

Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren



Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 399

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2022 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.

Bitte zitieren als Meyer, Alexander. 2022. *Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 399. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-556-8.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-555-1 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-556-8 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-556-8

Fakultätstitelblatt

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Meyer

aus Markt Erlbach

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, KIT

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Franke für die Betreuung dieser Arbeit, die konstruktiven Anmerkungen, die Förderung durch große Herausforderungen und das mir entgegengebrachte Vertrauen und die gewährte Selbständigkeit bei allen mir übertragenen Aufgaben und der Forschungsarbeit danken. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Fleischer, Institutsleiter Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) für die Übernahme des Koreferates und die wertvollen Hinweise. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Nöth vom Lehrstuhl für Informatik 5 (Mustererkennung) der FAU für die Begleitung der Promotionsprüfung als weiteres Prüfungsberechtigtes Mitglied und Herrn Prof. Willner vom Lehrstuhl für technische Mechanik für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Mein weiterer Dank gilt meinen Forschungspartnern für den wertvollen Austausch, da so stets der Praxisbezug und die Relevanz für die Industrie sichergestellt werden konnte.

Außerdem bedanke ich mich herzlich bei allen Kollegen des Lehrstuhls FAPS für die stets freundschaftliche Atmosphäre und große Hilfsbereitschaft bei allen Problemen und Herausforderungen und bei den Kollegen der Wittenstein SE und cyber motor GmbH für den fachlichen Austausch.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden, die mich stets motiviert haben und die mir auch in schwierigen Situationen zur Seite gestanden haben. Der größte Dank gilt meiner Familie, die mich stets gefördert hat und mir besonders während des Studiums und der Anfertigung dieser Arbeit den Rücken freigehalten hat, insbesondere meiner Mutter Lilia und meinem Vater Norbert der mir das Ingenieurwesen von Kindheit an nähergebracht hat und der mir immer ein wertvoller Diskussionspartner war.

Markt Erlbach, im März 2022

Alexander Meyer

Inhaltsverzeichnis

Vorv	vort		i	iii		
Forn	nelzei	chen- ι	und Abkürzungsverzeichnisv	<i>ii</i>		
Bildy	verzei	chnis		ix		
Tabe	ellenvo	erzeich	nisx	(V		
1	Ein	leitui	ויים ag	1		
2	Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der					
_	Rotorfertigung permanent erregter Synchronmaschinen 3					
	2.1	Grun	dlagen zur Prozesskette der Elektromotorenproduktion	3		
		2.1.1	Prozesskette der Motorenproduktion	3		
		2.1.2	Datenerfassungsgerechte Produkt- und Prozessbeschreibung	.5		
		2.1.3	Rotortopologien	10		
	2.2	Fertig	gungsprozesse der Rotorproduktion	14		
		2.2.1	Hartmagnetische Werkstoffe und Toleranzen	14		
		2.2.2	Magnetherstellung	18		
		2.2.3	Magnetmontage 2	24		
	2.3	Stand	l der Wissenschaft und offener Forschungsbedarf2	28		
		2.3.1	Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion des Rastmomentes 2	28		
		2.3.2	Kompensation von Fertigungsabweichungen	32		
		2.3.3	Offener Forschungsbedarf	\$4		
3	Die Prozesskette der Rotorfertigung und ihre					
	Fel	Fehlerpotentiale				
	3.1	Fehle	rpotentiale der Magnetmontage	37		
		3.1.1	Abweichungen des magnetischen Moments	37		
		3.1.2	Adhäsive Fixierung	41		
		3.1.3	Applikation von Magnetkörpern 4	13		
	3.2	Magn	etisierung4	14		
		3.2.1	Sättigung von Permanentmagneten4	ļ6		
		3.2.2	Magnetisierung mit Hilfe von Axialspulen4	8		
		3.2.3	Magnetisierung mit Magnetisiervorrichtungen5	;6		
	3.3	Prüfu	ng von Materialien und Rotorbaugruppen sowie zugehörige	0		
		Mess	methoden	;8		
		3.3.1	Nahfeldmessung5	;9		
		3.3.2	Fernfeldmessung)2 (0		
		3.3.3	Analyse Kompletter Kotorbaugruppen	0		

4	Untersuchung von Fertigungsfehlern am Beispiel von Halbach-Rotoren		hung von Fertigungsfehlern am Beispiel von Rotoren77		
	4.1	Ausga 4.1.1 4.1.2 4.1.3	ngspunkt für die Untersuchungen77 Allgemeine Beschreibung der Versuchsmaschine77 Stator der Maschine		
	4.2	Simul	ative Untersuchung81		
		4.2.1 4.2.2 4.2.3	Vergleich der Flussdichteverläufe		
	4.3	Messu	Messung an Musterrotoren		
		4.3.1 4.3.2 4.3.3	Magnetische Abweichungen der verfügbaren Magnete		
5 Kompensation von Magnetfeldfehlern durch selekt Magnetmontage		sation von Magnetfeldfehlern durch selektive 10ntage			
	5.1	Algori	ithmen für die optimierte Sequenzierung von Magnetsätzen 94		
		5.1.1 5.1.2 5.1.3	Kompensation durch Vektoraddition bei SPM		
	5.2	Softwareimplementierung und Test der Kompensations- algorithmen			
		5.2.1 5.2.2 5.2.3	Architektur des Kompensationssystems		
	5.3	Hardwareimplementierung eines Lagersystems zur selektiven Magnetmontage			
		5.3.1	Hardwarekonzept des Lagersystems und Realisierung eines Beispiels114		
		5.3.2 5.3.3	Architektur der Lagerdatenbank		
6	Zus	amm	enfassung und Ausblick133		
7	Sun	nmary	y and Outlook137		
8	Literaturverzeichnis141				

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung/	Einheit	Erläuterung
Formelzeichen		
PMSM		Permanenterregte Synchronmaschine
IPM		Innenliegende Magnete - Interior Perma-
		nent Magnets
SPM		Oberflächenmagnete – Surface-mounted
		Permanent Magnets
MGT		Magnetträger
MMPA		Magnetic Materials Producers Association -
		Normbezeichnung
NMR		Kernspinresonanz – Nuclear Magnetic Reso-
		nance
GFK		Glasfaserverstärkter Kunststoff
CFK		Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
U_{zk}	V	Zwischenkreisspannung
Id	А	Strom auf direkter (feldbildender) Achse im
		d/q-System
T _K	%	Temperaturkoeffizient bezogen auf die pro-
	K	zentuale Änderung von B _R oder H _{cJ}
B _R	Т	Remanenzflussdichte
H _{cJ}	kA	Koerzitivfeldstärke der magnetischen Polari-
	m	sation
H _{cB}	kA	Koerzitivfeldstärke der magnetischen Fluss-
	m	dichte
SE		Seltene Erde
(BH) _{max}	kJ/m³	Maximales Energieprodukt
EOL		End-Of-Line
BLDC(-Motor)		Elektronisch kommutierter Gleichstrommo-
		tor – Brushless Direct Current (-Motor)
EMK		Elektromotorische Kraft
SMC		Weichmagnetische Verbundwerkstoffe -
		Soft Magnetic Composites
ERP		Ressourcenbedarfsplanungssystem - Enter-
		prise-Resource-Planning

MES		Produktionsleitsystem – Manufacturing Exe-
		cution System
i.O.		In Ordnung
n.i.O.		Nicht in Ordnung
δ	m	Eindringtiefe
σ	1	Elektrische Leitfähigkeit
	$\Omega \cdot m$	
f	1	Frequenz
	S	
ρ	$\Omega \cdot \mathrm{mm}^2$	Spezifischer elektrischer Widerstand
	m	
ω	1	Kreisfrequenz
	S	
μ	<u>п</u>	Magnetische Permeabilität
EEM	m	Finita Elementa Mathada
FEIVI		Finite-Elemente-Methode
AMR(-Effekt)		Anisotroper magnetoresistiver Effekt

Bildverzeichnis

Bild 1:	Beispiel einer Prozesskette für die Motorenproduktion.4
Bild 2:	UML-Darstellung am Beispiel der Klasse 'Magnet'6
Bild 3:	Klassendiagramm der Motorenproduktion8
Bild 4:	Übersicht über verbreitete Magnetformen in Radial- flussmaschinen11
Bild 5:	Magnetfeld eines Halbach-Rotors; links als Außen- läufer, rechts als Innenläufer13
Bild 6:	Schema des kaltisostatischen Pressverfahrens (nach [19])20
Bild 7:	Schema des Transversalfeldpressverfahrens (nach [19]) 21
Bild 8:	Schema Axialfeldpressverfahrens (nach [19])22
Bild 9:	Formschlüssige Fixierung von Magneten über Bandage und Montagekäfig26
Bild 10:	Prozesskette der Rotorfertigung (Beispiel)27
Bild 11:	Lamellen für geschlitzte Zahnköpfe (nach [74])30
Bild 12:	Messaufbau zur magnetischen Vermessung38
Bild 13:	Statistische Darstellung der Abweichungen des Magnetisierungswinkels nach Magnettyp
Bild 14:	Statistische Darstellung der Abweichungen der Permanenz J nach Magnettyp40
Bild 15:	Darstellung von Fehlern bei der adhäsiven Fixierung von Magneten auf einem Magnetträger41
Bild 16:	Lage- und Polaritätserkennung mittels Vorrichtung44
Bild 17:	Vergleich der Abmagnetisierungskurven unterschied- lich gesättigter Permanentmagnete (Messergebnisse [S10])47
Bild 18:	Aufbau einer Bitterspule mit rechteckigem Quer- schnitt der Spulenöffnung - Leiterlamelle und Stapel48
Bild 19:	Vektoren in einer rechteckigen Luftspule (nach [S14]).49

Bildverzeichnis

Bild 20:	Diskretisierung der Rechteckspule (nach [S14])51
Bild 21:	Errechneter Verlauf der Flussdichteverteilung in axialer Richtung (nach [S14])52
Bild 22:	Stromstärke zur Sättigung in Abhängigkeit von der Position des Magneten in der Spule (nach [S14])52
Bild 23:	Abhängigkeit des Entmagnetisierungsfaktors vom Verhältnis l/d (nach [S14])54
Bild 24:	Remanenzflussdichte in Abhängigkeit von der Position im Magnetstapel (nach [S14])55
Bild 25:	Auswirkungen verschiedener Magnetisierungsstrate- gien auf die Sättigung (nach [S1])56
Bild 26:	Vollpolmagnetisierung eines mit Einzelmagneten bestückten Rotors (nach [S19])57
Bild 27:	Sättigung einer SPM Rotorbaugruppe57
Bild 28:	Methoden zur Messung von Magnetfeldern58
Bild 29:	Schematische Darstellung des möglichen Aufbaus eines integrierten Hall-Effekt-Sensors (nach [130])60
Bild 30:	Schematischer Aufbau eines monolithischen Hall- Effekt-Sensor-Arrays (nach [132])61
Bild 31:	Flussdichteverteilung über einem segmentierten Mag- neten (Darstellung generiert mit MagScope Software)61
Bild 32:	Bestimmung des magnetischen Moments mit der Helmholtzspule63
Bild 33:	Abschirmung der Helmholtzspule und Einbringung von Störsignalen (nach [S8])64
Bild 34:	Auswirkung von Fehlereinflüssen auf die einachsige Messung des magnetischen Moments mit Helmholtzspule und Fluxmeter (Ergebnisse aus [S8])65
Bild 35:	Auswirkung von Fehlereinflüssen auf die Ermittlung des Winkels des magnetischen Momentenvektors mit Helmholtzspule und Fluxmeter (Ergebnisse aus [S8])66
Bild 36:	Schematische Darstellung des Messverfahrens des Systems m-axis (nach [P14])67

Bild 37:	Zusammenhang zwischen Auflösung und Messgeschwindigkeit bei der Nahfeldmessung69
Bild 38:	Flussdichteverteilung im Nahfeld eines Magneten70
Bild 39:	Einfluss des Messabstandes auf die Flussdichtemes- sung (nach [S19])72
Bild 40:	Einfluss der Abtastrate auf das Rauschen der Hall- Sensor Messung (nach [S19])72
Bild 41:	Differenz zweier Mappingergebnisse als dreidimen- sionale Heat-Map (nach [S19])74
Bild 42:	Differenz zweier Mappingergebnisse innerhalb einer Sensorspur (nach [S19])75
Bild 43:	Wickelschema der Versuchsmaschine78
Bild 44:	Skizze des Statorschnitts der Versuchsmaschine
Bild 45:	Skizze des IPM-Rotors der Versuchsmaschine80
Bild 46:	Skizze des Halbach-Rotors der Versuchsmaschine80
Bild 47:	Flussdichteverteilung in den aktiven Teilen der Ver- suchsmaschine in IPM-Konfiguration
Bild 48:	Flussdichteverteilung im Rotor der Versuchsmaschi- ne in Halbach Konfiguration82
Bild 49:	Flussdichteverlauf der Referenzmaschine im Ver- gleich mit der Halbach-Anordnung (nach [S23])83
Bild 50:	Verlauf des Rastmoments in Abhängigkeit des Winkelfehlers der Einzelmagnete (nach [S23])84
Bild 51:	Darstellung der Auswirkung der Winkelabweichung auf die induzierte Spannung - positive Halbschwin- gung (nach [S23])84
Bild 52:	Darstellung der Auswirkung der Winkelabweichung auf die induzierte Spannung - negative Halbschwin- gung (nach [S23])85
Bild 53:	Verteilung der Winkelabweichung Ø _R der Radial- magnete (Probenumfang 80 Magnete)86
Bild 54:	Verteilung der Winkelabweichung Ø T der Transi- tionsmagnete (Probenumfang 80 Magnete)87

Bild 55:	Vergleich der gemessenen und simulierten Fluss- dichteverläufe des IPM Versuchsrotors (nach [S23])89
Bild 56:	Vergleich der gemessenen und simulierten Fluss- dichteverläufe der Halbach-Versuchsrotoren (nach [S23])89
Bild 57:	Aufbau zur Rastmomentmessung90
Bild 58:	Rastmomentverläufe der Versuchsrotoren
Bild 59:	Prozessablauf der fehlerkompensierten Vorsequenzierung von Magnetsätzen94
Bild 60:	Dreidimensionales Magnetmodell mit magnetischem Dipol-Momentenvektor (nach [S22])96
Bild 61:	2D-Modell der Abweichungen (nach [S22])97
Bild 62:	Abgerollte Darstellung der Magnetanordnung einer SPM-Maschine der Konfiguration #1 (nach [S22])99
Bild 63:	Abgerollte Darstellung der Magnetanordnung einer SPM-Maschine der Konfiguration #2 (nach [S22])99
Bild 64:	Darstellung des naiven 1D-Paarungsalgorithmus als Flussdiagramm (nach [S22])101
Bild 65:	Darstellung des sortierenden 1D-Paarungsalgorith- mus als Flussdiagramm (nach [S22])102
Bild 66:	Darstellung der Kategorisierung für die zweidimensionale Kompensation als Flussdiagramm (nach [S22])104
Bild 67:	Einzelner Magnetpol des Rotors nach Konfiguration #2 (nach [S22])105
Bild 68:	Kompensierte Vierergruppe von Magneten (nach [S22])106
Bild 69:	Struktur des regelbasierten Kompensationsalgorith- mus in C++ (nach [S22])107
Bild 70:	Testergebnis des 1D-Algorithmus verglichen mit zufälliger Verteilung (nach [S22]) 110
Bild 71:	Axiale Komponente der Feldabweichung bei Opti- mierung durch den kategorisierenden 2D-Paarungs- algorithmus (nach [S22])111

Bild 72:	Radiale Komponente der Feldabweichung bei Opti- mierung durch den kategorisierenden 2D-Paarungs- algorithmus (nach [S22])
Bild 73:	Axiale Komponente der Feldabweichung bei Opti- mierung durch den 2D-Vierpunktalgorithmus (nach [S22])
Bild 74:	Radiale Komponente der Feldabweichung bei Optimierung durch den 2D-Vierpunktalgorithmus (nach [S22])113
Bild 75:	Prozessabfolge der selektiven Magnetmontage114
Bild 76:	Konzept zur Vereinzelung der Magnete (nach [S5]) 116
Bild 77:	Einzelkomponenten des Regalsystems (nach [S5]) 116
Bild 78:	3D-Darstellung des Umschlagportals für den Zugriff auf die einzelnen Paletten des Palettenwerkstückträ- gers (nach [S5]) 117
Bild 79:	Bild des Demonstrators des Umschlagdocks mit Regalsystem im Hintergrund (Bild A. Mayr [S13]) 117
Bild 80:	Automatisierungslösung zum sequenzierten Stapeln der Magnete (nach [S5])118
Bild 81:	Layout des Lagersystems (nach [S13])118
Bild 82:	Übersicht Prozess Magneteinlagerung (nach [S13])120
Bild 83:	Übersicht Teilprozess Einzelmagnete in Regalsystem einlagern (nach [S13])121
Bild 84:	Übersicht Prozess Magnetauslagerung (nach [S13])122
Bild 85:	Bedienoberfläche des Lagersystems – Beispiel Um- schlageinrichtung (nach [S13])122
Bild 86:	Schrittfolge für das Zuführen eines Einzelmagneten in den Puffer123
Bild 87:	Schrittfolge für das Aus- und Einlagern von Magne- ten124
Bild 88:	Schrittfolge für das Wechseln einer Box125
Bild 89:	Zykluszeiten für das Ein- und Auslagern von 192 Einzelmagneten125

Bild 90:Erläuterung von BoxLog anhand der abstrahierten
Darstellung des Lagersystems (nach [S12])......128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über hartmagnetische Werkstoffe [33] 16
Tabelle 2:	Toleranzen bei der Magnetherstellung (hersteller- bezogene Angaben, nach [S7])17
Tabelle 3:	Typische Kennwerte verschiedener Magnetwerkstoffe [33, 19]
Tabelle 4:	Komponenten einer permanenterregten Synchron- Radialflussmaschine32
Tabelle 5:	Kleben von Magneten – Fehlermöglichkeiten und -folgen42
Tabelle 6:	Verwendete Entmagnetisierungsfaktoren53
Tabelle 7:	Rohdaten einer MagScope-Analyse eines segmen- tierten Permanentmagneten zu Bild 3162
Tabelle 8:	Nenndaten der Versuchsmaschine78
Tabelle 9:	Magnetische Kennwerte der Versuchsmagnete (nach Herstellerangaben)86
Tabelle 10:	Übersicht über die Abweichungen der Versuchs- rotoren
Tabelle 11:	Rastmomente der Versuchsrotoren92
Tabelle 12:	Rotorkonfigurationen für selektive Magnetmontage98
Tabelle 13:	Anforderungen an ein Magnetlagersystem (nach [S5]).115
Tabelle 14:	Beschreibung der Datenbank MagnetLog (nach [S22])127
Tabelle 15:	Stückzahlszenario zur Dimensionierung des Lagersystems129
Tabelle 16:	Investitionskosten für ein Lagersystem (Beispiel)129
Tabelle 17:	Jährliche Kosten des Lagersystems130
Tabelle 18:	Anteil der durch selektive Magnetmontage verur- sachten Herstellkosten131

1 Einleitung

Messen ist Wissen. - Werner von Siemens

Das Leben der heutigen Gesellschaft wird durch elektrische Maschinen in fast allen Bereichen erleichtert. Allein für das Jahr 2023 wird ein Umsatz in Deutschland für Generatoren, Motoren und Transformatoren von 22,1 Mrd. Euro prognostiziert [1]. Gegenwärtige Entwicklungen in der Elektromotorenproduktion verlangen nach stetiger Steigerung der Leistungsdichte bei gleichzeitiger Kostenreduktion, um neue Märkte zu erschließen und das Wachstum in den bestehenden Märkten zu sichern. Vor allem der Bereich Elektrotraktion setzt hier neue Maßstäbe. So besitzt der 2020 am Markt eingeführte Elektromotor HVH 146 des Herstellers Borgwarner eine Leistungsdichte von 2,5 kW/kg und eignet sich als Starter/Generator mit Traktionsunterstützung in Hybridfahrzeugen. Dabei handelt es sich um eine permanenterregte Synchronmaschine (PMSM) mit innenliegenden Permanentmagneten (IPM) und Hairpin-Stator [2]. Ein Flugzeugantrieb von Siemens weist eine noch größere Leistungsdichte von 5 kW/kg bei Dauerleistung auf [3]. Dieser Motor ist ebenso eine PMSM mit Außenläufer in segmentierter Halbach-Konfiguration. Um diese steigenden Anforderungen an die Leistungsdichte bei gleichzeitiger Verbesserung des Geräusch-, Vibrations- und Regelverhaltens durch Minimierung der fertigungsbedingten Abweichungen erfüllen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Fertigungs- und Montageprozesse erforderlich. Dazu ist sowohl die weitgehende Erfassung und Protokollierung sowie die Auswertung der Prozessdaten notwendig. Im Idealfall kann durch eine Prozessregelung anhand dieser Daten Stabilität und eine gleichmäßige Qualität bei geringen Ausschusskosten gewährleistet werden. Die Prozesskette der Statorfertigung bietet hier vielfältige Möglichkeiten [4].

Inwieweit die rechnerisch und simulativ ermittelten Eigenschaften des Maschinenentwurfs mit den Messergebnissen der realen Maschine übereinstimmen, hängt davon ab, wie genau das reale mit dem simulierten Magnetfeld übereinstimmt [5]. Neben rechnerischen Vereinfachungen treten hier auch durch Fertigungseinflüsse hervorgerufene Abweichungen in Erscheinung, die im Vorfeld nur schwer abzuschätzen sind. Diese Abweichungen haben direkten Einfluss auf die Qualität des erzeugten Magnetfeldes welche einerseits von der Qualität der Einzelkomponenten abhängt, andererseits von den Fertigungsprozessen beeinflusst wird und sich im Spannungsfeld zwischen Kosten, Qualität und Prozesskontrolle bewegt. Zum gegenwärtigen Stand werden, verglichen mit den Prozessen der Statorfertigung, in der rotorseitigen Prozesskette, wesentlich weniger Prozessdaten gesammelt. Dies liegt einerseits in komplizierten Prozessen für die Magnetmontage begründet, andererseits in der Messbarkeit der Größen. So sind Größen wie die Koerzitivfeldstärke nur in einer entmagnetisierenden Prüfung messbar [6]. Der Vektor des magnetischen Moments ist nach dem in DIN EN 604040-5 beschriebenen Verfahren auf Grund der Störeinflüsse nicht in einer Produktionsumgebung zu bestimmen. Es existieren jedoch seit wenigen Jahren Messverfahren, die genau dies ermöglichen[P14], bisher jedoch wenig verbreitet eingesetzt werden und auch noch nicht normativ beschrieben wurden.

Die folgenden Kapitel stellen demnach einen Beitrag dar, die Rotorfertigung permanenterregter Radialfluss-Synchronmaschinen zu analysieren, Fehlereinflüsse zu identifizieren und neue Möglichkeiten zur Kompensation von Fehlern vorzustellen. Dazu wird zunächst das Thema der Datenerfassung anhand einer Beispielprozesskette aufbereitet, der Prozess der Magnetherstellung und der Magnetmontage beschrieben, sowie die aktuellen Forschungsergebnisse dargestellt. Die Prozesskette der Magnetmontage als Schlüsselprozess wird insbesondere mit dem Schwerpunkt der Magnetisierung und der Inline-Messung von Magnetfeldern behandelt. Anhand eines Beispiels werden die Auswirkungen von Magnetfeldfehlern an Rotoren detailliert untersucht und abschließend ein Algorithmus vorgestellt, der die Kompensation von Magnetfeldfehlern ermöglicht und dessen Integration in eine Automatisierungslösung anhand eines Demonstrators beschrieben.

2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

2.1 Grundlagen zur Prozesskette der Elektromotorenproduktion

Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst die Prozesskette der Motorenproduktion und gehen insbesondere auf die Möglichkeiten zur Datenerfassung ein. Weiterhin wird ein Prozessmodell zur datenerfassungsgerechten Produkt- und Prozessgestaltung vorgestellt. Da die Grundcharakteristik einer Radialflussmaschine neben dem Stator in erheblichem Maße vom Rotor bestimmt wird, werden verschiedene, bereits bestehende Konzepte zur Minimierung des Rastmoments der Maschine sowie der Fertigungseinflüsse vorgestellt und miteinander verglichen.

2.1.1 Prozesskette der Motorenproduktion

Die Typenvielfalt permanenterregter Synchronmaschinen zieht ebenso vielfältige Fertigungsprozessketten nach sich. Ferner ist die Gestaltung dieser abhängig von technischen und wirtschaftlichen Aspekten, weshalb auch für gleiche Motorentypen Unterschiede bestehen können. Dies betrifft den Automatisierungsgrad der Fertigung ebenso wie Anforderungen an Toleranzen und die Eigenschaften verschiedener Fertigungshilfsstoffe wie Klebstoffe, Verguss- oder Imprägniermaterialien. Der im Folgenden dargestellte Ablauf zeigt deshalb eine Möglichkeit zur Herstellung einer luftgekühlten permanenterregten Radialflussmaschine mit oberflächenmontierten Magneten auf einem geblechten Magnetträger, Rotorlagegeber, klassischer Verschaltung und Gehäuse. Die Montage weiterer Antriebskomponenten, wie Elektronik, Temperaturgeber, Bremse oder Getriebe wird nicht betrachtet, da dies keine Auswirkungen auf die hier betrachteten Kernprozesse der Aktivteilfertigung hat.

Entlang der Teilprozesskette der Statorfertigung hängen die erzielbaren Toleranzen maßgeblich vom Blechpaket ab. Dies betrifft insbesondere Form- und Lagetoleranzen des Statorkerns sowie dessen elektrische und magnetische Eigenschaften infolge von Stanz- und Paketierprozessen [7, 8]. Um diese Abweichungen zu quantifizieren, wurde ein Inline Prüfverfahren entwickelt und beschrieben [9][10]. Während des Wickelns kann 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

stellenweise der Drahtquerschnitt durch zu hohen Drahtzug reduziert werden, sollten Drahtzugschwankungen auftreten. Im Allgemeinen ist dies durch die verfügbaren Drahtzugregelsysteme gut zu vermeiden [4]. An dieser Stelle ist je nach Automatisierungsgrad auch Inlineprüftechnik integrierbar. Somit kann beispielsweise der Widerstand jeder gewickelten Spule geprüft und Prozessabweichungen können erkannt werden, bevor weitere wertschöpfende Schritte an einem Ausschussteil durchgeführt werden. Die beim Verschalten und Fixieren der Wicklung auftretenden Fehler sowie mögliche im Vorfeld aufgetretenen Isolationsfehler sind durch die elektrische Stückprüfung nach IEC 60034-1 detektierbar. Zusätzlich zu den geforderten Prüfungen, wie Drehfeldrichtung, Isolationswiderständen auch Stoßspannungsprüfung, können neben Wicklungswiderständen auch Stoßspannung und Teilentladungen gemessen werden, um die Qualität der vorangegangenen Prozessschritte zu bewerten.



Bild 1: Beispiel einer Prozesskette für die Motorenproduktion

Die automatisierte Magnetmontage erlaubt die Aufzeichnung verschiedener Prozessdaten. Die Klebstoffmenge, sofern ein flüssiger Klebstoff verwendet wird, wird gesteuert appliziert. Um die Genauigkeit der Dosiereinrichtung zu überwachen, werden üblicherweise Probeschüsse abgewogen. Der Applikationsvorgang der Magnete kann über die Kraft-Weg-Sensorik der Fügemodule aufgezeichnet werden. Bei einem nachgelagerten Magnetisierprozess kann eine rudimentäre Prozessbewertung durch eine Inline-Summenflussmessung des magnetisierten Magneten erfolgen. Die Magnete können vor der Montage im unmagnetisierten Zustand geometrisch vermessen werden. Eine Bewertung der magnetischen Eigenschaften ist nur an magnetisierten Magneten möglich und wird häufig lediglich im Rahmen der Lieferantenqualifizierung durchgeführt. Von den Magnetlieferanten wird meist eine Entmagnetisierungskurve für das jeweilige Magnetmaterial zur Verfügung gestellt.

Bei allen Fügevorgängen können Kraft-Weg-Signale aufgezeichnet werden und somit die Fügeprozesse überwacht werden. Dies betrifft das Fügen des Stators in das Gehäuse, das Fügen der Lager in die Lagerschilde und das Fügen der Lagerschilde auf die Rotorwelle bzw. in den Gehäusesitz. Eventuelle Schiefstellungen der einzelnen Komponenten können somit erkannt werden. [11]

Abschließend wird meist eine drehende Prüfung durchgeführt, bei der die induzierte Spannung gemessen wird. Diese kann durch eine schnelle Fourier-Transformation hinsichtlich ihrer Frequenzanteile überprüft werden. Der daraus ermittelte Klirrfaktor kann als Indikator für Verluste dienen [P2]. Am Ende der Wertschöpfung sind Rückschlüsse auf die magnetischen Eigenschaften der Einzelmagnete sowie der geometrischen Qualität des Rotors möglich. Im Fehlerfall muss der Motor nachgearbeitet oder als Ausschuss deklariert werden.

2.1.2 Datenerfassungsgerechte Produkt- und Prozessbeschreibung

Die Analyse der einzelnen Teilprozesse in der Motorenproduktion zur Prozessüberwachung und -regelung sowie zur Erkennung von Fehlern setzt die strukturierte Speicherung der angefallenen Prozess- und Messdaten voraus. Auch frühere Studien [12] zeigen die Notwendigkeit der Datenanalyse bei der Produktion elektrischer Antriebe, lassen jedoch die praxisgerechte Implementierung außer Acht. In der Praxis angewandte Standards wie DIN EN 10204, IATF 16949, DIN EN 9100 sowie der Bahnstandard IRIS verlangen bereits eine Chargenrückverfolgbarkeit einzelner Komponenten. Werden diese Informationen ausgehend von den Grundkomponenten vollständig in ein Datenmodell integriert und mit den Prozessdaten ergänzt, entsteht ein vollständig nutzbares digitales Abbild der jeweiligen Baugruppe.

Nach dem letzten Stand der Definitionen zu Begriffen aus dem Kontext Industrie 4.0 können ausgehend von einem nicht verketteten Produktionssystem sowohl das Endprodukt, in diesem Fall der Motor, als auch die Baugruppen, in diesem Fall Rotor, Stator und Magnete, als digitales Modell (digital model) bezeichnet werden. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad des Produktionssystems kann das digitale Modell zu einem digitalen Schatten (digital shadow) weiterentwickelt werden. [13–16]



Bild 2: UML-Darstellung am Beispiel der Klasse 'Magnet'

Die Idee zur datenerfassungsgerechten Produkt- und Prozessbeschreibung besteht darin, den Motor ganzheitlich objektorientiert in Form eines UML-Diagramms [17] zu beschreiben. Ein Motor ist demnach eine Klasse, die Attribute (z.B. Seriennummer, Nenndrehzahl, Messwerte) besitzt. Diese Attribute werden von Methoden, also den Fertigungs- und Montageprozessen beeinflusst. Eine Instanz, also ein spezifisches Exemplar eines Motors selbst besteht seinerseits aus Instanzen der Klassen "Rotor" und "Stator". Je nach Bauart (z.B. redundante Ausführungen) kann ein Motor auch aus mehreren Instanzen der Klasse "Rotor' und "Stator' bestehen. Da die Magnete selbst ebenso über individuelle Eigenschaften verfügen, die eindeutig bestimmt werden können und auch einen entscheidenden Beitrag zur Qualität des Motors leisten, wird ebenso eine Klasse "Magnet' eingeführt. Die UML-Darstellung wird in Bild 2 erläutert. Die Syntax ist an übliche Regeln der Informatik angelehnt und setzt sich zusammen aus Zugriffsmodifikator (z.B. # für protected) – Attributs- oder Methodenbezeichnung (z.B. "Sorte_Magnet') – Datentyp (z.B. string für eine Zeichenkette oder int für integer). Manche Daten, wie zum Beispiel Kurven, erfordern ein mehrdimensionales Array. Dies wird mit zwei eckigen Klammern hinter dem Datentyp gekennzeichnet (z.B. int[]). Methoden werden immer durch zwei runde Klammern hinter der Methodenbezeichnung gekennzeichnet.

Das in Bild 3 dargestellte Klassendiagramm stellt demnach die Baugruppen eines Motors als Klassen dar. Die einzelnen Charakteristika der Baugruppen sind die Attribute der Klassen und bilden den Datentyp des jeweiligen Attributes passend ab. So werden Seriennummern als einzelne Integerwerte deklariert, Sortenbezeichnungen als String und Messwerte je nach Erfordernissen als Integer-Array. Dabei werden unveränderliche Werte als protected (#) gekennzeichnet. Diese Werte sind von den Prozessen nicht beeinflussbar oder es handelt sich um Nennwerte. Messgrößen stellen die vom Prozess veränderten Größen dar und werden als public (+) gekennzeichnet. Die Prozesschritte werden als Methoden dargestellt. Im Beispiel werden Prozesse mit einem maßgeblichen Einfluss auf die Laufeigenschaften des Motors ebenso als public gekennzeichnet, wohingegen Prozesse ohne direkten Einfluss als private (-) gekennzeichnet werden.

Die Prozesskette der Rotorfertigung, als Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, kann mit dem Schema der vorgestellten objektorientierten Prozessbeschreibung wie folgt analysiert werden: Die aus mehreren Magnetinstanzen bestehende Instanz der Klasse Rotor erhält ihre Attributswerte durch die Magnetinstanzen selbst und durch ihre Methoden (z.B. Paketieren_Blech, Fügen_Welle, etc.). Eine Magnetinstanz erhält ihrerseits die Attributswerte durch ihre eigenen Methoden. Die Methoden Formgebung_Magnetkörper und Behandlung_Oberfläche beispielsweise geben keine Datensätze zurück und charakterisieren lediglich die grundlegenden Eigenschaften des jeweiligen Magnets (z.B. im Axialfeld gepresst und vernickelt), die bei der Auslegung der Maschine berücksichtigt werden.

2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen



Bild 3: Klassendiagramm der Motorenproduktion

Die Methoden Prüfen_magnetisch und Prüfen_geometrisch symbolisieren Messprozesse und geben variable und für jede Magnetinstanz individuelle Datensätze zurück. Rotorseitig fallen beim Fügen der Welle Kraft-WegDaten und bei der Magnetmontage Positionsdaten an. Die Methoden Auswuchten_Rotor, Prüfen_magnetisch und Prüfen_geometrisch stehen ebenfalls für Messprozesse und geben Daten zurück, die Rückschlüsse auf die Prozesskette zulassen.

Da die jeweiligen Messverfahren für sich allein nicht alle Freiheitsgrade der Charakterisierung auflösen können, und isoliert betrachtet ein einzelner Datensatz keine eindeutige Identifizierung von Abweichungen oder Fehlern in der Prozesskette erlaubt, müssen diese Freiheitsgrade durch Abgleich mit Datensätzen verschiedener Messverfahren reduziert werden.

Konkret bedeutet dies, dass zur Identifizierung von Fehlern in der Prozesskette der Rotorproduktion nach dem Aufkleben der Magnete auf den Magnetträger ein Rotorscan durchgeführt wird, in dem sowohl die Geometrie als auch der Flussdichteverlauf ermittelt wird (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die Überlagerung der beiden Datensätze erlaubt die Unterscheidung zwischen ungleichmäßiger Magnetisierung oder Formfehler des Rotors, da bei bloßer Beurteilung des Magnetfeldscan beides zu einer inhomogenen Flussdichteverteilung führt. Um Winkelabweichungen der Magnete von Fehlern im Magnetmontageprozess unterscheiden zu können, wird ein Vergleich der Daten des Magnetfeld- und Geometriescans und den Sollwertabweichungen des magnetischen Momentenvektors der Einzelmagnete (vgl. Abschnitt 5.1.1), die mittels Fernfeldmessung (vgl. Abschnitt 3.3.2) bestimmt werden, durchgeführt. Somit können die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Fehler, wie z.B. exzentrischer Rotor, deplatzierte Magnete, ungleichmäßiger Klebstoffauftrag, geometrische oder magnetische Winkelfehler des Magnetmaterials eindeutig dem jeweiligen Prozessschritt zugeordnet werden. Um Eingriffsgrenzen zu definieren, die von Motortyp zu Motortyp unterschiedlich sein können, werden diese Daten mit den Ergebnissen der drehenden Stückprüfung (z.B. induzierte Spannung, Rastmoment) korreliert.

Dieses Modell ermöglicht eine direkte Ableitung einer Datenbankstruktur zur Speicherung der Produkt- und Prozessdaten und gibt einen Überblick über die Größen, die durch die einzelnen Prozesse verändert werden. Dies bildet ebenso die Grundlage für die Datenanalyse zur Regelung von Prozessen oder stellt in diesem Fall die Grundvoraussetzung für die Implementierung der selektiven Magnetmontage dar. 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

2.1.3 Rotortopologien

Generell sind die Rotortopologien von permanenterregten Radialfluss-Synchronmaschinen nach oberflächenbestückten Permanentmagneten (surface mounted permanent magnets - SPM) sowie innenliegenden oder vergrabenen (integrated permanent magnets – IPM) zu unterscheiden. Die klassische Radialflussmaschine besteht grundlegend aus einem ferromagnetischen Magnetträger, der je nach Ausführung verschiedene Aufgaben hat. An den Magnetträger werden neben elektromagnetischen Anforderungen auch mechanische Anforderungen gestellt, da dieser die im Betrieb der Maschine auftretenden Kräfte aufnehmen muss. Dazu zählt in erster Linie die aufzubringende Zentripetalkraft in Abhängigkeit von der Betriebsdrehzahl sowie eine gewisse Steifigkeit zur Vermeidung von Schwingungen.

