eines ersten Eindrucks der Ergebnisse hilfreich. In der Abbildung 5-11 sind Schnitte in der Mitte der Nut und die von Mises Vergleichsspannungen farbig auf den Leitergeometrien dargestellt. Es sind für die drei Lagenaufbauten jeweils vier Lagen über alle drei Stempelwege dargestellt. Abbildung 5-12 gibt eine Übersicht der drei Lagenaufbauten mit drei unterschiedlichen Anzahlen an Drahtlagen, über den maximalen und normierten Stempelweg zur initialen Wicklungshöhe von 21 %. Im Folgenden werden anhand der drei untersuchten Einflussfaktoren, der Anzahl der Drahtlagen, des Lagenaufbaus und des Stempelwegs, die Zielgrößen betrachtet und die Ergebnisse diskutiert. (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)

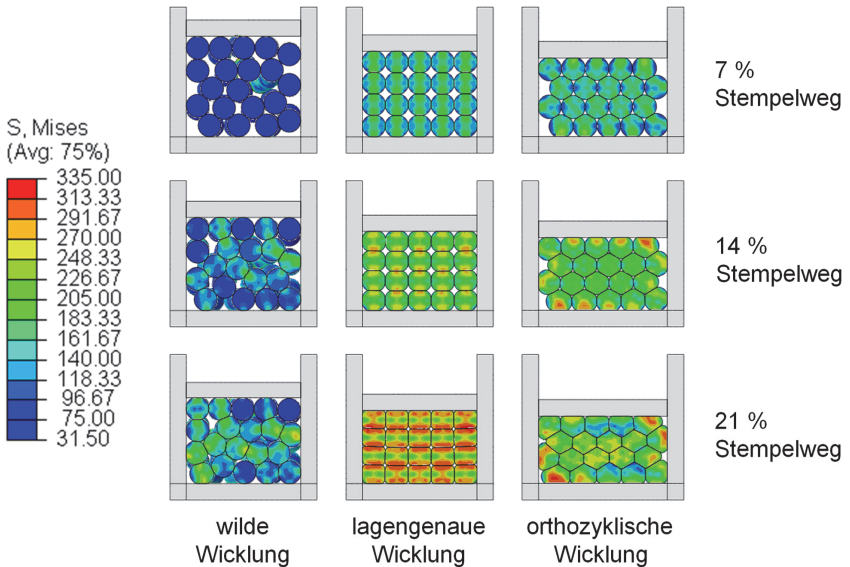


Abbildung 5-11: Übersicht der Falschfarbenbilder für die ausgewerteten von Mises Vergleichsspannungen an den drei Wicklungstopologien und Stempelwegen bei vier Drahtlagen. Dargestellt ist ein Schnittbild mittig der Nut bei 12,5 mm. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Bei Betrachtung der **Anzahl der Drahtlagen** fällt auf, dass die Geometrieabweichungen der kompaktierten Drähte, insbesondere in der Mitte der Nut und bei geordneten Lagenaufbauten zunehmen (siehe Abbildung 5-12). Es treten Formabweichungen der Drähte von einem Rechteck oder Verschiebungen der Flächenmittelpunkte der einzelnen Leiter zueinander auf. Bei der wilden Wicklung geschieht dies durch die zufällige Anordnung an allen Stellen in der Nut. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen und Beobachtungen in experimentellen Untersuchungen. Die Wahrscheinlichkeit des Abrutschens der Drähte voneinander in der Nutmitte ist größer, denn die Reibwerte zwischen den Drähten sind kleiner als zwischen den Drähten und dem Presswerkzeug. Die geordneten Lagenaufbauten weisen in Bezug auf die Lagenanzahl geringere Werte der maximalen von Mises Vergleichsspannungen und äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen auf (siehe Abbildung 5-13). Bei der wilden Wicklung hingegen nehmen die Spannungen und Dehnungen bei steigender Drahtanzahl tendenziell zu. Dies kann mit der ungeordneten Drahtanordnung erklärt werden, die zum einen zu großen

Verschiebungen der Drähte führen kann und zum anderen dreidimensionale Kreuzungen der Drähte in der Nut hervorruft, die zu stärkeren Verformungen der betroffenen Drähte führt. Eine höhere Drahtzahl steigert wiederum die Wahrscheinlichkeit großer Verschiebungen und Kreuzungen. Die Variation der Lagenanzahl bei geordneten Lagenaufbauten hat keinen signifikanten Einfluss auf die Füllfaktoren und die Füllfaktorensteigerung (vgl. Abbildung 5-14). Bei der wilden Wicklung ist die Steigerung der Lagenanzahl vorteilhaft, es bildet sich nämlich eine kompaktere Anordnung der einzelnen Leiter aus (siehe Abbildung 5-12 obere Reihe). (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)

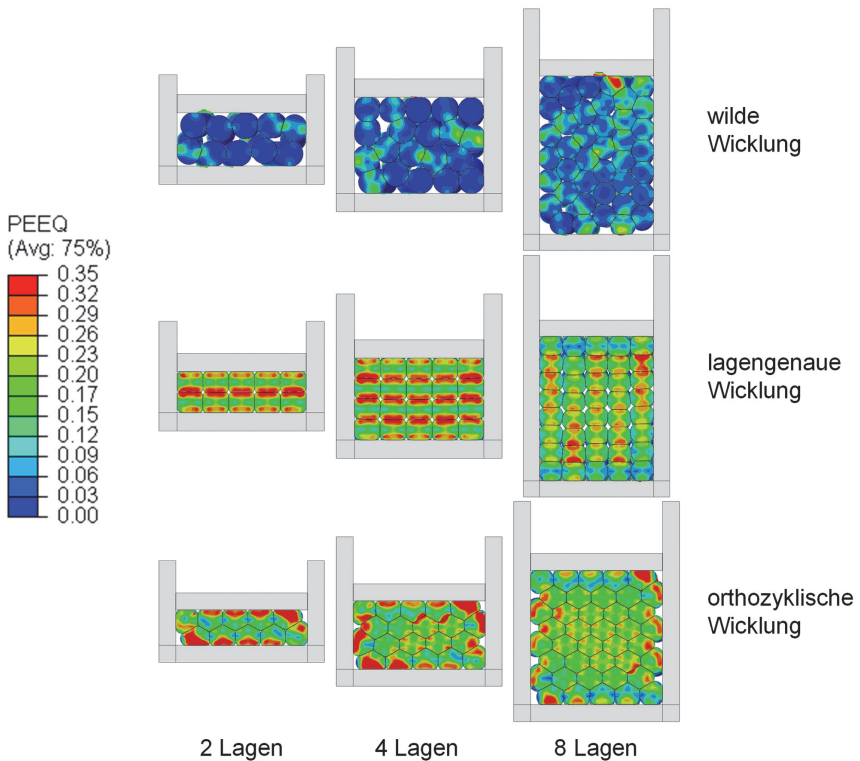
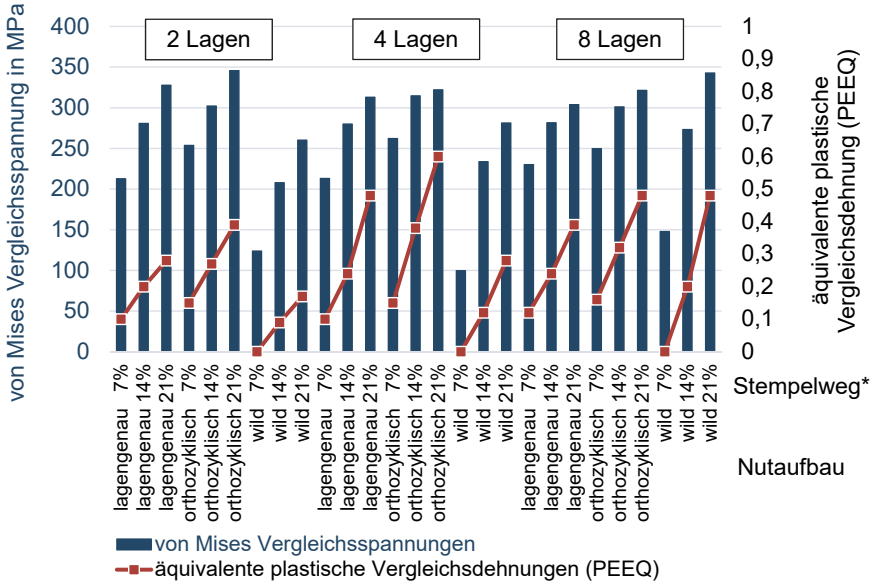


Abbildung 5-12: Übersicht der Falschfarbenbilder für die ausgewerteten äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen (PEEQ) an den drei Wicklungstopologien und Lagen bei jeweils maximalem Stempelweg von 21 %. Dargestellt ist ein Schnittbild mittig der Nut bei 12,5 mm. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Sehr auffällig ist der Einfluss der **Lagenaufbauten** auf die geometrischen Ausprägungen der Drähte nach dem Kompaktieren. Bei der Kompaktierung der lagengenauen Wicklung entstehen im Optimalfall rechteckige Leiter mit abgerundeten Kanten, wobei die Kantenradien zur Erzielung hoher Füllfaktoren möglichst klein sind. Bei der orthozyklischen Wicklung entstehen gleichseitige Sechsecke in der Mitte der Nut, während die Drähte am Rand auch überwiegend sechseckig, aber nicht gleichseitig ausgeprägt sind. Die kurzen Seiten sind teilweise so stark abgerundet, dass diese eher einem Radius ähneln, als einer Kante. Bei der wilden Wicklung ist die Spanne der geometrisch erzeugten Formen sehr groß und reicht von beinahe unverformten runden Drähten hin zu verzerrten Vielecken. Weiterhin sind die Spannungs- und Dehnungswerte bei der wilden Wicklung sehr inkonsistent und zwar so, wie in der oberen Reihe der Abbildung 5-12 dargestellt. Bei der lagengenauen Wicklung ist die Spannungs- und Dehnungsverteilung analog zur Geometrieausprägung als annäherungsweise symmetrisch anzunehmen (siehe Abbildung 5-11 mittlere Spalte). Die orthozyklische Wicklung ist teilweise in der Nutmitte durch symmetrische Spannungs- und Dehnungswerte gekennzeichnet, während die Drähte an den Nutgrenzen tendenziell unsymmetrisch verteilte und überhöhte Spannungs- und Dehnungswerte aufweisen. Die Lagenaufbauten haben, wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, schon vor der Kompaktierung großen Einfluss auf den Füllfaktor. Durch die Kompaktierung kann die wilde Wicklung die größten Steigerungen des Füllfaktors erzielen, weil die wilde Wicklung einen hohen Anteil an der Komprimierung der Wicklung besitzt. Sowohl die lagengenauen, als auch die orthozyklischen Wicklungen sind infolge ihrer geometrischen Anordnungen bereits soweit komprimiert, dass eine Kompaktierung nur noch mit Hilfe einer Verpressung erreicht werden kann. Es gibt also keine Leerstellen im Lagenaufbau, die durch eine Verschiebung von Drähten ohne plastische Deformation geschlossen werden könnten. Auffällig ist hingegen, dass die geordneten Lagenaufbauten wesentlich mehr Material aus der Nut verdrängen, denn es tritt eine Querkontraktion bei der plastischen Verformung auf. Diesem Herausdrücken von Material aus der Nut wird mittels der bereinigten elektrischen Füllfaktorverbesserung Rechnung getragen. Die Füllfaktorverbesserung ohne Bereinigung gibt nur den elektrischen Füllfaktor nach dem Pressen an, also das Verhältnis der erzeugten Nutfläche zur Leiterfläche in der Schnittansicht. Bei der bereinigten elektrischen Füllfaktorverbesserung wird der prozentuale Wert der verdrängten Leiterfläche aus der Nut von der reinen elektrischen

Füllfaktorverbesserung abgezogen. Somit steht die Füllfaktorverbesserung auch mit der Materialverdrängung in Wechselwirkung.



*(normiert über initiale Wicklungshöhe)

Abbildung 5-13: Auswertung der maximalen von Mises Vergleichsspannungen und der maximalen äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen für alle untersuchten Faktorkombinationen. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Der **Stempelweg** steht offensichtlich mit den festzustellenden maximalen Spannungs- und Dehnungswerten in signifikantem Zusammenhang. Je größer der Stempelweg ist, desto höher werden auch die Presskräfte am Stempel und es steigen die Spannungs- und Dehnungswerte in den Drähten. Für eine aussagekräftige Untersuchung des Wirkzusammenhangs von Stempelweg und Zielgrößen ist eine höhere Anzahl an Stempelwegen zu untersuchen. Dennoch können einige der auftretenden Phänomene durch diese Simulationsstudie aufgedeckt werden. Wie bereits beschrieben, wird die wilde Wicklung besonders im Bereich der kleinen Stempelwege nur komprimiert, was in der Abbildung 5-11 (oben links) sehr gut erkennbar ist. Wie theoretisch erörtert, treten keine plastischen Verformungen auf. Erst bei höheren Stempelwegen ist von einer plastischen Verformung auszugehen. Für alle Lagenaufbauten lässt sich also

feststellen, dass ein größerer Stempelweg prinzipiell zu einem höheren elektrischen Füllfaktor führt (vgl. Abbildung 5-14). Bei geordneten Lagenaufbauten und einer höheren Anzahl an Drahtlagen ist bei steigendem Stempelweg aber gleichzeitig festzustellen, dass sich die bereinigte Füllfaktorverbesserung unter Berücksichtigung der Materialverdrängung in axiale Richtung der Nut bei maximalen Stempelwegen nicht verbessert, sondern teilweise eher verschlechtert. Bei einer geringeren Anzahl von Lagen ist dieser Effekt kleiner. Dies lässt sich damit begründen, dass die Drähte an der Presswand durch höhere Reibwerte in geringerem Umfang in axiale Richtung verdrängt werden. Besonders in der dreidimensionalen Ansicht in Abbildung 5-15 ist dies erkennbar. Hier wird ersichtlich, dass die Verschiebung der Drähte aus der Nut besonders stark in den Lagen stattfindet, die eine Lage von der Nutwand entfernt liegen. Die Verschiebungen der Drähte, die am Nutgrund oder dem Stempel anliegen, sind in der Richtung aus der Nut heraus vergleichsweise klein.

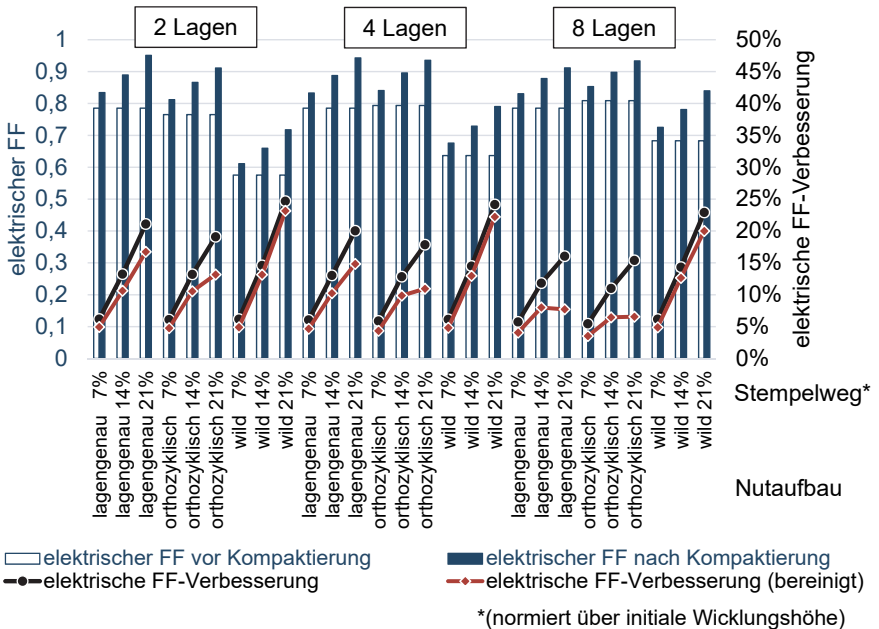


Abbildung 5-14: Auswertung der elektrischen Füllfaktoren (FF) und der prozentualen Verbesserungen der elektrischen Füllfaktoren für alle untersuchten Faktorkombinationen. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

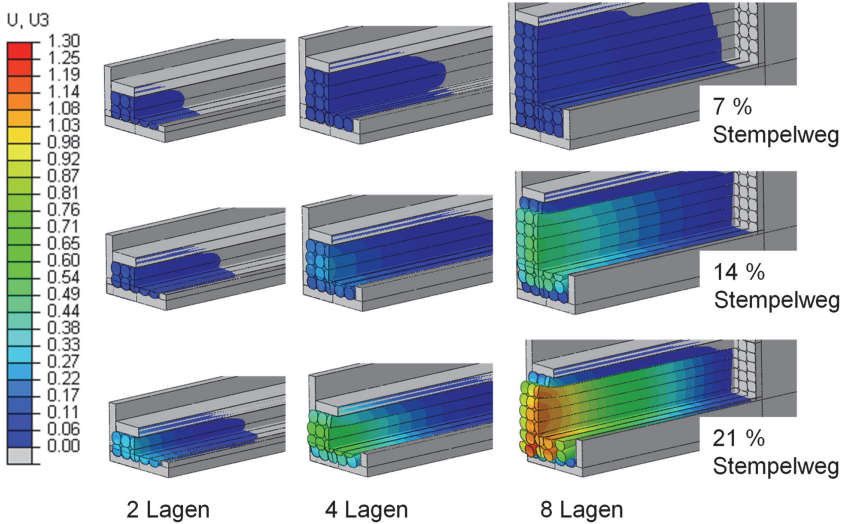


Abbildung 5-15: Dreidimensionale Schnittdarstellungen der Falschfarbenbilder der lagengenauen Nutaufbauten mit 2, 4 und 8 Lagen über 7%, 14% und 21% Stempelweg der initialen Wicklungshöhe. Verschiebung in mm in Richtung des Nutverlaufs in mm ($U3$).

Für die weitere Untersuchung wurde die Kompaktierung der lagengenauen Wicklung im vorgegebenen Simulationsmodell mit feineren Stempelwegen von 4 % bis 25 % berechnet, die Ergebnisse sind in den Graphen der Abbildung 5-16 über den Stempelweg aufgetragen. Gemäß der theoretischen, zweidimensionalen Überlegung ohne Querkontraktion, kann die kompaktierte Wicklungshöhe auf 78,5 % der ursprünglichen Höhe umgeformt werden (siehe Anhang F). Ohne das Vorliegen der Querkontraktion hätte der zu Beginn runde Querschnitt eines Leiters dieselbe Fläche wie die rechteckige Kontur nach dem Pressvorgang. Da in der dreidimensionalen Nutanordnung allerdings Querkontraktion stattfindet, liegt beim Stempelweg von 21,5 % bereits ein nicht vernachlässigbarer Materialfluss aus der Nut vor. Nach dieser Simulationsstudie ist ein Stempelwert von 18 % für die initiale Wicklung zu empfehlen, also 82 % der ursprünglichen Wicklungshöhe. Bei 18% ist der bereinigte Füllfaktor über alle Drahtlagenanzahlen im Durchschnitt am höchsten. Des Weiteren ist erkennbar, dass eine Zunahme der Lagen die Verbesserung des elektrischen Füllfaktors hemmt, bei der Verdoppelung der Lagen von vier auf acht nimmt die Füllfaktorverbesserung um

3 % ab, während sich die Verdopplung von zwei auf vier Lagen nur um 1 % verschlechtert.

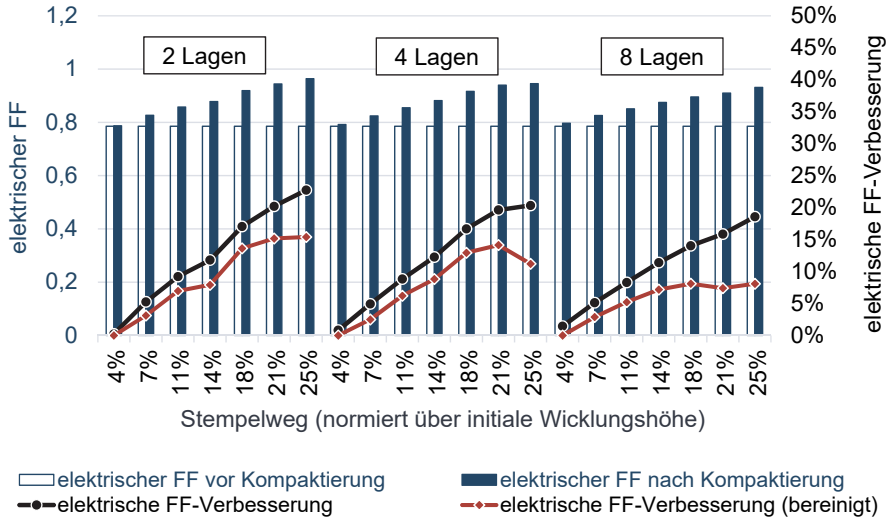


Abbildung 5-16: Auswertung der elektrischen Füllfaktoren und der prozentualen Verbesserungen der elektrischen Füllfaktoren für normierte Stempelwege von 4 % bis 25 % des lagengenaue Wicklungsaufbaus.

Zusammenfassend lässt sich mit der Simulationsstudie feststellen, dass die lagengenaue Wicklung die besten Voraussetzungen zur Kompaktierung bietet. Deshalb wird sie für den Kompaktwickelprozess als grundlegende Anordnung der Drähte in der Nut gewählt und im Folgenden experimentell untersucht. Es gibt ein hohes Potenzial für eine gleichmäßige und kontrollierbare Verpressung. Ab einer Anzahl von acht Drahtlagen ist bei der lagengenaue Wicklung allerdings das Abrutschen der inneren Drähte zu erwarten.

5.2.3 Aufbau der Versuchswerkzeuge

Bevor in Kapitel 5.2.4 auf die experimentellen Versuchsreihen eingegangen wird, werden in diesem Abschnitt die verwendeten Werkzeuge vorgestellt. In den ersten vier Versuchsreihen werden als Werkzeuge gefräste oder drahtgeschnittene Modellnuten und dazugehörige Stempel verwendet, wie in Abbildung 5-17 dargestellt. Dabei werden wild gewickelte Spulen mittels einer Wickelschablone auf einer Linearwickelmaschine hergestellt (vgl. Anhang E). Bei den Versuchen wird jeweils eine Spulenseite pro

Kompaktierungsversuch in die Modellnuten eingelegt und im Anschluss vermessen. Die runde, eckige und trapezförmige Modellnuten haben dabei eine Länge von 90 mm bei einer Nutbreite von 5,9 mm und einer Nuthöhe von 20 mm (Sell-Le Blanc et al. 2019). Der Stempel ist dabei mindestens um 0,6 mm kleiner, damit die Isolationspapiere und Druckmessfolien beidseitig in der Nut an der Stempelseite vorbeigeführt werden können. Die Abmessungen der NeWire-Geometrie sind aus (Winter et al. 2021) entnommen, die Nut besitzt eine Länge von 110 mm. (A_Jäger 2019; A_Kenge 2020; A_Weber 2021)

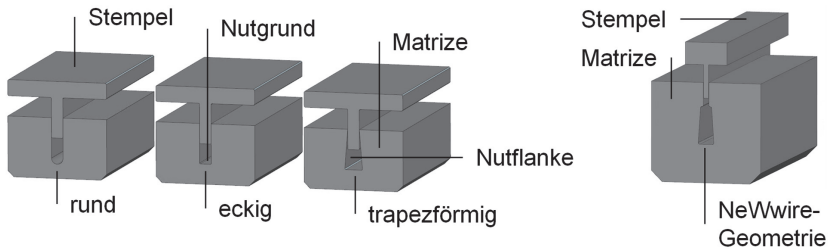


Abbildung 5-17: CAD-Darstellung der Werkzeuge für die Versuchsreihen 1 bis 4. Verwendet wurden Modellnuten mit rundem, eckigen und trapezförmigen Nutgrund (ersten drei Presswerkzeuge von links nach rechts) und eine Matrize (rechts) mit der Nutgeometrie des NeWire-Statots (siehe Winter et al. 2021) und angepasstem Stempel. (eigene Darstellung nach A_Jäger 2019; A_Kenge 2020; A_Weber 2021)

Die in den Versuchsreihen fünf bis acht eingesetzten Versuchswerkzeuge sind in Abbildung 5-18 dargestellt. Kompaktiert wurden verbackene Kompaktspulen, die händisch gemäß Kapitel 5.1 hergestellt wurden. Dieses Versuchswerkzeug wurde in den zwei Werkzeugversionen A und B untersucht. Bei den Werkzeugversionen A und B bleibt der Stempel gleich, die Matrizen sind bei Version A und Version B allerdings unterschiedlich. Aufgrund der in Kapitel 5.2.2 durchgeführten simulativen Parameterstudien wurde eine rechteckige Nutgeometrie gewählt, um die Untersuchung der lagengenauen Wicklung zu ermöglichen. Der Stempel besteht aus einer Grundplatte mit zwei abgesetzten Stempelflächen und vier Gleitbuchsen für eine geführte Pressbewegung. Bei der Werkzeugversion A wird die Spule in eine ausgefräste Kavität eingelegt. Hohe Pressdrücke führen zur Verklemmung der Spulen im Werkzeug, was eine beschädigungsfreie Entnahme der Spulen nach dem Kompaktieren erschwert. Daher wurde die Werkzeugversion B konstruiert, die eine teilbare Matrize besitzt, um die Spulen beschädigungsfrei entnehmen zu können. Die

Matrize wird dabei mit Hilfe von Führungsbolzen, Gleitbuchsen und Schrauben definiert zusammengebaut. Ein weiterer Vorteil ist die Zugänglichkeit der Werkzeugflächen, die mit der Spule in Kontakt stehen. Diese können auf einer Flachscheifmaschine geschliffen werden, was bei den Versuchswerkzeugen so auch realisiert wurde. Dadurch sind die Wirkflächen glatter und das Beschädigungsrisiko der Spulenisolation wird weiter reduziert. (A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022)

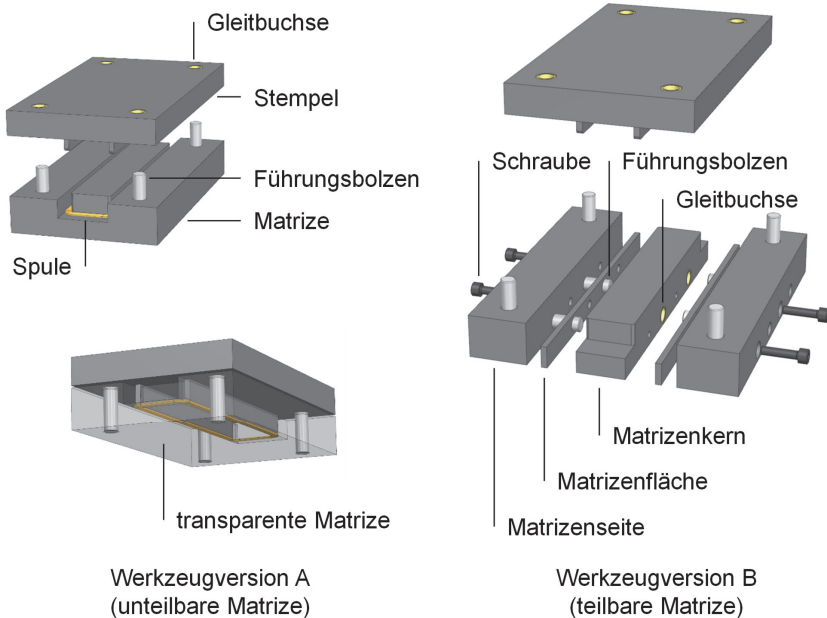


Abbildung 5-18: CAD-Modelle der beiden eingesetzten Kompaktierwerkzeuge zur Kompaktierung der verbackenen Spulenproben in den Versuchsreihen 5 bis 8 mit jeweils 10 Drähten (2 Schichten mit 5 Drähten). Werkzeugversion A, bestehend aus einer gefrästen Matrize (links), und Version B mit einer teilbaren Matrize (rechts). Der Aufbau und die Geometrie des Stempels sind in beiden Versionen gleich. (eigene Darstellung nach (A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022))

Sowohl bei den Modellnuten als auch bei den Kompaktierwerkzeugen wurde zur Kraftaufnahme einerseits die Druckanzeige in Tonnen der hydraulischen Werkstattpresse RODCRAFT W50P überwacht, als auch ein Präzisions-Zug-Druckkraftsensor Typ 8524 mit einem Messbereich von 0 kN bis 200 kN der Firma burster zur Messung der verwendeten Presskräfte eingesetzt. Der Kraftsensor wurde

mit dem USB Multisensor Interface 9206 und der Auswertesoftware DigiVision des Herstellers burster ausgewertet.

5.2.4 Experimentelle Versuchsreihen

Der Fokus der experimentellen Untersuchung liegt insbesondere auf den elektrischen Eigenschaften der erzeugten Spulen. Aufgrund der nicht quantifizierbaren Verdrängung des Kupfermaterials aus der Nut, wird von einer weiteren Berechnung des Füllfaktors abgesehen und stattdessen die Abhängigkeit des Pressdrucks p_{Press} in Megapascal angegeben. Es ist davon auszugehen, dass infolge der hohen angelegten Pressdrücke die Verpressung der dominierende Mechanismus in den Versuchsreihen ist. Daher wird hier von Pressdrücken anstatt von Kompaktierdrücken gesprochen.

Tabelle 5-8: Zusammenfassung aller Parameter bei der experimentellen Wicklungskompaktierung von Runddrahtwicklungen, bestehend aus isolierten Kupferleitern. Die unterstrichenen Parameter verdeutlichen dabei ausgewählte Parameter, die in den folgenden acht experimentellen Versuchsreihen untersucht werden. (basierend auf (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))

Steuergrößen	Störgrößen	Zielgrößen
<u>Presskraft/Pressdruck</u> <u>Leiterdurchmesser</u> Isolationsgrad <u>Nutgeometrie</u> <u>Windungszahl</u> <u>Anzahl der Drahtlagen</u> <u>Lagenaufbau</u> <u>Anzahl Drahtkreuzungen</u> 3D-Form (Nutverlauf) Reibwerte Stempelweg <u>Werkzeuggeometrie</u> Werkzeugtemperatur Materialeigenschaften Lackbeschichtungsart Isolationspapier	(Luft-) Feuchtigkeit Umgebungstemperatur Drahttoleranz Spulenkörpertoleranz Messunsicherheit Wiederholgenauigkeit Oberflächeneigenschaften	<u>Elektrischer Widerstand</u> ²² <u>Teilentladungsfestigkeit</u> <u>Isolationsfestigkeit</u> Gleichstromverluste Wechselstromverluste <u>Presskraft</u> Füllfaktor Spannungen Dehnungen Verschiebungen <u>Flächenpressung</u> Rückfederung <u>geom. Spulenform</u> <u>Fehlstellen (Isolation)</u>

Basierend auf den in Kapitel 5.2.2 genannten Parametern der simulativen Parameterstudie (vgl. Tabelle 5-5), sind die für die experimentellen Versuchsreihen

²² Spulenwiderstand, Wicklungswiderstand oder Isolationswiderstand

relevanten Parameter angepasst und in Tabelle 5-8 aufgelistet. Sämtliche numerische Parameter (siehe Tabelle 5-5 unten links) wurden entfernt, da sie auf die Ergebnisse der Experimente keinen Einfluss haben. Größen wie etwa die Art der Lackdrahtbeschichtung, können hingegen berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 5.1 dargestellt, ist Backlack für die Herstellung von Spulen mit lagengenauem Lagenaufbau notwendig. Die wilde Wicklung wurde als Referenz für den lagengenauen Lagenaufbau verwendet.

Die ausgewählten Steuergrößen werden in acht experimentellen Versuchsreihen weiterführend untersucht und sind in Tabelle 5-8 unterstrichen. Die entsprechenden Untersuchungsziele sind übersichtlich in Tabelle 5-9 aufgelistet. Dabei bauen die Zielsetzungen aufeinander auf und es werden je Störgröße mehrere Zielgrößen betrachtet. Die Versuchsreihen 1 und 2 untersuchen den Einfluss der Nutgeometrie. In den Versuchsreihen 3 und 4 liegt der Fokus insbesondere auf dem Einfluss der Kreuzungen innerhalb des verpressten Wicklungsabschnitts. Bei den ersten vier Versuchsreihen werden die Wicklungen wild ausgeführt. Ab Versuchsreihe 5 werden Kompaktspulen untersucht. Anstelle einer wilden Wicklung und der Verwendung von Modellnuten (Abbildung 5-17) werden spezielle Werkzeuge (Abbildung 5-18) zur Kompaktierung der Spulenkörper verwendet. Die zu kompaktierenden Spulen sind gemäß Kapitel 5.1 hergestellt worden. Versuchsreihe 5 fokussiert die Variation der Spulenzahl, während in Versuchsreihe 6 eine Spule kompaktiert wird. In Versuchsreihe 7 werden die Werkzeugversionen A und B getestet, darauf aufbauend werden in Versuchsreihe 8 Beschädigungen der Lackisolation mit Hilfe des Salzbadtests örtlich detektiert. (A_Kenge 2020; A_Weber 2021; A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022)

Tabelle 5-9: Übersicht der Untersuchungsziele der acht experimentellen Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Untersuchungsziel
1	Einfluss verschiedener Nutgeometrien
2	Untersuchung der NeWire-Nutgeometrie
3	Einfluss der Drahtkreuzungen im Lagenaufbau
4	Untersuchung lagengenauer Aufbau ohne Fixierung
5	Untersuchung Kompaktspulen in Werkzeugversion A
6	Untersuchung wilder Wicklungen in Werkzeugversion A
7	Kompaktspulen mit überarbeiteter Werkzeugversion B
8	Analyse der Lackbeschädigungen

In Tabelle 5-10 sind die nummerierten Versuchsreihen mit den jeweils gewählten Blöcken, Faktoren, Faktorstufen, Zielgrößen und konstanten Einflussgrößen eingehend dargestellt.

Tabelle 5-10: Detaillierte Darstellung der Parameter der acht experimentellen Versuchsreihen. (zusammengeführt aus (A_Kenge 2020; A_Weber 2021; A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022))

Versuchsreihe	Blockanzahl	Faktoren	Faktorstufen	Zielgrößen	konstante Einflussgrößen
1	2	Nutgeometrie:	eckig; rund; trapezf.	Druckverteilung	Isolationsgrad 2 wilde Wicklung Modellnuten
		p_{Press} in MPa:	150; 250; 350		
		Windungszahl:	60; 80; 100; 120		
2	3	Windungszahl	126 bis 150	F_{Press} in kN R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V U_{RPDIV} in V U_D in V	Isolationsgrad 2 wilde Wicklung Modellnut (NeWire)
3	3	p_{Press} in MPa:	210; 310; 410	Druckverteilung R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V	Isolationsgrad 2 wilde Wicklung Modellnut (eckig)
		Windungszahl:	20; 30		
		Kreuzungen:	0; 3; 6; 9		
4	12	p_{Press} in MPa:	210; 310; 410	Druckverteilung	Isolationsgrad 2 teilgeordnet Modellnut (eckig)
		Lagen (7):	2; 3		
5	3	p_{Press} in MPa:	235; 315	Druckverteilung R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V	Isolationsgrad 2B Kompaktwicklung
		Teilschule:	1; 3		
6	3	p_{Press} in MPa:	235; 315	R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V	Isolationsgrad 2B wilde Wicklung
7	3	p_{Press} in MPa:	235; 315; 395	R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V Maßhaltigkeit	Isolationsgrad 2B Kompaktwicklung
		Werkzeug:	A; B		
8	3	p_{Press} in MPa:	235; 315; 395	R_{el} in Ω U_{RPDIV} in V Salzbadtest	Isolationsgrad 2B Kompaktwicklung
		Werkzeug:	A; B		

Als konstante und bekannte Störgröße wird eine Umgebungstemperatur mit 20°C angenommen. Der Leiterdurchmesser wurde aufgrund des Bezugs zum Projekt NeWire durchgehend auf 0,71 mm festgelegt. Die verwendete Lackisolation der Kupferlackdrähte entspricht durchgängig der Isolierstoffklasse H.

Die vorangegangene simulative Parameterstudie (vgl. Kapitel 5.2.2) wurde Weg-gesteuert durchgeführt und hat das Potenzial der Füllfaktorsteigerung und die Verformungen der Drähte in Abhängigkeit des Lagenaufbaus aufgezeigt. In den experimentellen Versuchsreihen wird der Presstempel hingegen Kraft-gesteuert verfahren. Bei den untersuchten Pressdrücken wurde, entsprechend den Analysen und Voruntersuchungen aus Kapitel 5.2.1 und den simulativen Parameterstudien aus Kapitel 5.2.2, ein korrelierender Bereich von 150 MPa bis 410 MPa gewählt. Zusätzlich wurde aufgrund der Ergebnisse der simulativen Parameterstudien der lagengenaue Aufbau der Drähte in einer rechteckig geformten Nut gewählt. Weil ein Abrutschen der Drähte in der simulativen Parameterstudie ab vier Teilspulen (entspricht den untersuchten 8 Lagen) festzustellen war, sind bei der Variation der Anzahl der Teilspulen in Versuchsreihe 5 Faktorstufen von einer und drei Teilspulen festgelegt worden. Da die Flächen der Werkzeuge variieren, erfolgte die Umrechnung und Angabe der Pressdrücke p_{Press} in Megapascal, anstatt der gemessenen Presskraft F_{Press} in Kilonewton, das ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsreihen. Da je nach Versuchsreihe verschiedene Presskräfte verwendet wurden, variieren allerdings die Faktorstufen der Pressdrücke leicht.

Gemäß den Grundlagen der statistischen Versuchsplanung (vgl. Siebertz, van Beber & Hochkirchen 2017, S. 93 ff.), wurde bei der Durchführung der Versuche auf die Randomisierung, Wiederholung und Blockbildung geachtet. Bei allen Versuchen wurden die entsprechenden Faktoren randomisiert getestet, um systematische Störungen weitestgehend zu minimieren. Die Versuchswiederholung je Faktorstufe meint dabei nicht die reine Messwiederholung, sondern die Wiederholung des gesamten Versuchsvorgangs. Dies bedeutet beim Kompaktieren einer Formspule beispielsweise, dass mehrere Spulen je Faktorstufe verpresst werden. In allen vorliegenden Versuchen wurden Wiederholungen vorgenommen. Diese wurden in Blöcke (siehe Tabelle 5-10) aufgeteilt, um die Bildung systematischer Fehler noch weiter zu reduzieren. Zusätzlich wurden für die jeweiligen Faktoren die entsprechenden Wahrscheinlichkeitswerte ausgerechnet, auch Signifikanzen oder p-Werte genannt. Der p-Wert gibt dabei die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit an. Dabei wurde der in

der Literatur übliche p-Wert von 0,05 angenommen (Siebertz, van Beber & Hochkirchen 2017, S. 75), was einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % entspricht. Alle Faktoren die einen p-Wert kleiner oder gleich 0,05 besitzen, werden im folgenden Kontext als statistisch signifikant bezeichnet. Sofern es die Übersichtlichkeit und die Lesbarkeit der grafischen Darstellung zulässt, sind die Standardabweichungen durch Fehlerbalken bei jeder Faktorstufe dargestellt. (Sell-Le Blanc et al. 2019)

5.2.4.1 Versuchsreihe 1: Einfluss verschiedener Nutgeometrien

Innerhalb der **Versuchsreihe 1** wurden die eckigen, runden und trapezförmigen Nuten über drei Pressdrücke p_{press} und vier Windungszahlen w_{sp} untersucht, wie in Abbildung 5-19 gezeigt. Die Pressdrücke des Stempels ergeben sich aus der Stempelfläche von etwa 520 mm² und den gemessenen Presskräften F_{press} in Kilonewton und zwar so, wie in den eigenen Voruntersuchungen aus Kapitel 5.2.1 beschrieben. Um die Messungen des Pressdrucks der Drähte am Nutgrund und an den Nutflanken durchzuführen, wurde eine für Runddrahtwicklungen elektrischer Maschinen neuartige Messmethode angewandt. Hierzu wurden zwischen der Papierisolation und den Flächen der Metallnut Druckmessfolien eingelegt. Die verwendeten Druckmessfolien werden vom Hersteller FUJIFILM als „Pressure measurement film - Prescale“ bezeichnet (FUJIFILM 2023). Die Druckmessfolien sind dabei so aufgebaut, dass bei der Anlegung des Pressdrucks (im jeweils korrelierenden Druckbereich des Typs) mit farbloser Flüssigkeit gefüllte Mikrokapseln platzen und diese auf der Entwicklungsschicht durch eine dort stattfindende chemische Reaktion eine rote Färbung hervorrufen. Aufgrund unterschiedlicher Größen und Wandstärken der Mikrokapseln, die gleichmäßig über die Folie verteilt sind, platzen diese bei unterschiedlichen Drücken. Bei steigendem Druck erhöht sich die angezeigte Farbintensität auf der Druckmessfolie. Die verwendeten Druckmessfolien von MS bis HHS sind in der Einschichtversion ausgeführt, in der nur eine Folie verwendet und die Handhabung in den Versuchen dadurch deutlich erleichtert wird. Für die durchgeführten Versuche wurden, abhängig vom jeweils anliegenden Stempelpressdruck²³, die folgenden drei Filmtypen angewendet: „Medium Pressure“ (MS) für den Bereich von 10 MPa bis 50 MPa, „High Pressure“ (HS) für den Bereich von 50 MPa bis 130 MPa und „Super High Pressure“ (HHS) für den Bereich von 130 MPa bis 300 MPa. Für den Großteil der Messungen wurde der Typ HHS

²³ Wird der Pressdruck an den Nutflächen betrachtet, reduziert sich dieser in der Theorie, da die Stempelfläche kleiner als die Nutfläche ist.

verwendet. Bei der Verwendung der Druckmessfolien liegt der empfohlene Temperaturbereich zwischen 20°C bis 35°C, die Luftfeuchte (RH) sollte zwischen 35 % und 80 % liegen. Grundsätzlich wird eine Messabweichung der Druckmessfolien von mindestens $\pm 10\%$ bei einer Temperatur von 23°C und einer Luftfeuchtigkeit (RH) von 65 % angegeben. (FUJIFILM 2023) Während der Versuche wurden die empfohlenen Bereiche nicht verlassen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese Messmethode auch als Druckverteilungsmessung bezeichnet und wurde in den Versuchsreihen 1, 3, 4 und 5 angewandt (vgl. Tabelle 5-10).

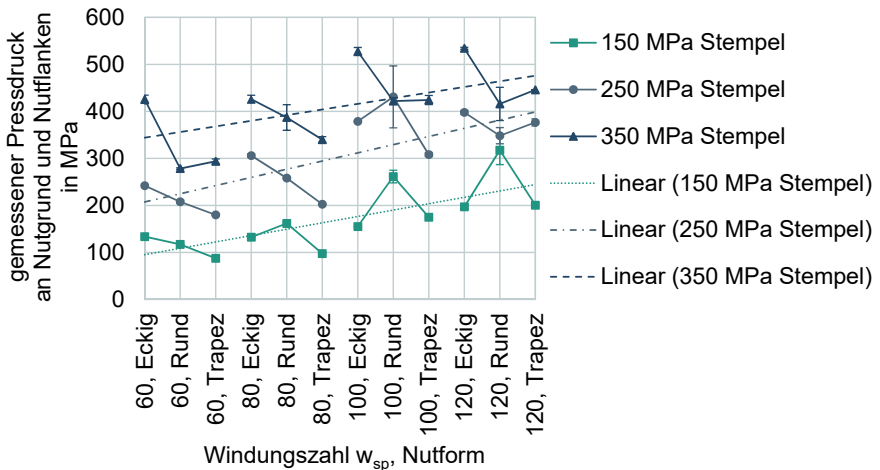


Abbildung 5-19: Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Versuchsreihe 1. Gemessener mittlerer Pressdruck p_{press} in MPa mit Standardabweichungen und linearen Approximationen über die Windungszahl und Nutform. (eigene Auswertung aus den Daten generiert in (A_Kenge 2020))

Die Druckmessfolien wurden nach der Versuchsdurchführung entnommen und durch eine Intensitätsauswertung mit Hilfe von MATLAB[®] ausgewertet. Um die Farbintensität mit den anliegenden Pressdrücken abzugleichen, wurde zunächst eine Kalibrierung mit Messstempeln und der eingebauten Kraftmessdose durchgeführt. Die Kalibrierungen sind ausführlich in (A_Kenge 2020) und (A_Weber 2021) beschrieben.

Die Auswertung der Druckmessfolien kann entweder über den gemittelten Pressdruck, wie in Abbildung 5-19 dargestellt, oder mittels Betrachtung der Falschfarbender anhand der Stärke der Farbintensitäten durchgeführt werden (Abbildung 5-20). Bei der Auswertung der gemessenen, gemittelten Pressdrücke zeigt sich, dass diese

erwartungsgemäß über den angelegten Pressdruck steigen. Auch ist zu erkennen, dass die gemessenen Pressdrücke über die steigende Windungszahl hin stark zunehmen. Dies lässt sich mit dem Kompaktiervorgang an den Nutflanken erklären. Die Drähte bewegen sich insbesondere bei der Komprimierung, sodass nach Abschluss des Kompaktiervorgangs die Drahtabdrücke wesentlich großflächiger auf der Druckmessfolie abgebildet werden, als es die Kontaktflächen der Drähte am Ende der Kompaktierung tatsächlich sind (vgl. Abbildung 5-20). Hierdurch entsteht eine erhebliche Überschätzung des anliegenden Pressdrucks. Aufgrund der hohen Ungenauigkeit der Druckmessfolien und der Verfälschungen infolge der Bewegung der Drähte, sind die gemessenen mittleren Pressdrücke lediglich als Anhaltspunkte zu betrachten. (A_Kenge 2020)

Bei der Sichtung der ausgewerteten Druckmessfolien, wie sie als Ausschnitt in Abbildung 5-20 zu sehen sind, können im Wesentlichen zwei Beobachtungen gemacht werden: Das im vorherigen Absatz beschriebene Abrollen der Drähte ist deutlich auf den Druckmessfolien erkennbar. Während die einzelnen Drahtabdrücke im Nutgrund gut identifizierbar sind, erscheinen die Einfärbungen an den Nutflanken, besonders bei höheren Pressdrücken, verschwommen. Weiterhin zeigt sich, dass die Nutgeometrie einen Einfluss auf die Druckverteilung hat. Die Bereiche des Nutgrundes haben eine stärkere Farbintensität als die Flanken und es liegt hier ein höherer Druck an. Da die Drähte direkt in Richtung Nutgrund gedrückt werden, ist dies folgerichtig. Auch an den Nutflanken kann der Druck aufgrund der Reibung und Klemmung bei steigendem Pressdruck des Stempels steigen, jedoch geringer als am Nutgrund. Dies ist an der rötlicheren Verfärbung in den Bereichen des Nutgrundes im Vergleich mit den Nutflanken erkennbar. Bei der Betrachtung des Einflusses der Nutgeometrie auf die Druckverteilung zeigt sich, dass die trapezförmige Nut grundsätzlich den stärksten Druck am Nutgrund besitzt. Dies ist mit dem Geometrieinfluss erklärbar, denn die Drähte neigen an den Nutflanken eher weniger zu einer Abstützung oder Verklemmung und werden dadurch stärker an den Nutgrund gedrückt. Bei eckigen Nuten ist der Nutgrund am stärksten belastet, aber etwas gleichmäßiger an den Nutflanken als bei der Trapezform. Der runde Nutgrund hingegen verteilt den Druck am gleichmäßigsten zwischen dem Nutgrund und der Nutflanke. Allerdings ergibt sich ein Nachteil: die Drähte rutschen wie an der Nutflanke ihrer runden Form ab. (A_Kenge 2020)

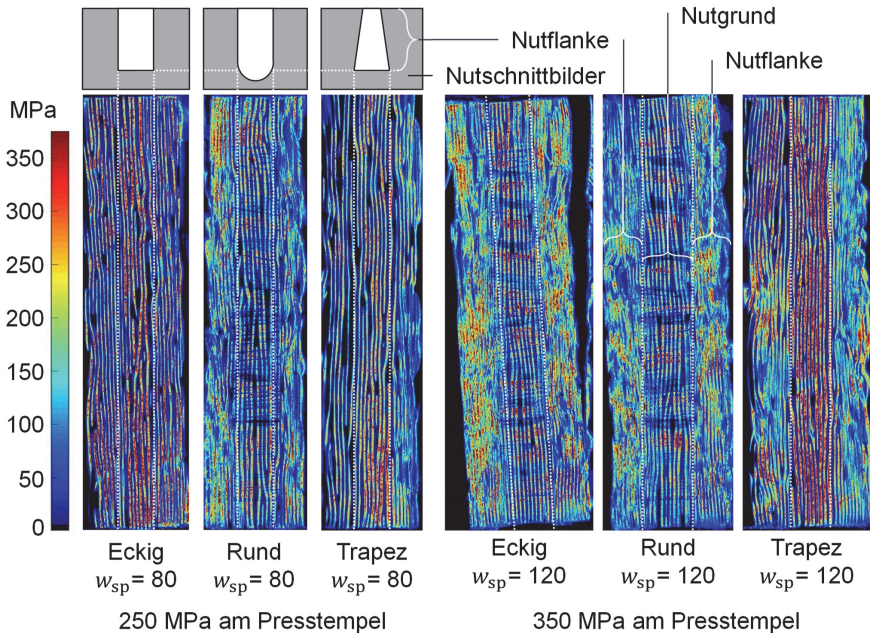


Abbildung 5-20: Aufnahme der ausgewerteten Druckmessfolien. Eckige, runde und trapezförmige Nutgeometrien mit jeweils 80 beziehungsweise 120 Windungen bei 250 beziehungsweise 350 MPa am Presstempel. Die mittigen Flächen liegen dabei am Nutgrund an, während links und rechts davon die Nutflanken anliegen. Die Druckmessfolien werden nach der Entnahme aus den Nuten zum Einscannen geglättet. (eigene Darstellung und Auswertung nach (A_Kenge 2020))

Aus der Versuchsreihe 1 kann für die Kompaktwicklung zusammengefasst werden, dass eine rechteckige Nut einen guten Kompromiss aus gleichmäßiger Druckverteilung und Fixierung der geordneten Drähte bietet.

