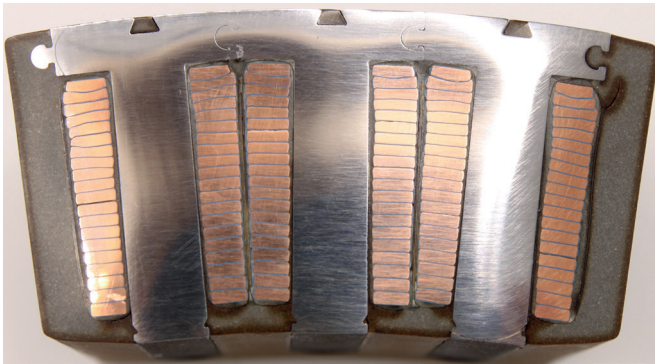


FlexiCoil

Entwicklung einer großserienfähigen und wirtschaftlichen Produktionstechnologie für umformtechnisch hergestellte Formspulen elektrischer Antriebe



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

SHAKER
VERLAG

Band 42

Verbundprojekt im Rahmen des Förderprogramms
E-Antriebe 2:
Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen 2
des Bundesministerium für Bildung und Forschung

Januar 2017 bis Dezember 2020

FlexiCoil: Entwicklung einer großserienfähigen und wirtschaftlichen Produktionstechnologie für umformtechnisch hergestellte Formspulen elektrischer Antriebe

Abschlussbericht

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Wir danken Herrn Noll vom PTKA für die Zusammenarbeit im Projekt. Zudem möchten wir den Firmen Ederfil Becker, Elantas und Essex für die Bereitstellung von Kupferlackdrähten zur Versuchsdurchführung, sowie der Firma Lankwitzer Lackfabrik für die Zurverfügungstellung eines geeigneten Beschichtungssystems danken.

Förderkennzeichen:

02P16A010 – Schaeffler Technologies AG & Co. KG

02P16A011 – Breuckmann GmbH & Co. KG

02P16A012 – RWTH Aachen University

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 42

Kay Hameyer (Hrsg.)

**FlexiCoil: Entwicklung einer großserienfähigen
und wirtschaftlichen Produktionstechnologie
für umformtechnisch hergestellte Formspulen
elektrischer Antriebe**

Abschlussbericht

Shaker Verlag
Düren 2021

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.

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen
RWTH Aachen
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8023-0

ISSN 1861-3799

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

Mitarbeiterliste

András Bárdos, Dr.-Ing.
Ehemals Breuckmann GmbH & Co. KG

Stefan Börzel, B. Sc.
Breuckmann GmbH & Co. KG

Alexander Braun, M. Sc.
Ehemals Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen University

Michael Breuckmann, M. Sc.
Breuckmann GmbH & Co. KG

Volker Breuckmann, Dipl.-Ing.
Breuckmann GmbH & Co. KG

Kay Hameyer, Prof. Dr.-Ing.
Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University

Christian Hecker, Dipl.-Ing.
Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Gerhard Hirt, Prof. Dr.-Ing.
Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen University

Jens Kattner, M. Sc.
Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Marius Klausnitzer, M. Sc.
Ehemals Schaeffler Industrial Drives AG & Co. KG

Jennifer Konnerth
Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Milan Madron, Dipl.-Ing. (FH)
Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Roland Müller, Dipl.-Ing. (FH)
Schaeffler Industrial Drives AG & Co. KG

Florian Pauli, M. Sc.
Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University

Daniel Petrell, M. Sc.
Institut für Bildsamer Formgebung (IBF), RWTH Aachen University

Waldemar Schäfer, MBA, B. Eng.
Breuckmann GmbH & Co. KG

Michael Schröder, Dr.-Ing.
Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University

Tristan Steibert, B. Eng.
Schaeffler Industrial Drives AG & Co. KG

Marco Teller, Dr.-Ing.
Institut für Bildsamer Formgebung (IBF), RWTH Aachen University