Bei der Bauart SPM können die Magnete entweder auf einen Magnetträger aus Elektroblech oder direkt auf die massive und spanabhebend hergestellte Welle aufgebracht werden. Dies ist möglich, da die Eisenverluste im Rotor auf Grund des großen effektiven Luftspalts gering sind [18]. Dieser Luftspalt setzt sich aus dem Arbeitsluftspalt zwischen Magnetoberfläche und Stator-Zahnkopf, dem Klebespalt sowie der Dicke des Magneten selbst zusammen. Der Magnet weist im Arbeitspunkt eine relative magnetische Permeabilität μ_r in der Größenordnung von 1 auf und verhält sich so ähnlich Luft (vgl. auch Bild 17 sowie [19]). Da das Eisen somit lediglich vom Erregerfeld des Rotors durchflutet wird, kann auch der Eisenquerschnitt klein gewählt werden, was ein geringes Trägheitsmoment begünstigt. Auf Grund dieser Tatsache, sind ebenso keine Nichtlinearitäten während des Betriebes zu erwarten, was eine analytische Auslegung der Maschine begünstigt. [18, 20]

Die Laufeigenschaften der Maschine können durch die Magnetgeometrie beeinflusst werden. Nicht drehmomentbildende Feldoberwellen, die zu Verlusten durch Erwärmung führen, werden in erster Linie durch scharfe Übergänge bei den Polwechseln begünstigt. Wird das Feld beim Polwechsel abgeschwächt, können diese Oberwellen reduziert werden [21]. Dies kann durch eine angepasste Magnetform, wie Brotlaib oder Schalenmagnet mit deutlich kleinerem Radius an der konvexen Magnetoberfläche als der Radius der Rotoroberfläche, erzielt werden. Ebenso können am Magnetträger Stege zwischen den Polen vorgesehen werden, die einen Teil der Magnetfeldlinien kurzschließen und somit das Feld an dieser Stelle im Luftspalt schwächen. Diese Stege begünstigen darüber hinaus auch die Magnetmontage, da somit die mögliche Deplatzierung der Magnete verringert wird. Schlussendlich ist auch eine Schrägung der Polwechsel möglich, ähnlich der Schrägung der Statornuten, was je nach Wickelverfahren nicht immer realisierbar ist.



Bild 4: Übersicht über verbreitete Magnetformen in Radialflussmaschinen

Untersuchungen zeigen allerdings Wirbelstromverluste in den Magneten selbst, welche zu Erwärmung der Magnete führen und somit die Gefahr der Entmagnetisierung im Betrieb der Maschine erhöhen [22–24]. Um dies zu vermeiden, sind den maximalen Abmessungen der Einzelmagnete Grenzen gesetzt. Je nach Fertigungskonzept können auch laminierte Magnete eingesetzt werden. Hierzu werden einzelne Magnetsegmente beim Lieferanten aneinandergeklebt und gemeinsam mit einer Schutzschicht versehen. Ebenso bieten einige Magnethersteller an, mäanderförmige Schnitte in die Magnete zu erodieren (teilweise als "Snakeline" bezeichnet), um die Leitfähigkeit der Magnete lokal zu reduzieren. Diese Verfahren sind jedoch teuer und erhöhen das Bruchrisiko der Magnete weiter.

Vor allem im Bereich der Traktionsantriebe bietet die IPM-Bauweise Vorteile. Durch Änderung des Stromschwenkungswinkels α kann bei Maschinen mit derartigem Rotor die Charakteristik ähnlich einer fremderregten Synchronmaschine geändert werden [18]. Wird auf der feldbildenden d-Achse Strom eingeprägt, kann je nach Vorzeichen die Erregung des Läufers angepasst werden. Wird das Erregerfeld verstärkt, kann das Drehmoment der Maschine gesteigert werden. Da jedoch die zur Verfügung stehende Zwischenkreisspannung U_{zk} begrenzt ist, sinkt dabei gleichermaßen die Maximaldrehzahl. Soll die Maximaldrehzahl hingegen angehoben werden, wird das Erregerfeld durch Einprägen von I_d mit umgekehrten Vorzeichen geschwächt. Dabei sinkt das Drehmoment. Dieser Effekt ist bei IPM Rotoren besonders stark ausgeprägt, da das die Magnete umgebende Eisen durch die hohe magnetische Permeabilität flussführende Eigenschaften aufweist und somit den Reluktanzeffekt des Rotors verstärkt.

Da der Eisenquerschnitt konstruktionsbedingt für den magnetischen Fluss nicht an jeder Stelle gleich ist und es somit zu lokaler Sättigung des Materials kommt, treten starke Nichtlinearitäten auf, die eine numerische 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

Berechnung einer solchen Maschine unumgänglich machen. Darüber hinaus zeigen Vergleiche zwischen vergleichbaren IPM- und SPM- Rotoren ein erhöhtes Trägheitsmoment von IPM-Rotoren auf Grund des höheren Eisenanteils und der damit größeren drehenden Masse. Dies reduziert die Dynamik der Maschine, d.h. die Geschwindigkeit, mit der Drehzahländerungen durchgeführt werden können, deutlich. [18]

Klaus Halbach schlug 1980 eine Konfiguration eines Magnetsystems vor, dessen Feld sich an einer Seite der Magnetanordnung maximal verstärkt und an der gegenüberliegenden Seite nahezu null beträgt. Dadurch sind Magnetsysteme mit besonders homogener Flussdichteverteilung für beispielsweise die NMR Spektrometrie erzeugbar. [25]

Ebenso ist diese Magnetanordnung für motorische oder generatorische Anwendungen mit besonderen Anforderungen an die Dynamik einsetzbar. So beschreibt Bernard Merrit ein Dipol-Array für einen Außenläufer [26]. Das Array besteht aus acht Magnetkörpern in Form von Kreisringsegmenten mit vier verschiedenen Magnetisierungsrichtungen. Die Folge ist ein ringförmiges Magnetarray mit sehr homogenem Fluss im Zentrum. Alle Feldlinien verlaufen im Inneren parallel diametral und addieren sich außerhalb des Rings zu null. Die Folge ist eine völlige Unabhängigkeit der Maschine vom gewählten Luftspalt zwischen Stator und Rotor und ein im generatorischen Betrieb geringer Oberwellenanteil der induzierten Spannung.

Diese Anordnung kann ebenso für klassische, mehrpolige Radialflussmaschinen gewählt werden. Im einfachsten Fall werden unabhängig von der Polpaarzahl der Maschine drei verschiedene Magnetisierungsrichtungen verwendet. Die Anisotropie der Magnete verläuft für dieses Beispiel je Magnet abwechselnd tangential und radial. Bild 5 zeigt zwei Möglichkeiten eines minimalsegmentierten Halbach-Rotors mit der Polpaarzahl 4. Die schwarzen Pfeile im Bild geben jeweils die Magnetisierungsrichtung der Magnete vor. Ebenso ist nur ein sehr kleines Streufeld auf der dem Arbeitsluftspalt jeweils abgewandten Seite zu erkennen. Die rechte Hälfte der Darstellung zeigt die Konfiguration als Innenläufer, die linke Hälfte die Konfiguration als Außenläufer.

Auf Grund der günstigeren Magnetfeldverteilung des Halbach-Rotors verglichen mit den klassischen eisenbehafteten Varianten SPM und IPM, kann auch ohne Schränkung des Blechpaketes ein geringes Rastmoment erzielt werden, was zu einer höheren Leistungsdichte des Motors führt [27–29]. Aus diesem Grund wird die Halbach-Konfiguration für Hochleistungsanwendungen wie Traktionsantriebe für Rennfahrzeuge [28], Flugzeugantriebe oder für Raumfahrtapplikationen [29, 30] eingesetzt.



Bild 5: Magnetfeld eines Halbach-Rotors; links als Außenläufer, rechts als Innenläufer

Da die Magnetsegmente aus fertigungstechnischen Gründen (vgl. Abschnitt 2.2.2 und3.2.2) nur parallel magnetisiert werden können, bleibt ein minimales Streufeld bestehen. Dies könnte mit sinusförmiger Magnetisierung eliminiert werden, jedoch erfordert dies den Einsatz Kunststoffgebundener Ringmagnete mit geringerem Anteil an Magnetmaterial und einer damit verbundenen geringeren Leistungsdichte [27]. Das Streufeld kann verglichen mit dem in Bild 5 gezeigten Rotor mit Minimalsegmentierung (für einen Pol o°, 90°, 180°) weiter reduziert werden, indem die Anzahl an Magnetsegmenten pro Pol mit jeweils anderer Magnetisierungsrichtung (für einen Pol z.B. o°, 45°, 90°, 135° und 180°). Dies führt folglich ebenso zu einer weiteren Reduzierung des Rastmoments und der Drehmomentwelligkeit [31]. Das Streufeld ist jedoch ebenso von der Präzision der Magnetisierung abhängig. Weichen die Magnetisierungswinkel von den Sollwerten ab, ist mit erhöhtem Rastmoment, erhöhter Drehmomentwelligkeit und erhöhten Verlusten durch Oberwellen zu rechnen.

Aus fertigungstechnischer Sicht ist vor allem der Wegfall des geblechten Magnetträgers zu erwähnen. Um ein möglichst geringes Massenträgheitsmoment zu erzielen, kann der Magnetträger als Leichtmetall-Druckgussteil mit geringem Massenträgheitsmoment ausgeführt oder je nach Betriebstemperatur aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt werden. Somit ist neben dem reduzierten Massenträgheitsmoment auch ein Kostenvorteil zu erzielen.

Die fertigungstechnischen Herausforderungen liegen vor allem in der Handhabung und der Montage der Einzelsegmente begründet. Auf Grund der großen Polabstände in radialer Richtung, ist eine Magnetisierung des Rotors im zusammengebauten Zustand nicht möglich. Montageversuche mit vormagnetisierten Magneten zeigen radial nach außen orientierte Kräfte der Magnete während der Applikation der Magnete auf den Magnetträger. Weiterhin besteht gerade bei manueller Montage die Gefahr der Verwechselung der Magnete mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen. Diese Herausforderung steigt mit feinerer Segmentierung.

2.2 Fertigungsprozesse der Rotorproduktion

Der wesentliche Bestandteil von Rotoren permanenterregter Maschinen sind, neben dem Blechpaket bzw. dem Magnetträger, die Permanentmagnete. Die eingesetzten Materialien unterscheiden sich von den üblicherweise im Maschinenbau verwendeten Werkstoffen. Dies betrifft sowohl die Material- bzw. Legierungszusammensetzung als auch die Herstellungsprozesse. Ebenso werden andere Toleranzen für die Magnetkörper zu Grunde gelegt. Die magnetischen Eigenschaften der Permanentmagnete erfordern ebenso besondere Handhabungsmethoden. Die folgenden Absätze geben einen Überblick über diese Besonderheiten der Rotorproduktion.

2.2.1 Hartmagnetische Werkstoffe und Toleranzen

Die für permanenterregte Maschinen notwendigen hartmagnetischen Werkstoffe werden ausgehend von ihrer jeweiligen Legierungszusammensetzung untergliedert. Die Hauptgruppen der verwendeten Werkstoffe beschränken sich auf Hartferrit, SmCo (Samarium-Cobalt), NdFeB (Neodym-Eisen-Bor), sowie AlNiCo (Aluminium-Nickel-Cobalt) [32]. Hartferrite sind Keramiken und basieren auf den Ausgangsstoffen Barium (BaFe₁₂O₁₉), Strontium (SrFe₁₂O₁₉) oder Cobalt (CoFe₂O₄). SmCo und NdFeB sind ebenfalls in unterschiedlichen Legierungen und damit unterschiedlichen magnetischen Kennwerten verfügbar. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die erwähnten Werkstoffe:

Der teure Werkstoff SmCo wird bei Anwendungen eingesetzt, bei denen eine besonders hohe thermische Belastbarkeit der Maschine gefordert ist. Der kleine Temperaturkoeffizient der Remanenzflussdichte und der Koerzitivfeldstärke gewährleistet gleichmäßig gute Leistung auch bei hohen Betriebstemperaturen (vgl. Tabelle 3). Auf Grund der hohen erforderlichen Sättigungsflussdichte ist die Magnetsierung ganzer Magnetsysteme, wie z.B. Rotorbaugruppen nicht möglich, da das Eisen der Magnetisiervorrichtung auf Grund der Sättigung die maximale Flussdichte begrenzt (vgl.
hierzu Abschnitt 3.2.3). Die Magnetisierung dieser Magnete erfolgt durch Impulsmagnetisierung in Luft (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes ist sehr gut und ermöglicht die nachträgliche spanabhebende Bearbeitung ohne weiteren Korrosionsschutz. Der Werkstoff ist sehr spröde. [19, 33]

Bemerkenswert ist der positive Temperaturkoeffizient bezogen auf die Koerzitivfeldstärke der Hartferrite. Dies ermöglicht eine hohe Sicherheit gegen Entmagnetisieren während des Betriebes der Maschine. Darüber hinaus sind diese Werkstoffe auf Grund ihres keramischen Charakters nicht elektrisch leitfähig. Folglich werden diese Magnete nicht durch Wirbelstromverluste während des Betriebs der elektrischen Maschine erwärmt.

AlNiCo Magnete werden auf Grund ihrer kleinen Koerzitivfeldstärke nur selten für Motoren eingesetzt. Ein Konzept, welches auf diesem Magnettypen basiert, ist der polumschaltbare Synchronmotor mit permanenter Erregung, auch als Memory-Motor bezeichnet. Dabei können im laufenden Betrieb durch Aufprägen eines ummagnetisierenden Statorfeldes unterschiedliche Polzahlen des Rotors realisiert werden [32].

2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

Werkstoff	Allg. Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	
Sama- rium- Cobalt (SmCo / SECo)		Sehr hohes max. Energieprodukt	Hoher Preis, da Sel- tenerdmagnet (SE)	
	Einsatz bei Hoch- temperaturanwen- dungen	Hohe Einsatztem- peraturen (>250°C) möglich	Schwierige Magne- tisierbarkeit	
		Geringe Tempera- turabhängigkeit	Spröder Werkstoff, neigt zu Brüchen	
		Hohes H_c und B_R		
		Korrosionsbestän- dig		
Neodym- Eisen-Bor (NdFeB / SEFeB)	Hartmagnetischer Hochleistungswerk- stoff	Keine Abhängigkeit von Cobalt	Beschichtung als Korrosionsschutz notwendig	
Alumi- nium- Nickel- Cobalt (AlNiCo)	Überwiegend An-	Temperaturstabil bis ca. 500°C	Benötigt strategi- schen Werkstoff Cobalt	
	wendung in hoch- scherenden Syste- men und Sensoren	Geringer Tempera- turkoeffizient	hohes <i>l/d</i> -Verhält- nis erforderlich	
		Leicht magnetisier- bar	Geringes <i>H_c</i> , leicht entmagnetisierbar	
Hartferrit (HF)	positiver Tempera- turkoeffizient, d.h. Entmagnetisierung bei höheren Tempe- raturen schwieriger	Temperaturstabil bis ca. 250°C	Schwierige Bearbei- tung	
		Preisgünstig		
		Korrosionsbestän- dig	Niedrige Energie- dichte	
		Gute Magnetisier- barkeit		

Tabelle 1: Übersicht über hartmagnetische Werkstoffe [33]

		MS Schram- berg	Vacuum- schmelze	IBS Mag- net	Alliance LLC (USA)/	Great Magtech Electric (China)
Allgemein	Mechani- sche Be- schädigun- gen	bis zu 2% der Polfä- che	bis zu 2% der Polfä- che	vor- han- den	10% der Oberflä- che; Länge: 50% der Polfäche	
	Kalibrieren	+-10% des magneti- schen Flusses				
	Parallelität	DIN ISO			MMPA	0,04 -
-	Vertikalität	DIN ISO 2768 mK			0,5°	0,5°
Formgepresst	Form und Lagetole- ranzen	DIN ISO 2768 mK		DIN ISO 2768 mK	MMPA 0100-00	
	Maßtole- ranzen roh	DIN IEC 60404-8-1	Eigene Tabelle		MMPA 0100-00	
	Maßtole- ranzen mit Nachbear- beitung	DIN ISO 2768 mK	DIN ISO 2768 mK	DIN ISO 2768 mK	MMPA 0100-00	0,03 - 0,05mm
	Magn. Ei- genschaften	DIN IEC 60404-8-1	DIN IEC 60404-8-1 DIN IEC 60404-5-1	DIN IEC 60404- 8-1	MMPA 0100-00	
	Polfächen	o,1mm	0,05mm		0,125mm	0,04 - 0,06mm
lsostatisch gepresst	Längentole- ranz	DIN ISO 2768 mK	o,ımm			

Tabelle 2: Toleranzen bei der Magnetherstellung (herstellerbezogene Angaben, nach [S7])

Eine Recherche [S7] bei mehreren Magnetherstellern bezogen auf die Fertigungstoleranzen erbrachte das in Tabelle 2 zusammengefasste Ergebnis. Die Tabelle zeigt, dass bei vielen Magnetherstellern keine einheitlichen Standards angewandt werden. In der Praxis sind die Toleranzen im Zuge der Konstruktion und der Bemusterung demnach mit dem jeweiligen Lieferanten individuell abzustimmen.

Werkstoff	$\begin{bmatrix} T_K(B_R) \\ \left[\frac{\%}{K} \right] \end{bmatrix}$	$T_{K}(H_{cJ})$ $\begin{bmatrix} \% \\ K \end{bmatrix}$	B_R $[T]$	H _{cJ} [kA/m]	(BH) $[kJ/m^3]$
SmCo	-0,03	-0,15	0,9-1,19	640-1.990	160-165
NdFeB	-0,11	-0,67	1,08-1,47	875-3.143	225-415
AlNiCo	-0,02	+0,03- 0,07	0,9-1,4	100	10-80
HF	-0,2	+0,4	0,2-0,43	220-300	23-34

 Tabelle 3:
 Typische Kennwerte verschiedener Magnetwerkstoffe [33, 19]

2.2.2 Magnetherstellung

Dieser Abschnitt bezieht sich auf die für leistungsfähige Synchronmaschinen erforderlichen Monomaterialien. Die Herstellung von hartmagnetischen Magnetkörpern aus Verbundmaterial, wie z.B. durch Kunststoff-Spritzguss oder additive Fertigungsprozesse zur Magnetherstellung wie Fused Deposition Moulding oder Binder Jetting [34] werden nicht betrachtet.

Der Ausgangswerkstoff für Seltenerd-Permanentmagnete liegt in Pulverform vor. Die Legierung wird in Abhängigkeit des Einsatzzweckes und des Fertigungsverfahrens je nach gewünschten Eigenschaften der Magnete zusammengesetzt. Die formgebende Herstellung von anisotropen Permanentmagneten erfordert die Ausrichtung der Pulverpartikel des Ausgangswerkstoffes während des pulvermetallurgischen Urformprozesses. Dies geschieht auf verschiedene Arten, von denen Sintern und Fließpressen den Stand der Technik darstellen. Die industriell weiter verbreitete Methode ist das Sintern.

Neben der Remanenzflussdichte des Magneten, beziehungsweise der remanenten Polarisation, die in der Praxis oft aus dem magnetischen Moment und der Geometrie der vermessenen Probe angenähert wird, ist die Koerzitivfeldstärke bei bestimmten Temperaturen die zweite entscheidende Kenngröße des Permanentmagneten. Diese wird bei NdFeB Magneten durch Zulegieren von schweren seltenen Erden, wie z.B. Terbium (Tb) oder Dysprosium (Dy) gesteigert. Bei konventionellen Legierungsverfahren sinkt dabei allerdings auch die Remanenzflussdichte des Magneten. Um diesen Effekt zu minimieren, wird gegenwärtig der grain boundary diffusion process (Korngrenzendiffusion) [35] verfolgt. Dabei wird in den aus der Grundlegierung geformten Magnetkörper der Zusatzstoff lediglich in die Korngrenzen eindiffundiert. [36]

Pulverherstellung

Die Partikel des zur pulvermetallurgischen Erzeugung von anisotropen Magneten erforderlichen Pulvers bestehen aus Einkristallen. Dies bedingt eine Partikelgröße von ca. 2-5 μ m, was eine sehr hohe Reaktivität des Pulvers nach sich zieht und somit die Gefahr der Selbstentzündung birgt. Auf Grund dessen ist der außerbetriebliche Transport dieses Ausgangsmaterials nicht möglich, was die werksinterne Pulvererzeugung erforderlich macht. Dies geschieht durch Brechen und Mahlen des Pulvers, z.B. im Jet-Milling-Verfahren (Strahlmühle), aus dem legierten und zu Pellets oder Barren gegossenen Ausgangsmaterial. [19, 37]

Das Fließpressverfahren erfordert flockenartiges Ausgangsmaterial von Partikelgrößen zwischen 30 und 50 µm. Dieses Material wird durch sehr rasches Erstarren der Nd-Fe-B Schmelze erzeugt. Dazu wird die Schmelze auf eine gekühlte und schnell drehende Walze gegossen und mit Hilfe einer Klinge abgeschabt. Da die einfachen Achsen der Körner zufällig verteilt sind, entsteht isotropes Pulver. Für den folgenden formgebenden Prozess ist kein einkristallines Material erforderlich, da sich die Anisotropie auf Grund der Prozessführung (vgl. unten) ausbildet. Die somit geringere Reaktivität des Pulvers ermöglicht eine externe Materialherstellung und den damit erforderlichen Transport über übliche Verkehrswege. [19, 37]

Eine alternative Legierungsmethode ist das mechanische Legieren. Dabei wird ein Gemisch aus elementaren Nd-, Fe- und B-Pulver in einer Kugelmühle mit Inertgasatmosphäre gemahlen. Somit werden die Pulverpartikel wiederholt kaltumgeformt und miteinander kaltverschweißt, sodass ein nanokristalliner Verbund aus einer amorphen Nd-reichen Phase und α -Eisen-Kristallen entsteht. Nach einer Wärmebehandlung bei 600 bis 750 °C entsteht das hartmagnetische Ausgangsmaterial Nd₂Fe₁₄B. [38, 19, 37]

Formgebende Prozesse

Bei dem dem eigentlichen Sintern vorgelagerten Pressen des Grünlings wird die Ausrichtung der Pulverpartikel über ein Magnetfeld erzielt. Die Richtung des Pressdruckes und des Magnetfeldes erlaubt die Unterscheidung verschiedener Pressverfahren. Allen Pressverfahren gemein ist die Ausrichtung der Partikel vor dem Aufbringen des Pressdruckes.

Beim **kaltisostatische Pressen** wird der Werkstoff in eine deformierbare Kapsel gefüllt, die in einem Druckgefäß mit hohem Druck (ca. 200 MPa) komprimiert wird. Als Druckmedium dient entweder Gas oder eine hydraulische Flüssigkeit. [39, 40] Das Verfahren kennzeichnet sich durch die gleichmäßige Druckverteilung innerhalb der Pressform, da der Druck von allen Seiten auf das Pulver wirkt. Dies ermöglicht eine nahezu ungestörte Ausrichtung der Pulverpartikel während der Kompaktierung. Die gepressten Blöcke werden anschließend auf bis mehr als 98% der theoretisch möglichen Dichte gesintert, wodurch in der Praxis Remanenzflussdichten B_r von 1,18 bis 1,47 T bei Koerzitivfeldstärken von 875 bis 2.230 kA/m erzeugt werden können. Das maximale Energieprodukt (BH)_{max} ergibt sich so zu 270 bis 415 kJ/m³. [19, 37]



Bild 6: Schema des kaltisostatischen Pressverfahrens (nach [19])

Auf Grund der wirtschaftlichen Mindestgröße der Formkapsel werden bevorzugt größere Blöcke gepresst, die durch Schneiden und Schleifen zur Zielgeometrie weiterverarbeitet werden. Der komplizierte Prozess und die Folgeprozesse führen zu hohen Herstellkosten, die durch den Einsatz alternativer Prozesse reduziert werden können. Das **Transversalfeldpressen** ermöglicht die Herstellung kleinerer Teile mit Geometrien nahe der Endkontur. Hierbei wird ein Pressgesenk verwendet und der Pressdruck mit zwei Stempeln symmetrisch von unten und oben aufgebracht. Das ausrichtende Magnetfeld ist quer zur Pressrichtung gerichtet. Dies richtet die einfachen Achsen der Pulverpartikel senkrecht zur Pressrichtung aus und gleichzeitig sind Reibungsverluste innerhalb der Pressform nahezu vernachlässigbar. Da beide felderzeugende Spulen in einem bestimmten Abstand voneinander angeordnet sein müssen, um ein möglichst homogenes Magnetfeld zu erzeugen, sind jedoch auch hier gewisse Grenzen bezüglich der Magnetabmessungen gegeben. Die erzielbaren Remanenzflussdichten B_r bei Nd-Fe-B betragen 1,14 bis 1,41 T bei Koerzitivfeldstärken von 1.115 bis 2.625 kA/m und maximalen Energieprodukten (BH)_{max} von 250 bis 385 kJ/m³. [19] [37]



Bild 7: Schema des Transversalfeldpressverfahrens (nach [19])

Für die automatisierte Herstellung von kleineren Magneten mit Endkontur eignet sich das **Axialfeldpressen**. Dabei entspricht die Richtung des Magnetfeldes der Pressrichtung. Auf Grund der Ausrichtung der einfachen Achsen der Partikel entlang der Pressrichtung, treten bei diesem Verfahren größere Reibungsverluste zwischen den Partikeln auf, was zu einer inhomogenen Druckverteilung im Pressgesenk und damit zu einer ungleichmäßigen Ausrichtung der Partikel führt. Ferner wird die Spulengeometrie stark von der Form des Gesenkes beeinflusst und kann eine gewisse Länge nicht übersteigen. Folglich kann kein ideal homogenes Magnetfeld erzeugt werden. Dennoch eignet sich dieses Verfahren für die Herstellung vielfältiger Magnetgeometrien wie Brotlaib, Quader, Schale, Scheibe oder Ring. 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

Die typischen magnetischen Eigenschaften von Nd-Fe-B entsprechen 1,08 bis 1,34 T für die remanente Polarisation J_r bei Koerzitivfeldstärken von 1.200 bis 2.800 kA/m und maximalen Energieprodukten (BH)_{max} von 160 bis 340 kJ/m³. Die hohe Koerzitivfeldstärke ermöglicht den Einsatz von nach diesem Verfahren beschriebenen Magneten in hochausgenutzten Synchronmaschinen, d.h. Maschinen mit großer Luftspaltinduktion. [19, 37]



Bild 8: Schema Axialfeldpressverfahrens (nach [19])

Da die Pulverzufuhr automatisiert mit Hilfe eines befüllten Rakels erfolgt, können die Magnete nicht genau in der Mitte der Spule und damit dem Bereich mit dem bestmöglich homogenen Feld gepresst werden. Dies bedeutet, dass die magnetischen Feldlinien an der Oberseite der Pressform divergieren. Dies bedeutet eine schwächere lokale Flussdichte an jeweils einer Magnetseite verglichen mit der gegenüberliegenden Seite. [19] Diese in der Literatur als Nord/Süd Effekt oder auch Hot-Side/Cold-Side Effect bezeichnete Eigenschaft kann durch bestimmte Fernfeldmessgeräte ermittelt werden (vgl. dazu Abschnitt 3.3.2).

Mit den oben beschriebenen Press- und Sinterprozessen sind zwar axial anisotrope, jedoch keine radial anisotropen Magnete zu erzeugen. Gerade bei Schränkung des Rotormagnetfeldes sind solche Magnete jedoch zu bevorzugen [41]. Dies wird durch das **Fließpressverfahren** ermöglicht. Dabei werden zunächst – unter Verwendung von isotropem Pulver in Flockenform mit Partikelgrößen zwischen 30 und 50 μ m – isotrope Magnetkörper durch Pressen bei Temperaturen von 750 °C erzeugt. Somit sind Werte für die remanente Polarisation J_r von ca. 0,8 T bei einer Koerzitivfeldstärke H_cJ von 1.400 kA/m und einem maximalen Energieprodukt (BH)_{max} von bis zu 120 kJ/m³ erzielbar. Wird der Magnetkörper anschließend durch Heißfließpressen umgeformt, richten sich die einfachen Achsen entlang der Pressrichtung und damit quer zur Fließrichtung aus und die anisotropen Bereiche wachsen. Somit sind Werte von 1,15 bis 1,3 T für J_r bei H_{cJ} von 1.000 bis 1.600 kA/m und (BH)_{max} von 250 bis 340 kJ/m³ zu erzielen. Durch Modifikation der Pressrichtung können somit auch radial anisotrope Magnete erzeugt werden. Diese werden aus isotropen Blöcken durch eine heiße Rückwärtsextrusion generiert. Kommerziell sind Ringmagnete von 1,08 bis 1,32 T und 1.110 bis 1.990 kA/m H_{cJ} bei (BH)_{max} von 230 bis 330 kJ/m³ erhältlich. [42, 19, 37]

Neben diesen beiden Alternativen, Sintern und Fließpressen, existieren noch weitere Methoden, hartmagnetische Halbzeuge herzustellen.

Beim **Rubber Isostatic Pressing (RIP)** wird eine mit ferromagnetischem Material angereicherte Elastomerform mit dem Magnetpulverwerkstoff gefüllt, diese mit Hilfe eines Stempels komprimiert während axial zur Pressrichtung ein starkes alternierendes Magnetfeld mit einer Pulsfeldstärke von 2.400 kA/m aufgebracht wird. Die Aufgabe der Elastomerform ist die gleichmäßige Verteilung des Pressdrucks auf das Pulver innerhalb der Form, sodass Near-Netshape Geometrien mit ähnlichen magnetischen Eigenschaften wie isostatisch gepresste Teile erzeugt werden können. In Versuchen wurden remanente Polarisationen J_r von 1,47 T bei Koerzitivfeldstärken H_{cJ} von 920 kA/m und einem maximalen Energieprodukt (BH)_{max} von 424 kJ/m³ erzielt. Jedoch sind die Formtoleranzen sowie der Teiledurchsatz beim Prozess schlechter als bei den klassischen Varianten. [43, 19, 37]

Das **Warmwalzen von Magnetkörpern** vereinfacht die Prozesskette der Magnetherstellung durch die Einsparung der aufwendigen Herstellung von einkristallinem Pulver. Ebenso wie beim beschriebenen Warmumformen von Magnetkörpern, erfolgt beim Warmwalzen von gegossenen Pr-Fe-Cu-B oder Nd-Fe-Cu-B Barren die Ausbildung der Anisotropie während des Umformprozesses, da sich die leichten Achsen der Körner parallel zur Umformkraft orientieren wobei sich die magnetische Vorzugsrichtung senkrecht zur Walzrichtung ausbildet. Dabei können Platten mit einigen Millimetern Dicke erzeugt werden. Die Werte für die remanente Polarisation J_r liegen zwischen o,9 und 1,2 T sowie zwischen 800 und 1.300 kA/m für die Koerzitivfeldstärke H_{cJ} bei maximalen Energieprodukten (BH)_{max} von 120 bis 290 kJ/m³. [19, 44, 37] 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

Ebenso gelingt die Herstellung von dünnen, hartmagnetischen Schichten durch das Plasmasprühverfahren. Unter Verwendung von Nd-Dv-Fe-B Pulver mit einer Partikelgröße zwischen 40 und 100 µm bei einer Abkühlrate von 106 K/s können nach der Wärmebehandlung der Nd16Dy1Fe76B7 Schichten remanente Polarisationen Jr von 0,66 bis 0,7 T bei Koerzitivfeldstärken H_{cl} von 1.210 bis 1.250 kA/m und maximalen Energieprodukten (BH)_{max} von 80 bis 82 kJ/m³ erzielt werden. Werden Schichten aus Nd-Fe-B auf ein vorgeheiztes Kupfersubstrat mit 500 bis 800 °C Oberflächentemperatur aufgetragen, kann für Nd₂Fe₁₄B ein Wert für die remanente Polarisation J. von 0.9 T bei einer Koerzitivfeldstärke Hel von 1.200 kA/m erreicht werden, was zu einem maximalen Energieprodukt (BH)_{max} von 180 kJ/m³ führt. [19, 45] Unter Verwendung von SmCo₅ Legierungen sind sehr hohe Koerzitivfeldstärken H_{cl} von 3.750 bis 5.400 kA/m bei allerdings relativ geringen Werten für die remanente Polarisation Jr von 0,5 und 0,56 T bei einem folglich geringerem Energieprodukt (BH)_{max} von 43 bis 61 kJ/m³erzielbar. [19, 46]

Andere **additive Fertigungsverfahren** erlauben die Herstellung von freigeformten Magnetgeometrien aus verschiedenen hartmagnetischen Ausgangsmaterialien. Zur Herstellung von Magnetkörpern aus Monomaterial wurde das Laserstrahlschmelzen untersucht. Hierbei wird auf Grund der guten Fließeigenschaften Pulver mit sphärischen Partikeln mit einer Partikelgröße kleiner 32 µm der Legierung Nd₂Fe₁₄B verwendet. Die ermittelten Abkühlraten des erzeugten Schmelzbades bewegen sich im Bereich von 10⁶ K/s. Erzielt wurden unter besten Bedingungen Werte von 0,578 T für die remanente Polarisation J_r bei einer Koerzitivfeldstärke H_{cJ} von 915 kA/m. [34, 47, 48]

2.2.3 Magnetmontage

Ausgehend vom Blechpaket als Kernelement des Magnetträgers sind in der Praxis bereits an dieser Stelle prozessbedingte Fertigungsabweichungen zu erwarten. Dies betrifft die einzelnen Bleche, sofern ein laminierter Magnetträger verwendet wird. Diese weisen bedingt durch den Walzvorgang gewisse Dickenunterschiede von Seite zu Seite auf. Obwohl die Walze während des Walzvorganges gestützt wird, ist die Dicke des Muttercoils, aus dem das Spaltband erzeugt wird, in der Mitte, bezogen auf die Breite, größer als im Randbereich, also dem Bereich, in dem die Walze gelagert ist. Die Chargennummer des verwendeten Spaltbandes lässt jedoch Rückschlüsse auf die Position im Muttercoil zu. Würden die einzelnen Bleche nach dem Stanzen ohne weitere Maßnahmen gestapelt, riefe dies eine erhebliche Abweichung in der Geradheit des Blechpaketes entlang der Drehachse hervor. Im Allgemeinen werden die Bleche beim Stapeln jeweils um einen gewissen Winkel gegeneinander verdreht, um diesen Effekt zu minimieren. Darüber hinaus werden so auch unerwünschte anisotrope Eigenschaften des meist nicht kornorientierten Elektrobandes ausgeglichen. Jedoch wurden in [5] auch Untersuchungen zur Verwendung kornorientierten Elektrobandes mit erhöhter Sättigungsflussdichte als Material für Magnetträger erwähnt. Hierbei werden die einzelnen Bleche ebenfalls gegeneinander verdreht.

Das Paketierverfahren wird dem Anwendungsfall entsprechend ausgewählt. Wird bei konventionellen Magnetträgern, welche mit einer Welle ausgestattet sind, der Zusammenhalt zwischen den Lamellen durch das Fügen der Welle und eventueller Deckscheiben hergestellt, kann im Gegenzug bei anderen Konstruktionen, die ein eigenstabiles Blechpaket auch ohne Welle erfordern, das Paketieren beispielsweise durch Backlack oder auch durch Stanzpaketieren erfolgen. Die Stanznasen erfordern jedoch konstruktiv Bauraum, womit letzteres Verfahren bei sehr filigranen Strukturen nicht angewendet werden kann. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass durch die Backlack-Paketierung ein höherer Eisenfüllfaktor des Blechpaketes erzielt werden kann [49].

Die eigentliche Magnetmontage beginnt mit der Reinigung der Magnete und des Magnetträgers [50]. Insbesondere beim Einsatz von Klebstoffen sind die Fettrückstände des Stanzprozesses zu entfernen, weshalb zur Reinigung des Magnetträgers dies mit Hilfe einer alkoholischen Lösung erfolgen kann. Das Waschen von Magneten ist auf Grund der erforderlichen Handhabung einer Vielzahl von Teilen prozesstechnisch unwirtschaftlich. Die Reinigung erfolgt hier unmittelbar vor dem Auftrag von Klebstoff oder dem Applizieren, bzw. Fügen von Magneten beispielsweise durch CO₂-Schneestrahl oder durch ein Luftplasma. Der Klebstoff kann sowohl auf den bzw. die Magnete als auch auf den Magnetträger aufgebracht werden. Dies ist je nach Prozessablauf und verwendetem Klebstoff zu bewerten. Die Eigenschaften von nicht thixotropen Klebstoffen sind hierbei zu beachten. Bei der Montage von IPM ist der Klebstoff entweder stirnseitig auf den Magneten aufzutragen [P6], oder die Kavitäten nachträglich mit Klebstoff zu füllen. Dies kann im Vakuumvollverguss, atmosphärisch mit niederviskosen Klebstoffen oder durch Überdruck im Spritzgussverfahren erfolgen. Alternativ können die Magnete auch formschlüssig fixiert werden. Dazu können Bandagen aus GFK, CFK, Aramid oder Edelstahl eingesetzt werden. Eine Vorfixierung der Magnete kann in diesem Fall über

2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

schnellaushärtende Klebstoffe ohne Klebespalt, doppelseitiges Klebeband mit geringer Klebekraft oder formschlüssig, wie in Bild 9 dargestellt, erfolgen.