5.2.4.2 Versuchsreihe 2: Untersuchung der NeWire-Nutgeometrie

In der **Versuchsreihe 2** wurde die Nutgeometrie des Stators des NeWire-Projektes verwendet, wie in Abbildung 5-17 auf der rechten Seite dargestellt. Dieser Aufbau untersucht eher den direkten Kompaktvorgang, in der die Wicklung in der Nut verpresst wird. Es wurde die Drahtanzahl, die wild in die Nut gewickelt wurde, erhöht und der Pressdruck (durch Messung der Presskraft) am Stempel ermittelt. Der Pressweg ist hierbei gleichbleibend. Die Idee hinter diesem Aufbau ist es

herauszufinden, ab welchem Füllgrad ein Wechsel von der Komprimierung zur Verpressung innerhalb des Kompaktiervorgangs stattfindet, und zwar am Beispiel einer realen Nutgeometrie. In Abbildung 5-21 ist zu sehen, dass der Pressdruck bis zu einer Windungszahl von 144 im Bereich von ~8 MPa bleibt. In diesem Bereich findet die Komprimierung statt. Ab 146 Windungen ist ein deutlicher Kraft- beziehungsweise Druckanstieg feststellbar, es findet die Verpressung der Wicklung statt. Die PDIV und RPDIV ist im Laufe der Wicklungszahlsteigerung stark schwankend. Die zugehörigen Fehlerbalken sind dabei sehr stark aufgeweitet, weshalb diese aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt sind. Die Teilentladungseinsetzspannung liegt – wie erwartet – stets unter der wiederholenden Teilentladungseinsetzspannung. Bei der Berechnung des linearen Trends ist eine Abnahme der Einsetzspannung um circa 10 % festzustellen. (A_Kengne 2020)

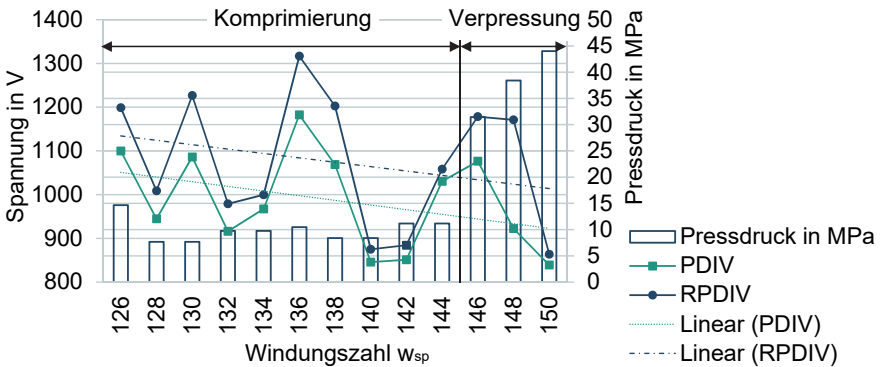


Abbildung 5-21: Darstellung der Messergebnisse der Teilentladungseinsetzspannung (PDIV) in V, der wiederholenden Teilentladungseinsetzspannung (RPDIV) in V und des resultierenden Pressdrucks am Stempel in MPa. (eigene Darstellung nach (A_Kengne 2020))

Bei den in Abbildung 5-22 aufgetragenen Messwerten des Widerstands über die Steigerung der Windungszahl ist ein linearer Anstieg zu beobachten. Dies erscheint aufgrund der ebenfalls linear steigenden Leitungslänge plausibel. Bei 126 und 144 Windungen sind zwei Ausreißer zu erkennen, die nicht unmittelbar erklärt werden können. Eine zufällige Abweichung der Messwerte des Widerstands ist jedoch beim wilden Wicklungsaufbau nicht auszuschließen. (A_Kengne 2020)

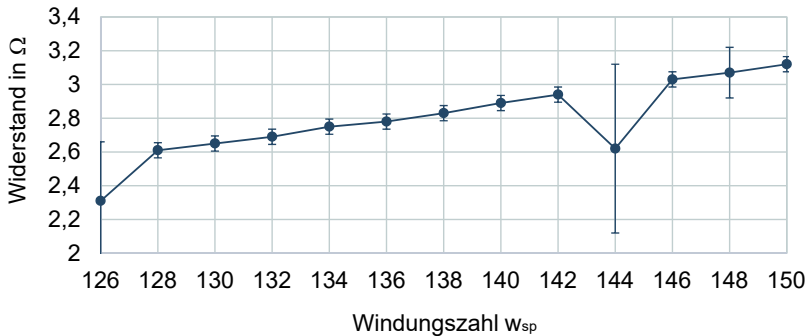


Abbildung 5-22: Gemessener Widerstand in Ω mit Standardabweichung der kompaktierten Spulen über steigende Windungszahl w_{sp} . (eigene Darstellung nach (A_Kengne 2020))

Für die Kompaktwicklung können aus der Versuchsreihe 2 zwei Erkenntnisse abgeleitet werden: Die formulierte These, dass sich die Kompaktierung aus der Komprimierung mit geringen und einer Verpressung mit hohen Presskräften zusammensetzt, konnte bestätigt werden. Dies gilt insbesondere für die hier vorliegenden wilden Wicklungen. Weiterhin sind die elektrischen Kenngrößen der PDIV, RPDIV und des Widerstands starken Schwankungen unterworfen, die weit über die Messungenauigkeiten hinaus gehen können.

5.2.4.3 Versuchsreihe 3: Einfluss von Drahtkreuzungen im Lagenaufbau

Wie bereits in Kapitel 4.1 als Hypothese formuliert, sind die Kreuzungen der Drähte vermutlich für die zufälligen Schwankungen der wilden Wicklung verantwortlich. Um den Einfluss der Drahtkreuzungen zu untersuchen, wurden in **Versuchsreihe 3** absichtlich Kreuzungen in die wilde Wicklung eingebracht. Es wurden mindestens²⁴ 0, 3, 6 und 9 Kreuzungen eingebracht, bei Windungszahlen von 20 und 30. Der Pressdruck am Stempel wurde in drei Faktorstufen mit 210 MPa, 310 MPa und 410 MPa angelegt. Die Modellnut hatte dabei stets eine eckige Geometrie. Über die gemittelten gemessenen Pressdrücke an den Nutflächen konnte keine statistische Signifikanz für den Einfluss der Kreuzungsanzahl festgestellt werden. Dies entspricht den Erwartungen, denn die resultierende Presskraft muss über die Nutflächen

²⁴ Aufgrund des wilden Wicklungsaufbaus ist das Vorhandensein von weiteren Kreuzungen nicht auszuschließen. Dennoch wurde versucht die Wicklung abgesehen von den Kreuzungen, möglichst geordnet zu erzeugen.

abgeführt werden, unabhängig von der Anzahl der Kreuzungen. Allerdings ist der Pressdruck in der Nähe der Kreuzungen deutlich inhomogener verteilt. Dies ist bei Betrachtung der ausgewerteten Druckmessfolien in Abbildung 5-23 deutlich zu erkennen. Zusätzlich ist ersichtlich, dass nicht nur Kreuzungen vorliegen, sondern auch das Abgleiten einzelner Drähte aus verschiedenen Lagen durch den Pressvorgang nicht immer verhindert werden kann. (A_Weber 2021)

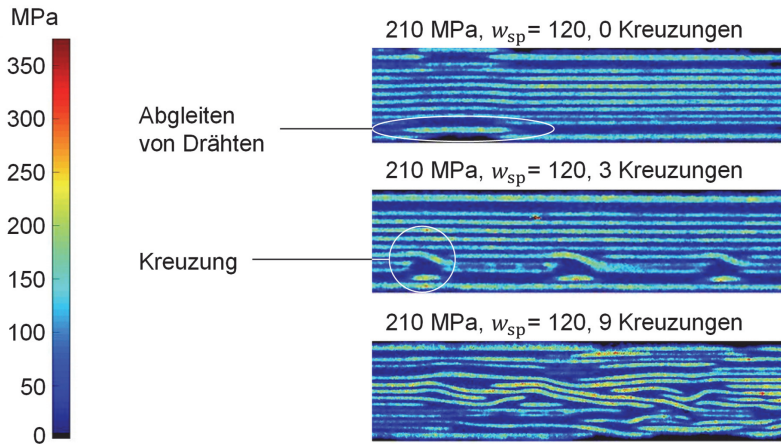


Abbildung 5-23: Ausgewertete Druckmessfolien beim Pressdruck von 210 MPa am Stempel und einer Windungszahl von 20 bei 0, 3 und 9 Kreuzungen. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021))

Aus den Messergebnissen des Widerstands (siehe Abbildung 5-24 links) ist ersichtlich, dass die Windungszahl und der Pressdruck einen signifikanten Einfluss auf den Widerstand haben. Dieser steigt konsequent bei größerer Windungszahl und höheren Pressdrücken. Die Kreuzungen haben dagegen keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Widerstand. (A_Weber 2021)

Auf die RPDIV (siehe Abbildung 5-24 rechts) hingegen hat die Kreuzungsanzahl einen statistisch signifikanten Einfluss, ebenso die Windungszahl. Bei steigender Windungszahl als auch bei steigender Kreuzungsanzahl sinkt die RPDIV. Ein Einfluss des Pressdrucks auf die RPDIV konnte im Rahmen dieser Versuchsreihe statistisch hingegen nicht signifikant nachgewiesen werden. (A_Weber 2021)

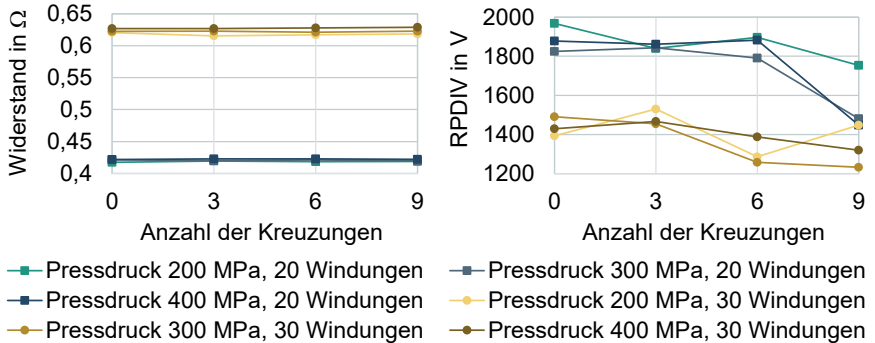


Abbildung 5-24: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 3. Links: Elektrischer Widerstand in Ω über die Mindestanzahl der eingebrachten Kreuzungen. Rechts: RPDIV in V über die Mindestanzahl der eingebrachten Kreuzungen. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021))

Für die Kompaktwicklung kann im Wege der Versuchsreihe 3 die angenommene Hypothese bestätigt werden, dass sich eine steigende Kreuzungsanzahl negativ auf die RPDIV auswirkt und eine inhomogenere Druckverteilung an den Flächen der Nut entsteht. Dies gilt folgerichtig auch für die Stempelfläche. Weiterhin nimmt der elektrische Widerstand bei steigender Presskraft zu.

5.2.4.4 Versuchsreihe 4: Untersuchung lagengenauer Aufbau ohne Fixierung

Innerhalb der **Versuchsreihe 4** wurde keine Spule mit der Linearwickelmaschine hergestellt, sondern einzelne Drähte wurden lagengenau in die eckige Nut eingelegt. Auch wurde dabei kein Backlack verwendet, eine Lage besteht weiterhin aus 7 Drähten. Infolge der aufgetrennten Spule konnten keine elektrischen Messungen durchgeführt werden. (A_Weber 2021)

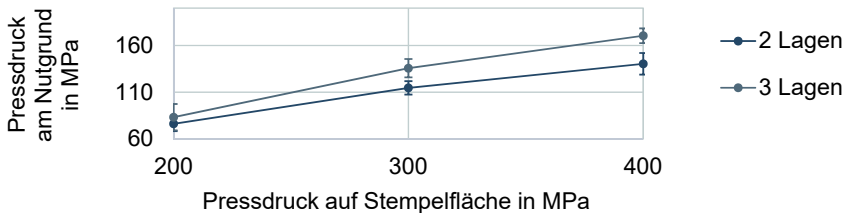


Abbildung 5-25: Darstellung des resultierenden Pressdrucks am Nutgrund über den angelegten Pressdruck am Stempel in MPa. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021))

Wie bereits in Versuchsreihe 1 festgestellt, nimmt der gemessene Druck an den Druckmessfolien signifikant an den Nutflächen zu. Dies ist deutlich in Abbildung 5-25 zu erkennen. Weiterhin ist der am Stempel anliegende Pressdruck, wie erwartet, eine signifikante Einflussgröße. Die Betrachtung der ausgewerteten Druckmessfolien lässt eine weitere Schlussfolgerung zu: Aufgrund des fehlenden Zusammenhalts und der geringen Reibung der zu Beginn lagengenau angeordneten Kupferlackdrähte weisen sämtliche ausgewertete Druckmessfolien vertauschte oder abgerutschte Drähte auf. Wenn zwei Drähte wechselseitig zueinander die Position in der Lage tauschen, entstehen Kreuzungen. In Abbildung 5-26 sind die Druckmessfolien dargestellt sowie eine Aufnahme der Verjüngungen der Drähte nach der Entnahme der Wicklung mit Kreuzungen. Tendenziell wirken sich sowohl die steigende Lagenanzahl als auch die steigende Presskraft begünstigend auf das Abrutschen der Drähte und die Bildung von Kreuzungen aus. Eine statistische Signifikanz konnte aber nicht nachgewiesen werden. (A_Weber 2021)

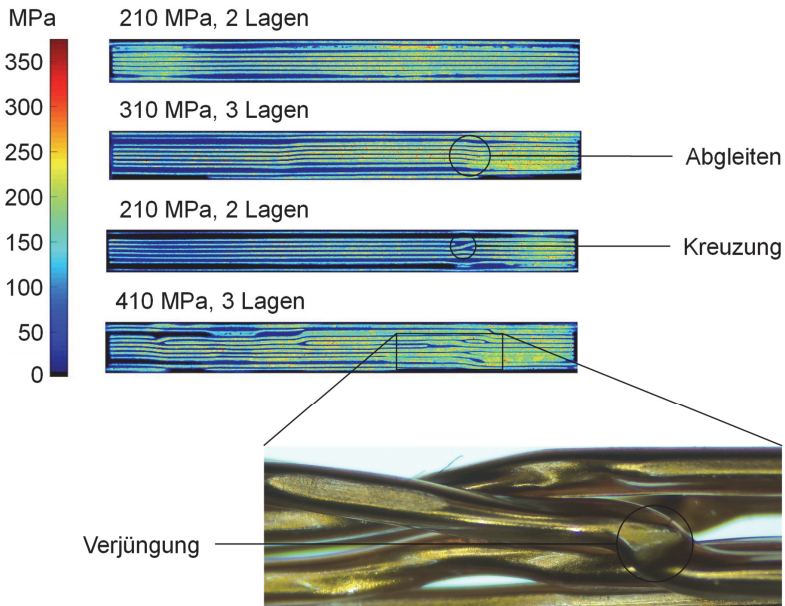


Abbildung 5-26: Auswertung der Druckmessfolien aus Versuchsreihe 4. Sortierung nach steigender Fehleranzahl. Ausschnitt einer Mikroskopaufnahme der Kupferlackdrähte nach Entnahme. Der am Stempel anliegende Pressdruck in MPa und die Lagenanzahl sind angegeben. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021))

Es kann für die Kompaktwicklung aus der Versuchsreihe 4 die Erkenntnis gewonnen werden, dass zu Beginn lagengenau angeordnete (unverbackene) Kupferlackdrähte beim Pressvorgang voneinander abgleiten und dadurch im ungünstigsten Fall Kreuzungen erzeugen. Diese weisen typischerweise Quetschungen auf, woraus Verjüngungen des Drahtquerschnittes entstehen. Eine steigende Lagenanzahl und steigender Pressdruck begünstigen dieses Verhalten.

5.2.4.5 Versuchsreihe 5: Untersuchung Kompaktspulen in Werkzeugversion A

In der **Versuchsreihe 5** wurden die gemäß Kapitel 5.1 hergestellten Spulen im in Abbildung 5-18 dargestellten Werkzeug der Version A kompaktiert. Die Spulen besitzen eine lagengenauere Anordnung der Drähte und sind miteinander durch Backlack verbunden. Damit soll das in Versuchsreihe 4 beobachtete Abgleiten der Drähte unterbunden werden. Es wurden die Faktoren Pressdruck und Lagenanzahl mit jeweils zwei Faktorstufen variiert. Für die Auswertung wurden der elektrische Widerstand und die RPDIV vor und nach der Kompaktierung gemessen (siehe Abbildung 5-27). Es wurden eine oder drei Teilspulen vermessen, eine Teilspule besteht dabei aus zwei Drahtreihen mit jeweils fünf Drähten, wie in Kapitel 4.1 unter Abbildung 4-2 dargestellt. (A_Claassen 2022)

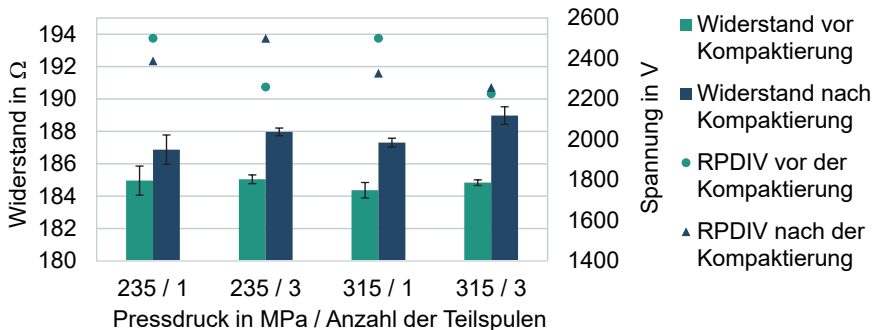


Abbildung 5-27: Darstellung der Messergebnisse aus Versuchsreihe 5. Elektrischer Widerstand in Ω und RPDIV in V über den Pressdruck in MPa und die Teilspulenanzahl. (eigene Darstellung nach (A_Claassen 2022))

Die Presskraft und die Teilspulenanzahl haben einen signifikanten Einfluss auf den elektrischen Widerstand. Dieser steigt infolge zunehmender Presskraft und Teilspulenanzahl. Bei der Widerstandsmessung für drei Teilspulen wurde jede Teilspule einzeln gemessen und der Mittelwert gebildet. Wie bereits in den

Simulationsstudien in Kapitel 5.2.2 gezeigt, könnte dieses Verhalten aufgrund der Formabweichungen durch die erhöhte Lagenanzahl verursacht werden. Bei der Messung der RPDIV wurde jede Spule einzeln vermessen. Durch die großen Standardabweichungen bei der RPDIV²⁵ ist keine Signifikanz der Presskraft oder der Teilspulenanzahl auf die RPDIV feststellbar. Dennoch war zu verzeichnen, dass bei allen Versuchen der niedrigste Wert der RPDIV bei 1772 V lag. Bei der Annahme einer Bemessungsspannung von 400 V ist damit ein Sicherheitsfaktor von nahezu 4,5 gegeben. (A_Claaseen 2022)

Weiterhin wurde die Druckverteilung am Nutgrund durch eingelegte Druckmessfolien aufgenommen. Ausschnitte der ausgewerteten Druckmessfolien je Faktorstufe sind in Abbildung 5-28 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Drähte keine Kreuzungen bilden und nicht abgleiten. Außerdem ist die Druckverteilung homogener als in den vorherigen Versuchswerkzeugen. Die homogenere Verteilung basiert aber sehr wahrscheinlich auf der genaueren Werkzeugführung durch Führungsbolzen und Messingbuchsen. (A_Claaseen 2022)

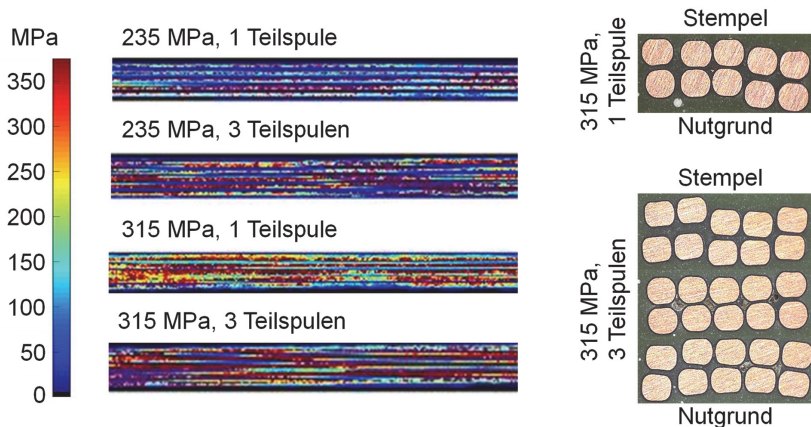


Abbildung 5-28: Darstellung von Ausschnitten der ausgewerteten Druckmessfolien (links) und Schliffproben der Teilspulen für eine Druckstufe von 315 MPa. (eigene Darstellung nach (A_Claaseen 2022))

²⁵ Aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in Darstellung Abbildung 5-27 mit Fehlerbalken dargestellt.

Zusätzlich wurden Schlifffproben der Wicklungen erstellt. Es ist erkennbar, dass bei der Verwendung von drei Teilspulen ein deutlicher Unterschied zwischen der oberen, mittleren und unteren Teilspule in der Geometrieabweichung festzustellen ist, weshalb in den folgenden Versuchsreihen jeweils nur eine einzelne Teilspule verwendet wird. Bei der Entnahme der Kompaktspulen in der Werkzeugversion A war jedoch festzustellen, dass aufgrund des nicht teilbaren Werkzeugs und der gefrästen Nutflächen – besonders bei hohen Pressdrücken von 315 MPa – eine beschädigungsfreie Entnahme der Spulen erschwert ist (A_Claassen 2022). In der Abbildung 5-18 ist dies auch am fehlenden Zusammenhalt der Drähte ersichtlich. Deshalb wurde bei Versuchsreihe 7 und 8 die Werkzeugversion B ergänzt.

Weiterhin ist festzustellen, dass kein weitergehender Mehrwert durch die Verwendung der Druckmessfolien für dieses Vorhaben zu erwarten ist, weshalb auf weitere Druckverteilungsmessungen verzichtet wurde.

Für die Kompaktwicklung konnte in der Versuchsreihe 5 nachgewiesen werden, dass das Verpressen von zuvor verbackenen körperlosen Spulen mit einem angefertigten Werkzeug zu einer Vermeidung von Drahtabgleitungen und -kreuzungen führt.

5.2.4.6 Versuchsreihe 6: Untersuchung wilder Wicklungen in Werkzeugversion A

In der **Versuchsreihe 6** wurde mit der Werkzeugversion A eine Vergleichsmessung zu Versuchsreihe 5 durchgeführt, um den Einfluss der Kompaktwicklung zur wilden Wicklung bei gleichbleibendem Werkzeug bewerten zu können.

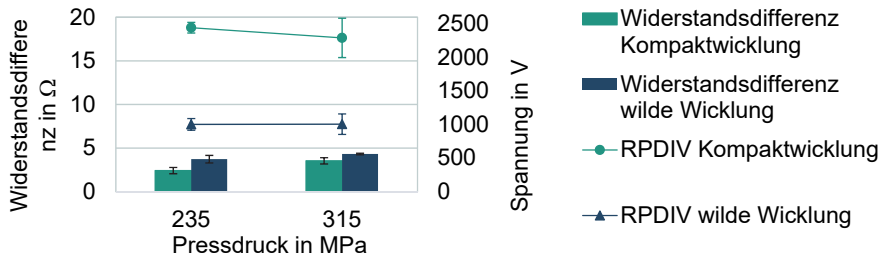


Abbildung 5-29: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 5 und 6. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse nach der Kompaktierung der wilden Wicklung und der Kompaktwicklung für die Widerstandsdifferenz in Ω und der RPDIV in V mit der Standardabweichung als Fehlerbalken.

Aus den gegenübergestellten Messergebnissen aus den Versuchsreihen der Kompaktwicklung und der wilden Wicklung konnte gefolgert werden, dass die Widerstandserhöhung nach dem Kompaktiervorgang bei der Kompaktwicklung signifikant geringer ist als bei der wilden Wicklung (Abbildung 5-29). Die RPDIV ist für die beiden Druckstufen bei der Kompaktwicklung signifikant erhöht.

Aus der Versuchsreihe 6 folgt, dass bei der Verwendung der geordneten und verbackenen Struktur der Kompaktwicklung deutlich bessere Eigenschaften der Spulen in Bezug auf den elektrischen Widerstand und die Teilentladungsfestigkeit erzielt werden können, als bei der wilden Wicklung in der sonst gleichen Spulen- und Werkzeugkonfiguration.

5.2.4.7 Versuchsreihe 7: Kompaktspulen mit überarbeiteter Werkzeugversion B

Die Werkzeugversion B mit der teilbaren Matrize und den geschliffenen Werkzeugoberflächen wurde in **Versuchsreihe 7** neben der Werkzeugversion A eingesetzt. Neben den Werkzeugversionen wurde auch der Faktor Pressdruck mit den Faktorstufen 235 MPa, 315 MPa und 395 MPa untersucht. Außerdem wurde in den drei durchgeführten Blöcken jede Faktorstufenkombination dreimal wiederholt. Somit wurde in dieser Versuchsreihe 7 eine sehr breite Datenbasis erzeugt. (A_Ouroulis 2022)

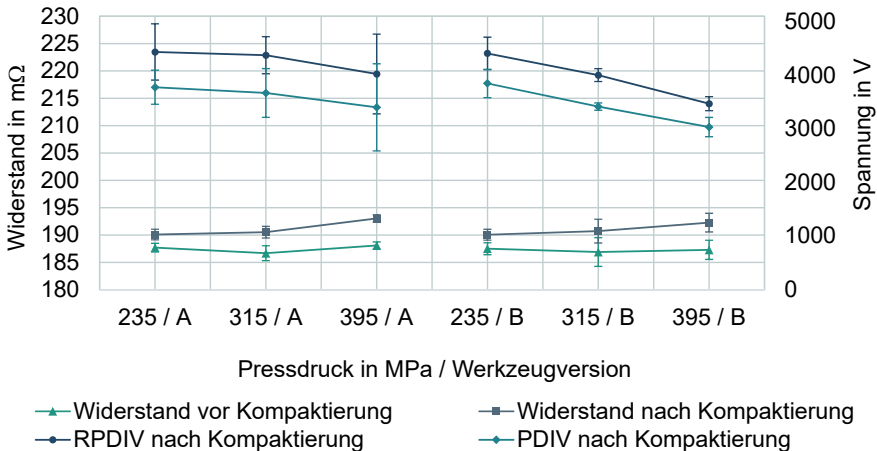


Abbildung 5-30: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 7. Widerstand vor und nach der Kompaktierung in mΩ, PDIV und RPDIV in V nach der Kompaktierung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Ouroulis 2022))

In Abbildung 5-30 sind die Messergebnisse der elektrischen Widerstände und Teilentladungsfestigkeiten dargestellt. Im Wesentlichen kann festgestellt werden, dass zwischen der Werkzeugversion A und B keine signifikanten Abweichungen der Mittelwerte festzustellen sind. Allerdings ist sowohl beim elektrischen Widerstand, als auch bei den Teilentladungseinsetzspannungen erkennbar, dass sich die Fehlerbalken der Standardabweichungen deutlich verkleinern. Somit bestätigt sich die Hypothese, dass Teilbarkeit und Oberflächengüte des neuen Presswerkzeugs einen Einfluss auf die entnommenen Teilspulen haben. Besonders bei hohen Pressdrücken kann die Anzahl der Lackschichtverletzungen reduziert werden. Diese These ließ sich durch die dreidimensionale Vermessung der entnommenen Spulen mittels des 3D-Scanners ATOS Q der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH untermauern, wie in Abbildung 5-31 gezeigt. (A_Ouroulis 2022)

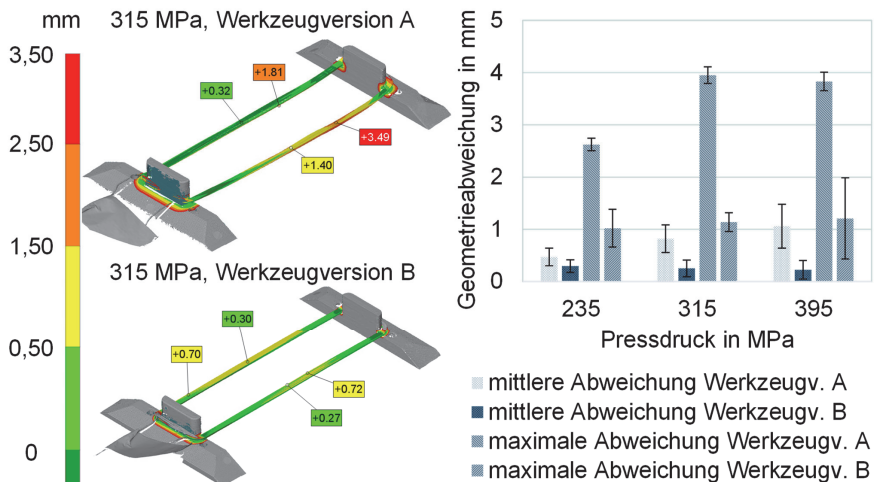


Abbildung 5-31: Darstellung der dreidimensional vermessenen Geometrieabweichungen in mm im Vergleich zum CAD-Modell der Spule (links) und den ausgewerteten Messdaten der gesamten Versuchsreihe 7 (rechts). (eigene Auswertung und Darstellung nach (A_Ouroulis 2022))

Auf einer eigens entwickelten und mittels Filament 3D-Druck (FDM) hergestellten Spulenaufnahme wurden die Teilspuln vermessen und eine deutlich geringere geometrische Formabweichung bei den in Werkzeugversion B verpressten Teilspuln aufgenommen (siehe Abbildung 5-31 links). Es wurden dabei die mittleren

geometrischen Formabweichungen und die maximalen geometrischen Formabweichungen mit dem CAD-Spulenmodell (verpresster Zustand) verglichen. Hierbei wurde je Spulenseite die mittlere und maximale Abweichung in mm gemessen. Als Auswertesoftware wurde die GOM Inspect Suite von der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH verwendet. (A_Ouroulis 2022) Aus der gesamten Ergebnisauswertung der Versuchsreihe 7 folgt, dass die mittleren Abweichungen der Geometrien durchschnittlich um etwa 70 % geringer sind. Die maximalen Abweichungen sind ebenfalls um circa 70 % geringer, allerdings ergibt sich mit einer durchschnittlich 2,35 mm geringeren maximalen Abweichung ein größerer absoluter Wert als bei der mittleren Abweichung. Dort beträgt der absolute Wert im Durchschnitt nur 0,5 mm.

Nach der dreidimensionalen Vermessung der Spulen wurden pro Faktorkombination einer Teilspule jeweils sechs Schliffproben erstellt. Diese wurden mit den in Abbildung 5-32 angegebenen Maßen vermessen.

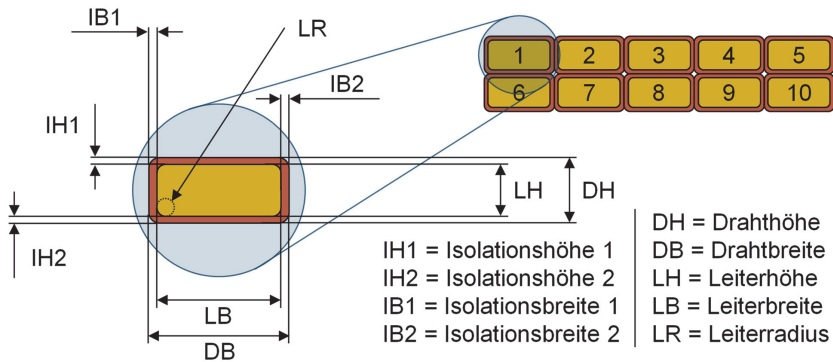


Abbildung 5-32: Schematische Schnittzeichnung der Kompaktproben mit Detailausschnitt der Isolationsmessstellen.

Die Auswertung der Leiterabmessungen ist in Abbildung 5-33 dargestellt. Die Werkzeugversion hat einen signifikanten Einfluss auf die Leiterbreite. Die Leiterbreite ist pro Draht bei der Werkzeugversion B im Durchschnitt etwa 28 µm größer. Daraus resultiert eine geringere Drahthöhe, durchschnittlich um etwa 9,5 µm geringer bei der Werkzeugversion B als bei der Werkzeugversion A. Dies kann zum einen mit der Werkzeugtrennung in der Werkzeugversion B begründet werden. Bei der Montage je Pressvorgang entstehen Toleranzen in der Nutbreite. Zum anderen ist die Nutgeometrie grundsätzlich mit Toleranzen behaftet, eine Abweichung von ±0,1 mm

wurde in der Fertigungszeichnung spezifiziert. Bei der Nutbreite der Werkzeugversion B konnte eine Verbreiterung um eben diese 0,1 mm gemessen werden. Folglich werden von den 28 μm der gesamten durchschnittlichen Drahtverbreiterung 20 μm pro Draht durch die Fertigungstoleranz der Nut verursacht und 8 μm durch die Werkzeugteilung.

In Bezug auf den resultierenden Kantenradius konnte keine Signifikanz der Werkzeugversion nachgewiesen werden. Es war allerdings die Tendenz zu erkennen, dass der Kantenradius bei steigendem Pressdruck abnimmt.

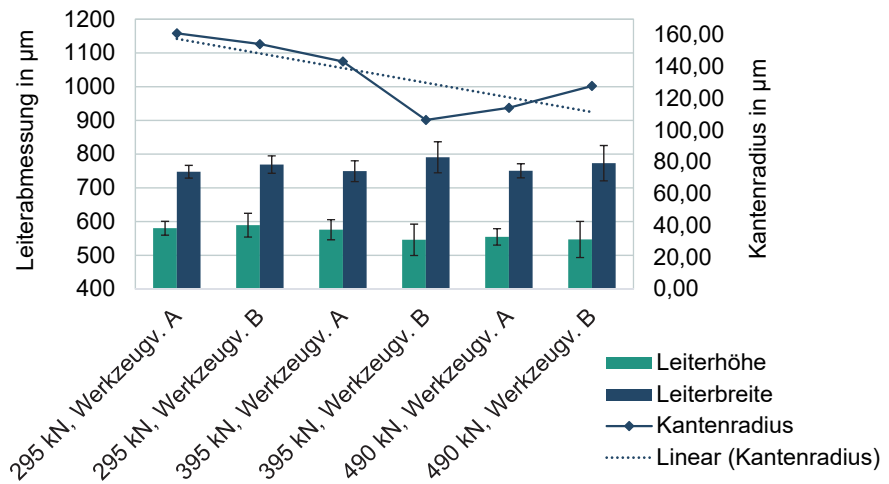


Abbildung 5-33: Messergebnisse der ausgewerteten Leiterabmessungen in μm (Leiterhöhe LH und Leiterbreite LB) und Kantenradien in μm über die sechs ausgewerteten Faktorkombinationen.

Entscheidend für die elektrischen Isolationseigenschaften – und damit die Funktionsfähigkeit einer Spule – ist die Einhaltung der vorgegebenen Isolationsschichtdicke. In Abbildung 5-34 sind mit den gestrichelten Linien die nach der Normreihe DIN EN 60317 (DIN EN 60317-0-1:2014-09) vorgegebenen minimalen und maximalen Isolationsschichtdicken angegeben. Die rot eingezeichnete Linie stellt den gemessenen Wert der Isolationsschichtdicke vor dem Pressvorgang dar. Die Balken geben die gemessenen Isolationsschichtdicken, -höhen und -breiten wieder. Die Isolationsschichtdicken sind dabei Mittelwerte aus den Breiten und Höhen. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Im Durchschnitt nimmt die Lackisolationsschichtdicke um 12,3 μm

durch die Verpressung ab. Würde eine Charge von Kupferlackdrähten verwendet, deren Isolationsdicke an der oberen Toleranzgrenze liegt, würden die Kompaktspulen die minimale Isolationsdicke nach der Kompaktierung erfüllen. Bei der Werkzeugversion und einem Pressdruck von 490 kN ist die Abnahme der Isolationsdicke mit etwa 9 µm sogar deutlich geringer als der Durchschnitt und liegt im Toleranzbereich der Normreihe DIN EN 60317 (DIN EN 60317-0-1:2014-09). Es kann nicht eindeutig geklärt werden, ob es sich um einen Messfehler handelt, weil die Schliffbilder immer nur einen Ausschnitt der Wicklung abbilden, oder ob ein systematischer Wirkmechanismus für dieses Verhalten vorliegt. Für detailliertere Aussagen dazu müsste die Grenzschicht zwischen Kupfer und Lackisolation genauer modelliert und es müssten auch die plastischen Materialeigenschaften der Lackisolationsschicht erarbeitet werden. Durch die spezielle Fertigungstechnik der Lackdrähte²⁶ ist das Fließverhalten der Isolation während der Verpressung nicht allein mit Materialkennwerten der Isolation beschreibbar. Nur durch die Betrachtung des Kupferlackdrahtes als Verbundwerkstoff ist eine hinreichend genaue Beschreibung möglich. (Vogt 2019; Kulan et al. 2016; Hofmann et al. 2018) Diese Betrachtung soll hier nicht vertieft werden.

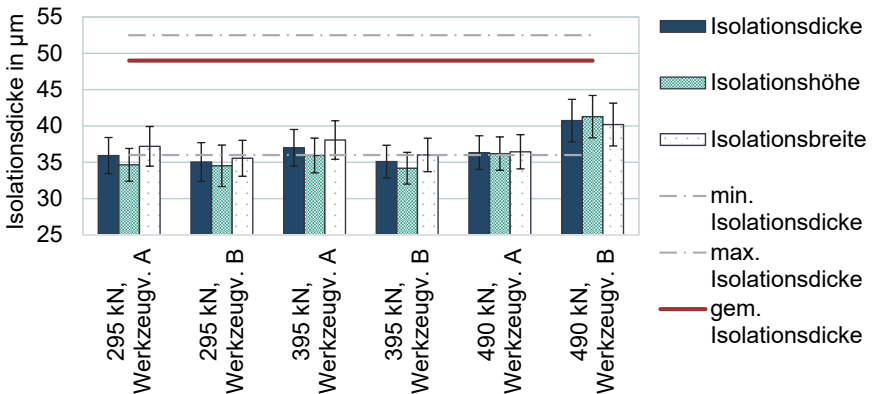


Abbildung 5-34: Auswertung der Isolationsdicke, der Isolationshöhe und -breite in µm über die drei angelegten Pressdrücke und die Werkzeugversionen A und B. Die Isolationsdicke beschreibt hierbei den Mittelwert aus Isolationsbreite und Isolationshöhe.

²⁶ Schichtweise Beschichtung mit anschließendem Verbacken der Drähte. (siehe Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016)

Eine Übersicht der erzeugten Querschnitte ist in Abbildung 5-35 für jede Faktorkombination gezeigt. Die beschriebenen Veränderungen der Leiterabmessungen sind zum Teil gut erkennbar.

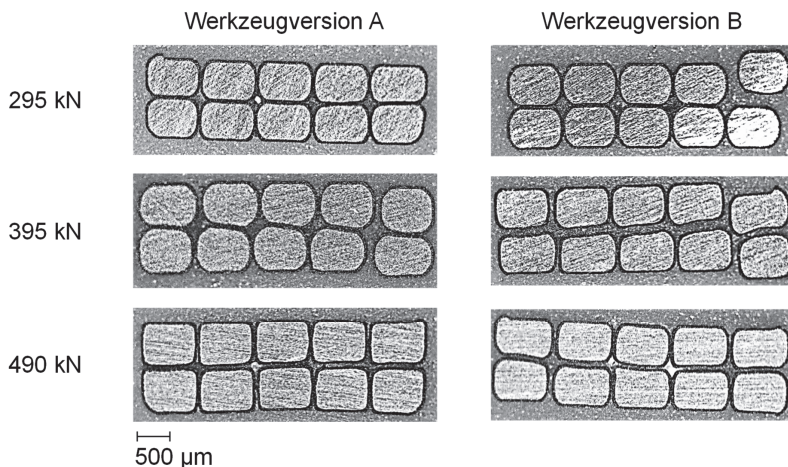


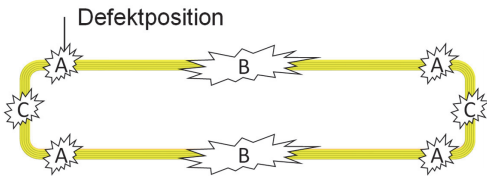
Abbildung 5-35: Darstellung eines Schlifffildes je angelegtem Pressdruck und Werkzeugversion. Die Abbildung zeigt Graustufen, zur besseren Kontrastierung der Lackisolationsschicht.

Die Versuchsreihe 7 beschäftigt sich maßgeblich mit der Erzeugung der Teilspulen für die Kompaktwicklung mit zwei verschiedenen Werkzeugversionen A und B. Die Werkzeugversion B mit polierten Nutflächen ist in Bezug auf die geometrische Spulenqualität zu bevorzugen. Auch sind die Standardabweichungen des elektrischen Widerstands und der Teilentladungsfestigkeiten reduziert, was bei der Fertigung der Spulen einen Vorteil bedeutet.

5.2.4.8 Versuchsreihe 8: Analyse der Lackbeschädigungen

Innerhalb der **Versuchsreihe 8** sind die Spulen aus Versuchsreihe 7 nach der Messung der RPDIV mittels eines Salzbadtests untersucht worden. Infolge dieser Messung ist davon auszugehen, dass die vermessenen Spulen Vorschädigungen in der Isolation aufweisen. Es wurden je Faktorkombinationsstufe zwei Teilspulen untersucht und die Wahrscheinlichkeiten der Defektposition berechnet, wie in Abbildung 5-36 dargestellt. Die häufigste Position der Defekte befindet sich in der

Position A. Hier läuft der Pressstempel aus und es ist ein Eindruck des Stempels im Übergang zum Wickelkopf erkennbar. Durch eine deutlich größere Rundung oder eine stumpfe Phase könnte diese verhindert werden. Weiterhin können Beschädigungen an den verpressten Spulenseiten auftreten, dies ist besonders bei hohen Pressdrücken in der Kombination mit Werkzeugversion B kritisch. Hier kommt es häufiger vor, dass die Drähte durch die Werkzeugeilung in die Spalten des Nutgrundes eingedrückt werden. Beschädigungen im Wickelkopf treten daneben nur sporadisch auf, hängen aber wahrscheinlich mit der Spulenserstellung und nicht dem Kompaktiervorgang zusammen. (A_Ouroulis 2022)



Position	Wahrscheinlichkeit*	
	Version A	Version B
A	95 %	92 %
B	2,5 %	5,5 %
C	2,5 %	2,5 %

Position A: Übergang des Presswerkzeugs
 Position B: Spulenseite (kompaktiert)
 Position C: Wickelkopfseite (nicht kompaktiert)

*der Defektposition bei auftretendem Defekt

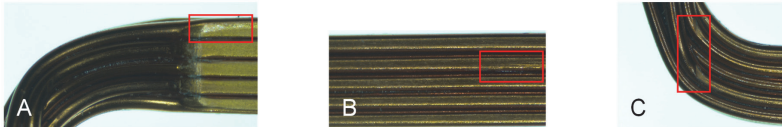


Abbildung 5-36: Darstellung der Defektpositionen anhand des Spulenmodells (oben links) und Wahrscheinlichkeit der Position eines Defektes (oben rechts). Mikroskopaufnahmen der realen Spulenseiten, markiert durch den roten Kasten (unten). (eigene Auswertung nach (A_Ouroulis 2022))

In der Versuchsreihe 8 konnte abschließend festgestellt werden, dass der Einlauf des Pressstempels einen kritischen Einfluss auf die Defektposition hat. Eine Geometrieangepassung ist deshalb erstrebenswert, um die starke Eindrückung der unverpressten Drähte des Wickelkopfes zu vermeiden.

5.2.5 Parameterraum der Einflussgrößen für die Wicklungskompaktierung

In der Tabelle 5-11 sind die signifikanten Einflussgrößen aus den simulativen und experimentellen Untersuchungen zusammengefasst und die empfehlenswerten Parameterbereiche angegeben.

Tabelle 5-11: Übersicht der in den acht Versuchsreihen erarbeiteten signifikanten Einflussgrößen auf die jeweiligen Eigenschaften und die empfehlenswerten Parameterbereiche.

Einflussgröße	Signifikanz auf Wicklungseigenschaften	empfehlenswerter Parameterraum
Pressdruck p_{Press}	Ja ^{1, 2, 3, 4}	350 – 400 MPa
Lagenaufbau	Ja ^{1, 2, 3, 4}	lagengenau
Kreuzungsanzahl	Ja ²	keine
Lackisolation	Ja ^{2, 4}	Grad 2B
Werkzeugart	Ja ^{3, 4}	teilbar & poliert
Nutgeometrie	Ja ³	eckig
Windungszahl	Ja ^{1, 3, 4}	gering
Teilspulenzahl	Ja ³	gering

1 = elektr. Widerstand; 2 = RPDIV, 3 = Druckverteilung / resultierende Geometrie, 4 = Isolationsschichtdicke.

Die wesentlichen Fehlerbilder bei der Kompaktierung der Kompaktwicklung, die aus den Erkenntnissen der Versuchsreihen 1 bis 8 resultieren, sind in der Abbildung 5-37 mit Hilfe einer Fehlzustandsbaumanalyse dargestellt. Die Schlißproben A, B und C sind den Fehlerbildern zugeordnet. Fehlerbild A ist eine nicht stabile Formspule, bei der zumeist der Backlack versagt. Häufig tritt dieser Fehler bei der Entnahme aus dem Presswerkzeug auf. Durch eine geringere Oberflächenrauheit und hoher Sauberkeit des Werkzeugs kann dieser Fehler vermieden werden. Auch die Werkzeugteilung wirkt sich positiv aus. Eine Abscherung des Isolationsmaterials durch Eindruck des Pressstempels in einen Kupferdraht kann durch eine Radiusverkleinerung der Stempelkanten und eine Reduktion der Stempelmaße reduziert werden. Dabei sollte die Hälfte des Kantenradius der Drähte angestrebt werden, um das Fehlerbild B vermeiden zu können. Ein Abrutschen der Drähte beschreibt Fehlerbild C. Wenn ein Zusammenhalt der Drähte vor dem Kompaktieren durch Backlack besteht, aber dennoch ein Abgleiten der Drähte vorliegt, ist die Fehlerursache zumeist ein nicht maßhaltiges Werkzeug oder eine nicht lagengenau aufgebaute Drahtanordnung. Dadurch formen sich die Drähte nicht in Rechtecke mit abgerundeten Kanten, sondern bilden schräge Tropfenformen aus.

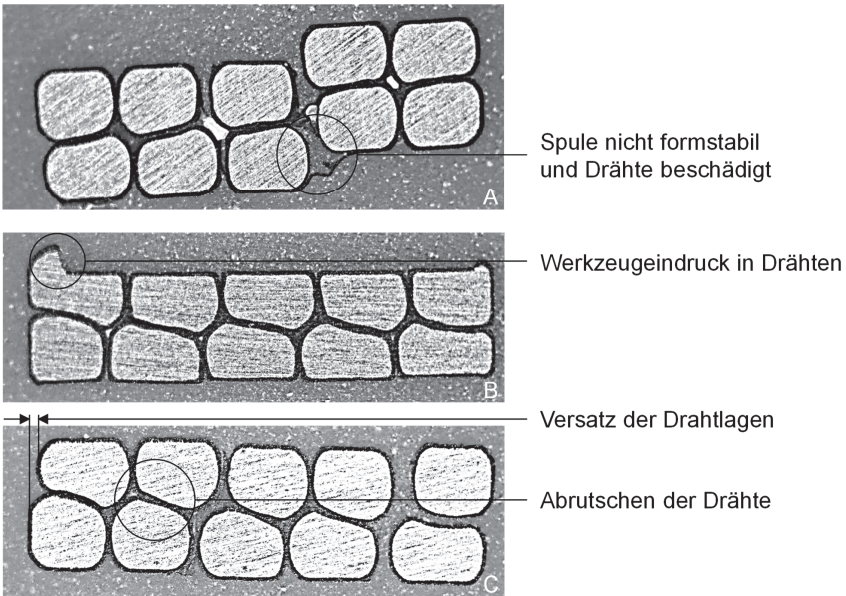
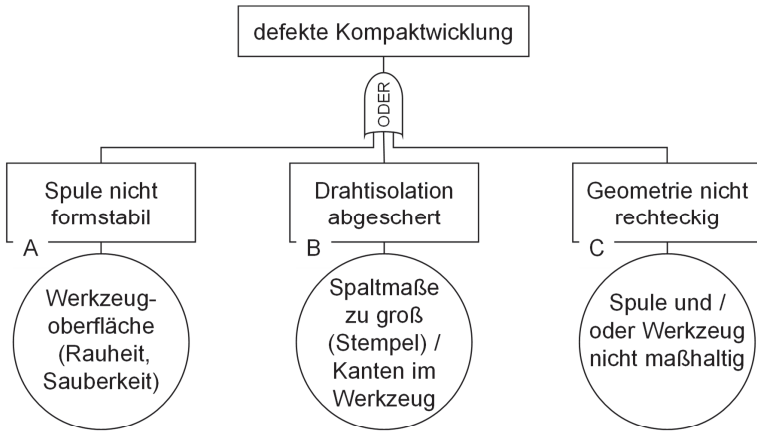


Abbildung 5-37: Darstellung der hauptsächlichsten Fehlerbilder der Kompaktwicklung. Übersicht in Fehlzustandsbaumanalyse nach DIN EN 61025 (DIN EN 61025:2007-08) für das Hauptereignis defekter Kompaktwicklungen (oben) mit dazugehörigen Schlißproben (unten).

6 Synthese zum automatisierten Gesamtsystem

Der in diesem Kapitel zugrunde gelegte Teil des Problemlösungszyklus zur Synthese (vgl. Kapitel 3) von Gesamtsystemen der Kompaktwicklungsherstellung, soll nunmehr detaillierter und methodisch erläutert werden. Diese Vorgehensweise wurde sowohl für den sequenziellen als auch den integralen Kompaktwickelprozess verfolgt. Für beide Ansätze wurden Versuchsträger umgesetzt, um ihre Machbarkeit nachzuweisen und um die Fertigungszeiten aufzunehmen. Die durchgeführten Versuche und daraus resultierenden Ist-Zeiten sind im anschließenden Kapitel 7.1 zu finden.

Der **sequenzielle Kompaktwickelprozess** basiert auf dem händischen Träufelwickelprozess, bei dem die Spulen nacheinander einzeln in den Stator eingelegt werden. Dabei sind die in Kapitel 5 verwendeten Geometrien, Werkzeuge und Apparaturen entwickelt und in den Versuchen genutzt worden. Aufgrund der parallel stattfindenden Analyse-Synthese wurden diese Versuchsträger gemäß der integrierten Produktentwicklung entwickelt und auch für die Untersuchungen von Kapitel 5 und Kapitel 6 genutzt. Die in den Kapiteln 5 und 6 erarbeiteten Parameter zur Erstellung der Kompaktspulen wurden berücksichtigt. Es wurde ein Versuchsstand mit automatisiert beweglichen Achsen und einem Steuerungskonzept umgesetzt.

Die Entwicklung des **integralen Kompaktwickelprozesses** wurde nicht als Versuchsträger für Kapitel 5 und 6 genutzt, sondern als ein seriennaher Lösungsvorschlag für die Herstellung von Statoren mit Kompaktwicklung vorgesehen. Dieser Ansatz basiert auf der zeiteffizienten Erzeugung und Einbringung von zusammenhängenden Wickelmatten. Dabei ist die Umsetzung einzelner Komponenten im Prototypenstadium umgesetzt, welche als Versuchsträger bezeichnet werden.

Die angewandte **Lösungssuche (II.)** für die beiden Ansätze des Kompaktwickelprozesses innerhalb des Problemlösungszyklus (siehe Kapitel 3) lässt sich in folgende Unterkategorien aufteilen (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 108):

- I. Aufgabe (Problemstellung) klären
- II. **Lösungen suchen und darstellen**
 - **vorhandene Lösungen suchen (Recherche)**
 - **neue Lösungen generieren (Kreativitätsmethoden)**
 - **Lösungen systematisieren (morphologischer Kasten)**
- III. Lösungen auswählen (ggf. verwirklichen)

Bevor auf die einzelnen Schritte der Lösungssuche eingegangen wird, ist zu beachten, dass die Bewertung in Kapitel 7 die Wicklung und das Gesamtsystem der Kompaktwicklung betrifft. Zur Bewertung der einzelnen Teilentwürfe in den jeweiligen Konzepten wurden die einzelnen Aktivitäten nach dem allgemeinen Modell der Produktentwicklung (VDI 2221 Blatt 1:2019-11) durchgeführt und zu einem Gesamtentwurf innerhalb der Synthese zusammengeführt. In den nachfolgenden zwei Unterkapiteln 6.1 und 6.2 sind die Ergebnisse der Produktentwicklung aufgeführt, die weiteren Ergebnisse lassen sich in den jeweils angegebenen Quellen in einem tieferen Detaillierungsgrad nachvollziehen.