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Elektrische Maschinen mit Einzelzahnwicklungen und konischen Formspulen	5
2.1.1 Grundlegender Aufbau elektrischer Niederspannungsmaschinen	5
2.1.2 Thermische Modellierung elektrischer Maschinen	8
2.1.3 Maschinen mit Zahnspulenwicklungen	10
2.1.4 Spulengeometrie	11
2.1.5 Isoliersystem	15
2.2 Umformtechnik	20
2.2.1 Umformtechnischer Ansatz des Fertigungsverfahrens im Vergleich zum Stand der Technik	22
2.2.2 Materialdaten für Umformsimulationen	24
2.2.3 Leitereinschnürung beim Stauchen konzentrierter Wicklungen	26
3 Erprobungsträger und Definition der Spulengeometrie	31
3.1 Radnabenmotor	31
3.1.1 Grundlegender Aufbau und Funktion des Radnabenmotors	31
3.1.2 Vorteile des Radnabenmotors	33
3.1.3 Der E-Wheel Drive Gamma	35
3.2 Spulengeometrie	39
3.2.1 Einschnürungen durch den Umformprozess	39
3.2.2 Einfluss des Umformprozesses auf die elektrischen Eigenschaften der Spule	54
4 Laborversuche und Konzeptentwicklung	61
4.1 Widerstandsänderung durch umformtechnischen Ansatz	61
4.1.1 Materialbedingte Widerstandserhöhung	62

4.1.2	Geometriebedingte Widerstandserhöhung	64
4.2	Konzepte für den Stauchprozess des umformtechnischen Ansatzes	67
4.2.1	Konzept der einstufigen Umformung	68
4.2.2	Konzept der mehrstufigen Umformung	70
4.2.3	Konzept der Umformung mit Gegenhalter	74
4.2.4	Konzept der Umformung mit Werkzeugspule	78
4.2.5	Vergleich der Konzepte des Stauchprozesses	80
4.3	Umformbarkeit von Kupferlackdraht	81
4.3.1	Eigenschaften von konventionellem Kupferlackdraht	81
4.3.2	Einfluss des Stauchprozesses auf die elektrische Funktion der Windungsisolierung	82
4.3.3	Materialfluss der Isolierung beim Stauchen	86
5	Herstellung der Formspule	93
5.1	Herstellung der Spulenrohlinge durch CNC-Biegen	93
5.2	Aufbau und Funktion des mehrstufigen Umformwerkzeuges	96
5.3	Produktion der Prototypen	100
5.4	Bewerten der Herstellbarkeit	105
6	Isoliersystem	109
6.1	Anforderungen an das Isoliersystem	109
6.1.1	Initiale Auswahl der Isolierstoffe	109
6.1.2	Lebensdaueranforderungen an die Isolierstoffe	110
6.2	Auswahl Beschichtungsverfahren	110
6.2.1	Verfügbare Beschichtungsverfahren	111
6.2.2	Beschichtung der FlexiCoil-Spulen	114
6.3	Erprobung der Windungsisolierung	121
6.3.1	Bewertung der TE-Einsatzspannungen an Leiter-Leiter-Anordnungen	121
6.3.2	Lebensdauerabschätzung durch beschleunigte Alterung	124
6.4	Untersuchung weiterer Lacksysteme	134
6.4.1	Initiale Bewertung der Spannungsfestigkeit	141
6.4.2	Initiale Bewertung mechanischer und chemischer Eigenschaften	142
7	Vergleich von Referenzmaschine und Erprobungsträger	145
7.1	Aufbau und konstruktive Anpassung der Maschinen	145
7.1.1	Grundsätzliche Anpassungen an beiden Maschinen	145
7.1.2	Aufbau Referenzmaschine	148

7.1.3	Aufbau Technologieträger und spezifische konstruktive Anpassungen	150
7.2	Simulativer und messtechnischer Vergleich	156
7.2.1	Simulativer Vergleich zwischen Erprobungsträger und Referenzmaschine	157
7.2.2	Messtechnischer Vergleich zwischen Erprobungsträger und Referenzmaschine	160
7.2.3	Thermische Vermessung von Erprobungsträger und Referenzmaschine	169
8	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	177
8.1	Technische Bewertung	177
8.2	Gesamtwirtschaftliche Bewertung	182
8.3	Gesamtfazit	184
9	Zusammenfassung und Ausblick	187
	Literaturverzeichnis	191
	Eigene Veröffentlichungen	195