Bild 9: Formschlüssige Fixierung von Magneten über Bandage und Montagekäfig

Im oben abgebildeten Beispiel wird ein Montagekäfig aus spritzgegossenem Polyamid eingesetzt, um die Magnete auf dem stanzpaketierten Magnetträger formschlüssig über eine Schwalbenschwanzgeometrie zu fixieren. Der Fügespalt kann auf Grund der Duktilität des Kunststoffes kleiner gewählt werden, als wenn eine ähnliche Geometrie direkt am Blechpaket vorgesehen werden würde. Ebenso werden so Beschädigungen der Magnete verhindert. Die so erzeugten Rotorsegmente werden zur Reduktion des Rastmomentes (vgl. Abschnitt 2.3.1) um einen gewissen Winkel gegeneinander verdreht (Schränkung oder Skewing) auf die Welle aufgepresst. Die Fliehkraftsicherung wird in diesem Fall durch eine beidseitig gefalzte Bandage gewährleistet. Das Verfahren bedingt einerseits hohe Stückzahlen, um wirtschaftlich umsetzbar zu sein. Andererseits erfordert es aber auch enge Form- und Lagetoleranzen des Blechpaketes und der Magnete sowie einen großen Luftspalt zwischen Stator und Rotor. Ferner treten in der Bandage Wirbelstromverluste auf, die das Luftspaltfeld schwächen und zur Erwärmung des Rotors beitragen.

Abschließend kann der Rotor, falls erforderlich, gewuchtet werden. Eine gesonderte Prüfung des Rotors wird in den meisten Fällen nicht durchgeführt. Die Qualität des Rotors kann in einem End-Of-Line-Test zusammen mit dem Stator ermittelt werden. Hier kann die induzierte Spannung, deren Oberwellenspektrum und das Rastmoment ermittelt und somit Rückschlüsse auf den Rotor gezogen werden.

Bild 10 zeigt einen üblichen Ansatz für die Magnetmontage im Industriemotorenbereich.



Bild 10: Prozesskette der Rotorfertigung (Beispiel)

2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

2.3 Stand der Wissenschaft und offener Forschungsbedarf

Unerwünschte Effekte im Laufverhalten von permanenterregten Synchronmaschinen betreffen Rastmomente, Drehmomentwelligkeit, Lärmemissionen durch zugkraftinduzierte Schwingungen sowie Erwärmung durch Verluste [12]. Diese Effekte werden einerseits durch das Maschinendesign hervorgehoben oder abgeschwächt, andererseits jedoch auch durch Fertigungsabweichungen beeinflusst [51, 52, 12, 53]. Ein direkter Zusammenhang zwischen Rastmomenten und der Drehmomentwelligkeit ist allerdings nicht gegeben [54]. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die bisher untersuchten Möglichkeiten zur Beeinflussung unerwünschter Effekte und zur Optimierung der Laufcharakteristika permanenterregter Maschinen.

2.3.1 Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion des Rastmomentes

Gängige Möglichkeiten zur konstruktiven Reduktion des Rastmomentes einer elektrischen Maschine bestehen darin, geeignete Nut-/Polzahl-Kombinationen zu wählen, die Geometrie der Statorpole anzupassen [55] und eine Schrägung der Nuten bzw. Pole durch Versatz der Rotorsegmente vorzusehen. Darüber hinaus können in den Zahnköpfen oder aber an der Oberfläche eines IPM-Rotors Nuten eingebracht werden [56-61]. Die Maschinenparameter werden bei der Feinauslegung der Maschine in Parameterstudien durch Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode soweit optimiert, bis die Zielgrößen der definierten Spezifikation entsprechen [62-66]. Dabei werden in manchen Fällen auch Sensitivitätsanalysen [67] bezüglich streuender Materialparameter, wie z.B. unterschiedliche Magnettemperaturen und Permeabilitäten des Eisens [68] durchgeführt und diese bei der Auslegung der Maschine berücksichtigt [69]. Bei der Auslegung der Maschine ist durch eine passende Nut-Polzahlkombination und beispielsweise durch geschickte Gestaltung von Flussbarrieren in IPM-Rotoren bereits eine Reduktion des maschinenabhängigen Rastmoments zu erzielen [70, 71]. Bei der Verwendung von segmentierten Magnetpolen und paralleler Magnetisierung der einzelnen Segmente bzw. Magnetkörper ist auf Grund des Streuflusses zwischen den Segmenten jedoch immer von einer Verschlechterung der Laufcharakteristika verglichen mit ideal sinusförmig magnetisierten Rotoren auszugehen [72].

[73, 65] beschreiben die Einflüsse von Hilfskerben auf den Zahnköpfen anhand einer Parameterstudie an einer BLDC-Maschine. Dazu werden sowohl die Tiefe als auch die Breite der Hilfskerben verändert und das Rastmoment der jeweiligen angepassten Maschine mit dem der Referenzmaschine ohne Hilfskerben verglichen und die Wirksamkeit des Ansatzes sowohl numerisch berechnet als auch experimentell nachgewiesen. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ergibt jedoch erhebliche Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten des Rastmoments. Dies wird auf eine unzureichende Abbildbarkeit von Fertigungseinflüssen in der numerischen Simulation zurückgeführt.

Die Ansätze, die Zahnköpfe mit Hilfsschlitzen zu versehen, zielen darauf ab. die durch die Grundkonstruktion des Motors vorhandenen Rastmomente zu reduzieren. Ein Ansatz um die durch Fertigungsabweichungen des Rotors, insbesondere in Bezug auf die Form- und Lageabweichungen des Magneten auf dem Magnetträger hervorgerufen Rastmomente und Harmonischen des Drehmomentes zu reduzieren, wird in [74-76] beschrieben. Der Ansatz verfolgt das Ziel, die Sensitivität des Maschinendesigns auf Fertigungseinflüsse zu minimieren. Das Beispiel bezieht sich auf einen segmentierten Stator mit 12 Nuten in Verbindung mit einem 10 poligen Rotor mit Brotlaib-Magneten. Ein Statorzahn besteht aus mindestens zwei verschiedenen Lamellengeometrien. Eine davon formt einen geschlitzten Zahnkopf in der Mitte des Stators (vgl. Bild 11). Die Idee des Ansatzes geht davon aus, dass durch die Überlagerung der in der ungeschlitzten Zone des Zahnes auftretenden Harmonischen der Rastmomente mit den durch den in der Zone mit dem Hilfsschlitz um π phasenverschobenen Rastmomenten eine vollständige Auslöschung der durch Fertigungseinflüsse hervorgerufenen Komponenten der Rastmomente erfolgt. Dabei muss die Länge der geschlitzten Zone der Länge der ungeschlitzten Zonen entsprechen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde experimentell bestätigt.

Diese Methode wird jedoch höhere Herstellkosten beim Stanzen des Blechpaketes verursachen, da zwei verschiedene Stanzkavitäten erforderlich sind. Insbesondere segmentierte Statoren erfordern, verglichen mit Statorvollschnitten, mehr Stanzhübe, da die Zahl der Kavitäten pro Stanzwerkzeug auf Grund der Formtoleranzen untereinander nicht beliebig gesteigert werden kann. Folglich ist dieses Konzept wirtschaftlich für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen.



Bild 11: Lamellen für geschlitzte Zahnköpfe (nach [74])

Ein weiterer Ansatz besteht darin, eine Nutenzahl zu wählen, die kein Vielfaches der Phasenzahl darstellt [77]. Dies führt fertigungstechnisch dazu, dass in zwei der Nuten jeweils nur eine Spulenhälfte eingelegt wird. Dies führt zu einer Reduktion des Rastmoments, zieht allerdings umlaufende Zugkräfte nach sich, die sich negativ auf die Lagerlebensdauer auswirken.

Weiter hat das Verhältnis von Polbreite zu Magnetbreite einen Einfluss auf das Rastmoment. Diese Maßnahme ist jedoch abhängig davon, ob die Permanentmagnete parallel oder radial magnetisiert sind und von der Anzahl der Nuten pro Pol. Bei einer geringen Anzahl von Nuten pro Pol hat eine kleine Änderung des Verhältnisses einen großen Einfluss auf das Rastmoment und kann bei Fertigungsabweichungen oder Fehlauslegung auch unerwünschte Effekte verursachen. [56, 58]

Durch eine gezielt asymmetrische Anordnung der Magnete auf dem Rotor, das heißt gezielte ungleichmäßige Polabstände ist eine Veränderung des Rastmomentes hin zu höheren Ordnungen möglich [59, 78].

Um eine Reduktion des Rastmomentes ohne die Schrägung von Nuten oder Polen zu erzielen, ist es bei IPM-Rotoren möglich, die Form und Lage der Flussbarrieren im Blechschnitt des Magnetträgers optimal zu gestalten [79]. Im Beispiel wird ebenso ein Zusammenhang zwischen den Harmonischen der induzierten Spannung sowie den Harmonischen des Rastmomentes hergestellt. Dies deckt sich jedoch nicht mit den praktischen Erfahrungen aus dem Elektromaschinenbau.

Die Schwächung des Luftspaltfeldes an den Polgrenzen zur Reduktion der Drehmomentwelligkeit und der Harmonischen in der Gegen-EMK durch exzentrische geformte Magnete wird in [80–84] beschrieben. Dies bedeutet, dass der Radius an der äußeren Magnetseite kleiner ist als der an der Magnetinnenseite bzw. der Rotoraußenseite. In [80] wird jedoch von radial magnetisierten Schalenmagneten ausgegangen, die allerdings nicht weit verbreitet sind, da sie entweder als anisotrope Magnete teuer sind oder als isotrope Magnete nur eine geringe Remanenzflussdichte aufweisen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

In [85–87] wird eine rechnerisch wirksame Methode zur Reduktion von Rastmomenten beschrieben, in dem einerseits eine Vergrößerung des Luftspaltes durch einen vergrößerten Kantenradius im Nutschlitz und andererseits eine Anpassung der Magnetisiervorrichtung vorgeschlagen wird. Die Drehmomentkonstante der Maschine bleibt annähernd erhalten. Dies bezieht sich ausschließlich auf Außenläufer. Ein experimenteller Nachweis bleibt aus.

Ähnlich diesem Ansatz wird in [88, 54] vorgeschlagen, in der Polmitte einen Bereich mit deutlich geringerer Restmagnetisierung einzubringen, indem ebenso das Magnetisierjoch in der jeweiligen Polmitte mit einer Aussparung versehen wird. Die Wirksamkeit zur Reduktion von Rastmomenten wird ebenso rechnerisch nachgewiesen.

Die Anpassung der Magnetisiervorrichtung ist insofern als kritisch zu betrachten, als dass Teilbereiche im Permanentmagneten nicht vollständig gesättigt werden und somit die volle Koerzitivfeldstärke nicht über den gesamten Magneten erreicht wird. Vor allem bei hochausgenutzten Maschinen kann dies zu erheblichen Beeinträchtigungen der Charakteristika führen. Dies wird in keinem Beispiel betrachtet.

Die Verwendung eines im Zweikomponenten-Spritzguss hergestellten Rotors mit einem weichmagnetischem Kern aus SMC-Material und einem hartmagnetischen, isotropen Ring bietet großes Potential hinsichtlich der Genauigkeit der Polabstände und der geometrischen Abweichungen. Bei einer hinreichend präzisen Magnetisierung des Rings kann hier das Rastmoment verglichen mit einem gesinterten Ring mit radialer Magnetisierung erheblich gesenkt werden bei gleichzeitig reduzierten Wirbelstromverlusten. [89]

Die beschriebenen Maßnahmen wirken sich jedoch teils negativ auf die Drehmomentdichte des Motors aus. [56].

2.3.2 Kompensation von Fertigungsabweichungen

Grundsätzlich sind bei Betrachtung der Fertigungseinflüsse und deren Auswirkung auf die Laufeigenschaften der permanenterregten Synchronmaschine mit dem Schwerpunkt auf der weit verbreiteten Radialflussmaschine die Quellen möglicher Abweichungen in Bezug auf die Teilegruppe zu klassifizieren. Ausgehend von einer idealen Ansteuerung der Maschine werden diese Quellen im Folgenden unterteilt in Aktiv- und Passivteile der Maschine in Abhängigkeit des Beitrags der jeweiligen Komponente zum Magnetfeld der Maschine sowie weiter in Gehäuseteile einschließlich Lager und Welle, Rotor und Stator. Einen Überblick gibt folgende Tabelle 4:

Funktion	Gehäuse	Stator	Rotor
Aktiv		•Blechpaket •Wicklung	•Magnetträger •Magnete
Passiv	•Gehäuse •Lagerschilde •Lager	 Isolation Verguss/Imprägnie- rung 	•Welle •Bandage

Tabelle 4: Komponenten einer permanenterregten Synchron-Radialflussmaschine

Die Fertigungstechnologie zur spanabhebenden Herstellung der passiven Gehäuseteile sowie der Welle werden an anderer Stelle behandelt und sind allgemeingültig auf die Herstellung einer Vielzahl von Produkten übertragbar. Die Isolation, der Verguss bzw. die Imprägnierung der Statorwicklung sowie die Bandage als Fliehkraftsicherung der Magnete haben ebenso keinen direkten Einfluss auf das eigentliche kraft- bzw. drehmomenterzeugende Magnetfeld der Maschine. Aus diesem Grund werden diese Komponenten und die dazugehörigen Fertigungsverfahren an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

Schwingungen werden ebenso durch eine Unwucht des Rotors verursacht. Auf Grund der beschriebenen Toleranzen bei der Magnetherstellung ist durch die unterschiedlichen Massen der einzelnen Magnetkörper eine Unwucht zu erwarten. Diese Abweichungen werden in den meisten Fällen durch Positiv- oder Negativwuchten behoben. Um den Wuchtaufwand zu minimieren und damit die Masse des Rotors möglichst gering zu halten, existieren verschiedene Ansätze, die auf dem Prinzip der selektiven Montage [90, 91] basieren. Einerseits kann bei segmentierten Rotoren die Unwucht der einzelnen Rotorscheiben bestimmt werden und diese mit der passenden Winkelausrichtung und in der errechneten optimalen Kombination auf die Welle montiert werden [92]. Bei nicht segmentierten Rotoren können vor der Montage die einzelnen Magnete gewogen werden, wobei die Masse dem jeweiligen Magneten zugeordnet werden muss. Durch optimale Kombination der Magnete ist die Grundwuchtgüte der Rotoren erheblich steigerbar. [93–96] Dabei bleiben Abweichungen der Magnetisierung jedoch unbeachtet.

[97–100] identifizieren die Ursachen für ungleichmäßige Magnetkräfte und Rastmomente in elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren (BLDC) sowohl als Exzentrizitäten von Rotor und Stator als auch als ungleichmäßige Magnetisierung. Als Lösungsvorschlag wird in [97] eine Anpassung der Nutschlitzbreite vorgeschlagen und numerisch untersucht. In der Untersuchung konnten Rastmoment und die ungleichmäßigen Magnetkräfte (Zugkräfte) nicht gleichzeitig reduziert werden, letztere aber als dominante Quelle für den diskutierten Anwendungsfall identifiziert werden. Demnach muss ein Kompromiss zwischen minimalem Rastmoment und Vibrationen gefunden werden.

Auch [101] und [102] identifizieren die ungleichmäßige Magnetisierung der Permanentmagnete als Hauptursache für erhöhte Rastmomente. In den Beispielen wurden erneut elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren, in diesem Falle Außenläufer-Festplattenantriebe, mit unterschiedlichen Nut-/Polzahl-Kombinationen betrachtet. Zur Reduktion des Rastmomentes wird hier eine Anpassung des Zahnkopfradius untersucht. Weicht dieser jedoch vom Luftspaltradius ab, kann sich die Amplitude der Rastmomente erhöhen. In [102] wird empfohlen, den Zahnkopfradius entsprechend der Magnetisierungsverteilung anzupassen. Eine solche Anpassung der Statorgeometrie ist auf Grund der Notwendigkeit einer spanenden Bearbeitung jedes Stators für die meisten Anwendungsfälle aus wirtschaftlichen Gründen unpraktikabel.

Auf Grund gänzlich verschiedener Fertigungsverfahren bezüglich der Erzeugung des Blechpaketes im Vergleich zur Radialflussmaschine, identifiziert [103] das Statorblechpaket als Hauptquelle für erhöhte Rastmomente bei der permanenterregten Axialflussmaschine und stellt einen Ansatz vor, wie mit Hilfe eines Flachbettscanners, Bildverarbeitung und eines Superpositionsalgorithmus das durch Fertigungsabweichungen hervorgerufene Rastmoment vorhergesagt werden kann. Dabei wird die Lage jeder einzelnen Lamelle durch Bildverarbeitung bestimmt und anhand dieser errechneten Geometrieabweichung das Rastmoment vorhergesagt.

Rotorseitig werden hauptsächlich die Magnete und damit zusammenhängende Merkmale als Haupteinflussfaktor für zusätzliche Rastmomente und 2 Elektromotorenproduktion mit dem Fokus auf der Rotorfertigung permanenterregter Synchronmaschinen

Harmonische der induzierten Spannung identifiziert. Dies betrifft Abweichungen der Magnetdicke, des Magnetradius (bei Schalen- oder Brotlaibmagneten sowie Ringen und Kreissegmenten) die Magnetbreite, die Abweichungen der Magnetisierung bezogen auf Winkel und Amplitude sowie Deplatzierung und damit hervorgerufene Fehler im Schränkungswinkel und sowohl Exzentrizitäten als auch Koaxialitätsfehler des Rotors bezogen auf den Stator [104, 105, 5, 106–110]. Bei Ringmagneten und der dadurch notwendigen nachträglichen Magnetisierung hat eine ungleichmäßige bzw. unvollständige Magnetisierung einen erheblichen Einfluss auf Rastmomente [67, 111–113].

Ein cyberphysisches System zur Kompensation der durch magnetische Abweichungen hervorgerufenen Unzulänglichkeiten der Laufeigenschaften von IPM-Maschinen, wird in [114–118] vorgestellt. Dabei wird die radiale Feldkomponente einzelner Rotorscheiben durch eine Nahfeldmessung ermittelt, um die einzelnen Scheiben bei der Montage des Rotors so zu kombinieren und auszurichten, dass sich damit über der Rotoroberfläche ein gleichmäßiges Magnetfeld ausbildet. Die Voraussetzung für dieses Verfahren ist die Segmentierung des Rotors bereits bei der Konstruktion der Maschine. Winkelabweichungen der Einzelmagnete werden hierbei nicht beachtet, da eine ausreichende Kompensation dieser Abweichungen bereits durch das die Magnete umgebende Rotoreisen zu erwarten ist.

2.3.3 Offener Forschungsbedarf

Die in 2.3.1 sowie 2.3.2 beschriebenen Beeinträchtigungen der Laufeigenschaften von permanenterregten Synchronmaschinen stehen in den meisten Fällen in direktem Zusammenhang mit einem erhöhten Rastmoment, das von ungleichmäßiger Magnetisierung hervorgerufen wird. Auch eine direkt mit dem Thema toleranzbehaftete Komponenten bei elektrischen Antriebssystemen zusammenhängende Arbeit [105, 5] beschreibt die Ursachen von erhöhtem Rastmoment und Schwingungen maßgeblich bezogen auf magnetische Abweichungen hervorgerufen durch Abweichungen der Einzelmagnete, der Magnetmontage sowie der Welle und deren Lagerung mit dem Fokus auf IPM- und SPM- Radialflussmaschinen.

[5] identifiziert weiterhin den Anteil des Rotoreisens als maßgeblich, inwieweit Abweichungen der Magnetisierung einen Einfluss auf das Rastmoment der Maschine haben. Ein Vergleich zwischen Rotoren mit oberflächenmontierten Magneten (SPM), eingebetteten Magneten (IPM) mit radialer Flussausrichtung sowie eingebetteten Magneten in Speichen- bzw. Sammleranordnung mit tangentialer Flussausrichtung zeigt, dass der größte Einfluss einer ungleichmäßigen Magnetisierung auf das Rastmoment bei der SPM-Anordnung zu erwarten ist, da die Abweichungen nicht vom flussführenden Rotoreisen kompensiert werden. Demnach ist die These zu formulieren, dass bei Wegfall des Rotoreisens die Sensitivität der Maschine gegenüber Magnetisierungsfehlern sehr hoch sein wird. Das in 2.1.3 beschriebene Konzept der segmentierten Halbach-Anordnung ist bezüglich der Leistungsdichte und des potentiell geringen Rastmomentes bei gleichzeitig hoher Dynamik durch ein niedriges Rotorträgheitsmoment vielversprechend, jedoch sind durch die aufgestellte These hierbei große Herausforderungen in der Fertigungstechnologie zu erwarten.

Nachdem Peter [93] bereits die selektive Montage von Magneten zur Reduktion von mechanischer Unwucht und Coupek [116] die selektive Montage einzelner Rotorscheiben von IPM-Rotoren zur wirkungsvollen Kompensation von Magnetfeldfehlern beschrieben haben, bleibt die Frage offen, wie dieser Ansatz zur Kompensation von Magnetfeldfehlern bei SPM-Rotoren adaptiert werden kann.

Eine frühzeitige Erkennung von Magnetfeldfehlern vermeidet Wertschöpfungsverluste und ermöglicht den Einsatz weitreichender Kompensationsalgorithmen. Dazu ist zunächst die Prozesskette der Montage von SPM-Rotoren hinsichtlich ihrer Fehlerpotentiale zu analysieren, eine geeignete Methode zur Inline-Messung von Magneten auszuwählen und ein Kompensationsalgorithmus zu entwickeln. Abschließend wird ein Vorschlag zur Umsetzung der selektiven Magnetmontage in einem Produktionssystem vorgestellt.

3 Die Prozesskette der Rotorfertigung und ihre Fehlerpotentiale

Üblicherweise schließt die Fertigungstiefe bei den meisten Motorenherstellern, bis auf wenige Ausnahmen, die Magnetherstellung nicht mit ein. In den meisten Fällen werden Magnetträger und Magnete von den jeweiligen Wertschöpfungspartnern bezogen. Die Einflussmöglichkeiten auf den Prozess sind hierbei folglich begrenzt, sowie Prüfungen beim Hersteller mit erhöhtem Aufwand verbunden. Messprotokolle oder gar eine 100%-Prüfung werden dem Kunden meist in Rechnung gestellt und schwierig in eigene ERP- bzw. MES zu integrieren. Dieses Kapitel geht von einem fiktiven Wertstrom eines typischen Motorenherstellers aus, der beschichtete Magnete und Magnetträger in der jeweilig benötigten Endgeometrie nach Zeichnung von Lieferanten bezieht. Das Wuchten des Rotors wird hierbei nicht betrachtet, da dies einerseits bereits umfassend wissenschaftlich behandelt wurde [93] und andererseits keinen obligatorischen Prozessschritt darstellt.

3.1 Fehlerpotentiale der Magnetmontage

Die Magnetmontage umfasst ausgehend vom Ausgangsmaterial die Handhabung und die Fixierung von Magneten. Dabei bergen sowohl die einzelnen Magnetkörper, die weit verbreitete adhäsive Fixierung durch Klebstoffe und der eigentliche Applikationsprozess Fehlermöglichkeiten. Im Folgenden werden diese Fehlermöglichkeiten in den erwähnten drei Feldern näher beleuchtet.

3.1.1 Abweichungen des magnetischen Moments

Zur Visualisierung der magnetischen Toleranzen wurden von drei Magnetherstellern Stichproben untersucht. Der Vektor des magnetischen Moments wurde im offenen magnetischen Kreis mit Hilfe des in Abschnitt 3.3.2 erläuterten Verfahrens der Dipolapproximation ermittelt. Dazu wird ein Messsystem des Herstellers Matesy vom Typ m-axis verwendet. Dieses System ist mit AMR-Effekt-Sensoren und einer Auswertesoftware ausgestattet, die die Dipolapproximation durchführt. Die Sensorik ist am Boden des Gehäuses angebracht und die zu messenden Magnete werden auf eine ebene Referenzplatte gelegt, die einen definierten Abstand zur Messsensorik sicherstellt. Um die Winkelabweichung in Längs- oder Querrichtung zum Magneten unterscheiden zu können, werden die Magneten markiert und an einen Anschlag gelegt. Der Messaufbau ist schematisch in Bild 12 dargestellt.



Bild 12: Messaufbau zur magnetischen Vermessung

Die Magnettypen entstammen verschiedenen Quellen. Typ 1 und 2 wurden nach Zeichnung vom Lieferanten Zhejiang Innuovo Magnetics Co.,Ltd. gefertigt. Dieser Lieferant repräsentiert den Durchschnitt für kostensensitiven Produkte. Magnettyp 3 ist ein Magnet für Traktionsanwendungen mit hoher Koerzitivfeldstärke und stellt das obere Ende der am Markt verfügbaren Qualität dar. Diese Magnete wurden von Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. gefertigt. Magnettyp 4 ist ein im Einzelhandel erhältlicher Magnettyp ohne besondere Angaben zu Toleranzen.

Die Ergebnisse der Untersuchung werden im Folgenden als Boxplot dargestellt und geben Aufschluss über die Verteilung der Winkelabweichungen von der spezifizierten Magnetisierungsrichtung.

Die Winkelabweichung der Magnetisierungsrichtung liegt bei den ersten beiden Typen im Mittelwert bei 1,3 ° bzw. 1,6 °. Die Geometrie beider Magnete ist identisch. Die Typen unterscheiden sich nur um eine um 90 ° verdrehte Magnetisierungsrichtung. Dies ist eine Erklärung für die unterschiedlichen Mittelwerte, da sich bei einem der beiden Typen die geometrischen Abweichungen stärker bemerkbar machen. Dennoch streuen die Werte bei beiden Typen zwischen ca. 0,2 ° und ca. 4,5 °. Dies wird nur durch die für den Einzelhandel produzierten Magnete von Typ 4 übertroffen. Die Magnete des Typs 3 weisen die mit Abstand geringsten Abweichungen auf. Die relativen Kosten spiegeln eine Bewertung der Beschaffungskosten wider. Dabei wurden Vergleichspreise bei gleichbleibender Abnahmemenge ermittelt. Für die über den Einzelhandel beschafften Magneten wurde ein Vergleichstyp mit identischer Spezifikation herangezogen.



Bild 13: Statistische Darstellung der Abweichungen des Magnetisierungswinkels nach Magnettyp

Bei den Ergebnissen zur Permanenz fallen die erheblichen Unterschiede zwischen Typ 1 und 2 auf. Die Ursache dafür sind die Einschränkungen des verwendeten Messsystems, da auf Grund von identischer Geometrie und Werkstoffzusammensetzung keine derartigen Unterschiede zu erwarten sind. Dies ist auf die für das Messsystem ungünstigen Aspektverhältnisse von Magnetisierungsrichtung zu Sensorarray zurückzuführen. Ein größeres Array sowie ein größerer Abstand zwischen Array und Magnet würde dieses Problem beheben. Ein weiteres Indiz für diese These stellt der hohe Residualwert der Qualitätsfunktion dar, welcher während der Messung von Typ 1 abweichend von den anderen Messungen ausgegeben wurde. Somit wird zur Interpretation der Ergebnisse der Typ 1 ignoriert. Der Vergleich zwischen Typ 2 und Typ 3 zeigt sehr geringe Unterschiede hinsichtlich der Polarisation. Lediglich die Magnete aus dem Einzelhandel zeigen hier große Toleranzen.



Bild 14: Statistische Darstellung der Abweichungen der Permanenz J nach Magnettyp

Die Untersuchung legt folgenden Schluss nahe: Die Materialkosten stehen in deutlichem Verhältnis zu den Abweichungen des Magnetisierungswinkels von der spezifizierten Richtung. Die Streuung der Polarisation ist im Gegensatz dazu weniger stark ausgeprägt. Dies ist mit den verwendeten Pressverfahren zu begründen. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, ist das kostengünstigste Verfahren das Axialfeldpressen. Laut Auskunft des Lieferanten werden die Magnete als Block gepresst und dann mit spanabhebenden Verfahren zur Endgeometrie bearbeitet. Die inhomogene Feldverteilung bei diesem Fertigungsverfahren ist eine Erklärung für die Abweichungen der Vorzugsrichtung. Dieser Zusammenhang ist bei der Auswahl des Magnetlieferanten im Hinblick auf die technischen Anforderungen der jeweiligen Maschine sowie die wirtschaftlichen Anforderungen des Marktes besonders zu bewerten. Bei besonders sensitiven Konfigurationen, wie z.B. ein Halbach-Rotor oder eine Maschine mit hinsichtlich Sensitivität auf Fertigungsabweichungen ungünstigem Nutzahl/Polzahlverhältnis, können mit Hilfe einer selektiven Montage der Magnete Materialkosten gespart werden.

3.1.2 Adhäsive Fixierung

Die adhäsive Fixierung von Magneten ist ein verbreiteter Prozess, birgt jedoch einige Prozessrisiken. Bei IPM-Konfiguration besteht vor allem die Gefahr des Abstreifens des applizierten Klebstoffes beim Einführen des Magnetkörpers in die Kavität. Um dies zu vermeiden, kann der Klebstoff stirnseitig auf den Magneten aufgetragen werden [P6]. Alternativ können die Magnete durch Vergießen des Rotors oder durch nachträgliches Einspritzen von Klebstoff in die Kavität fixiert werden. Bei Magnetträgern (MGT) für die IPM-Anordnung stellt in den meisten Fällen das Blechpaket die Außengeometrie des Rotors dar und ist somit eine wirkungsvolle Fliehkraftsicherung.

Fehler, die bei der Montage von Magneten in SPM-Anordnung auftreten können, sind in Bild 15 dargestellt und werden in Tabelle 5 beschrieben.



Bild 15: Darstellung von Fehlern bei der adhäsiven Fixierung von Magneten auf einem Magnetträger

#	Beschreibung	Folge
1	Korrekte Platzierung, korrekter Klebespalt	Keine Einflüsse durch Klebung
2	Magnet verschoben, Klebespalt Keilförmig	Risswachstum möglich durch mech. Spannung im Klebespalt, Polteilungsfehler, zusätzlicher Winkelfehler der Magnetisierung durch Klebung, Magnet schleift am Stator
3	Klebespalt zu klein	Risswachstum der Klebverbin- dung möglich bei Temperatur- wechsel, keine ausreichende Hal- tekraft, Klebstoff tritt aus
4	Magnet verkehrt herum aufgesetzt	Ungleichmäßiger Klebespalt, Risswachstum, Luftspaltfluss- dichte weicht von Auslegung ab, Außengeometrie weicht von Spe- zifikation ab (vgl. 3.1.3)
5	Klebespalt zu groß	Außendurchmesser weicht von Spezifikation ab, Luftspaltfluss- dichte weicht von Auslegung ab
6	Klebstoff ungleichmä- ßig verteilt	Haftkraft reicht nicht aus
7	Magnet verdreht	Axiale Winkelfehler bekommen Radialkomponente, benachbarte Magnete können nicht platziert werden
8	Zu viel Klebstoff	Klebstoff quillt heraus, Außen- durchmesser weicht von Spezifi- kation ab.

Tabelle 5: Kleben von Magneten – Fehlermöglichkeiten und -folgen

Neben Fehlern, die ein Zusammenfügen von Rotor und Stator verhindern, da der Außendurchmesser des Rotors größer als der Innendurchmesser des Stators ist, treten beim Kleben von Magneten auch Fehler auf, die die Leistung des Motors und dessen Laufeigenschaften beeinflussen oder die Lebensdauer einschränken. Dies betrifft vor allem die mechanische Spannung in der Klebeschicht, die bei Temperaturwechseln durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Magneten hervorgerufen wird. Die Platzierung der Magnete kann durch Trennstege zwischen den Polen vereinfacht werden. Um die Klebeschichtdicke sicherzustellen, sind entweder Klebetaschen im Magnetträger vorzusehen oder dem Klebstoff Glasperlen mit definiertem Durchmesser beizumischen. Die gleichmäßige Applikation des Klebstoffs kann durch automatisierte Applikation mit einem präzisen Dosiersystem sichergestellt werden.

3.1.3 Applikation von Magnetkörpern

Die Applikation von Magnetkörpern kann sowohl manuell als auch automatisiert erfolgen. Dies hat Einfluss auf die möglichen Fehler. So treten bei manueller Applikation andere Fehler auf als bei automatisierter Applikation. Darüber hinaus hat die Rotorgeometrie, die Magnetgeometrie sowie das Fixierungskonzept Einfluss auf die bei diesem Prozessschritt entstehenden Abweichungen.

Vor allem bei der manuellen Montage von bereits magnetisierten Magneten besteht die Gefahr von Polungsfehlern innerhalb eines Rotorpoles. Dieses Fehlerpotential kann durch Mitarbeiterschulung, Verwendung von einfachen Polprüfern und teilautomatisierte Magnetvereinzelung in Magazinen mit Polaritätsüberwachung reduziert werden. Bei der manuellen Montage ist die Polarität der Magnete ebenso durch die abstoßenden und anziehenden Kräfte des zu montierenden Magneten zu den bereits montierten Magneten festzustellen.

Magnete, deren Geometrie von der Quaderform abweicht, können zudem auch geometrisch verkehrt montiert werden. Insbesondere brotlaibförmige Magnete mit bezogen auf die Größe des Magneten relativ großem Oberflächenradius können mit dem Radius nach unten auf die Rotoroberfläche montiert werden, da dieser Radius nur schwer erkennbar ist. Diese Fehlermöglichkeit besteht ebenso bei der Beschickung von Magnetmagazinen von automatisierten Magnetapplikationsanlagen und ist ebenso unabhängig davon, ob magnetisierte oder unmagnetisierte Magnete appliziert werden. Zur Vermeidung dieses Fehlers kann eine Vorrichtung nach dem in Bild 16 skizzierten Prinzip eingesetzt werden, die ohne Magnetfeldsensor auskommt und in ein Magazin zur Magnetvereinzelung integriert werden kann. Dabei wird bei falscher Magazinbeschickung, sowohl hinsichtlich Magnetgeometrie als auch hinsichtlich Polarität, der entstehende Lichtspalt mit Hilfe einer Lichtquelle und eines lichtempfindlichen Halbleiters detektiert. Die Vereinzelung erfolgt nur, wenn das Magazin korrekt beschickt wurde.

Formschlüssige Verbindungen bei SPM-Magneten, wie das in Bild 9 dargestellte Konzept oder in den Magnetträger integrierte Trennstege und Magnete, die beide eine Schwalbenschwanzgeometrie für den Formschluss aufweisen, [94] vermeiden durch Poka-Yoke die Montage in der falschen geometrischen Lage. Jedoch werden durch diese Formelemente die Anforderungen an die Formtoleranzen von Blechpaket und Magneten erhöht. Damit verbunden sind höhere Materialkosten für diese Zukaufteile. Die Polarität muss dennoch gesondert geprüft werden



Bild 16: Lage- und Polaritätserkennung mittels Vorrichtung

3.2 Magnetisierung

Zur Magnetisierung von Seltenerdmagneten wird das Impulsmagnetisierverfahren eingesetzt. Das Magnetfeld wird mit Hilfe einer Axialspule oder einer komplexen Anordnung stromführender Leiter, die die Magnetisierung ganzer Magnetsysteme erlauben, erzeugt. Der dazu notwendige Stromimpuls wird über einen aufgeladenen Kondensator erzeugt. Die möglichen Prozessparameter sind Stromstärke und damit erzielbare Flussdichte, Pulsform sowie Pulslänge. Der Betrag der Flussdichte des entstehenden Magnetfeldes wird über die Höhe der Ladespannung des in das Magnetisiergerät eingebauten Kondensators eingestellt und ist variabel. Bei einigen Magnetisiergeräten ist auch die Pulsform variabel. Die Pulsdauer hingegen wird bestimmt durch die Induktivität von Magnetisiervorrichtung oder Magnetisierspule und die dazu in Reihe geschaltete Induktivität der Drosselspule und ist somit nicht variabel einstellbar. Die Pulsdauer hat einen erheblichen Einfluss auf die Eindringtiefe des Magnetfeldes in den zu magnetisierenden Permanentmagneten, sofern dieser aus elektrisch leitfähigem Material, wie beispielsweise gesintertes NdFeB oder SmCo besteht. Dies ist durch Wirbelströme im Material zu erklären, die durch das zeitlich veränderliche Magnetfeld des Magnetisierimpulses im Magneten induziert werden. Das äußere Magnetfeld wird durch das von den Wirbelströmen hervorgerufene magnetische Gegenfeld aus dem Inneren des Magneten verdrängt. Dieser Vorgang wird ebenso als Skin-Effekt bezeichnet. Die Eindringtiefe δ ist wie folgt zu beschreiben:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} = \sqrt{\frac{2 \rho}{\omega \mu}}$$
(1) [33]

Formel (1) zeigt die maßgebliche Abhängigkeit der Eindringtiefe δ des magnetisierenden Feldes von der Leitfähigkeit σ oder auch vom spezifischen Widerstand ρ und der magnetischen Permeabilität μ des zu magnetisierenden Materials sowie von der Zeitdauer des Impulses respektive von der Frequenz *f* beziehungsweise der Kreisfrequenz ω . [33]

Die Impulsdauer ist bei der Auslegung der Magnetisieranlage entsprechend dem zu magnetisierenden Magnetsystem anzupassen. Ferner ist die Leistung der Anlage auf die erforderliche Taktzeit und die benötigte Magnetisierungsenergie anzugleichen. Die Leistung der Anlage bestimmt die Ladezeit des Kondensators. Die Kühlung des Magnetisierwerkzeuges ist entsprechend zu dimensionieren. Um die Abwärme und die Taktzeit auf ein Minimum zu reduzieren, sind bei der Prozessauslegung auch Sättigungstests am realen Magnetsystem durchzuführen, um die exakte Ladespannung und die damit verbundene Energiemenge zur Magnetisierung zu ermitteln. Durch Sättigungstests wird ebenso die maximale Remanenzflussdichte sowie die höchstmögliche Koerzitivfeldstärke des Einzelmagneten sichergestellt.