Bevor mit der Lösungssuche begonnen werden kann, sind die Anforderungen aus der Problemstellung (vgl. hierzu Kapitel 3 und Kapitel 4) für die gesuchten Ansätze zu klären und zu präzisieren. Dafür wurden auch die in der Abbildung 6-1 dargestellten Hauptmerkmale der Anforderungen als Orientierung angewandt, um eine möglichst umfassende Anforderungsliste erstellen zu können. Daraus resultieren die Anforderungen, die das entwickelte Konzept erfüllen soll. Daran anschließend ist es sinnvoll, die Teilfunktionen der angestrebten Konzepte zu ermitteln und ein Funktionsmodell zu erstellen.

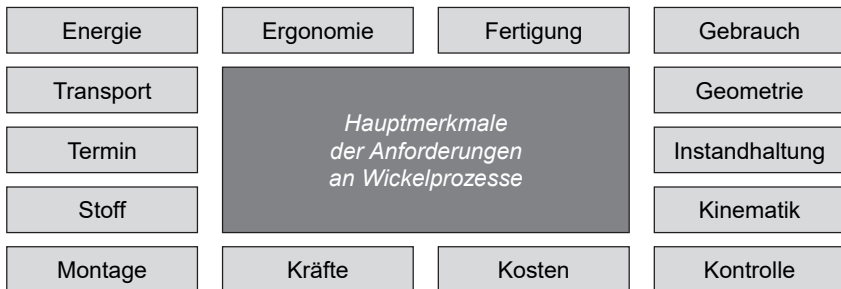


Abbildung 6-1: Übersicht der Hauptmerkmale der Anforderungen an Wickelprozesse. (eigene Darstellung nach (Winter et al. 2021, S. 28))

Sobald das Funktionsmodell vorliegt, kann mit der eigentlichen **Lösungssuche (II.)** begonnen werden. Im nachfolgenden Kontext der Unterkapitel werden die Teillösungskonzepte, die die Teilfunktionen des Funktionsmodells erfüllen, als Baugruppen bezeichnet. Prinzipiell können durch die Bildung von Analogien bekannter Konzepte Lösungen für das vorliegende Problem generiert werden. Hierzu ist eine Recherchearbeit in Patenten, wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder sonstiger

Fachliteratur notwendig. Bei der Entwicklung neuer Lösungen ist es sinnvoll, bekannte und etablierte Kreativitätsmethoden einzusetzen, um möglichst viele neue Ideen systematisch entwickeln zu können. In diesem Vorhaben wurden insbesondere das Brainstorming, Brainwriting und die 6-3-5 Methode angewandt (siehe Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, Kap. 7.5.4). Nachdem im Ideenfindungsprozess für die einzelnen Teilfunktionen Lösungskonzepte gefunden wurden, diente der morphologische Kasten (siehe Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, Kap. 7.5.6) der Kombination von Teillösungskonzepten zu Gesamtkonzepten. In Anhang G ist hierzu ein beispielhafter morphologischer Kasten enthalten. Zur Reduktion der Lösungsmöglichkeiten ist es zum einen ratsam, die Teilfunktionen auf Machbarkeit zu untersuchen und zum anderen keine Gesamtkonzepte zu erstellen, bei denen die Kombination der Teillösungen auf einen Widerspruch stößt. Im Anschluss an die Untersuchung der Teilfunktionen können die gefundenen Anforderungen als Bewertungskriterien verwendet und in einem paarweisen Vergleich (siehe Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 645) wechselseitig gewichtet werden. Die Konzepte werden anschließend anhand der Nutzwertanalyse (vgl. VDI 2225 Blatt 3:1998-11) und gewichteter Bewertungskriterien ausgewählt. Das jeweils bestbewertete Konzept für den sequenziellen und integralen Kompaktwickelprozess ist in den beiden folgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.1 Sequenzieller Kompaktwickelprozess

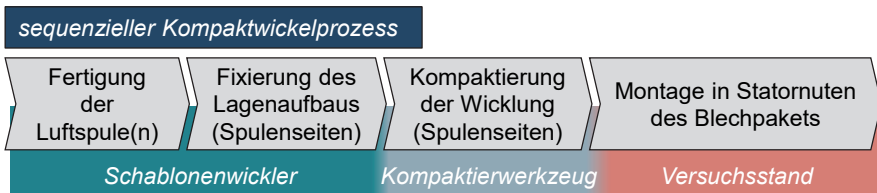


Abbildung 6-2: Übersicht des sequenziellen Kompaktwickelprozesses der drei Baugruppen zur Erfüllung der Teilfunktionen. Zuordnung der vier Teilfunktionen zu den Baugruppen des Schablonenwicklers, des Kompaktierwerkzeugs und des Versuchsstands.

Für die Analyse und Entwicklung der einzelnen Prozessschritte wurden Komponenten des sequenziellen Kompaktwickelprozesses eingesetzt, wie beispielsweise die bereits gezeigten Presswerkzeuge. Die aus Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Entwicklung und dem Aufbau des Versuchsstands berücksichtigt. Dieser wurde zur Untersuchung der automatisierten Herstellung der Kompaktwicklung am wbk Institut für Produktionstechnik aufgebaut. Der sequenzielle Kompaktwickelprozess (siehe Abbildung 6-2) ist ein indirekter Wickelprozess. Die Entwicklung und Ideenfindung wurde von der händischen Träufelwickeltechnik (siehe Kapitel 2.3.3) abgeleitet. Eine entscheidende Ausprägung des Merkmals Nutgeometrie des Statorblechpaketes ist beim Träufelwickelverfahren die Verwendung von Zahnköpfen. Durch die Zahnköpfe ist der Nutschlitz kleiner als die eigentliche Nutbreite. Diese Merkmalsausprägung soll auch bei dem sequenziellen Kompaktwickelprozess ermöglicht werden.

Der sequenzielle Kompaktwickelprozess setzt sich aus vier Prozessschritten, nämlich Fertigung der Luftspule(n), Fixierung des Lagenaufbaus, Kompaktierung der Wicklung und Montage in den Statornuten des Blechpakets zusammen (Abbildung 6-2). Die Fixierung und Kompaktierung bezieht sich hierbei auf die beiden Spulenseiten der jeweiligen Luftspule. Für die Ausführung dieser vier Prozessschritte sind die drei Baugruppen Schablonenwickler, Presswerkzeug und Versuchsstand notwendig, weil der Schablonenwickler die Fertigung der Luftspulen und deren Fixierung übernehmen kann. Die Kompaktierung der fixierten Spulen findet mit Hilfe des Kompaktierwerkzeugs statt, wobei dies im automatisierten Fall der Wickelschablone entspricht. Durch Übergabe der Wickelschablone in den Versuchsstand können die erzeugten Kompaktspulen in die Statornuten des Blechpakets montiert werden.

6.1.1 Schablonenwickler

Abgeleitet aus der Übersicht der Hauptmerkmale der Anforderungen (siehe Abbildung 6-1) ist die in Tabelle 6-1 dargestellte Anforderungsliste für die Baugruppe des Schablonenwicklers erstellt worden. Hierbei sind die Anforderungen als Forderung und Wunsch klassifiziert. Eine Forderung ist eine Mindestanforderung, wenn deren Verfehlung bereits zu einem Ausschluss des Lösungskonzeptes führen kann. Wünsche hingegen sind keine harten Ausschlusskriterien im Entwicklungsprozess, deren Erfüllung sich allerdings positiv auf die Bewertung auswirkt. Dies gilt für alle folgenden Anforderungslisten in gleichem Umfang.

Der Schablonenwickler wurde von der Aumann Espelkamp GmbH im Rahmen des Projektes NeWwire konstruiert und gefertigt. Am wbk Institut für Produktionstechnik wurde dieser im Anschluss aufgebaut und automatisiert (siehe Winter et al. 2021).

Tabelle 6-1: Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung des Schablonenwicklers. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Karaoglan 2019; Winter et al. 2021))

(W)/(F)*	Hauptmerkmal	Anforderungsbeschreibung	Quantifizierung
W	Energie	elektrisch	≤ 400 V
W	Energie	pneumatisch	≤ 7 bar
F	Ergonomie	Zugänglichkeit	Spulen, Wickelschablone
W	Fertigung	Fertigungsverfahren	spanend, zugekauft
W	Gebrauch	Verschleiß	wartungsarm
F	Gebrauch	Steuerung	teil- / vollautomatisch
F	Gebrauch	Sicherheit	Schutzumhausung
F	Geometrie	Versuchsstand	<i>siehe Kapitel 6.1.3</i>
W	Instandhaltung	Wartungsintervall	lebensdauer-Schmierung
F	Kinematik	Übergabe Wickelschablone	<i>siehe Kapitel 6.1.3</i>
F	Kinematik	Wickelspindel	Rotation der Schablone
F	Kinematik	Drahtführung	Verdrillung der Drähte am Wickelkopf
W	Kontrolle	Wickelbild	Schliffproben
W	Kontrolle	Maßhaltigkeit	Spulenseiten $< 0,5$ mm
W	Kontrolle	Schleif MTC 2	Widerstand, Isolation
W	Kosten	Material	gering
W	Kosten	Fertigung	gering
F	Kräfte	Drahtzug	ungeregelt
F	Montage	Zusammenhalt	Backlackdraht aktivieren
W	Stoff	Werkstoffe	Kunststoff, Aluminium, Stahl

*(W) = Wunsch; (F) = Forderung

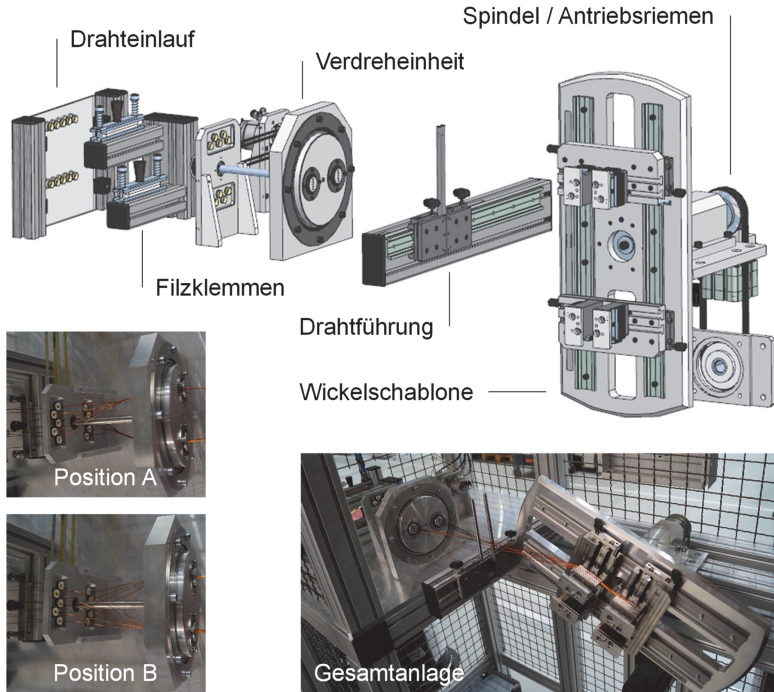


Abbildung 6-3: Darstellung des aufgebauten Schablonenwicklers der Aumann Espelkamp GmbH am wbk Institut für Produktionstechnik (Standort Forschungsfabrik) mit schematischer Seitenansicht (oben) und Aufnahmen der Umsetzung (unten).

Die Drähte werden aus den Drahtfässern abgezogen und werden durch den aus Keramikdüsen bestehenden Drahteinlauf in den Schablonenwickler geführt. Es folgt die Führung durch Filzklemmen. Die Filzklemmen bewirken einen geringen Drahtzug und richten die Drähte zusätzlich. Anschließend folgt die Verdreheinheit, wie in der oberen Hälfte der Abbildung 6-3 dargestellt. Diese besitzt eine drehbar gelagerte Scheibe mit zwei ebenfalls drehbar gelagerten Einlässen. Je Einlass sind fünf Drahtdüsen montiert. Durch eine pneumatisch aktuierte Zahnradmechanik können sowohl die beiden Düsen einlässe als auch die gesamte Scheibe unabhängig voneinander gedreht werden und verschiedene Drahtverdrillungen ermöglicht werden (siehe Abbildung 6-3 unten links). Es kann damit unter anderem die in Kapitel 4.1 geforderte Lagenverdrillung erzeugt werden. (vgl. Winter et al. 2021) Die Automation des Schablonenwicklers wurde

am wbk Institut für Produktionstechnik vorgenommen (vgl. auch A_Karaoglan 2019, A_Faggion 2021). Hierbei wurde eine SPS (Bosch XM 21) verwendet und mittels OPC UA eine Schnittstelle zu einer eigenen Bedienoberfläche (GUI) geschaffen. Der entsprechende Schaltschrankaufbau ist in Anhang H gezeigt.

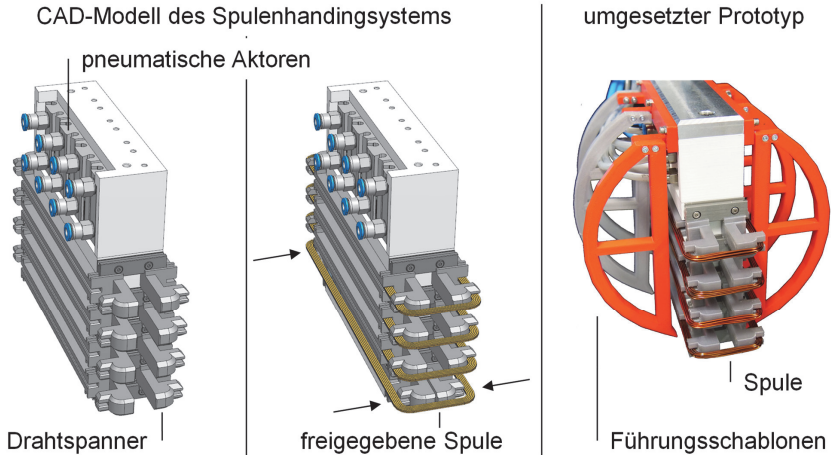


Abbildung 6-4: Darstellung des Spulenshandlingsystems (Kombination aus Wickelschablone und Einbringeinheit). CAD-Modell des Spulenshandlingsystems mit ausgefahrenen Drahtspannern in Ausgangsstellung (links), CAD-Modell mit aufgenommenen Kompaktspulen mit schematischer Darstellung der Freigabe der untersten Kompaktspule (Mitte) und Darstellung des umgesetzten Prototyps mit aufgenommenen Spulen und montierten Führungsschablonen (rechts). (eigene Darstellung nach (A_Ambis 2020))

Die Wickelschablone ist der Wickelkörper der die Luftspule aufnimmt, beziehungsweise während des Wickelvorgangs formt. Prinzipiell ist das Spulenshandlingsystem (siehe Abbildung 6-4) als Wickelschablone für den Schablonenwickler konzipiert, erfüllt allerdings auch die Aufgabe der Einbringvorrichtung innerhalb des Versuchstandes des sequenziellen Kompaktwickelns (siehe Kapitel 6.1.3). Bei einer Verkettung (voll- oder teilautomatisiert) der Prozessschritte wird folglich das Spulenshandlingsystem als Wickelschablone, Presswerkzeug und Einbringeinheit genutzt. Aufgrund des hohen konstruktiven Aufwands wurde das Spulenshandlingsystem nur als Einbringeinheit im Versuchsstand umgesetzt. In der Funktion als Wickelschablone wird die Wicklung auf das Spulenshandlingsystem gewickelt. Entlang der langen genuteten Seiten der Drahtspanner liegen die Spulenseiten und ihre Länge entspricht der Statorlänge. Die

Nuten ermöglichen darüber hinaus im Anschluss an den Wickelvorgang die geordnete Fixierung, den Verbackvorgang und den Kompaktierschritt. Die kurzen Seiten nehmen den Wickelkopfbereich auf. Die Länge des Wickelkopfes ist auf dem Spulenhändlingsystem länger als in der Einbaulage im Stator, weil die Nuten radial voneinander weg zeigen und dementsprechend ein Längenausgleich innerhalb des flexiblen Wickelkopfes stattfinden muss. Jede der vier Drahtspannerebenen kann durch einzelne pneumatische Aktoren angesteuert und zusammengefahren werden (siehe Abbildung 6-4 Mitte). Zwei gegenüberliegende Drahtspanner können gegengleich auseinander- und zusammengefahren werden. Im drucklosen Ausgangszustand sind die Drahtspanner auseinandergefahren und halten die Kompaktspulen fest. Durch Druckbeaufschlagung der Aktoren wird im inneren eine mechanische Entriegelung betätigt, welche die Drahtspanner nach Innen bewegt. Die jeweilige Kompaktspule liegt frei.

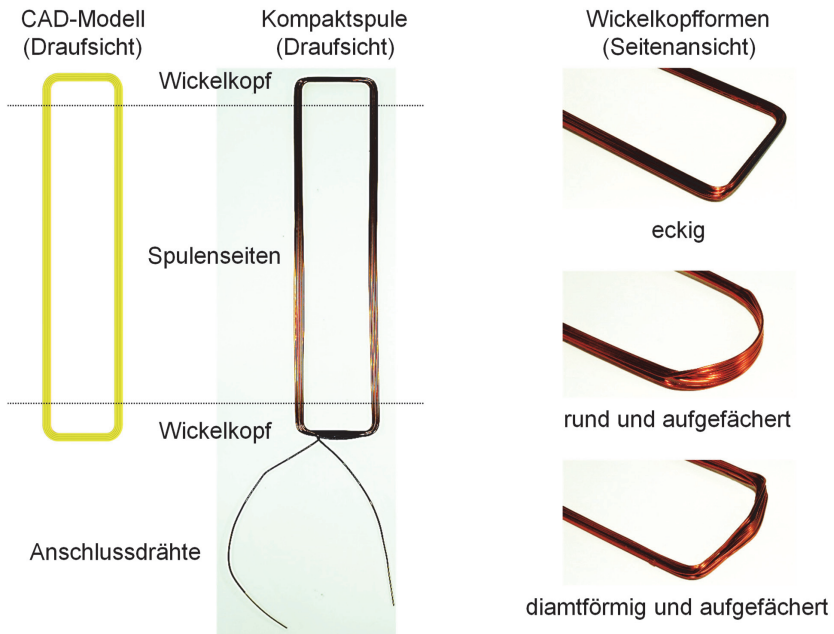


Abbildung 6-5: Darstellung der Kompaktspulen. Draufsicht des CAD-Modells (links), Draufsicht der hergestellten Kompaktspulen (Mitte) und Seitenansicht der drei verschiedener Wickelkopfgeometrien (rechts). (eigene Darstellung nach (A_Scholz 2021))

Um den Längenausgleich und die Flexibilität des Wickelkopfes zu ermöglichen, wurden, wie in Abbildung 6-5 dargestellt, verschiedene Wickelkopfformen hergestellt (vgl. (A_Scholz 2021)). Die aufgefächerten Varianten sind von Beginn an nicht verbacken und flexibel, die runde und die diamantförmige Geometrie ermöglichen außerdem einen größeren Längenausgleich. Die Umsetzung erfolgt durch verschiedene Ausformungen der Drahtspanner im Wickelkopfbereich.

6.1.2 Kompaktierwerkzeug

Abgeleitet aus der Übersicht der Hauptmerkmale der Anforderungen (siehe Abbildung 6-1) ist die in Anhang I dargestellte Anforderungsliste für die Baugruppe des Kompaktierwerkzeugs erstellt worden. Die weitere Beschreibung der entwickelten Werkzeuge mit den Versionen A und B ist bereits in Kapitel 5.2.3 beschrieben und dargestellt worden. Diese Werkzeuge haben hauptsächlich die Aufgabe die Versuchsspulen zu kompaktieren und mit der vorhandenen hydraulischen Werkstattpresse RODCRAFT WP50P verwendet werden zu können.

Bei einer vollautomatisierten Lösung müsste die Kompaktierfunktion in die Wickelschablone integriert werden, sodass diese als Schablone bei dem Wickelvorgang, Kompaktierwerkzeug und Spulenhändlungssystem im Versuchsstand genutzt werden kann. Infolge der Nutzung von bei Werkzeugmaschinen üblichen Schnittstellen erscheint dies möglich. Aufgrund der hohen Komplexität und der begrenzten Ressourcen, konnte das im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht umgesetzt werden.

6.1.3 Versuchsstand

Abgeleitet aus der Übersicht der Hauptmerkmale für die Anforderungen (siehe Abbildung 6-1) ist die in Anhang J dargestellte Anforderungsliste für die Baugruppe des Versuchsstands erstellt worden. Mit dem Versuchsstand sollen die hergestellten und verpressten Teilspulen, in diesem Zusammenhang auch als Kompaktspulen bezeichnet, eingebracht werden. Da die Teilspulen in den Stator sequenziell eingebracht werden, ist nur die Herstellung von Wicklungen ohne Lagenwechsel möglich. Dementsprechend soll der Versuchsstand die Einbringung der Spulen innerhalb des sequenziellen Kompaktwickelprozesses abbilden.

Zu Beginn der Konzeptfindung wurden verschiedene Ideen zur Einbringung von Teilspulen in Statorblechpakete mit Vollblechschnitt und ausgeformten Zahnköpfen

gesucht. Die Ideen wurden in verschiedenen Kreativitätsworkshops entwickelt, anschließend gesammelt und durch den morphologischen Kasten strukturiert. Die Konzepte können in fünf Übergruppen aufgeteilt werden (Winter et al. 2021, S. 52 f.). Diese fünf Übergruppen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art der Montage der Spulen im Stator und bilden den händischen Träufelprozess mit Hilfe von mechanisierten Maschinenelementen ab. Es wurde die Einbringung der Spulen durch Drahtbündelmontage (A_Buckpesch 2018; A_Flaum 2018), Drahtlagenmontage (A_Kroll 2018; A_Amb 2020; A_Scholz 2021), Fördererlemente (A_Marsetz 2018, A_Gardiewski 2019), peristaltische Greifer (A_Amb 2018) oder eine Kombination aus Trichtern mit Zahnradelementen (A_Baier 2018) als Übergruppen gebildet. Nach einer Ausarbeitung von Grobkonzepten²⁷, wurden Konzeptauswahl und Bewertung nach VDI 2225 durchgeführt (VDI 2225 Blatt 3:1998-11). Es wurde die Drahtlagenmontage ausgewählt, die in Abbildung 6-6 dargestellt ist und im Weiteren näher vorgestellt wird.

Bei der Drahtlagenmontage werden die beiden Spulenseiten der Kompaktspulen in die Statornut eingebracht, wie schematisch in der unteren Bildsequenz von Abbildung 6-6 dargestellt. Zwei Drahtspanner fixieren dabei eine Kompaktspule. In der Abbildung 6-6 oben ist die CAD-Konstruktion des Versuchsstandes zur Drahtlagenmontage und der entsprechende Ablauf mittels Spulenhändlingsystem, Greifer und Stator gezeigt. Wie bereits zu Beginn des Kapitels 6 beschrieben, wurde der Einbringvorgang dem händischen Träufelwickelverfahren nachempfunden. Vier Kompaktspulen können je Spulenhändlingsystem in den Stator eingebracht werden. Diese werden gemäß Kapitel 5 hergestellt und bestehen aus zehn Drähten. Wenn das mit vier Kompaktspulen bestückte Spulenhändlingsystem in die Statorbohrung gefahren ist, umschließen Greifer die Spulenseiten und die Führungen des Spulenhändlingsystems geben die Spulenseiten frei (1). Dabei sind je Kompaktspule vier Greiferpaare im Einsatz, denn die beiden Abbildungen zeigen mit zwei Greiferpaaren nur eine Statorseite. Auf der Rückseite findet der Vorgang zeitgleich gespiegelt statt. Um das Einbringen in den verengten Nutschlitz zu ermöglichen, werden die Greifer um 90° verdreht und anschließend in die Nut eingebracht (2). Im letzten Schritt (3) werden die Greifer und somit die Spulenseiten in den Winkel des Nutgrundes gedreht (siehe (3) Abbildung 6-6) und abgelegt. Im Anschluss werden die Greiferpaare auseinandergefahren und der Vorgang wiederholt sich mit der nächsten Kompaktspule.

²⁷ Nachzuschlagen in den jeweils angegebenen Quellen.

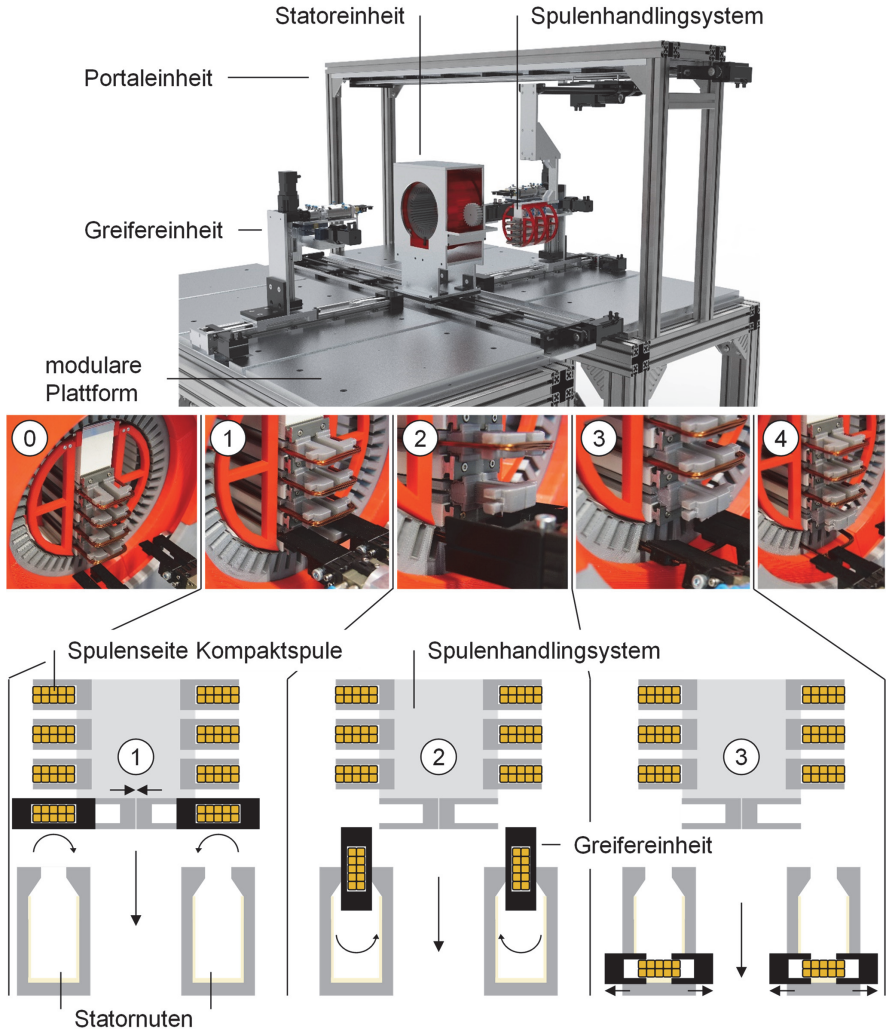


Abbildung 6-6: CAD-Modell (oberes Bild) der Umsetzung der Drahtlagenmontage. Versuchsstand, bestehend aus modularen Plattformen, der Statoreinheit, der Portaleinheit mit montiertem Spulenhandlingsystem und den beiden Greifereinheiten zur Montage der Teilspulen. Abbildung der fünf Schritte der Drahtlagenmontage (mittlere Bildsequenz) und schematische Schnittdarstellung der Drahtlagenmontage (untere Bildsequenz). (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Amb 2020, Halwas et al. 2020a))

Wenn alle vier Kompaktspulen im Stator abgelegt sind, fährt das Spulenhandlingsystem aus dem Stator, wird neu bestückt (bewickelt) und die Drahtlagenmontage wird so oft wiederholt, bis die vollständige Wicklung montiert ist. Im vorliegenden Fall besteht ein Stator aus insgesamt 192 Kompaktspulen, sodass das Spulenhandlingsystem 48-mal in die Statorbohrung ein- und ausfahren muss.

Parallel zur Entwicklung der Versuchsstandsmechanik wurde auch ein umfangreiches Steuerungskonzept aufgebaut, wie in Abbildung 6-7 dargestellt (A_Karaoglan; A_Faggion 2021). Dies umfasst neben dem Versuchsstand auch den Schablonenwickler. Bei der Entwicklung wurde eine möglichst einfache und erweiterbare Steuerungsarchitektur gewählt. Als Kernelement wurde eine Bosch XM 21 SPS ausgewählt. Diese verfügt über eine OPC UA Schnittstelle, sodass über einen PC oder Mikrocontroller, wie einen Rasperry PI, eine Bedienoberfläche (GUI) per HTML genutzt werden kann. Über diese GUI wird die gesamte Anlage gesteuert, siehe Bedienterminal Abbildung 6-8. (Halwas et al. 2020a)

Die SPS kommuniziert auf zwei Arten mit den Motoren, Aktoren und Sensoren. Über das Bussystem Sercos III werden sowohl der Umrichter für den Schablonenwickler, als auch die Feldbus-Koppler angesteuert. Sämtliche Aktoren und Sensoren sind mit den Feldbus-Kopplern verbunden. Die Achsen des Versuchsstandes wurden mit Motoren aus der NEMA-Reihe 17 bis 23XL konfiguriert, weil nur relativ geringe Lasten an den Achsen anliegen. Hierfür wurden die kostengünstigeren Motorsteuerungen IGUS Dryve D1 verwendet, die über eine direkte Ethernetschnittstelle per Webbrowser eingerichtet und bedient werden können. Die genannten Motorsteuerungen betreiben alle linearen Achsen und zusätzlich die Rotation des Stators. Die Steuerungen sind weiterhin mit der XM 21 über die digitalen Ein- und Ausgänge verdrahtet, sodass über eine fünf-Bit Codierung bis zu 32 voreingespeicherte Fahrbefehle in den Dryve D1 Motorsteuerungen durch die Ablaufsteuerung der XM 21 abgefahren werden können. Unter Anhang H sind die aufgebauten Schaltschränke und Steuerungen dargestellt. (Halwas et al. 2020a)

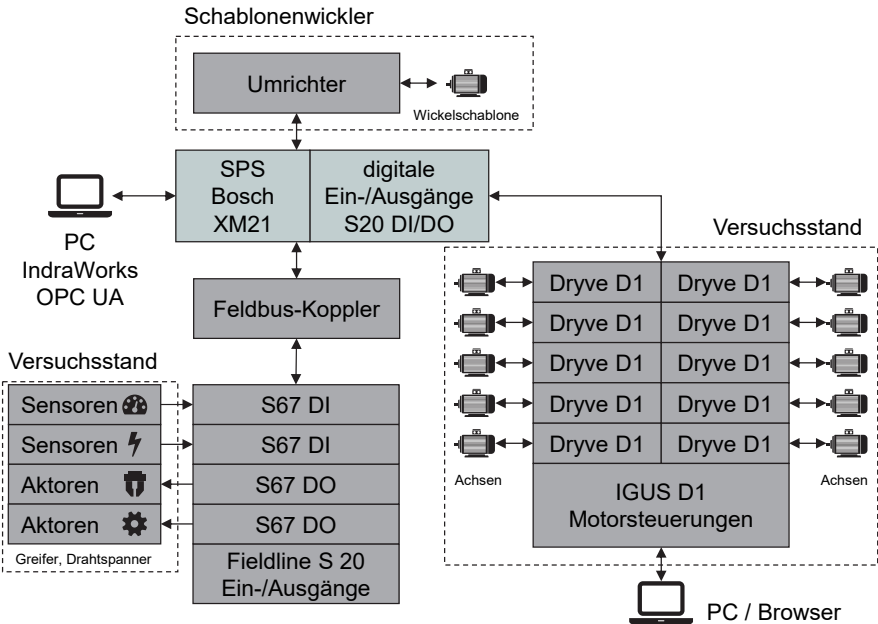
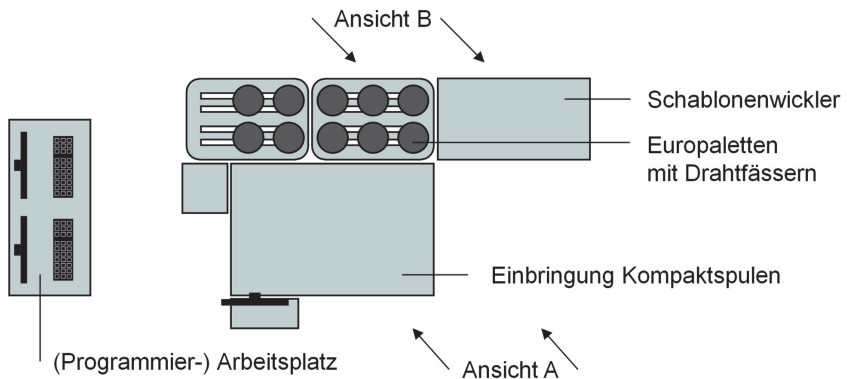


Abbildung 6-7: Schematische Darstellung der Steuerungstechnik für den Versuchsstand. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a))

Das gesamte Layout der Anlage ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Mit Hilfe der Anlage wurden Zeitstudien durchgeführt, die in der Bewertung in Kapitel 7.1 aufgegriffen werden. Ein Nachweis der Einbringung von Kompaktspulen wurde erbracht, allerdings ist eine hohe Störanfälligkeit der Anlage aufgrund der hochkomplexen Montageaufgabe gegeben. Weiterhin ist die Montage der Kompaktspulen bei fast vollständig montierter Wicklung erschwert, da die bereits montierten Drähte im Wickelkopfbereich die Zugänglichkeit der Greifer verringern. Dadurch ist der ungewollte Kontakt der Greifer mit Drähten aus dem Wickelkopf nicht zu vermeiden, wodurch leicht Beschädigungen entstehen können.



Bedienterminal



Abbildung 6-8: Darstellung des aufgebauten Versuchszustandes am wbk Institut für Produktionstechnik (Standort Forschungsfabrik) mit schematischer Draufsicht (Mitte) und Aufnahmen der seitlichen Ansichten A und B (obere und untere Aufnahme).

6.2 Integraler Kompaktwickelprozess

Zum Nachweis der Machbarkeit der Wicklungserstellung wurde das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Wickelschwert im Nachgang konstruktiv für die prototypische Herstellung angepasst und gefertigt, um Wickelversuche auf einer Nadelwickelmaschine durchführen zu können. Hierbei wurde der integrale Kompaktwickelprozess zur Umsetzung der Kompaktwicklung anfangs in die vier bekannten Teilfunktionen der Fertigung der Wickelmatte, der Fixierung des Lagenaufbaus, der Kompaktierung der Wicklung und der Montage des Blechpakets aufgeteilt. Diese werden mit den beiden wesentlichen Anlagenbaugruppen realisiert: das Wickelschwert und die Einbringvorrichtung (siehe Abbildung 6-9).

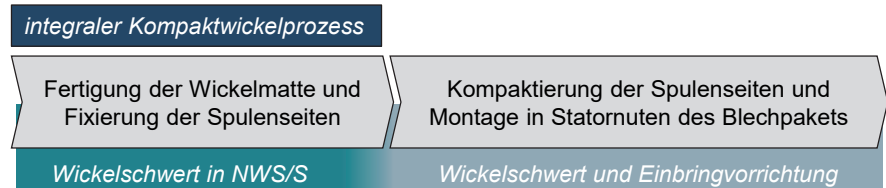


Abbildung 6-9: Übersicht des integralen Kompaktwickelprozesses mit den zwei Baugruppen zur Erfüllung der Teilfunktionen. Zuordnung der vier Teilfunktionen zu den Baugruppen des Wickelschwerts und der Einbringvorrichtung.

Das Wickelschwert soll die initiale Fertigung der Wickelmatte und die Fixierung der Drähte in den Spulenseiten realisieren. Im Vergleich zum sequenziellen Kompaktwickelprozess, ist es für die Fertigung mit Potenzial zur Anwendung in der Serie eine wichtige Anforderung, dass die einzelnen Teilschichten nicht mehr einzeln und nacheinander montiert werden, sondern eine Wickelmatte erzeugt wird, die möglichst in einem Vorgang in den Stator eingebracht werden kann. Dieser Schritt wird durch die Einbringvorrichtung ermöglicht. In dieser lässt sich auch die Kompaktierung der Spulenseiten umzusetzen.

6.2.1 Wickelschwert in NWS/S

Abgeleitet aus der Übersicht der Hauptmerkmale für die Anforderungen (siehe Abbildung 6-1), ist die in Anhang K dargestellte Anforderungsliste für die Baugruppe des Wickelschwerts erstellt worden. Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass es für die Zielvorstellung des Wickelschwerts wichtig ist, dass die Stränge der Phasen U, V und W jeweils zusammenhängend gewickelt werden können. Damit ist

gemeint, dass die einzelnen Spulen eines Stranges nicht voneinander getrennt sein müssen, sondern – je nach Vorgabe des Wickelschemas – zusammenhängen. Die vollständige Wicklung eines Stators kann auf dem Wickelschwert gefertigt und im Anschluss fixiert werden. Somit gibt die Geometrie des Stators gemeinsam mit dem Wickelschema die geometrischen Randbedingungen vor. Im Anschluss daran soll die erzeugte Kompaktwicklung vom Wickelschwert entnommen werden, dementsprechend sind kollabierbare Nuten notwendig. Kollabierbar bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Nuten beweglich sind, sodass die Nuten von den Spulenseiten verschoben werden können, wodurch die Spulenseiten frei liegen und die Wickelmatte anschließend entnommen werden kann. (vgl. A_Sedlmair 2021)

Weiterhin sind die Einbaumaße der Universalnadelwickelmaschine NWS/S der Aumann Espelkamp GmbH²⁸ zu beachten, die in Abbildung 6-10 gezeigt ist. In dieser Anlage wird das Wickelschwert zur Wicklungserzeugung in ein rotierbares Dreibackenfutter eingespannt, und mittels der angeschlossenen Wickelspindel gedreht. Zur Stabilisierung wird von der gegenüberliegenden Seite, analog zu einer Drehbank, ein Reitstock mit einem drehbar gelagerten Dorn angebracht. Die entsprechenden Aufnahmen hierfür sind konstruktiv vorzusehen und die Einbaulänge ist auf maximal 750 mm beim Radius des Wickelschwerts von maximal 200 mm begrenzt. Bei der Fertigung ist der Wunsch zu berücksichtigen, dass das Wickelschwert als Prototyp zur Erprobung der Wicklungserstellung mit Hilfe der NWS/S aufgebaut werden soll, weshalb bei der Konstruktion die Konstruktionsrandbedingungen für spanende und generative Fertigungsverfahren berücksichtigt werden müssen. Der Nadelträger ist über dem drehbaren Wickelkörper auf einem in x-, y-, und z-Richtung verschiebbaren Lineartisch angebracht. Eine Verlegung von einem oder mehreren Drähten ist möglich. Diese können durch mehrere Drahtbremsen auch separat gebremst werden. Der Aufbau der NWS/S erfordert, dass die Nuten des Wickelschwerts, was innerhalb der Anlage als Wickelschablone dient, nach außen für die Drahtablage geöffnet sind und die Wicklung um den Körper gewickelt wird. (vgl. A_Sedlmair 2021)

²⁸ Baujahr 2016, Q1806

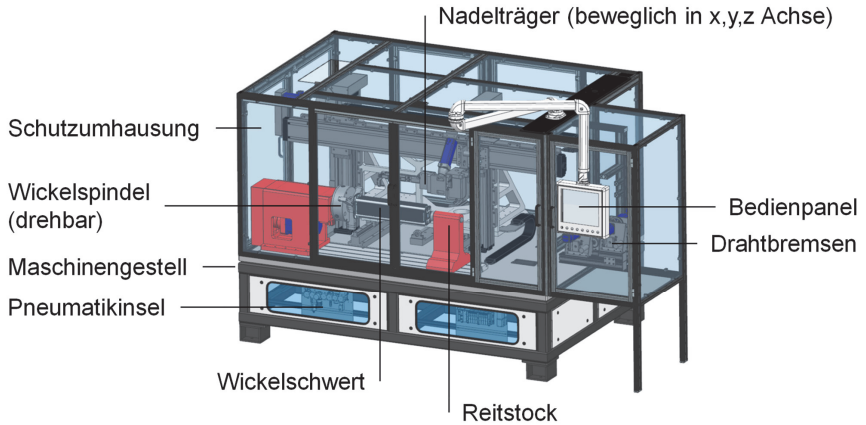


Abbildung 6-10: CAD-Modell der verwendeten Universalnadelwickelmaschine (NWS/S der Aumann Espelkamp GmbH) mit den entsprechenden Maschinenkomponenten und eingebautem Wickelschwert. Nicht dargestellt sind der zugehörige Schaltschrank und die Drahtfässer zur Versorgung der Anlage.

Im Anschluss an die Erstellung der Anforderungsliste wurde eine ausführliche Recherche zu bekannten Konzepten und Umsetzungen der Erzeugung von Wickelmatten erstellt. Hierzu sei auf die bereits dargestellten Verfahren in den Kapiteln 2.3.3, 2.3.4 und 2.3.5 hingewiesen. Besonders die Wickelmattenherstellung bei der kontinuierlichen Wellenwicklung und der Ansatz des automatisierten Träufelwickelns stellen Konzepte mit einem großen Potenzial für Analogien dar. Da allerdings keiner der Ansätze den aufgeführten Anforderungen vollständig gerecht werden kann, wurde eine Neuentwicklung des Wickelschwerts angestrebt.

Das Ergebnis der Entwicklung und Konstruktion des Wickelschwerts ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Die Gesamtbaugruppe des Wickelschwerts besteht dabei aus dem Grundrahmen, der die übrigen Komponenten in ihren gewünschten Positionen hält. Die Wickelkopfschablonen sind durch jeweils vier Schrauben mit Gleitführungen im Grundrahmen verschiebbar fixiert. In den mit dem Grundrahmen verschraubten Wickelkopfschablonen kann über Nuten der Kern mit den Nutenschablonen eingeschoben werden. Der Kern und die Nutenschablonen sind durch eine Gleitschiene verbunden. Nuten und Wickelkopfschablonen enthalten ebenfalls eine Nutschiene, in die die einzelnen Nutsegmente eingeschoben werden können. Dadurch wird die Anforderung des flexiblen Wickelschemas erfüllt, weil verschiedene Nutabmessungen

und Abstände zwischen den Nuten eingestellt werden können. Es ist auch innerhalb eines Wickelschemas möglich, verschiedene Nutgrößen oder Abstände zwischen diesen zu ermöglichen. In der Theorie ist dadurch beinahe jedes denkbare Wickelschema realisierbar. (vgl. A_Sedlmair 2021)

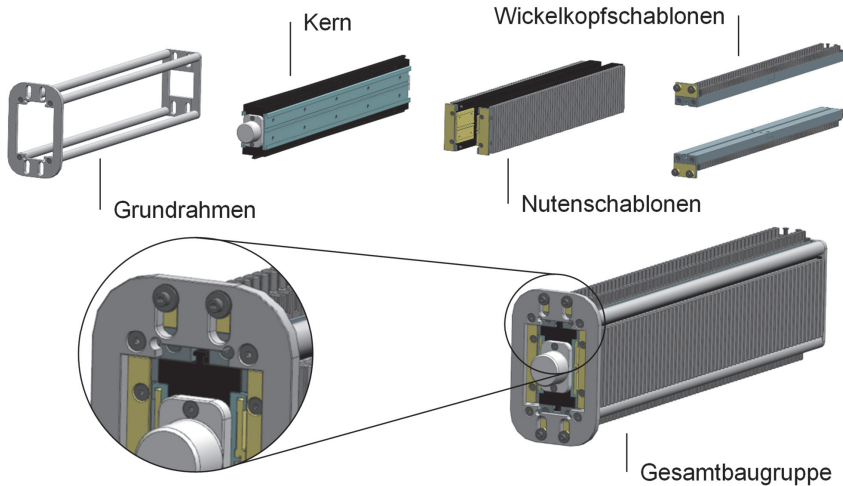


Abbildung 6-11: Darstellung der vier Hauptbaugruppen des Wickelschwerts (oben) und der montierten Gesamtbaugruppe. (eigene Darstellung nach A_Sedlmair 2021)

Die Kombination der in Abbildung 6-11 gezeigten Unterbaugruppen ermöglicht nach der Herstellung der Wickelmatten auch deren Entnahme. Abbildung 6-12 stellt den Entnahmeprozess der zuvor auf das Wickelschwert aufgetragenen Wicklung graphisch dar. Hierbei ist die zusammenhängende Phase U auf dem Wickelschwert (1) als Ausgangslage dargestellt, die gesamte Wickelmatte würde zusätzlich die Phasen V und W beinhalten. Zu Beginn des Vorgangs wird der Kern aus dem Wickelschwert gezogen (2). Weil die Nutenschablonen und der Kern mit einer Gleitschiene über eine schiefe Ebene miteinander verbunden sind, bewirkt der Auszug des Kerns ein Kollabieren (Einfahren) der Nuten auf beiden Spulenseiten. Sind diese vollständig eingefahren, wirkt ein Anschlag zwischen dem Kern und den Nutenschablonen und der Verbund von Kern und Nutenschablonen kann aus dem Grundrahmen herausgezogen werden (3 & 4). Durch die Verschiebung der Wickelkopfschablonen können die Spulenköpfe freigelegt werden (5). Im letzten Entnahmeschritt kann dann der Grundrahmen aus der Wickelmatte gezogen werden (5 zu 6). Dieser Schritt ist rein schematisch dargestellt,

zur Fixierung der Wickelmatte ist eine entsprechende Vorrichtung notwendig, wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt. (A_Sedlmair 2021)

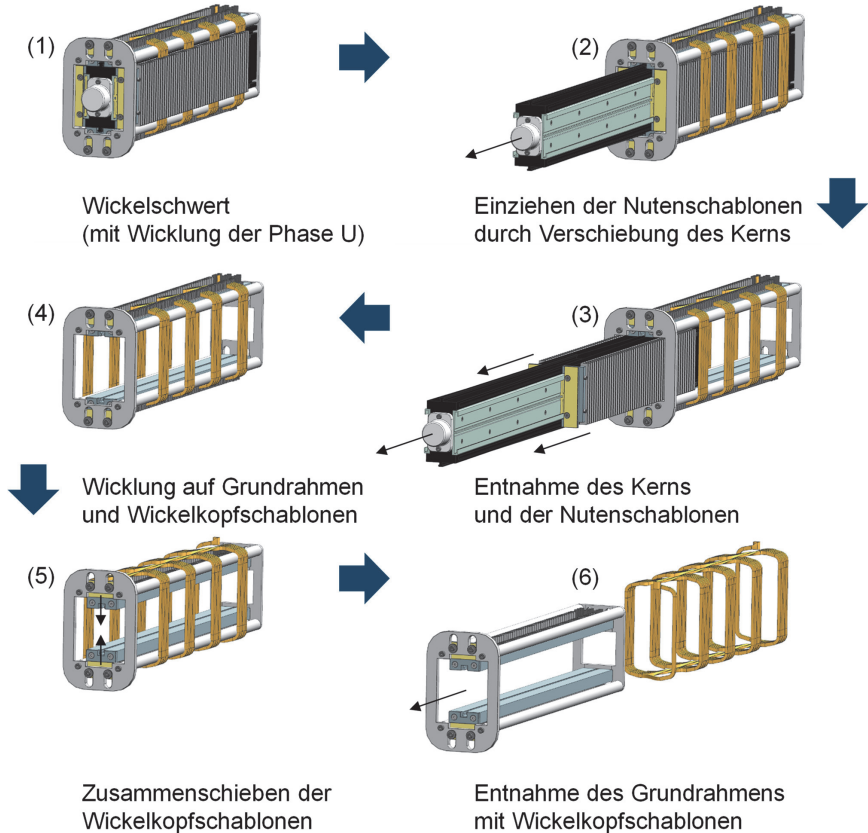


Abbildung 6-12: Darstellung der einzelnen Demontageschritte nach Bewicklung des Wickelschwerts zur Entnahme der Wicklung. Hier ist beispielhaft nur die Phase U gezeigt, bei der seriennahen Umsetzung sind alle drei Phasen U, V und W handzuhaben. (eigene Darstellung nach (A_Sedlmair 2021))

Zum Nachweis der Machbarkeit der Wickelmatteerstellung wurde ein Prototyp des Wickelschwerts aufgebaut, wie in Abbildung 6-13 gezeigt. Der Grundrahmen besteht hierbei aus spanend bearbeiteten Aluminiumkomponenten, der Kern und die schwarzen Wickelkopfschablonen wurden mittels Filament 3D-Druck (Materialien:

Poly lactide und Acrylnitril-Butadien-Styrol) hergestellt. Die weiteren grauen Wickelkopf- und Nutenschablonen sind mittels selektivem Laserstrahlschmelzen aus dem Material Alumide (Mischung aus Polyamid- und Aluminiumpulver) gefertigt. Gerade die generativ gefertigten Bauteile haben sich am wbk Institut für Produktionstechnik für die Erprobung von Wickelschablonen bewährt. Diese sind kostengünstig und variabel in ihrer geometrischen Formgebung herzustellen. Für Versuche im Umfeld der Erprobung von Wickelverfahren sind diese Materialeigenschaften ausreichend, für Anwendungen in der Serie sind aufgrund der Abriebsfestigkeiten und Gleiteigenschaften insbesondere polierte Werkzeugstähle für die Schablonen zu bevorzugen.



Abbildung 6-13: Aufnahme des prototypischen Wickelschwerts zur Überprüfung der Machbarkeit der Wickelmattenerstellung in der NWS/S.

Im nächsten Schritt wurde der in Abbildung 6-13 gezeigte Prototyp zur Erprobung der Wicklungsherstellung in die Universalnadelwickelmaschine NWS/S eingespannt und bewickelt, wie in Abbildung 6-14 gezeigt. Hierbei wurde die Wickelmatte bis zur Hälfte – bestehend aus acht Teilspulen – hergestellt, die zweite Hälfte wird analog fortgesetzt. Es wurden mehrere Bewicklungsversuche durchgeführt, sowohl mit einem einzelnen Draht, als auch mit zwei parallel gewickelten Drähten. Zehn parallele Drähte konnten aufgrund der Düsengeometrie und dem Drahtbremssystem nicht verarbeitet werden, wären aber durch Umrüstungsmaßnahmen an der NWS/S prinzipiell realisierbar. Die Phasen werden anhand des Wickelschemas nacheinander in der Reihenfolge U, V und W auf das Wickelschwert gewickelt. Dies entspricht einer Lage in der Nut. In der Abbildung 6-14 ist das mit einer Wicklung versehene Wickelschwert dargestellt. Gut erkennbar ist der lagengenaue Aufbau in dieser Schicht. In der Serienfertigung wäre

hierfür eine Verlegung von zehn parallelen Leitern in vierfacher Windungszahl erforderlich. Zur Realisierung sind in der NWS/S weitere Anpassungen und Wickelversuche durchzuführen, die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht vorgenommen werden konnten.

Anhand der Wickelversuche konnten bei der Wickelmattenherstellung für die Konstruktion des Wickelschwerths die nachfolgend aufgelisteten Herausforderungen identifiziert werden. Daraus wurden entsprechende Lösungsvorschläge abgeleitet:

- *Herausforderung:* Führungselemente in Wickelkopfschablone zu niedrig
Lösungsvorschlag: Erhöhung der Elemente zur besseren Führung
- *Herausforderung:* Drähte bleiben an Flächen der Führungselemente hängen
Lösungsvorschlag: polierte Metalloberflächen verwenden
- *Herausforderung:* Zugkräfte verdrehen die Nutelemente
Lösungsvorschlag: Materialänderung zu Stahl und Toleranzanpassung
- *Herausforderung:* Kompaktierung wegen Kunststoffnuten nicht möglich
Lösungsvorschlag: Kern und Nutenschablonen aus Stahl fertigen
- *Herausforderung:* Zugspannungen der Wickelmatte auf Grundrahmen
Lösungsvorschlag: Grundrahmen auch kollabierbar gestalten
- *Herausforderung:* Fertigungszeit bei der Wickelmattenerstellung zu hoch
Lösungsvorschlag: Düse anpassen, um mit bis zu 10 parallelen Drähten wickeln zu können und gleichzeitig drei Düsen nebeneinander am Nadelarm anbringen (nur bei Phasensymmetrie möglich), um Phasen gleichzeitig zu erstellen

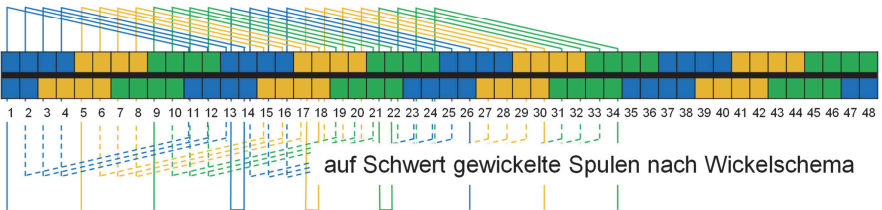
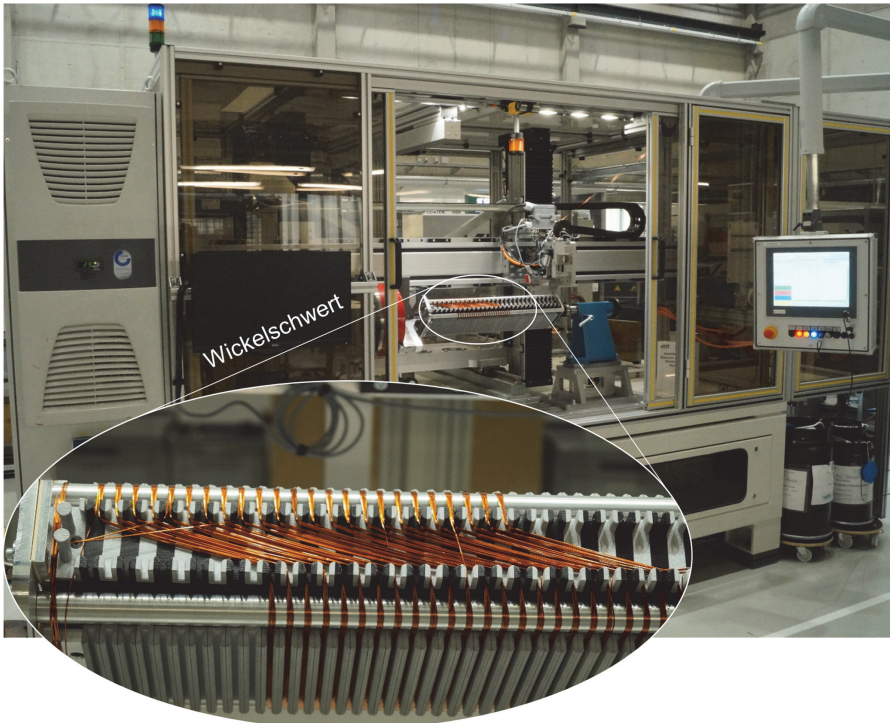


Abbildung 6-14: Machbarkeitsnachweis der Wicklungsherstellung mit Hilfe der NWS/S mit der Hälfte der Wicklung. Zweite Hälfte der Wicklung wird analog auf der weiteren Länge gewickelt.

In einem weiteren Wickelversuch wurden die sogenannten Phasentrenner in die Herstellung der Wickelmatten integriert. In diesem Fall wurden Isolationspapiere des Typs TRIVOLTHERM: NKN 2520 verwendet. Diese werden je Wickelkopfseite dreimal in die Wickelkopfschablone eingelegt. Ein Phasentrenner wird zu Beginn des Wickelvorgangs eingelegt, die anderen folgen nach der Wicklung der jeweiligen

Stränge. Somit sind die Phasen im Wickelkopf durch das Isolationspapier voneinander getrennt. Dies ist auch gut in der Abbildung 6-15 erkennbar.

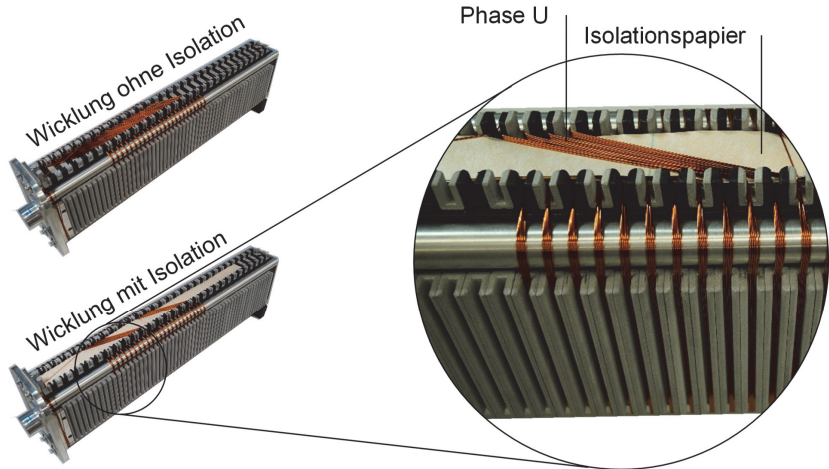


Abbildung 6-15: Bewickeltes Wickelschwert mit halber Wicklung mit (unten links) und ohne (oben links) Isolationspapier im Bereich des Wickelkopfs. Die im Ausschnitt (rechts) gezeigte Wickelkopfisolation trennt die Phase W von V, sodass im Wickelkopfbereich nur die Kupferlackdrähte der Phase W sichtbar sind. Darunter liegen zwei weitere Phasentrenner zwischen dem Wickelschwert und der Phase U zu V.

6.2.2 Wickelschwert und Einbringvorrichtung

Abgeleitet aus der Übersicht der Hauptmerkmale für die Anforderungen (siehe Abbildung 6-1) ist die in Anhang L dargestellte Anforderungsliste für die Baugruppe der Einbringvorrichtung erstellt worden. Prinzipiell muss die Entwicklung und Konstruktion auf das in Kapitel 6.2.1 erarbeitete Wickelschwert und den zu bewickelnden Stator abgestimmt sein. Aus diesen beiden Baugruppen gehen insbesondere die geometrischen Randbedingungen hervor. Hinsichtlich des Platzbedarfs, beziehungsweise den Außenabmessungen der Einbringvorrichtung, sind vorerst keine Einschränkungen gesetzt. Diese können deshalb so gewählt werden, wie es die Baugruppenkinematik vorgibt. Bezüglich der Energieversorgung sollte eine Betriebsspannung von 400 V nicht überschritten werden und gängige Druckluftanschlüsse (5 bar bis 8 bar) sind in Industrieanwendungen Standard. Zwei entscheidende Vorgänge sind durch die Einbringvorrichtung zu realisieren: das

geordnete Entnehmen der Wickelmatte aus dem Wickelschwert und die Übergabe und Montage in das Statorblechpaket. (A_Dieterich 2022)

Prinzipiell sind im Rahmen dieses Vorhabens für die Umsetzung drei wesentliche Konzepte für den integralen Kompaktwickelprozess erarbeitet worden (Halwas, Wirth & Fleischer 2021). Das erste Konzept ist die Verwendung der Kompaktwickelmatten im Fertigungsprozess analog der kontinuierlichen Hairpintechnologie, wie in Abbildung 6-16 (a) dargestellt. Abgesehen von der in Kapitel 6.2.1 erläuterten Herstellung der Wicklung, gleicht der Einbringvorgang der kontinuierlichen Hairpintechnologie. Bei Verwendung der Stern-Joch Bauweise, wird die kompaktierte Wickelmatte zu Beginn mit Hilfe einer Führung auf den Stern gedreht (siehe Abbildung 6-16 (b)). Im Anschluss daran wird das Statorjoch über den bewickelten Stern geschoben, sodass die Statorbaugruppe mit Kompaktwicklung vollständig montiert ist. Das Einrollen von flexiblen Blechpaketen kann durch die Verwendung von Polketten oder formbaren Blechpaketen realisiert werden (vgl. Parati 2022; Wüterich, Liewald & Kopp 2020; Wüterich, Liewald & Kopp 2019). Die Kompaktwickelmatte wird dabei in das anfangs geradlinig geformte Blechpaket übergeben und im Anschluss zum drehsymmetrischen Stator mit Hilfe einer Führung gebogen (Abbildung 6-16 (c)). Bei allen drei dargestellten Konzepten ist der Wickelkopf anfänglich derart ausgeformt, dass die benötigte Einbaulänge berücksichtigt wird. Somit ist der Wickelkopf in der Ausgangslage etwas länger, damit die benötigte Weglänge von Nut zu Nut der Wicklung im Stator ausgeglichen werden kann. (Halwas, Wirth & Fleischer 2021)

Aufgrund der umfangreichen Herausforderungen an die Blechpaketgestaltung der Stern-Joch Bauweise und der aufrollbaren Blechpakete wurde die Einbringung analog zur kontinuierlichen Hairpintechnologie in der durchgeführten Bewertung als am geeignetsten eingestuft. Daher wird dieses Konzept weiter betrachtet und ausgearbeitet, wie in der Abbildung 6-17 und der Abbildung 6-18 dargestellt. Das hat allerdings den Nachteil, dass im Nutschlitz kein Zahnkopf ausgeprägt werden kann. (vgl. Halwas, Wirth & Fleischer 2021)

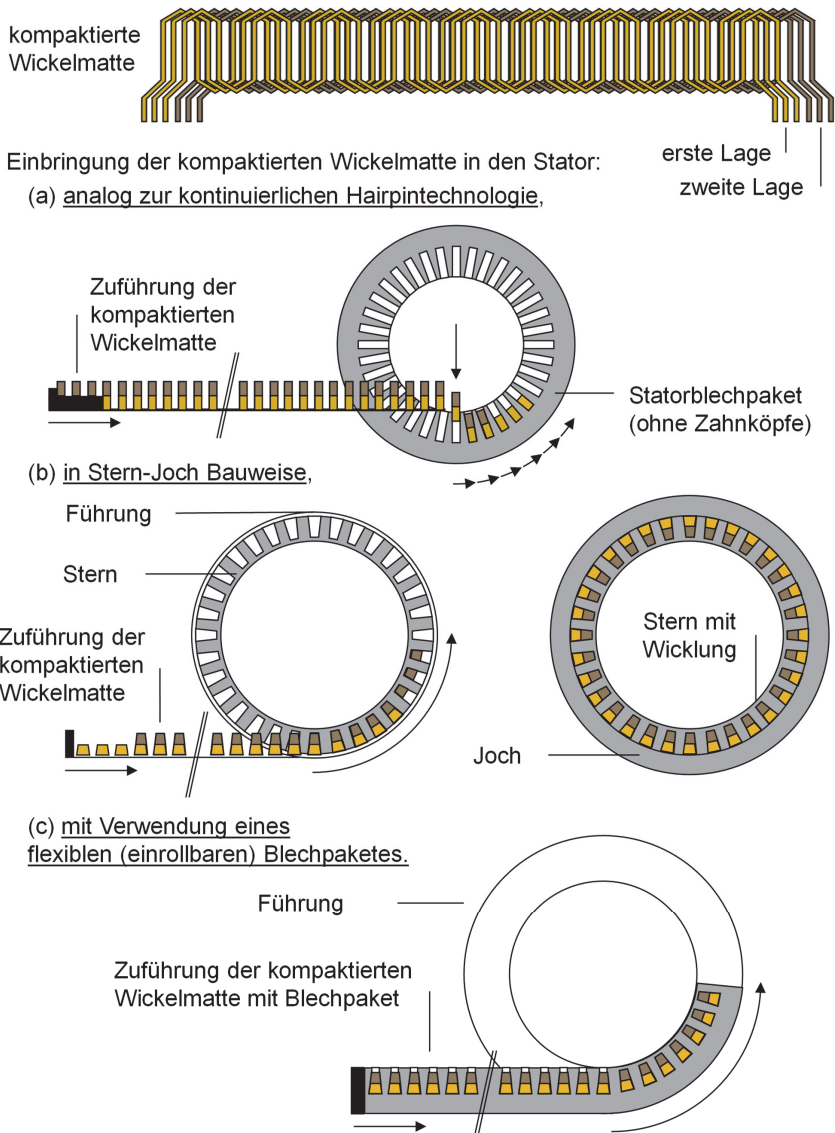


Abbildung 6-16: Darstellung der Konzepte zur Einbringung der Kompaktwickelmatte in das Statorblechpaket: (a) analog zur kontinuierlichen Hairpintechnologie, (b) in Stern-Joch Bauweise und (c) unter Verwendung eines flexiblen (einrollbaren) Blechpaketes. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2021))

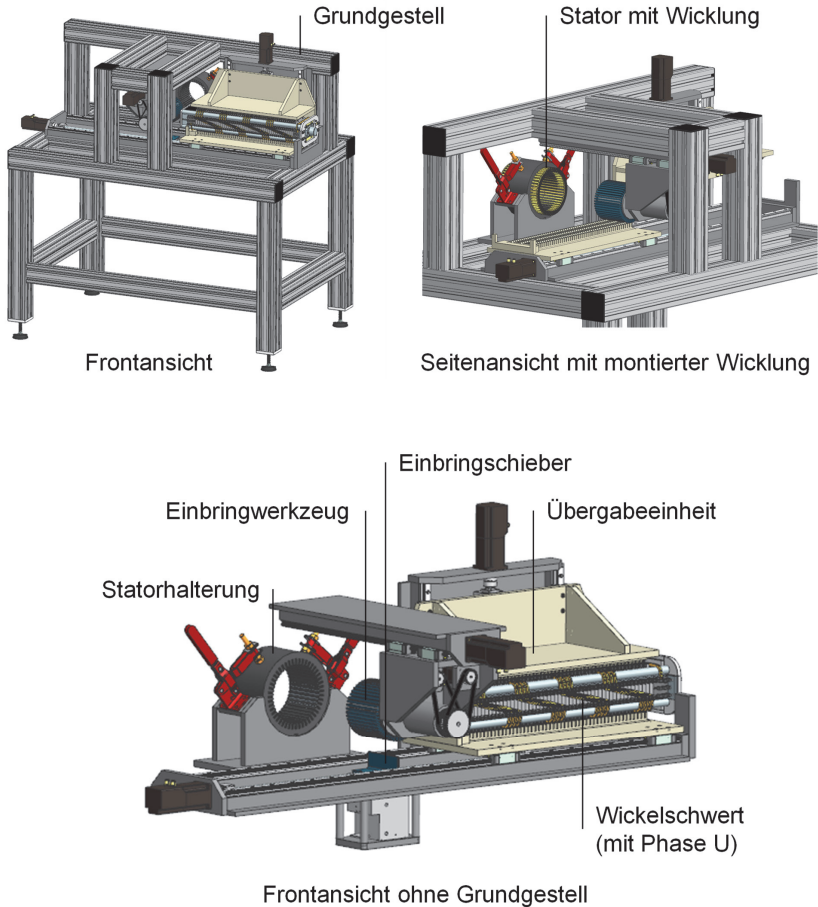


Abbildung 6-17: CAD-Modell des virtuellen Prototyps der Einbringvorrichtung der Kompaktwickelmatten. Frontansicht (oben links), Rückansicht (oben rechts) und Frontansicht ohne Grundgestell (unten). (eigene Darstellung nach (A_Dieterich 2022))

In der Abbildung 6-17 ist das entwickelte Gesamtlösungskonzept der Einbringvorrichtung dargestellt. Das Grundgestell basiert auf einem Rahmen, bestehend aus Aluminiumprofilen, die mit einer geeigneten Verbindungstechnik verschraubt werden. Daran werden die beiden Achsen der Übergabeeinheit und die Achse der Einbringeinheit montiert. Die Statorhalterung wird ebenfalls an das

Grundgestell angeschraubt. Die Übergabeeinheit übernimmt die Wickelmatte aus dem Wickelschwert. Diese übergibt die Wickelmatte mittels Schieber in ein drehsymmetrisches Einbringwerkzeug, das im Anschluss in das Statorblechpaket einfährt und die Wickelmatte radial in die Statornuten expandiert.

Der detaillierte Ablauf des Übergabeprozesses ist in Abbildung 6-18 ausführlich dargestellt. Zu Beginn wird das Wickelschwert, das in der NWS/S mit den Kupferlackdrähten mit Wickelmatte bestückt wurde, in die Übergabeeinheit zwischen die beiden Übergabekämme eingelegt (1). Die Spulenseiten der Wickelmatte wurden in der NWS/S zusätzlich fixiert, sodass die Formstabilität der einzelnen Spulenseiten der Wickelmatte gegeben ist, wobei der Wickelkopf flexibel bleibt. In den Schritten (2) bis (5) werden anschließend die gegenüberliegenden Spulenseiten der Wickelmatte durch die Übergabekämme zusammengeschoben. Durch die schräge Bewicklung des Wickelschwerts innerhalb der Wickelkopfschablone wird so der Lagenwechsel (in diesem Fall eine Zweischichtwicklung) ohne Twistvorgang (vergleiche Hairpintechnologie Kapitel 2.3.4) realisiert. Der Wickelkopf längt sich dabei nach außen und überbrückt die Verkürzung der Wegstrecke. Das Wickelschwert gibt die Wickelmatte dabei wie in Abbildung 6-12 dargestellt frei. Die beiden Übergabekämme kompaktieren am Ende des Zusammenfahrens die Spulenseiten und übernehmen dadurch die Funktion der Presseinheit. Nach vollständiger Übergabe und Kompaktierung der Wickelmatte kann der untere Kamm in Richtung des Einbringwerkzeugs verschoben werden (5). Hierbei fährt der obere Kamm in seine Ausgangsposition. Die einzelnen Spulenseiten der Wickelmatte werden anschließend mittels eines Schiebers in die Nuten des Einbringwerkzeugs eingeschoben ((6) bis (7)). Das Einbringwerkzeug fährt daraufhin in den Stator ein und expandiert die Wickelmatte exzentrisch in den Stator (8), bis die Wicklung im Stator montiert ist (9). Hier wird der überstehende Wickelkopf genutzt, um den größeren Nutabstand im Statorblechpaket auszugleichen. Der zeitlich begrenzende Vorgang dabei ist das Einschieben der Wickelmatte in die Einbringvorrichtung, da jede Nut einzeln gefüllt wird. Gegebenenfalls ist es notwendig, diesen Vorgang durch einen kontinuierlichen Eindrehvorgang ohne Schieber mittels Führung zu beschleunigen, wie es bei der Verwendung in der Stern-Joch Bauweise oder den flexiblen Blechpaketen in der Abbildung 6-16 (b) und (c) dargestellt ist. In der Abbildung 6-18 sind zusätzlich notwendige Leitbleche, um die Wickelmatte in den gewünschten Positionen zu fixieren, nicht gezeigt. (A_Dieterich 2022)

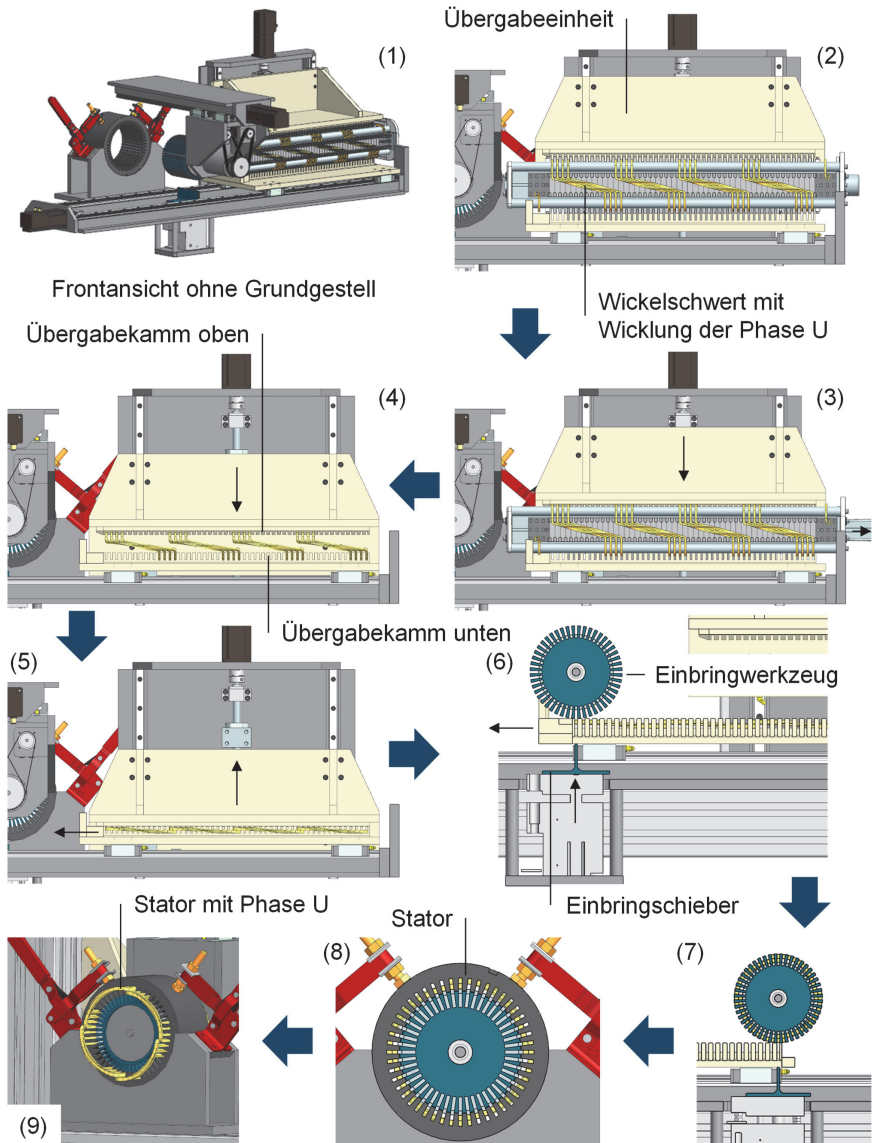


Abbildung 6-18: Ablauf der Entnahme der Wicklung (hier beispielhaft Phase U) vom Wickelschwert und Montage in den Stator. (eigene Darstellung nach (A_Dieterich 2022))

Die Antriebe der Achsen wurden mit Schrittmotoren aus der NEMA Baugrößenreihe ausgewählt und aktuierten alle Achsen sowie alle weiteren Komponenten der Einbringvorrichtung. Der Schieber wird durch einen Pneumatikzylinder aktuiert, der durch elektrische Ventile angesteuert werden kann. Somit kann der Einbringvorgang vollständig automatisiert und durch ein Ablaufprogramm mit geeigneter Steuerung, wie eine SPS, realisiert werden. In der vorliegenden prototypischen Konzeptumsetzung ist die Aktuierung des Wickelschwerts händisch durch den Maschinenbediener durchzuführen. Dies betrifft die Schritte des Einlegens des Wickelschwerts, die Entnahme des Kerns mit den Nutenschablonen, das Verschieben der Wickelkopfschablonen und die abschließende Entnahme des Wickelschwerts. In weiteren Entwicklungsschritten ist die vollständige Automatisierung dieser Schritte denkbar. Der Stator wird in diesem Konzept ebenfalls durch den Bediener mittels eines Schnellspannsystems fixiert, auch hierzu wären Automatisierungslösungen möglich. Ein weiterer, entscheidender Gesichtspunkt ist die Funktionalität der Übergabeeinheit. Es ist für die konstruktive Ausgestaltung entscheidend, ob nur eine Übergabe der Wickelmatte erfolgt oder eine Kompaktierung stattfindet. Bei der Realisierung der Kompaktierungsfunktion ist die Ausführung massiver auszulegen als dargestellt und eine pneumatische oder hydraulische Aktuierung zum Aufbringen der notwendigen Presskräfte umzusetzen. Theoretisch ist das Kompaktieren der Spulenseiten auch durch den Einbringschieber in die Einbringvorrichtung denkbar. Dies ist aufgrund der geometrischen Randbedingungen notwendigen filigranen Strukturen des Schiebers und der Einbringvorrichtung nicht empfehlenswert, auch wäre ein weiteres Gegenlager zur Aufnahme der Kräfte im Einbringwerkzeug notwendig. Das in Abbildung 6-17 gezeigte CAD-Modell des Gesamtlösungskonzepts ist dementsprechend als Ausblick zu betrachten, wie eine seriennahe Umsetzung des Kompaktwickelprozesses aussehen könnte. In der realen Umsetzung müssten eine detaillierte Konstruktion und Auslegung stattfinden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnte. (A_Dieterich 2022)

7 Ergebnisse und Bewertung

Unter Verwendung der in Kapitel 6 aufgebauten Versuchsträger des sequenziellen und integralen Kompaktwickelprozesses, wurden Versuche zur Aufnahme der Fertigungszeiten durchgeführt. Die daran anschließende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit lässt Rückschlüsse auf den realistischen Einsatz der Produktionstechnologie für Traktionsantriebe im industriellen Umfeld zu. Zur Bewertung der Kompaktwicklung wurden zwei Analysen durchgeführt. Die numerische Verlustanalyse gibt Aufschlüsse über die Reduktion der Verluste bei der Anwendung der Kompaktwicklung und die thermische Analyse zeigt das Potenzial zur gesteigerten Wärmeabfuhr auf.

7.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand von Fertigungszeiten

Anhand der Fertigungszeiten soll die Wirtschaftlichkeit einer möglichen Umsetzung der hier erforschten Kompaktwickelprozesse bewertet werden. Zur Betrachtung der Fertigungszeiten wurde die Methodenlehre des Arbeitsstudiums nach REFA angewandt (vgl. REFA 1976; REFA 1978). Dazu wurden sowohl die Fertigungszeiten des sequenziellen, als auch des integralen Kompaktwickelprozesses während der Durchführung der Wickelversuche gemessen (Ist-Zeiten). Um diese gegenüber Prozessen in industriellen Anwendungen der Automobilindustrie, wie etwa der Hairpintechnologie, bewerten zu können, wurden die Fertigungszeiten der Hairpinbiegung der einschlägigen Literatur entnommen (Soll-Zeiten). Für alle drei Prozesse wurden neben den beschriebenen Fertigungszeiten der Spulenerzeugung auch die weiteren Prozessschritte zur Wicklungserzeugung im Stator betrachtet. Diese sind Schätzwerte und deshalb Soll-Zeiten. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Herstellung der Statorwicklung die höchste Anzahl an einzelnen Ablaufabschnitten benötigt und daher der zeitkritischste Prozessschritt ist. Diese Annahme soll am Beispiel der Hairpintechnologie erläutert werden. Ein einzelner Hairpin benötigt eine kurze Taktzeit, um gebogen zu werden. Prinzipiell kann eine U-Biegung mit anschließender Schränkung für die Formgebung ausreichen, die Taktzeit liegt im Bereich weniger Sekunden. Allerdings werden häufig weit mehr als 100 Hairpins pro Stator benötigt, was die Fertigungszeit der gesamten Statorwicklung um den Faktor 100 erhöht. Es ist davon auszugehen, dass Prozessschritte, wie etwa das Einbringen aller Hairpins oder das nachfolgende Twisten der Hairpinenden, weniger Zeit benötigen, als das Biegen aller benötigten Hairpins. Wenn bei 100 Hairpins pro

Wicklung das Twisten beispielsweise um den Faktor zehn länger dauert, als der Biegevorgang eines einzelnen Hairpins, ist der Twistvorgang trotzdem um den Faktor zehn schneller, als das Biegen aller Hairpins für eine Statorwicklung. Deshalb ist es im hiesigen Rahmen ausreichend, Schätzzeiten zu verwenden, abgesehen von der Wicklungserzeugung. Die daraus resultierenden Auftrags- und Belegungszeiten sind also in Relation zueinander zu sehen, die absolute Zeit je Prozess könnte abweichen. Beispielsweise wurde für die einzelnen Prozessschritte eine Rüstzeit von zweimal 120 Sekunden angenommen. In der Realität, werden diese je nach Prozessschritt variieren oder sogar entfallen, insbesondere bei der Hairpintechnologie. Um die Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde allerdings derselbe Wert angenommen. Im Folgenden werden die Zeiten für die Wicklungserstellung genauer beschrieben. Die geschätzten Soll-Zeiten für die weiteren Prozessschritte sind in Anhang R bis T dargestellt. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass die Statoren mit Isolationspapier versehen sind und Kupferlackdrähte als Halbzeug verwendet werden. Das Ergebnis ist ein Stator mit montierter Wicklung (nicht imprägniert oder vergossen).

In Tabelle 7-1 sind die gemessenen Ist-Zeiten in Sekunden und Minuten für die 17 Ablaufabschnitte der Wicklungserzeugung des sequenziellen Kompaktwickelprozesses angegeben. Es ist die Fertigung von vier Teilspulen aufgelistet, sodass der Ablauf 48-mal je Stator wiederholt wird. Die Zeitarten sind für den bedienenden Menschen (M) und das Betriebsmittel (B) angegeben. Die Erläuterungen der Indizes der Zeitarten (t) sind in den Tabellenlegenden angegeben und im Anhang M bis P weitergehend dargestellt. Dies gilt analog für die Tabelle 7-2 und die Tabelle 7-3. Für den sequenziellen Kompaktwickelprozess ist die Wicklungserstellung aufwändig, weil die Spulen nacheinander gewickelt werden. Eine weitere Automatisierung des prototypischen Wickelvorgangs würde den Ablauf zwar beschleunigen, der gesamte Zeitaufwand des sequenziellen Vorgehens bleibt aber trotzdem hoch. Der sequenzielle Kompaktwickelprozess besteht insgesamt aus vier Prozessschritten sK1 bis sK4 (siehe Abbildung 7-1), die weiteren Zeiten für sK2 bis sK4 sind dem Anhang R zu entnehmen.

Tabelle 7-1: Auflistung der aufgenommenen Ist-Zeiten für die Wicklungserzeugung des sequenziellen Kompaktwickelprozess (sK1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Ist-Zeit in s	Ist-Zeit in min	Zeitart	
				M	B
1	Draht + Fässer in LWS einbauen und Drähte bis zur Düse führen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}
2	Wickelwerkzeug vorbereiten	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
3	Wickelwerkzeug in LWS einbauen	60	1,0	t_{MN}	t_{BA}
4	Drähte an Wickelwerkzeug anbringen (Anwickeln)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
5	Spule 1 wickeln	120	2,0	t_{MA}	t_{BH}
6	Spule 1 fixieren (Terminieren)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
7	Drähte an Wickelwerkzeug anbringen (Anwickeln)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
8	Spule 2 wickeln	120	2,0	t_{MA}	t_{BH}
9	Spule 2 fixieren (Terminieren)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
10	Drähte an Wickelwerkzeug anbringen (Anwickeln)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
11	Spule 3 wickeln	120	2,0	t_{MA}	t_{BH}
12	Spule 3 fixieren (Terminieren)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
13	Drähte an Wickelwerkzeug anbringen (Anwickeln)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
14	Spule 4 wickeln	120	2,0	t_{MA}	t_{BH}
15	Spule 4 fixieren (Terminieren)	30	0,5	t_{MN}	t_{BA}
16	Wickelwerkzeug aus LWS ausbauen	60	1,0	t_{MN}	t_{BA}
17	Draht + Fässer aus LWS ausbauen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung; A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

Tabelle 7-2 zeigt die aufgenommenen Fertigungszeiten des integralen Kompaktwickelprozesses für die Erstellung der gesamten Wickelmatte auf dem Wickelschwert. Im Vergleich zum sequenziellen Kompaktwickelprozess werden im integralen Kompaktwickelprozess nicht mehr die Teilspulen sequenziell gewickelt, sondern die Phasen U, V und W vollständig nacheinander hergestellt. Die Wickelzeit wurde zwar mit der Bewicklung mit einem Draht aufgenommen, in der folgenden Berechnung jedoch unter der Annahme ausgeführt, dass zehn Drähte gleichzeitig parallel verlegt werden. Der integrale Kompaktwickelprozess besteht insgesamt aus zwei Prozessschritten iK1 bis iK2 (siehe Abbildung 7-1), die weiteren Zeiten von iK2 sind Anhang S zu entnehmen.

Tabelle 7-2: Auflistung der aufgenommenen Ist-Zeiten für die Wickelmattenerzeugung des integralen Kompaktwickelprozesses (iK1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Ist-Zeit in s	Ist-Zeit in min	Zeitart	
				M	B
1	Draht + Fässer in NWS/S einbauen und Drähte bis zur Düse führen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}
2	Wickelschwert vorbereiten	55	0,9	t_{MN}	t_{BA}
3	Wickelschwert in NWS/S einbauen	70	1,2	t_{MN}	t_{BA}
4	Drähte an Wickelschwert anbringen (Anwickeln)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
5	Phase U wickeln	864	14,4	t_{MA}	t_{BH}
6	Phase U fixieren (Terminieren)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
7	Drähte an Wickelschwert anbringen (Anwickeln)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
8	Phase V wickeln	864	14,4	t_{MA}	t_{BH}
9	Phase V fixieren (Terminieren)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
10	Drähte an Wickelschwert anbringen (Anwickeln)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
11	Phase W wickeln	864	14,4	t_{MA}	t_{BH}
12	Phase W fixieren (Terminieren)	120	2,0	t_{MN}	t_{BA}
13	Spulenseiten der Wickelmatten verbacken	150	2,5	t_{MA}	t_{BH}
14	Wickelschwert aus NWS/S ausbauen	55	0,9	t_{MN}	t_{BA}
15	Draht + Fässer aus NWS/S ausbauen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung; A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

Für die in Tabelle 7-3 bestimmten und geschätzten Soll-Zeiten der Hairpintechnologie, wurde eine Soll-Zeit von 1,5 Sekunden für den Biegeprozess eines Hairpins angenommen (siehe hierzu WAFIOS 2022). Die kurze Fertigungszeit wird durch die Verkettung der Biegeoperationen ermöglicht. Die Fertigungszeit ist zugleich die Taktzeit innerhalb einer Transfer-Biegeanlage. Zur Abschätzung der Fertigungszeiten der NeWwire-Geometrie mittels Hairpintechnologie, wurden 192 Hairpins je Statorwicklung zugrunde gelegt. Die Rüstzeiten wurden analog Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 abgeschätzt, um ihre Vergleichbarkeit herstellen zu können. Die Hairpintechnologie besteht insgesamt aus sechs Prozessschritten HP1 bis HP6 (siehe Abbildung 7-1), die weiteren Zeiten von HP2 bis HP6 sind Anhang T zu entnehmen.

Tabelle 7-3: Auflistung der bestimmten und geschätzten Soll-Zeiten für die Formung der Hairpins (HP1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Soll-Zeit		Zeitart	
		in s	in min	M	B
1	Drahtrollen in Fertigungslinie einbauen, Drähte zur Düse führen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}
2	Hairpin biegen (192 pro Stator)	1,5	0,03	t_{MA}	t_{BH}
3	Drahtrollen ausbauen	120	2,0	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung; A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

In Anhang Q sind die angewandten Formeln zur Erzeugung der Berechnungsergebnisse aus Abbildung 7-1 hinterlegt. Die in Abbildung 7-1 enthaltenen Auftragszeiten wurden für die Losgrößen 1, 100 und 1000 berechnet. Für alle drei Technologien wurde ein Verteilprozentsatz z_v von 5 % eingesetzt. Die Rüstzeit fällt nur jeweils einmal zu Beginn und am Ende der Fertigung der Losgröße an, sodass der Anteil der Rüstzeiten bei steigender Stückzahl zu vernachlässigen ist. Weil die daraus resultierenden Auftragszeiten T mit den Belegungszeiten des Betriebsmittels T_{dB} übereinstimmen, finden im Folgenden nur die Auftragszeiten Berücksichtigung. Das liegt darin begründet, dass keine Erholungszeiten für den Bediener vorgesehen werden müssen, weil die ablaufbedingten Unterbrechungen des menschlichen Ablaufs groß sind und der Bediener bereits während des Ablaufs eine ausreichende Anzahl an Pausen hat. Bei der Wicklungsherstellung auf dem Wickelschwert übt der Anlagenbediener lediglich eine überwachende Tätigkeit aus.

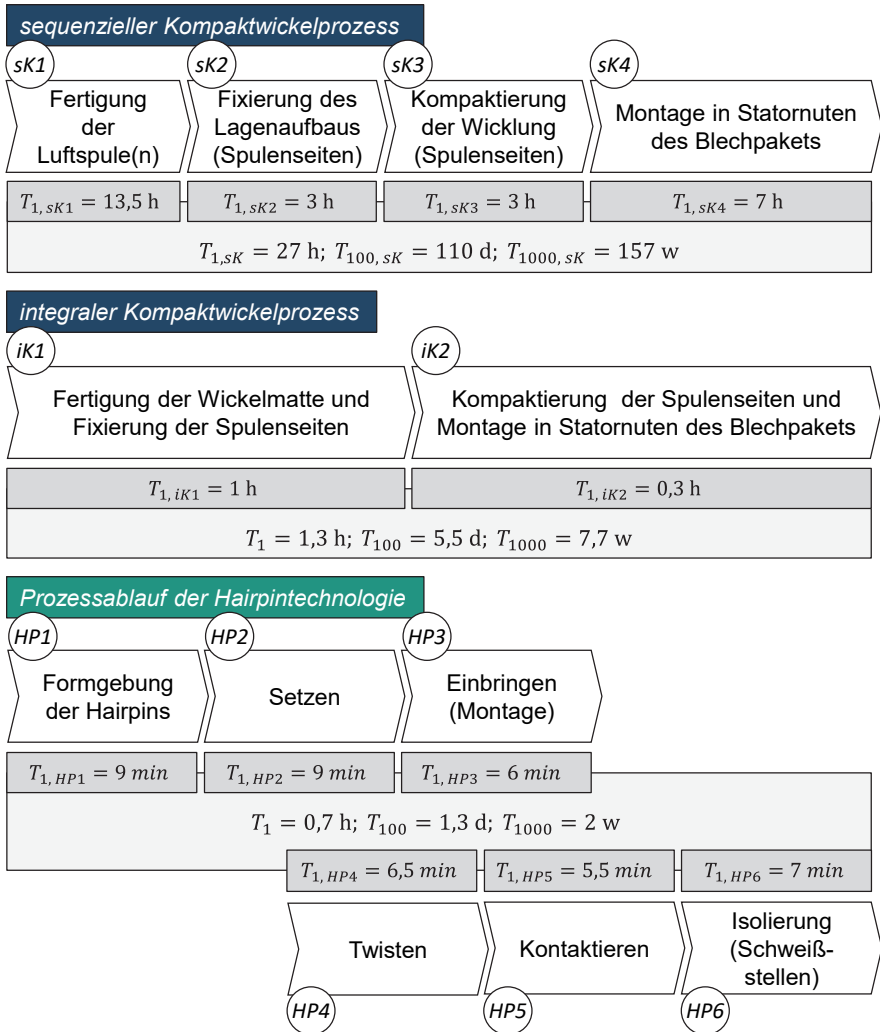


Abbildung 7-1: Übersichtsdarstellung der Auftrags- und Belegungszeiten für den sequenziellen Kompaktwickelprozess (sK), den integralen Kompaktwickelprozess (iK) und die Hairpintechnologie (HP). Berechnung nach REFA, siehe hierzu Anhang M bis T. Auftragszeiten T entsprechen in dieser Berechnung den Belegungszeiten T_{bb} der Betriebsmittel. T_1 = Auftragszeit je 1 Stator; T_{100} = Auftragszeit je 100 Statoren; T_{1000} = Auftragszeit je 1000 Statoren. (Annahme zur Berechnung ist 3-Schichtbetrieb durchgehend: 60 min = 1 h; 24 h = 1 d, 7 d = 1 w)

Erwartungsgemäß benötigt ein Hairpinstator im Vergleich zu den Statoren mit Kompaktwicklung die geringste Fertigungszeit von etwa neun Minuten. Wie beschrieben, ist dies aufgrund der angegebenen Rüstzeit von zweimal 120 Sekunden ein absolut betrachtet hoher Wert, bei der Erhöhung der Stückzahl reduziert sich der Anteil der Rüstzeiten, die dann kaum mehr ins Gewicht fallen. Mit der Anschaffung mehrerer Biege- und Setzanlagen ist eine weitere Reduktion der Auftragszeit möglich, sodass die daraus resultierende Taktzeit halbiert werden könnte. Die Fertigung eines Stators mittels integralem Kompaktwickelprozess kann innerhalb einer Stunde realisiert werden. Auch hier ist eine Reduktion der Taktzeit durch eine Vervielfältigung der Anlagen denkbar. Der sequenzielle Kompaktwickelprozess liegt mit 13,5 Stunden für eine Statorwicklung in einer Größenordnung, in der sich eine industrielle Serienfertigung nicht lohnt, mit hoher Wahrscheinlichkeit wäre das händische Träufelwickeln sogar wirtschaftlicher. Beachtlich ist dabei allerdings, dass dies eine rein wirtschaftliche Betrachtung ist und die Kompaktwicklung nicht im konventionellen Träufelwickelverfahren hergestellt werden kann.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Konzeption des integralen Kompaktwickelprozesses die Fertigungszeit eines Stators deutlich, nämlich um den Faktor zehn, reduziert. Dennoch ist die Fertigungszeit bei der Hairpintechnologie nochmals um den Faktor sechs kürzer. Somit ist die Umsetzung der Kompaktwicklung im seriennahen Ansatz industriell denkbar, jedoch eher bei moderaten Stückzahlenanforderungen sinnvoll und wirtschaftlich.

7.2 Numerische Verlustanalyse der Kompaktwicklung

Zur Analyse und Bewertung der Kompaktwicklung wurde in ANSYS Maxwell²⁹ ein zweidimensionales Simulationsmodell für die Kompakt- und die Hairpinwicklung aufgebaut (siehe Anhang U). Zielstellung der Analysen ist dabei eine Gegenüberstellung der Verluste beider Wicklungstypen. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 7-4 dargestellt, angewandt wurde in diesem Fall die Ausführung einer PMSM.

²⁹ Verwendete Version: Electronics Desktop 2020 R2

Tabelle 7-4: Verwendete Parameter im Simulationsmodell. (orientiert an der Auslegung von (Winter et al. 2021; Riehm, Spieker & Fister 2020))

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Wicklungsparameter			
Phasen (Stangzahl)	m	3	
Polpaarzahl	p	2	
Nutenzahl	N	48	
Lochzahl	q	4	
Sehnung	W/τ_p	10/12	
Blechschnitt			
Statoraußendurchmesser	D_{Stator}	210	mm
Statorinnendurchmesser	d_{Stator}	138	mm
Rotoraußendurchmesser	D_{Rotor}	136	mm
Nutschlitzbreite	$b_{\text{Nutschlitz}}$	2,3	mm
Isolationssystem			
Isolationsgrad	G	2	
Dicke Isolationspapier	d_{isop}	0,2	mm
Leitergeometrie			
Fläche des Drahtquerschnitts (Hairpinwicklung = ein Leiter; Kompaktwicklung = zehn Teilleiter)	A_{Leiter}	3,9	mm ²
Stromstärke	I	70	A
spez. Parameter der Kompaktwicklung			
Drahtdurchmesser vor Kompaktierung	D_{Kupfer}	0,71	mm
Drahtabmessung nach Kompaktierung	$B_{\text{DKW}} \times H_{\text{DKW}}$	0,71 x 0,557	mm
Kantenrundung des Drahtes	r_{DKW}	0,065	mm
Schichtdicke Isolationslack	$d_{\text{Lack,KW}}$	0,0395	mm
Abmessung Nut	$B_{\text{NKW}} \times H_{\text{NKW}}$	4,345 x 10,782	mm
spez. Parameter der Hairpinwicklung			
Drahtabmessung	$B_{\text{HP}} \times H_{\text{HP}}$	4 x 1	mm
Kantenrundung des Drahtes	r_{HP}	0,32	mm
Schichtdicke Isolationslack	$d_{\text{Lack,HP}}$	0,0725	mm
Abmessung Nut	$B_{\text{NHP}} \times H_{\text{NHP}}$	4,545 x 9,76	mm
verwendete Materialparameter (Herstellerangabe)			
Blechpakete (Rotor und Stator)	Cogent Power M235-35A, 50 Hz		
Magnetmaterial	Arnold Magnetics N40UH 60°C		

Bei den Drahtabmessungen sind in der Tabelle 7-4 die Werte für reine Kupferleiter ohne Isolation angegeben. Die Isolation wurde bei der räumlichen Anordnung als Leerstelle berücksichtigt, wie der Abbildung 7-2 zu entnehmen ist. Die Viertelschnitte des Simulationsmodells für die beiden Wicklungstypen sind im Anhang U dargestellt. Im Rahmen dieser Simulationsstudien wird nur das Verhalten der elektromagnetisch wirksamen Materialien berücksichtigt.

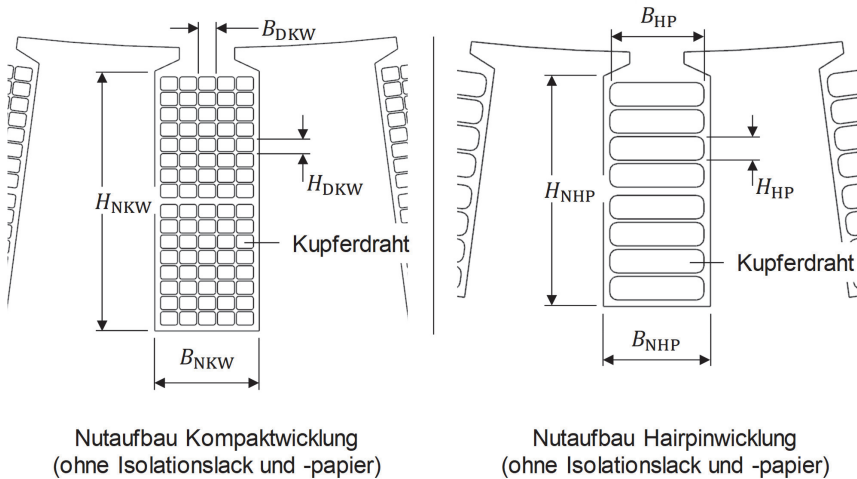


Abbildung 7-2: Darstellung der beiden unterschiedlichen Nutaufbauten der Kompaktwicklung (links) und der Hairpinwicklung (rechts) im Simulationsmodell.

Zu Beginn der Simulationen wurde eine Konvergenzstudie durchgeführt, um die geeignete Anzahl der Berechnungsschritte für jede elektrische Periode festzulegen. Aufgetragen wurde dies über die Gesamtverluste in Magneten und Wicklungen in Watt für die Kompaktwicklung. Ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und hoher Ergebnissenauigkeit zeigt Abbildung 7-3 bei einer Schrittzahl von 600. Dieser Wert wurde in den Simulationen verwendet.

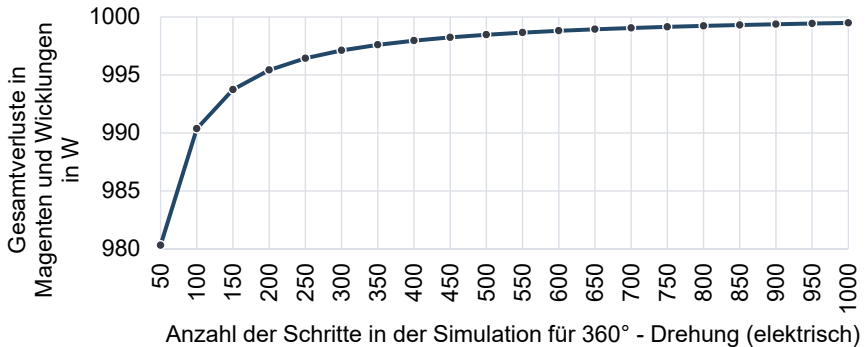


Abbildung 7-3: Analyse des Einflusses der Schrittzahl für eine Drehung des Rotors um 360° (elektrisch) in den Simulationsergebnissen bei der Kompaktwicklung.

Die Simulationen wurden in einem Bereich von 2.500 bis 50.000 U/min mit einer Schrittweite von 2.500 U/min durchgeführt, um die stark frequenzabhängigen Wechselstromverluste P_w abbilden zu können. Eine Drehzahl von 50.000 U/min entspricht beim gewählten Modell einer elektrischen Frequenz von gerundet 1,67 kHz. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Drehzahl von 50.000 U/min in der praktischen Anwendung nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisierbar ist, denn der Rotor müsste speziell gegen Bersten ausgelegt werden. Aufgrund der in diesem Beispiel niedrig angesetzten Polpaarzahl von zwei, kann davon ausgegangen werden, dass die Polpaarzahl in der Anwendung realer Traktionsantriebe größer ist und sich dadurch ihre Drehzahl bei gleicher Frequenz verringert. Wird beispielsweise die Polpaarzahl auf vier erhöht, halbiert sich die Drehzahl bei gleichbleibender elektrischer Frequenz. Aus diesem Grund wurden die Drehzahlen in entsprechende Frequenzen umgerechnet und im Folgenden angegeben. Außerdem wurden die sich aus den Wickelköpfen ergebenden Auswirkungen sowohl bei den Gleichstrom- als auch den Wechselstromverlusten nicht berücksichtigt. Unter Zugrundelegung der Annahme gleicher Wickelkopflängen ist davon auszugehen, dass die Gleichstromverluste P_g sowohl bei der Kompakt- als auch der Hairpinwicklung um den gleichen Wert steigen. Aufgrund der komplexen dreidimensionalen Wickelkopfformen und der Streufelder in den Wickelköpfen, lassen sich für die Wechselstromverluste hier keine aussagekräftigen Abschätzungen vornehmen. Vermutlich bieten aber die kleinen Teilleiter der Kompaktwicklung einen Vorteil, insbesondere wenn sie im Vergleich zu

formstabilen Hairpindrähten verdrillt werden können, um Kreisströme auszugleichen (vgl. hierzu (Vogt 2019)).