Der Magnetisierungszeitpunkt hängt entscheidend sowohl von der Prozesskette als auch vom Design der elektrischen Maschine ab. So ermöglicht eine Magnetisierung des Gesamtrotors eine einfache Magnetmontage, verbietet aber eine 100% Prüfung der Einzelmagnete und lässt somit keine Kompensation der magnetischen Abweichungen insbesondere bei der Verwendung von anisotropen Magneten zu.

Die folgenden Kapitel beschreiben den Magnetisierprozess für Einzelmagnete und auch für komplette Rotorbaugruppen detailliert, wobei ebenso auf mögliche Prozessfehler sowie auf die Grenzen des Verfahrens eingegangen wird. Das Verfahren der In-Situ-Magnetisierung oder auch post-assembly magnetization [119, 120] wird hier nicht weiter betrachtet. Es bietet prozesstechnisch gesehen Vorteile, da Rotor und Stator im unmagnetisierten Zustand gefügt werden können, auf Grund der zusätzlich notwendigen Magnetisierwicklung im Stator, wird der bei Hochleistungsantrieben erforderliche effektive Kupferfüllfaktor dadurch jedoch erheblich eingeschränkt und es besteht die Gefahr der Beschädigung der Wicklungsisolation.

3.2.1 Sättigung von Permanentmagneten

Permanentmagnete werden durch die hohen Temperaturen während der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Fertigungsverfahren über ihre Curie-Temperatur hinaus erwärmt, wodurch die Magnetisierung verschwindet. Die erneute Aufmagnetisierung erfolgt mit Hilfe eines ausreichend starken Magnetfeldes. Dabei müssen die Magnete bis zu ihrer Sättigung aufmagnetisiert werden, um eine ausreichende Koerzitivfeldstärke zu erlangen. Die Sättigungsbedingung ist in DIN 60404-5 [6] angegeben wie folgt:

$$P_2 \le P_1 \cdot (H_2/H_1)^{0,02454} \tag{2}$$

und

$$H_2 \ge 1,2 H_1 \tag{3}$$

Dabei ist:

 P_2 der größte erreichbare Wert der Koerzitivfeldstärke H_{cB} in A/m

 P_1 der niedrigere Wert der Koerzitivfeldstärke H_{cB} in A/m

 H_2 die magnetische Feldstärke, von der aus P_2 erreicht wurde, in A/m

 H_1 die magnetische Feldstärke, von der aus P_1 erreicht wurde, in A/m

Diese Sättigungsbedingung zeigt die sehr kleine Abweichung der beiden Magnetisierungsfeldstärken H_1 und H_2 voneinander. In der Praxis ist diese Sättigungsprüfung so nicht immer durchführbar, da einerseits die Messung der magnetischen Feldstärke während der Magnetisierung eine Herausforderung darstellt und andererseits die Koerzitivfeldstärke nur mit Hilfe eines Hysteresemessgerätes bestimmt werden kann. Demnach geben Hersteller von Magnetisiergeräten oft eigene, praxisnahe Vorschläge zur Ermittlung der idealen Sättigungsfeldstärke an. Dabei wird vorgeschlagen, die Feldstärke während der Magnetisierung schrittweise so weit zu

erhöhen, bis das gemessene magnetische Moment nicht mehr signifikant ansteigt.

Die Messung des magnetischen Moments und der daraus abgeleiteten Permanenz birgt allerdings die Möglichkeit der Fehlinterpretation des Ergebnisses mit der Folge einer unzureichenden Koerzitivfeldstärke.

Der Vergleich der Abmagnetisierungskurven zweier identischer Magnetkörper derselben Charge des Typs Shin-Etsu N37MZ-G (vgl. Abschnitt 3.1.1 Magnettyp 3 sowie Abschnitt 2.2.2 zum Thema Grain-Boundary-Diffusion) zeigt die Auswirkung dieses Fehlers:



Abmagnetisierung ggü. Sättigung

Bild 17: Vergleich der Abmagnetisierungskurven unterschiedlich gesättigter Permanentmagnete (Messergebnisse [S10])

Vor der Bestimmung der Abmagnetisierungskurve wurden beide Magnete im Impulsmagnetisierverfahren (vgl. Abschnitt 3.2.2) aufmagnetisiert. Dabei erfolgte die Aufmagnetisierung eines Magneten bei einer Ladespannung von 500V und die des anderen bei einer Spannung von 700V. Die Abmagnetisierungskurve wurde in einem Hysteresegraphen bei 150 °C nach Norm [6] bestimmt. Die Werte für die remanente Polarisation J unterscheiden sich um 1,5 % (1,02 T zu 1,04 T). Der Verlauf der Kurve für die Ladespannung von 500 V zeigt eine steilere Abnahme der Polarisation über die Abmagnetisierungsfeldstärke im Vergleich zur Kurve für die Ladespannung von 700 V. Ebenso unterscheiden sich die Koerzitivfeldstärken H_{cJ} um 8 % (1265 kA/m zu 1376 kA/m) und H_{cB} um 14 % (620 kA/m zu 720 kA/m). Dies führt zu einer Abweichung der maximalen Energieprodukte $(BH)_{max}$ von 18 % (153 kJ/m³ zu 186 kJ/m³). [S10]

Durch die im Vergleich zum Nominalwert geringere Koerzitivfeldstärke liegt die Sicherheit gegen Entmagnetisieren niedriger als bei der Auslegung der Maschine errechnet. Beim Betrieb der elektrischen Maschine kann das Überschreiten der tatsächlichen Koerzitivfeldstärke des Magneten im Fehlerfall, z.B. im dreiphasigen Kurzschluss, zum unerwarteten Entmagnetisieren des Rotors und damit zum Stillstand des Motors führen.

3.2.2 Magnetisierung mit Hilfe von Axialspulen

Zur Magnetisierung einzelner Magnete in axialer Richtung, wie für die meisten Motoranwendungen üblich, werden zylindrische Luftspulen eingesetzt. In erster Linie richtet sich der Aufbau der Spule an die Taktzeitanforderungen. So werden Spulen für den Laborbetrieb ohne besondere Anforderungen an die Taktzeit aus massivem Runddraht gewickelt, mit Harz getränkt und im Betrieb mit Luft gekühlt. Typische Taktzeiten liegen hier bei 180 s. Steigen die Anforderungen werden luftgekühlte Spulen aus Blechen nach dem Prinzip der Bitterspule (vgl. Bild 18) aufgebaut, um gleichzeitig die Kühloberfläche und den Leiterquerschnitt zu vergrößern und damit auch den Widerstand zu senken. Bei hoher Magnetisierungsenergie und kurzen Taktzeiten werden flüssigkeitsgekühlte Rohrleiter verwendet. Die Systemkosten steigen in der Nennungsreihenfolge.



Bild 18: Aufbau einer Bitterspule mit Rechteckigem Querschnitt der Spulenöffnung -

Die Bitterspule ist aus einzelnen Spulenleiterlamellen aus Kupfer aufgebaut, die an einer Stelle geschlitzt sind. Die Spulenleiterlamellen sind durch Zwischenlamellen voneinander isoliert. An einer Stelle erfolgt die Durchkontalierung auf die nächste Lamelle.

Axialspulen mit einem realistischen Verhältnis von Durchmesser zu Länge weisen ein inhomogenes Magnetfeld im Inneren auf. Dies bewirkt eine Kraft auf den Magneten in Richtung der höchsten Flussdichte. Das ist bei der Entwicklung von Systemen zur automatisierten Zuführung der Magnete in die Magnetisierspule zu beachten. Je nach Position des zu magnetisierenden Magneten in der Spule, sind darüber hinaus bei der Suche nach passenden Prozessparametern durch eine Sättigungsprüfung ausreichende Reserven zu berücksichtigen. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, soll das Feld im Inneren einer luftgekühlten Spule mit rechteckigem Querschnitt analytisch beschrieben werden.

Beschrieben wird die für das Magnetisieren erforderliche Axialkomponente des Magnetfeldes im Inneren der Spule. Zur Lösung des Biot-Savart-Integrals [121] wird die Leiterschleife der Magnetisierspule in vier Teilstücke unterteilt. Abgebildet wird der zur Magnetisierung zur Verfügung stehende Innenbereich der Spule. Zur Erläuterung der verwendeten Größen dient die folgende Skizze.



Bild 19: Vektoren in einer rechteckigen Luftspule (nach [S14])

Der Ortsvektor für das grün markierte Teilstück 1 definiert sich wie folgt:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\overrightarrow{r_1} = \begin{pmatrix} a \\ u \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \text{mit } u = [-b; b] \tag{5}$$

$$d\vec{s_1} = \begin{pmatrix} 0\\ du\\ 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Die Flussdichte in einer Leiterschleife ist nach dem Gesetz von Biot und Savart wie folgt beschrieben:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{I \,\mu_0}{4 \,\pi} \oint_C \frac{d\vec{s} \times (\vec{r} - \vec{r_0})}{|\vec{r} - \vec{r_0}|^3} \tag{7}$$

Die Quotienten des Integrals werden bezogen auf die Skizze in Bild 19 wie folgt definiert:

$$d\vec{s} \times (\vec{r} - \vec{r_1}) = \begin{pmatrix} z \, du \\ 0 \\ -(x - a) \, du \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \, du \\ 0 \\ (a - x) \, du \end{pmatrix}$$
(8)
$$|\vec{r} - \vec{r_1}| = ((x - a)^2 + (y - u)^2 + z^2)^{0.5}$$
(9)

Eingesetzt in das Integral (7) ergibt sich für das grün markierte Teilstück:

$$\int_{-b}^{b} \frac{\begin{pmatrix} z \, du \\ 0 \\ (a-x) \, du \end{pmatrix}}{((x-a)^2 + (y-u)^2 + z^2)^{1,5}} = \\ = \left[\frac{\begin{pmatrix} z \\ 0 \\ (a-x) \end{pmatrix} (u-y)}{((x-a)^2 + z^2) ((x-a)^2 + (y-u)^2 + z^2)^{0,5}} \right]_{-b}^{b} = \\ = \frac{\begin{pmatrix} z \\ 0 \\ (a-x) \end{pmatrix} (b-y)}{((x-a)^2 + z^2) ((x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2)^{0,5}} + \\ + \frac{\begin{pmatrix} z \\ 0 \\ (a-x) \end{pmatrix} (b+y)}{((x-a)^2 + z^2) ((x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2)^{0,5}} + \\ \end{array}$$
Da sich das Magnetfeld innerhalb der Spule maßgeblich axial ausbreitet, wird zur Vereinfachung lediglich die \vec{B}_z -Komponente herangezogen. Ferner wird entlang der z-Achse der Spule integriert, um alle Windungen zu erfassen. Es wird somit wie folgt vereinfacht:

$$\int_{z'-l}^{z'} \vec{B}(\vec{r}) dz \approx \int_{z'-l}^{z'} \vec{B}_{z} dz$$
(11)

Für ein Teilstück ergibt sich dann über alle Windungen:

$$\vec{B}_{z} = \frac{l n \mu_{0}}{l 4 \pi} \vec{e}_{z} \left[\tan^{-1} \left(\frac{|y-b| z}{|x-a| ((x-a)^{2} + (y-b)^{2} + z^{2})^{0,5}} \right)^{(12)} + \tan^{-1} \left(\frac{(y+b) z}{|x-a| ((x-a)^{2} + (y+b)^{2} + z^{2})^{0,5}} \right) \right]_{z'-l}^{z'}$$

Formel (12) muss durch Einsetzen der jeweiligen Werte für r derart erweitert werden, dass die Feldkomponenten für jedes der vier Teilstücke addiert werden. Zur einfachen Berechnung verschiedener Rechteckspulen wurde ein Excel-Tool entwickelt [S14], welches die Flussdichte an vielen Orten in einer Spule nach oben genanntem Zusammenhang ermitteln kann. Dazu wird, wie in Bild 20 illustriert, diskretisiert.



Bild 20: Diskretisierung der Rechteckspule (nach [S14])

Als Beispiel wird die Flussdichteverteilung in einer Spule mit rechteckigem Querschnitt in Bitterbauweise mit der zuvor beschriebenen Methodik berechnet und visualisiert.



Bild 21: Errechneter Verlauf der Flussdichteverteilung in axialer Richtung (nach [S14])

Bild 20 zeigt ebenso den Verlauf der Flussdichte in der zentralen Ebene der Magnetisierspule in einem Viertel des Querschnitts. Bild 21 zeigt den Verlauf entlang der zentralen Spulenachse. In der Ebene beträgt die Flussdichte im Zentrum lediglich 85 % der Flussdichte in den Ecken. Dementsprechend zeigen Versuche ein entsprechendes Sättigungsverhalten von Permanentmagneten bei örtlicher Veränderung des Magnetkörpers innerhalb der Spule.



Bild 22: Stromstärke zur Sättigung in Abhängigkeit von der Position des Magneten in der Spule (nach [S14])

Der in den Untersuchungen herangezogene Prozessparameter ist in den Beispielen der Spulenstrom. Das verwendete Material entspricht der Spezifikation N37 MZ-G, ein temperaturbeständiges NdFeB Material hoher Koerzitivfeldstärke. Bild 22 zeigt die zur Sättigung des Magneten notwendige Stromstärke in Abhängigkeit der Position auf der Spulenebene. In der Ecke ist in diesem Beispiel die Sättigungsstromstärke um 343 A bzw. 12 % geringer als im Zentrum.

In der Praxis wurden Prozesse beobachtet, die zur Steigerung der Ausbringung und zur Vereinfachung der Handhabung Magnete zunächst stapeln, dann gegebenenfalls verpacken und die Magnete in gestapeltem Zustand zusammen magnetisieren. Bei einer Stapelung von Magneten wirken sich weitere Faktoren auf den Magnetisiervorgang aus. Zunächst spiegeln die Versuchsergebnisse die inhomogene Feldverteilung entlang der Spulenachse wider. Zusätzlich wird bei der Stapelung der Permanentmagnete das Entmagnetisierungsverhalten und damit die Neukurve der Magnete geändert, was eine frühere Sättigung der im Zentrum des Stapels befindlichen Magnete zur Folge hat. Dies ist auf den geometrieabhängigen Entmagnetisierungsfaktor N zurückzuführen [19]. Die Selbstentmagnetisierung im offenen magnetischen Kreis nimmt mit zunehmendem Verhältnis von Länge zu Durchmesser (p=l/d) zu und kann für Ellipsoide wie folgt beschrieben werden:

$$N_{z} = \frac{1}{p^{2} - 1} \cdot \left(\frac{p}{\sqrt{p^{2} - 1}} \cdot \ln\left(p + \sqrt{p^{2} - 1} - 1\right)\right) mit \ p > 1$$
(13)[19, 122]

Geometrie	Parameter	Werte
Würfel	Kantenlänge $l = l_a = l_b \ [mm]$	5; 10
Quader (all- gemein)	Magnetlänge <i>l</i> [<i>mm</i>]	5; 15
	Kantenlänge Grundfläche <i>l</i> _a [<i>mm</i>]	10; 20
	Kantenlänge Grundfläche <i>l_b</i> [<i>mm</i>]	25; 30
Quader (Grundfläche quadratisch)	Magnetlänge <i>l</i> [<i>mm</i>]	5; 12,5; 20
	Kantenlänge Grundfläche $l_a = l_b \ [mm]$	10; 15
Zylinder	Magnetlänge <i>l</i> [<i>mm</i>]	3; 10
	Magnetdurchmesser d [mm]	10

Tabelle 6: Verwendete Entmagnetisierungsfaktoren

Für nichtellipsoide Geometrien ist die Magnetisierung M nicht mehr homogen und für N_z können somit nur noch Durchschnittswerte angenommen werden. Für Beispielgeometrien, die in einigen Versuchen verwendet wurden, wurden die Entmagnetisierungsfaktoren durch experimentelle Bestimmung der Neukurve und anschließende numerische Berechnung mit Hilfe einer FEM-Simulation, in der die zuvor beschriebene Rechteckspule abgebildet wurde, bestimmt. Die Entmagnetisierungsfaktoren wurden für die Beispielgeometrien aus Tabelle 6 bestimmt, wobei die Parameter der Geometrien, also die Kantenlängen bzw. Durchmesser, wie angegeben variiert wurden.

Als Kontrollwert dient der Würfel, da sich bei Parametervariation der Entmagnetisierungsfaktor nicht ändern sollte. Allgemein ist festzustellen, dass der Entmagnetisierungsfaktor für $l/d \rightarrow \infty$ gegen Null konvergiert. Bild 23 enthält die für die beschriebenen Beispiele ermittelten Faktoren als Datenpunkte, und zeigt eine Annäherung für die geometriekompensierten l/d – Verhältnisse an die theoretisch ermittelte Kurve mit sehr geringen Abweichungen, was den Zusammenhang bestätigt.



Bild 23: Abhängigkeit des Entmagnetisierungsfaktors vom Verhältnis l/d (nach [S14])

Da sich bei der Magnetisierung von Stapeln das l/d –Verhältnis entsprechend der Stapelhöhe vergrößert, wird die Neukurve hinsichtlich der Magnetisierbarkeit positiv beeinflusst. Die in der nachfolgenden Bild dargestellten Zusammenhänge zeigen eine Abnahme der Polarisation für die an den Enden des Stapels befindlichen Magnete. Dies wird einerseits durch die erwähnte inhomogene Verteilung des Entmagnetisierungsfaktors und andererseits in der in Bild 24 gezeigten Abnahme der Flussdichte hin zu den Spulenenden begründet. Bemerkenswert ist die inhomogene Magnetisierung des Stapels, wobei der zentrale Magnet deutlich früher die Sättigung erreicht.



Bild 24: Remanenzflussdichte in Abhängigkeit von der Position im Magnetstapel (nach [S14])

Dieser positive Effekt ist durch Substitution der umliegenden Magnete durch flussführendes Material mit hoher Sättigungspolarisation weiter auszunutzen. Wird der Entmagnetisierungsfaktor eines einzelnen Magneten durch ebensolches Material an seinen Stirnseiten reduziert, ist ebenso eine erheblich frühere Sättigung zu beobachten, was die Versuchsergebnisse in Bild 25 zeigen. [P17, P26]



Bild 25: Auswirkungen verschiedener Magnetisierungsstrategien auf die Sättigung (nach [S1])

3.2.3 Magnetisierung mit Magnetisiervorrichtungen

Bei der Magnetisierung von Rotoren treten einerseits die in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Effekte in Erscheinung und andererseits werden im Fall der Vollpolmagnetisierung zusätzlich Anforderungen an die Präzision der Magnetisiervorrichtung sowie den Luftspalt zwischen Magnetisiervorrichtung und Rotoroberfläche gestellt.

Vollpolmagnetisierung bezeichnet die Magnetisierung von Ringmagneten oder die Magnetisierung von Rotoren aus Einzelmagneten über die geometrischen Magnetgrenzen hinweg, wie in Bild 26 dargestellt.

Der Einfluss einer inhomogenen Magnetisierung wurde bereits umfassend untersucht [123, 54, 112, 113]. Ebenso wurden erhebliche Auswirkungen auf die Laufeigenschaften und insbesondere auf das Rastmoment der jeweiligen Maschine bei ungenauer Positionierung des Rotors in der Magnetisiervorrichtung sowie bei mangelnder Präzision der Vorrichtung dargestellt [101]. Die Sättigung der Magnete hängt bei diesem Verfahren entscheidend von der Rotorgeometrie ab. Generell ist die Sättigung des Rotoreisens während des Magnetisiervorgangs zu berücksichtigen. IPM Rotoren in Speichenanordnung sind auf Grund der großen Entfernung der inneren Magnetbereiche von der Magnetisiervorrichtung in den meisten Fällen nicht vollständig magnetisierbar. Ebenso werden bei kleinen Polabständen und kleinen Rotordurchmessern hohe Anforderungen an die Magnetisiervorrichtung gestellt. Die Stromdichte in den Leitern der Vorrichtung sowie die Erwärmung stellen hier die physikalische Grenze dar, wie Bild 27 zeigt.



Bild 26: Vollpolmagnetisierung eines mit Einzelmagneten bestückten Rotors (nach [S19])

Für den in diesem Beispiel verwendeten Magnettyp wurde die Sättigungsfeldstärke durch Messung der Koerzitivfeldstärke zu 1.800 kA/m bestimmt.



Bild 27: Sättigung einer SPM Rotorbaugruppe

Das Bild 27 zeigt ungesättigte Randbereiche des Magneten. Um eine Aussage über die Entmagnetisierfestigkeit des Rotors treffen zu können, sind im praktischen Versuch entweder die Magnete von der Rotoroberfläche zu entfernen, um dann die Abmagnetisierungskurve aufzuzeichnen oder Überlasttests mit der Maschine durchzuführen.

3.3 Prüfung von Materialien und Rotorbaugruppen sowie zugehörige Messmethoden

Die Bestimmung der magnetischen Kennwerte durch Aufnahme der Abmagnetisierungskurve wird umfassend in der DIN EN 60404-5 [6] behandelt. Das Verfahren eignet sich nicht zur Stückprüfung, da die Magnete zunächst bis zur Sättigung aufmagnetisiert werden müssen und nach der Aufzeichnung der Abmagnetisierungskurve durch Messung in einem entmagnetisierendem Magnetfeld einen undefinierten Magnetisierungszustand aufweisen. Da der Schwerpunkt der folgenden Abschnitte auf Inlinefähigen Prüfverfahren liegt, wird die Ermittlung der Koerzitivfeldstärke hier nicht näher behandelt. Diese Inline-Prüfverfahren sind derzeit nicht normativ, eignen sich aber zur Beurteilung der bei der Fertigung entstehenden Abweichungen und zur Abschätzung der Auswirkungen auf das Laufverhalten permanenterregter Maschinen. Demnach werden verschiedene, für die Stückprüfung geeignete Messverfahren und deren Einschränkungen beschrieben. Ebenso wird auf die Eignung zur selektiven Magnetmontage eingegangen.



Bild 28: Methoden zur Messung von Magnetfeldern

Zu unterscheiden ist generell die Nahfeldmessung von der Fernfeldmessung [124]. Während bei der Nahfeldmessung die lokale Flussdichte oder die lokale magnetische Induktion in einem Messvolumen von einem Kubikmillimeter oder weniger in unmittelbarer Nähe des Objektes gemessen wird, bezieht sich die Fernfeldmessung auf das Gesamtmagnetfeld eines einzelnen Magneten oder in bestimmten Fällen eines Magnetsystems. [125]

Bild 28 zeigt einen Überblick über mögliche Messmethoden zur Bestimmung magnetischer Größen von Einzelmagneten und Magnetsystemen. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

3.3.1 Nahfeldmessung

Die Nahfeldmessung dient der Beurteilung der Homogenität des Magnetfeldes. Die Norm zur Vermessung von Magneten DIN EN 60404-5 [6] enthält diesbezüglich keine Informationen, sondern beschränkt sich lediglich auf die Prüfung des Gesamtmagnetfeldes der Probe. Da in gängigen FEM-Tools zur Simulation elektrischer Maschinen die einzelnen Magnetkörper in der Regel als ein Körper mit homogenem Magnetfeld abgebildet werden, können die Messergebnisse bis dato noch nicht direkt genutzt werden. Jedoch weist die Flussdichteverteilung über der Magnetoberfläche zu den Randbereichen, also hin zu den Pollücken, höhere Werte auf (vgl. Bild 31), was bei SPM zu Oberwellen sowohl im Magnetfeld, als auch in der gemessenen EMK der Gesamtmaschine führt [80–82].

Dennoch bietet der Markt eine Auswahl an Lösungen zur räumlich aufgelösten Darstellung der Flussdichteverteilung. Die notwendige Sensorik muss einerseits den auf der Oberfläche des Messobjektes auftretenden Flussdichtebereich von ca. -800 bis +800 mT mit einer ausreichenden Auflösung und Genauigkeit abdecken und andererseits eine rasche Messwerterfassung ermöglichen.

Die in [6] erwähnten NMR-Sensoren zur Kalibrierung von Hall-Effekt Sensor basierten Teslametern bieten auf Grund der Funktionsweise eine sehr hohe Messgenauigkeit im nT Bereich. Eine NMR-Sonde besteht aus einer Spule, die eine volumetrisch bestimmte Messprobe eines Materials, welches reich an Wasserstoffkernen ist, umgibt. Zur Durchführung einer Messung wird die Sonde im zu vermessenden Magnetfeld platziert und die Messprobe durch ein hochfrequentes Signal, dessen Frequenz stetig gesteigert wird, angeregt. Der Resonanzfall tritt ein, sobald die dem äußeren Magnetfeld und dem gyromagnetischen Verhältnis des Probenmaterials entsprechende Frequenz erreicht ist. Wird Wasser als Probenmaterial gewählt, so entspricht die Resonanzfrequenz für die äußere Flussdichte von 1 T beispielsweise 42.5 MHz. Da dieser Resonanzbereich extrem schmal ist, wird eine Messgenauigkeit von 10 nT [126] erreicht. Der Zusammenhang zwischen Flussdichte *B* am Ort *r*, gyromagnetischem Verhältnis γ (materialabhängig) und Kreisfrequenz ω_d stellt sich wie folgt dar:

$$\gamma \int_0^t |B(r,\tau)| d\tau = \phi(t) + \omega_d t \tag{14}$$

Durch die Notwendigkeit einen Frequenzscan durchzuführen, wird die Messung verlangsamt. Eine Messung dauert mehrere Sekunden, wobei das Magnetfeld stabil bleiben muss, was den Einsatz für eine schnelle Aufzeichnung einer heterogenen Flussdichteverteilung unwirtschaftlich macht. [126][127]

Hohe Messgeschwindigkeiten werden aktuell von Hall-Effekt-Sensoren erzielt. Die Messung mit einem Hall-Effekt-Sensor erfordert entweder eine Konstantstromquelle oder eine Spannungsquelle und eine Möglichkeit, um die Hallspannung zu erfassen, beispielsweise einen A/D-Wandler. Die notwendigen Bauteile sind kostengünstig erhältlich.



Bild 29: Schematische Darstellung des möglichen Aufbaus eines integrierten Hall-Effekt-Sensors (nach [128])

Der Markt bietet eine Vielzahl an Sensoren, von reinen Analogsensoren mit einer Messachse (z.B. [129]) bis hin zu integrierten Sensoren mit digitaler Messwertausgabe, Bus-Kompatibilität, eingebauter Temperatursensorik und der Möglichkeit, alle drei Raumachsen gleichzeitig zu vermessen [130] [128]. Letztere sind in Form von USB-Teslametern [131], Sensorköpfen für Magnetfeldmapper oder Arrays erhältlich. Der mögliche Aufbau der Implementierung eines solchen integrierten Sensor ist in Bild 29 dargestellt.

Darüber hinaus ist ebenso eine hochauflösende Arraylösung erhältlich. Diese unter der Handelsbezeichnung MagCam vertriebene Lösung besteht im Gegensatz zu den erwähnten integrierten Lösungen aus einem monolithischen Mikrochip (vgl. Bild 30) mit 128 x 128 Hall-EffektSensorelementen mit einem Abstand von 100 µm zueinander. Die aktive Fläche jedes einzelnen Hall-Elements beträgt 40 x 40 µm. Der Abstand der Sensorfläche zur Gehäuseoberfläche beträgt laut mündlicher Auskunft des Herstellers 300 µm. [132]

***** ************* Silizium-Wafer *********** ************ ************ Hall-Effekt-Pixelzelle او دانه دانه دانه دانه دانه دانه دانه د ***** ****

Bild 30: Schematischer Aufbau eines monolithischen Hall-Effekt-Sensor-Arrays (nach [132])

Die MagCam ermöglicht die Beurteilung der Homogenität der Flussdichteverteilung auf der Magnetoberfläche. So ist es zum Beispiel möglich, den Einfluss der Segmentierung von Magneten mit Hilfe von FEM Simulationen zu untersuchen, sofern ein geeignetes und realitätsnahes Modell zur Abbildung der Magneten genutzt wird. Die Flussdichteverteilung eines Magneten mit 4 Segmenten wird anhand des folgenden Messergebnisses verdeutlicht.



riert mit MagScope Software)

Die grafische Darstellung der z-Komponente der Flussdichteverteilung B in T hilft der visuellen Beurteilung. Die proprietäre Software MagScope des Unternehmens MagCam ermöglicht darüber hinaus diverse Auswertemethoden. Die nachfolgende Tabelle, die automatisiert erzeugt wurde, zeigt beispielsweise die Verteilung lokaler Extremstellen der Flussdichte am jeweiligen Messort.

Start	-13	mm	Stop	33,5	mm			
#	10							
М	-12,7	mm	В	-0,0129	Т	ΔΥ	10,7	mm
m	-2	mm	В	-0,0719	Т	ΔY	4,2	mm
Μ	2,2	mm	В	0,2848	Т	ΔY	3	mm
m	5,2	mm	В	0,2358	Т	ΔY	1,3	mm
М	6,5	mm	В	0,2596	Т	ΔΥ	3,7	mm
m	10,2	mm	В	0,2108	Т	ΔY	3,6	mm
Μ	13,8	mm	В	0,2569	Т	ΔY	1,5	mm
m	15,3	mm	В	0,2315	Т	ΔΥ	3,2	mm
Μ	18,5	mm	В	0,29	Т	ΔΥ	4,1	mm
m	22,6	mm	В	-0,0654	Т			
	Start # M M M M M M M M M M M	Start -13 # 10 M -12,7 m -2 M 2,2 m 5,2 M 6,5 m 10,2 M 13,8 m 15,3 M 18,5 m 22,6	Start -13 mm # 10 M -12,7 mm m -2 mm M 2,2 mm M 5,2 mm M 6,5 mm M 10,2 mm M 13,8 mm M 15,3 mm M 18,5 mm	Start -13 mm Stop # 10	Start -13 mm Stop 33,5 # 10	Start -13 mm Stop 33,5 mm # 10	Start-13mmStop33,5mm#10 $-12,7$ mmB $-0,0129$ T ΔY M-12,7mmB $-0,0719$ T ΔY m-2mmB $-0,0719$ T ΔY M2,2mmB $0,2848$ T ΔY m5,2mmB $0,2358$ T ΔY M6,5mmB $0,2596$ T ΔY m10,2mmB $0,2108$ T ΔY M13,8mmB $0,2315$ T ΔY M15,3mmB $0,2315$ T ΔY M18,5mmB $0,29$ T ΔY m22,6mmB $-0,0654$ T ΔY	Start-13mmStop33,5mm#10

Tabelle 7: Rohdaten einer MagScope-Analyse eines segmentierten Permanentmagneten zu Bild 31

Die in Tabelle 7 dargestellten Rohdaten können als Datenquelle für weiterführende Analysen verwendet werden. Im dargestellten Beispiel wird im Kopf der Tabelle zunächst die Start- und Endposition des Scans angegeben. Die MagScope-Analyse wurde hinsichtlich der Erkennung von Extrema durchgeführt. M steht hierbei für ein lokales Maximum und m für ein lokales Minimum. Von links nach rechts beinhalten die Spalten die Klassifizierung nach Minimum und Maximum, die Lage der Extremstelle in einer Raumrichtung, die gemessene Flussdichte in T sowie die Entfernung der jeweiligen Extremstelle zur nächsten.

3.3.2 Fernfeldmessung

Die Fernfeldmessung wird laut DIN EN 60404-5 [6] mit Hilfe eines Spulenpaares und eines Fluxmeters durchgeführt. Durch Integration der induzierten Spannung am Spulenpaar kann das magnetische Dipolmoment des Probenkörpers entlang der Achse des Spulenpaares wie folgt bestimmt werden (vgl. Bild 32).

Ein Magnet mit dem zunächst unbekannten magnetischen Moment *m* und dem Volumen *V* ruft beim Einlegen in die Helmholtzspule mit der Spulenkonstante *k* und der Windungszahl *N* die magnetische Flussänderung $\frac{d\Phi}{dt}$ hervor und induziert somit die Spannung U_{ind} die an den Spulenenden gemessen werden kann. Kommt der Magnet auf dem Probenhalter im Zentrum der Spule zu liegen, ändert sich auch der magnetische Fluss Φ nicht mehr, wodurch die induzierte Spannung U_{ind} Null wird. Dies erklärt die Notwendigkeit der zeitlichen Integration der induzierten Spannung, um Φ zu erhalten. Wird der magnetische Fluss mit der Spulenkonstante k multipliziert, kann das magnetische Moment m errechnet werden. Die Polarisation J kann durch Teilen des magnetischen Momentes durch das Volumen V errechnet werden und dient der Vergleichbarkeit der Messwerte.

Magnet	Fluxmeter	Helmholtzspule
• Magn. Moment $m = \Phi \cdot k[V \text{ s cm}]$	 Integration der Induktionsspannung 	 Messung der Induktionsspannung
• Polarisation $J = \frac{m}{V} [T]$	$Vereinfacht: \\ \int U_{ind} dt = -N \cdot \Phi$	$Vereinfacht: U_{ind} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$
V: Volumen des Magneten [cm ³]		

Bild 32: Bestimmung des magnetischen Moments mit der Helmholtzspule

Zur Bestimmung der Raumrichtung des Dipolmomentes ist die Messung in allen drei Raumachsen des Probenkörpers durchzuführen. Dies ist lediglich bei quaderförmigen Magneten möglich, sofern das Spulenpaar über eine präzise Vorrichtung zur Platzierung des Magneten verfügt. Die Untersuchung von Helmholtzspulen hinsichtlich Messfehlern ergab als Haupteinfluss unebene Probenhalter [S₃].

Ebenso zeigte die Inaugenscheinnahme von Geräten verschiedener Hersteller auf Messen bereits offensichtliche Winkelfehler in den Probenhaltern sowie eine schlechte Oberflächenqualität. Dies führt zu Messfehlern insbesondere bei den kleinen Messwerten quer zur Vorzugsrichtung des Magneten.

Elektromagnetische Felder rufen ebenso Messfehler hervor. Fluxmeter sind in der Regel mit einer Funktion zur Driftkompensation ausgestattet, die konstante Störfaktoren, wie beispielsweise Thermospannungen, am Signaleingang eliminiert [133]. Dazu wird eine temperaturkompensierte Spannungsquelle mit automatischer Regelung eingesetzt. Nicht konstante Störungen durch elektromagnetische Felder können so jedoch nicht kompensiert werden.



Bild 33: Abschirmung der Helmholtzspule und Einbringung von Störsignalen (nach [S8])

Um die Einflüsse zu verdeutlichen wurden Versuchsreihen unter Normalbedigungen, mit ferromagnetischen Abschirmblechen aus Hyperm 766, einer Legierung aus 24 % Eisen und 76 % Nickel und mit einer Störquelle in Form eines Schaltnetzteils mit 100 W Leistung, die in unmittelbare Nähe der Helmholtzspule gebracht wurde (vgl. Bild 33).

Die Messreihe unter Normalbedingung wurde jeweils in weitgehend störungsfreier Umgebung durchgeführt. Die Probe für die Untersuchung der einachsigen Messung ist ein kalibriertes Momentetalon mit einem spezifizierten magnetischen Moment von 0,7667 µVsm der Herstellers Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH. Es wurden jeweils 30 Messungen durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsreihe in Bild 34 zeigt zunächst einen deutlich höheren Mittelwert sobald ferromagnetisches Material in die Nähe der Helmholtzspule gebracht wird. Durch die Abschirmung der Spule wird deren Induktivität geändert und das zu messende Magnetfeld verzerrt. Dies gilt für alle ferromagnetischen Materialien im Umfeld der Helmholtzspule. Wider Erwarten weist diese Messreihe auch eine um 33 % höhere Standardabweichung auf. Die Standardabweichung vervierfacht sich, sobald Störsignale vorhanden sind. Die Mittelwertabweichung beträgt jedoch lediglich 0,25 %. Die größere Streuung der Messwerte ist mit der Messwertdrift auf Grund der elektromagnetischen Störstrahlung zu erklären. Die Messwertdrift kann ebenfalls beobachtet werden, wenn in größerer Entfernung zur Spule unzureichend geschirmte Stromversorgungen oder Frequenzumrichter in der Umgebung von Helmholtzspulen betrieben werden.



Statistik	Normalbedingung	Abgeschirmt	mit Störquelle
Mittelwert in µVsm	0,7664	0,7844	0,7686
Mittelwert Fehler	-0,04%	2,31%	0,25%
Standardabweichung in µVsm	6,05E-04	8,03E-04	2,66E-03
Rel. Standardabweichung	100%	133%	441%

Bild 34: Auswirkung von Fehlereinflüssen auf die einachsige Messung des magnetischen Moments mit Helmholtzspule und Fluxmeter (Ergebnisse aus [S8])

Der Winkel des magnetischen Momentenvektors wird mit einer einachsigen Helmholtzspule durch die einzelne Messung jeder Raumachse des Magneten trigonometrisch ermittelt. Dabei spielen sowohl die Genauigkeit des Probenhalters als auch der übrigen mechanischen Teile des Helmholtzspulenpaares eine entscheidende Rolle. Als Probe wurde in der Versuchsreihe ein guaderförmiger Magnet verwendet, dessen Winkelabweichung mit dem System m-axis in einer dreiachsigen Messung ermittelt wurde, da das Momentetalon eine für diese Art der Messung ungeeignete zylindrische Geometrie aufweist. Die Ergebnisse in Bild 35 zeigen keinen Einfluss der Schirmung auf den Mittelwert, da diese einen Systematischen Fehler erzeugt, der sich auf alle drei Raumachsen gleich auswirkt. Die Messreihe mit eingebrachter Störeinstrahlung weist einen um 2 % größeren Fehler beim Mittelwert auf als bei den Messreihen ohne Störeinstrahlung und eine doppelt so große Standardabweichung wie bei der Messung unter Normalbedingungen. Ein offensichtlicher systematischer Fehler kann bei keiner Messreihe identifiziert werden.