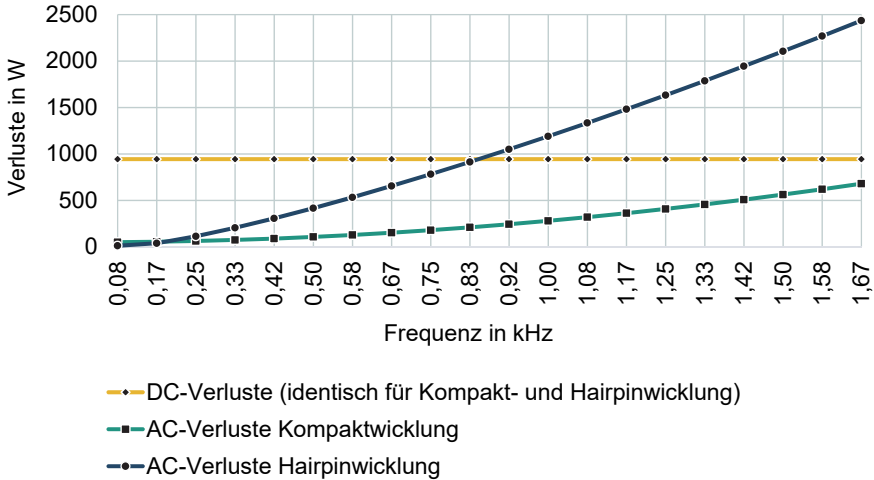


Abbildung 7-4: Gleich- und Wechselstromverluste für die Kompakt- und Hairpinwicklung über die Frequenz.

Die Ergebnisse der Gleichstrom- und Wechselstromverluste der Kompakt- und Hairpinwicklung über die Frequenzen sind in Abbildung 7-4 anhand eines Diagramms aufgetragen. Eindeutig ist daraus zu erkennen, dass die Gleichstromverluste in dieser Betrachtung von der Frequenz unabhängig sind. Der Wert für beide Wicklungen liegt bei 945 W.

Die Wechselstromverluste hingegen nehmen bei beiden Wicklungstypen zu, allerdings ist der Anstieg bei der Hairpinwicklung wesentlich größer. Es ergibt sich eine Leistung der Kompaktwicklung von 239 kW bei 0,67 kHz und 597 kW bei 1,67 kHz, für die Hairpinwicklung analog 220 kW und 550 kW. Die daraus resultierende Gesamtwirkungsgradsteigerung der Kompaktwicklung im Vergleich zur Hairpinwicklung ist in Tabelle 7-5 dargestellt. Es werden dabei nur elektromagnetische Verluste berücksichtigt, die errechneten und berücksichtigten Eisenverluste betragen bei 0,67 kHz circa 2,6 kW und bei 1,67 kHz circa 12 kW. Effekte durch Erwärmung der Wicklung sowie Luft- und Lagerreibung sind nicht im Simulationsmodell abgebildet. Eine Reduktion der Wechselstromverluste um 77 % bei 0,67 kHz kann durch die Verwendung der Kompaktwicklung abgeschätzt werden, bei 1,67 kHz sind es circa

73 %. Bezogen auf den Gesamtwirkungsgrad bedeutet dies eine Verbesserung um 1 %.

Tabelle 7-5: Auflistung der Gleich- und Wechselstromverluste der Kompakt- und Hairpinwicklung für 0,67 kHz und 1,67 kHz mit dem resultierenden Wirkungsgrad.

	Gleichstrom- verluste in W	Wechselstrom- verluste in W	Wirkungsgrad- steigerung
0,67 kHz			
Kompaktwicklung	945	153	+ 0,41%
Hairpinwicklung	945	656	
1,67 kHz			
Kompaktwicklung	945	681	+ 0,52%
Hairpinwicklung	945	2435	

Zur detaillierteren Darstellung der Verluste im Leiter wurde das zeitabhängige Verhalten untersucht. Dabei wurden die über die jeweiligen Leiterflächen integrierten Gesamtverluste der Leiter ausgegeben. Die Ergebnisse für die Leiter der Kompaktwicklung sind in der Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 für die jeweils zehn parallelen Leiter in den Bereichen der Nutöffnung und dem Nutgrund dargestellt. Erwartungsgemäß, wie auch schon in Kapitel 2.1.3 beschrieben, sind die Leiter im Bereich der Nutöffnung mit viel höheren Verlusten durchsetzt, da das Nutstreuelfeld zur Nutöffnung hin zunimmt. Die Berechnungen wurden bei einer Frequenz von 0,67 kHz ausgewertet, folglich entsprechen 1,5 ms einer mechanischen Rotordrehung von 180°, was wiederum einer Drehung von 360° im elektrischen Sinn entspricht. Weiterhin sind die Gleichstromverluste der Leiter angegeben, die erwartungsgemäß die Sinuswelle des Effektivstroms widerspiegeln. Die Werte der Gleichstromverluste ergeben sich aus dem Produkt von Effektivstrom und Gleichstromwiderstand der Leiter. Dieser Verlauf verdeutlicht das Auftreten der zusätzlichen Stromwärmeverluste.

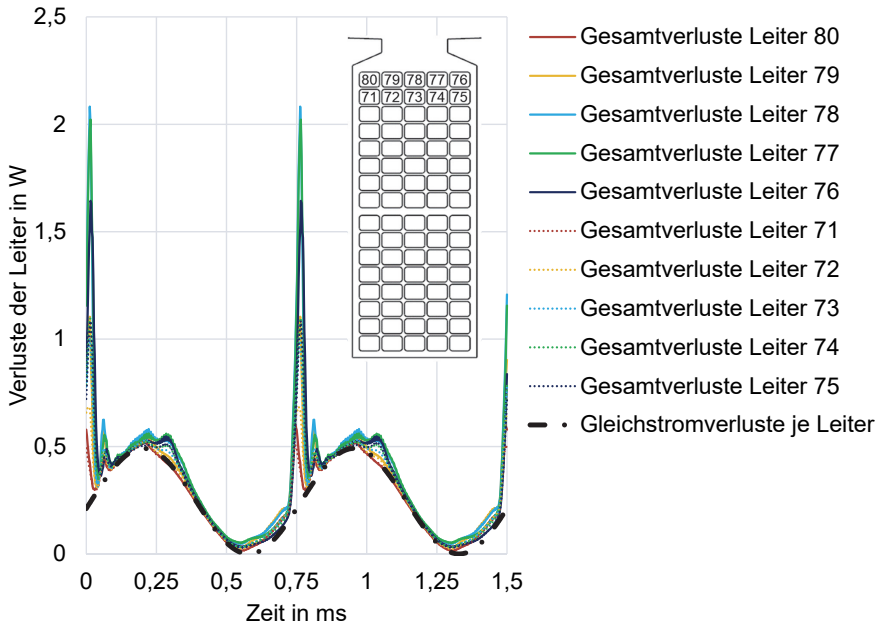


Abbildung 7-5: Transiente Gesamtverluste (bezogen auf den jeweiligen Leiter) der zehn Kompaktleiter in Richtung Nutöffnung und Gleichstromverluste je Leiter.

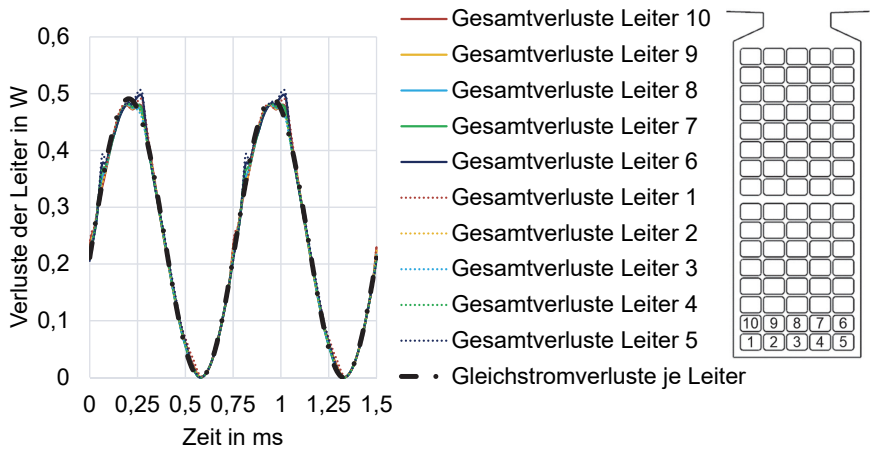
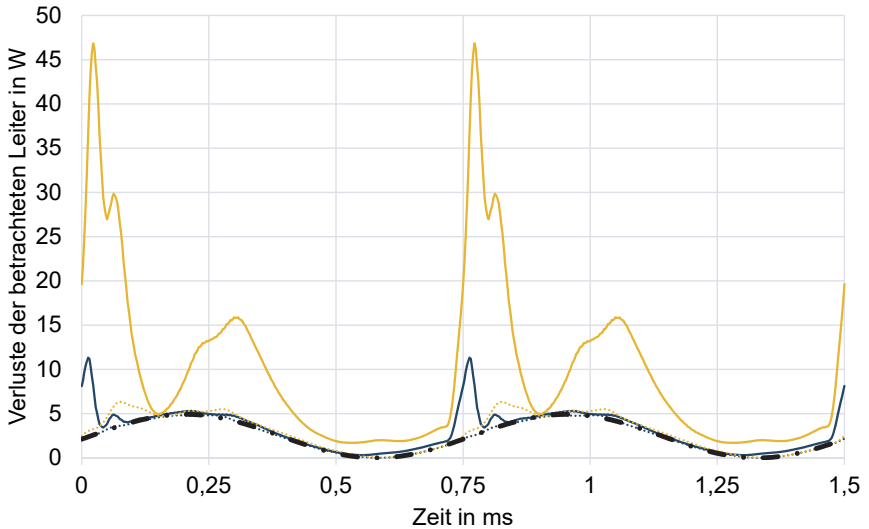
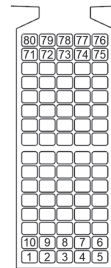


Abbildung 7-6: Transiente Gesamtverluste (bezogen auf den jeweiligen Leiter) der zehn Kompaktleiter am Nutgrund und Gleichstromverluste je Leiter.

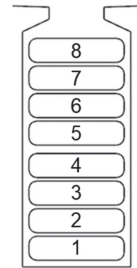
Analog wurde die Analyse für die Hairpinwicklung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-7 dargestellt. Um einen Vergleich mit der Kompaktwicklung anstreben zu können, wurden die jeweils zehn parallelen Leiter betrachtet und die Verluste der oberen und unteren zehn Leiter summiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Hairpinleiter Richtung Nutöffnung wesentlich erhöhte Verluste aufweisen.



- Gesamtverluste der zehn Leiter (71-80) an der Nutöffnung der Kompaktwicklung
- Gesamtverluste der zehn Leiter (1-10) am Nutgrund der Kompaktwicklung
- Gesamtverluste Leiter 8 an Nutöffnung der Hairpinwicklung
- Gesamtverluste Leiter 1 am Nutgrund der Hairpinwicklung
- • Gleichstromverluste je zehn Leiter der Kompaktwicklung oder ein Hairpinleiter



Kompaktwicklung



Hairpinwicklung

Abbildung 7-7: Transiente Gesamtverluste und Gleichstromverluste (bezogen auf die Leiter) des oberen (8) und unteren Leiters (1) der Hairpinwicklung im Vergleich zu den zehn summierten Kompaktleitern in Richtung der Nutöffnung (71-80) und am Nutgrund (1-10).

Diese Darstellung kann auch in einem bestimmten Zeitpunkt als Falschfarbenbild ausgegeben werden, wie in Abbildung 7-8 dargestellt. Um den Unterschied hervorzuheben, wurde 0,7625 ms als Zeitpunkt festgelegt, bei einer Frequenz von jeweils 0,67 kHz.

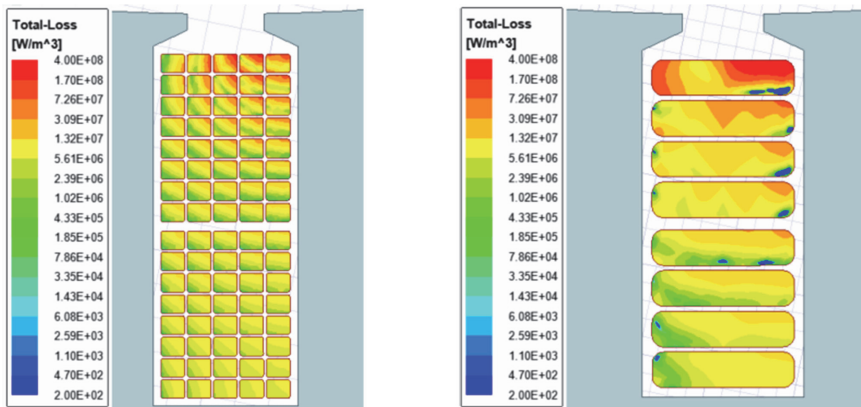


Abbildung 7-8: Darstellung der gesamten Leiterverluste pro Volumen als Falschfarbenbilder für die Kompakt- (links) und Hairpinwicklung (rechts) zum Zeitpunkt 0,7625 ms bei einer Frequenz von 0,67 kHz.

Zwei wesentliche Schlussfolgerungen können für die Kompaktwicklung aus dieser Analyse abgeleitet werden. Zum einen zeigt das vorgestellte Modell des Nutaufbaus, dass es theoretisch möglich ist, eine Kompaktwicklung mit annähernder Nutform bei gleichbleibendem Kupferquerschnitt im Vergleich zur Hairpinwicklung zu gestalten (siehe Tabelle 7-4 und Abbildung 7-2), was gleiche Gleichstromverluste von Kompakt- und Hairpinwicklung ermöglicht. Die Hairpinwicklung gilt nach aktuellem Stand der Technik in diesem Fall für hochperformante Traktionsantriebe als bestmögliche Referenz. Eine weitere Reduktion der Gleichstromverluste durch Maßnahmen der Füllfaktorerrhöhung ist bei geometrischer Betrachtung kaum noch möglich. Aus fertigungstechnischen Gründen unvermeidbare Radien an den Leiterkanten und die Notwendigkeit des Isolationsmaterials beschränken die weitere Füllfaktorerrhöhung. Weitere Reduktionen der Gleichstromverluste können demnach nur noch über die spezifische Leitfähigkeit des Leitermaterials erreicht werden, was im Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter betrachtet wird. Zum anderen ist erkennbar, dass die Kompaktwicklung den Vorteil der geringen Wechselstromverluste erst im

erhöhten Drehzahlbereich ausspielen kann. Der Gesamtwirkungsgrad kann so um bis zu 0,5 % verbessert werden. Im unteren Frequenzbereich bis 0,17 kHz ist allerdings festzustellen, dass die Wechselstromverluste der Hairpinwicklung geringer sind als bei der Kompaktwicklung. Hier nicht ausgewertet wird, ob die Verlustmechanismen bei der Kompaktwicklung zu höheren Wechselstromverluste führen. Eine mögliche Hypothese zur Erklärung dieses Phänomens ist der Proximity-Effekt, der durch die benachbarten Leiter und eine höhere Leiteranzahl bei der Kompaktwicklung verursacht wird. Der Skin-Effekt und der durch das Nutstrefeld verursachte Proximity-Effekt, wirken sich mit großer Wahrscheinlichkeit erst bei höheren Frequenzen entscheidend positiv auf die Kompaktwicklung aus.

7.3 Thermische Analyse der Kompaktwicklung

Zur Bewertung der thermischen Leitfähigkeit der Kompaktwicklung in der Nut wurden simulative und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde die Kompaktwicklung der Hairpinwicklung, der wilden Wicklung und der lagengenauen Wicklung in einer Modellanordnung gegenübergestellt.

Die Übertragung von Wärme kann prinzipiell in zwei wesentliche Mechanismen aufgeteilt werden, nämlich die Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

Die **Wärmeleitung** in festen Stoffen oder ruhenden Medien wird als Konduktion bezeichnet. Wärmeleitung in Form von Konduktion ist vom Temperaturgradienten und den Eigenschaften des Stoffs abhängig. Bei Wärmeleitung in strömenden Fluiden, der sogenannten Konvektion, sind zusätzlich die Dichte, der Druckunterschied und die Strömungsgeschwindigkeit mit einzubeziehen. (Böckh & Wetzel 2015, S. 4) Grundlegende Informationen und Herleitungen dazu können der Fachliteratur entnommen werden (Lienhard 2020; Venkateshan 2021; Sidebotham 2015; Herwig & Moschallski 2019). Bei der Analyse des thermischen Verhaltens von Wicklungen in Statornuten elektrischer Maschinen ist die Konduktion der entscheidende Wärmetransportvorgang. Konvektion tritt in Traktionsantrieben zwar auch auf, beschränkt sich allerdings vorrangig auf die Wärmeabfuhr aus dem Antrieb mittels des Kühlmediums, wie es beispielsweise bei einer Mantelkühlung in den Kühlkanälen auftritt. Auch eine direkte Kühlung der Wickelköpfe mit Kühlflüssigkeiten ist möglich und beruht auf Konvektion. Da der Vorgang jedoch außerhalb der Nut stattfindet, wird er im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Wärmestrahlung tritt innerhalb von Traktionsantrieben in einem derart kleinen Anteil auf, dass diese häufig vernachlässigbar ist und aus diesem Grund hier auch nicht weiter betrachtet wird. (Halwas et al. 2021)

Der im folgenden Kontext wichtige Zusammenhang für Wärmeleitungsvorgänge mittels Konduktion ist in der Formel 7-1 enthalten und wirkt zwischen dem thermischen Widerstand R_{th} , der Wärmeleitfähigkeit λ_{th} und den geometrischen Abmessungen der Probe:

$$R_{th} = \frac{l_{Probe}}{\lambda_{th} \cdot A_{Probe}} \quad \text{Formel 7-1}$$

Dabei ist l_{Probe} die Länge und A_{Probe} die Querschnittsfläche der jeweils betrachteten Probe. Eine Unterscheidung zwischen dem axialen und dem radialen thermischen Widerstand ist notwendig, da in der Statornut ein großer Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten zwischen der axialen und radialen Richtung besteht. Bei der Betrachtung der Nutmodelle in Abbildung 7-9 zeigt die axiale Richtung in die Bildebene. (Halwas et al. 2021) Die Kupferleiter verlaufen in axiale Richtung und die Wärmeleitfähigkeit der Leiter kann als Parallelschaltung angenähert werden. Dadurch ist die Wärmeleitfähigkeit in axiale Richtung $\lambda_{th,axial}$ hoch und entspricht, bei hohen Füllgraden, beinahe der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer. Wie bereits in wissenschaftlichen Veröffentlichungen gezeigt (Oechslen 2018), ist $\lambda_{th,axial}$ folglich stark vom Füllfaktor abhängig und wird an dieser Stelle nicht tiefergehend betrachtet. In radialer Richtung hingegen ist die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{th,radial}$ durch den inhomogenen Aufbau verschiedenster Leiter- und Isolationsmaterialien wesentlich geringer. In Abbildung 7-9 ist die radiale Richtung des thermischen Flusses entlang der Bildebene (z.B. von links nach rechts). Für die Entwärmung der Wicklung im Stator ist der radiale Wärmefluss aus der Nutmitte in Richtung des Kühlmantels ein entscheidender Faktor. Dies ist sowohl bei gängigen Traktionsantrieben, als auch bei vielen weiteren Applikationen elektrischer Maschinen der Fall. (Halwas et al. 2021)

Nach ausführlicher Recherche wissenschaftlicher Veröffentlichungen zur Wärmeübertragung innerhalb elektrischer Maschinen (siehe Halwas et al. 2021) kann die thermische Analyse der in der Nut liegenden Wicklungsabschnitte analytisch, numerisch oder experimentell durchgeführt werden. Diese Methoden können auch kombiniert zur Anwendung kommen. Eine Übersicht gängiger Methoden ist in

Anhang V aufgelistet, die nach den drei bekannten Analysemethoden kategorisiert sind. Analytische und numerische Verfahren können dabei das thermische Verhalten nur so präzise abbilden, wie sie im Modell berücksichtigt sind. Insbesondere bei vereinfachten analytischen Modellen kann es deshalb zu großen Abweichungen von der Realität kommen. Bei experimentellen Untersuchungen hingegen sind Unsicherheiten des Versuchsaufbaus und dessen Umgebung zu berücksichtigen, wie etwa eine nicht perfekte Isolation und daraus resultierende Wärmeströme in die Umgebung, was zu abweichenden Wärmeleitfähigkeiten führen kann. Auch weist die verwendete Messtechnik Messunsicherheiten auf. Um die vorliegenden Wicklungsproben zu charakterisieren, werden Thermoelemente des Typs K mit der Toleranzklasse 2 verwendet, die eine zulässige Grenzabweichung von $\pm 2,5\text{ °C}$ besitzen (siehe DIN EN 60584-1:2014-06, Tabelle 12). Analytische und numerische Ansätze haben den Vorteil, dass mit Hilfe der aufgebauten Modelle verschiedene Leiter- und Nutgeometrien ohne hohen experimentellen Aufwand untersucht werden können. Nach der Validierung durch Experimente können die Modelle für Vorhersagen der Wärmeleitfähigkeiten zukünftiger Wicklungen genutzt werden. Deshalb werden hier alle drei Ansätze angewandt. (Halwas et al. 2021; Hoffmann et al. 2022)

Tabelle 7-6: Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten Materialien in den folgenden analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen. (Hoffmann et al. 2022)

<i>Materialbezeichnung</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)</i>
Vergussharz ELANTAS: ELANTRON MC62/360F	0,90
Vergussharz Huntsman: Araldite CW1446BDF/Aradur HY2919	0,67
Imprägnationsharz ELANTAS: ELAN-protect UP142	0,23
Isolationslack ESSEXFURUKAWA: Magnebond CAB-200 G2B (THEIC - PEI + PAI + PA)	0,26
Isolationspapier TRIVOLTHERM: NKN 2520	0,20
Kupferleiter	385

In Anhang W sind Literaturwerte für die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten der gängigen Materialien innerhalb eines typischen Nutaufbaus angegeben. Die für die folgenden Untersuchungen zugrunde gelegten Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten Materialien in den Wicklungen sind in der Tabelle 7-6 aufgeführt (vgl. Hoffmann et al. 2022).

Aus dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Literatur (vgl. Halwas et al. 2021) lässt sich weiterhin ableiten, dass bisher keine umfassenden Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen der Wärmeleitfähigkeit für die verschiedenen Lagenaufbauten und Füllfaktoren mit vergleichbaren Randbedingungen durchgeführt wurden. Insbesondere die Nachbildung und Vermessung einer möglichst realistischen Nut, wie sie in elektrischen Maschinen verbaut ist, wurde bisher nicht untersucht. Als verschiedene Lagenaufbauten sollen zur Bewertung der Kompaktwicklung sowohl Rechteck- als auch Runddrahtwicklungen untersucht werden. Bei Rechteckdraht wird der Nutaufbau der Hairpinwicklung adressiert, bei Runddrahtwicklungen wird die Anordnung der Drähte bei der wilden Wicklung, der lagengenauen Wicklung und der Kompaktwicklung untersucht. Diese Lagenaufbauten sind in Abbildung 7-9 schematisch dargestellt. (Halwas et al. 2021)

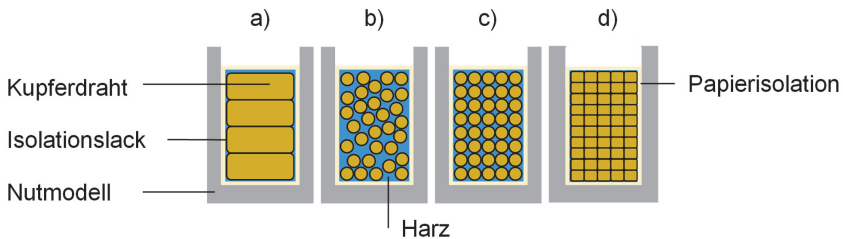


Abbildung 7-9: Schematische Darstellung der untersuchten Lagenaufbauten innerhalb einer Modellnut: a) Hairpinwicklung, b) wilde Wicklung, c) lagengenauere Wicklung und d) Kompaktwicklung.

In diesem Zusammenhang wird die Wärmeleitfähigkeit der in die Nut eingelegten Wicklung, mit sämtlichen weiteren Isolations- und Füllstoffen³⁰, wie Isolationspapier, Harz oder Vergussmasse, untersucht. Es ist dabei vorteilhaft, eine möglichst hohe

³⁰ An dieser Stelle ist auf Kapitel 2.2.3 zu verweisen und zu beachten, dass der Isolationslack des Drahtes und das Isolationspapier (Nutgrundisolation) zu den elektrischen Isoliermaterialien (EIM) zählen. Die Imprägnations- oder Vergussharze werden als nicht-elektrische Isoliermaterialien (NIM) zusammengefasst, siehe hierzu auch Abbildung 7-10.

Wärmeleitfähigkeit zu erzielen. Entscheidend für die hier durchgeführte Analyse der Kompaktwicklung ist der Nutaufbau, denn die Kompaktwicklung soll im Hinblick auf ihre Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur Hairpinwicklung, der wilden und der lagengenauen Wicklung bewertet werden. Da diese verschiedenen Wicklungstypen unterschiedliche Füllfaktoren und Materialverteilungen besitzen, sind in der thermischen Analyse neben den Nutaufbauten auch die Füllfaktoren, Drahtdurchmesser und Harzeigenschaften zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die vier Lagenaufbauten aus Abbildung 7-9 mittels dem analytischen, numerischen und experimentellen Ansatz untersucht.

Ein Ansatz der **analytischen Modellbildung** zur Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung $\lambda_{th,radial}$ sind vereinfachte thermische Netzwerke. Dabei wurden hier ein einfacher Lagenaufbau, ein paralleler Aufbau, ein serieller Aufbau und ein kombinierter Aufbau betrachtet, wie in Abbildung 7-10 dargestellt. Die Ansätze wurden analog bereits bekannter Arbeiten aufgebaut (Halwas et al. 2021; Hoffmann et al. 2022; Oechslen 2018).

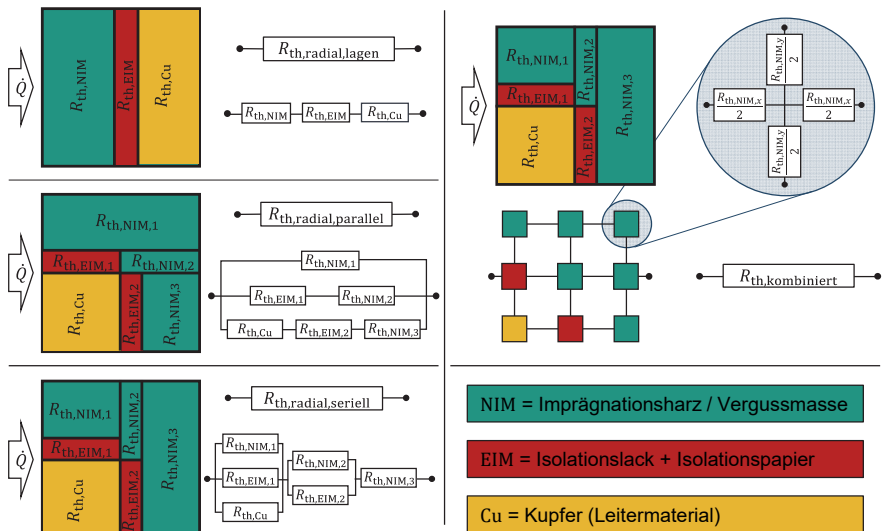


Abbildung 7-10: Graphische Darstellung der vier aufgebauten und untersuchten thermischen Netzwerke zur Berechnung der radialen Wärmeleitfähigkeit durch die Nut. Oben links: Lagenaufbau; Mitte links: paralleler Aufbau; unten links: serieller Aufbau; oben rechts: kombinierter Aufbau; unten rechts: Legende. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2021; Hoffmann et al. 2022; Oechslen 2018))

Bei der **numerischen Modellbildung** wurde eine 2D-FEA mit Hilfe der MATLAB® PDE Toolbox durchgeführt. Diese wurde vor allem zur Überprüfung der Ergebnisse der analytischen Berechnungen eingesetzt. Berücksichtigt wurden die geometrischen Abmessungen und die Materialparameter der Proben. (Hoffmann et al. 2022)

Für die **experimentellen Untersuchungen** wurde zunächst der in Abbildung 7-11 dargestellte Messaufbau konzipiert (siehe A_Bader 2021; A_Heyde 2021). Dabei wird die zu untersuchende Wicklungsprobe zwischen zwei Aluminiumplatten des Typs EN-AW6060 eingespannt, bei der eine Wärmeleitfähigkeit von 200 W/(mK) angenommen wird. Die beiden Platten und die Probe werden durch vier Nygonschrauben zusammengepresst, um den thermischen Übergang möglichst gering zu halten. In der linken Aluminiumplatte kann ein definierter Wärmestrom mittels einer zentral eingeklebten Heizpatrone eingeprägt werden. Mithilfe eines regelbaren DC-Netzteils kann die Heizpatrone mit einer Leistung von bis zu 200 W betrieben werden. An der rechten Platte ist zur Umgebung hin ein Kühlkörper angebracht. Dieser besteht aus Kühlrippen und einem Lüfter, der die erwärmte Luft absaugt. In beiden Aluminiumplatten sind jeweils drei Thermoelemente des Typs K (siehe DIN EN 60584-1:2014-06) zur Temperaturmessung eingebracht. Um den Wärmefluss in die Umgebung zu reduzieren, der vor allem durch natürliche Konvektion entsteht, wurde mit Wärmedämmwolle aus Calcium-Magnesium Silikat und Aluminiumtape eine Isolationshülle aufgebaut. Für die Isolationshülle wurde im Rahmen der Modellbildung eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(mK) der Wärmedämmwolle angenommen. Zusätzlich wurden Wärmedämmplatten aus Calcium-Magnesium Silikat in die Zwischenräume zwischen den Aluminiumplatten gesteckt, um den Wärmestrom möglichst nur durch die Probe zu leiten und die Wärmeübertragung durch Strahlung zu reduzieren. (Halwas et al. 2021; Hoffmann et al. 2022)

Anhand des in den Versuchsaufbau eingebrachten Wärmeflusses \dot{Q} durch die Heizpatrone und der gemessenen Temperaturdifferenz ΔT an den Thermoelementen der beiden Aluminiumplatten, kann die resultierende Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Probe $\lambda_{\text{th,res}}$ in radialer Richtung mit Hilfe der Breite b_{Probe} und der Querschnittsfläche A_{Probe} bestimmt werden (Hoffmann et al. 2022):

$$\lambda_{\text{th,res}} = \frac{\dot{Q} \cdot b_{\text{Probe}}}{\Delta T \cdot A_{\text{Probe}}} \quad \text{Formel 7-2}$$

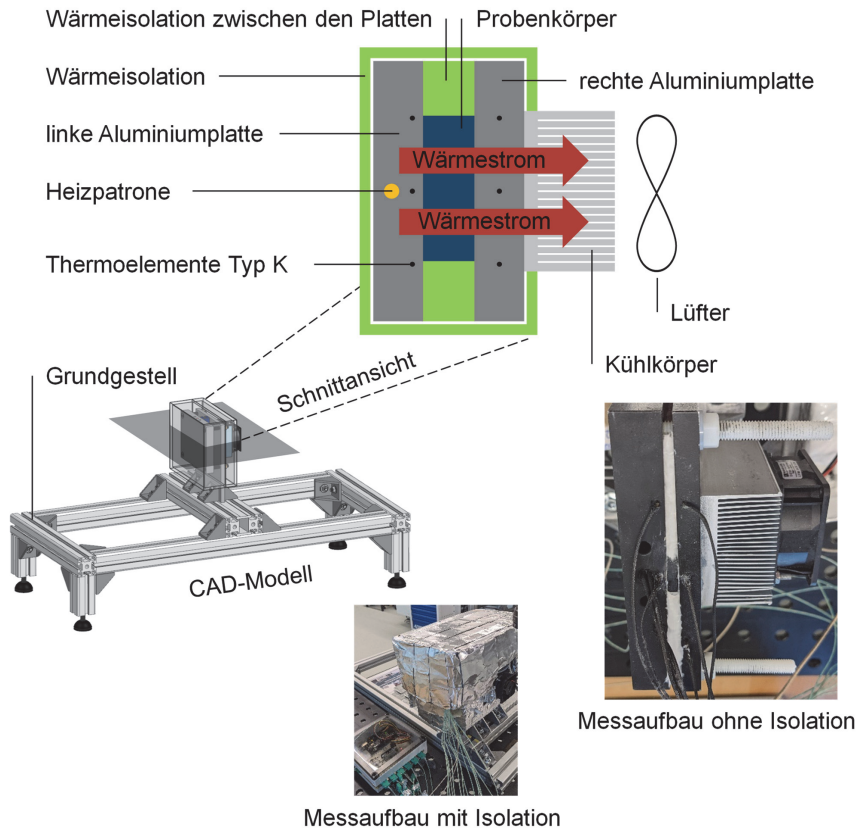


Abbildung 7-11: Darstellung des entwickelten und genutzten Messaufbaus zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Wicklungsproben. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Bader 2021; A_Heyde))

Um Querflüsse durch die Wicklungsprobe zu vermeiden, wurde ein Probenaufbau entwickelt, der nur aus Drähten, Isolationspapier und Harz- oder Vergussmasse besteht, der aber kein Joch aus Weicheisen besitzt. Die entsprechenden Wicklungsproben sind in Abbildung 7-13 dargestellt. Zur die Probenerstellung ist ein Vergusswerkzeug notwendig (siehe Abbildung 7-12).

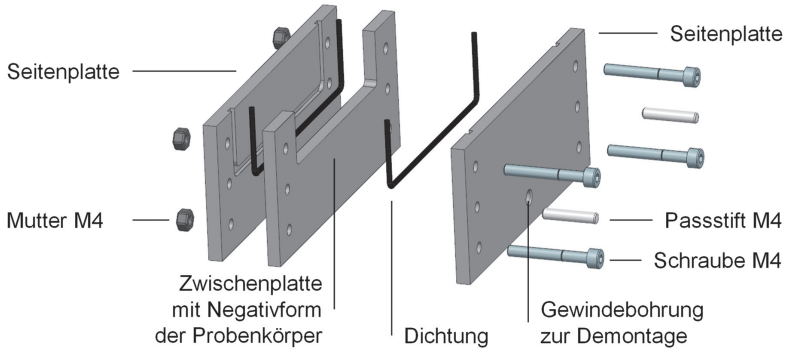


Abbildung 7-12: Schematische Darstellung des Vergusswerkzeugs zur Herstellung der Wicklungsproben für die Hauptversuchsreihe.

Die in der experimentellen Versuchsreihe verwendeten Proben (Abbildung 7-13) besitzen jeweils eine Dicke von 5 mm, eine Höhe von 19 mm und eine Länge von 160 mm. Daraus ergibt sich eine Querschnittsfläche der Probe A_{Probe} von 3040 mm^2 . Die exakten Maße der jeweiligen Proben wurden mit einer Bügelmessschraube gemessen, da jede Probe durch die Fertigungstoleranzen geometrische Abweichungen im Zehntel-Millimeterbereich aufweist. Diese Abweichungen haben bereits deutlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und müssen deshalb berücksichtigt werden. (Hoffmann et al. 2022) Die weiteren geometrischen Abmessungen der Leiter sind in Tabelle 7-7 aufgelistet. Die analytischen und numerischen Modelle sind analog der angegebenen geometrischen Werte aufgebaut.

Tabelle 7-7: Übersicht der geometrischen Werte der Leiter der untersuchten Proben in der Hauptversuchsreihe; analytisch, numerisch sowie experimentell gemäß DIN EN 60137-0-2/-0-4 und DIN EN 60317-0-1:2014-09. (erweitert nach (Hoffmann et al. 2022))

Lagenaufbau	Drahtanzahl	Leiterabmessungen	elektrischer Füllfaktor
Hairpinwicklung	8	4 x 2 mm (G2)	64 %
wilde Wicklung	80	0,71 mm (G2B)	33,5 %
lagengenaue Wicklung	100	0,71 mm (G2B)	42 %
Kompaktwicklung	110	0,71 mm (G2B)	46 %

In der experimentellen Hauptversuchsreihe wurden die Hairpin-, die wilde, die lagengenaue und die Kompaktwicklung jeweils mit den zur Verfügung stehenden NIM vergossen, beziehungsweise imprägniert. Als Vergussharze wurden dabei das

ELANTAS: ELANTRON MC62/360F und das Huntsman: Araldite CW1446BDF/Aradur HY2919 verwendet, als Imprägnationsharz wurde der Typ ELANTAS: ELAN-protect UP142 eingesetzt. Die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten dieser NIM und der weiteren EIM sind in Tabelle 7-6 aufgelistet. Zusätzlich wurden neben dem Wert von 0,71 mm bei der wilden Wicklung vier weitere Leiterdurchmesser getestet, nämlich 0,53 mm, 1 mm, 1,25 mm und 1,5 mm. Als Kupferlackdraht wurde ESSEXFURUKAWA: Magnebond CAB-200 G2B verwendet; dieser ist ein auf Polyetherimid, Polyamidimid und Polyamid basierender Backlack. Der Einsatz des Backlackdrahts war notwendig, weil die lagengenaue Wicklung und die Kompaktwicklung nach der Herstellung außerhalb des in Abbildung 7-12 gezeigten Vergusswerkzeugs in eine feste Struktur verbacken werden musste, um diese im Anschluss in das Vergusswerkzeug einlegen zu können. Ein Nachteil ist dabei, dass die einzelnen Drahtbündel aus jeweils zehn einzelnen Drähten bestehen und sich bei der Montage in das Vergusswerkzeug unbeabsichtigt verschieben. Wie bereits erwähnt, ist dies auf den Einsatz des Vergusswerkzeugs zurückzuführen, das Fügespalten vorweist. Außerdem wurden die Durchmesser bei dem Nutaufbau der wilden Wicklung und dem Einsatz des Vergussharzes ELANTAS: ELANTRON MC62/360F variiert. Neben dem Leiterdurchmesser von 0,71 mm wurden die weiteren Durchmesser 0,53 mm, 1,0 mm, 1,25 mm und 1,5 mm getestet. Die vom Leiterdurchmesser 0,71 mm abweichenden Runddrähte haben eine an die DIN EN 60317-0-1:2014-09 angelehnte Lackschichtdicke des Grads 2, teilweise aber andere Lackisolationen, wie beispielsweise der ESSEXFURUKAWA: Magnetemp CA-200 G2, weil bei der Erstellung der wilden Wicklungen kein Bonding notwendig ist. Die eingesetzten Lackarten sind aber alle aus Polyetherimid und Polyamidimid zusammengesetzt, weshalb der Wert der Isolationslackschicht von ESSEXFURUKAWA: Magnebond CAB-200 G2B für die Wärmeleitfähigkeit angenommen werden kann. (Hoffmann et al. 2022)

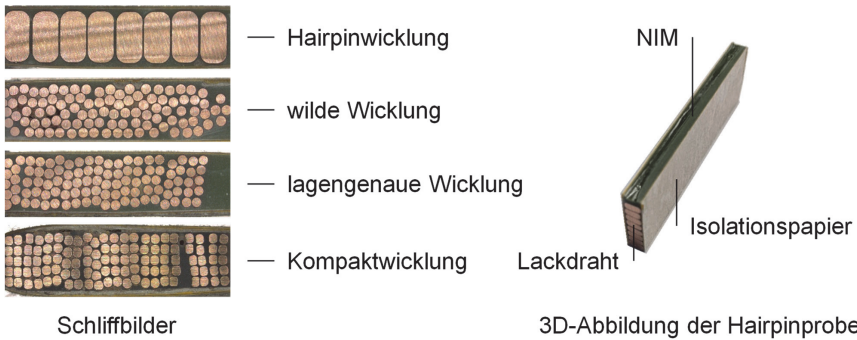


Abbildung 7-13: Ansicht der verwendeten Proben in der Hauptversuchsreihe. Mikroskopaufnahmen der Schlifffbilder³¹ (links) und dreidimensionale Aufnahme der Hairpinprobe (rechts).

Bevor im folgenden Abschnitt die **Ergebnisse** der analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen der Versuchsreihe erläutert und diskutiert werden sollen, sind die vier analytischen Ansätze dem numerischen Modell zunächst gegenübergestellt, wie aus Abbildung 7-14 ersichtlich. Ziel ist es dabei, ein möglichst präzises aber schnell zu rechnendes Modell zur Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse auszuwählen. Hierbei wurden die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über den Wertebereich der Wärmeleitfähigkeiten des NIM von $0,2 \text{ W/(mK)}$ bis 1 W/(mK) aufgetragen. Die Ergebnisse des numerischen Simulationsmodells können an dieser Stelle zur ersten Einschätzung der analytischen Ansätze genutzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier nur die radialen Wärmeflüsse und die lagengenaue Wicklung (aufgrund der exakten Kenntnis der Lage der Drähte) berücksichtigt wurden. In den Modellen können aber neben den rein horizontalen Wärmeflüssen auch vertikale Flüsse kombiniert werden. Flüsse in axialer Richtung haben einen zusätzlichen Einfluss auf die radiale Wärmeleitung, können aber in den hier verwendeten zweidimensionalen Modellen nicht berücksichtigt werden. (Halwas et al. 2021)

³¹ Die Schlifffbilder wurden nach der Vermessung auf dem Messaufbau angefertigt.

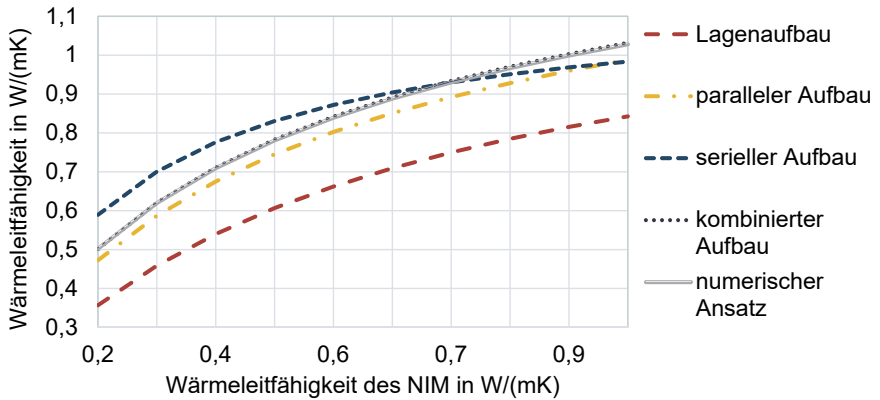


Abbildung 7-14: Vergleich der vier analytischen Modelle mit dem numerischen Ansatz anhand des Nutaufbaus der lagengenauen Wicklung. Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über die Wärmeleitfähigkeiten der NIM von 0,2 W/(mK) bis 1 W/(mK). (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022))

In Abbildung 7-14 ist erkennbar, dass der analytische Ansatz des Lagenaufbaus die Wärmeleitfähigkeit in der Wicklung deutlich unterschätzt, weil im angenommenen Aufbau der Wärmefluss in Reihe durch die gesamten Materialien nacheinander fließt und vertikale Flüsse nicht auftreten. Dies ist aus dem in Abbildung 7-10 gezeigten Ersatzschaltbild ersichtlich. Der parallele Aufbau teilt die Komponenten in drei parallel geschaltete Schichten auf und berücksichtigt dabei, dass die Nut nicht vollständig mit Leitern gefüllt ist. Der parallele Aufbau unterschätzt folglich die Wärmeleitfähigkeiten, allerdings in einem deutlich reduzierteren Maß als der Ansatz des Lagenaufbaus. Der serielle Aufbau berücksichtigt zusätzlich, dass die Nut nicht vollständig mit NIM in radiale Richtung gefüllt ist. Der serielle Aufbau überschätzt die Wärmeleitfähigkeit der Wicklung in Bereichen der niedrigen Leitfähigkeiten des NIM und unterschätzt diesen bei höheren Werten des NIM. Der kombinierte Aufbau liegt näherungsweise exakt auf der Kurve des numerischen Ansatzes. Die hohe Übereinstimmung des kombinierten Aufbaus mit den numerischen Ergebnissen kann darauf zurückgeführt werden, dass sowohl horizontale als auch vertikale Wärmeflüsse in der Ebene berücksichtigt werden (vgl. Oechsle 2018). Das kombinierte Modell hat eine beinahe deckungsgleiche Übereinstimmung mit dem numerischen Modell und ist darüber hinaus wesentlich zeiteffizienter für die verschiedenen Proben aufzubauen und zu berechnen. Aus diesem

Grund wird im Folgenden zum Vergleich der experimentellen Ergebnisse der Hauptversuchsreihe der kombinierte Aufbau des analytischen Modells eingesetzt. (Hoffmann et al. 2022)

Die Ergebnisse der vier Wicklungstypen über verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des NIM sind der Abbildung 7-15 zu entnehmen. Die Ergebnisse des kombinierten Aufbaus des analytischen Modells werden als Kurve dargestellt, die Messergebnisse hingegen sind als Markierungen der entsprechenden Werte der drei verschiedenen NIM angegeben. Erwartungsgemäß steigt die Wärmeleitfähigkeit der Wicklung bei einer höheren Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten NIM. Bei Betrachtung der Kurven wird deutlich, dass die Zunahmen (Kurvesteigungen) der Wärmeleitfähigkeiten der Wicklungen bei steigenden Wärmeleitfähigkeiten der NIM abnehmen und sich die Kurven leicht einander annähern. (Hoffmann et al. 2022)

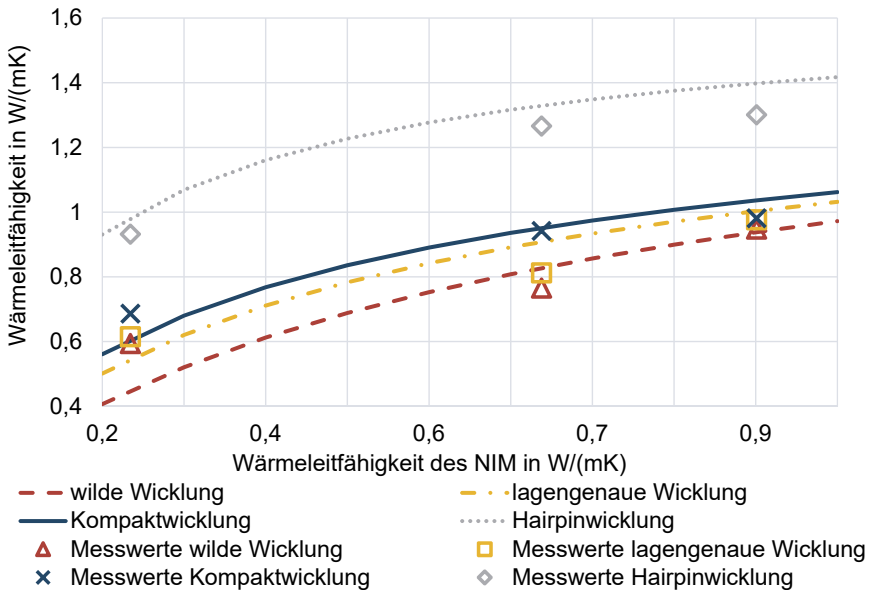


Abbildung 7-15: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über die Wärmeleitfähigkeit der NIM von 0,2 W/(mK) bis 1 W/(mK). (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022))

Bei einer Wärmeleitfähigkeit des NIM von 0,23 W/(mK) ergibt sich für die Kompaktwicklung ein errechneter Wert von 0,6 W/(mK) und ein gemessener Wert von

0,69 W/(mK). Damit ist die errechnete Wärmeleitfähigkeit der Kompaktwicklung um 38 % höher als die der wilden Wicklung, während die Hairpinwicklung nochmals 39 % höher liegt als die Kompaktwicklung. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,9 W/(mK) des NIM liegt die berechnete Wärmeleitfähigkeit der Kompaktwicklung bei 1,03 W/(mK) und bei 0,98 W/(mK) in der Messung. Die Steigerung im Verhältnis zur wilden Wicklung beträgt nur noch 10 % und die Wärmeleitfähigkeit der Hairpinwicklung ist 26 % höher als die der Kompaktwicklung. Der nur noch geringe Abstand von 10 % der Kompaktwicklung zur wilden Wicklung kann damit erklärt werden, dass bei einer besseren Wärmeleitfähigkeit des NIM der Einfluss der Wärmeleitfähigkeiten der EIM dominanter wird. Besonders bei der Kompaktwicklung reduziert der höhere Anteil des Isolationslacks auf den Drähten die Wärmeleitfähigkeit, im Vergleich zur wilden Wicklung mit geringeren elektrischen Füllfaktoren. (Hoffmann et al. 2022)

Die gemessenen Werte der Wicklungsproben bestätigen die errechneten Wärmeleitfähigkeiten mit einer mittleren Abweichung von 0,06 W/(mK), was bei einer Leitfähigkeit der Proben bei 1 W/(mK) einem Wert von 6 % entspricht. Diese können mit folgenden Effekten erklärt werden: Abweichungen der gefertigten Proben von den idealen Modellen, Wärmeflüsse vom Messaufbau in die Umgebung sowie sonstige Messunsicherheiten. Beachtlich ist dabei, dass die Messungen bei geringer Wärmeleitfähigkeit des NIM von 0,23 W/(mK) besonders bei der wilden Wicklung wesentlich besser sind als berechnet. Dies wird wahrscheinlich dadurch verursacht, dass die Drähte der wilden Wicklung im experimentellen Aufbau, aber auch bei den anderen Runddrahtproben, nicht wie im Modell exakt geradlinig und axial durch die Nut verlaufen. Dadurch entsteht ein axialer Wärmefluss durch die gut leitenden Kupferleiter, der die radiale Wärmeleitfähigkeit begünstigt. An den höheren Wärmeleitfähigkeiten des NIM wird erkennbar, dass besonders die Leitfähigkeit der Kompaktwicklung und lagengenauen Wicklung in der Berechnung überschätzt wird, somit die Messwerte tiefer liegen als die berechneten Werte. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Harze mit steigender Wärmeleitfähigkeit auch mehr Füllstoffe besitzen und dadurch eine höhere Viskosität³² aufweisen. Dadurch werden die durch die Kompaktierung entstehenden schmalen Leerstellen in der Kompaktwicklung nicht mehr ausreichend

³² Laut Datenblatt besitzt das Imprägnationsharz ELANTAS: ELAN-protect UP142 mit 0,23 W/(mK) bei 23°C eine Viskosität von 1000 mPas, während das Vergusscharz (Mischung) Huntsman: Araldite CW1446BDF/Aradur HY2919 mit 0,67 W/(mK) bei einer deutlich höheren Temperatur von 40°C eine Viskosität von 1100 mPas aufweist.

gefüllt und es entstehen mehr Lufteinschlüsse beim Vergießen innerhalb des Wicklungsaufbaus. Dies trifft auch auf die lagengenaue Wicklung zu, auch hier entstehen durch die höhere Packungsdichte der Drähte Lufteinschlüsse. Die Lüfteinschlüsse könnten deshalb für die zu niedrig gemessenen Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zur Berechnung ursächlich sein. (Hoffmann et al. 2022)

Um den Einfluss des Isolationslacks der Drähte genauer untersuchen zu können, wurde der Leiterdurchmesser bei den Runddrahtwicklungen variiert. Die Werte der berechneten und gemessenen Wärmeleitfähigkeit der drei möglichen Runddrahtwicklungen sind in Abbildung 7-16 dargestellt. Hierbei wurde der Füllfaktor konstant gehalten und als NIM das Vergussharz ELANTAS: ELANTRON MC62/360F eingesetzt – beziehungsweise dessen Wärmeleitfähigkeit in den Berechnungsmodellen hinterlegt. Dabei ist festzustellen, dass die Wärmeleitfähigkeit über den steigenden Leiterdurchmesser zunimmt. Dies ist darin begründet, dass das Verhältnis der Lackisolation zum Kupfer des Leiters bei steigendem Drahtdurchmesser sinkt. Weil die Lackisolation im Vergleich zum Vergussharz (NIM) eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist, begünstigt ein geringerer Anteil an Lackisolation eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Auch ist nach DIN EN 60317-0-1:2014-09 festzustellen, dass beim gleichbleibenden Isolationsgrad, wie in diesem Fall Grad 2, aber sinkendem Leiterdurchmesser, die Isolationssschicht nicht im gleichen Verhältnis sinkt, sondern der Isolationsanteil sogar steigt (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 125). Dieses Verhältnis ist im Anhang X dargestellt. Die Messergebnisse der wilden Wicklung liegen über den berechneten Werten. Wie bereits erörtert, ist das auf die in axialer Richtung verdrehten Leiter der realen Proben zurückzuführen. Dennoch bestätigten die Messwerte den Verlauf der analytischen Berechnung des kombinierten Modells. Die Kompaktwicklung besitzt beim Leiterdurchmesser von 0,5 mm eine errechnete Wärmeleitfähigkeit von 0,986 W/(mK) und 1,139 W/(mK) bei 1,5 mm. Daraus resultiert eine Verbesserung um 15,5 %. Da das in Anhang P gezeigte Verhältnis der Leiterdurchmesser zur Isolationssschichtdicke aber nicht kontinuierlich steigt, sondern die Kurve abflacht, ist die Steigerung des Leiterdurchmessers über die hier gezeigten Maße bei Traktionsantrieben vermutlich nicht sinnvoll. Dies gilt insbesondere für die Kompaktwicklung, weil in diesem Fall die festgestellten Stromwärmeverluste (siehe Kapitel 7.2) ebenfalls zunehmen würden. Weiterhin verursachen größere Drahtdurchmesser in den Statornuten aufgrund größerer Fehlstellen geringere

elektrische Füllfaktoren (vgl. Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 98) und damit auch eine geringere Wärmeleitfähigkeit, wie im nächsten Abschnitt gezeigt.

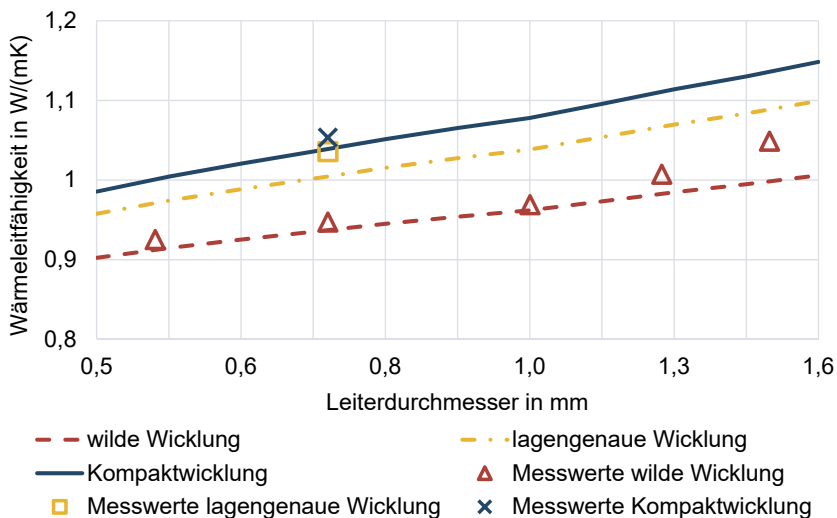


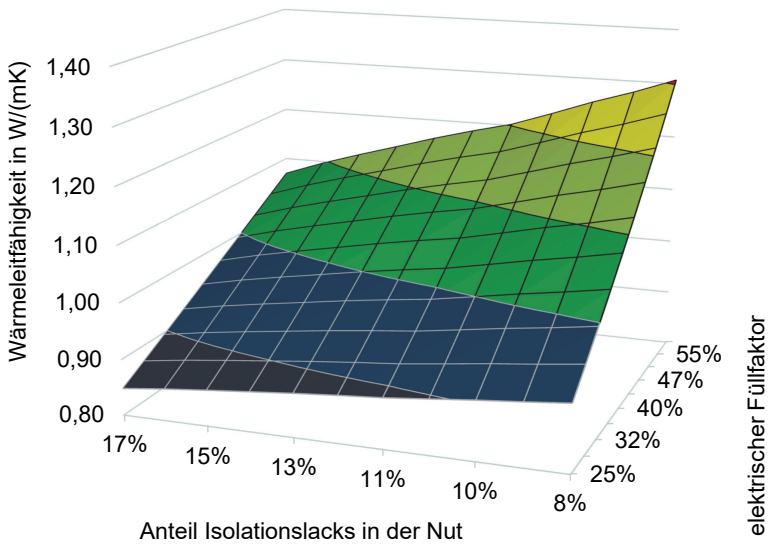
Abbildung 7-16: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über einen variierenden Leiterdurchmesser von 0,5 mm bis 1,6 mm bei der Verwendung des Vergusscharzes ELANTAS: ELANTRON MC62/360F und konstantem elektrischen Füllfaktor. Die Dicke des Isolationslackes richtet sich nach DIN EN 60317-0-1:2014-09 mit dem Grad 2. (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022))

Zur Analyse des angesprochenen Einflusses des elektrischen Füllfaktors und des Anteils des Isolationslackes auf die Wärmeleitfähigkeit der Wicklung, wurde der unter Abbildung 7-17 gezeigte dreidimensionale Flächengraph erstellt. Die Werte basieren auf dem analytisch berechneten kombinierten Modell. Dabei wurde der Füllgrad des Isolationspapiers FG_{Papier} mit einem konstanten Wert von 8 % verwendet. Die Summe aus den Füllgraden des Isolationslackes FG_{Lack} , des Isolationspapiers FG_{Papier} , des Harzes FG_{NIM} und des elektrischen Füllfaktors k_{el} ergeben 100 % (Hoffmann et al. 2022):

$$k_{\text{el}} + FG_{\text{Lack}} + FG_{\text{Papier}} + FG_{\text{NIM}} = 100 \%$$

Formel 7-3

Als NIM wurde zur Berechnung erneut die Wärmeleitfähigkeit des Vergusscharzes ELANTAS: ELANTRON MC62/360F angenommen. Beachtlich ist, dass in der Berechnung die Einflüsse der verschiedenen Nutaufbauten vernachlässigt wurden. Es ist deutlich erkennbar, dass der elektrische Füllfaktor einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Der Füllgrad des Isolationslacks hat hingegen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Dennoch lässt sich feststellen, dass bei steigendem elektrischen Füllfaktor auch der Einfluss des Füllgrades des Isolationslacks zunimmt. Ist hingegen der elektrische Füllfaktor gering, fällt die Isolationslackschicht kaum noch ins Gewicht und ihr Einfluss ist deutlich geringer.



Wärmeleitfähigkeit in W/(mK):

- 0,80-0,90
- 0,90-1,00
- 1,00-1,10
- 1,10-1,20
- 1,20-1,30
- 1,30-1,40

Abbildung 7-17: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit über den Füllgrad des Isolationslacks und den elektrischen Füllfaktor in der Wicklung. (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022))

Zusammenfassend lässt sich aus der thermischen Analyse für die Kompaktwicklung ableiten, dass diese im Vergleich zu den übrigen Wicklungstypen – mit Runddrähten als Ausgangsmaterial – die höchste Wärmeleitfähigkeit besitzt. Bei der Fertigung kann es vorteilhaft sein, Imprägnations- oder Vergussharze zu verwenden, die eine geringere Viskosität bei dem Vergießen besitzen, um Luftporen zu verhindern, selbst wenn diese eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit haben. Dabei ist es empfehlenswert, sowohl in den einzelnen Kombinationen der EIS-Materialien (EIM und NIM) als auch bei den Leiter- und Nutgeometrien Schliffproben zur Überprüfung anzufertigen.

Die hohen Werte der Wärmeleitfähigkeit der Hairpinwicklung können mit der Kompaktwicklung allerdings nicht erreicht werden. Bei der Hairpinwicklung ist nicht nur der hohe elektrische Füllfaktor vorteilhaft, sondern auch die niedrigen Anteile des Isolationslacks im Verhältnis zur Leiterfläche. Bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit ist ein steigender Drahtdurchmesser vorteilhaft, wie analytisch, numerisch und experimentell nachgewiesen wurde.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiger Wickelprozess zur Fertigung der Kompaktwicklung untersucht und erarbeitet. Die dabei erzeugte Wicklung zeichnet sich durch eine lagengenaue Drahtanordnung im Nutverlauf des Stators aus. Die zu Beginn runden Drähte werden mittels eines Kompaktierschritts zu rechteckigen Geometrien verformt. Dabei sind die Wickelköpfe flexibel gestaltet und im Idealfall verdreht. Durch das Verbacken der Leiter im Bereich der Spulenseiten ergibt sich eine formstabile Kompaktwickelmatte. Die Merkmalsausprägungen der Kompaktwicklung wurden aus dem Stand der Technik für Traktionsantriebe und deren Herstellungsverfahren (Wickeltechnologien) abgeleitet, mit dem Ziel einer Maximierung der Performance der so erzeugten Traktionsantriebe. Der Kompaktwickelprozess stellt deshalb eine gut geeignete Kombination der herkömmlichen Runddrahtwickeltechnik und der Hairpintechnologie dar.

In der Analyse und der Entwicklung der Prozessschritte wurde zu Beginn die Herstellung von formlosen Spulen für die Kompaktwicklung adressiert. Es wurde ein Wickelwerkzeug zur händischen Fertigung entwickelt und die Parameter für das fehlerfreie Verbacken der Spulen durch experimentelle Versuche bestimmt. Verwendet wurde Backlack des Grades 2B, der sich durch thermische Aktivierung verbindet. Dafür wurde die Erwärmung durch elektrisches Aufheizen gewählt. Entscheidend ist dabei die korrekt eingebrachte Leistung in Watt über die Zeit in Sekunden, aus der der Energieeintrag in Kilojoule resultiert. Für die weiteren Versuche wurden die so hergestellten Spulen eingesetzt. Des Weiteren konnte mittels numerischer Simulationsstudien nachgewiesen werden, dass die lagengenaue Drahtanordnung, im Vergleich zur wilden oder orthozyklischen Wicklung, die besten Voraussetzungen für die Kompaktwicklung bietet. Durch Simulationen wurde der Parameterraum von Drahtanzahl, Stempelweg und Verformung abgegrenzt. Im nächsten Schritt wurden in experimentellen Versuchsreihen besonders die elektrischen Eigenschaften des Widerstands in Ohm, der Isolationsfestigkeit in Volt, der Teilentladungsfestigkeit in Volt in Abhängigkeit der Einflussgrößen des Lagenaufbaus, des Pressdrucks in Megapascal, der Nutgeometrie und der Werkzeuggeometrie untersucht. Unter Einsatz von Druckmessfolien konnte die Druckverteilung am Nutgrund ermittelt werden. Zusammenfassend bestätigte sich, dass die Kompaktierung einer lagengenaue

angeordneten und verbackenen Wicklung möglich ist. Es wurden zudem die notwendigen Parameterbereiche für die Kompaktierung der Wicklung bestimmt.

Nach der Analyse und Entwicklung der Kompaktwicklung wurden zwei Prozesskonzepte der Herstellung zusammengeführt, nämlich der sequenzielle und der integrale Kompaktwickelprozess. Der sequenzielle Kompaktwickelprozess ist nur für die Herstellung von Einschichtwicklungen unter Einsatz einzelner Teilschichten geeignet. Er ist dem händischen Träufelwickeln nachempfunden und kann mit ausgeformten Zahnköpfen im Statorblechpaket eingesetzt werden. Der integrale Kompaktwickelprozess hingegen bringt vollständige Kompaktwickelmatten in den Stator ein. Dabei werden Blechpakete ohne Zahnköpfe verwendet, wie es analog in der kontinuierlichen Hairpintechnologie üblich ist.

Aus der abschließenden Bewertung der Wirtschaftlichkeit der entwickelten Ansätze folgt, dass der sequenzielle Kompaktwickelprozess derart lange Fertigungszeiten benötigt, dass ein Einsatz in der Industrie unrealistisch ist. Der integrale Kompaktwickelprozess hingegen ist zwar zeitintensiver als die Hairpintechnologie pro gefertigtem Stator, birgt aber das Potenzial für kleinere bis mittlere Stückzahlen in der Serienproduktion, wenn die notwendige Performance eines Traktionsantriebes von hoher Relevanz ist. In Bezug auf die Wechselstromverluste wurde eine Wirkungsgradsteigerung der Kompaktwicklung im Vergleich zur Hairpinwicklung aufgezeigt. Die thermische Leitfähigkeit der Kompaktwicklung ist im Vergleich zur Hairpinwicklung etwas geringer. Jedoch ist die Kompaktwicklung mit Abstand die beste Konfiguration der untersuchten Runddrahtwicklungen.

8.2 Ausblick

Für die industrielle Anwendung des Kompaktwickelprozesses können die nachfolgenden Ansätze weiterführend betrachtet werden.

In erster Linie ist eine erweiterte konstruktive Ausarbeitung des integralen Kompaktwickelprozesses notwendig. Hierzu zählt insbesondere die Herstellung des flexiblen Wickelkopfes. Dies könnte durch eine angepasste Düse realisiert werden, in der die Drähte, analog zum Schablonenwickler, verdrillt werden könnten. Prinzipiell sind Universalwickelmaschinen eine geeignete Plattform dafür. Im Anschluss wäre die Fertigung des geordneten Lagenaufbaus zu untersuchen. Eine interessante Fragestellung ist dabei, ob die bisher notwendige Fixierung der Drähte durch Backlack entweder nur in den Bereichen der Spulenseiten eingebracht werden könnte oder ob

eine Fixierung ohne Backlack möglich ist. Dafür müsste auch die Einbringung der Nutgrundisolationen betrachtet werden. Im Anschluss sollten die hergestellten Kompaktwickelmatten insgesamt auf ihre elektrischen Eigenschaften untersucht werden, wie es in der vorliegenden Arbeit an den einzelnen Teilspulen durchgeführt wurde. Für diesen Fall wäre eine Einbringvorrichtung zu konstruieren, zu fertigen und zu erproben. Dabei stellt sich die weitere Frage, wie das Stator-Design am günstigsten für die Einbringung der Kompaktwickelmatten gestaltet werden kann. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung der Stern-Joch Bauweise, von Polketten oder aufrollbaren Blechpaketen vorteilhaft und im Produktdesign denkbar. Es könnten dadurch die Nutschlitze mit Zahnköpfen ausgestaltet werden, bei gleichzeitig höherer Komplexität der Blechpakete. (vgl. Halwas, Wirth & Fleischer 2021) Auch könnten weitere neuartige Fertigungsverfahren für Statoren mit der Kompaktwicklung kombiniert werden.

Für die Isolationsschicht, insbesondere um deren Verhalten im Kompaktiervorgang zu bestimmen, ist eine weitere, detailliertere Modellierung sinnvoll. Hier sollte das reale Verhalten des Kupfer- und Isolationsmaterialverbunds untersucht werden, um bessere Prognosen über die Isolationsschichtdicke während des Kompaktierens treffen zu können. Dies betrifft nicht nur die Interaktion der Drähte zueinander in der Ausprägung der Querschnittsgeometrien und der Isolationsschichtdicken, sondern darüber hinaus auch die Wechselwirkungen mit den jeweiligen Werkzeugwänden.

Produktseitig ist es notwendig, eine elektrische Maschine auf die neuen Möglichkeiten der Kompaktwicklung auszulegen und Maschinenprototypen mit der Kompaktwicklung aufzubauen und zu testen. Um den Verlauf der Drähte im Bereich der Nuten und des Wickelkopfes in diesem Zusammenhang experimentell zu untersuchen, könnte die Computertomographie genutzt werden, wie in einem ersten eigenen Ansatz gezeigt werden konnte (siehe Halwas, Binder & Fleischer 2018). Für vollständige Statoren und Wickelköpfe sind dafür allerdings leistungsfähigere Computertomographiesysteme zu verwenden.

Die entwickelte Methode der Druckverteilungsmessung mit Hilfe von Druckmessfolien könnte über die Anwendung der Kompaktwicklung hinaus verwendet werden, um die thermische Anbindung von Wicklungen an das Blechpaket oder die Papierisolation zu bestimmen. Besonders für den dreidimensionalen Nutverlauf könnten auf diesem Wege weitergehende Erkenntnisse gewonnen werden.

Publikationsliste

Die im Folgenden chronologisch aufgelisteten Nachweise umfassen alle im Rahmen der Tätigkeit des Autors am wbk Institut für Produktionstechnik (mit-) verfassten Publikationen:

Erstautorenschaft

Halwas, Binder & Fleischer 2018

Halwas, M.; Binder, D. & Fleischer, J. (2018), *Systematische Analyse des Lagenaufbaus von Wicklungen in Nuten elektrischer Maschinen mittels räumlicher Bildgebung und maschinellen Lernens*, whitepaper, Bamberg, www.umformtechnik.net [24.02.2024].

Halwas et al. 2018a

Halwas, M.; Hofmann, J.; Fleischer, J.; Riehm, C.; Spieker, C.; Fister, M.; Stoehr, G.; Wist, A.; Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Jovanoski, J. & Kehl, N. (2018), „Entwicklung eines parallelen Technologie- und Produktentwicklungsprozesses. Am Beispiel der Wicklungsauslegung und -fertigung im Rahmen des Förderprojektes NeWire“, *wt Werkstattstechnik online*, 108, 5, S. 301–306, DOI: 10.37544/1436-4980-2018-05-27.

Halwas et al. 2018b

Halwas, M.; Ambs, P.; Marsetz, M.; Baier, C.; Schigal, W.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „Systematic Development and Comparison of Concepts for an Automated Series-Flexible Trickle Winding Process“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1-7, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658360.

Halwas et al. 2019

Halwas, M.; Sell-Le Blanc, F.; Jux, B.; Doppelbauer, M.; Wirth, F.; Hausmann, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Coherences Between Production Technology and Performance of Electric Traction Drives“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011889.

Halwas et al. 2020a

Halwas, M.; Ambs, P.; Blanc, F. S.-L.; Weiße, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Development and Implementation of a Compact Winding Process“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388198.

Halwas et al. 2020b

Halwas, M.; Hausmann, L.; Wirth, F.; Fleischer, J.; Jux, B. & Doppelbauer, M. (2020), „Influences of Design and Manufacturing on the Performance of Electric Traction Drives“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 488–494, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270899.

Halwas et al. 2021

Halwas, M.; Hoffmann, F.; Bader, P.; Heyde, T.; Doppelbauer, M. & Fleischer, J. (2021), „Influence of Wire Layer Structures on the Thermal Behavior in Electrical Machine Slots“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–10, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684217.

Halwas, Wirth & Fleischer 2021

Halwas, M.; Wirth, F. & Fleischer, J. (2021), „Kompaktwickelprozess zur Herstellung verteilter Wicklungen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116, 3, S. 124–127, DOI: 10.1515/zwf-2021-0024.

Halwas, Wirth & Fleischer 2022

Halwas, M.; Wirth, F. & Fleischer, J. (2022), „Investigation of the Forming Behavior of Copper Wires for the Compaction of Windings for Electric Machines“, *Key Engineering Materials*, 926, S. 1809–1818, DOI: 10.4028/p-hhpr62.

Mitautorenschaft

Peter et al. 2017

Peter, M.; Halwas, M.; Schigal, W. & Fleischer, J. (2017), „Entwicklung eines serienflexiblen Wickelverfahrens“, *E-Motive 2017 - 9. Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe*, FVA, S. 91–94, KITopen-ID: 1000147096.

Sell-Le Blanc et al. 2019

Sell-Le Blanc, F.; Halwas, M.; Jäger, D.; Weisse, L.; Jovanoski, J.; Kehl, N.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Feasibility Study for Enameled Round Copper Wire Compression within Slots of Electrical Machines“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9012030.

Wirth et al. 2019

Wirth, F.; Hausmann, L.; Halwas, M.; Hofmann, J.; Mayer, D.; Wößner, W. & Fleischer, J. (2019), „Optimierte Fertigung elektrischer Traktionsmotoren durch Technologien der Industrie 4.0“. *Future Mobility: automatisiert - vernetzt - elektrisch*, Esslingen, S.1-14, KITopen-ID: 1000147010.

Sell-Le Blanc et al. 2020

Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Klusmann, B.; Luttge, W.; Dunker, A.; Lindhorst, N. & Halwas, M. (2020), „Development of an alternative Round Wire Process Chain: Automated Trickle Winding“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388202.

Fleischer et al. 2021

Fleischer, J.; Pfund, T.; Wirth, F.; Fraider, F.; Halwas, M.; Hausmann, L. & Wößner, W. (2021), „Agile Produktion elektrischer Traktionsmotoren als Antwort auf volatile Märkte und Technologien“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116, 3, S. 128–132, DOI: 10.1515/zwf-2021-0025.

Winter et al. 2021

Winter, J.; Grützner, S.; Porabka, T.; Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Klusmann, B.; Kehl, N.; Jovanoski, J.; Halwas, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2021), *Neuartige serienflexible Wickelverfahren für die wirtschaftliche automatisierte Fertigung von hoch performanten elektrischen Maschinen: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts NeWire*, Förderkennzeichen: BMBF 02P16A000-004, DOI: 10.2314/KXP:1815339780.

Fleischer et al. 2022

Fleischer, J.; Doppelbauer, M.; Albers, A.; Fraider, F.; Halwas, M.; Wirth, F.; Schmitt, M.; Breining, P.; Braumandl, A.; Kübler, M.; Bause, K. & Ott, S. (2022), „Product-Production-Co-Design for Agile Production of Electric Traction Motors“ in *35th International Electric Vehicle Symposium (EVS25)*, S. 1-12, KITopen-ID: 1000153648.

Hoffmann et al. 2022

Hoffmann, F.; Halwas, M.; Fleischer, J. & Doppelbauer, M. (2022), „Thermal Analysis of Novel Winding Structures for the Usage in Electrical Machines“, *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910869.

Beteiligung an Erfindungsmeldungen und Patentschriften

Weiße et al. 2019

Weiße, L.; Klusmann, B.; Lüttge, W.; Dunker, A.; Sell-Le Blanc, F.; Halwas, M. & Fleischer, J. (2019), *Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Anordnung mit einem genuteten Wicklungsträger und einer Spulenwicklung für eine elektrische Maschine*, Europäische Patentschrift, Patentnummer: EP 3 654 502 B1.

Schmidt et al. 2021a

Schmidt, S.; Hubert, T.; Gräf, R.; Schneider, J.; Braunbeck, F.; Halwas, M.; Mayer, D.; Hausmann, L.; Fleischer, J.; Wirth, F. (2021), *Verfahren zur Wickelkopfisolation eines elektrischen Traktionsmotor-Stators*, Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, Patentnummer: DE 10 2021 115 395 B3.

Schmidt et al. 2021b

Schmidt, S.; Hubert, T.; Schneider, J.; Gräf, R.; Braunbeck, F.; Hausmann, L.; Mayer, D.; Halwas, M.; (2021), *Verfahren zur Isolierung von Verbindungsstellen einer Statorwicklung einer elektrischen Maschine*, Patentschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, Patentnummer: DE 10 2021 120 301 B3.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema **A Name Jahr** beziehen sich auf studentische Arbeiten, die vom Verfasser im Rahmen der Tätigkeit am Karlsruher Institut für Technologie am wbk Institut für Produktionstechnik angeleitet wurden. Hier ist eine vollständige Liste in alphabetischer Reihenfolge der Arbeiten aufgeführt, die entweder im Kontext des Projektes NeWwire oder darüber hinaus im Zusammenhang mit dem Promotionsvorhaben entstanden sind. Im Anschluss folgt das alphabetisch geordnete Literaturverzeichnis aller Nachweise dieser Arbeit:

A_Ambs 2018

Ambs, P. (Februar 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Ambs 2020

Ambs, P. (Juli 2020), *Konstruktion, Projektierung und Aufbau einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Bader 2021

Bader, P. (Juni 2021), *Planung, Aufbau und Validierung eines Messverfahrens zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit in Nuten elektrischer Maschinen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Baier 2018

Baier, C. (April 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Binder 2018

Binder, D. (Oktober 2018), *Bestimmung von charakteristischen Merkmalen an Bilddaten einer Kupferlackdrahtwicklung durch ein entwickeltes Auswertetool*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Buckpesch 2018

Buckpesch, M. (Oktober 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Claassen 2022

Claassen, T. (Februar 2022), *Praktische Einflussanalyse des Pressens von Wicklungen elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Daneshyan 2019

Daneshyan, A. (April 2019), *Development of a software tool for analysing the structure of electrical machines using a neural network*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Dieterich 2022

Dieterich, A. (Januar 2022), *Ausarbeitung und Konstruktion von Konzepten zur automatisierten Herstellung von Statorwicklungen für elektrische Traktionsantriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Faggion 2021

Faggion, G. (Juli 2021), *Entwicklung der Steuerungstechnik für einen Versuchsstand*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Flaum 2018

Flaum, A. (Oktober 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Gardiewski 2019

Gardiewski, S. (April 2019), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Heyde 2021

Heyde, T. (November 2021), *Weiterentwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit in Nuten elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Jäger 2019

Jäger, D. (April 2019), *Systematische Einflussanalyse des Pressens von Rundleitern innerhalb der Nuten elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Karaoglan 2019

Karaoglan, H. (April 2019), *Projektierung, Konstruktion und Umsetzung eines Steuerungssystems für einen Schablonenwickler*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Kengne 2020

Kengne, V. (Oktober 2020), *Praktische Einflussanalyse des Pressens von Wicklungen elektrischer Maschinen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Knipper 2020

Knipper, J. (August 2020), *Systematische Weiterentwicklung einer Softwareumgebung zur Validierung von Drahtverläufen innerhalb Nuten elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Kroll 2018

Kroll, C. (November 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsabtriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Marsetz 2018

Marsetz, M. (Februar 2018), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsabtriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Norouzi 2020

Norouzi, A. (April 2020), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsabtriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Ochmann 2018

Ochmann, D. (Oktober 2018), *Marktanalyse und Patentrecht in Bezug auf Wickeltechniken von Spulen in der Elektromobilität*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Ochmann 2020

Ochmann, D. (November 2020), *Konzeptausarbeitung und Konstruktion einer Vorrichtung zur automatisierten Herstellung und Kompaktierung einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Ouroulis 2022

Ouroulis, C. (Mai 2022), *Practical Influence Analysis of the Production of Compacted Coil-Windings of Electrical Machines*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Schigal 2017

Schigal, W. (November 2017), *Konzepterstellung für eine Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Scholz 2021

Scholz, N. (September 2021), *Umrüstung, Aufbau und Versuchsdurchführungen auf einer Anlage zur automatisierten Herstellung und Montage einer Statorwicklung für elektrische Traktionsantriebe*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Sedlmair 2021

Sedlmair, M. (September 2021), *Ausarbeitung und Konstruktion von Konzepten zur automatisierten Herstellung von Statorwicklungen für elektrische Traktionsantriebe*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Weber 2021

Weber, D. (Mai 2021), *Praktische Einflussanalyse des Pressens von Wicklungen elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

A_Woy 2021

Woy, A. (August 2021), *Entwicklung und Implementierung eines Softwaretools zur Simulation von Füllfaktoren in Nuten elektrischer Maschinen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

Albers & Wintergerst 2014

Albers, A. & Wintergerst, E. (2014), „The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality“, *An anthology of theories and models of design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations*, Hrsg. A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing, Springer, London, S. 151–171, ISBN: 978-1-4471-6337-4.

Albers et al. 2022

Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles“, *Procedia CIRP*, 109, S. 167–172, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.231.

ANSI/CAN/UL 1446:2020-11

ANSI/CAN/UL 1446 (2020), *UL Standard for Safety for Systems of Insulating Materials – General*, (8. Auflage), Beuth Verlag, Berlin.

Arendes et al. 2003

Arendes, D.; Werthmann, C.; Seidel, M.; Blenke, L. & Bunzel, M. (2003), *Elektrische Maschine, deren Herstellverfahren und Vorrichtung zu ihrer Herstellung*, Offenlegungsschrift, Bundesrepublik Deutschland, Patentnummer: DE 10329579 A1.

Asokan 2004

Asokan, T. (2004), „Corona Free Winding in Electrical Machines“, *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, S. 222–225, DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380529.

Ayat et al. 2016

Ayat, S.; Wrobel, R.; Goss, J. & Drury, D. (2016), „Estimation of Equivalent Thermal Conductivity for Impregnated Electrical Windings Formed from Profiled Rectangular Conductors“, *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Institution of Engineering and Technology, S. 1–6, DOI: 10.1049/cp.2016.0313.

Ayat et al. 2018

Ayat, S.; Liu, H.; Kulan, M. & Wrobel, R. (2018), „Estimation of Equivalent Thermal Conductivity for Electrical Windings with High Conductor Fill Factor“, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, S. 6529–6536, DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557534.

Ayat et al. 2020

Ayat, S.; Simpson, N.; Daguse, B.; Rudolph, J.; Lorenz, F. & Drury, D. (2020), „Design of Shaped-Profile Electrical Machine Windings for Multi-Material Additive Manufacture“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 1554–1559, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270945.

Babel 2020

Babel, G. (2020), *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*, Lehr- und Arbeitsbuch, (4. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-22175-1.

Bach et al. 2021

Bach, M.; Linnemann, M.; Bergmann, M.; Psyk, V.; Krausel, V. & Pohl, N. (2021), „Towards the Forming of concentrated Windings with trapezoidal Cross Sections for Increasing the Slot Filling Factor“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684199.

Bălă et al. 1969

Bălă, C.; Fetita, A.; Lefter, V.; Wentzel, H. & Priester, H. (1969), *Handbuch der Wickeltechnik elektrischer Maschinen*, Theorie, Konstruktion und Technologie von Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen, VEB Verlag Technik, Berlin.

Bauer 2019

Bauer, D. (2019), *Verlustanalyse bei elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zur Weiterverarbeitung in thermischen Netzwerkmodellen*, Dissertation, Universität Stuttgart, Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-24271-8.

Bender et al. 2021

Bender, B.; Gericke, K.; Pahl, G. & Beitz, W. (2021), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, (9. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-57303-7.

Bermond 1970

Bermond, G. (1970), *Verfahren zum Bewickeln des Ankers einer elektrischen Maschine*, Offenlegungsschrift, Bundesrepublik Deutschland, Patentnummer: P 19 11 673.5.

Bilterynt et al. 2017

Bilterynt, P.-Y.; Delianne, H.; Margueritte, David, Jozefowicz, Eric; Perreaut, S.; Balthaze, P. & Battut, J. (2017), *Rotary electrical machine provided with a stator*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 2017/0133893 A1.

Binder 2017

Binder, A. (2017), *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Grundlagen, Betriebsverhalten, (2. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-53240-9.

Böckh & Wetzel 2015

Böckh, P. & Wetzel, T. (2015), *Wärmeübertragung*, Grundlagen und Praxis, (6. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-44477-1.

Boesel 1989

Boesel, R. P. (1989), „Compression Bonding Process for Manufacture of High-Performance Electrical Coils“, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 5, 5, S. 22–28, DOI: 10.1109/57.35606.

Böge & Plaßmann 2007

Böge, W. & Plaßmann, W. (2007), *Vieweg-Handbuch Elektrotechnik*, Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker, (4. Auflage), Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-0136-4.

Boglietti, Cavagnino & Staton 2008

Boglietti, A.; Cavagnino, A. & Staton, D. (2008), „Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44, 4, S. 1150–1159, DOI: 10.1109/TIA.2008.926233.

Bolte 2018

Bolte, E. (2018), *Elektrische Maschinen*, Grundlagen, Magnetfelder, Erwärmung, Funktionsprinzipien, Betriebsarten, Einsatz, Entwurf, Wirtschaftlichkeit, (2. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-54687-1.

Bönig et al. 2014

Bönig, J.; Bickel, B.; Spahr, M.; Fischer, C. & Franke, J. (2014), „Explicit dynamics process simulation of linear coil winding for electric drives production“, *4th International Electric Drives Production Conference (EDPC 2014)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC.2014.6984403.

Bönig et al. 2015

Bönig, J.; Bickel, B.; Spahr, M.; Fischer, C. & Franke, J. (2015), „Simulation of orthocyclic windings using the linear winding technique“, *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC.2015.7323201.

Born et al. 2022a

Born, H. C.; Blanc, F. S.-L.; Platte, V.; Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Brans, F.; Drexler, D.; Oehler, F.; Munster, A. zu & Reising, S. (2022), „Development of a Production Process for Formed Litz Wire Stator Windings“, *2022 12th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC56367.2022.10019746.

Born et al. 2022b

Born, H. C.; Oehler, F.; Platte, V.; Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Brans, F.; Drexler, D.; Blanc, F. S.-L. & Reising, S. (2022), „Manufacturing Process and Design Requirements of Litz Wire with Focus on Efficiency Improvement of Traction Motors“, *2022 12th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC56367.2022.10019744.

Bräuer et al. 2012

Bräuer, P.; Lindner, M.; Studnitzky, T.; Kieback, B.; Rudolph, J.; Werner, R. & Krause, G. (2012), „3D Screen Printing technology — Opportunities to use revolutionary materials and machine designs“, *2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC 2012)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC.2012.6425124.

Busch 2015

Busch, R. (2015), *Elektrotechnik und Elektronik*, Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker, (7. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-09674-8.

Carstensen 2008

Carstensen, C. (2008), *Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines*, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8322-7118-3.

Chu et al. 2014

Chu, W. Q.; Zhu, Z. Q.; Zhang, J.; Ge, X.; Liu, X.; Stone, D. & Foster, M. (2014), „Comparison of electrically excited and interior permanent magnet machines for hybrid electric vehicle application“, *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2014)*, IEEE, S. 401–407, DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013504.

Dassault Systems 2022

Dassault Systems (2022), *Abaqus Analysis User's Guide*, Abaqus 6.14, <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm> [04.10.2022].

Demiri 2014

Demiri, A. (2014), *Enamel Insulated Copper Wire in Electric Motors: Sliding Behavior and Possible Damage Mechanisms During Die Bending*, Masterarbeit, Universität Windsor, <https://core.ac.uk/download/pdf/72770993.pdf> [24.02.2024].

Deutsches Kupferinstitut 2022a

Deutsches Kupferinstitut (2022), *Cu-ETP*, Deutsches Kupferinstitut, <https://www.kupferinstitut.de/mediathek/datenblaetter/> [31.01.2022].

Deutsches Kupferinstitut 2022b

Deutsches Kupferinstitut (2022), *Cu-OFE*, Deutsches Kupferinstitut, <https://www.kupferinstitut.de/mediathek/datenblaetter/> [31.01.2022].

Deutsches Patent- und Markenamt 2022

Deutsches Patent- und Markenamt (2022), *DPMA | Recherche*, <https://www.dpma.de/patente/recherche/index.html> [16.07.2022].

DIN 1304-1:1994-03

DIN 1304-1 (1994), *Formelzeichen; Allgemeine Formelzeichen*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 01.075.

DIN 8580:2003-09

DIN 8580 (2003), *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 01.040.25; 25.020.

DIN 8593-5:2003-09

DIN 8593-5 (2003), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 01.040.25; 25.020; 25.120.99.

DIN EN 10106:2016-03

DIN EN 10106 (2016), *Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand; Deutsche Fassung EN 10106:2015*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 77.140.50.

DIN EN 13602:2013-09

DIN EN 13602 (2013), *Kupfer und Kupferlegierungen – Gezogener Runddraht aus Kupfer zur Herstellung elektrischer Leiter*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 77.150.30.

DIN EN 60027-4:2008-03

DIN EN 60027-4 (2008), *Formelzeichen für die Elektrotechnik - Teil 4: Drehende elektrische Maschinen (IEC_60027-4:2006); Deutsche Fassung EN_60027-4:2007*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 01.075; 29.160.01.

DIN EN 60085:2008-08

DIN EN 60085 (2008), *Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung (IEC 60085:2007); Deutsche Fassung EN 60085:2008*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 29.035.01.

DIN EN 60317-0-1:2014-09

DIN EN 60317-0-1 (2014), *Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten- Teil 0-1: Allgemeine Anforderungen - Runddrähte aus Kupfer, lackisoliert (IEC 60317-0-1:2013); Deutsche Fassung EN 60317-0-1:2014*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 29.060.10.

DIN EN 60584-1:2014-06

DIN EN 60584-1 (2014), *Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013); Deutsche Fassung EN 60584-1:2013*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 17.200.20.

DIN EN 61025:2007-08

DIN EN 61025 (2007), *Fehlzustandsbaumanalyse*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 29.020.

DIN EN ISO 6892-1:2020-06

DIN EN ISO 6892-1 (2020), *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019)*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 77.040.10.

DIN IEC/TS 61934:2012-09

DIN IEC/TS 61934 (2012), *Elektrische Isolierstoffe und -systeme – Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit (IEC/TS 61934:2011)*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 29.035.01.

Dobroschke 2011

Dobroschke, A. (2011), *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, ISBN: 978-3-87525-317-7.

Doppelbauer 2020

Doppelbauer, M. (2020), *Grundlagen der Elektromobilität*, Technik, Praxis, Energie und Umwelt, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-29729-9.

Ehrlenspiel & Meerkamm 2017

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017), *Integrierte Produktentwicklung*, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, (6. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-44089-0.

e-mobil BW 2021

e-mobil BW (2021), *Wissen Kompakt: Kompendium 2021*, transformations Wissen BW, Lotsenstelle Transformationswissen BW c/o e-mobil BW GmbH, Stuttgart, www.transformationswissen-bw.de [27.02.2023].

Epskamp 2020

Epskamp, T. (2020), *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, DOI: 10.5445/IR/1000117913.

Essex Furukawa Magnet Wire 2020

Essex Furukawa Magnet Wire (2020), *Datasheet Magnebond CAB-200*, <https://essexfurukawa.com/products/magnebond-cab-200/> [01.11.2022].

Fasola & Nicolini 1997

Fasola, G. & Nicolini, G. (1997), *Elektromachinerotor, insbesondere für einen Elektromotor, der eine Wärmekraftmaschine eines Fahrzeugs anfñhl und Vorrichtungen für seine Herstellung*, Übersetzung der europäischen Patentschrift EP 0 695 019 B1, Bundesrepublik Deutschland, Patentnummer: DE 69500756 T2.

Feldmann 2014

Feldmann, K. (2014), *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-42827-0.

Fischer 2017

Fischer, R. (2017), *Elektrische Maschinen*, (17. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-45295-4.

Fleischer, Haag & Hofmann 2017

Fleischer, J.; Haag, S. & Hofmann, J. (2017), *Quo Vadis Wickeltechnik?*, Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau, Karlsruhe, https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017_02_21_Studie_Wickeltechnik_final_DE.pdf [24.02.2024].

Fleischer, Lanza & Schulze 2019

Fleischer, J.; Lanza, G. & Schulze, V. (Hrsg.) (2019), *Auf dem Weg zur Elektromobilität – Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik*, Tagungsband zur wbk-Herbsttagung 2019, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-6953-2.

Fleischer et al. 2021

Fleischer, J.; Pfund, T.; Wirth, F.; Fraider, F.; Halwas, M.; Hausmann, L. & Wößner, W. (2021), „Agile Produktion elektrischer Traktionsmotoren als Antwort auf volatile Märkte und Technologien“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116, 3, S. 128–132, DOI: 10.1515/zwf-2021-0025.

FUJIFILM 2023

FUJIFILM (2023), *Prescale - Pressure measurement film | Fujifilm [Germany]*, <https://www.fujifilm.com/de/en/business/inspection/measurement-film/prescale> [29.03.2023].

Gerling 2015

Gerling, D. (2015), *Electrical Machines, Mathematical Fundamentals of Machine Topologies*, Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-642-17583-1.

Gerst 2002

Gerst, M. (2002), *Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung*, Dissertation, Technische Universität München, Verlag Dr. Hut, München, ISBN: 3-934767-79-6.

Ghahfarokhi et al. 2021

Ghahfarokhi, P. S.; Podgornovs, A.; Marques Cardoso, A. J.; Kallaste, A.; Belahcen, A. & Vaimann, T. (2021), „Hairpin Windings Manufacturing, Design, and AC Losses Analysis Approaches for Electric Vehicle Motors“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684208.

Gibson, Rosen & Stucker 2015

Gibson, I.; Rosen, D. & Stucker, B. (2015), *Additive Manufacturing Technologies*, (2. Auflage), Springer, New York, ISBN: 978-1-4939-2112-6.

Glässel et al. 2020

Glässel, T.; Masuch, M.; Weigelt, M.; Kühn, A. & Franke, J. (2020), *Schlussbericht zu dem Teilvorhaben "Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen" im Verbundprojekt "PRO-E-Traktion"*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Förderkennzeichen: 01MX15011F.

Gonzalez & Saban 2014

Gonzalez, D. A. & Saban, D. M. (2014), „Study of the Copper Losses in a High-Speed Permanent-Magnet Machine With Form-Wound Windings“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 6, S. 3038–3045, DOI: 10.1109/TIE.2013.2262759.

Gröninger et al. 2011

Gröninger, M.; Horch, F.; Kock, A.; Pleiteit, H.; Ponick, B.; Schmidt, D. & Wöstmann, F.-J. (2011), „Casting production of coils for electrical machines“, *2011 1st International Electric Drives Production Conference*, IEEE, S. 159–161, DOI: 10.1109/EDPC.2011.6085534.

Gröninger et al. 2014

Gröninger, M.; Horch, F.; Kock, A.; Jakob, M. & Ponick, B. (2014), „Cast coils for electrical machines and their application in automotive and industrial drive systems“, *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC 2014)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC.2014.6984384.

Hagedorn & Lüttge 2012

Hagedorn, J. & Lüttge, W. (2012), *Nadelwickelsystem für zu bewickelnde Wicklungsträger, Verfahren zum Bewickeln von Wicklungsträgern mit verteilter Wicklung, Innenläufer-Stator, Aussenläufer-Rotor und Wicklungsträger für Elektromotoren mit verteilter Wicklung*, Europäische Patentanmeldung, Patentnummer: EP 2 477 315 A2.

Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016

Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F. & Fleischer, J. (2016), *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren*, Ein Beitrag zur Energieeffizienz, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-49209-3.

Haggenmüller & Dreier 2019

Haggenmüller, T. & Dreier, G. (2019), *Verfahren und Vorrichtung zum Wickeln einer Wellenwickelmatte sowie damit herstellbare Wellenwickelmatte*, Offenlegungsschrift, Patentnummer: DE 10 2017 120 559 A1.

Halwas, Binder & Fleischer 2018

Halwas, M.; Binder, D. & Fleischer, J. (2018), *Systematische Analyse des Lagenaufbaus von Wicklungen in Nuten elektrischer Maschinen mittels räumlicher Bildgebung und maschinellen Lernens*, whitepaper, Bamberg, www.umformtechnik.net [24.02.2024].

Halwas et al. 2018a

Halwas, M.; Hofmann, J.; Fleischer, J.; Riehm, C.; Spieker, C.; Fister, M.; Stoehr, G.; Wist, A.; Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Jovanoski, J. & Kehl, N. (2018), „Entwicklung eines parallelen Technologie- und Produktentwicklungsprozesses. Am Beispiel der Wicklungsauslegung und -fertigung im Rahmen des Förderprojektes NeWwire“, *wt Werkstattstechnik online*, 108, 5, S. 301–306, DOI: 10.37544/1436-4980-2018-05-27.

Halwas et al. 2018b

Halwas, M.; Ambs, P.; Marsetz, M.; Baier, C.; Schigal, W.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „Systematic Development and Comparison of Concepts for an Automated Series-Flexible Trickle Winding Process“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1-7, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658360.

Halwas et al. 2019

Halwas, M.; Sell-Le Blanc, F.; Jux, B.; Doppelbauer, M.; Wirth, F.; Hausmann, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Coherences Between Production Technology and Performance of Electric Traction Drives“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011889.

Halwas et al. 2020a

Halwas, M.; Ambs, P.; Blanc, F. S.-L.; Weiße, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Development and Implementation of a Compact Winding Process“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388198.

Halwas et al. 2020b

Halwas, M.; Hausmann, L.; Wirth, F.; Fleischer, J.; Jux, B. & Doppelbauer, M. (2020), „Influences of Design and Manufacturing on the Performance of Electric Traction Drives“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 488–494, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270899.

Halwas et al. 2021

Halwas, M.; Hoffmann, F.; Bader, P.; Heyde, T.; Doppelbauer, M. & Fleischer, J. (2021), „Influence of Wire Layer Structures on the Thermal Behavior in Electrical Machine Slots“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–10, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684217.

Halwas, Wirth & Fleischer 2021

Halwas, M.; Wirth, F. & Fleischer, J. (2021), „Kompaktwickelprozess zur Herstellung verteilter Wicklungen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116, 3, S. 124–127, DOI: 10.1515/zwf-2021-0024.

Halwas, Wirth & Fleischer 2022

Halwas, M.; Wirth, F. & Fleischer, J. (2022), „Investigation of the Forming Behavior of Copper Wires for the Compaction of Windings for Electric Machines“, *Key Engineering Materials*, 926, S. 1809–1818, DOI: 10.4028/p-hhpr62.

Hashin & Shtrikman 1962

Hashin, Z. & Shtrikman, S. (1962), „A Variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials“, *Journal of Applied Physics*, 33, 10, S. 3125–3131, DOI: 10.1063/1.1728579.

Heering 1952

Heering, H. (1952), *Verfahren zu Herstellung der Wicklung elektrischer Maschinen*, Patentschrift, Bundesrepublik Deutschland, Patentnummer: 838 782.

Herwig & Moschallski 2019

Herwig, H. & Moschallski, A. (2019), *Wärmeübertragung*, Physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben, (4. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-26401-7.

Hoffmann, Jux & Doppelbauer 2019

Hoffmann, F.; Jux, B. & Doppelbauer, M. (2019), „Thermal Modeling of the Stator Slot in Electrical Machines Using an Extended Layer Approach“, *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, S. 1405–1410, DOI: 10.1109/IECON.2019.8927002.

Hoffmann et al. 2022

Hoffmann, F.; Halwas, M.; Fleischer, J. & Doppelbauer, M. (2022), „Thermal Analysis of Novel Winding Structures for the Usage in Electrical Machines“, *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910869.

Hofmann et al. 2016

Hofmann, J.; Blanc, F. S.-L.; Krause, M.; Wirth, F. & Fleischer, J. (2016), „Simulation of the assembly process of the insert technique for distributed windings“, *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 144–148, DOI: 10.1109/EDPC.2016.7851326.

Hofmann et al. 2018

Hofmann, J.; Komodromos, A.; Fleischer, J. & Tekkaya, A. E. (2018), „Optimization of the Linear Coil Winding Process by Combining New Actuator Principles on the Basis of Wire Forming Analysis“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658264.

Hofmann 2020

Hofmann, J. (2020), *Prozessmodellierung des Fünf-Achs- Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektorienbasierten Drahtzugkraftregelung*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-7778-0.

Hofmann 2014

Hofmann, P. (2014), *Hybridfahrzeuge*, Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft, (2. Auflage), Springer, Wien, ISBN: 978-3-7091-1780-4.

Houtman 1970

Houtman, J. A. (1970), *Method of manufacturing a stator assembly for an induction motor*, Patentschrift, United States, Patentnummer: 3,528,171.

Idoughi et al. 2011

Idoughi, L.; Mininger, X.; Bouillault, F.; Bernard, L. & Hoang, E. (2011), „Thermal Model With Winding Homogenization and FIT Discretization for Stator Slot“, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47, 12, S. 4822–4826, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2159013.

Ilhan et al. 2013

Ilhan, E.; Kremers, M. F. J.; Motoasca, T. E.; Paulides, J. J. H. & Lomonova, E. (2013), „Transient thermal analysis of flux switching PM machines“, *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2013)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EVER.2013.6521588.

International Annealed Copper Standard (IACS):1914-10

International Annealed Copper Standard (IACS) (1914), *Circular of the Bureau of Standards No. 31, Copper Wire Tables*, Government Printing Office, Washington.

Ivers-Tiffée & Münch 2007

Ivers-Tiffée, E. & Münch, W. von (2007), *Werkstoffe der Elektrotechnik*, (10. Auflage), Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8351-0052-7.

Iwasaki et al. 2009

Iwasaki, S.; Deodhar, R. P.; Liu, Y.; Pride, A.; Zhu, Z. Q. & Bremner, J. J. (2009), „Influence of PWM on the Proximity Loss in Permanent-Magnet Brushless AC Machines“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, 4, S. 1359–1367, DOI: 10.1109/TIA.2009.2023488.

Jack et al. 1999

Jack, A. G.; Mecrow, B. C.; Dickinson, P. G.; Stephenson, D.; Burdess, J. S.; Fawcett, J. N. & Evans, T. (1999), „Permanent-Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Prepressed Windings“, *Conference record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference*, IEEE, S. 97–103, DOI: 10.1109/IAS.1999.799934.

Jaksic 2011

Jaksic, D. (2011), „Getting rid of the air“, or how to maximize winding fill factor (ID 81)“, *1st International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2011*, IEEE, S. 84–87, DOI: 10.1109/EDPC.2011.6085555.

Junginger 2016

Junginger, C. (2016), *Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-17006-6.

Jung, Helm & Liebold 2021

Jung, J.; Helm, A. & Liebold, J. (2021), „Effizientere Elektroantriebe durch additiv gefertigte Roebelstäbe in der Wicklung“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 82, 4, S. 56–60, DOI: 10.1007/s35146-021-0652-2.

Kampker 2014

Kampker, A. (2014), *Elektromobilproduktion*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-642-42022-1.

Karle 2020

Karle, A. (2020), *Elektromobilität*, Grundlagen und Praxis, (4. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-46078-2.

Kawalla 2021

Kawalla (2021), *DFG Forschergruppe "Verlustarme Elektrobleche für energieeffiziente Antriebe"*, DFG, <https://www.for1897.de/> [15.12.2021].

Koga 2013

Koga, N. K. (2013), *Rotary Electric Machine*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 2013/0193798 A1.

Komodromos, Lobbe & Tekkaya 2017

Komodromos, A.; Lobbe, C. & Tekkaya, A. E. (2017), „Development of forming and product properties of copper wire in a linear coil winding process“, *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC.2017.8328143.

Kreuzer et al. 2003

Kreuzer, H.; Willmott, A.; Fussey, A.; Neil, W. & Henne, M. (2003), *Method for producing a magnetically excitable core comprising a core winding for an electric machine*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 2003/0071534 A1.

Kühl & Franke 2013

Kühl, A. & Franke, J. (2013), „Robot-based assembly of stators“, *2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC.2013.6689754.

Kühl 2014

Kühl, A. (2014), *Flexible Automatisierung der Statornmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, ISBN: 978-3-87525-367-2.

Kühl & Franke 2015

Kühl, A. & Franke, J. (2015), „Innovative Assembly of Stators using Ambidextrous Kinematics“, *WCECS 2015 - World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, Engineers IA, Newswood Limited, ISBN 978-988-19253-6-7.

Kühl, Franke & Lebender 2016

Kühl, A.; Franke, J. & Lebender, J. (2016), „Robotic-based Automatization of Handling and Contacting of the Ends of Windings for the Mounting of Electric Drives“, *WCECS 2016 - World Congress on Engineering and Computer Science 2016*, Engineers IA, Newswood Limited, ISBN: 978-988-14048-2-4.

Kulan, Baker & Widmer 2016

Kulan, M. C.; Baker, N. J. & Widmer, J. D. (2016), „Design of a high fill factor permanent magnet integrated starter generator with compressed stator windings“, *Proceedings, 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Hrsg. I. C. o. E. Machines, IEEE, S. 1513–1519, DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732724.

Kulan et al. 2016

Kulan, M. C.; Baker, N. J.; Widmer, J. D. & Lambert, S. M. (2016), „Modelling the mechanical and thermal properties of compressed stator windings“, *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Institution of Engineering and Technology, S. 6, DOI: 10.1049/cp.2016.0132.