Statistik	Normalbedingung	Abgeschirmt	mit Störquelle
Mittelwert in °	1,61	1,62	1,58
Mittelwert Fehler	o,oo % (Referenz)	0,44 %	-2,08 %
Standardabweichung in °	0,13	0,20	0,26
Rel. Standardabweichung	100%	146%	197%
Bild 35: Auswirkung von Fe	hlereinflüssen auf die Ei	rmittlung des Wi	nkels des magneti-

Bild 35: Auswirkung von Fehlereinflüssen auf die Ermittlung des Winkels des magnetischen Momentenvektors mit Helmholtzspule und Fluxmeter (Ergebnisse aus [S8])

Folglich ist bei der Durchführung einer Messung mit Fluxmeter und Helmholtzspule ein Ort mit geringer Belastung durch elektromagnetische Felder sowie mit möglichst konstanter Temperatur zu wählen. Dies schließt eine Verwendung innerhalb einer Anlage aus und beschränkt die Nutzung des Messverfahrens auf das Labor. Der Markt bietet Lösungen zur direkten Messung aller drei Achsen durch Verwendung von drei Helmholtzspulen – eine für jede Raumrichtung – in einer Messanordnung an. Die Größe der Helmholtzspule ist entsprechend des magnetischen Moments der zu vermessenden Probe in einem gewissen Raster zu wählen.

Nicht normative Alternativen zum beschriebenen Verfahren stellen die kommerziell erhältlichen Systeme MagCam [132] sowie m-axis [P14] dar. Vergleichsmessungen weisen eine geringere Streuung der Messergebnisse auf.

Die MagCam führt eine Nahfeldmessung (siehe unten) durch. Das Softwaremodul MagFit approximiert das Fernfeld des Gesamtmagneten mit Hilfe eines theoretischen Magnetmodells. Als Ergebnis wird sowohl die Polarisation des Magneten als auch der Raumwinkel des magnetischen Dipolmomentenvektors ausgegeben. Magnetkörper von maximal 13 x 13 mm können direkt vermessen werden, größere Magnetkörper müssen mit Hilfe einer geeigneten Vorrichtung abgerastert werden. [132] [134]

Um die Messung an das in [6] beschriebene Vorgehen anzunähern, muss das Hall-Effekt-Sensorarray der MagCam in einem homogenen Magnetfeld bei verschiedenen Flussdichten kalibriert werden. Zur Überprüfung der Homogenität des für die Kalibrierung erzeugten Magnetfeldes werden NMR-Sonden [126, 127] empfohlen. Durch die in der MagCam integrierte Elektronik können Feldverzerrungen auftreten, die an der Sensorfläche zum Kalibrierzeitpunkt nicht kontrolliert werden können. Der interne Aufbau der MagCam ist nicht veröffentlicht, folglich können keine Aussagen über mögliche Feldverzerrungen getroffen werden.



Bild 36: Schematische Darstellung des Messverfahrens des Systems m-axis (nach [P14])

Das System m-axis führt eine Fernfeldmessung mit Hilfe eines AMR-Sensor-Arrays durch. Das Array besteht aus 18 Sensorelementen mit einem Messbereich von 20 nT bis 400 μ T. Dieser Messbereich verspricht einerseits eine hohe potenzielle Messgenauigkeit durch die hohe Empfindlichkeit der Sensoren, andererseits beträgt die lokale Flussdichte auf einem Permanentmagneten bis zu 500 mT. Unter der Annahme, dass ein Magnetkörper in ausreichendem Messabstand als Dipol approximiert werden kann, wird mit Hilfe folgender Gleichung (15), die aus den Maxwell'schen Gleichungen hergeleitet wird, sowohl die Lage als auch das magnetische Moment des approximierten Dipols bestimmt [135]:

$$B(\vec{j},\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(\vec{j}\cdot\vec{r})\cdot\vec{r} - |\vec{j}|\cdot|\vec{r}|^2}{|\vec{r}|^5}$$
(15)

Dabei entspricht $B(j, \vec{r})$ dem Vektor der gemessenen magnetischen Flussdichte, zusammengesetzt aus dem Ortsvektor des Dipols \vec{r} vom jeweiligen Sensor aus gesehen und dem Vektor des magnetischen Dipolmoments j. Der Ortsvektor \vec{r} ist durch den technisch festgelegten Messabstand zwischen Sensor-Array und Magnetkörper in drei Freiheitsgraden anzunähern. Die beiden Vektoren werden durch Bild 36 veranschaulicht. Die Orientierung des approximierten Dipols im Raum ist aus den drei verbliebenen Freiheitsgraden von \vec{j} mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus so zu bestimmen, dass das Ergebnis der gemessenen Feldstärke der einzelnen Sensoren nach Gleichung (15) am besten entspricht. Zum Lösen des Problems ist für jeden Freiheitsgrad ein Sensor erforderlich. In diesem Fall beträgt die Minimalzahl an Sensoren also 6. Die Qualitätsfunktion Q stellt einerseits das Optimierungskriterium dar, andererseits ermöglicht Q die Abschätzung des Messfehlers. Da 12 Sensorwerte mehr ausgewertet werden als erforderlich, ist darüber hinaus eine Kompensation von Störfeldern bis zu einem gewissen Maß sowie die Beurteilung der Messgenauigkeit möglich.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \left[B(\vec{j}, \vec{r})_{i_{gemessen}} - B(\vec{j}, \vec{r})_{i_{approximiert}} \right]^2$$
(16)

Die Qualitätsfunktion bildet die Summe der Fehlerquadrate, indem jeweils der gemessene Flussdichtewert am jeweiligen Sensor mit dem Ergebnis des Optimierungsalgorithmus verglichen wird. Die Optimierung ist beendet, sobald Q ein Minimum erreicht hat. Der Minimalwert spiegelt gleichzeitig den Messfehler wider. [136][P14]

Die beschriebenen Eigenschaften ermöglichen einerseits den Einsatz im Fertigungsumfeld und andererseits eine Selbstdiagnose des Systems. Dies erlaubt eine intelligente Bedienerunterweisung durch die Messsoftware. Der Messabstand muss entsprechend dem magnetischen Moment der zu vermessenden Magnete in einem gewissen Raster gewählt werden.

3.3.3 Analyse kompletter Rotorbaugruppen

Die Nahfeldmessung erlaubt neben der Beurteilung der Homogenität des Magnetfeldes von Einzelmagneten auch die Analyse von kompletten Magnetsystemen wie beispielsweise Rotorbaugruppen oder Magnetarrays für Linearmotoren [137]. Durch die gewonnenen Informationen können Fertigungsfehler in der Prozesskette detektiert werden und vor dem Zusammenfügen von Rotor und Stator Aussagen über die Laufeigenschaften, wie Leistung, Effizienz und Vibrationen getroffen werden. Durch den Einsatz von 3D-Sensoren können alle drei Raumkomponenten des Rotormagnetfeldes erfasst und durch Auswertung der Tangential- und Axialkomponente weitere detaillierte Informationen, wie sie etwa zur Rissdetektion erforderlich sind, gewonnen werden. Hierzu wird eine in einem Abstand zur Rotoroberfläche befindliche Zylinderfläche abgetastet.

Bei der Aufnahme eines großflächigen Magnetfeldes spielt neben der Genauigkeit insbesondere die Messgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle, sofern die Messung einen taktzeitkritischen Prozessschritt darstellt. Die Messgeschwindigkeit hängt von der Auflösung der Messwerte über den Umfang bzw. die Strecke, der Abtastrate der Sensoren und von der von den Sensoren überdeckten Fläche im Falle einer Arrayanordnung ab. Bild 37 zeigt die verschiedenen Einflüsse auf die Messgeschwindigkeit.



Bild 37: Zusammenhang zwischen Auflösung und Messgeschwindigkeit bei der Nahfeldmessung

Die Auflösung in Umfangsrichtung wird durch den Abstand Δs zwischen zwei Messpunkten definiert. Wird eine feinere Auflösung mit einem kleinen Δs gewählt, muss die Abtastfrequenz f_{abtast} erhöht werden, um die Messzeit t_{mess} nicht zu verlängern. Die Abtastfrequenz bestimmt zusammen mit dem Durchmesser d des zu vermessenden Rotors die Drehzahl n, mit der sich der Rotor drehen darf. Um die Messgeschwindigkeit zu erhöhen, kann auch die Breite des abgetasteten Bereiches vergrößert werden. Dazu wird ein Array aus mehreren Hall-Effekt-Sensoren eingesetzt. Die Auflösung in axialer Richtung hängt dann vom Abstand der einzelnen Sensoren zueinander ab und wird durch die Sensorgröße limitiert. Bei diskreten Sensoren liegt die Untergrenze derzeit bei 1,6 mm für Sensoren vom Typ CYSJ166A [129].



Bild 38: Flussdichteverteilung im Nahfeld eines Magneten

Die sinnvolle Auflösung hängt ihrerseits vom Messabstand ab, da das Magnetfeld in zunehmender Entfernung unscharf erscheint. Dies ist mit der stärkeren Feldverzerrung an den Polgrenzen zu erklären. Bild 38 verdeutlicht diesen Effekt. Dargestellt ist die numerisch berechnete Flussdichteverteilung um einen Quadermagneten in Luft ohne ferromagnetische Materialien oder andere Permanentmagnete in der Umgebung. Das Diagramm zeigt den Verlauf der Flussdichte entlang zweier gedachter Linien. Die orange Linie befindet sich 0,05 mm über der Magnetoberfläche und die blaue Linie 0,1 mm über der Magnetoberfläche. An den Rändern des Magneten verlaufen die Feldlinien in einem flacheren Winkel als im Zentrum. Das Magnetfeld ist in den Randbereichen also stärker verzerrt und wird vom jeweils anderen magnetischen Pol beeinflusst. Demnach wird in unmittelbarer Nähe zum Magneten an den Rändern eine höhere Flussdichte gemessen, als in größerem Abstand Die Stärke dieser Feldverzerrung hängt ebenso von den Aspektverhältnissen, also Grundfläche zu Höhe des Magneten und von möglichen Feldüberlagerungen durch beispielsweise

benachbarte Magnete auf einem Rotor oder durch das ferromagnetische Material des Magnetträgers ab.

Bild 39 zeigt drei Messungen an einem Beispielrotor, dessen magnetische Flussdichte über die Oberfläche in drei verschiedenen Abständen aufgezeichnet wurde. Der Abstand entspricht dem Abstand zwischen der Gehäuseoberseite der einzelnen Hallsensoren und der Rotoroberfläche. Bei den verwendeten Sensoren vom Typ CYSJ166A [129] ist die aktive Sensorfläche bereits 0,4 mm von der Gehäuseoberfläche entfernt. Der Verlauf der Messwertkurven zeigt bereits Unterschiede zwischen dem Fall mit an der Oberfläche anliegenden Sensoren und dem Fall mit 0,5 mm Abstand der Gehäuseoberfläche zur Rotoroberfläche, wobei wesentliche Details, wie die Grenzen der Einzelmagnete, die durch die Einbrüche in der Flussdichte erkennbar sind, erhalten bleiben. Eine Messung in größerem Abstand, im Beispiel 2,5 mm, verschleiert diese maßgeblichen Details und führt zu einer Reduktion der gemessenen Maximalflussdichte von ca. 60%. Der Vergleich mit dem Flussdichteverlauf des in Bild 38 berechneten Einzelmagneten zeigt, dass bei dem untersuchten Rotor auch in einem praktisch sinnvollen Abstand (in diesem Fall 0,5 mm) noch Details detektiert werden können, da die Feldüberlagerungen der Nachbarmagnete die Verzerrung des Magnetfeldes beeinflussen. Wie stark sich der Abstand auf die Messung auswirkt, hängt also von der Art und von der Größe des Rotors ab. Soll eine Rissdetektion durchgeführt werden, ist der Messabstand möglichst klein zu wählen, da hier auch die sehr schwachen Komponenten der Flussdichte quer zur Hauptrichtung erfasst werden müssen. Sensoren mit geringerem Abstand von Sensorfläche zur Gehäuseoberfläche sind jedoch empfindlicher gegenüber mechanischen Kollisionen. Die in einem anderen Array verwendeten Sensoren vom Typ FH5401 [128] sind in der vorliegenden Ausführung lediglich lackiert, wobei die Dicke der Lackschicht ungefähr 50 µm beträgt. Kollisionen mit der Rotoroberfläche können hier zur Zerstörung des jeweiligen Sensors führen.



Bild 39: Einfluss des Messabstandes auf die Flussdichtemessung (nach [S19])

Die für die Messgeschwindigkeit respektive die Auflösung verantwortliche Abtastrate hat einen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Eine Untersuchung an einem rotationssymmetrischen Bauteil mit neun lokalen Extremwerten zeigt einen Zusammenhang zwischen dem Messwertrauschen und der Abtastfrequenz.



Bild 40: Einfluss der Abtastrate auf das Rauschen der Hall-Sensor Messung (nach [S19])

Bild 40 verdeutlicht die Zunahme des Rauschens ab einer Frequenz von 500 Hz. Rauschen kann durch Filterung verringert werden. So können störende Oberwellen in den Messwerten beispielsweise durch ein Tiefpass- oder Bandpassfilter eliminiert werden, wodurch eine höhere Abtastrate und damit auch Messgeschwindigkeit erzielt werden kann. Dies muss allerdings so erfolgen, dass wichtige Messdetails nicht verloren gehen.

Die Verarbeitung der Messwerte erfolgt mit dem Ziel der Aufbereitung der für den Bediener abstrakten Zahlenwerte des Magnetfeldes in verschiedenen Graden. Die einfachste Methode der Aufbereitung besteht in der Visualisierung der Daten in verschiedenen Darstellungsarten. Die Herausforderung besteht in der Darstellung aller drei Raumrichtungen des Rotormagnetfeldes, des Messabstandes, sowie der Amplitude der Flussdichte am jeweiligen Messpunkt räumlich aufgelöst über der Rotoroberfläche. Für eine vollständige Darstellung des Rotormagnetfeldes ist die infinitesimale Abtastung eines Hüllzylinders um das rotationssymmetrische Messobjekt resp. um den Rotor erforderlich. Dies bedeutet sowohl die Abtastung in Umfangsrichtung sowie entlang der Rotorachse, andererseits auch in radialer Richtung, da die Raumrichtung der Flussdichtevektoren auf Grund des inhomogenen Verlaufs der Magnetfeldlinien vom Messort abhängt. Die beschriebenen Anwendungsfelder beziehen sich allerdings auf diskrete Abtastung in einem festen Abstand von der Rotoroberfläche. Bild 39 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Auflösung und Messabstand und zeigt so die Hinlänglichkeit der Abtastung in einem, technisch minimal möglichem Abstand.

Bei der Visualisierung der Informationen muss zwischen der dreidimensionalen Gesamtdarstellung des Rotormagnetfeldes und der zweidimensionalen Detaildarstellung einzelner Messlinien unterschieden werden. Bei der dreidimensionalen Darstellung der Verteilung des Rotormagnetfeldes über die Rotoroberfläche ist eine Darstellung über Vektoren, deren Länge die Amplitude der Radialkomponente darstellt oder über Farben zur Visualisierung dieser möglich. Sollen alle Raumkomponenten des Magnetfeldes dargestellt werden, so erscheint die Vektordarstellung als einzig sinnvolle Möglichkeit, wobei eine zu große Anzahl an darzustellenden Messpunkten die Übersichtlichkeit enorm einschränkt. Die Übersichtlichkeit steigt durch Darstellung lediglich einer einzelnen Raumkomponente pro Übersichtsbild.

Die bloße visuelle Darstellung der Messwerte erlaubt nur in wenigen Fällen eine detaillierte Beurteilung der Messung. Lediglich offensichtliche Fehler wie fehlende oder verkehrt polarisierte Magnete respektive Unterschiede in der Amplitude oder Inhomogenitäten bei Nutzung der zweidimensionalen Detaildarstellung sind so qualitativ zu erkennen. Ein wesentlicher Erkenntnisgewinn ist durch die weiterführende Messwertverarbeitung gegeben. So kann eine schnelle Fourier-Transformation auch quantitativ Aufschluss über falsch positionierte Magnete geben. Die Zahl, der Anteil und die Verteilung der Oberwellen kann so auch Rückschlüsse über etwaige Drehmomentschwankungen, Rastmomente, Erwärmung oder Schwingungen ermöglichen.

Die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten ist derzeit mit einem hohen manuellen Aufwand und großer Fachkenntnis verbunden, wenngleich die eigentliche Anwendung geeigneter Algorithmen und bekannter Verfahren von der gegenwärtig und zukünftig verfügbaren Rechenleistung sowie Speicherkapazität profitiert.

Liegen Vergleichswerte vor, wird eine Beurteilung der Rotorqualität weiter vereinfacht. Untersuchungen zeigen die Möglichkeit der Unterscheidung von Paketierverfahren durch Vergleich zweier Magnetfeldwerte. Untenstehendes Bild zeigt die Differenz beider Rotoren gleichen Blechschnitts und mit gleichen Magneten bestückt. Im Vorfeld ist im Beispiel bei der Prüfung der Gesamtmaschine ein Unterschied in der Spannungskonstanten von ca. 10 % aufgefallen. In der dreidimensionalen Darstellung erscheinen die Polgrenzen jeweils deutlich hervorgehoben.



Bild 41: Differenz zweier Mappingergebnisse als dreidimensionale Heat-Map (nach [S19])

Auch die Detaildarstellung einer Sensorbahn zeigt Extremwerte der Differenz besonders an den Polgrenzen. Dies ist auf das eingestanzte



Verbindungselement zurückzuführen. Darüber hinaus fällt die leicht geringere Flussdichte bei dem stanzpaketierten Rotor auf.

Bild 42: Differenz zweier Mappingergebnisse innerhalb einer Sensorspur (nach [S19])

135

Polgrenze

180

Rotorwinkel in °

Differenzmaximum an

225

270

-0,3

-0,4

0

45

90

Ein Konzept zur automatisierten Auswertung gewonnener Magnetfelddaten sieht die Nutzung sämtlicher im Produktentstehungsprozess generierten Informationen sowie Experteninformationen über das Produkt, den Fertigungsprozess sowie über den Mess- und Prüfprozess vor. Dabei werden verschiedene Anwendersichten berücksichtigt. Dies ermöglicht die Anpassung an unterschiedliche Nutzergruppen mit unterschiedlichen Unterstützungs- respektive Automatisierungsgraden. Bei Elektromotorenentwicklern besteht die Möglichkeit der Notwendigkeit von Unterstützung im Messprozess zur Erzeugung von Daten mit höchstmöglicher Qualität, indem beispielsweise auf notwendige Kalibriermaßnahmen oder ungünstige Messbedingungen hingewiesen wird. Ebenso können Detailinformationen über Fertigungsprozesse an dieser Stelle Optimierungspotentiale heben, die ohne genaue Prozesskenntnis, wie beispielsweise erzielbare Toleranzen mit verfügbaren Technologien, verborgen blieben. Diese Aussage ist umgekehrt für die Anwendergruppe der Prozessentwickler anwendbar, die durch Informationen über elektromagnetische Details und notwendige Toleranzgrenzen in der Konzeptionierung der Fertigungsprozesskette unterstützt werden. Auf Shopfloor-Ebene hingegen ist der notwendige Unterstützungs- und Automatisierungsgrad höher und erfordert sowohl eine Anwenderführung sowie eine umfassende Überwachung des Messprozesses hinsichtlich möglicher Fehler. Der höchste Automatisierungsgrad ist beim linienintegrierten Einsatz gegeben. Dort ist ebenso eine Anbindung an bestehende Produktionsleitsysteme (MES) erforderlich sowie die umfassende

360

315

Vorgabe von Sollwerten und Messabläufen. Hier kann die Überwachung der Magnetfelddaten ebenso zur Zustandsüberwachung der einzelnen Produktionsprozesse dienen. Methoden des maschinellen Lernens ermöglichen auch eine Vorhersage der Leistungsdaten der gesamten Maschine zu einem Zeitpunkt vor dem finalen Zusammenbau.

Die Grundlage der Software stellt eine Datenbank dar, die sämtliche Informationen zum realen Produkt, in diesem Fall zum jeweiligen Elektromotor, enthält. Die geometrischen und magnetischen Messwerte sind mit Hilfe geeigneter Sensorik zu ermitteln. Dies kann je nach Integrationsgrad im Labor, aber auch innerhalb der Produktionslinie geschehen. Die einzelnen Magnete werden in einer 100 % Bauteilprüfung vermessen und so der magnetische Momentenvektor ermittelt. Andere Daten, die nur mit aufwendigeren Prüfverfahren zu ermitteln sind, werden aus dem Datenblatt entnommen und in der Datenbank hinterlegt.

4 Untersuchung von Fertigungsfehlern am Beispiel von Halbach-Rotoren

Rotoren in Halbach-Konfiguration eignen sich auf Grund der hohen Leistungsdichte sowie der geringen Massenträgheit des Rotors besonders für den Einsatz in Hochleistungsantrieben [138]. Dabei ist allerdings eine besonders hohe Sensitivität auf Fertigungsabweichungen der Permanentmagnete, insbesondere Abweichungen des magnetischen Momentenvektors zu erwarten, da kein Rotoreisen existiert, welches derartige Abweichungen kompensieren würde [5]. Im Folgenden werden die Einflüsse dieser Fertigungsabweichungen der Permanentmagnete anhand einer Beispielapplikation untersucht.

4.1 Ausgangspunkt für die Untersuchungen

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde eine Versuchsmaschine konstruiert, die den einfachen Tausch der einzelnen Komponenten ermöglicht. Die besteht aus einem Aluminiumgehäuse mit eingepresstem Stator, Aluminiumlagerschilden und einer Aluminiummotorwelle. Ebenso können Vorrichtungen zur Montage und Demontage direkt an den Gehäuseteilen angebracht werden, um eine Beschädigung der einzelnen Bauteile beim Komponententausch zu vermeiden.

4.1.1 Allgemeine Beschreibung der Versuchsmaschine

Die Grundlage für die Untersuchungen stellt eine permanenterregte Synchronmaschine mit 12 Nuten und 8 Polen dar. Das Ursprungsdesign der Maschine wurde für automotive Anwendungen ausgelegt, was zu einer Nennspannung von 12 V führt. Der Stator ist hinsichtlich Nutschlitzbreite, Füllfaktor und Windungszahl für eine Direktbewicklung im Nadelwickelverfahren [4] geeignet, was bedeutet, dass statorseitig im Interesse einer prozesssicheren automatisierten Bewicklung nicht alle Optimierungspotentiale in Bezug auf die Leistungsdichte ausgeschöpft wurden. Ferner ist der Rotor der Maschine mit innenliegenden Magneten (IPM) ausgestattet. Für die Versuche wurde unter Beibehaltung des Stators ein Halbach-Rotor mit ebenfalls 8 Polen und Minimalsegmentierung entworfen. Die Minimalsegmentierung erlaubt eine gezielte Untersuchung der Fertigungsabweichungen, da in dieser Konfiguration lediglich zwei Vorzugsrichtungen auftreten. Dies bedeutet für die Feldmagnete o° und 180° als Magnetisierungswinkel zur Oberflächennormalen des Rotors und für die Transitionsmagnete 90° und 270°. Die Nenndaten der Maschine sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 8: Nenndaten der Versuchsmaschine

Nennspannung	12 V
Nennleistung	92 W
Nenndrehzahl	4300 1/min
Nutenzahl	12
Polzahl	8
Windungszahl pro Zahn	9
Bohrungsdurchmesser	60 mm
Blechpaketlänge	30 mm

Diese Maschine ist ferner mit einer Polymer-Gleitlagerung ausgestattet, um Einflüsse, die durch die Wälzkörper hervorgerufen würden, zu vermeiden. Ferner werden so mögliche Lagerströme [139] unterdrückt, da der Rotor keine elektrisch leitende Verbindung zum Stator aufweist.

4.1.2 Stator der Maschine

Der Stator der Maschine ist als Vollschnitt (vgl. Bild 44) mit einer konzentrierten Wicklung und einer Drahtstärke von 1 mm ausgeführt.



Bild 43: Wickelschema der Versuchsmaschine



Bild 44: Skizze des Statorschnitts der Versuchsmaschine

Das Wickelschema ist in Bild 43 dargestellt. Es werden keine Drähte parallel gewickelt und keine Zweige parallel verschalten.

Die Nutgrundisolation erfolgt mit Nomex, welches manuell geschnitten und gefalzt wird. Die Wicklung ist mit Lackdraht der Spezifikation W210 Grad 2 ausgeführt. Auf eine Imprägnierung der Wicklung wird auf Grund der geringen zu erwartenden Drehmomente und der kurzen Betriebsdauer der Maschine verzichtet. Somit kann die Wicklung bei Bedarf mit wenig Aufwand geändert werden.

4.1.3 Rotoren der Maschine

Die Untersuchungen werden anhand zweier Rotorausführungen durchgeführt. Die paramagnetische Aluminiumwelle ist bis auf die Aufnahme des Blechpaketes bei beiden Ausführungen gleich ausgeführt. Als Referenz für die Untersuchungen dient ein Rotor mit eingebetteten Magneten und vier Polpaaren. Das Blechpaket der IPM-Ausführung hat eine Lamellenstärke von 0,5 mm und ist lasergeschweißt. Die Verbindung des Blechpaketes mit der Welle ist als Längspressverband gegen einen definierten Anschlag ausgeführt.



Bild 45: Skizze des IPM-Rotors der Versuchsmaschine

Ausgehend von dem in Bild 45 dargestellten IPM-Rotor weist das Halbach-Rotorkonzept mit Minimalsegmentierung und 4 Polpaaren insgesamt 16 Magnete in Ringsegmentform auf. Die Magnete werden direkt auf die paramagnetische Aluminium-Rotorwelle aufgeklebt. Als Positionierungshilfe dient ebenso ein axialer Anschlag. Die Länge der Magnete entspricht der Blechpaketlänge des IPM Rotors.



Bild 46: Skizze des Halbach-Rotors der Versuchsmaschine

4.2 Simulative Untersuchung

Der Einfluss der Fertigungsabweichungen auf das Laufverhalten der Versuchsmaschine wird anhand eines numerischen 2D-FEM-Modells untersucht. Dabei werden die Winkelfehler der Halbach-Magnetsegmente simuliert und deren Auswirkungen auf das Rastmoment und die induzierte Spannung untersucht.

4.2.1 Vergleich der Flussdichteverläufe

Als Referenz dient die Maschine mit IPM-Rotor als FEM-Modell. Ebenso wird der Streufluss in Richtung der Rotorwelle qualitativ untersucht, um eine mögliche unerwünschte Beeinflussung des Rotormagnetfeldes auszuschließen.



Bild 47: Flussdichteverteilung in den aktiven Teilen der Versuchsmaschine in IPM-Konfiguration

Bild 47 zeigt den durch das Rotoreisen geleiteten Fluss, der durch die Magnete erzeugt wird. Im Inneren des Rotorblechpaketes ist kein Streufluss zu erkennen. Wie erwartet ist das Blechpaket ausreichend dimensioniert, sodass die Welle keinen Beitrag zur Flussführung leistet. Folglich hat die Verwendung einer paramagnetischen Welle keinen Einfluss auf die Laufeigenschaften der Maschine. Demgegenüber steht die segmentierte Halbach-Anordnung.



Bild 48: Flussdichteverteilung im Rotor der Versuchsmaschine in Halbach-Konfiguration

Bild 48 zeigt die Magnetflussverteilung innerhalb der Halbach-Anordnung bei idealer Magnetisierung der Magnete, d.h. ohne Fertigungsabweichungen. Im Bereich der Welle sind dennoch kleine Streufelder zu erkennen. Demnach hätte eine ferromagnetische Welle einen Einfluss auf das Luftspaltfeld. Ebenso ist zu erwarten, dass eine Welle mit hoher magnetischer Permeabilität Fertigungsabweichungen durch den Shimming-Effekt kompensieren würde. Darüber hinaus vergrößert eine Welle aus Stahl auf Grund der höheren Dichte das Massenträgheitsmoment des Rotors zu Lasten der Dynamik. Der direkte Vergleich der Flussdichteverläufe ist in Bild 49 dargestellt.



Bild 49: Flussdichteverlauf der Referenzmaschine im Vergleich mit der Halbach-Anordnung (nach [S23])

Bemerkenswert ist die größere magnetische Flussdichte an der Oberfläche der Halbach-Konfiguration im Vergleich zum IPM Rotor bei gleichem verwendetem Grundmaterial. Ebenso ist der Einfluss der Trennstege zwischen den Magnetkavitäten zu erkennen. Dieser äußert sich durch einen Streuflusspeak in der Pollücke mit umgekehrter magnetischer Polarität. Die Halbach-Konfiguration weist diesen Peak nicht auf und zeigt einen gleichmäßigeren Verlauf.

4.2.2 Auswirkungen auf das Rastmoment

Die Auswirkungen von Winkelabweichungen des magnetischen Momentenvektors auf das Rastmoment bei Halbach-Konfiguration wurden ermittelt, indem mit Hilfe der Simulation Rastmomentkurven für Rotoren mit Abweichungen bei den Einzelmagneten mit Winkelfehlern von o°-6° gegenüber der spezifizierten Magnetisierungsrichtung berechnet wurden.



Bild 50: Verlauf des Rastmoments in Abhängigkeit des Winkelfehlers der Einzelmagnete (nach [S23])

Der Verlauf zeigt eine Zunahme des Rastmoments von 25% gemessen von Spitze zu Spitze der maximalen Amplitude gegenüber dem Wert für die ideale Magnetisierung mit einer Winkelabweichung von 0°.

4.2.3 Auswirkung auf die induzierte Spannung

Die Auswirkungen auf die induzierte Spannung wurden analog zu den Auswirkungen auf das Rastmoment ermittelt. Um die Unterschiede bei der positiven und bei der negativen Halbschwingung besser beurteilen zu können, wurden die Spitzen jeweils in einem eigenen Diagramm dargestellt.



Bild 51: Darstellung der Auswirkung der Winkelabweichung auf die induzierte Spannung - positive Halbschwingung (nach [S23])

Die Amplitude sinkt bei maximaler Winkelabweichung von 6° um ca. 4% gegenüber der idealen Magnetisierung des Arrays.



Bild 52: Darstellung der Auswirkung der Winkelabweichung auf die induzierte Spannung - negative Halbschwingung (nach [S23])

Der Vergleich mit dem negativen Teil der Halbschwingung zeigt eine Asymmetrie der Schwingung bei zunehmendem Winkelfehler der Magnetisierung.

4.3 Messung an Musterrotoren

Die beschriebene Prozesskette zur Fertigung von Rotorbaugruppen bietet verschiedene Möglichkeiten zur Fehlerentdeckung vor der Endmontage von Rotor und Stator. Im Folgenden werden daher die in Kapitel 3.3 beschriebenen Inline-tauglichen Prüfmöglichkeiten anhand eines praktischen Montagebeispiels dargestellt. Dies betrifft die Stückprüfung der Einzelmagnete mit Hilfe eines für die Automatisierung geeigneten Messsystems (vgl. Abschnitt 3.3.2), der Zuordnung der Magnetcluster zum jeweiligen Rotor über eine Seriennummer (vgl. Abschnitt 2.1.2) sowie die Endprüfung der Rotoren mit Hilfe von Magnetfeldmapping (vgl. Abschnitte 3.3.1 und 3.3.3).

4.3.1 Magnetische Abweichungen der verfügbaren Magnete

Verwendet wurde die Menge an Magneten, die in Abschnitt 3.1.1 als Typ 1 und Typ 2 eingeführt wurden. Von den verwendeten Magneten der Spezifikation N35H wurde durch den Hersteller eine Stichprobe der Probengröße 10 geometrisch vermessen. Die Magnete der Probe liegen geometrisch innerhalb der Toleranz von ± 0,05 mm hinsichtlich Länge und Dicke. Ferner wurde die Abmagnetisierungskurve eines Probenzylinders der Materialcharge mit 6 mm Durchmesser aufgezeichnet und die Kennwerte bei 20 °C wie folgt bestimmt:

Tabelle 9: Magnetische Kennwerte der Versuchsmagnete (nach Herstellerangaben)

Br	1180 T
H _{cB}	899 kA/m
H _{cJ}	1442 kA/m
(BH) _{max}	266 kJ/m ³

Die Winkelabweichung des magnetischen Momentenvektors wurde mit Hilfe des Fernfeldmesssystems m-axis [P14] im Rahmen der Messreihe aus Abschnitt 3.3.2 für die gesamte Charge von 160 Magneten bestimmt. Für die Magnete mit radialer Magnetisierungsrichtung, also die Magnete für die Nord- und die Südpole ergibt sich folgende Winkelverteilung:



Bild 53: Verteilung der Winkelabweichung θ_R der Radialmagnete (Probenumfang 80 Magnete)

Der Mittelwert des Qualitätsresiduums der Messung beträgt 7,2 und deutet auf eine belastbare Messung hin. Der Großteil (76 %) der Magnete weist
eine Abweichung zwischen 0,4° und 2,5 ° von der senkrechten Magnetisierungsachse auf. Die Transitionsmagnete mit tangentialer Magnetiserungsrichtung wurden in gleicher Lage auf dem Messsystem platziert. Die Verteilung der Winkelabweichung ist in Bild 54 dargestellt.



Bild 54: Verteilung der Winkelabweichung θ_T der Transitionsmagnete (Probenumfang 80 Magnete)

Durch die bei dieser Messung parallel zur Sensorebene verlaufende Dipolachse ergibt sich ein höherer Mittelwert des Qualitätsresiduums zu 21,7. Dies bedeutet eine unzuverlässigere Dipolapproximation des Prüflings und erklärt den insgesamt kleineren gemessenen Winkelfehler. Die gemessenen Werte der Winkelabweichung für den Großteil (83 %) der Magnete liegen im Bereich von 0,03° bis 1,2 °

4.3.2 Zusammensetzung der Musterrotoren

Aus der Menge von jeweils 40 Magneten mit radialer Magnetisierung in Nord- und Südrichtung sowie den 80 zugehörigen Transitionsmagneten mit tangentialer Magnetisierung, wurden 4 Rotoren mit unterschiedlicher Fehlercharakteristik aufgebaut. Dabei wurden die Magnete direkt auf die Welle aufgeklebt. Als Auswahlkriterium für die Magnete dient das geometrische Mittel über die Winkelabweichungen der Magnete von der spezifizierten Magnetisierungsrichtung.

Potornum	RMS	RMS	RMS	
mer	aller Magnete in °	Radialmagnete in °	Transitionsmagnete in °	
1	1,15	1,05	1,23	
2	1,05	1,38	0,54	
3	1,39	1,62	1,11	
4	0,68	0,85	0,46	

Tabelle 10: Übersicht über die Abweichungen der Versuchsrotoren

Die Zusammensetzung der Versuchsrotoren ist in Tabelle 10 dargestellt. Rotor 1 trägt eine zufällige Auswahl der Magnete mit ähnlicher Abweichung bei den Radial- und Transitionsmagneten. Rotor 2 weist eine um 60 % kleinere Winkelabweichung bei den Transitionsmagneten als bei den Radialmagneten auf. Dazu kompensieren sich die Abweichungen der Magnete gegenseitig. Rotor 3 trägt Radialmagnete mit großer Winkelabweichung. Rotor 4 trägt Magnete mit möglichst kleiner Winkelabweichung.

4.3.3 Messergebnisse der Musterrotoren

Ein Magnetfeldmapping der Rotoroberfläche visualisiert die Auswirkungen der Fertigungsabweichungen. Als Referenz dient der Vergleich zwischen den Messwerten des Magnetfeldmappings des IPM-Rotors mit den simulierten Flussdichtewerten. Das Mapping wurde mit dem in [S20] beschriebenen Rotormessplatz und Hall-Effekt-Sensorarray nach [P13] durchgeführt. Bild 55 zeigt den Verlauf der Flussdichte entlang einer Bahn über der Rotoroberfläche. Das Hall-Effekt-Sensorarray wurde 0,1 mm über der Rotoroberfläche positioniert. Die Ähnlichkeit beider Kurvenverläufe zeigt, dass die Simulation grundsätzlich mit den richtigen Randbedingungen und Parametern durchgeführt wurde. Unterschiede bestehen in der Magnetpolbreite und der Amplitude. Die gemessene Magnetpolbreite erscheint kleiner als die simulierte. Ebenso ist die Amplitude der Flussdichte geringer. Das Sensorarray der Messvorrichtung wurde lediglich in einem Punkt kalibriert und weist prinzipbedingte Nichtlinearitäten auf. Dazu kommt der zum Schutz des Messarrays erforderliche Messabstand, was sowohl zu einer geringeren gemessenen Flussdichte als auch zu Unschärfe führt (vgl. auch Bild 39).



Bild 55: Vergleich der gemessenen und simulierten Flussdichteverläufe des IPM Versuchsrotors (nach [S23])



Bild 56: Vergleich der gemessenen und simulierten Flussdichteverläufe der Halbach-Versuchsrotoren (nach [S23])

Die Verläufe der radialen Flussdichtekomponente der Halbach-Versuchsrotoren zeigen erheblich größere Abweichungen der gemessenen Verläufe vom simulierten Verlauf. Die Kurven für die Rotoren 1 und 3 zeigen ausgeprägtere Polspitzen als die der Rotoren 2 und 4. Rotor 2 zeigt darüber hinaus ein deutlich höheres Maximum der Flussdichte, als die anderen Rotoren.

Zur Aufzeichnung der Rastmomentverläufe dient der in Bild 57 dargestellte Messaufbau, bei dem die zu prüfende Maschine mit Hilfe eines langsam drehenden Getriebemotors bei offenen Klemmen angetrieben wird. Damit das Messergebnis nicht durch die durch das Rastmoment verursachten Drehschwingungen verfälscht wird, werden diese mittels einer Drehmasse weitestgehend unterdrückt. Die eingesetzte Drehmomentmesswelle besitzt einen maximalen Messbereich von +/- 0,1 Nm und erfasst 200 Messwerte pro Sekunde. Bei einer Drehzahl von 3 min⁻¹ ergibt sich somit eine Abtastung alle 0,09 ° einer vollen Umdrehung.



Bild 57: Aufbau zur Rastmomentmessung

Die Messungen der verschiedenen Rotoren erfolgten unter Beibehaltung des Stators sowie der Lagerung, sodass Einflüsse durch Abweichungen dieser Komponenten ausgeschlossen werden können und nur der Einfluss durch das Rotormagnetfeld erfasst wird.

Bild 58 zeigt die Verläufe der durch die verschiedenen Rotoren verursachten Rastmomente über eine Drehung des Rotors von 60°. Der Offset der Kurven beträgt ca. -0,025 Nm und wird von den Reibungsverlusten in der Gleitlagerung der Rotorwelle verursacht. Offensichtlich ist die Amplitude des Rastmoments mit den Rotoren 2 und 4 geringer als mit den Rotoren 1 und 3. Dies verdeutlicht ebenso die Analyse der Werte über drei volle Umdrehungen, dargestellt in Tabelle 11. Der Wert des Rastmoments wird über das geometrische Mittel (RMS – Root Mean Square) der jeweils ca. 10.000 Messwerte gebildet.



Bild 58: Rastmomentverläufe der Versuchsrotoren

Rotor 4, dessen Magnete die geringsten Winkelabweichungen in radialer Richtung aufweisen verursacht ein Rastmoment von 0,06 Nm. Dieser Wert dient als Referenz beim Vergleich der Rastmomente der anderen Rotoren und stellt ein Rastmoment von 100 % dar. Das von Rotor 1 verursachte Rastmoment (0,074 Nm) ist 23 % höher als das des Referenzrotors 4. Hier beträgt die maximale Winkelabweichung 2,83 °, wobei das geometrische Mittel der Abweichungen 1,15 ° beträgt. Rotor 3 verursacht ein 14 % höheres Rastmoment als Rotor 4. Bei diesem Rotor weisen die Radialmagnete eine höhere Abweichung (durchschnittlich 1,62 °, maximal 3,36 °) auf, als die Transitionsmagnete (durchschnittlich 1,11 °, maximal 1,58 °). Bei Rotor 2 kompensieren sich die Winkelabweichungen (maximal 2,14°) gegenseitig, was zu einem 1 % niedrigerem Rastmoment (0,0594 Nm) als das von Rotor 4 führt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Halbach-Systemen bereits kleine Abweichungen des Magnetisierungswinkels einen großen Einfluss auf das Rastmoment der Maschine haben. Insbesondere ist eine hohe Qualität der Transitionsmagnete erforderlich, um das Rastmoment zu minimieren. Das niedrige Rastmoment von Rotor 2 dessen Magnete in einer sich kompensierenden Reihenfolge montiert wurden, zeigt die Wirksamkeit der selektiven Magnetmontage gerade bei Halbach-Systemen. Ferner ist das Geometrische Mittel der Abweichungen ein Indikator für die Qualität des Rotors.

	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3	Rotor 4
M _{R,min} in Nm	-0,1286	-0,1246	-0,1286	-0,1258
M _{R, max} in Nm	0,0871	0,0616	0,0871	0,0726
Amplitude M _R in Nm	0,2157	0,1862	0,2157	0,1984
RMS von M _R in Nm	0,0740	0,0594	0,0685	0,0600
Rel. RMS von M _R	123%	99%	114%	100%

Tabelle 11: Rastmomente der Versuchsrotoren

5 Kompensation von Magnetfeldfehlern durch selektive Magnetmontage

Zum Zeitpunkt der Prüfung der bestückten Rotorbaugruppe oder des bestückten Magnetträgers ist die Wertschöpfung der Prozesskette der Rotorfertigung bereits weit vorangeschritten, wobei fehlerhafte Rotoren zwar vor der Auslieferung an den Kunden bzw. vor dem Einbau in den Stator erkannt werden, jedoch im Fehlerfall Wertschöpfung verloren geht.

Die Kompensation dieser Fehler kann entweder durch Shimming erfolgen, was jedoch die Unwucht des Rotors vergrößert, oder durch selektive Montage. Soll die selektive Magnetmontage genutzt werden, um Winkelfehler der Magnetisierung der Einzelmagnete bei der Applikation zu kompensieren, ist immer eine 100 %-Teileprüfung der Einzelmagnete erforderlich. Ferner basieren die vorgestellten Ansätze auf der eindeutigen Zuordenbarkeit der Messdaten zu den jeweiligen Magnetkörpern. Anhand der in einer Datenbank hinterlegten Prüfdaten werden durch passende Algorithmen kompensierte Magnetsätze erzeugt, die dann dem Magnetmontageprozess vorsequenziert zugeführt werden und eine hinsichtlich minimaler Winkelfehler optimierte Bestückung ermöglichen.

Mit Hilfe der in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Methoden der Fernfeldmessung ist einem Magnetkörper mit inhomogener Flussdichteverteilung und Magnetisierungsrichtung seinem magnetischen Moment ein Vektor zuzuordnen, der einen Durchschnittswert abbildet und den Magnetkörper als Dipol approximiert. Unter der oben genannten Voraussetzung der eindeutigen Zuordenbarkeit der Messwerte zu dem jeweiligen Permanentmagneten entstehen digitale Modelle der Magnetkörper wodurch die Grundvoraussetzung zur selektiven Magnetmontage geschaffen wird. Die eigentliche Kompensation der Magnetfeldfehler geschieht jeweils in mehreren Schritten. Der Teilprozess dieser fehlerkompensierten Vorsequenzierung von Magnetsätzen ist in Bild 59 nach den einzelnen Prozessschritten aufgeteilt dargestellt, wobei die Prozessschritte grau hinterlegt sind, die statt auf physische Objekte, auf digitale Modelle der Magnete und Rotoren zurückgreifen. Dies erfolgt nach dem in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Schema.

Insbesondere bei eisenlosen Magnetsystemen, wie Halbach-Anordnungen, kann das Magnetfeld auch durch gezielte Applikation von Ausgleichselementen hoher magnetischer Permeabilität optimiert werden. Dieses Konzept beeinflusst allerdings die Unwucht des Rotors maßgeblich und macht den prinzipbedingten Gewichtsvorteil der Halbach-Konfiguration zunichte. Nach diesem sogenannten magnetischem Shimming [140, 141] ist eine Verschlechterung der Wuchtgüte des Rotors zu erwarten, die mit zusätzlicher Wuchtmasse ausgeglichen werden müsste, was zu einem schwereren Rotor mit höherer Massenträgheit führen würde. Da der Vorteil in Bezug auf das geringere Massenträgheitsmoment und die höhere Leistungsdichte der Halbach-Konfiguration gegenüber einem eisenbehafteten Rotor mit diesen Maßnahmen schrumpft, wird das Verfahren im Folgenden nicht weiter betrachtet.



Bild 59: Prozessablauf der fehlerkompensierten Vorsequenzierung von Magnetsätzen

5.1 Algorithmen für die optimierte Sequenzierung von Magnetsätzen

Regelbasierte Algorithmen zeichnen sich durch vorhersagbare Rechenzeit aus und liefern nachvollziehbare Ergebnisse. Jedoch ist für die Formulierung eines derartigen Algorithmus eine genaue Kenntnis der Problemstellung erforderlich. In Abschnitt 4.3.3 wird beschrieben, dass die Reduktion des Rastmoments durch die Kompensation von Winkelfehlern mittels passender Kombination abweichungsbehafteter Magnete, die in diesem Fall manuell durchgeführt wurde, möglich ist und das geometrische Mittel einen Indikator für das Rastmoment darstellt. Die im Folgenden vorgestellten Algorithmen ermöglichen eine automatisierte Kompensation von Magnetfeldfehlern und wurden mit Unterstützung von Yixiao Zhang [S22] entwickelt und getestet.

5.1.1 Kompensation durch Vektoraddition bei SPM

Die digitalen Modelle der Magnetkörper werden mit Hilfe von Algorithmen auf Basis der Vektoraddition so gruppiert, dass die Summe aller korrespondierenden Magnetfeldvektoren der für einen Rotor vorgesehenen Einzelmagnete möglichst klein wird. Die für diese Optimierung notwendigen Attributswerte, wie Polzahl, Anzahl der Magnete pro Pol und Magnetanordnung werden der jeweiligen Rotorinstanz entnommen. Das Ergebnis ist ein optimierter Datensatz, der aus einzeln identifizierbaren Magnetinstanzen besteht und Informationen über die Position eines jeden Magnetkörpers auf der Rotoroberfläche trägt. Daraus kann ein physischer Satz Magnete für einen Rotor mit minimaler Winkelabweichung des Magnetfeldes zusammengestellt werden.

Den Kompensationsalgorithmen liegt ein dreidimensionales Magnetmodell zu Grunde, welches den magnetischen Dipol-Momentenvektor darstellt. Wie in Bild 60 dargestellt, wird ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung sich im geometrischen Mittelpunkt des Magnetkörpers befindet, eingeführt. Die z- Achse des Koordinatensystems zeigt in die nominelle Magnetisierungsrichtung und die x-Achse verläuft parallel zur Längsachse des Magnetkörpers. Diese wird entsprechend der vorgesehenen Montagelage auf der Rotoroberfläche definiert und verläuft parallel zur Rotationsachse. Die resultierende, gemessene Magnetisierung M wird als Vektor v dargestellt. Im Idealfall verläuft v parallel zur z-Achse. Reale Magnetkörper weisen die in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Abweichungen auf. Die im Modell verwendeten Komponenten v_x , v_y und v_{dev} stellen jeweils Projektionen auf die xz-, die yz- und die xy-Ebene dar, wobei v_{eff} die Projektion von v auf die z-Achse als Radialkomponente des Rotormagnetfeldes darstellt.



Bild 60: Dreidimensionales Magnetmodell mit magnetischem Dipol-Momentenvektor (nach [S22])

Zur Vereinfachung wird die Abweichung von v immer in positive y-Richtung dargestellt, wohingegen die Abweichung in x-Richtung sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Somit kann v nur im I. und II. Oktanten existieren. Diese Vereinfachung kann auf Grund der Symmetrie der Magnetgeometrie erfolgen. Die in diesem Beispiel herangezogenen Quader können sowohl rotiert als auch umgedreht werden. Das Umdrehen bewirkt ein Umkehren der Magnetisierungsrichtung im Raum. Mathematisch kann der Vektor wie folgt beschrieben werden:

$$\boldsymbol{v} = (x, y, z) \tag{S22} (17)$$

mit

 $x \in \mathbb{R}$

- $y \ge 0$
- $z \ge 0$

Die in der dreidimensionalen Beschreibung maßgeblichen Vektorkomponenten v_{dev} und v_{eff} können wie folgt beschrieben werden:

$$\|v_{dev}\| = \|v\| \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha}$$

$$\|v_{eff}\| = \|v\| \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$$

$$[S_{22}] (18)$$

Dabei repräsentiert v_{dev} die wirksame Komponente der realen Abweichung von der idealen Magnetisierungsrichtung in der tangentialen Ebene der Rotoroberfläche durch den geometrischen Mittelpunkt des Magnetkörpers. v_{eff} hingegen stellt die effektiv an der Luftspaltinduktion der Maschine beteiligte Komponente dar. Aus dieser Dekomposition des Vektors v kann eine weitere Vereinfachung des Modells in ein zweidimensionales Modell der Abweichung erfolgen.



Bild 61: 2D-Modell der Abweichungen (nach [S22])

Die Grundlage des zweidimensionalen Modells ist die Projektion des dreidimensionalen Vektors v auf die xy-Ebene. In diesem Modell kann v_{dev} wie folgt beschrieben werden:

$$\boldsymbol{v_{dev}} = (x, y) \tag{S22} (20)$$

Die Projektionen auf die Achsen des resultierenden zweidimensionalen Koordinatensystems ergeben sich wie folgt:

$$\|x\| = \|v\|\cos\alpha \cdot \sin\beta$$

$$[522] (21)$$

1 ()

$$\|y\| = \|v\|\cos\beta \cdot \sin\alpha \qquad [S_{22}] (22)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\|y\|}{\|x\|}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\|v\|\cos\beta\cdot\sin\alpha}{\|v\|\cos\alpha\cdot\sin\beta}\right)$$
[S22] (23)

mit

 $0 \leq \theta \leq \pi$

Der Winkel θ beschreibt folglich die Richtung der Winkelabweichung.

Die Algorithmen verwenden v_{dev} , um die Abweichung zu berechnen und die Kompensation durchzuführen, da v_{dev} sowohl die Größe des Winkelfehlers als auch die Richtung θ enthält.

Zur Durchführung der Kompensation wird zunächst ein Modell des betreffenden Rotors anhand seines digitalen Modells erstellt. Die notwendigen Informationen betreffen die Polzahl des Rotors, die Anzahl der Magnete einer Magnetreihe in axialer Richtung sowie die Anzahl der Magnete pro Pol. Um die für die Algorithmen überzähligen Informationen zu eliminieren und das Modell weitestgehend zu vereinfachen, wird durch Abrollen der Rotoroberfläche eine Matrix erzeugt, deren Elemente die jeweiligen Einzelmagnete abbilden.

Tabelle 12: Rotorkonfigurationen für selektive Magnetmontage

Konfigura- tion	Magnet- an- ordnung	Mag- nete pro Reihe (m)	Magnet- reihen (<i>n</i>)	Reihen pro Pol (<i>k</i>)	Pol- zahl (p)
# 1	SPM	4	8	1	8
# 2	SPM	4	12	3	4

Als Referenz für die Kompensationsalgorithmen sollen die in Tabelle 12 beschriebenen sowie in Bild 62 und Bild 63 dargestellten Konfigurationen dienen.



Bild 62: Abgerollte Darstellung der Magnetanordnung einer SPM-Maschine der Konfiguration #1 (nach [S22])



Bild 63: Abgerollte Darstellung der Magnetanordnung einer SPM-Maschine der Konfiguration #2 (nach [S22])

Die Matrix hat *m* Zeilen und *n* Spalten, wobei ein Pol aus k Spalten besteht. Folglich entspricht die Polzahl *p* des Rotors $p = \frac{n}{k}$. Die Magnete werden in diesem Ansatz, wie bereits beschrieben, als punktförmiger magnetischer Dipol angenommen, wobei sich der Ursprung des magnetischen Momentenvektors im geometrischen Mittelpunkt des jeweiligen Magneten befindet. Grundsätzlich muss zwischen eindimensionalen (1D) und zweidimensionalen (2D) Algorithmen unterschieden werden.

5.1.2 1D-Kompensationsalgorithmen

Der einfachste Ansatz ist ein naiver 1D-Paarungsalgorithmus. Diesem Algorithmus liegt die Annahme zu Grunde, dass Winkelabweichungen in axialer Richtung vernachlässigbaren Einfluss auf die Laufcharakteristika Rastmoment und Drehmomentwelligkeit des Motors haben. Dabei wird der die Winkelabweichung repräsentierende 2D-Vektor v_{dev} durch diese Annahme in einen 1D-Vektor v'_{dev} überführt. Dies kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$v = \|v'_{dev}\| \tag{24}$$

$$v = \|v_{dev}\| * \sin\theta \tag{25}$$

Mit dem Skalar v kann dann der 1D-Algorithmus einen kompensierten Magnetsatz finden. Dies geschieht durch das Finden von sich jeweils bestmöglich kompensierenden Magnetpaaren wie in Bild 64 dargestellt.

Ein beliebiger Magnet, dessen Abweichung in radialer Richtung als vorzeichenloser Fließkommawert *a* (wobei der Wert von *a* dem von *v* entspricht) dargestellt ist, wird aus der vorhandenen Menge an Magneten S im Puffer der Größe m-1 (m >= 2) entnommen. Zur Kompensation der Abweichung des ersten Magneten *a* wird nun ein passender zweiter Magnet mit der Abweichung *b* gesucht. Der Algorithmus zieht den ersten Wert *b* der Menge *S* als initialen Wert heran und berechnet die Differenz d_{min} zwischen *a* und *b*. Danach wird die Differenz *d* zwischen *a* und dem nächsten Wert *c* aus der Menge *S* berechnet und mit d_{min} verglichen. Ist nun $d < d_{min}$, wird d_{min} mit dem Wert von *d* überschrieben und *b* wird mit dem Wert von *c* überschrieben. Dies geschieht iterativ so lange, bis *b* mit jedem Wert aus *S* verglichen wurde. Das Ergebnis ist ein kompensiertes Paar der Werte *a* und *b*. In der praktischen Umsetzung wird dann zunächst ein Pol bestückt. Bei ungerader Anzahl an Magneten pro Pol wird dann ein Magnet des benachbarten Pols mit dem ersten Magneten des Paars kompensiert.

Dieser Algorithmus gehört der Kategorie der Greedy-Algorithmen an und seine Komplexität bei *m* Werten in *S* für das Finden eines kompensierten Paares *a* und *b* ergibt O(m). Bei n Iterationen, also für die reale Anwendung, steigt die Komplexität auf $O(m^*n)$. Um bei steigender Anzahl an Magneten den Rechenaufwand zu begrenzen, kann eine Toleranz *t* definiert werden, wobei der Algorithmus dann am Ziel ist, sobald die Bedingung d_{min} <= t zutrifft.



Bild 64: Darstellung des naiven 1D-Paarungsalgorithmus als Flussdiagramm (nach [S22])

Die Komplexität kann durch eine Erweiterung reduziert werden, indem die Werte der Menge S in absteigender oder aufsteigender Reihenfolge sortiert werden. Zwei benachbarte Werte ergeben dann ein kompensiertes Paar. Dies ist möglich, da jeder Magnet um 180° um seine z-Achse rotiert werden kann. Somit müssen nur noch so lange die jeweils benachbarten Werte a und b aus S entnommen und in P geschrieben werden, bis S nur noch weniger als 2 Einträge besitzt. P ist dann der kompensierte Magnetsatz. Da somit die in der vorhergehenden Version erforderliche Iteration entfällt, wird die Komplexität auf O(n) reduziert, wobei n der Anzahl der benötigten Magnetpaare entspricht. Die Genauigkeit dieser Version entspricht exakt derer des naiven Ansatzes.

5 Kompensation von Magnetfeldfehlern durch selektive Magnetmontage



Bild 65: Darstellung des sortierenden 1D-Paarungsalgorithmus als Flussdiagramm (nach [S22])

5.1.3 2D-Kompensationsalgorithmen

Die eindimensionalen Algorithmen kompensieren zwar die Abweichungen, die zu erhöhtem Rastmoment und Drehmomentwelligkeit führt, verhindern aber nicht das Auftreten axialer Kräfte auf die Rotorwelle infolge ungleichmäßiger Magnetfeldverteilung in axialer Richtung. Um diesen unerwünschten Effekt zu minimieren, sind zweidimensional kompensierende Algorithmen erforderlich.

Die hier vorgestellten zweidimensionalen Algorithmen haben zwei Freiheitsgrade, da sie sowohl den Betrag der Abweichung des magnetischen Momentenvektors $||v_{dev}||$ sowie dessen Winkel θ berücksichtigen. Um den Berechnungsaufwand und die Komplexität zu reduzieren, werden durch eine Vorsortierung zunächst Kategorien mit ähnlichem Betrag des

magnetischen Moments nach Bild 66 geschaffen. Dadurch wird in der späteren Kompensation ein Freiheitsgrad eliminiert und eindimensionale Algorithmen können angewandt werden. Die Kategorisierung wird im allgemeinen Sprachgebrauch der Montagetechnik als "Clustern" oder "Gruppieren" bezeichnet.

Initial wird hierzu der Magnetsatz *S* nach den Vektorbeträgen in absteigender oder aufsteigender Reihenfolge sortiert. Innerhalb einer Kategorie liegt die Abweichung $||v_{dev}||$ maximal im Bereich des Schwellwertes *t*. Zunächst wird der erste Eintrag v_i aus dem sortierten Array *S* als Referenzvektor für den ersten Vergleich verwendet und in die erste Kategorie *Si* verschoben. Die nächsten Werte v_2 , v_3 , ... aus *S* werden dann mit v_i hinsichtlich ihres Betrages verglichen. Solange die Differenz zwischen v_i und v_n kleiner oder gleich *t* ist, werden diese ebenso in die Kategorie *Si* verschoben. Sobald der Betrag eines Vektors mehr als *t* vom Betrag des Referenzvektors v_i abweicht, wird die jeweilige Kategorie *S_i* bzw. *S_i* in den Kategoriesatz *C* geschrieben. Dieser, nicht in die erste Kategorie passende Vektor wird dann als Referenz für die nächste Iteration verwendet. Dies geschieht so lange, bis *S* keine Vektoren mehr enthält.

Das Ergebnis ist ein Kategoriesatz *C* der die Kategorien *S*_{*i*} bis *S*_{*i*} enthält, wobei die Anzahl der unterschiedlichen Kategorien vom Schwellwert *t* abhängt. Die einzelnen Kategorien enthalten dann nur noch Vektoren von Magneten, deren magnetisches Moment ähnlich ist und die sich nur im Magnetisierungswinkel θ unterscheiden. Folglich können ausgehend davon mit den in 5.1.2 vorgestellten eindimensionalen Algorithmen kompensierte Magnetsätze erstellt werden.

Die Genauigkeit dieses Algorithmus beziehungsweise die Güte der erzielbaren Kompensation hängt folglich entscheidend vom Schwellwert *t* ab. Wird dieser klein gewählt, so ähneln sich die Beträge der Vektoren stark, wobei jedoch auch die Anzahl der verfügbaren Werte in den einzelnen Kategorien sinkt, was im Gegenzug zu großen Unterschieden in der Winkelabweichung und damit einer schlechteren Kompensation der Winkelabweichungen führen würde. Für einen kleinen Schwellwert muss also die Anzahl verfügbarer Magnete sehr hoch sein, um die Güte der Kompensation nicht zu verschlechtern.

5 Kompensation von Magnetfeldfehlern durch selektive Magnetmontage



Bild 66: Darstellung der Kategorisierung für die zweidimensionale Kompensation als Flussdiagramm (nach [S22])

Soll die Kompensationsgüte gesteigert, und sowohl die axiale als auch die radiale Raumkomponente des Magnetfeldes kompensiert werden, so kann dies durch einen zweidimensionalen Vierpunktalgorithmus erfolgen. Anstatt den Betrag der Abweichung des magnetischen Momentenvektors $||v_{dev}||$ sowie ebenso dessen Winkel θ zu betrachten, wird der Vektor v_{dev} in seine beiden Raumkomponenten x und y zerlegt.



Bild 67: Einzelner Magnetpol des Rotors nach Konfiguration #2 (nach [S22])

Ziel des Algorithmus ist nun, dass sich die radialen x- und axialen y-Komponenten der Vektoren untereinander jeweils kompensieren wie in Bild 67 gezeigt. Die gleichfarbigen und gleich nummerierten Vektoren kompensieren sich hier gegenseitig.

Offensichtlich liegt hier wieder ein Problem mit zwei Freiheitsgraden vor, da beide Raumrichtungen gleichzeitig kompensiert werden müssen. Um dieses Problem zu vereinfachen, wird der Pol nach dem vorgestellten Vierpunktalgorithmus in Vierergruppen unterteilt, wie in Bild 68 dargestellt.

Die vier Magnete der Gruppe werden als m1, m12, m21 und m22 bezeichnet. Der erste Magnet m11 wird zufällig ausgewählt. m12, der sich rechts von m11 befindet wird so ausgewählt, dass sich die radialen *x*-Komponenten gegenseitig kompensieren. Analog dazu wird der sich oberhalb von m11 befindende Magnet m21 so ausgewählt, dass sich die axialen *y*-Komponenten gegenseitig kompensieren. Die Auswahl von m12 und m21 kann mit Hilfe der vorgestellten eindimensionalen Algorithmen erfolgen, da jeweils nur eine Raumrichtung, also ein Skalar, verglichen werden muss. Bei der Auswahl von m22 bleibt allerdings ein Problem mit zwei Freiheitsgraden bestehen.



Bild 68: Kompensierte Vierergruppe von Magneten(nach [S22])

Aus der Menge an Magneten *S* muss nun unter Zuhilfenahme einer Toleranz t ein Magnet mit der passenden Magnetisierung in beiden Raumrichtungen (*x*, *y*) gefunden werden. Die Differenz seiner beiden Raumkomponenten *x* und *y* muss zur *x*-Komponente *a* von m12 und zur *y*-Komponente *b* von m21 jeweils weniger als die Toleranz *t* betragen. Zunächst wird aus der Menge *S* eine Teilmenge *S*' gebildet, in der die Differenz aller *y*-Komponenten bereits bereits kleiner als *t* ist ($||b\pm y|| \le t$). Aus dieser Teilmenge wird nun der passende Magnet gesucht, der unter Beachtung des Vorzeichens von *x*, den kleinsten Abstand zu *a* $||a\pm x||$ aufweist.

5.2 Softwareimplementierung und Test der Kompensationsalgorithmen

Die in Abschnitt 5.1 vorgestellten Algorithmen wurden als fester Bestandteil des physisch realisierten Lagersystems entwickelt. Die Datenbank des Lagersystems dient als Datenquelle für die Kompensationsalgorithmen und wurde zu Testzwecken mit virtuellen Daten gefüllt. Der Test der in Software implementierten Algorithmen erfolgt mit Hilfe von Testalgorithmen [S22], die ebenso in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

5.2.1 Architektur des Kompensationssystems

Die vorgestellten Algorithmen wurden in C++ implementiert und bestehen aus den Klassen: *Connector, Magnet, Rotor* und *Selector*. Die Struktur des Algorithmus ist in Bild 69 dargestellt, wobei ersichtlich ist, dass der eigentliche Kompensationsalgorithmus in der Klasse *Selector* enthalten ist.



Bild 69: Struktur des regelbasierten Kompensationsalgorithmus in C++ (nach [S22])

Zunächst bildet die Klasse *Connector* die Schnittstelle zur MySQL-Datenbank, in der alle Prüfdaten der Magnete gespeichert sind. Diese Klasse erlaubt es Instanzen zu generieren, die eine Datenbankabfrage durchführen und einen Datensatz mit der Bezeichnung *ResultSet* in der jeweils benötigten Struktur (z.B. eine Tabelle) zurückzugeben.

Die eigentliche Klasse *"Magnet"* stellt das Grundgerüst des digitalen Modells der jeweiligen Magnetinstanz zur Verfügung. Hier sind alle für den Algorithmus erforderlichen Daten enthalten. Dazu gehören die eindeutige Magnet-ID (mag_id), der magnetische Dipol-Momentenvektor aufgeteilt in die drei Komponenten *angle_y, angle_x* und *magnitude* für den Betrag des Vektors, die Orientierung des Magneten relativ zu den anderen des Magnetsatzes (*rotation*), den Lagerort des Magneten (*storage*) im automatisierten Magnetlager (vgl. Kapitel 5.3) sowie die zu berechnende Position auf dem Rotor (*rotor_location*). Die Orientierung des Magneten wird benötigt, wenn die Drehung des Magneten um 180° um seine z-Achse eine Kompensation ermöglicht. Diese *rotation* kann boolesche Werte annehmen und ist standardmäßig *false*. Im Falle einer notwendigen Drehung, um den Fehler des benachbarten Magneten zu kompensieren, wird dieser Wert auf *true* gesetzt.

Der magnetische Dipol-Momentenvektor wird durch eine Reihe von Fließkommafeldern abgebildet, in denen sich auch die in Kapitel 5.1.1 eingeführten Größen v mit den zugehörigen Winkeln α und β sowie die resultierenden Werte v_{dev} und θ finden. Um den unterschiedlichen Anforderungen der hier verglichenen Algorithmen zu entsprechen, werden lediglich die Grundkomponenten des magnetischen Dipol-Momentenvektors aus der Datenbank extrahiert und alle weiteren benötigten Größen je nach Bedarf daraus abgeleitet. Die Position des jeweiligen Magneten auf dem Rotor sowie sein Lagerort werden jeweils als dreidimensionale Koordinaten angegeben. Dem jeweiligen Magneten wird unmittelbar vor der Messung die ID zugeordnet. Bei jedem Handhabungsschritt wird diese verfolgt und erlaubt somit eine eindeutige Zuordnung im Puffer und im Magnetlagersystem. Sofern die Beschichtung des Magneten es zulässt (z.B. Epoxid-Beschichtung), kann die ID in maschinenlesbarer Form (z.B. Datamatrix-Code) als Lasermarkierung auf dem Magneten direkt aufgebracht werden. Bei sehr dünnen Beschichtungen kann dies allerdings zu Korrosion führen [S17.]

Die Klasse *Rotor* stellt ein mathematisches Modell des Rotors dar und besitzt Attribute für die eindeutige Rotor ID, die Magnetanordnung oder die Magnet-Matrix als Liste mit den einzelnen Magnet-IDs. Aus diesem Magnetsatz kann dann die Feldabweichung berechnet werden.

Der jeweilige Kompensationsalgorithmus ist, wie erwähnt, in der Klasse *Selector* enthalten, die in diesem Beispiel zwei Nachfahren für jeweils den 1D-Algorithmus und den 2D-Algorithmus hat. Die Klasse enthält eine Liste mit

zu bestückenden Rotoren, eine Liste mit den verfügbaren Magneten, eine Beschreibung des physisch vorhandenen Magnetlagers und einen Schwellwert für die zulässige Toleranz des Kompensationsergebnisses. Ferner werden Funktionen für den Datenbankzugriff mittels Connector, für die eigentliche Kompensation und für die Berechnung der Qualität der Kompensation zur Verfügung gestellt. Um Datenfehler zu vermeiden, werden sowohl die Listen der Rotor- als auch der Magnetinstanzen temporär als Vektoren gespeichert und nicht ständig online aus der Datenbank abgefragt.

Zum Test der Algorithmen wurde eine Datenbank mit Magnetdaten gefüllt. Da die für den Test erforderliche Zahl an Magneten wesentlich größer war, als real verfügbar, wurde aus der Messreihe von Magnettyp 4 (vgl. Abschnitt 3.1.1) die Verteilung der Winkelabweichungen herangezogen, um daraus 768 virtuelle Magnetdaten zu generieren. Die grundlegende Idee des Tests ist, dass idealerweise von senkrecht magnetisierten Magneten ausgegangen wird, die jeweils eine Abweichung von Null Grad zu ihrer spezifizierten Vorzugsrichtung aufweisen. Folglich ist das Ziel der Kompensation, die Summe der realen Einzelvektoren durch passende Kombination der vorhandenen Magnete in einem Magnetsatz möglichst nahe an Null zu bringen. Diese Fehlersumme der jeweiligen Raumrichtung wird für jeden einzelnen Pol wie folgt gebildet:

$$dev_x = \sum \|v_{dev}\| \cdot \sin\theta \cdot rot \tag{26}$$

Wobei *rot* die beschriebene Rotation des Magneten um seine z-Achse darstellt und Werte von 1 für den nicht rotierten Fall bzw. den booleschen Wert false und -1 für den rotierten Fall bzw. den booleschen Wert true annehmen kann. Für die Raumrichtung y bzw. die tangentiale Magnetfeldkomponente formuliert sich die Fehlersumme entsprechend:

$$dev_{y} = \sum ||y|| \cdot rot \tag{27}$$

Hierbei ist zu beachten, dass die tangentiale Komponente durch ||y|| anstelle von $||v_{dev}|| \cdot \cos \theta$ gebildet wird, da diese laut Definition $0 \le \theta \le \pi$ nur positive Werte annehmen kann. Da die 2D-Algorithmen das Magnetfeld sowohl in tangentialer als auch in axialer Richtung kompensieren, erfolgt die Bewertung durch das quadratische Mittel der Fehlersummen der einzelnen Pole für die beiden Raumrichtung nach:

$$RMS_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dev_{xi}^2}$$
(28)

Sowie:

$$RMS_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} de v_{xi}^2}$$
(29)

Wobei n für die Anzahl der Pole steht. Die quadratischen Mittel der Fehlersummen werden durch Funktionen der Klasse *Selector* berechnet.

5.2.2 Test der 1D-Algorithmen

Der 1D-Kompensationsalgorithmus vernachlässigt wie erwähnt Abweichungen in axialer Richtung (x-Komponente). Folglich wird nur RMS_y betrachtet. Es wurden aus der Menge von 768 Magneten 10 virtuelle Rotoren zusammengestellt und die Mittelwerte der Abweichung verglichen:



1D-Algorithmus

Bild 70:Testergebnis des 1D-Algorithmus verglichen mit zufälliger Verteilung (nach [S22])

Beträgt der Mittelwert für den Winkelfehler eines gesamten Rotors unkompensiert 2,7° so erzeugt der 1D Kompensationsalgorithmus aus zufällig ausgewählten Magneten bei Rotorkonfiguration #1 einen Mittelwert von rund 0,02°.

5.2.3 Test der 2D-Algorithmen

Bei der Implementierung der 2D-Algorithmen wurden zur Lösung des Problems durch die Reduktion der Freiheitsgrade zwei verschiedene Ansätze implementiert. Zum Test beider Algorithmen werden jeweils 10 virtuelle Rotoren aus einer gegebenen Menge an Magneten generiert. Ein Vergleich erfolgt mit unkompensierten Rotoren als Referenz, deren Magnetanordnung aus derselben Menge an Magneten zufällig erfolgt.

In den folgenden Grafiken sind jeweils die Abweichungen in axialer sowie radialer Richtung getrennt voneinander dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu bewahren. Es werden jeweils 3, 5 und 10 verschiedene Kategorien gebildet und die quadratischen Mittel der Fehlersummen verglichen.



Bild 71: Axiale Komponente der Feldabweichung bei Optimierung durch den kategorisierenden 2D-Paarungsalgorithmus (nach [S22])

Die Wirksamkeit des Algorithmus ist beim Vergleich mit dem unkompensierten Referenzwert bereits bei 3 Kategorien offensichtlich. Ebenso kann die Annahme bestätigt werden, dass die Genauigkeit des Algorithmus mit zunehmender Anzahl an Kategorien steigt.

5 Kompensation von Magnetfeldfehlern durch selektive Magnetmontage



Bild 72: Radiale Komponente der Feldabweichung bei Optimierung durch den kategorisierenden 2D-Paarungsalgorithmus (nach [S22])

Der Unterschied des Fehlersummenmittelwertes zwischen 3 und 5 Kategorien ist allerdings weder in axialer noch in radialer Richtung nicht signifikant. Die Verwendung von 10 Kategorien ergibt eine Reduktion des Fehlersummenmittelwertes von 92,5 % bzw. 94,5 % und kann damit als deutlich bezeichnet werden.





Bild 73: Axiale Komponente der Feldabweichung bei Optimierung durch den 2D-Vierpunktalgorithmus (nach [S22])

Bild 73 zeigt die Vernachlässigung der axialen Komponente durch den Vierpunktalgorithmus. Die Streuung wird zwar verringert, jedoch bleibt ein deutliches Fehlerresiduum erhalten.



2D-Algorithmus, 4-Punkt - radiale Abweichung

Bild 74: Radiale Komponente der Feldabweichung bei Optimierung durch den 2D-Vierpunktalgorithmus (nach [S22])

Die Wirksamkeit des Vierpunktalgorithmus wird beim Betrachten der radialen Komponente der Fehlersumme in Bild 74 deutlich. Der Vergleich mit dem kategorisierenden Algorithmus zeigt ein nochmals geringeres Fehlerresiduum in der radialen Komponente der Winkelabweichung.

5.3 Hardwareimplementierung eines Lagersystems zur selektiven Magnetmontage

Der Einsatz eines Kompensationsalgorithmus erfordert eine selektive Magnetmontage, welche den wahlfreien Zugriff auf eine große Anzahl an vormagnetisierten Magneten voraussetzt. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein automatisiertes Lagersystem vorgestellt, welches bei ausreichender Zuführung von magnetisierten Magneten autonom laufen und somit auch Geisterschichten bedienen kann. Der magnetisierte Zustand der Einzelmagnete erfordert die magnetische Schirmung der einzelnen Speicherkavitäten. Die notwendige Stückprüfung aller eingelagerten Magnete setzt die Vormagnetisierbarkeit des jeweiligen Magnetsystems, respektive des Rotors (vgl. Abschnitt 3.2) eine entscheidende Rolle bei der Entscheidung zur Montage von vormagnetisierten Magneten. In folgenden Fällen besteht meist die Notwendigkeit der Montage von vormagnetisierten Magnetkörpern:

- Segmentierte Halbachanordnung mit großen Magnetvolumina
- Vergrabene Magnete in Rotoren mit hohem Eisenanteil zur Flussführung zur Nutzung des Reluktanzeffektes (z.B. Rotoren für Hybridmaschinen, V-, Speichen oder Sammleranordnung)
- Hochausgenutzte SPM-Maschinen mit geringem Polabstand
- Geringer Eisenanteil im Rotor

Die folgenden Abschnitte beschreiben das Konzept eines Lagersystems für die selektive Magnetmontage als Voraussetzung für die Implementierung der vorgestellten Kompensationsalgorithmen in einem automatisierten Magnetmontageprozess.

5.3.1 Hardwarekonzept des Lagersystems und Realisierung eines Beispiels

Die Hardware des Lagersystems muss die in Bild 75 dargestellten Prozessschritte abbilden können. Dies betrifft im Wesentlichen die Vereinzelung der Magnete aus einem Stapel, die Prüfung und ggf. Markierung, die Einlagerung und Zuordnung der Messwerte sowie die Sortierung nach den Ergebnissen des Optimierungsalgorithmus.