Kulan, Baker & Widmer 2017

Kulan, M. C.; Baker, N. J. & Widmer, J. D. (2017), „Design and Analysis of Compressed Windings for a Permanent Magnet Integrated Starter Generator“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, 4, S. 3371–3378, DOI: 10.1109/TIA.2017.2681976.

Labisch & Wählich 2020

Labisch, S. & Wählich, G. (2020), *Technisches Zeichnen, Eigenständig lernen und effektiv üben*, (6. Auflage), Springer, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-30650-2.

Lachmayer, Lippert & Fahlbusch 2016

Lachmayer, R.; Lippert, R. b. & Fahlbusch, T. (2016), *3D-Druck beleuchtet, Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-49055-6.

Lachmayer & Lippert 2017

Lachmayer, R. & Lippert, R. b. (2017), *Additive Manufacturing Quantifiziert*, Visionäre Anwendungen und Stand der Technik, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-54112-8.

Lahrmann, Lahrmann & Granitza 2015

Lahrmann, M.; Lahrmann, J.-P. & Granitza, N. (2015), *Prüfmethodenfibel*, Kompetente Wicklungsprüfung, (Revision 1.2), Schleich GmbH, Hemer.

Langheck et al. 2018

Langheck, A.; Reuter, S.; Saburow, O.; Maertens, R.; Wittemann, F.; Berg, L. F. & Doppelbauer, M. (2018), „Evaluation of an Integral Injection Molded Housing for High Power Density Synchronous Machines with Concentrated Single-Tooth Winding“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658324.

Leame 1993

Leame, F. (1993), *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Wellenwicklung, insbesondere für Drehstromgeneratoren*, Europäische Patentanmeldung, Patentnummer: 0 604 797 A2.

Leuning et al. 2019

Leuning, N.; Elfgen, S.; Weiss, H. A.; Volk, W. & Hameyer, K. (2019), „Der Einfluss des Schneidens von Elektroblechlamellen und die geeignete numerische Modellierung“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 136, 2, S. 184–194, DOI: 10.1007/s00502-019-0722-z.

Lienhard 2020

Lienhard, J. H. (2020), *A Heat Transfer Textbook*, (5. Auflage), Phlogiston Press, Cambridge.

Lindemann 2009

Lindemann, U. (2009), *Methodische Entwicklung technischer Produkte*, Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, (3. Auflage), Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-642-01422-2.

Linnemann et al. 2019

Linnemann, M.; Bach, M.; Psyk, V.; Werner, M.; Gerlach, M. & Schubert, N. (2019), „Resource-efficient, innovative coil production for increased filling factor“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9012063.

Liu et al. 2017

Liu, M.; Li, Y.; Ding, H. & Sarlioglu, B. (2017), „Thermal management and cooling of windings in electrical machines for electric vehicle and traction application“, *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC)*, IEEE, S. 668–673, DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993349.

Liu et al. 2020

Liu, X.; Gerada, D.; Xu, Z.; Corfield, M.; Gerada, C. & Yu, H. (2020), „Effective Thermal Conductivity Calculation and Measurement of Litz Wire Based on the Porous Metal Materials Structure“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 4, S. 2667–2677, DOI: 10.1109/TIE.2019.2910031.

Lorenz, Rudolph & Werner 2018a

Lorenz, F.; Rudolph, J. & Werner, R. (2018), „Design of 3D Printed High Performance Windings for Switched Reluctance Machines“, *Proceedings, 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 2451–2457, DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506845.

Lorenz, Rudolph & Werner 2018b

Lorenz, F.; Rudolph, J. & Werner, R. (2018), „High Temperature Operation and Increased Cooling Capabilities of Switched Reluctance Machines using 3D Printed Ceramic Insulated Coils“, *2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC)*, IEEE, S. 400–405, DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450089.

Luchscheider 2016

Luchscheider, V. (2016), *Experimentelle und numerische Identifikation eines homogenisierten Materialmodells für Blechpakete elektrischer Maschinen*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ISSN: 2190-023X.

Lüttge 2015

Lüttge, W. (2015), *Vorrichtung und Verfahren zum Einbringen einer Wellenwicklung aus einer vorgefertigten Wellenwicklungsmatte in Statorblechpaketnuten*, Europäische Patentschrift, Patentnummer: EP 3 182 569 B1.

Lüttge 2018

Lüttge, W. (2018), *Wellenwickelvorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer Wellenwicklung*, Europäische Patentschrift, Patentnummer: EP 3 512 079 B1.

Lüttge et al. 2018

Lüttge, W.; Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L. & Dunker, A. (2018), *Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Stators mit einer Wicklung mit geschränkten Luftspulen*, Offenlegungsschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, Patentnummer: DE 10 2018 104 838 A1.

Marenbach, Jäger & Nelles 2020

Marenbach, R.; Jäger, J. & Nelles, D. (2020), *Elektrische Energietechnik, Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*, (3. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-29492-2.

Mathis & Reibing 2017

Mathis, W. & Reibing, A. (2017), *Küpfmüller Theoretische Elektrotechnik, Elektromagnetische Felder, Schaltungen und elektronische Bauelemente*, (20. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-54837-0.

Matsubara et al. 1983

Matsubara, K.; Yoshizaki, M.; Mifune, T.; Nakamura, K.; Endo, Y.; Takamatsu, H.; Saito, Y. & Kawan, Y. (1983), *Anker für eine elektrische Rotationsmaschine*, Offenlegungsschrift, Bundesrepublik Deutschland, Patentnummer: DE 3347195 A1.

Mayer et al. 2019

Mayer, D.; Hausmann, L.; Maul, N.; Reinschmidt, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Systematic Investigation of the Grooving Process and its Influence on Slot Insulation of Stators with Hairpin Technology“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011935.

Mellor, Roberts. & Turner 1991

Mellor, P. H.; Roberts., D. & Turner, D. R. (1991), „Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design“, *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 138, 5, S. 205–218, DOI: 10.1049/ip-b.1991.0025.

Michel 2018

Michel, S. (2018), „Vollständige Elektromotoren im 3D-Druck herstellen“, *Maschinenmarkt*, Vogel Communications Group, Würzburg, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/vollstaendige-elektromotoren-im-3d-druck-herstellen-a-695531/> [25.02.2024].

Milton 1981

Milton, G. W. (1981), „Bounds on the transport and optical properties of a two-component composite material“, *Journal of Applied Physics*, 52, 8, S. 5294–5304, DOI: 10.1063/1.329386.

Montsinger 1930

Montsinger, V. M. (1930), „Abridgment of loading transformers by temperature“, *Journal of the A.I.E.E.*, 49, 4, S. 293–297, DOI: 10.1109/T-AIEE.1930.5055572.

Moya et al. 2022

Moya, C.; Langard, N.; Desurmont, S. & Allain, P. (2022), *Electrical conductor for a stator of a rotary electric machine, and method for manufacturing same*, Offenlegungsschrift, Patentnummer: WO 2022/207992 A1.

Müller, Vogt & Ponick 2008

Müller, G.; Vogt, K. & Ponick, B. (2008), *Berechnung elektrischer Maschinen*, (6. Auflage), Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN: 978-3-527-40525-1.

Müller & Ponick 2014

Müller, G. & Ponick, B. (2014), *Grundlagen elektrischer Maschinen*, (10. Auflage), Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN: 978-3-527-67612-5.

Nehl & Fatemi 2019

Nehl, T. W. & Fatemi, A. (2019), *Segmented bar conductors for electric machines*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 2022/0216756 A1.

Németh-Csóka 2018

Németh-Csóka, M. (2018), *Thermisches Management elektrischer Maschinen*, Messung, Modell und Energieoptimierung, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-20133-3.

Noji 2015

Noji, K. (2015), *Stator Manufacturing Device and Manufacturing Method*, European Patent Application, Patentnummer: EP 3 118 978 A1.

Oberretl 1969

Oberretl, K. (1969), „13 Regeln für minimale Zusatzverluste in Induktionsmotoren“, *Bulletin Oerlikon*, 389, 390, S. 1–12.

Oechslen 2018

Oechslen, S. (2018), *Thermische Modellierung elektrischer Hochleistungsantriebe*, Dissertation, Universität Stuttgart, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-22632-9.

Offenburger 2017

Offenburger, O. (2017), *Patent und Patentrecherche*, Praxisbuch für KMU, Start-ups und Erfinder, (2. Auflage), Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-14431-9.

Parati 2022

Parati, G. B. (2022), *Method and Processing Line for Manufacturing a Stator for Electric Motors*, Offenlegungsschrift, Patentnummer: WO 2022/084760 A1.

Peter et al. 2017

Peter, M.; Halwas, M.; Schigal, W. & Fleischer, J. (2017), „Entwicklung eines serienflexiblen Wickelverfahrens“, *E-Motive 2017 - 9. Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe*, FVA, S. 91–94, KITopen-ID: 1000147096.

Petrell, Braun & Hirt 2018

Petrell, D.; Braun, A. & Hirt, G. (2018), „Comparison of Different Upsetting Processes for the Production of Copper Coils for Wheel Hub Engines“, *Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, S. 445–454, DOI: 10.1007/978-3-030-03451-1.

Petrell et al. 2019a

Petrell, D.; Teller, M.; Hirt, G.; Borzel, S. & Schafer, W. (2019), „Manufacturing of Conically Shaped Concentrated Windings for Wheel Hub Engines by a Multi-Stage Upsetting Process“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011944.

Petrell et al. 2019b

Petrell, D.; Pauli, F.; Hecker, C.; Seibert, T.; Klausnitzer, M.; Börzel, S.; Schröder, M. & Hameyer, K. (2019), „Umformtechnisch hergestellte Formspulen zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors in elektrischen Maschinen“, *Ideen Form geben : 33. ASK Umformtechnik 2019*, Verlagshaus Mainz GmbH, S. 135-146, ISBN: 978-3-95886-271-5.

Petrell et al. 2020

Petrell, D.; Teller, M.; Hirt, G.; Borzel, S. & Schafer, W. (2020), „Economical production of conically shaped concentrated windings using forming technology for use in wheel hub engines“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388188.

Pischinger & Seiffert 2016

Pischinger, S. & Seiffert, U. (2016), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, (8. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-09528-4.

Powell 2003

Powell, D. J. (2003), *Modelling of high power density electrical machines for aerospace*, Dissertation, University of Sheffield.

Pyrhönen et al. 2008

Pyrhönen, J.; Jokinen, T.; Hrabovcová, V. & Niemelä, H. (2008), *Design of Rotating Electrical Machines*, Wiley, Chichester, ISBN: 978-0-470-69516-6.

Reddy, Jahns & El-Refaie 2008

Reddy, P. B.; Jahns, T. M. & El-Refaie, A. M. (2008), „Impact of Winding Layer Number and Slot/Pole Combination on AC Armature Losses of Synchronous Surface PM Machines Designed for Wide Constant-Power Speed Range Operation“, *2008 IEEE Industry Applications Society annual meeting*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/08IAS.2008.57.

REFA 1976

REFA, V. f. A. (1976), *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*, Teil 1: Grundlagen, (5. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 3-446-12211-7.

REFA 1978

REFA, V. f. A. (1978), *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*, Teil 2: Datenermittlung, (6. Auflage), Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 3-446-12704-6.

Reuter et al. 2021

Reuter, S.; Sorg, T.; Liebertseder, J. & Doppelbauer, M. (2021), „Design and Evaluation of a Houseless High-Performance Machine with Thermoset Molded Internal Cooling“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684226.

Reuter, Berg & Doppelbauer 2021

Reuter, S.; Berg, L. F. & Doppelbauer, M. (2021), „Performance evaluation of a high-performance motor with thermoset molded internal cooling“, *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684222.

Richnow 2016

Richnow, J. P. (2016), *Untersuchungen zur Optimierung der Fertigung von Drehfeldstatorn für Traktionsantriebe*, Dissertation, Universität München, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-4849-0.

Riedel et al. 2022

Riedel, A.; Kühl, A.; Franke, J.; Gräf, R.; Hubert, T. & Bauer, D. (2022), „Experimental Investigation of a New Manufacturing Technology for Hairpin Stators with Litz Wires“, *2022 12th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC56367.2022.10019747.

Riehm, Spieker & Fister 2020

Riehm, C.; Spieker, C. & Fister, M. (2020), „NeWwire - Design of an Induction Machine with an automatable pitched double-layer lap winding“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388191.

Risch et al. 2016

Risch, F.; Halder, H.; Schlag, P.; Kehl, N.; Schilp, H. & Beckmöller, S. (2016), *Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe (HeP-E): Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts*, München, DOI: 10.2314/GBV:872354997.

Risch 2016

Risch, F. (2016), *Schlussbericht der Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft über das Förderprojekt HeP-E, hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe*, Förderkennzeichen: 02PJ2330.

Roebel 1912

Roebel, L. (1912), *Leiter für elektrische Maschinen, welcher aus zwei oder mehr Gruppen von Teilleitern besteht.*, Patentschrift, Kaiserliches Patentamt, Deutsches Reich, Patentnummer: 277012.

Ruf et al. 2018

Ruf, A.; Pauli, F.; Schröder, M. & Hameyer, K. (2018), „Lebensdauermodellierung von nicht-teilentladungsresistenten Isoliersystemen elektrischer Maschinen in dynamischen Lastkollektiven“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 135, 2, S. 131–144, DOI: 10.1007/s00502-018-0600-0.

Sadiku & Witt 2009

Sadiku, S. & Witt, B. (2009), „Prozesstechnologien zur Herstellung von Elektromotoren für Hybrid-und Elektrofahrzeuge“, *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, expert Verlag, Renningen, S.116-133, ISBN: 978-3-8169-2900-0.

Sadiku & Witwer 2015

Sadiku, S. & Witwer, K. (2015), *Verfahren zur Herstellung einer Spulenwicklung zum Einlegen in radial offene Nuten von Statoren oder Rotoren von Elektromaschinen*, Offenlegungsschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, Patentnummer: DE 10 2015 120 661 A1.

Schäfer et al. 2021

Schäfer, L.; Burkhardt, L.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2021), „Integriertes Produkt-Produktions-Codesign/Integrated product-production codesign“, *wt Werkstattstechnik online*, 111, 04, S: 201–205, DOI: 10.37544/1436–4980–2021–04–23.

Schiefer 2017

Schiefer, M. (2017), *Indirekte Wicklungskühlung von hochausgenutzten permanenterregten Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklung*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.

Schon 2016

Schon, K. (2016), *Hochspannungsmesstechnik*, Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-15177-5.

Schramm et al. 2017

Schramm, D.; Hesse, B.; Maas, N.; Hiesgen, G. & Unterreiner, M. (2017), *Fahrzeugtechnik*, Technische Grundlagen aktueller und zukünftiger Kraftfahrzeuge, De Gruyter, Berlin, ISBN: 978-3-486-85514-2.

Schröder 2017

Schröder, D. (2017), *Elektrische Antriebe - Grundlagen*, Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben, (6. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-55447-0.

Schröder, Ayeb & Brabetz 2020

Schröder, M.; Ayeb, M. & Brabetz, L. (2020), „Thermal design of an asynchronous machine within the project NeWire“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388197.

Sell-Le Blanc 2016

Sell-Le Blanc, F. (2016), *Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen*, Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-5020-2.

Sell-Le Blanc et al. 2019

Sell-Le Blanc, F.; Halwas, M.; Jäger, D.; Weisse, L.; Jovanoski, J.; Kehl, N.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Feasibility Study for Enameled Round Copper Wire Compression within Slots of Electrical Machines“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–9, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9012030.

Sell-Le Blanc et al. 2020

Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Klusmann, B.; Luttge, W.; Dunker, A.; Lindhorst, N. & Halwas, M. (2020), „Development of an alternative Round Wire Process Chain: Automated Trickle Winding“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9388202.

Seong 2017

Seong, T. L. (2017), *Electrical machine with variable cross section stator windings*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 2019/0149001 A1.

Sequenz et al. 1973

Sequenz, H.; Brüderlink, M.; Feiten, E.; Haus, O.; Knobloch, R.; Lambrecht, D.; Maier, F.; Mertens, W.; Neidhöfer, G.; Oburger, W. & Wichmann, A. (1973), *Herstellung der Wicklungen elektrischer Maschinen*, Springer Verlag, Wien, ISBN: 978-3-7091-4383-4.

Sidebotham 2015

Sidebotham, G. (2015), *Heat Transfer Modeling, An Inductive Approach*, Springer, Heidelberg, ISBN: 978-3-319-14513-6.

Siebertz, van Bebber & Hochkirchen 2017

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)*, (2. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-55742-6.

Siesing, Reinap & Andersson 2014

Siesing, L.; Reinap, A. & Andersson, M. (2014), „Thermal properties on high fill factor electrical windings: Infiltrated vs non infiltrated“, *International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014*, IEEE, S. 2218–2223, DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960492.

Simpson, Wrobel & Mellor 2013

Simpson, N.; Wrobel, R. & Mellor, P. H. (2013), „Estimation of Equivalent Thermal Parameters of Impregnated Electrical Windings“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49, 6, S. 2505–2515, DOI: 10.1109/TIA.2013.2263271.

Simpson & Mellor 2018

Simpson, N. & Mellor, P. H. (2018), „Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines“, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, S. 5765–5772, DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557999.

Simpson, Tighe & Mellor 2019

Simpson, N.; Tighe, C. & Mellor, P. (2019), „Design of High Performance Shaped Profile Windings for Additive Manufacture“, *ECCE 2019*, IEEE, S. 761–768, DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912923.

Simpson et al. 2020

Simpson, N.; North, D. J.; Collins, S. M. & Mellor, P. H. (2020), „Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56, 3, S. 2510–2519, DOI: 10.1109/TIA.2020.2975763.

Stan 2020

Stan, C. (2020), *Alternative Antriebe für Automobile*, (5. Auflage), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-61758-8.

Staton, Boglietti & Cavagnino 2005

Staton, D.; Boglietti, A. & Cavagnino, A. (2005), „Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors“, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20, 3, S. 620–628, DOI: 10.1109/TEC.2005.847979.

Stöck, Lohmeyer & Meboldt 2015

Stöck, M.; Lohmeyer, Q. & Meboldt, M. (2015), „Increasing the Power Density of e-motors by Innovative Winding Design“, *Procedia CIRP*, 36, S. 236–241, DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.078.

Stöck 2016

Stöck, M. (2016), *Steigerung der Leistungsdichte und der Wirtschaftlichkeit von Elektromotoren für atomotive Fahrtriebe*, Dissertation, ETH Zürich, Research Collection, Zürich.

Stroebele & Scheiffele 2004

Stroebele, W. & Scheiffele, H. (2004), *Method for making an electromagnetically excitable core of an electrical machine with a multiphase winding*, Patent Application Publication, United States, Patentnummer: US 0261255 A1.

Tschöke, Mollenhauer & Maier 2018

Tschöke, H.; Mollenhauer, K. & Maier, R. (2018), *Handbuch Dieselmotoren*, (4. Auflage), Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-07697-9.

Tschöke, Gutzmer & Pfund 2019

Tschöke, H.; Gutzmer, P. & Pfund, T. (2019), *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-60356-7.

Tzscheuschler, Olbrisch & Jordan 1990

Tzscheuschler, R.; Olbrisch, H. & Jordan, W. (1990), *Technologie des Elektromaschinenbaus*, Verlag Technik, Berlin, ISBN: 3-341-00851-9.

Unger 1955

Unger, F. (1955), „Die Wärmeleitung in Runddrahtspulen“, *Archiv für Elektrotechnik*, 41, 7, S. 357–364, DOI: 10.1007/BF01407440.

van der Geest et al. 2013

van der Geest, M.; Polinder, H.; Ferreira, J. A. & Zeilstra, D. (2013), „Stator winding proximity loss reduction techniques in high speed electrical machines“, *2013 International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC 2013)*, IEEE, S. 340–346, DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556273.

van der Geest et al. 2014

van der Geest, M.; Polinder, H.; Ferreira, J. A. & Zeilstra, D. (2014), „Current Sharing Analysis of Parallel Strands in Low-Voltage High-Speed Machines“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 6, S. 3064–3070, DOI: 10.1109/TIE.2013.2251741.

VDI 2206:2004-06

VDI 2206 (2004), *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 03.100.40; 31.220.

VDI 2221:1993-05

VDI 2221 (1993), *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: DK 62.001/002:621:681:66.0; 681.3.06(083.132).

- VDI 2221 Blatt 1:2019-11
VDI 2221 Blatt 1 (2019), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 03.100.40.
- VDI 2225 Blatt 3:1998-11
VDI 2225 Blatt 3 (1998), *Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: ICS 03.100.40.
- VDI 2860:1990-05
VDI 2860 (1990), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, Beuth Verlag, Berlin, Notation: DK 621.757:62-18(083.71):003.62; 62-771:658.286.2:621.86(083.132).
- Veigel 2018
Veigel, M. (2018), *Ein neues Modell zur Berechnung der fertigungsabhängigen Ummagnetisierungsverluste in Synchronmaschinen*, Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie.
- Venkateshan 2021
Venkateshan, S. (2021), *Heat Transfer*, (3. Auflage), Springer International Publishing, Cham, ISBN: 978-3-030-58338-5.
- Vogt 2019
Vogt, S. (2019), *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von verpressten Spulen für effizientere E-Traktionsantriebe*, Dissertation, Technische Universität München.
- WAFIOS 2022
WAFIOS (2022), *Transfer-Biegemaschine, Modell SpeedFormer*, Für die Serienfertigung von Hairpins, I-Pins und Statoranschlussbaugruppen aus Flachmaterial, www.wafios.com [08.11.2022].
- Weigelt et al. 2019
Weigelt, M.; Kink, J.; Mayr, A.; Lindenfels, J. v.; Kuhl, A. & Franke, J. (2019), „Digital Twin of the Linear Winding Process Based on Explicit Finite Element Method“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011857.
- Weisse & Sell-Le Blanc 2019
Weisse, L. & Sell-Le Blanc, F. (2019), *Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer Anordnung für eine Spule mit einer verteilten Spulenwicklungeiner elektrodynamischen Maschine*, Europäische Patentanmeldung, Patentnummer: EP 3 534 513 A1.
- Wereszczak et al. 2017
Wereszczak, A. A.; Emily Cousineau, J.; Bennion, K.; Wang, H.; Wiles, R. H.; Burress, T. B. & Wu, T. (2017), „Anisotropic Thermal Response of Packed Copper Wire“, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 9, 4, DOI: 10.1115/1.4035972.

Widmer et al. 2014

Widmer, J. D.; Spargo, C. M.; Atkinson, G. J. & Mecrow, B. C. (2014), „Solar Plane Propulsion Motors With Precompressed Aluminum Stator Windings“, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29, 3, S. 681–688, DOI: 10.1109/TEC.2014.2313642.

Widmer, Martin & Mecrow 2015

Widmer, J. D.; Martin, R. & Mecrow, B. C. (2015), „Pre-compressed and stranded aluminium motor windings for traction motors“, *Proceedings, 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, IEEE, S. 1851–1857, DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409316.

Winter et al. 2021

Winter, J.; Grütznert, S.; Porabka, T.; Sell-Le Blanc, F.; Weiße, L.; Klusmann, B.; Kehl, N.; Jovanoski, J.; Halwas, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2021), *Neuartige serienflexible Wickelverfahren für die wirtschaftliche automatisierte Fertigung von hoch performanten elektrischen Maschinen: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts NeWire*, Förderkennzeichen: BMBF 02P16A000-004, DOI: 10.2314/KXP:1815339780.

Wirth, Hofmann & Fleischer 2019

Wirth, F.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), *Einfluss geometrischer Materialtoleranzen auf die werkzeuggebundene Formgebung und Eigenschaften von Hairpin-Steckspulen*, Whitepaper, www.umformtechnik.net [30.01.2022].

Wirth et al. 2018

Wirth, F.; Kirgor, T.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „FE-Based Simulation of Hairpin Shaping Processes for Traction Drives“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658278.

Wirth & Fleischer 2019

Wirth, F. & Fleischer, J. (2019), „Influence of Wire Tolerances on Hairpin Shaping Processes“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011999.

Wirth et al. 2020

Wirth, F.; Nguyen, C.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Characterization of Rectangular Copper Wire Forming Properties and Derivation of Control Concepts for the Kinematic Bending of Hairpin Coils“, *Procedia Manufacturing*, 47, S. 678–685, DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.209.

Wolf 1997

Wolf, K.-U. (1997), *Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, ISBN: 3-87525-092-3.

Wrobel & Mellor 2010

Wrobel, R. & Mellor, P. H. (2010), „A General Cuboidal Element for Three-Dimensional Thermal Modelling“, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 8, S. 3197–3200, DOI: 10.1109/TMAG.2010.2043928.

Wrobel & Mellor 2011

Wrobel, R. & Mellor, P. H. (2011), „Thermal Design of High-Energy-Density Wound Components“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58, 9, S. 4096–4104, DOI: 10.1109/TIE.2010.2093485.

Wu & El-Refaie 2020a

Wu, F. & El-Refaie, A. M. (2020), „Additively Manufactured Hollow Conductors Integrated with Heat Pipes: Design Tradeoffs and Hardware Demonstration“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 52–58, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270954.

Wu & El-Refaie 2020b

Wu, F. & El-Refaie, A. M. (2020), „Additively Manufactured Hollow Conductors with Integrated Cooling for High Specific Power Electrical Machines“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, S. 1497–1503, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270871.

Wu, El-Refaie & Al-Qarni 2021a

Wu, F.; El-Refaie, A. M. & Al-Qarni, A. (2021), „Additively Manufactured Hollow Conductors for High Specific Power Electrical Machines: Aluminum vs Copper“, *ECCE 2021*, Hrsg. B. Welchko & N. Anglani, IEEE, S. 4397–4404, DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595470.

Wu, El-Refaie & Al-Qarni 2021b

Wu, F.; El-Refaie, A. M. & Al-Qarni, A. (2021), „Additively Manufactured Hollow Conductors Integrated With Heat Pipes: Design Tradeoffs and Hardware Demonstration“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57, 4, S. 3632–3642, DOI: 10.1109/TIA.2021.3076423.

Wüterich, Liewald & Kopp 2019

Wüterich, D.; Liewald, M. & Kopp, M. (2019), „Validation of Bending Simulation Models Based on Yield Strength Influences of Electrical Steel Sheets on Stator Core Radius“, *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011969.

Wüterich, Liewald & Kopp 2020

Wüterich, D.; Liewald, M. & Kopp, M. (2020), „Numerical Simulation and Experimental Validation of Flatpack Bending and Joining Process“, *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC51184.2020.9718576.

Xue et al. 2021

Xue, S.; Michon, M.; Popescu, M. & Volpe, G. (2021), „Optimisation of Hairpin Winding in Electric Traction Motor Applications“, *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, IEEE, S. 1–7, DOI: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449605.

Ziegler et al. 2018

Ziegler, M.; Schneider, M.; Hubert, M. & Franke, J. (2018), „Potentials of the Rotary Cutting Process for Electrical Steel Strip“, *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–6, DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658297.

Zingel 2013

Zingel, J. C. (2013), *Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips = Basis definition of a common language of product engineering in the context of modeling of technical systems and a modeling technique for the systems of objectives and objects of technical systems on the basis of the ZHO-principle*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Stolzenberger Druck und Werbung, Leimen, ISSN: 1615-8113.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Aufbaus der vorliegenden Arbeit.	3
Abbildung 2-1: Traktionsmaschine als Leistungswandler: (links) motorischer Betrieb, (rechts) generatorischer Betrieb / Rekuperation.	5
Abbildung 2-2: Einordnung der geeigneten Maschinentypen für Traktionsantriebe in die Übersicht der elektrischen Maschinen geordnet nach Funktionsprinzip. (eigene und veränderte Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 73))	6
Abbildung 2-3: Aufbau einer Traktionsmaschine, in der Ausführung als ASM. Obere Reihe: Axialschnitt (links) und Radialschnitt (rechts) der Gesamtbaugruppe. Untere Reihe (von links nach rechts): Rotor-, Stator- und Gehäusebaugruppe einzeln dargestellt. (eigene und veränderte Darstellung nach (Doppelbauer 2020, S. 200))	8
Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung des Leistungsflusses und der Verluste in den Baugruppen Stator und Rotor (eigene und veränderte Darstellung nach (Doppelbauer 2020, S. 228))	17
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Skin-Effekts in einem Rundleiter. (eigene Darstellung nach (Bauer 2019, S. 33))	18
Abbildung 2-6: Abnahme der Skintiefe für Leitkupfer, Leitaluminium und Silber über steigende Frequenz des anliegenden Wechselstroms.	19
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des Proximity-Effekts in benachbarten Rundleitern (links) und einer exemplarischen Statornut (rechts). (eigene Darstellung nach (Iwasaki et al. 2009; Bauer 2019, S. 33 f.))	21
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Reduktion der Wirbelströme in beispielhaften Rechteckkörpern durch Segmentierung des Volumens (links) und Hystereseschleife bei Ummagnetisierung (rechts).	24
Abbildung 2-9: Vereinfachte schematische Darstellung der drei Rotortopologien mit Ausbruch (von links nach rechts) einer Asynchronmaschine (ASM), permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) und fremderregten Synchronmaschine (FESM).	25
Abbildung 2-10: Darstellungen der beiden Hauptbaugruppen eines Drehstromstators: Blechpaket mit Papierisolation (links) und vereinfachter verteilter Kupferwicklung (Mitte). Die Gesamtbaugruppe ist auf der rechten Seite dargestellt. (Eigene Darstellung basierend auf (Winter et al. 2021))	28
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines gesamten Statorblechpaketes im Vollblechschnitt (links) und eine Darstellung der einzelnen geschichteten Elektrobleche (rechts). (Eigene Darstellung des Blechpaketes nach (Winter et al. 2021))	29

- Abbildung 2-12: Vereinfachte schematische Darstellung einer Spule (links), einer konzentrierten Wicklung (oben rechts) und einer verteilten Wicklung (unten rechts). (eigene und veränderte Darstellung nach (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990)). 32
- Abbildung 2-13: Vereinfachte schematische Darstellung verschiedener Wickelschemata: Schleifenwicklung (Mitte) und Wellenwicklung (rechts), bei der Verwendung von Stäben (links oben) oder einzelnen Leitern (links unten) innerhalb einer Spule. (eigene Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 90) 34
- Abbildung 2-14: Vereinfachte schematische Darstellung einer geometrischen Ausprägung der Ein- und Zweischichtwicklung. Jeweils: Schnitt durch die Statorbaugruppe (links), Draufsicht des Statorwickelkopfes (Mitte) und Schnitt durch eine exemplarische Nut (rechts). (Eigene Darstellung nach (Bälä et al. 1969; Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016; Sequenz et al. 1973; Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990)) 35
- Abbildung 2-15: Darstellung des Wickelschemas einer Zweischichtwicklung mit Lagenwechsel und 10/12 Sehnung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (Winter et al. 2021) und (A_Sedlmaier 2021)) 36
- Abbildung 2-16: Vereinfachte schematische Darstellung eines Kupferlackdrahtes zur Verwendung in der Spulenwickeltechnik. (eigene und veränderte Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 106) 40
- Abbildung 2-17: Darstellung von Lagenaufbauten in Statornuten nach aktuellem Stand der Technik in einer Schnittansicht: a) Rechteckleiter (bspw. Hairpinwicklung), b) wilde Wicklung, c) lagengenaue Wicklung und d) orthozyklische Wicklung. 42
- Abbildung 2-18: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zum elektrischen Füllfaktor eines Statornutmodells für wilde Lagenaufbauten. (eigene Darstellung nach Staton, Boglietti & Cavagnino 2005) 44
- Abbildung 2-19: Schematische Darstellung des Aufbaus eines elektromagnetischen Schwingkreises (links) der Stoßspannungsprüfung und der gedämpften Sinuswelle (rechts) der resultierenden schwingenden Schaltstoßspannung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (Sell-Le Blanc et al. 2019; Schon 2016; Lahrman, Lahrman & Granitza 2015)) 48
- Abbildung 2-20: Schematische Übersicht der Prozesskette der Statorfertigung. Blau gekennzeichnet sind die einzelnen Prozessschritte, grau die zu verarbeitenden Halbzeuge und Materialien. (eigene und veränderte Darstellung nach (Vogt 2019, S. 19)) 53
- Abbildung 2-21: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 mit Fokus auf das Wickeln mit Draht nach DIN 8593-5. (eigene und veränderte Darstellung nach (DIN 8580:2003-09; DIN 8593-5:2003-09)) 54

Abbildung 2-22: Vereinfachte schematische Darstellung des Linearwickelverfahrens auf einem unrundern Spulenkörper.	56
Abbildung 2-23: Vereinfachte schematische Darstellung des Flyerwickelverfahrens auf einem unrundern Spulenkörper.	57
Abbildung 2-24: Vereinfachte schematische Darstellung des Nadelwickelverfahrens auf unrundern Spulenkörper.	58
Abbildung 2-25: Vereinfachte schematische Schnittdarstellung der Schritte des Einziehvorgangs zuvor gewickelter Spulen in ein Statorblechpaket. (eigene Darstellung nach (Tzscheutschler, Olbrisch & Jordan 1990, S. 339))	59
Abbildung 2-26: Vereinfachte schematische Darstellung der Träufelwickeltechnik. Erstellung der Luftspulen auf einem Schablonenwickler (links) und Einträufeln der Wicklung in der Schnittansicht (rechts).	61
Abbildung 2-27: Vereinfachte schematische Darstellung des Prozessablaufs der Hairpintechnologie zur Herstellung verteilter Wicklungen für Traktionsantriebe. (eigene und veränderte Darstellung nach (Wirth et al. 2020))	64
Abbildung 2-28: Vereinfachte schematische Darstellung der Prozessschritte der kontinuierlichen Hairpintechnologie zur Herstellung verteilter Wicklungen für Traktionsantriebe. (eigene schematische Darstellung nach (Sadiku & Witt 2009; Lüttge 2015))	66
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zielstellung (Kompaktwicklung).	75
Abbildung 3-2: Darstellung des technischen Produktlebenszyklus. (eigene Darstellung nach (VDI 2221 Blatt 1:2019-11))	76
Abbildung 3-3: Der Aufbau und die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit ist angelehnt an den Problemlösungszyklus nach VDI 2206:2004-06 (links) mit den drei allgemeinen Schritten des Vorgehenszyklus (rechts) in der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017, S. 108). (eigene und veränderte Darstellung nach (Gerst 2002, S. 11))	78
Abbildung 4-1: Idealisierte Darstellung des kompaktierten lagengenauen Aufbaus als Zielbild der Kompaktwicklung (Schnittdarstellung im Statorblechpaket).	79
Abbildung 4-2: Darstellung eines geordneten Lagenaufbaus in einer schematischen Statornut. Als geordneter Lagenaufbau wird eine definierte geometrische Anordnung bezeichnet, in diesem Fall der lagengenauere Nutaufbau. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass die Drahtmittelpunkte quadratisch angeordnet sind, mit einer Kantenlänge des Drahtdurchmessers d . (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2021))	80

Abbildung 4-3: Darstellung der schematischen Kompaktierung. Schematische Komprimierung einer Wicklung (links) und schematische Verpressung eines Runddrahtes (rechts) mit initialem Durchmesser d und umgeformter Höhe h . (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a))	81
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des flexiblen Wickelkopfes (links) und der Lagenstrukturen (beispielhafte Schnittdarstellung) bei ungetwistetem (rechts oben) und getwistetem Wickelkopf (rechts unten). (Eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a; Halwas, Wirth & Fleischer 2021))	82
Abbildung 4-5: Darstellung des Prozessablaufs für den direkten und indirekten Kompaktwickelprozess.	84
Abbildung 5-1: CAD-Darstellung der geplanten Versuchsspulen mit lagengenaue Wicklung zur Untersuchung des Kompaktwickelprozesses.	86
Abbildung 5-2: Darstellung des Versuchswerkzeugs als CAD-Modell mit Beschriftungen und Schnittansicht. (Eigene Darstellung nach (A_Norouzi 2020))	87
Abbildung 5-3: Darstellung der empfohlenen Stromstärken in A über die Verbackzeit in s für die Kupferleiter mit den Leiterdurchmessern von 0,56 mm, 0,71 mm und 0,90 mm nach Formel 5-1.	89
Abbildung 5-4: Aufnahme und Ausschnitte der korrekt hergestellten Spulen. (Eigene Darstellung nach Aufnahmen entnommen aus (A_Scholz 2021))	91
Abbildung 5-5: Fehlzustandsbaumanalyse nach DIN EN 61025 (DIN EN 61025:2007-08) für das Hauptereignis defekter Spulen.	92
Abbildung 5-6: Eingebrachte Energie in kJ über Leistung in W und Verbackzeit in s. Die mit schwarzem Rahmen umrandeten Energiebereiche von 10 bis 40 kJ sind für das Verbacken von den vorliegenden Spulen geeignet.	93
Abbildung 5-7: Darstellung der Ergebnisse aus Versuchsreihe D. Elektrischer Widerstand R_g in Ω , RPDIV in V, mechanischer Füllfaktor und Auftretenshäufigkeit von Isolationsfehlern über den Pressdruck in MPa inklusive der gemessenen Standardabweichung (links). Aufnahmen der kompaktierten Isolationspapiere der Pressdrücke von 20 bis 300 MPa mit schwarz markierten Beschädigungen der Isolationspapiere (rechts). (eigene Darstellung nach (Sell-Le Blanc et al. 2019))	99
Abbildung 5-8: Übersicht der vereinfachten schematischen Zusammenstellung bekannter Konzeptumsetzungen für das Kompaktieren von Wicklungen in Patenten in vier Übergruppen (A bis D). Darstellung als Schnittansicht durch die Nuten: (1) vor Kompaktierschritt, (2) Kompaktierschritt und (3) finale Form der Wicklung.	101
Abbildung 5-9: Gemessene Standardkraft in N über die Dehnung in % der zehn Runddrahtproben mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und Grad 2.	104

- Abbildung 5-10: Gemittelte Fließkurve der zehn Runddrahtproben mit einem Leiterdurchmesser von 0,71 mm und Grad 2. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)) 104
- Abbildung 5-11: Übersicht der Falschfarbenbilder für die ausgewerteten von Mises Vergleichsspannungen an den drei Wicklungstopologien und Stempelwegen bei vier Drahtlagen. Dargestellt ist ein Schnittbild mittig der Nut bei 12,5 mm. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)) 110
- Abbildung 5-12: Übersicht der Falschfarbenbilder für die ausgewerteten äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen (PEEQ) an den drei Wicklungstopologien und Lagen bei jeweils maximalem Stempelweg von 21 %. Dargestellt ist ein Schnittbild mittig der Nut bei 12,5 mm. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)) 111
- Abbildung 5-13: Auswertung der maximalen von Mises Vergleichsspannungen und der maximalen äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen für alle untersuchten Faktorkombinationen. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)) 113
- Abbildung 5-14: Auswertung der elektrischen Füllfaktoren (FF) und der prozentualen Verbesserungen der elektrischen Füllfaktoren für alle untersuchten Faktorkombinationen. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022)) 114
- Abbildung 5-15: Dreidimensionale Schnittdarstellungen der Falschfarbenbilder der lagengenauen Nutaufbauten mit 2, 4 und 8 Lagen über 7 %, 14 % und 21 % Stempelweg der initialen Wicklungshöhe. Verschiebung in mm in Richtung des Nutverlaufs in mm (U3). 115
- Abbildung 5-16: Auswertung der elektrischen Füllfaktoren und der prozentualen Verbesserungen der elektrischen Füllfaktoren für normierte Stempelwege von 4 % bis 25 % des lagengenauen Wicklungsaufbaus. 116
- Abbildung 5-17: CAD-Darstellung der Werkzeuge für die Versuchsreihen 1 bis 4. Verwendet wurden Modellnuten mit rundem, eckigen und trapezförmigen Nutgrund (ersten drei Presswerkzeuge von links nach rechts) und eine Matrize (rechts) mit der Nutgeometrie des NeWire-Stators (siehe Winter et al. 2021) und angepasstem Stempel. (eigene Darstellung nach A_Jäger 2019; A_Kenge 2020; A_Weber 2021) 117
- Abbildung 5-18: CAD-Modelle der beiden eingesetzten Kompaktierwerkzeuge zur Kompaktierung der verbackenen Spulenproben in den Versuchsreihen 5 bis 8 mit jeweils 10 Drähten (2 Schichten mit 5 Drähten). Werkzeugversion A, bestehend aus einer gefrästen Matrize (links), und Version B mit einer teilbaren Matrize (rechts). Der Aufbau und die Geometrie des Stempels sind in beiden Versionen gleich. (eigene Darstellung nach (A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022)) 118

- Abbildung 5-19: Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse der Versuchsreihe 1. Gemessener mittlerer Pressdruck p_{Press} in MPa mit Standardabweichungen und linearen Approximationen über die Windungszahl und Nutform. (eigene Auswertung aus den Daten generiert in (A_Kenge 2020)) 124
- Abbildung 5-20: Aufnahme der ausgewerteten Druckmessfolien. Eckige, runde und trapezförmige Nutgeometrien mit jeweils 80 beziehungsweise 120 Windungen bei 250 beziehungsweise 350 MPa am Presstempel. Die mittigen Flächen liegen dabei am Nutgrund an, während links und rechts davon die Nutflanken anliegen. Die Druckmessfolien werden nach der Entnahme aus den Nuten zum Einscannen geglättet. (eigene Darstellung und Auswertung nach (A_Kenge 2020)) 126
- Abbildung 5-21: Darstellung der Messergebnisse der Teilentladungseinsetzspannung (PDIV) in V, der wiederholenden Teilentladungseinsetzspannung (RPDIV) in V und des resultierenden Pressdrucks am Stempel in MPa. (eigene Darstellung nach (A_Kengne 2020)) 127
- Abbildung 5-22: Gemessener Widerstand in Ω mit Standardabweichung der kompaktierten Spulen über steigende Windungszahl w_{sp} . (eigene Darstellung nach (A_Kengne 2020)) 128
- Abbildung 5-23: Ausgewertete Druckmessfolien beim Pressdruck von 210 MPa am Stempel und einer Windungszahl von 20 bei 0, 3 und 9 Kreuzungen. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021)) 129
- Abbildung 5-24: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 3. Links: Elektrischer Widerstand in Ω über die Mindestanzahl der eingebrachten Kreuzungen. Rechts: RPDIV in V über die Mindestanzahl der eingebrachten Kreuzungen. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021)) 130
- Abbildung 5-25: Darstellung des resultierenden Pressdrucks am Nutgrund über den angelegten Pressdruck am Stempel in MPa. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021)) 130
- Abbildung 5-26: Auswertung der Druckmessfolien aus Versuchsreihe 4. Sortierung nach steigender Fehleranzahl. Ausschnitt einer Mikroskopaufnahme der Kupferlackdrähte nach Entnahme. Der am Stempel anliegende Pressdruck in MPa und die Lagenanzahl sind angegeben. (eigene Darstellung nach (A_Weber 2021)) 131
- Abbildung 5-27: Darstellung der Messergebnisse aus Versuchsreihe 5. Elektrischer Widerstand in Ω und RPDIV in V über den Pressdruck in MPa und die Teilspulenanzahl. (eigene Darstellung nach (A_Claassen 2022)) 132
- Abbildung 5-28: Darstellung von Ausschnitten der ausgewerteten Druckmessfolien (links) und Schlifffproben der Teilspulen für eine Druckstufe von 315 MPa. (eigene Darstellung nach (A_Claassen 2022)) 133

- Abbildung 5-29: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 5 und 6. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse nach der Kompaktierung der wilden Wicklung und der Kompaktwicklung für die Widerstandsdifferenz in Ω und der RPDIV in V mit der Standardabweichung als Fehlerbalken. 134
- Abbildung 5-30: Darstellung der Messergebnisse aus der Versuchsreihe 7. Widerstand vor und nach der Kompaktierung in $m\Omega$, PDIV und RPDIV in V nach der Kompaktierung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Ouroulis 2022)) 135
- Abbildung 5-31: Darstellung der dreidimensional vermessenen Geometrieabweichungen in mm im Vergleich zum CAD-Modell der Spule (links) und den ausgewerteten Messdaten der gesamten Versuchsreihe 7 (rechts). (eigene Auswertung und Darstellung nach (A_Ouroulis 2022)) 136
- Abbildung 5-32: Schematische Schnittzeichnung der Kompaktproben mit Detailausschnitt der Isolationsmessstellen. 137
- Abbildung 5-33: Messergebnisse der ausgewerteten Leiterabmessungen in μm (Leiterhöhe LH und Leiterbreite LB) und Kantenradien in μm über die sechs ausgewerteten Faktorkombinationen. 138
- Abbildung 5-34: Auswertung der Isolationsdicke, der Isolationshöhe und -breite in μm über die drei angelegten Pressdrücke und die Werkzeugversionen A und B. Die Isolationsdicke beschreibt hierbei den Mittelwert aus Isolationsbreite und Isolationshöhe. 139
- Abbildung 5-35: Darstellung eines Schliffbildes je angelegtem Pressdruck und Werkzeugversion. Die Abbildung zeigt Graustufen, zur besseren Kontrastierung der Lackisolationsschicht. 140
- Abbildung 5-36: Darstellung der Defektpositionen anhand des Spulenmodells (oben links) und Wahrscheinlichkeit der Position eines Defektes (oben rechts). Mikroskopaufnahmen der realen Spulenfehler, markiert durch den roten Kasten (unten). (eigene Auswertung nach (A_Ouroulis 2022)) 141
- Abbildung 5-37: Darstellung der hauptsächlichen Fehlerbilder der Kompaktwicklung. Übersicht in Fehlzustandsbaumanalyse nach DIN EN 61025 (DIN EN 61025:2007-08) für das Hauptereignis defekter Kompaktwicklungen (oben) mit dazugehörigen Schliffproben (unten). 143
- Abbildung 6-1: Übersicht der Hauptmerkmale der Anforderungen an Wickelprozesse. (eigene Darstellung nach (Winter et al. 2021, S. 28)) 145
- Abbildung 6-2: Übersicht des sequenziellen Kompaktwickelprozesses der drei Baugruppen zur Erfüllung der Teilfunktionen. Zuordnung der vier Teilfunktionen zu den Baugruppen des Schablonenwicklers, des Kompaktierwerkzeugs und des Versuchsstands. 147
- Abbildung 6-3: Darstellung des aufgebauten Schablonenwicklers der Aumann Espekamp GmbH am wbk Institut für Produktionstechnik (Standort Forschungsfabrik) mit schematischer Seitenansicht (oben) und Aufnahmen der Umsetzung (unten). 149

- Abbildung 6-4: Darstellung des Spulenhandlingsystems (Kombination aus Wickelschablone und Einbringeinheit). CAD-Modell des Spulenhandlingsystems mit ausgefahrenen Drahtspannern in Ausgangsstellung (links), CAD-Modell mit aufgenommenen Kompaktspulen mit schematischer Darstellung der Freigabe der untersten Kompaktspule (Mitte) und Darstellung des umgesetzten Prototyps mit aufgenommenen Spulen und montierten Führungsschablonen (rechts). (eigene Darstellung nach (A_Amb 2020)) 150
- Abbildung 6-5: Darstellung der Kompaktspulen. Draufsicht des CAD-Modells (links), Draufsicht der hergestellten Kompaktspulen (Mitte) und Seitenansicht der drei verschiedener Wickelkopfgeometrien (rechts). (eigene Darstellung nach (A_Scholz 2021)) 151
- Abbildung 6-6: CAD-Modell (oberes Bild) der Umsetzung der Drahtlagenmontage. Versuchsstand, bestehend aus modularen Plattformen, der Statoreinheit, der Portaleinheit mit montiertem Spulenhandlingssystem und den beiden Greifereinheiten zur Montage der Teilschichten. Abbildung der fünf Schritte der Drahtlagenmontage (mittlere Bildsequenz) und schematische Schnittdarstellung der Drahtlagenmontage (untere Bildsequenz). (eigene und veränderte Darstellung nach (A_Amb 2020, Halwas et al. 2020a)) 154
- Abbildung 6-7: Schematische Darstellung der Steuerungstechnik für den Versuchsstand. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2020a)) 156
- Abbildung 6-8: Darstellung des aufgebauten Versuchsstandes am wbk Institut für Produktionstechnik (Standort Forschungsfabrik) mit schematischer Draufsicht (Mitte) und Aufnahmen der seitlichen Ansichten A und B (obere und untere Aufnahme). 157
- Abbildung 6-9: Übersicht des integralen Kompaktwickelprozesses mit den zwei Baugruppen zur Erfüllung der Teilfunktionen. Zuordnung der vier Teilfunktionen zu den Baugruppen des Wickelschwerts und der Einbringvorrichtung. 158
- Abbildung 6-10: CAD-Modell der verwendeten Universalnadelwickelmaschine (NWS/S der Aumann Espelkamp GmbH) mit den entsprechenden Maschinenkomponenten und eingebautem Wickelschwert. Nicht dargestellt sind der zugehörige Schaltschrank und die Drahtfässer zur Versorgung der Anlage. 160
- Abbildung 6-11: Darstellung der vier Hauptbaugruppen des Wickelschwerts (oben) und der montierten Gesamtbaugruppe. (eigene Darstellung nach A_Sedlmair 2021) 161
- Abbildung 6-12: Darstellung der einzelnen Demontageschritte nach Bewicklung des Wickelschwerts zur Entnahme der Wicklung. Hier ist beispielhaft nur die Phase U gezeigt, bei der seriennahen Umsetzung sind alle drei Phasen U, V und W handzuhaben. (eigene Darstellung nach (A_Sedlmair 2021)) 162

- Abbildung 6-13: Aufnahme des prototypischen Wickelschwerts zur Überprüfung der Machbarkeit der Wickelmattenerstellung in der NWS/S. 163
- Abbildung 6-14: Machbarkeitsnachweis der Wicklungsherstellung mit Hilfe der NWS/S mit der Hälfte der Wicklung. Zweite Hälfte der Wicklung wird analog auf der weiteren Länge gewickelt. 165
- Abbildung 6-15: Bewickeltes Wickelschwert mit halber Wicklung mit (unten links) und ohne (oben links) Isolationspapier im Bereich des Wickelkopfs. Die im Ausschnitt (rechts) gezeigte Wickelkopfisolation trennt die Phase W von V, sodass im Wickelkopfbereich nur die Kupferlackdrähte der Phase W sichtbar sind. Darunter liegen zwei weitere Phasentrenner zwischen dem Wickelschwert und der Phase U zu V. 166
- Abbildung 6-16: Darstellung der Konzepte zur Einbringung der Kompaktwickelmatten in das Statorblechpaket: (a) analog zur kontinuierlichen Hairpintechnologie, (b) in Stern-Joch Bauweise und (c) unter Verwendung eines flexiblen (einrollbaren) Blechpaketes. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2021)) 168
- Abbildung 6-17: CAD-Modell des virtuellen Prototyps der Einbringvorrichtung der Kompaktwickelmatten. Frontansicht (oben links), Rückansicht (oben rechts) und Frontansicht ohne Grundgestell (unten). (eigene Darstellung nach (A_Dieterich 2022)) 169
- Abbildung 6-18: Ablauf der Entnahme der Wicklung (hier beispielhaft Phase U) vom Wickelschwert und Montage in den Stator. (eigene Darstellung nach (A_Dieterich 2022)) 171
- Abbildung 7-1: Übersichtsdarstellung der Auftrags- und Belegungszeiten für den sequenziellen Kompaktwickelprozess (sK), den integralen Kompaktwickelprozess (iK) und die Hairpintechnologie (HP). Berechnung nach REFA, siehe hierzu Anhang M bis T. Auftragszeiten T entsprechen in dieser Berechnung den Belegungszeiten T_{bB} der Betriebsmittel. T_1 = Auftragszeit je 1 Stator; T_{100} = Auftragszeit je 100 Statoren; T_{1000} = Auftragszeit je 1000 Statoren. (Annahme zur Berechnung ist 3-Schichtbetrieb durchgehend: 60 min = 1 h; 24 h = 1 d, 7 d = 1 w) 178
- Abbildung 7-2: Darstellung der beiden unterschiedlichen Nutaufbauten der Kompaktwicklung (links) und der Hairpinwicklung (rechts) im Simulationsmodell. 181
- Abbildung 7-3: Analyse des Einflusses der Schrittzahl für eine Drehung des Rotors um 360° (elektrisch) in den Simulationsergebnissen bei der Kompaktwicklung. 182
- Abbildung 7-4: Gleich- und Wechselstromverluste für die Kompakt- und Hairpinwicklung über die Frequenz. 183
- Abbildung 7-5: Transiente Gesamtverluste (bezogen auf den jeweiligen Leiter) der zehn Kompaktleiter in Richtung Nutöffnung und Gleichstromverluste je Leiter. 185