Bild 75: Prozessabfolge der selektiven Magnetmontage

Der nachfolgenden Magnetmontagestation werden dann bereits vorsortierte Stapel zugeführt. Das Markieren sowie das Auslesen der Magnetdaten ist optional und dient lediglich der zusätzlichen Absicherung des Prozesses. Beim Markieren der Magnete sind insbesondere die Eigenschaften der Oberflächenbeschichtung und deren Eignung zur Markierung bspw. durch Laser zu beachten, damit keine Einschränkungen der Korrosionsbeständigkeit entstehen.

Aus dieser Prozessabfolge werden die in Tabelle 13 aufgelisteten Anforderungen an das Lagersystem abgeleitet.

Tabelle 13: Anforderungen an ein Magnetlagersystem (nach [S5])

- Lagesicheres Speichern einzelner magnetisierter Magnetkör-1 per Sicherstellen der Zuführ- und Entnehmbarkeit durch Reduzie-2 rung magnetischer Einflüsse innerhalb des Werkstückträgers Beschädigungen der Magnete sind unzulässig 3 Variantenflexible Speicherung von Magnetkörpern mit defi-4 nierten Maximalabmessungen Wahlfreier Zugriff auf die eingelagerten Magnetkörper 5 6 Betrieb in Geisterschichten möglich **Raumoptimierte Speicherung** 7 Integrierte 100 %-Prüfung von Magneten 8 Automatisierte Vereinzelung aus Magnetstapeln 9 Automatisiertes Stapeln der Magnete in ermittelter Reihen-10 folge Optionale Lasermarkierung von Magneten 11 Pufferzone zur Reduktion von Zugriffszeiten 12 Grafische Benutzeroberfläche 13
- 14 Nutzung standardisierter Werkstückträger

Um die Anforderung der Variantenflexibilität bei der Vereinzelung von Magnetkörpern aus dem Stapel zu gewährleisten, wird ein verstellbares Schachtmagazin eingesetzt (vgl. Bild 76).

Die Vereinzelung geschieht mit Hilfe eines Pneumatikzylinders durch Abscheren. Der Magnetstapel wird dabei durch die Magnetkraft auf ferromagnetische Rollen am Boden des Magazins gezogen. Die Verstellung des Schachtes sowie der Abtrennkante kann optional mit Hilfe von Servoantrieben automatisiert erfolgen, sofern das Magnetlager gleichzeitig verschiedene Magnetvarianten bereitstellen soll.



Bild 76: Konzept zur Vereinzelung der Magnete (nach [S5])

Die geschirmte Lagerung der Magnetkörper erfolgt in Kunststoffkavitäten, die mit einer ferromagnetischen Hülle versehen sind. Der Abstand des Magneten von der Blechschirmung, der durch den Kunststoffeinsatz gewährleistet wird, verringert die Kräfte beim Entnehmen der Magnete. Dadurch sind Vakuumsauggreifer für die Handhabung der Magnete einsetzbar. Die Magnetkavitäten befinden sich auf Paletten, die in einem Palettenwerkstückträger gestapelt gelagert werden können. Diese Paletten sind rollengelagert und somit automatisiert bedienbar. Jeder Palettenwerkstückträger kann von einem Regalbediengerät ein- und ausgelagert werden.



Bild 77: Einzelkomponenten des Regalsystems (nach [S5])

5.3 Hardwareimplementierung eines Lagersystems zur selektiven Magnetmontage



Bild 78: 3D-Darstellung des Umschlagportals für den Zugriff auf die einzelnen Paletten des Palettenwerkstückträgers (nach [S5])

Der Zugriff auf die einzelnen Magnetkörper erfolgt mit Hilfe eines Umschlagportals, welches die jeweilige vorgewählte Palette des Palettenwerkstückträgers bereitstellt. Der Zugriff auf die Einzelkavität erfolgt dann mit Hilfe eines Industrieroboters.



Bild 79: Bild des Demonstrators des Umschlagdocks mit Regalsystem im Hintergrund (Bild A. Mayr [S13])

Bild 79 zeigt die Position des Umschlagportals vor dem Regalbediengerät mit bereitgestelltem Palettenwerkstückträger.



Bild 80: Automatisierungslösung zum sequenzierten Stapeln der Magnete (nach [S5])



Bild 81: Layout des Lagersystems (nach [S13])

Zur sequenzierten Stapelung der Magnete nach dem Auslagern und vor der Bereitstellung an der Magnetmontagestation wird das Konzept des Schachtmagazins zur Vereinzelung wiederverwendet. Die Stapelung folgt hierbei von der Unterseite, um somit die Kräfte auf den Magneten zu minimieren und damit Beschädigungen auszuschließen. Soll ein Magnet dem Stapel zugeführt werden, wird dieser auf den Übergabeplatz des Schachtmagazins gelegt. Der vertikale Pneumatikzylinder drückt darauf den Stapel nach oben, sodass der horizontale Zustellschieber den einzelnen Magneten einführen kann. Sobald dieser Magnet sich unter dem Stapel befindet, kann der senkrechte Schieber zurückfahren und den Restweg für den Magneten freigeben.

Das Layout des gesamten Lagersystems ist in Bild 81 dargestellt. Das Material fließt dabei im Uhrzeigersinn. Nach der Zuführung des Stapels und der Vereinzelung, werden die Magnete vermessen (magnetisch, optional geometrisch) und ihnen eine Identifizierungsnummer zugeordnet. Danach werden sie optional markiert und in einer Pufferzone abgelegt. Die Pufferzone bildet die Menge, aus der der Optimierungsalgorithmus vorsortierte Sets bilden kann, die dann in den jeweiligen Paletten abgelegt werden.

Der Einlagerungsprozess beinhaltet den Teilprozess zur Bedienung des Umschlagdocks. Sofern sich ein falscher Palettenwerkstückträger (Box) im Dock befindet, wird zunächst die ausgefahrene Palette zurückgeschoben und das Umschlagportal auf die oberste Ebene gefahren. Die oberste Ebene stellt die Ausgangsposition dar.

Beim Auslagern wird die jeweilige Palette auf diese Position gefahren, da so alle Kavitäten erreicht werden können und die Kollisionsgefahr minimiert wird.

Vor der Entnahme aus dem Lagersystem wird dann gegebenenfalls überprüft, ob der jeweilige Stapel optimal zusammengestellt ist, oder ob eine bessere Kombination gefunden werden kann. Das Auslagern erfolgt dann nach dem Stapeln in vorgegebener Sequenz.

Der Betrieb und die Konfiguration des Lagersystems kann mit Hilfe der Benutzerschnittstelle überwacht und vorgenommen werden. Diese grafische Benutzeroberfläche, erlaubt den Zugriff auf alle Funktionen des Lagersystems und stellt somit eine zentrale Schnittstelle in der äußerst heterogenen Steuerungsumgebung des Lagersystems dar.



Bild 82: Übersicht Prozess Magneteinlagerung (nach [S13])

Der automatische Zyklus ermittelt alle Magnetparameter, wie geometrische Abmaße, das magnetische Moment sowie die Seriennummer des Magneten und gibt diese auf der Oberfläche aus. An dieser Stelle ist ebenso die Anbindung an ERP und ME-Systeme vorgesehen. Der manuelle Einrichtbetrieb erlaubt den Zugriff auf sämtliche Einzelkomponenten und gibt auch Signalwerte und Zustände aus. Die Benutzeroberfläche ist so gestaltet, dass alle notwendigen Konfigurationen sehr einfach vorgenommen werden können. Der manuelle Modus erlaubt es, z.B. den Roboter an voreingestellte Positionen zu bewegen, die Umschlageinrichtung mit allen Komponenten zu bewegen und zu Debugging-Zwecken, die Status sämtlicher Antriebe und Endschalter einzusehen (vgl. Bild 85). Die eingesetzte Steuerung erlaubt ebenso einen Zugriff über ein Web-Interface und ermöglicht so die Nutzung über mobile Endgeräte.



Bild 83: Übersicht Teilprozess Einzelmagnete in Regalsystem einlagern (nach [S13])

Der realisierte Aufbau dient der grundlegenden Demonstration des Konzeptes. Die mit dem Lagerdemonstrator erzielbare Taktzeit wird durch die sequenzielle Schrittfolge und die Geschwindigkeit der Einzelkomponenten begrenzt.



Bild 84: Übersicht Prozess Magnetauslagerung (nach [S13])

0	Aut								
/ereinz auto	elungs- omat	Geometri Messsy	sches stem	Magnetis Messsys	ches tem	Lasermarker	Roboter	E Contraction of Cont	A
Pu	ffer	Umsch einricht	lag- ung	Regalsys	tem	Stapelautomat			
Jmsch	nlagdocl	k			Umso	hlagportal ——			
0	Box in	Umschlagdo	ck			Spindel oben		Fahre zu Ebene:	9
0	Box in	Arretierungsp	osition			Spindel unten			8
					0	Schrittmotor St	atus Bereit		7
0	Arretie	rungshaken a	lusgefahr	en		Schrittmotor St	atus Fahrend		6
	Arretier	rungshaken e	ingefahre	'n		Schrittmotor St	atus Fehler		5
0	Arretie	rungshaken a	iusfahren	0	0	Refernzfahrt st	tarten		4
0	Arretie	rungshaken e	infahren						3
									2
	0	Förderband	Auslager	'n					1
	0	Förderband	Einlagen	n		Ausziehschlitte	n vorgeschoben		
	0	Förderband	stoppen		0	Ausziehschlitte	n zurückgeschoben		
					0	Ausziehschlitte	en vorschieben		
					0	Ausziehschlitte	n zurückschieben		

Bild 85: Bedienoberfläche des Lagersystems – Beispiel Umschlageinrichtung (nach [S13])
Zur Abschätzung der mit dem Demonstratoraufbau möglichen Taktzeit wird eine Beispielsequenz zu Grunde gelegt. Ausgehend von der maximalen Kapazität des in Bild 77 beschriebenen Palettenwerkstückträgers, allgemein als "Box" bezeichnet, werden im Puffer dementsprechend 192 Plätze vorgesehen.

Es ergeben sich für das Einlagern von Magneten vier und für das Auslagern drei Teilzyklen. Der erste Teilzyklus stellt die Schrittfolge für das Vereinzeln und Vermessen von Einzelmagneten, sowie den Transfer in den Puffer dar, dargestellt für einen einzelnen Magneten in Bild 86.

				Zyk	lus 14,6 s	6	
		Magnetische Vermessung 2 s		_	I]
Magnet in Puffer		Transfer	3,8 s				
	fer	Puffer		o s			
	Juf	Transfer (leer)		2 S			
	nF	Geometrische Vermessung		2 S			
	Magnet i	Transfer			2,9 S		
		Magnetische Vermessung				2 S	
		Transfer (leer)				2 S	
		Vereinzeler				1 S	
\neg		Transfer					3,9 S
		Geometrische Vermessung					

Bild 86: Schrittfolge für das Zuführen eines Einzelmagneten in den Puffer

Zunächst wird ein Magnet von der Station ,magnetische Vermessung' in den Puffer transferiert. Darauffolgend kann der nächste Magnet von der Station ,geometrische Vermessung' zur magnetischen Vermessung durch den Roboter nachgerückt werden. Ein aus dem zugeführten Stapel vereinzelter Magnet kann nun vom Vereinzeler zur geometrischen Vermessung transferiert werden. Die beiden Messprozesse werden parallel zu den Transferprozessen durchgeführt. Der Zyklus beginnt für den nächsten Magneten von vorn. Die resultierende Zykluszeit beträgt 14,6 s und wird maßgeblich von den vielen Handhabungsoperationen des Roboters bestimmt.

Nach dem Füllen des Puffers werden aus dem Inhalt kompensierte Magnetsätze gebildet, die Palettenweise eingelagert werden, um die nötigen Lagerbewegungen zu minimieren. Mit dem Inhalt des Puffers kann eine Palette gefüllt werden. Der Zyklus für den Transfer eines Magneten in eine Palette, die sich auf dem Umschlagdock befindet, beträgt 5,9s. Da eine Palette 24 Magnetkavitäten besitzt, muss nach 24 Magneten die Palette gewechselt werden. Dazu schiebt das Umschlagdock die gefüllte Palette in die Box zurück, verfährt die Ausziehplattform zur nächsten Ebene und zieht eine leere Palette heraus. Die Zeiten für das Transferieren des Magneten auf den Stapelautomaten sind identisch, da beide Schrittfolgen bis auf die Station ,Puffer' identisch sind. Die Zeiten für die Einzelschritte sind in Bild 87 dargestellt.



Zyklus 6,5 s

Bild 87: Schrittfolge für das Aus- und Einlagern von Magneten

Nach dem Einlagern von 192 Magneten beginnt der Zyklus für das Wechseln der Box. Dabei wird die Box vom Umschlagdock auf das Regalbediengerät (RBG) transferiert. Das RBG bewegt die Box zum vorgesehenen Lagerplatz und befördert diese in das Regal. Zum Auslagern wird der nächste Regalplatz angefahren, eine Box austransferiert und diese zum Umschlagdock befördert. Als Zeit für das Bewegen des RBGs wird ein Durchschnittswert angenommen. Die Zykluszeit beträgt hierfür 29,6 s. Der Ablauf ist in Bild 88 dargestellt.

Das Einlagern eines Magneten besteht aus dem Vereinzeln und Vermessen des Magneten, dem Transfer in den Puffer, dem sortierten Einlagern ins Regal, dem Wechseln der Palette sowie dem Wechseln der Box. Beim Auslagern entfällt das Vermessen.



Bild 88: Schrittfolge für das Wechseln einer Box

Die Gegenüberstellung der Zykluszeiten für das Ein- und Auslagern von Magneten in das Lagersystem in Bild 89 zeigt, dass das Vermessen und damit das Füllen des Puffers den Flaschenhals darstellt und damit taktzeitbestimmend wird. Die Taktzeit für einen einzelnen Magneten ergibt sich somit zu rund 28 s.



Bild 89: Zykluszeiten für das Ein- und Auslagern von 192 Einzelmagneten

Eine Reduktion der Taktzeit ist mit Hilfe von Pick-and-Place-Achsen für den Transfer zwischen dem Vereinzeler, der geometrischen Vermessung und der magnetischen Vermessung möglich. Dadurch, dass der Knickarmroboter dann nur noch zwischen der Station "magnetische Vermessung" und dem Puffer transferieren muss, sinkt die Gesamttaktzeit auf rechnerisch 12,1 s. Durch den Einsatz eines schnelleren Roboters, der eine Gesamttransferzeit (Magnet aufnehmen und Absetzen, sowie Leertransfer) von 3 s ermöglicht, sinkt die Taktzeit weiter auf 6,4 s. Durch Parallelisierung von Vermessung und Einlagerung in die Box, ist eine weitere Reduktion auf rund 3,5 s möglich. Dazu sind ein zweiter Roboter sowie eine Doppelung des Puffers erforderlich. Die beiden Puffer müssen dann ebenso automatisch getauscht werden können.

5.3.2 Architektur der Lagerdatenbank

Das Lagersystem basiert softwareseitig auf Datenbanken, deren Struktur sich sowohl am Hardwareaufbau als auch an den Anforderungen der in 5.2.1 beschriebenen Kompensationsalgorithmen orientiert. Das realisierte Beispiel handhabt in erster Linie die beschriebenen Boxen, also die standardisierten Werkstückträger, die mit einem Zusatzaufbau mit 8 Paletten (Pallet) à 24 Kavitäten (Entry) versehen wurden. Eine Box entspricht hier ebenso dem Lagerplatz im automatisierten Kleinteilelager.

Die festgelegten Attribute der Datenbank MagnetLog beschreiben die für die selektive Montage notwendigen physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Magneten sowie seinen Lagerort als Tupel der Datenbank. Zusätzlich enthält das Schema das Attribut ,assignmentFlag', das seinen Wert abhängig davon ändert, ob der jeweilige Magnet bereits eingelagert wurde, oder sich noch im Eingangspuffer befindet. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Attribute ist Tabelle 14 zu entnehmen.

Da aus der Datenbank MagnetLog nicht hervorgeht, wo sich die jeweilige Box im Lager befindet, wird eine zweite, kompaktere Datenbank eingeführt. Die Datenbank BoxLog beschreibt den Lagerort der Box innerhalb des Lagersystems nach Zeilen (Row) und Spalten (Column).

Das in 5.3.1 vorgestellte Lagersystem verfügt über 50 Lagerplätze für Standard Palettenwerkstückträger, die jeweils mit einer Box ausgestattet sind. Die Lagerplätze sind in Zeilen (Row) und Spalten (Column) im Regalsystem angeordnet. Die Nummerierung der einzelnen Zellen bzw. Boxen erfolgt fortlaufend beginnend von #o. Aus der Box-Datenbank BoxLog (vgl. Bild 90) wird dann die Relation der jeweiligen Zelle bzw. BoxID zur Position im Lager dargestellt. Dies ist erforderlich, da die Entfernung der jeweiligen Boxen zueinander einen signifikanten Einfluss auf die Zugriffszeit hat. Wichtig für die Zugriffsplanung ist weiterhin die Nullposition des Regalbediengerätes, die im Beispiel mit Zeile 4 (Beginnend von o) und Spalte 4 festgelegt ist. Dies entspricht der hardwareseitig festgelegten Position des Umschlagdocks (vgl. Bild 81).

5.3 Hardwareimplementierung eines Lagersystems zur selektiven Magnetmontage

Spalte	Beschreibung			
MagnetID	ID des betreffenden Magnetkörpers (hier als integer Wert abgebildet)			
Angle_beta	Winkelkomponente β der Abweichung			
Angle_alpha	Winkelkomponente α der Abweichung			
PalletNum	Palettennummer der Palette, auf der sich der Mag- net befindet (von o bis 7)			
Entry	Position der Einzelkammer auf der Palette in Form eines 1D-Arrays (von o bis 23)			
BoxNum	ID der Box, in der sich der Magnet befindet			
Magnitude	Betrag des magnetischen Momentenvektors des Magneten			
y_vector	Skalar-Wert der Y-Komponente der Abweichung <i>y_{vec}</i>			
x_vector	Skalar-Wert der X-Komponente der Abweichung x_{vec}			
assignmentFlag	Flag wird auf 1 gesetzt, sobald der Magnet eingela- gert wurde, bei dem Wert o befindet er sich noch in der Pufferzone (nicht zugeordnet)			

Tabelle 14: Beschreibung der Datenbank MagnetLog (nach [S22])

Innerhalb einer Box wird die Magnetposition durch die Palettennummer (o bis 7) und die Kammernummer (o bis 23) präzisiert. Da der Abstand der einzelnen Kammern voneinander verglichen mit dem Abstand der einzelnen Boxen sehr viel kleiner und damit auch die Zugriffszeit kurz ist, wird hier auf eine erneute Unterteilung in Zeilen und Spalten verzichtet. Ebenso wird die Zugriffsplanung auf die einzelnen Kammern innerhalb einer Palette nicht weiter zeitoptimiert durchgeführt. Diese Informationen werden der Magnet-Datenbank MagnetLog entnommen.



Bild 90: Erläuterung von BoxLog anhand der abstrahierten Darstellung des Lagersystems (nach [S12])

5.3.3 Dimensionierung des Lagersystems für ein Beispielszenario

Bei der Dimensionierung eines Lagersystems muss vor allem der Magnetbedarf und auch die Wiederbeschaffungszeit berücksichtigt werden. Für die Berechnung des Magnetbedarfs wird im Folgenden ein Beispielszenario zu Grunde gelegt. Das Szenario beschreibt die Bestückung von Magnetträgern für einen fiktiven Baukasten von Industriemotoren. Der Baukasten sieht sechs verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Polzahlen vor. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass alle Varianten mit demselben Magnettyp bestückt werden. Hierbei wird berücksichtigt, dass zur Vermeidung von Wirbelströmen im Magneten, die einzelnen Magnetkörper nur eine bestimmte maximal zulässige Länge aufweisen dürfen. Längere Varianten werden demnach durch den Einsatz von mehreren Magneten pro Pol abgedeckt. Die Durchmesservarianz wird durch eine Erhöhung der Polzahl gewährleistet. Als maximal zur Verfügung stehende Arbeitszeit werden 4.500 Stunden pro Jahr bei 12 Schichten je Woche angenommen. Eine Schicht dauert 7,5 Stunden. Die restlichen 9 Schichten der Woche stehen als Geisterschichten ohne Personal zur Verfügung. Das Beispiel folge dem Stückzahlszenario aus Tabelle 15.

Motor- typ	Pole	Mag- nete pro Pol	Magnete gesamt	Stück- zahl pro Jahr	Stückzahl pro Wo- che	Magnete pro Wo- che	Mag- nete pro Stunde	Takt- zeit pro Mag- net
1	8	3	24	9.000	180	4.320	48	
2	12	3	36	13.500	270	9.720	108	
3	20	3	60	4.500	90	5.400	60	
4	8	8	64	6.750	135	8.640	96	
5	12	8	96	9.000	180	17.280	192	
6	20	8	160	4.500	90	14.400	160	
	SU	MME		47.250	945	59.760	664	5,4 s

Tabelle 15: Stückzahlszenario zur Dimensionierung des Lagersystems

Bei einer angenommenen Wiederbeschaffungszeit von einer Woche ist demnach eine Gesamtkapazität des Lagers von rund 60.000 Magnetkörpern erforderlich, um die jährlich geplante Stückzahl von 47.250 Motoren fertigen zu können. Daraus resultiert eine Taktzeit von rund 5 s pro Magnet.

	Stückzahl	Einzelpreis	Kosten
Regalbediengerät	1	40.000,00 €	40.000,00 €
Roboter	2	50.000,00 €	100.000,00€
Geometrische Vermessung	1	15.000,00 €	15.000,00 €
Magnetische Vermessung	1	18.000,00 €	18.000,00 €
Regalhardware	1	10.000,00 €	10.000,00€
Box mit 8 Paletten	50	1.200,00€	60.000,00 €
Pick-and-Place-Achsen	2	2.500,00 €	5.000,00€
Vereinzeler/Stapeleinrichtung	2	2.000,00€	4.000,00€
Palettiergerät	2	10.000,00€	20.000,00€
Pufferwechseleinrichtung	1	5.000,00 €	5.000,00€
Umschlagdock	1	7.000,00 €	7.000,00€
Steuerung + HMI	1	20.000,00€	20.000,00€
Aufbau und Inbetriebnahme	1	15.000,00 €	15.000,00 €
SUMME			319.000,00€

Tabelle 16: Investitionskosten für ein Lagersystem (Beispiel)

Um diese Taktzeit zu erreichen, sind die in Abschnitt 5.3.1 vorgeschlagenen Anpassungen mit zu berücksichtigen. Dies betrifft Pick-and-Place-Achsen zwischen dem Vereinzeler und den Vermessungsstationen, zwei schnellere Roboter, vorzugsweise mit SCARA-Kinematik, da keine Schwenkbewegungen erforderlich sind, zwei Puffer mit Transfersystem, um das Vermessen und das Einlagern der Magnete zu parallelisieren sowie jeweils ein Palettiergerät vor dem Vereinzeler und dem Stapelautomaten, um das Lager in den Geisterschichten vollautomatisiert füllen zu können und Wegzeiten bei der Entnahme der kompensierten Magnetsätze zu sparen. Somit ergeben sich die Investitionskosten überschlägig wie in Tabelle 16 dargestellt zu 319.000 €.

			Kosten pro Jahr	Kosten je Stunde
Anschaffungskosten		319.000,00 €	-	-
Wiederbeschaffungs- wert	+ 21%	385.990,00 €	-	-
Nutzungsdauer in Jahren		7,00	-	-
Laufzeit pro Jahr		7000,00 h	-	-
Kalkulatorische Abschr	55.141,43€	7,88 €		
Kalkulatorische Zinsen	10%		15.950,00€	2,28€
Fixe mittlere Leis- tungsaufnahme	1 kW	o,17 €/Std	1.190,00 €	0,17€
Variable mittlere Leistungsaufnahme	3 kW	o,17 €/Std	3.570,00 €	0,51€
Druckluft und Schmiermittel			2.000,00 €	0,29€
Flächenmiete pro Jahr	50 m ²	17,30 €/m²	10.380,00 €	1,48€
Instandhaltungskos- ten	3%		1.654,24 €	0,24€
Personalbedarf	5%	40,00 €/Std	14.000,00 €	2,00 €
SUMME			103.885,67 €	14,84 €

Tabelle 17: Jährliche Kosten des Lagersystems

Den Investitionskosten stehen die jährlichen Betriebskosten des Lagersystems gegenüber. Diese werden auf Basis einer jährlichen Laufzeit des Lagersystems von 7000 Stunden berechnet. Diese Laufzeit entspricht einem Dreischichtbetrieb an 7 Tagen pro Woche bei einer Anlagenverfügbarkeit von 80 %. Mit der Bedienung des Lagersystems und für die Material Zu- und Abfuhr wird ein Mitarbeiter 350 Stunden (5% der Maschinenlaufzeit) pro Jahr beschäftigt sein. Die Betriebskosten des Lagersystems berechnen sich, wie in Tabelle 17 dargestellt.

Die jährlichen Betriebskosten einschließlich der Abschreibung des Lagersystems für die selektive Magnetmontage (SMM), erhöhen die Herstellkosten (HK) der Motoren. Ausgehend von der im vorgestellten Beispielszenario (vgl. Tabelle 15) angenommenen Stückzahl von 47250 Motoren pro Jahr und durchschnittlichen Herstellkosten inklusive der Materialkosten von 150 € pro Motor. Somit errechnet sich der Anteil der Kostenerhöhung durch das Lagersystem wie folgt:

Tabelle 18: Anteil der durch selektive Magnetmontage verursachten Herstellkosten
--

Stückzahl Motoren pro Jahr	47250
Durchschnittliche HK pro Motor	150,00 €
Gesamte HK pro Jahr	7.087.500,00 €
Betriebskosten Magnetregal pro Jahr	103.885,67€
HK Erhöhung durch SMM pro Motor	2,20 €
Anteil SMM an HK	1,5%

Die Betriebskosten des Lagersystems werden auf die jährliche Stückzahl der produzierten Motoren umgelegt und betragen somit 2,20 € pro Motor. Dies entspricht einer Erhöhung der Herstellkosten um 1,5 %. Demgegenüber stehen sowohl geringere Materialkosten durch günstigere Magnete sowie eine Verringerung des Rastmomentes. Bei dem in Abschnitt 4 betrachteten Versuchsmotor in Halbach-Konfiguration konnte das Rastmoment durch selektive Magnetmontage um 24 % reduziert werden gegenüber einer zufälligen Magnetauswahl aus derselben Magnetcharge mit im Marktvergleich durchschnittlicher Magnetqualität. Der Einkaufspreis der vorliegenden Magnetcharge beträgt 30 % von dem einer Charge der besten am Markt verfügbaren Qualität. Dies bedeutet bei 64 Magneten pro Rotor und einem Einkaufspreis von 0,60 € für einen Magneten der höchsten Qualität mit minimalen Winkelabweichungen eine Einsparung von 26,88 € bei der Verwendung von Magneten mit einem Einzelpreis von 0,18 € mit durchschnittlicher Qualität. Dieses Optimierungspotential ist jedoch von der Motorkonfiguration abhängig und muss in Versuchen ermittelt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Fertigung von permanenterregten Rotorbaugruppen und Fehlermöglichkeiten dieser Prozesskette. Dazu werden Möglichkeiten zur Fehlererkennung beschrieben und die Kompensation dieser Fehler durch selektive Magnetmontage beleuchtet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Reduktion des Rastmomentes, da dieser Parameter in der Literatur als besonders wichtig eingestuft wird und neben der Regelbarkeit von Servoantrieben insbesondere für die von einer elektrischen Maschine verursachten Schwingungen verantwortlich ist (vgl. Abschnitt 2.3). Das Rastmoment hängt einerseits von der Motorkonfiguration und andererseits von der Winkelabweichung des magnetischen Momentenvektors der Einzelmagnete ab. Vor allem bei permanenterregten Synchronmaschinen mit eisenlosen Halbach-Rotoren können Feldverzerrungen nicht, wie beispielsweise bei eingebetteten Magneten [5], durch das Rotoreisen kompensiert werden. Dies wird ebenso durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen bestätigt. Durch die selektive Magnetmontage ist die Hebung eines enormen Kosteneinsparungspotentials durch Verwendung von günstigeren Magneten bei minimiertem Rastmoment möglich. Dies wird durch die Kompensation der Winkelabweichungen der Einzelmagnete untereinander erreicht. Dazu wird durch Berechnungsalgorithmen ein kompensierter Magnetsatz gebildet. Zur Implementierung in eine Produktionsumgebung ist ein Lagersystem erforderlich, das vollautomatisch Magnete vermessen, sortieren, speichern und als kompensierten Magnetsatz bereitstellen kann. Ein Konzeptdemonstrator eines solchen Lagersystem wird vorgestellt, die Taktzeiten ermittelt und Optimierungspotentiale identifiziert. Anhand eines Beispielszenarios, in dem ein Motorenbaukasten mit 6 verschiedenen Varianten und einer jährlichen Gesamtstückzahl von 47250 Motoren mit Hilfe der selektiven Magnetmontage gefertigt werden soll, wird das Einsparungspotential durch günstigere Magnete aufgezeigt. Die Materialkosten für hochwertige Magnete haben im Beispiel einen Anteil von 25 % an den gesamten Herstellkosten für einen Motor. Demgegenüber stehen 70 % günstigere Materialkosten für die Magnete und Mehrkosten von 1,5 % für ein vollautomatisches Lagersystem.

Das Konzept der selektiven Magnetmontage kann darüber hinaus überall dort angewendet werden, wo besonders homogene Magnetfelder gefordert sind. Dies können analytische Magnetsysteme wie beispielsweise permanentmagnetische Magnetresonanzspektrometer oder Linearantriebssysteme mit elektromagnetischer Lagerung der Schlitten sein.

Der in diesem Beispiel gewählte Ansatz zur Kompensation der Winkelabweichungen über regelbasierte Algorithmen kann, wie nachgewiesen, den geometrischen Mittelwert der Winkelabweichungen des zu montierenden Magnetsatzes deutlich reduzieren. Im betrachteten Beispiel ist durch die Verwendung eines Magnetsatzes mit einer geringen mittleren Winkelabweichung eine deutliche Reduktion des Rastmomentes der Maschine möglich. Für komplexere Anwendungen, wie zum Beispiel Magnetgetriebe [142] oder andere Motorkonzepte, die auf Permanentmagnetsystemen basieren, können Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) zu besseren Erfolgen führen. ML bietet bei nicht hinreichend zu beschreibenden Problemstellungen Vorteile, da diese Algorithmen durch Training zunächst Wechselwirkungen identifizieren und die gefundenen Parameter gezielt beeinflussen können. Für dieses Training ist idealerweise eine Menge an Magnetsystemen zu fertigen, zu testen und zu bewerten. Ferner ist ein, im Vergleich zu regelbasierten Algorithmen, höherer Rechenaufwand erforderlich. [Pio]

Denkbar ist eine Speisung des ML-Algorithmus mit Daten, die aus einem Finite-Elemente-Modell gewonnen werden, um die Zahl an physischen Magnetsystemen, die für das Training benötigt werden, und damit die Materialkosten sowie die Zeit zum Start der Produktion zu reduzieren. Dazu ist allerdings eine genaue Abbildung der Fertigungsabweichungen erforderlich. Um die Rechenzeit nicht übermäßig zu vergrößern, ist zu untersuchen, inwieweit zum Beispiel die Magnete diskretisiert werden müssen, um Abweichungen hinreichend genau darstellen zu können.

Bei gesteigerten Anforderungen an die geometrischen Toleranzen von Rotoren, ist eine spanende Endbearbeitung möglich. Dies betrifft sowohl Einzelmagnete als auch komplette Rotoren. Bei Einzelmagneten kann dies im Zusammenhang mit segmentierten Ringen notwendig sein, um die Klebespalte gleichmäßig und die Gesamttoleranz der Form und Lage klein zu halten. In diesem Fall können die Magnetsegmente vor der spanenden Bearbeitung einzeln im Impulsverfahren abmagnetisiert werden, um die Spanabfuhr zu vereinfachen, um nach der Bearbeitung wieder aufmagnetisiert zu werden. Bei ganzen Rotorbaugruppen ist dies nicht immer möglich (vgl. Abschnitt 3.2) und erfordert teilweise die Bearbeitung im magnetisierten Zustand. In beiden Fällen können durch verschiedene Bearbeitungsprozesse Gefügeveränderungen hervorgerufen werden [143]. Die Auswirkungen der Gefügeveränderungen auf die Abmagnetisierungskurve und das Magnetfeld der Einzelmagnete in Zusammenhang mit den Zerspanungsparametern in diesem teil- oder vollmagnetisierten Zustand wurden bislang noch nicht untersucht.

Die Flussdichteverteilung an der Magnetoberfläche kann durch gezielte Bearbeitung der Oberfläche beeinflusst werden. Dazu können sowohl Laserbasierte Verfahren als auch spanabhebende Verfahren eingesetzt werden. Auch hier spielen die Prozessparameter und der damit verbundene Wärmeeintrag in den Magnetkörper ein entscheidende Rolle. Ebenso sind jeweils unterschiedliche Verhalten von anisotropen und isotropen Magneten als auch von additiv hergestellten Magneten möglich. Auch hierzu konnten bisher keine detaillierteren Ergebnisse, die Aufschluss über mögliche Prozessparameter und Gefügeveränderungen geben, gefunden werden.

7 Summary and Outlook

This work gives an overview of the production of permanent magnet rotor assemblies and possible errors in the process chain. For this purpose, possibilities for error detection are described and the compensation of these errors by selective magnet assembly is illuminated. The focus of the work is on the reduction of the cogging torque, since this parameter is classified in the literature as particularly important and, in addition to the controllability of servo drives, is responsible in particular for the vibrations caused by an electrical machine (cf. section 2.3). The cogging torque depends on the one hand on the motor configuration and on the other hand on the angular deviation of the magnetic moment vector of the individual magnets. Especially in permanently excited synchronous machines with ironless Halbach rotors, field distortions cannot be compensated by the rotor iron, as is the case with embedded magnets [5]. This is also confirmed by the measurements carried out within the scope of this work. The selective magnet assembly makes it possible to raise an enormous cost saving potential by using cheaper magnets with minimised cogging torque. This is achieved by compensating for the angular deviations of the individual magnets from each other. For this purpose, a compensated set of magnets is formed by calculation algorithms. For implementation in a production environment, a storage system is required that can fully automatically measure, sort, store and provide magnets as a compensated magnet set. A concept demonstrator of such a storage system is presented, the cycle times are determined and optimisation potentials are identified. Using an example scenario, in which a motor kit with 6 different variants and a total annual quantity of 47250 motors is to be manufactured with the help of selective magnet assembly, the savings potential through cheaper magnets is shown. In the example, the material costs for high-quality magnets account for 25 % of the total manufacturing costs for a motor. In contrast, the material costs for the magnets are 70 % lower and the additional costs for a fully automatic bearing system are 1.5 %.

The concept of selective magnet assembly can also be used wherever particularly homogeneous magnetic fields are required. These can be analytical magnet systems such as permanent-magnet magnetic resonance spectrometers or linear drive systems with electromagnetic bearing of the slides.

The approach chosen in this example to compensate for the angular deviations via rule-based algorithms can, as has been demonstrated, significantly

7 Summary and Outlook

reduce the geometric mean value of the angular deviations of the magnet set to be mounted. In the example considered, the use of a magnet set with a low mean angular deviation makes it possible to significantly reduce the cogging torque of the machine. For more complex applications, such as magnetic gears [142] or other motor concepts based on permanent magnet systems, machine learning (ML) algorithms can lead to better success. ML offers advantages for problems that cannot be described sufficiently, since these algorithms can first identify interactions through training and specifically influence the parameters found. Ideally, a large number of magnet systems should be manufactured, tested and evaluated for this training. Furthermore, a higher computational effort is required compared to rulebased algorithms. [P10]

It is conceivable to feed the ML algorithm with data obtained from a finite element model in order to reduce the number of physical magnet systems needed for training and thus the material costs as well as the time to start production. However, this requires an accurate representation of the manufacturing deviations. In order not to increase the computing time excessively, it must be investigated to what extent, for example, the magnets must be discretised in order to be able to represent deviations sufficiently accurately.

If the geometric tolerances of rotors are subject to increased demands, final machining is possible. This applies to both individual magnets and complete rotors. In the case of individual magnets, this may be necessary in connection with segmented rings in order to keep the bonding gaps uniform and the overall tolerance of the shape and position small. In this case, the magnet segments can be individually pulse demagnetised prior to machining to facilitate chip removal, to be remagnetised after machining. For entire rotor assemblies, this is not always possible (cf. section 3.2) and sometimes requires machining in the magnetised state. In both cases, microstructural changes can be caused by various machining processes [143]. The effects of the microstructural changes on the demagnetisation curve and the magnetic field of the individual magnets in connection with the machining parameters in this partially or fully magnetised state have not yet been investigated.

The flux density distribution on the magnetic surface can be influenced by selective machining of the surface. Laser-based processes as well as machining processes can be used for this purpose. Here, the process parameters and the associated heat input into the magnet body play a decisive role too. Likewise, different behaviour of anisotropic and isotropic magnets as

well as additively manufactured magnets are possible. However, detailed results that provide information about possible process parameters and structural changes have not yet been found.