- Abbildung 7-6: Transiente Gesamtverluste (bezogen auf den jeweiligen Leiter) der zehn Kompaktleiter am Nutgrund und Gleichstromverluste je Leiter. 185
- Abbildung 7-7: Transiente Gesamtverluste und Gleichstromverluste (bezogen auf die Leiter) des oberen (8) und unteren Leiters (1) der Hairpinwicklung im Vergleich zu den zehn summierten Kompaktleitern in Richtung der Nutöffnung (71-80) und am Nutgrund (1-10). 186
- Abbildung 7-8: Darstellung der gesamten Leiterverluste pro Volumen als Falschfarbenbilder für die Kompakt- (links) und Hairpinwicklung (rechts) zum Zeitpunkt 0,7625 ms bei einer Frequenz von 0,67 kHz. 187
- Abbildung 7-9: Schematische Darstellung der untersuchten Lagenaufbauten innerhalb einer Modellnut: a) Hairpinwicklung, b) wilde Wicklung, c) lagengenaue Wicklung und d) Kompaktwicklung. 191
- Abbildung 7-10: Graphische Darstellung der vier aufgebauten und untersuchten thermischen Netzwerke zur Berechnung der radialen Wärmeleitfähigkeit durch die Nut. Oben links: Lagenaufbau; Mitte links: paralleler Aufbau; unten links: serieller Aufbau; oben rechts: kombinierter Aufbau; unten rechts: Legende. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2021; Hoffmann et al. 2022; Oechslen 2018)) 192
- Abbildung 7-11: Darstellung des entwickelten und genutzten Messaufbaus zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Wicklungsproben. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Bader 2021; A_Heyde)) 194
- Abbildung 7-12: Schematische Darstellung des Vergusswerkzeugs zur Herstellung der Wicklungsproben für die Hauptversuchsreihe. 195
- Abbildung 7-13: Ansicht der verwendeten Proben in der Hauptversuchsreihe. Mikroskopaufnahmen der Schliffbilder (links) und dreidimensionale Aufnahme der Hairpinprobe (rechts). 197
- Abbildung 7-14: Vergleich der vier analytischen Modelle mit dem numerischen Ansatz anhand des Nutaufbaus der lagengenaue Wicklung. Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über die Wärmeleitfähigkeiten der NIM von 0,2 W/(mK) bis 1 W/(mK). (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022)) 198
- Abbildung 7-15: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über die Wärmeleitfähigkeit der NIM von 0,2 W/(mK) bis 1 W/(mK). (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022)) 199
- Abbildung 7-16: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Wicklungen der Hauptversuchsreihen über einen variierenden Leiterdurchmesser von 0,5 mm bis 1,6 mm bei der Verwendung des Vergussharzes ELANTAS: ELANTRON MC62/360F und konstantem elektrischen Füllfaktor. Die Dicke des Isolationslackes richtet sich nach DIN EN 60317-0-1:2014-09 mit dem Grad 2. (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022)) 202

Abbildung 7-17: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit über den Füllgrad des Isolationslacks und den elektrischen Füllfaktor in der Wicklung. (eigene Darstellung nach (Hoffmann et al. 2022)) 203

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht der Leistungskenngrößen von Drehstrommaschinen; im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit als Eigenschaften der Drehstrommaschine bezeichnet. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2019) und (Halwas et al. 2020b), Formelzeichen in Anlehnung an DIN EN 60027-4:2008-03 und DIN 1304-1:1994-03)	10
Tabelle 2-2: Übersicht der für diese Arbeit gewählten Begriffsdefinitionen für Bezeichnungen in der Produktentwicklung. Die Beispiele wurden im Zusammenhang mit dieser Arbeit für Traktionsmaschinen ausgeführt. (eigene und erweiterte Übersicht nach (Zingel 2013; Bender et al. 2021; Albers & Wintergerst 2014; VDI 2221 Blatt 1:2019-11))	12
Tabelle 2-3: Übersicht grundlegender geometrischer und verwandter Kenngrößen von Drehstrommaschinen; im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit gemeinsam mit anderen Kenngrößen als Merkmale bezeichnet. (eigene Darstellung nach (Halwas et al. 2019) und (Halwas et al. 2020b), Formelzeichen orientiert an DIN EN 60027-4:2008-03 und DIN 1304-1:1994-03)	15
Tabelle 2-4: Tabellarische Darstellung der vereinfachten und verallgemeinerten Verluste einer Drehstrommaschine in typischer Anwendung als Traktionsantrieb. (Chu et al. 2014; Epskamp 2020; Doppelbauer 2020; Bauer 2019)	27
Tabelle 2-5: Verwendete Parameter des Stators im Projekt NeWwire. (orientiert an der Auslegung aus (Winter et al. 2021; Riehm, Spieker & Fister 2020))	38
Tabelle 2-6: Übersicht der übergeordneten Merkmale einer Wicklung mit den entsprechenden Ausprägungsmöglichkeiten. (eigene und veränderte Darstellung nach (Vogt 2019, S. 25))	39
Tabelle 2-7: Theoretisch berechenbare und in der Anwendung erreichbare mechanische Füllfaktoren für die verschiedenen Lagenaufbauten in Nuten von Traktionsantrieben. (Halwas et al. 2020a; Wirth, Hofmann & Fleischer 2019)	44
Tabelle 2-8: Übersicht der möglichen Wicklungsfehler über die Mess- und Prüfverfahren zur Charakterisierung und Detektion der entsprechenden Fehlertypen. (Sell-Le Blanc et al. 2019)	46
Tabelle 2-9: Matrix zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Performanceeigenschaften (Zeilen) und den Merkmalen (Spalten) von Traktionsantrieben. (eigene und veränderte Darstellung nach (Halwas et al. 2019))	51
Tabelle 2-10: Matrix zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Wickeltechnologien (Zeilen) und den Merkmalen (Spalten) von Traktionsantrieben. (eigene und veränderte Darstellung nach (Halwas et al. 2019))	73

Tabelle 5-1: Bewertung der verschiedenen Verbackverfahren zum Bonding körperloser Verbackspulen. (Orientierung an (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 239) mit Adaption auf das vorliegende Forschungsumfeld)	88
Tabelle 5-2: Darstellung der Ergebnisse der Wickel- und Verbackversuche bei der Herstellung lagengenaue Wicklungen. (Eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Scholz 2021))	90
Tabelle 5-3: Zusammenfassende Übersicht der entscheidenden Werte für die Kompaktierung von Runddrahtwicklungen aus der Literatur.	95
Tabelle 5-4: Materialkennwerte für die untersuchten Kupferlackdrähte (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))	103
Tabelle 5-5: Zusammenfassung der möglichen Parameter bei der Wicklungskompaktierung von Runddrahtwicklungen bestehend aus Kupferlackdraht (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))	106
Tabelle 5-6: Übersicht der gewählten Faktoren und Faktorstufen für die Parameterstudie. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))	106
Tabelle 5-7: Aufbau des Simulationsmodells und gewählte Parameter. (eigene Darstellung nach (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))	109
Tabelle 5-8: Zusammenfassung aller Parameter bei der experimentellen Wicklungskompaktierung von Runddrahtwicklungen, bestehend aus isolierten Kupferleitern. Die unterstrichenen Parameter verdeutlichen dabei ausgewählte Parameter, die in den folgenden acht experimentellen Versuchsreihen untersucht werden. (basierend auf (Halwas, Wirth & Fleischer 2022))	119
Tabelle 5-9: Übersicht der Untersuchungsziele der acht experimentellen Versuchsreihen.	120
Tabelle 5-10: Detaillierte Darstellung der Parameter der acht experimentellen Versuchsreihen. (zusammengeführt aus (A_Kenge 2020; A_Weber 2021; A_Claassen 2022; A_Ouroulis 2022))	121
Tabelle 5-11: Übersicht der in den acht Versuchsreihen erarbeiteten signifikanten Einflussgrößen auf die jeweiligen Eigenschaften und die empfehlenswerten Parameterbereiche.	142
Tabelle 6-1: Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung des Schablonenwicklers. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Karaoglan 2019; Winter et al. 2021))	148
Tabelle 7-1: Auflistung der aufgenommenen Ist-Zeiten für die Wicklungserzeugung des sequenziellen Kompaktwickelprozess (sK1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))	175
Tabelle 7-2: Auflistung der aufgenommenen Ist-Zeiten für die Wickelmattenerzeugung des integralen Kompaktwickelprozesses (iK1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))	176

Tabelle 7-3: Auflistung der bestimmten und geschätzten Soll-Zeiten für die Formung der Hairpins (HP1) nach REFA. (vgl. (REFA 1978))	177
Tabelle 7-4: Verwendete Parameter im Simulationsmodell. (orientiert an der Auslegung von (Winter et al. 2021; Riehm, Spieker & Fister 2020))	180
Tabelle 7-5: Auflistung der Gleich- und Wechselstromverluste der Kompakt- und Hairpinwicklung für 0,67 kHz und 1,67 kHz mit dem resultierenden Wirkungsgrad.	184
Tabelle 7-6: Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten Materialien in den folgenden analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen. (Hoffmann et al. 2022)	190
Tabelle 7-7: Übersicht der geometrischen Werte der Leiter der untersuchten Proben in der Hauptversuchsreihe; analytisch, numerisch sowie experimentell gemäß DIN EN 60137-0-2/-0-4 und DIN EN 60317-0-1:2014-09. (erweitert nach (Hoffmann et al. 2022))	195

Anhang

Anhang A, Übersicht der für lackisolierte Runddrähte aus Kupfer wichtigen Teile der Normreihe DIN EN 60317 für Isolationsgrade G1 bis G3 und Wärmeklassen 180(H) bis 200(N).

Norm	Beschreibung
DIN EN 60317-0-1	Allgemeine Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Isolationen vom Grad 1, 2 & 3, als auch 1B & 2B.
DIN EN 60317-8	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyesterimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1, 2 & 3 mit Einfachbeschichtung.
DIN EN 60317-13	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyester oder Polyesterimid und Polyamidimid der Wärmeklasse 200 vom Grad 1 & 2 mit Zweifachbeschichtung.
DIN EN 60317-22	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyester oder Polyesterimid und Polyamidimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1, 2 & 3 mit Zweifachbeschichtung.
DIN EN 60317-23	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyesterimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1 & 2 mit Zweifachbeschichtung.
DIN EN 60317-26	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyamidimid der Wärmeklasse 200 vom Grad 1 & 2 mit Einfachbeschichtung.
DIN EN 60317-36	Anforderungen an lackisolierte und verbackbare Runddrähte aus Kupfer mit Polyesterimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1B & 2B mit Zweischichtisolation.
DIN EN 60317-37	Anforderungen an lackisolierte und verbackbare Runddrähte aus Kupfer mit Polyester oder Polyesterimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1B & 2B mit Zweischichtisolation.
DIN EN 60317-38	Anforderungen an lackisolierte und verbackbare Runddrähte aus Kupfer mit Polyester oder Polyesterimid und darüber Polyamidimid der Wärmeklasse 200 vom Grad 1B & 2B mit Dreischichtisolation.
DIN EN 60317-42	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyesteramid-imid der Wärmeklasse 200 vom Grad 1 & 2.
DIN EN 60317-51	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyurethan der Wärmeklasse 180 vom Grad 1 & 2 mit Einfachbeschichtung.
DIN EN 60317-55	Anforderungen an lackisolierte Runddrähte aus Kupfer mit Polyurethan und darüber Polyamidimid der Wärmeklasse 180 vom Grad 1 & 2 mit Zweifachbeschichtung.

Anhang B, Bezeichnungen für die thermischen Klassen. (DIN EN 60085:2008-08)

Thermische Klasse °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
250	—

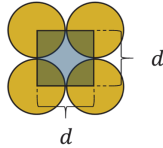
Anhang C, Herleitung der mechanischen Füllfaktoren für den lagengenauen und orthozyklischen Aufbau. (Halwas et al. 2020a)

Theoretischer mechanischer Füllfaktor für lagengenauen Wicklungsaufbau

$$A_{\text{Rechteck}} = d^2$$

$$A_{\text{Drähte}} = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$k_{\text{mec}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.53\%$$

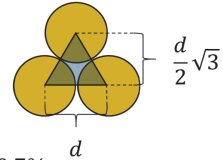


Theoretischer mechanischer Füllfaktor für orthozyklischen Wicklungsaufbau

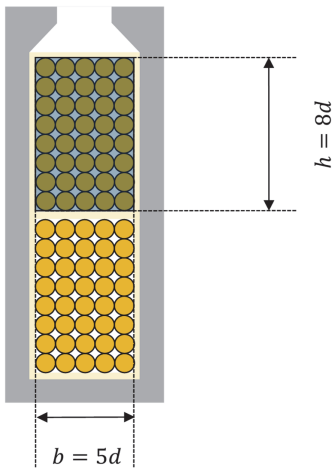
$$A_{\text{Dreieck}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

$$A_{\text{Drähte}} = \frac{\pi}{8} d^2$$

$$k_{\text{mec}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 90.7\%$$



Realistischer mechanischer Füllfaktor für lagengenauen Wicklungsaufbau

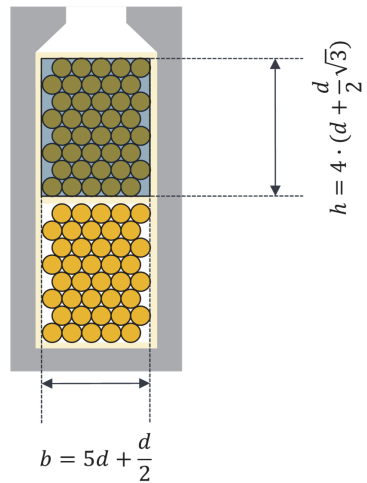


$$A_{\text{Drähte}} = 40 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

$$A_{\text{Nut,iso}} = 40 \cdot d^2$$

$$k_{\text{mec}} = \frac{\pi}{4} \approx 78.53\%$$

Realistischer mechanischer Füllfaktor für orthozyklischen Wicklungsaufbau



$$A_{\text{Drähte}} = 40 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

$$A_{\text{Nut,iso}} = \left(1 + \frac{1}{2}\sqrt{3}\right) \cdot 22d^2$$

$$k_{\text{mec}} \approx 76,53\%$$

Anhang D, Darstellung des Mess- und Prüfplatzes mit universellem Wicklungsprüfgerät MTC-2 der Schleich GmbH mit zugehöriger Prüfhaube und exemplarisch eingelegten Spulen.



Anhang E, Darstellung des Versuchsaufbaus: Herstellung der Testspulen auf Tischwickelmaschine TW 2-CNC der Aumann Espelkamp GmbH (Oben), Kompaktierung einer Spulenseite in Modellnut mittels Stempel auf der hydraulischen Werkstattpresse RODCRAFT WP50P (Mitte) und Vermessung der kompaktierten Spulen im universellen Wicklungsprüfgerät MTC-2 der Schleich GmbH (Unten). (eigene Darstellung nach (Sell-Le Blanc et al. 2019; A_Jäger 2019))



Wickelschablone

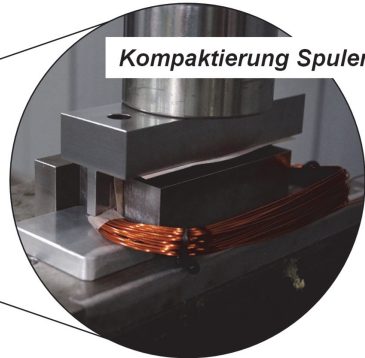
Linearwickelmaschine

Herstellung Spulen

Kraftanzeige in t



Kompaktierung Spulen

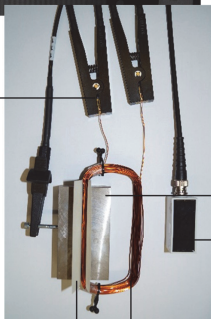


Vermessung Spulen

Klemmen

Modellnut

Messsonde

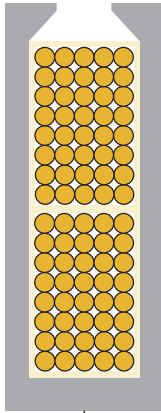


Spule

Isolationspapier (und ggf. Druckmessfolien)

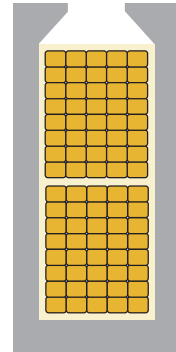
Anhang F, Herleitung Höhenveränderung des Durchmessers bei Verpressung von Runddrähten und Darstellung des resultierenden Umformgrades in Höhenrichtung. (eigene und veränderte Darstellung nach (Halwas et al. 2020a; Petrell et al. 2020))

lagengenaue Wicklung



$$A_{\text{Runddraht}} = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Kompaktwicklung



$$A_{\text{Rechteckdraht}} = d \cdot h$$

Kompaktierung / Verpressung

Höhenveränderung

bei Volumenkonstanz:

$$A_{\text{Runddraht}} = A_{\text{Rechteckdraht}} \rightarrow h = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d \approx \mathbf{0,785 \cdot d}$$

Logarithmischer Umformgrad
in Höhenrichtung:

$$\varphi_h = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \rightarrow \varphi_{h,\max} = \ln\left(\frac{h}{d}\right) = \ln\left(\frac{\pi}{4}\right) \approx \mathbf{-0,242}$$

Anhang G, Darstellung eines exemplarischen morphologischen Kastens. In diesem Fall am Beispiel des Wickelschwerter für den seriennahen Ansatz. (A_Sedlmair 2021)

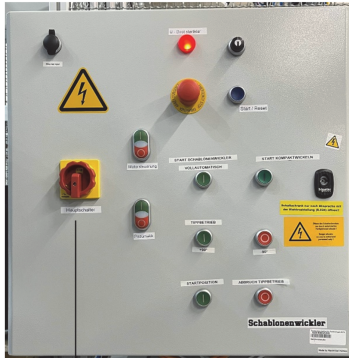
Teilfunktion/System	mögliche Ausprägungen				
	A	B	C	D	E
1 Drahtenden terminieren	 manuell betätigte Klemmbacken	 automatisch betätigte Klemmbacken	 Klemmspalt	 Klemmstift (geschützter Stift, unwickelt)	 Parkierstift
2 Drahtlage definieren	 Rillen am Wickelkopf	 Nuten	 Sätle		
3 Drahttrenner	an Schwert	an Düseneinheit	manuell		
4 Abnahme/Transport Wicklungsmatte	 Schwertbreite verkürzen	 Nutabstand verkürzen (Spannung Wickelkopf lösen)	 bewickelte Hilfselemente von Schwert schieben	 Stäbe	 Schwerttiefe ändern
5 Düsengeometrie	 jeder Draht einzelnes Loch	 mehrere Drähte pro Loch (Langlöcher)	 alle Drähte durch ein (Lang-) Loch		
6 Geometrie Wickschwert	 Kern	 Kernlos	 Hybrid		
7 Freiheitsgrade Düse	Starr	Rotation um eigene Achse (Verdrehung)			
8 Variantenflexibilität	Nuten freilassen	Flexibel platzierbaren Elemente	Schwertbreite veränderbar		
9 Position Kompaktieren Prozessabfolge	Außere Wickelschwert	In Übergabewerkzeug			
10 Stempel Kompaktieren	 einseitig	 beidseitig			

Legende:

- Konzept A
- Konzept B
- Konzept C
- Konzept D

Anhang H, Aufnahmen der beiden Schaltschränke des Versuchsstands (beschrieben in Abschnitt 6.1.3). Außenansicht (links) und Komponenten im Schrank (rechts).

Schaltschrank mit SPS



Hauptschalter

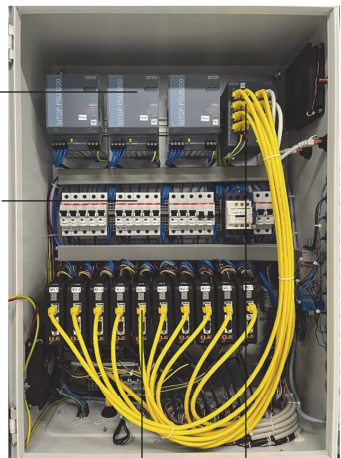


Ein-/ und Ausgänge
SPS
Netzteil
Sicherungen
Umrichter für Schablonenwickler

Schaltschrank mit Motorsteuerungen



Betriebsleuchte



Netzteile
Sicherungen
D1 Steuerungen
Ethernet-Switch

Anhang I, Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung des Kompaktierwerkzeugs.

(W)/(F)*	Hauptmerkmal	Anforderungsbeschreibung	Quantifizierung
W	Energie	händische Bedienung	keine ext. Energiequelle
W	Ergonomie	Handhabung eine Person	<15 kg, <1,5 m
F	Fertigung	Verfahren	spanend / trennend
F	Gebrauch	Kompaktierung	in RODCRAFT WP50P
F	Geometrie	Maße RODCRAFT WP50P	700x700x700 mm
F	Geometrie	Spulenabmessung	<i>siehe Abbildung 5-1</i>
F	Kontrolle	Schleich MTC 2	Widerstand, Isolation
F	Kosten	Materialkosten	gering
F	Kosten	Fertigung	gering
F	Kräfte	Kompaktierung Spulenseiten	max. 450 MPa
F	Montage	Einspannung in NWS/S	Backenfutter/Reitstock
W	Montage	Demontage Wicklung	kollabierbare Nuten
W	Montage	Wickelkopfisolation	Papierisolation
W	Stoff	Werkstoffe	Stahl / Werkzeugstahl
W	Termin	Herstellung	kurze Fertigungszeit
W	Transport	Handhabung eine Person	<15 kg, <1,5 m

*(W) = Wunsch; (F) = Forderung

Anhang J, Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung des Versuchsstandes. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Kroll 2018))

(W)/(F)*	Hauptmerkmal	Anforderungsbeschreibung	Quantifizierung
W	Energie	elektrisch	</=400 V
W	Energie	pneumatisch	</=7 bar
F	Ergonomie	Zugänglichkeit	Stator (NeWwire), Spulenhandlingsystem
W	Fertigung	Verfahren	spanend und generativ
W	Gebrauch	Verschleiß	wartungsarm
F	Gebrauch	Erweiterbar	Modulplattform
F	Gebrauch	Mensch	Schutzumhausung
F	Geometrie	Spulenhandling	Statordurchmesser, Spulenabmessungen
F	Geometrie	Stator	Länge, Durchmesser, ...
F	Geometrie	Leiterdurchmesser	0,71 mm (G2B)
F	Kinematik	Übergabe Spule / Zahnköpfe	drehbare Greifer
W	Kinematik	Wicklungsschema	Einschichtwicklung
W	Kontrolle	Schleich MTC 2	Widerstand, Isolation
W	Kosten	Materialkosten	mittel
W	Kosten	Fertigung	mittel
F	Montage	Spulen	drehbare Greifer
W	Stoff	Werkstoffe	Stahl, Aluminium
W	Transport	Bedienung eine Person	automatisiert / GUI

*(W) = Wunsch; (F) = Forderung

Anhang K, Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung des Wickelschwerths. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Sedlmair 2021))

(W)/(F)*	Hauptmerkmal	Anforderungsbeschreibung	Quantifizierung
W	Energie	händische Bedienung	keine ext. Energiequelle
W	Ergonomie	Handhabung eine Person	<15 kg, <1,5 m
F	Fertigung	Verfahren	spanend und generativ
W	Gebrauch	Verschleiß	wartungsarm
F	Gebrauch	Fertigung Wickelmatte	in NWS/S Aumann
F	Geometrie	Einbau in NWS/S (Länge)	<750 mm
F	Geometrie	Einbau in NWS/S (Radius)	<200 mm
F	Geometrie	Leiterdurchmesser	0,71 mm (G2B)
W	Instandhaltung	Wartungsintervall	Wechsel der Einsätze
F	Kinematik	Umsetzung Wickelschema	<i>siehe Abbildung 2-15</i>
F	Kinematik	Wicklung Stränge (U, V, W)	zusammenhängend
W	Kinematik	Wicklungsschema	variantenflexibel
W	Kontrolle	Schleich MTC 2	Widerstand, Isolation
W	Kosten	Materialkosten	gering
W	Kosten	Fertigung	gering
F	Kräfte	Kompaktierung Spulenseiten	max. 300 MPa
F	Montage	Einspannung in NWS/S	Backenfutter/Reitstock
F	Montage	Demontage Wicklung	kollabierbare Nuten
W	Montage	Wickelkopfisolation	Papierisolation
W	Stoff	Werkstoffe	Aluminium, Kunststoff
W	Termin	rapid Prototyping	kurze Fertigungszeit
W	Transport	Handhabung eine Person	<15 kg, <1,5 m

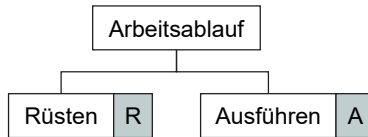
* (W) = Wunsch; (F) = Forderung

Anhang L, Übersicht der relevanten Anforderungen für die Entwicklung der Einbringvorrichtung. (eigene und erweiterte Darstellung nach (A_Dieterich 2022))

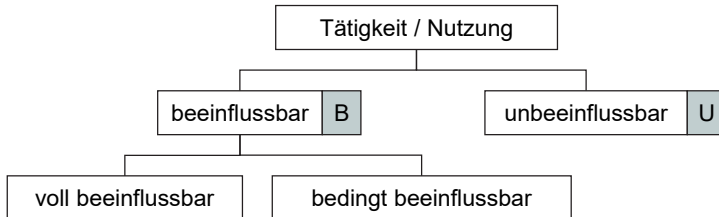
(W)/(F)*	Hauptmerkmal	Anforderungsbeschreibung	Quantifizierung
W	Energie	elektrisch	≤ 400 V
W	Energie	pneumatisch	≤ 7 bar
F	Ergonomie	Zugänglichkeit	Stator, Wickelschwert
W	Fertigung	Verfahren	spanend und generativ
W	Gebrauch	Verschleiß	wartungsarm
F	Geometrie	Wickelschwert	<i>siehe Kapitel 6.2.1</i>
F	Geometrie	Stator	Länge, Durchmesser, ...
F	Geometrie	Leiterdurchmesser	0,71 mm (G2B)
W	Instandhaltung	Wartungsintervall	Schmierung Führungen
F	Kinematik	Übergabe Wickelmatte	<i>siehe Kapitel 6.2.1</i>
W	Kinematik	Wicklungsschema	variantenflexibel
W	Kontrolle	Schleich MTC 2	Widerstand, Isolation
W	Kosten	Materialkosten	mittel
W	Kosten	Fertigung	mittel
F	Kräfte	Kompaktierung Spulenseiten	max. 300 MPa
F	Montage	Isolation	Papierisolation
W	Stoff	Werkstoffe	Stahl, Aluminium
F	Termin	Einbringung Wicklung	kurze Fertigungszeit
W	Transport	Bedienung eine Person	< 15 kg, $< 1,5$ m

*(W) = Wunsch; (F) = Forderung

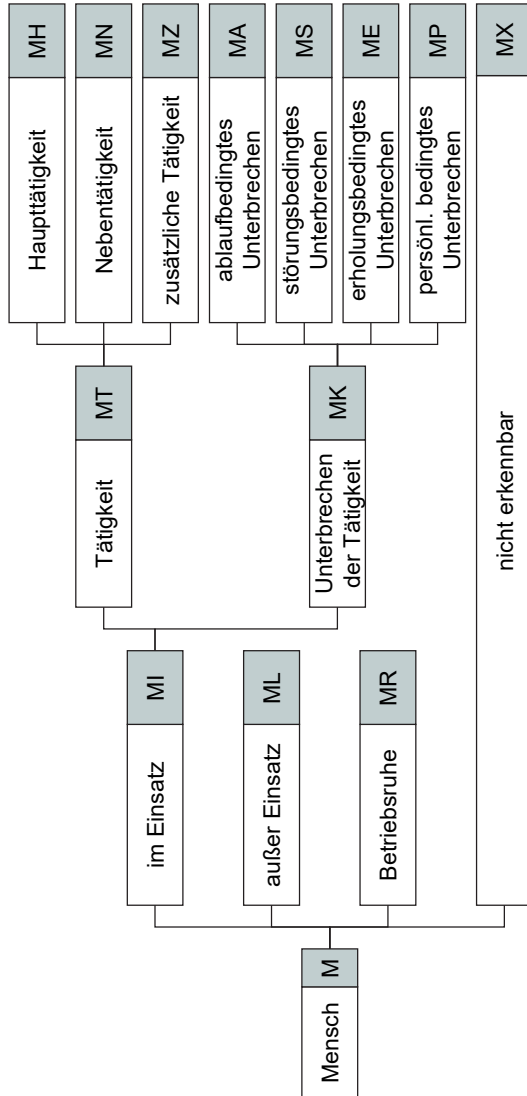
Anhang M, Gliederungsmöglichkeiten für Abläufe nach REFA. (eigene Darstellung nach (REFA 1978, S. 20))



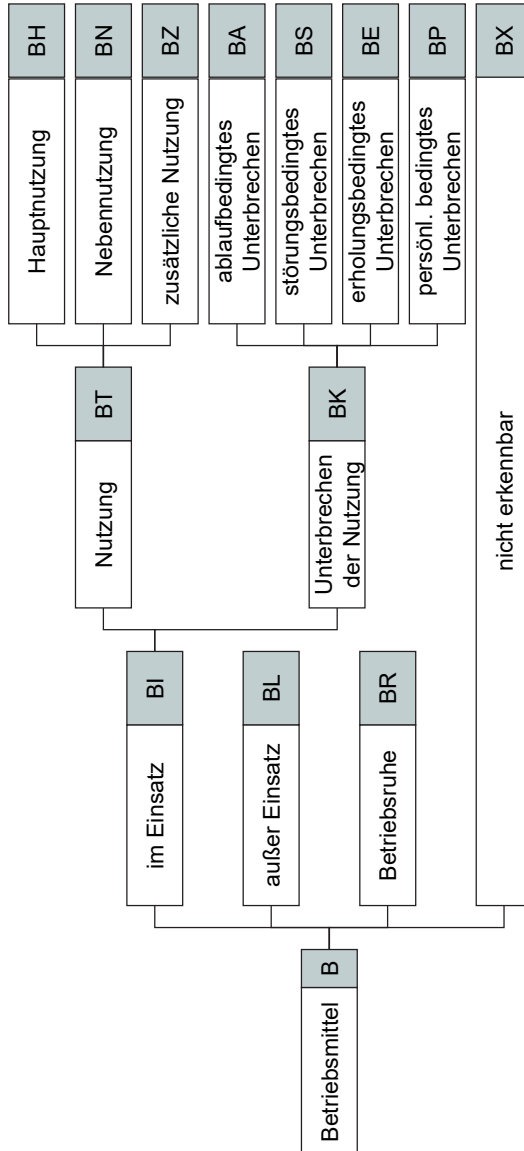
Anhang N, Gliederungsmöglichkeiten für Abläufe nach REFA. (eigene Darstellung nach (REFA 1978, S. 21))



Anhang O, Ablaufgliederung (Analyse der Ablaufarten) bezogen auf den Menschen. (REFA 1978, S. 25)



Anhang P, Ablaufgliederung (Analyse der Ablaufarten) bezogen auf das Betriebsmittel.
(REFA 1978, S. 29)



Anhang Q, Angabe der Berechnungsformeln für die in Kapitel 7.1 durchgeführten Bestimmungen der Auftrags- und Belegungszeiten auf Grundlage der Ist- und Soll-Zeiten nach REFA. (REFA 1978)

Auftragszeit	$T = t_r + m * t_e$	Belegungszeit*	$T_{bB} = t_{rB} + m * t_{eB}$
Zeit je Einheit	$t_e = t_g + t_v$	Zeit je Einheit*	$t_{eB} = t_{gB} + t_{vB}$
Rüstzeit	$t_r = t_{rG} + t_{rV}$	Rüstzeit*	$t_{rB} = t_{rGB} + t_{rVB}$
Rüstgrundzeit	$t_{rG} = \Sigma t_{MNR}$	Rüstgrundzeit*	$t_{rGB} = \Sigma t_{BAR}$
Rüstverteizeit	$t_{rV} = \frac{z_v}{100} * t_{rG}$	Rüstverteizeit*	$t_{rVB} = t_{rV}$
Grundzeit	$t_g = \Sigma t_{MN} + \Sigma t_{MA}$	Grundzeit*	$t_{gB} = \Sigma t_{BH} + \Sigma t_{BA}$
Verteilzeit	$t_v = \frac{z_v}{100} * t_g$	Verteilzeit*	$t_{vB} = t_v$

* = des Betriebsmittels

Stückzahl / Mengeneinheit	m
Verteilzeitprozentsatz	z_v

Anhang R, Auflistung der geschätzten Soll-Zeiten für die Prozessschritte sK2 bis sK4 des sequenziellen Kompaktwickelprozess nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Soll-Zeit in s	Soll-Zeit in min	Zeitart	
				M	B
sK2, Fixierung des Lagenaufbaus (Spulenseiten)					
18	Werkzeugaufnahme und Netzgerät vorbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
19	Werkzeug in Verbackstation einbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
20	Wickeldrähte an Netzgerät anschließen	30	0,50	t_{MN}	t_{BA}
21	Spulenseiten der Spulen 1-4 gleichzeitig verbacken	48	0,80	t_{MA}	t_{BH}
22	Wickeldrähte von Netzgerät abschließen	30	0,50	t_{MN}	t_{BA}
23	Werkzeug aus Verbackstation ausbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
24	Werkzeugaufnahme und Netzgerät nachbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
sK3, Kompaktierung der Wicklung (Spulenseiten)					
25	Werkzeugaufnahme und Netzgerät vorbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
26	Werkzeug in Verbackstation einbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
27	Wickeldrähte an Netzgerät anschließen	30	0,50	t_{MN}	t_{BA}
28	Spulenseiten der Spulen 1-4 gleichzeitig verpressen	30	0,50	t_{MA}	t_{BH}
29	Wickeldrähte von Netzgerät abschließen	30	0,50	t_{MN}	t_{BA}
30	Werkzeug aus Verbackstation einbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
31	Werkzeugaufnahme und Netzgerät nachbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
sK4, Montage in Statornuten des Blechpakets					
32	Einbringvorrichtung vorbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
33	Stator mit Nutisolation einbauen / positionieren	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
34	Werkzeug in Einbringvorrichtung einbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
35	Spulenhandlingsystem in Stator einfahren	20	0,33	t_{MA}	t_{BH}
36	Greifer vorfahren	30	0,50	t_{MA}	t_{BH}
37	Spule 1 greifen und ablegen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
38	Greifer zu Spule 2 fahren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}

39	Spule 2 greifen und ablegen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
40	Greifer zu Spule 3 fahren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
41	Spule 3 greifen und ablegen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
42	Greifer zu Spule 4 fahren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
43	Spule 4 greifen und ablegen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
44	Greifer zurückfahren	30	0,50	t_{MA}	t_{BH}
45	Spulenhandlingsystem aus Stator fahren	20	0,33	t_{MA}	t_{BH}
46	Werkzeug aus Einbringvorrichtung ausbauen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
47	Stator mit Nutisolation ausbauen / drehen	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
48	Einbringvorrichtung nachbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung;
A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

Anhang S, Auflistung der geschätzten Soll-Zeiten für den Prozessschritte iK2 integralen Kompaktwickelprozess nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Soll-Zeit in s	Soll-Zeit in min	Zeitart	
				M	B
iK2, Kompaktierung der Spulenseiten und Montage in Statornuten des Blechpakets					
16	Einbringvorrichtung vorbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
17	Stator mit Nutisolation in Einbringvorrichtung einbauen	25	0,42	t_{MN}	t_{BA}
18	Wickelschwert in Einbringvorrichtung einbauen	70	1,17	t_{MN}	t_{BA}
19	Wickelmatte in Übergabekamm drücken	120	2,00	t_{MA}	t_{BH}
20	Pressstempel über Nuten positionieren	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
21	Pressvorgang	90	1,50	t_{MA}	t_{BH}
22	Pressstempel wegfahren	60	1,00	t_{MN}	t_{BA}
23	Übergabekamm und Einbringwerkzeug positionieren	25	0,42	t_{MN}	t_{BA}
24	Wicklung in Einbringwerkzeug einschieben	144	2,40	t_{MA}	t_{BH}
25	Einbringwerkzeug in Stator positionieren	25	0,42	t_{MN}	t_{BA}
26	Wicklung in Stator expandieren	60	1,00	t_{MA}	t_{BH}
27	Werkzeuge in Ausgangsstellung fahren	25	0,42	t_{MN}	t_{BA}
28	Wickelschwert aus Einbringvorrichtung ausbauen	70	1,17	t_{MN}	t_{BA}
29	Stator aus Einbringvorrichtung ausbauen	25	0,42	t_{MN}	t_{BA}
30	Einbringvorrichtung nachbereiten	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung; A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

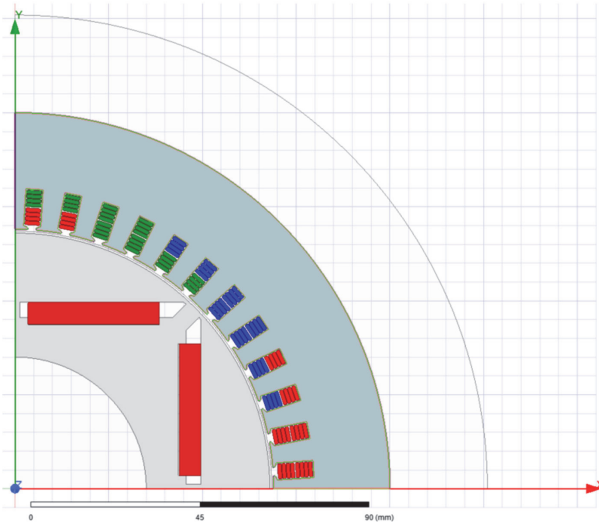
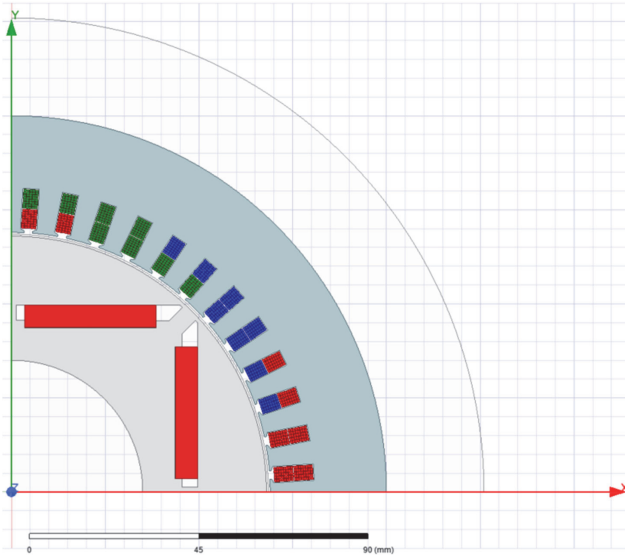
Anhang T, Auflistung der geschätzten Soll-Zeiten für die Prozessschritte HP2 bis HP6 der Hairpintechnologie nach REFA. (vgl. (REFA 1978))

Nr.	Ablaufabschnitt	Soll-Zeit in s	Soll-Zeit in min	Zeitart	
				M	B
HP2, Setzen der Hairpins					
3	Werkzeug einbauen, Magazin montieren	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
4	Hairpin in Setzschablone einsetzen (192 pro Stator)	1,5	0,03	t_{MA}	t_{BH}
5	Werkzeug ausbauen, Magazin demontieren	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
HP3, Einbringen der Hairpins					
6	Werkzeuge einbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
7	Stator mit isolierten Nuten ausbauen / einsetzen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
8	Einbringeinheit über Setzschablone positionieren	10	0,17	t_{MA}	t_{BH}
9	Hairpins aufnehmen	30	0,50	t_{MA}	t_{BH}
10	Einbringeinheit über Stator positionieren	10	0,17	t_{MA}	t_{BH}
11	Hairpins einschieben	30	0,50	t_{MA}	t_{BH}
12	Werkzeuge ausbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
HP4, Twisten und Aufweiten der Hairpins					
13	Werkzeuge einbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
14	Stator mit Hairpins ausbauen / einsetzen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
15	Aufweiteinheit über Stator positionieren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
16	Hairpins aufweiten	40	0,67	t_{MA}	t_{BH}
17	Twisteinheit über Stator positionieren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
18	Twistvorgang	40	0,67	t_{MA}	t_{BH}
19	Werkzeuge ausbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
HP5, Kontaktieren					
20	Werkzeuge einbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
21	Stator mit Hairpins ausbauen / einsetzen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
22	Schweißabdeckung positionieren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
23	Hairpins verschweißen	20	0,33	t_{MA}	t_{BH}
24	Schweißabdeckung entfernen	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
25	Werkzeuge ausbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}
HP6, Schweißstellen isolieren					
26	Werkzeuge einbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}

27	Stator mit Schweißstellen ausbauen / einsetzen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
28	Stator positionieren	15	0,25	t_{MA}	t_{BH}
29	Schweißstellen tauchen	25	0,42	t_{MA}	t_{BH}
30	Schweißabdeckung abtropfen	90	1,50	t_{MA}	t_{BH}
31	Werkzeuge ausbauen	120	2,00	t_{MNR}	t_{BAR}

Indizes der Zeitart (t): M = Mensch; B = Betriebsmittel, H = Hauptnutzung, N = Nebennutzung;
A = ablaufbedingtes Unterbrechen; R = Rüsten

Anhang U, Graphische Darstellung der beiden Viertelschnitte zur numerischen Verlustanalyse in ANSYS Electronics Desktop 2020 R2: Kompaktwicklung (oben) und Hairpinwicklung (unten).



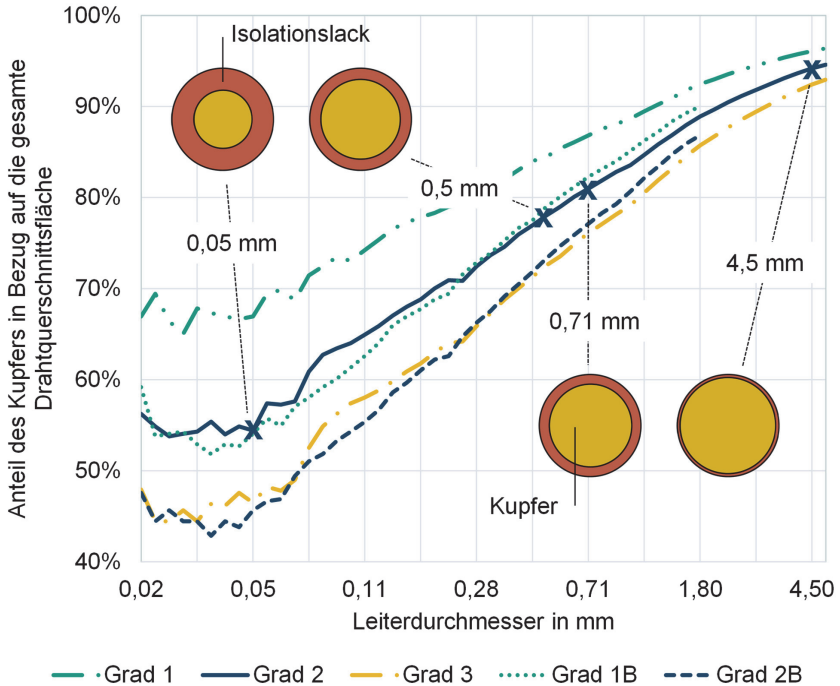
Anhang V, Überblick der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Charakterisierung der Wärmeleitfähigkeit von Wicklungen in elektrischen Maschinen. (siehe (Halwas et al. 2021))

Quelle	Methodik		
	analytisch	numerisch	experimentell
(Pyrhönen et al. 2008)	○		
(Hashin & Shtrikman 1962)	●		
(Milton 1981)	●		
(Unger 1955)	●		
(Hoffmann, Jux & Doppelbauer 2019)	●	○	
(Ilhan et al. 2013)	●	○	
(Mellor, Roberts. & Turner 1991)	●		○
(Schröder, Ayeb & Brabetz 2020)	●		○
(Ayat et al. 2018; Ayat et al. 2016)	●	○	○
(Boglietti, Cavagnino & Staton 2008)	●	○	○
(Liu et al. 2020)	●	○	○
(Wrobel & Mellor 2010)	●	○	○
(Powell 2003)	●	●	○
(Simpson, Wrobel & Mellor 2013)	●	●	○
(Idoughi et al. 2011)	○	●	
(Stöck, Lohmeyer & Meboldt 2015)			●
(Staton, Boglietti & Cavagnino 2005)	○		●
(Wereszczak et al. 2017)		○	●
(Siesing, Reinap & Andersson 2014)	○	○	●
(Oechslen 2018)	●	●	●

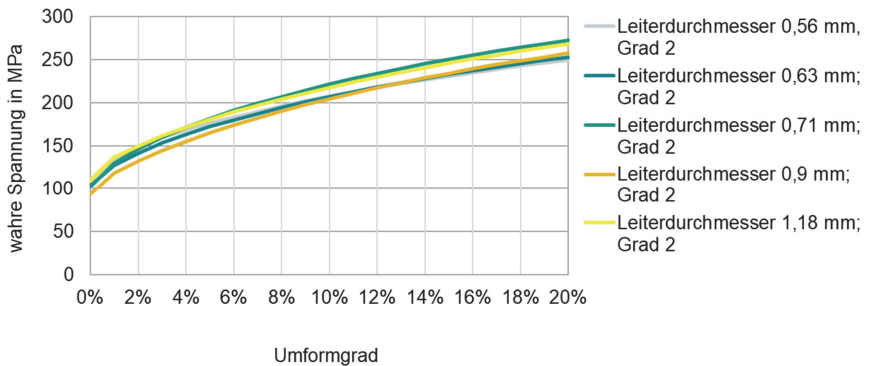
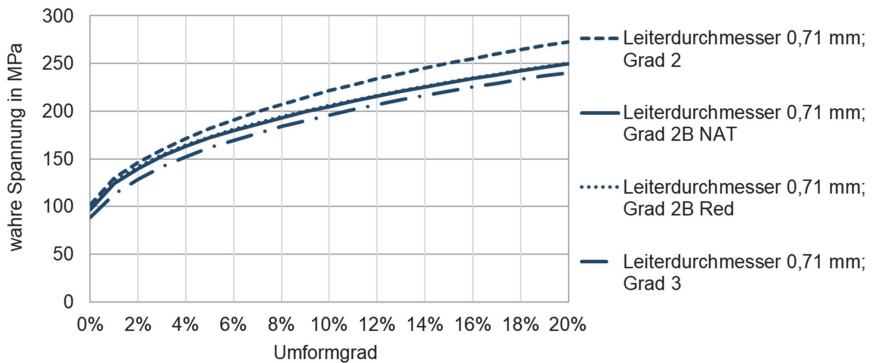
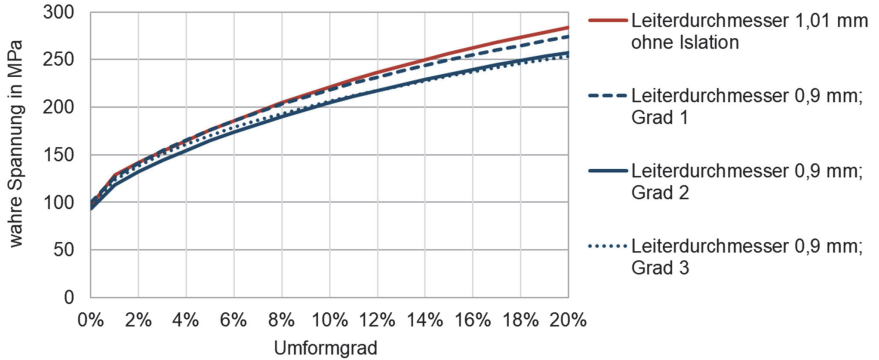
Anhang W, Überblick der in der Literatur angegebenen Werte für die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bestandteile sowie der gesamten Wicklung in elektrischen Maschinen; Sortierung der Quellen nach alphabetischer Reihenfolge. (eigene und erweiterte Darstellung nach (Halwas et al. 2021))

Quelle	Kupfer in W/(mK)	Drahtisolation in W/(mK)	Papierisolation in W/(mK)	Vergussharz in W/(mK)	Imprägnationsharz in W/(mK)	Gesamte Wicklung (radiale Richtung) in W/(mK)
(Ayat et al. 2018; Ayat et al. 2016)						1,9 – 6,5
(Boglietti, Cavagnino & Staton 2008)						0,7 – 0,85
(Hoffmann, Jux & Doppelbauer 2019)	385	0,22	0,2	0,9		
(Idoughi et al. 2011)	401				0,25	0,85
(Ilhan et al. 2013)						0,68
(Liu et al. 2017)			0,25			
(Liu et al. 2020)						1,02 – 2,35
(Oechslen 2018)	401	0,22		0,69		0,65 – 1,85
(Powell 2003)	383			0,6 – 1,4		
(Ruf et al. 2018)		0,13			0,23	
(Siesing, Reinap & Andersson 2014)	385		0,26		0,21	1,03 – 2,1
(Simpson, Wrobel & Mellor 2013)	385	0,26		0,85		1,76 – 3,8
(Stöck, Lohmeyer & Meboldt 2015; Stöck 2016)						0,56 – 2,09
(Wereszczak et al. 2017)	375 - 400	< 1,0		< 0,2		0,5 - 1
(Wrobel & Mellor 2010; Wrobel & Mellor 2011)			0,13	1,0		1,2 – 1,6

Anhang X, Verhältnis der Drahtfläche zur Leiterfläche angegeben nach DIN EN 60317-0-1:2014-09 aufgetragen über den Drahtdurchmesser der Grade 1, 2, 3, 1B und 2B. Normierte Darstellung der Drahtquerschnitte für markierte Drahtdurchmesser des Grades 2. (eigene und veränderte Darstellung nach (Hagedorn, Sell-Le Blanc & Fleischer 2016, S. 125))



Anhang Y, Ergebnisse der gemessenen Fließkurven der durchgeführten Zugversuche bei Kupferlackdrähten mit unterschiedlichen Isolationsgraden, Isolationslackmaterialien und Leiterdurchmessern.



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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. WirtschaftsIng. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspanntechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasive Strahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälern

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspannbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spannbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebs-elementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und

Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von

Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an

Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels

Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur

Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwalgwindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitatsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositatserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Ruckfuhrungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitatsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