8 Literaturverzeichnis

- Prognose: Umsatz der Branche Herstellung von Elektromotoren, Generatoren u.Ä. in Deutschland von 2011 bis 2017 und Prognose bis zum Jahr 2023 (in Milliarden Euro) | Statista [online] [Zugriff am: 7. August 2020]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/prognosen/924940/herst-vonelektromotoren-generatoren-uae-umsatz-in-deutschland
- SCHÄFER, P. Borgwarners neuer Elektromotor HVH 146 geht 2020 in Serie [online]. springerprofessional.de, 10. Dezember 2019
 [Zugriff am: 7. August 2020]. Verfügbar unter: https://www.springerprofessional.de/elektromotor/ hybridtechnik/borgwarners-neuer-elektromotor-hvh-146-geht-2020-in-serie/17482684
- [3] Elektromotor von Siemens stellt neuen Weltrekord im Steigflug auf [online]. 17 März 2021 [Zugriff am: 17. März 2021]. Verfügbar unter: https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/elektrom otor-von-siemens-stellt-neuen-weltrekord-im-steigflug-auf
- [4] HAGEDORN, J., F. SELL-LE BLANC und J. FLEISCHER.
 Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz. Berlin: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-6624-9209-3
- [5] COENEN, I. Beitrag zur Analyse elektrischer Antriebssysteme mit toleranzbehafteten Komponenten. Vom elektromagnetischen Entwurf bis zur End-of-Line Prüfung. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2014. Aachen: Shaker, 2015. Aachener Schriftenreihe zur elektromagnetischen Energiewandlung. 18. ISBN 978-3-8440-3564-3
- [6] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung e. V. DIN IEC 60404-5, Magnetische Werkstoffe - Teil 5: Dauermagnet- (hartmagnetische) Werkstoffe - Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [7] LAMPRECHT, E., M. HOMME und T. ALBRECHT. Investigations of eddy current losses in laminated cores due to the impact of various stacking processes. In: 2012 2nd International Electric

Drives Production Conference. [Place of publication not identified]: IEEE, 2012, S. 1-8. ISBN 978-1-4673-3008-4

- [8] MANESCU, V., G. PALTANEA, H. GAVRILA und I. PETER. The influence of punching and laser cutting technologies on the magnetic properties of non-oriented silicon iron steels. In: 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). University Politehnica of Bucharest, Romania, November 28-29, 2014. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 1-4. ISBN 978-1-4799-6821-3
- FOO, C.F. und D.M. ZHANG. A resonant method to construct core loss of magnetic materials using impedance analyser. In: *PESC '98 record. [Fukuoka, Japan, May 17 22, 1998].* Piscataway, NJ: IEEE, 17. Mai 1998, S. 1997-2002. ISBN 0-7803-4489-8
- SCHNEIDER, M. und J. FRANKE. Resonant method for the measurement of quality of laminated cores. In: 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 15-16 Sept. 2015, Nuremberg, Germany. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1-6. ISBN 978-1-4673-7511-5
- [11] ABERSFELDER, S., A. HEYDER und J. FRANKE. Optimization of a servo motor manufacturing value stream by use of "Industrie 4.0". In: 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 15-16 Sept. 2015, Nuremberg, Germany. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1-5. ISBN 978-1-4673-7511-5
- [12] HEROLD, T., S. BÖHMER, D. FRANCK und K. HAMEYER. Data analysis in the production process of electrical drive systems. In:
 6. Conference on Future Automotive Technology, 2017
- SHAHIDI, A., M. HÜSING und B. CORVES. A Decentralized Structure for the Digital Shadows of Internet of Production. In: G. VENTURE, J. SOLIS, Y. TAKEDA und A. KONNO, Hg. *ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control.* Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 179-186. ISBN 978-3-030-58379-8
- [14] KRITZINGER, W., M. KARNER, G. TRAAR, J. HENJES und W. SIHN. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [online]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(11), 1016-1022. ISSN 24058963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.474

- [15] NEGRI, E., L. FUMAGALLI und M. MACCHI. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems [online]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11, 939-948. ISSN 23519789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198
- [16] LECHLER, T., J. FUCHS, M. SJAROV, M. BROSSOG, A.
 SELMAIER, F. FALTUS, T. DONHAUSER und J. FRANKE.
 Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): IEEE, 92020, S. 1773-1780. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [17] RUMBAUGH, J., I. JACOBSON und G. BOOCH. *The Unified Modeling Language reference manual*. UML ; [covers UML 2.0. 2. ed. Boston: Addison-Wesley, 2005. The Addison-Wesley object technology series. ISBN 0-3217-1895-2
- [18] WÖHL-BRUHN, H. Vergleich von Rotoren mit Oberflächenmagneten und eingebetteten Magneten. In: IMAB Jahresbericht 2005
- [19] HILZINGER, R. und W. RODEWALD. Magnetic materials. Fundamentals, products, properties, applications. Erlangen: Publicis Publ, 2013. ISBN 978-3-8957-8352-4
- [20] BINDER, A. *PM-Rotoren mit Oberflächen- und vergrabenen Magneten.* Darmstadt. Permanentmagnet-Synchron-Maschinen – Grundlagen des Betriebs und der Auslegung
- [21] LIN, H., D. WANG, D. LIU und J. CHEN. Influence of magnet shape on torque behavior in surface-mounted permanent magnet motors. In: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), S. 44-47
- [22] BINDER, A. Hochausgenutzte Permanentmagnet-Synchronmaschinen. Wien, 11. April 2008. Innovative elektrische Antriebe
- [23] GERLACH, T., R. STECKEL, T. HUBERT und A. KREMSER. Eddy current loss analysis in permanent magnets of synchronous machines. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2016, S. 246-252
- [24] YAMAZAKI, K., Y. FUKUSHIMA und M. SATO. Loss Analysis of Permanent-Magnet Motors With Concentrated Windings— Variation of Magnet Eddy-Current Loss Due to Stator and Rotor

Shapes [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, **45**(4), 1334-1342. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2009.2023393

- [25] HALBACH, K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material [online]. Nuclear Instruments and Methods, 1980, 169(1), 1-10. ISSN 0029554X. Verfügbar unter: doi:10.1016/0029-554X(80)90094-4
- [26] MERRITT, B.T., G.R. DREIFUERST und D.A. BENDER. Halbach Array Motor/Generators - A Novel Generalized Electric Machine. Berkeley, CA, 3. Februar 1995. Halbach Festschrift Symposium
- [27] Z. Q. ZHU, Z. P. XIA und D. HOWE. Comparative study of electromagnetic performance of alternative Halbach and conventional radially magnetized permanent magnet brushless motors. In: 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, S. 2778-2783
- [28] OFORI-TENKORRANG, J. und J.H. LANG. A comparative analysis of torque production in Halbach and conventional surface-mounted permanent-magnet synchronous motors. In: *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE:* IEEE, 1995, S. 657-663. ISBN 0-7803-3008-0
- [29] R. P. PRAVEEN, M. H. RAVICHANDRAN, V. T. SADASIVAN ACHARI, V. P. JAGATHY RAJ, G. MADHU und G. R. BINDU. Design and analysis of zero cogging Brushless DC motor for spacecraft applications. In: ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology
- [30] WANG, H.T., S.H. FANG, B.C. GUO und H.Y. LIN. A new Halbach arc permanent magnet synchronous motor with threedimensions air gap used on large telescope. In: 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD): IEEE, 20. November 2015 - 23. November 2015, S. 478-479. ISBN 978-1-4673-8106-2
- [31] Z. Q. ZHU, Z. P. XIA, D. HOWE, Z.Q. ZHU, Z.P. XIA und D. HOWE. Comparison of Halbach magnetised brushless machines having discrete magnet segments or single ring magnet. In: 2002 *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*, FT7

- [32] ZHOU, Y., Y. CHEN und J.-X. SHEN. Analysis and Improvement of a Hybrid Permanent-Magnet Memory Motor [online]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, **31**(3), 915-923. ISSN 0885-8969. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEC.2015.2507262
- [33] CASSING, W., K. KUNTZE und G. ROSS. *Dauermagnete. Messund Magnetisiertechnik.* 2., neu bearb. Aufl. Renningen: expert-Verl., 2015. Kontakt & Studium. 672. ISBN 9783816932895
- KOLB, T., F. HUBER, B. AKBULUT, C. DONOCIK, N. URBAN, D. MAURER und J. FRANKE. Laser Beam Melting of NdFeB for the production of rare-earth magnets. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC): IEEE, 30. November 2016 1. Dezember 2016, S. 34-40. ISBN 978-1-5090-2908-2
- [35] HERZIG, C. und Y. MISHIN. Grain Boundary Diffusion in Metals.
 In: P. HEITJANS und J. KÄRGER, Hg. *Diffusion in Condensed Matter*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 337-366.
 ISBN 3-5402-0043-6
- [36] FUJIMURA, KAZUMASA. RFEB-BASED MAGNET AND METHOD FOR PRODUCING RFEB-BASED MAGNET. Erfinder: K. FUJIMURA. Anmeldung: 26. Juni 2018. EP 3 425 643 A1
- [37] RODEWALD, W. Rare-earth Transition-metal Magnets. In: H. KRONMÜLLER und S. PARKIN, Hg. *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. ISBN 0-4700-2217-5
- [38] SCHULTZ, L., J. WECKER und E. HELLSTERN. Formation and properties of NdFeB prepared by mechanical alloying and solidstate reaction [online]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **61**(8), 3583-3585. ISSN 0021-8979. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.338708
- [39] DAVIS, R.F. Hot Isostatic Pressing. In: Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials: Elsevier, 1991, S. 210-215. ISBN 978-0-0803-4720-2
- [40] MORRIS, K.J. Cold Isostatic Pressing. In: Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials: Elsevier, 1991, S. 84-88. ISBN 978-0-0803-4720-2
- [41] MURTHY, S., B. DEROUANE, B. LIU und T. SEBASTIAN. Minimization of torque pulsations in a trapezoidal back-EMF permanent magnet brushless DC motor. In: 1999 IEEE Industry

Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), S. 1237-1242

- [42] GIERAS, J.F. und M. WING. Permanent magnet motor technology. Design and applications. New York: Marcel Dekker, 2002. Electrical engineering and electronics. 113. ISBN 0-8247-0739-7
- [43] SAGAWA, M., H. NAGATA, T. WATANABE und O. ITATANI.
 Rubber isostatic pressing (RIP) of powders for magnets and other materials [online]. *Materials & Design*, 2000, 21(4), 243-249. ISSN 02613069. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0261-3069(99)00084-9
- [44] FERRANTE, M., E. de FREITAS und V. SINKA. The mechanism of magnetic alignment in hot rolled Nd–Fe–B magnets [online]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1998, 188(1-2), 125-137. ISSN 03048853. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0304-8853(98)00057-2
- [45] WYSŁOCKI, J.J. Domain structure of the arc-plasma sprayed Nd-Fe-B anisotropic permanent magnet [online]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1992, 104-107, 363-364. ISSN 03048853. Verfügbar unter: doi:10.1016/0304-8853(92)90835-C
- [46] WILLSON, M.C. und R.J. JANOWIECKI. Plasma sprayed samarium-cobalt permanent magnets. In: *AIP Conference Proceedings:* AIP, S. 689-690
- [47] URBAN, N., F. HUBER und J. FRANKE. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (E/DPC). Proceedings : December 5th-6th, 2017, Wuerzburg, Germany. [Piscataway, New Jersey]: IEEE, 2017, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-1069-5
- [48] URBAN, N., A. KUHL, M. GLAUCHE und J. FRANKE. Additive Manufacturing of Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets. In: 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Proceedings : 4 and 5 December 2018, Schweinfurt, Germany. [Piscataway, New Jersey]: IEEE, 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-7281-0148-4
- [49] STOLL, J., B. KEMPER und G. LANZA. Throughput analysis and simulation-based improvement of baked varnish stacking for automotive electric drives. In: *Electric Drives Production*

Conference (EDPC), 2014 4th International: IEEE, 30. September 2014 - 1. Oktober 2014, S. 1-6. ISBN 978-1-4799-5009-6

- [50] FRANKE, J., J. TREMEL und A. KÜHL. Innovative developments for automated magnet handling and bonding of rare earth magnets. In: 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), S. 1-5
- [51] GASPARIN, L., A. CERNIGOJ, S. MARKIC und R. FISER.
 Additional Cogging Torque Components in Permanent-Magnet
 Motors Due to Manufacturing Imperfections [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(3), 1210-1213. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2009.2012561
- [52] GASPARIN, L. und R. FISER. Impact of manufacturing imperfections on cogging torque level in PMSM. In: 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, S. 1055-1060
- [53] VOLLMER, U. *Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge.* Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2012
- [54] LEE, C.J. und G.H. JANG. Development of a New Magnetizing Fixture for the Permanent Magnet Brushless DC Motors to Reduce the Cogging Torque [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10), 2410-2413. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2154306
- [55] HAMLER, A. und B. HRIBERNIK. Impact of shape of stator pole of one phase brushless motor on cogging torque [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(3), 1545-1548. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.497545
- [56] HUANG, S., J. ZHANG, J. GAO und K. HUANG. Optimization the Electromagnetic Torque Ripple of Permanent Magnet Synchronous Motor. In: 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), S. 3969-3972
- BIANCHINI, C., F. IMMOVILLI, E. LORENZANI, A. BELLINI und M. DAVOLI. Review of Design Solutions for Internal Permanent-Magnet Machines Cogging Torque Reduction [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(10), 2685-2693. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2012.2199509

- [58] BIANCHI, N. und S. BOLOGNANI. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(5), 1259-1265. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2002.802989
- [59] BRETON, C., J. BARTOLOME, J.A. BENITO, G. TASSINARIO, I. FLOTATS, C.W. LU und B.J. CHALMERS. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent-magnet brushless motors [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(5), 3819-3823. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.908386
- [60] GUO, Z., L. CHANG und Y. XUE. Cogging torque of permanent magnet electric machiens: An overview. In: 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, S. 1172-1177
- [61] ROBERT BOSCH GMBH. Elektrische Maschine mit einem Rotor mit reduziertem Rastmoment. Erfinder: Torsten Wilharm. WO2012116853 A1
- [62] HEMMATI, S., S. SHOKRIKOJOORI, R. GHOBADI und M.I. GHIASI. A practical approach to cogging torque reduction in a Permanent Magnet Synchronous Motor using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. In: 4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, S. 88-92
- [63] KIM, K.-S., S.-J. LEE, S.-G. CHO, J. JANG, T. LEE, J.-P. HONG und S.-I. KIM. Multi-response Taguchi robust design of back electromotive force and cogging torque considering the manufacturing tolerance for electric machine. In: 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), S. 379-387
- [64] WANG, D., X. WANG und S.-Y. JUNG. Cogging Torque Minimization and Torque Ripple Suppression in Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines Using Different Magnet Widths [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(5), 2295-2298. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2013.2242454
- [65] KOH, C.S., B.-K. KANG, J.-S. RYU und J.-S. SEOL. The effects of the distribution of residual magnetization on the cogging torque and switching signals in permanent magnet (PM) motors

[online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, **38**(2), 1217-1220. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.996311

- [66] RUANGSINCHAIWANICH, S., Z.Q. ZHU und D. HOWE. Influence of magnet shape on cogging torque and back-emf waveform in permanent magnet machines. In: 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 284-289 Vol. 1
- [67] ZHAO, W., T.A. LIPO und B.-I. KWON. A Novel Dual-Rotor, Axial Field, Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent Magnet Machine With High-Torque Performance [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, **51**(11), 1-4. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2015.2445926
- [68] LANGER, U., P. GANGL, W. AMRHEIN, G. BRAMERDORFER und A. FOHLER. Determination of the cogging torque sensitivity of brushless permanent magnet machines due to changes of the material characteristics of ferromagnetic components. In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), S. 272
- [69] HERRANZ GRACIA, M. Methoden zum Entwurf von robusten Stellantrieben unter Berücksichtigung fertigungsbedingter Abweichungen. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2008.
 Aachen: Shaker, 2009. Aachener Schriftenreihe zur elektromagnetischen Energiewandlung. 6. ISBN 978-3-8322-7966-0
- [70] KANG, G.-H. und J. HUR. Analytical prediction and reduction of the cogging torque in interior permanent magnet motor. In: 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, S. 1620-1624
- [71] YAMAGUCHI, S., A. DAIKOKU und N. TAKAHASHI. Cogging torque calculation considering magnetic anisotropy for permanent magnet synchronous motors [online]. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2004, **23**(3), 639-646. ISSN 0332-1649. Verfügbar unter: doi:10.1108/03321640410540548
- [72] HWANG, S.-M. und K.-T. KIM. Effects of segmented poles on motor performances [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(5), 3712-3714. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.800640

- [73] KOH, C.S., H.S. YOON, K.W. NAM und H.S. CHOI. Magnetic pole shape optimization of permanent magnet motor for reduction of cogging torque [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33(2), 1822-1827. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.582633
- [74] NAKANO, M., Y. MORITA und T. MATSUNAGA. Reduction of cogging torque due to production tolerances of rotor by using partially placed dummy slots in axial direction. In: 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), S. 5579-5586
- [75] NAKANO, M., Y. MORITA und T. MATSUNAGA. Reduction of Cogging Torque Due to Production Tolerances of Rotor by Using Dummy Slots Placed Partially in Axial Direction [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(6), 4372-4382.
 ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2015.2443110
- [76] W. REN und Q. XU. A Novel Technique of Cogging Torque Reduction in Mass-produced Surface-mounted Permanent Magnet Motor Using Tooth Notching Pairing. In: 2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)
- [77] DORRELL, D.G. und M. POPESCU. Odd Stator Slot Numbers in Brushless DC Machines—An Aid to Cogging Torque Reduction [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10), 3012-3015.
 ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2157093
- BORGHI, C.A., D. CASADEI, A. CRISTOFOLINI, M. FABBRI und G. SERRA. Minimizing torque ripple in permanent magnet synchronous motors with polymer-bonded magnets [online].
 IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2), 1371-1377. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.996027
- [79] K. J. KANG, G. H. JANG und S. J. SUNG. Characteristics of BEMF, cogging torque and UMF in a HDD spindle motor due to magnetization of PM. In: 2012 Digest APMRC
- [80] CHEN, Z., C. XIA, Q. GENG und Y. YAN. Modeling and Analyzing of Surface-Mounted Permanent-Magnet Synchronous Machines With Optimized Magnetic Pole Shape [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, **50**(11), 1-4. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2014.2327138
- [81] YANG, Y., X. WANG, C. ZHU und C. HUANG. Reducing cogging torque by adopting isodiametric permanent magnet. In: 2009 4th

IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, S. 1028-1031

- [82] SARAVANAN, S., M.A.N. DOSS, S. JEEVANANTHAN und S. VIDYASAGAR. Reduction of cogging torque by adopting semi circled permanent magnet. In: 2011 Ist International Conference on Electrical Energy Systems, S. 149-153
- [83] CHABCHOUB, M., I. BEN SALAH, G. KREBS, R. NEJI und C. MARCHAND. PMSM cogging torque reduction: Comparison between different shapes of magnet. In: 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), S. 206-211
- [84] CHEN, N., S.L. HO und W.N. FU. Optimization of Permanent Magnet Surface Shapes of Electric <newline/>Motors for Minimization of Cogging Torque Using FEM [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(6), 2478-2481. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2010.2044764
- [85] LIN, Y.-K., Y.-N. HU, T.-K. LIN, H.-N. LIN, Y.-H. CHANG, C.-Y. CHEN, S.-J. WANG und T.-F. YING. A method to reduce the cogging torque of spindle motors [online]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 209(1-3), 180-182. ISSN 03048853. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0304-8853(99)00681-2
- YAO, Y.D., D.R. HUANG, J.C. WANG, S.J. WANG, T.F. YING und D.Y. CHIANG. Study of a high efficiency and low cogging torque spindle motor [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(2), 465-467. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.667793
- [87] BAE, J., S.-J. KIM, S.-C. GO, H.-W. LEE, Y.-D. CHUN, C.-J. REE und J. LEE. Novel Configuration of the Magnetizing Fixture for a Brushless Permanent-Magnet Motor [online]. *IEEE Transactions* on Magnetics, 2009, 45(6), 2807-2810. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2009.2018665
- [88] KOH, C.S. und J.-S. SEOL. New cogging-torque reduction method for brushless permanent-magnet motors [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, **39**(6), 3503-3506. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2003.819473
- [89] AMANO, H., Y. ENOMOTO, M. ITO, R. MASAKI, M. MASUZAWA und M. MITA. Characteristics of a Permanent-

Magnet Synchronous Motor with a Dual-Molding Permanent-Magnet Rotor. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, S. 1-7

- [90] PUGH, G. Selective assembly with components of dissimilar variance [online]. Computers & Industrial Engineering, 1992, 23(1-4), 487-491. ISSN 0360-8352. Verfügbar unter: doi:10.1016/0360-8352(92)90167-i
- [91] KUMAR, M.S. und S. KANNAN. Optimum manufacturing tolerance to selective assembly technique for different assembly specifications by using genetic algorithm [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **32**(5-6), 591-598. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-005-0337-x
- [92] B. HOFMANN, M. MASUCH, P. KÜMMETH, J. FRANKE, P. FREY und M. MERKLEIN. In-line strategies and methods to reduce balancing efforts within rotor production for electric drives. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2016, S. 27-31
- [93] PETER, M. Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung. Herzogenrath: Shaker, 2018. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe. 213. ISBN 3-8440-5925-3
- [94] PETER, M. und J. FLEISCHER. Optimized magnet assembly algorithms for reduced rotor unbalance: New rotor balancing strategy by measuring the weight of each magnet and placing it according to an algorithm. In: 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 15-16 Sept. 2015, Nuremberg, Germany. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1-5. ISBN 978-1-4673-7511-5
- [95] M. PETER und J. FLEISCHER. Rotor balancing by optimized magnet positioning during algorithm-controlled assembly process: Selection and assembly of rotor components minimizing the unbalance. In: 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2014, S. 1-4
- [96] W. WÖßNER, J. STOLL, M. O. FLAMMER, P. WURSTER, M. PETER und J. FLEISCHER. Intelligent Rotor Assembly Enabling Positive Balancing Concepts for High-Performance Permanent

Magnet Rotors. In: 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2018, S. 1-6

- [97] YOON, T. Magnetically induced vibration in a permanentmagnet brushless DC motor with symmetric pole-slot configuration [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(6), 2173-2179. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2005.848321
- [98] HONG, J.-P., S.-I. KIM, J.-M. KIM und M.-H. YOON. Analysis of cogging torque caused by manufacturing tolerances of surfacemounted permanent magnet synchronous motor for electric power steering [online]. *IET Electric Power Applications*, 2016, 10(8), 691-696. ISSN 1751-8660. Verfügbar unter: doi:10.1049/ietepa.2015.0641
- [99] HUR, J., D.-S. HYUN und J.-P. HONG. A method for reduction of cogging torque in brushless DC motor considering the distribution of magnetization by 3DEMCN [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(5), 3532-3535. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.717833
- [100] THIELE, M., G. HEINS und T. BROWN. Decoupling manufacturing sources of cogging torque in fractional pitch PMSM. In: 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), S. 924-929
- [101] S. J. SUNG, S. J. PARK und G. H. JANG. Cogging torque of brushless DC motors due to the interaction between unevenly magnetized permanent magnet and teeth chamfering. In: 2010 APMRC
- [102] SUNG, S.J., S.J. PARK und G.H. JANG. Cogging Torque of Brushless DC Motors Due to the Interaction Between the Uneven Magnetization of a Permanent Magnet and Teeth Curvature [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(7), 1923-1928. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2120599
- [103] BROWN, T., G. HEINS, S. HOBBS, M. THIELE und J. DAVEY. Cogging torque prediction for mass-produced axial flux PMSM stators. In: 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), S. 206-211
- [104] KHAN, M.A., I. HUSAIN, R. ISLAM und J. KLASS. Design of experiments to address manufacturing tolerances and process

variation influencing cogging torque and back EMF in the mass production of the permanent magnet synchronous motors. In: 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), S. 3032-3039

- [105] ISABEL COENEN, MICHAEL VAN DER GIET und KAY
 HAMEYER. Manufacturing tolerances: Estimation and prediction of cogging torque influenced by magnetization faults. In: 2011
 14th European Conference on Power Electronics and Applications
- [106] COENEN, I., M. VAN DER GIET und K. HAMEYER.
 Manufacturing Tolerances [online]. Estimation and Prediction of Cogging Torque Influenced by Magnetization Faults. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(5), 1932-1936. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2178252
- KHAN, M.A., I. HUSAIN, M.R. ISLAM und J.T. KLASS. Design of Experiments to Address Manufacturing Tolerances and Process Variations Influencing Cogging Torque and Back EMF in the Mass Production of the Permanent-Magnet Synchronous Motors [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, **50**(1), 346-355. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2013.2271473
- QIAN, H., H. GUO, Z. WU und X. DING. Analytical Solution for Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors With Magnet Imperfections and Rotor Eccentricity [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, **50**(8), 1-15. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2014.2312179
- [109] KIM, Y.-B., H.-J. KIM, K.-T. JUNG und J.-P. HONG. Influence of manufacturing tolerances on cogging torque of IPMSM for EPS application. In: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), S. 382-386
- [110] PARK, S.-C., T.-H. YOON, B.-I. KWON, H.-S. YOON und S.-H. WON. Influence on brushless DC motor performance due to unsymmetric magnetization distribution in permanent magnet [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(4), 1898-1901. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.877817
- [11] WON, S.H., W.H. KIM und J. LEE. Effect of the Incomplete Magnetization of Permanent Magnet in the Characteristics of BLDC Motor [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009,

45(6), 2847-2850. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2009.2018691

- [112] LEE, C.J., C.I. LEE und G.H. JANG. Source and Reduction of Uneven Magnetization of the Permanent Magnet of a HDD Spindle Motor. In: 2010 APMRC
- [113] LEE, C.J., C.I. LEE und G.H. JANG. Source and Reduction of Uneven Magnetization of the Permanent Magnet of a HDD Spindle Motor [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(7), 1929-1932. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2123877
- [114] COLLEDANI, M., D. COUPEK, A. VERL, J. AICHELE und A. YEMANE. A cyber-physical system for quality-oriented assembly of automotive electric motors [online]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, 20, 12-22. ISSN 17555817. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirpj.2017.09.001
- [115] D. COUPEK, A. LECHLER und A. VERL. Cloud-based control for downstream defect reduction in the production of electric motors. In: 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2016, S. 1-6
- [116] COUPEK, D., A. GÜLEC, A. LECHLER und A. VERL. Selective rotor Assembly Using Fuzzy Logic in the Production of Electric Drives [online]. *Procedia CIRP*, 2015, 33, 550-555. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.06.074
- [117] COLLEDANI, M., A. YEMANE, D. COUPEK und A. LECHLER. Quality-oriented Design of Rotor Assembly Strategies for Electric Drive Production Systems [online]. *Procedia CIRP*, 2015, 36, 141-146. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.02.225
- [118] COLLEDANI, M., D. COUPEK, A. VERL, J. AICHELE und A. YEMANE. Design and Evaluation of In-line Product Repair Strategies for Defect Reduction in the Production of Electric Drives [online]. *Procedia CIRP*, 2014, 21, 159-164. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2014.03.186
- [119] ZHENG, P., F. CHAI, Y. WANG und S. CHENG. Research on the magnetization of a tangentially magnetized brushless DC motor.

In: 2005 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), S. 1951-1952

- [120] HO, S.L., H.L. LI und W.N. FU. A Post-Assembly Magnetization Method of Direct-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motors and Its Finite-Element Analysis of Transient Magnetic Field [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11), 3238-3241. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2012.2199476
- BECKER, R.W. und F. SAUTER, Hg. Einführung in die Maxwellsche Theorie, Elektronentheorie, Relativitätstheorie. Mit 81 Übungsaufgaben mit Lösungen. 21., völlig neubearb. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1973. Theorie der Elektrizität. / von R. Becker. Neubearb. von F. Sauter ; Bd. 1. ISBN 3-519-23006-2
- [122] CHEN, D.-X., J.A. BRUG und R.B. GOLDFARB. Demagnetizing factors for cylinders [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27(4), 3601-3619. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.102932
- [123] LEE, C.J., C.I. LEE und G.H. JANG. Source and Reduction of Uneven Magnetization of the Permanent Magnet of the HDD Spindle Motor [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(7), 1929-1932. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2011.2123877
- YOSHIOKA, T., Y. TAWADA, K. TSUZAKI, S. WAKAO, A. KAMEARI, T. TOKUMASU, Y. TAKAHASHI, H. IGARASHI und K. FUJIWARA. Magnetic Field Analysis in Far-Field Region by Infinite Edge Element With Boundary Surface Integration [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(5), 1681-1684. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2013.2242456
- [125] KWON, O.-M., C. SURUSSAVADEE, M. CHARI, S. SALON und K. SIVASUBRAMANIAM. Analysis of the Far Field of Permanent-Magnet Motors and Effects of Geometric Asymmetries and Unbalance in Magnet Design [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40(2), 435-442. ISSN 0018-9464. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMAG.2004.824117
- [126] ZANCHE, N. de, C. BARMET, J.A. NORDMEYER-MASSNER und K.P. PRUESSMANN. NMR probes for measuring magnetic fields and field dynamics in MR systems [online]. *Magnetic resonance*

in medicine, 2008, **60**(1), 176-186. ISSN 0740-3194. Verfügbar unter: doi:10.1002/mrm.21624

- [127] KELLER, P. Technologies for Precision Magnetic Field Mapping [online], 2015. Verfügbar unter: https://www.metrolab.com/wpcontent/uploads/2015/07/General_tech_note_Technologies_for_ Precision_Magnetic_Field_Mapping.pdf
- [128] TASCHKA, K. HALLINONE® FH5401: DUAL INTEGRATED 3D MAGNETIC FIELD SENSOR [online]. Verfügbar unter: https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/en/doc/il/ics/ sensorsysteme/FH5401_Dual_integrated_3D_Magnetic_filed_ sensoren_Web.pdf
- [129] CHENYANG TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG. *CYSJ166A GaAs HALL-EFFECT ELEMENTS* [online], 2016. Verfügbar unter: http://www.hallsensors.de/CYSJ166A.pdf
- [130] ASAHI KASEI MICRODEVICES CORPORATION. AK09970 3axis Magnetic Sensor with Programmable Switch [online], 2017. Verfügbar unter: https://www.akm.com/file.jsp?id=424377
- SENIS AG. 3MTS TESLAMETER [online]. USB Handheld Teslameter, 2018. Verfügbar unter: http://c1940652.r52.cfo.rackcdn.com/5a8fced9ff2a7c6bfc000251/ DS.200.3MTS-TESLAMETER.17_Ver.2.1_21.02.2018.pdf
- [132] VERVAEKE, K. Inline magnet inspection using fast high resolution MagCam magnetic field mapping and analysis. In: 2011 1st International Electric Drives Production Conference, 2011, S. 172-180
- [133] MICHALOWSKY, L. und J. SCHNEIDER. Magnettechnik. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen. 3. Aufl. s.l.: Vulkan-Verlag GmbH, 2006. ISBN 978-3-8027-2139-7
- [134] TREMEL, J. Flexible systems for permanent magnet assembly and magnetic rotor measurement. Dissertation. Nürnberg, 2017.
 Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 293. ISBN 978-3-87525-419-8
- [135] HOCKE, M., U. SCHÖNE, H. RICHERT, P. GÖRNERT, J. KELLER, P. LAYER und A. STALLMACH. Every slow-wave impulse is associated with motor activity of the human stomach [online]. American journal of physiology. Gastrointestinal and

liver physiology, 2009, **296**(4), G709-16. ISSN 0193-1857. Verfügbar unter: doi:10.1152/ajpgi.90318.2008

- [136] RICHERT, H. Entwicklung eines magnetischen Monitoringsystems am Beispiel der nichtinvasiven Untersuchung des menschlichen Verdauungssystems. Dissertation. Jena, 2003
- [137] OFFERMANN, P., I. COENEN, D. FRANCK und K. HAMEYER. Magnet deviation measurements and their consideration in electromagnetic field simulation. In: 15th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, IGTE, 2012, S. 305-309
- [138] E. SCHMIDT und C. LECHNER. Design and assembling of a permanent magnet synchronous machine with a Halbach magnet array for the application in an electric driven race car. In: 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2015, S. 1-6
- [139] G. VIDMAR und D. MILJAVEC. Investigations of bearing currents in brush-less direct-current motors. In: *Proceedings of* 15th International Conference MECHATRONIKA, 2012, S. 1-4
- [140] GERALD A. PEARSON. *SHIMMING AN NMR MAGNET*. Iowa City, Iowa, USA, 17. Dezember 1991
- [141] PARKER, A.J., W. ZIA, C.W.G. REHORN und B. BLÜMICH.
 Shimming Halbach magnets utilizing genetic algorithms to profit from material imperfections [online]. *Journal of magnetic resonance (San Diego, Calif. : 1997)*, 2016, 265, 83-89. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmr.2016.01.014
- [142] JING, L., J. CHEN und Z. HUANG. Analysis of Magnetic Field of Magnetic Gear during Overload. In: 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG): IEEE, 92019, S. 557-558. ISBN 978-1-7281-2148-2
- SCHWIENBACHER, S. Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation. München, 2007
Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] ABERSFELDER, S., A. MEYER, A. HEYDER, M. HERZOG, J. FRANKE und M. BRELA. Crack detection in PM-rotors using magnetic field measurement and data processing [online], 2018, 2017-December, 1-6
- [P2] ABERSFELDER, S., A. MEYER, A. HEYDER, M. THANNER und J. FRANKE. Prediction of electric motor performance by Inline testing of permanent excited rotors [online], 2016, 80-85
- [P3] HEYDER, A., T. LOSCH, A. MEYER, S. ABERSFELDER und J. FRANKE. Comparison analysis of the magnetic field and the magnetic force inside of an electromagnetic actuator with the use of an armature measuring sensor [online], 2016, 262-265
- [P4] HEYDER, A., M. TENNER, A. MEYER, S. ABERSFELDER und J. FRANKE. Magnetic stray field measurement of magnetic specimen [online], 2016, 312-316
- [P5] JOSEPH, E., J. TREMEL, B. HOFMANN, A. MEYER, J. FRANKE und S. ESCHRICH. Automated magnet assembly for large PM synchronous machines with integrated permanent magnets [online], 2013
- [P6] FRANKE, J., B. HOFMANN, J. TREMEL und A. MEYER. Innovative methods for automated assembly and fixation of permanent magnets in electrical machines [online], 2015, 26, 724-728
- [P7] KREITLEIN, S., A. MEYER und J. FRANKE. EBenchmark-A pioneering method for process planning and sustainable manufacturing strategies for processes in the electric drives production [online], 2014
- [P8] LINDENFELS, J.V., N. URBAN, A. MAYR, A. MEYER und J. FRANKE. Advances in quality monitoring of stray fields on rotors of permanent magnet synchronous motors [online], 2019
- [P9] MAHR, A., A. MEYER, B. HOFMANN, M. MASUCH und J. FRANKE. Innovative developments for automated assembly and fixation of integrated permanent magnets in rotors of synchronous machines [online], 2015
- [P10] MAYR, A., A. MEYER, J. SEEFRIED, M. WEIGELT, B. LUTZ, D. SULTANI, M. HAMPL und J. FRANKE. Potentials of machine learning in electric drives production using the example of

contacting processes and selective magnet assembly [online], 2018, 2017-December, 1-8

- [P11] MEYER, A., S. ABERSFELDER, N. URBAN, M. SCHNEIDER und J. FRANKE. Quality control during production in the manufacture of electric motors: By magnetic field test of permanent magnet synchronous rotors [online]. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(4), 205-208
- [P12] MAYR, A., A. MEYER, P. GONNHEIMER, J. GRAMLICH, M. REI-SER und J. FRANKE. Concept for an integrated product and process development of electric drives using a knowledge-based system [online], 2018, 2017-December, 1-7
- [P13] MEYER, A., A. HEYDER, M. BRELA, N. URBAN, J. SPARRER und J. FRANKE. Fully automated rotor inspection apparatus with high flexibility for permanent magnet synchronous motors using an improved hall sensor line array [online], 2015
- [P14] MEYER, A., A. HEYDER, A. KÜHL, C. SAND, H. GEHB, S. ABERSFELDER, J. FRANKE, R. HOLZHEY, U. BÜTTNER und S. WANGEMANN. Concept for Magnet Intra Logistics and Assembly Supporting the Improvement of Running Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors [online], 2016, 43, 356-361
- [P15] MEYER, A., J. von LINDENFELS, A. MAYR und J. FRANKE. Manufacturing Imperfections in Electric Motor Production with Focus on Halbach Array Permanent Magnet Rotor Assembly [online], 2019
- [P16] MEYER, A., A. MAYR, N. MALYGIN, Y. ZHANG und J. FRANKE. Selective magnet assembly assisted by an automated warehouse system: Algorithms, performance and industry 4.0 readyness [online], 2018, 2017-December, 1-6
- [P17] MEYER, A., C. NOLTE, C. FISCHER, A. SAUERHOFER und J. FRANKE. Increasing the energy efficiency of the impulse magnetizing process [online], 2016, 22-26
- [P18] SCHNEIDER, M., N. URBAN, A. MEYER und J. FRANKE. A new approach for flexible production of loss-optimized stator core packages [online]. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(4), 225-228

- [P19] URBAN, N., A. MEYER, M. LECKEL, M. LEDER und J. FRANKE. Additive Manufacturing of an Electric Drive a Feasability Study [online], 2018, 1327-1331
- [P20] KREITLEIN, S., B. HOFMANN, A. MEYER, S. SPRENG, A. KUEHL und J. FRANKE. Strategies and Methods for the Energy Efficient Production of Electric Drives [online], 2016, 48, 114-121
- [P21] MEYER, A., A. HEYDER, M. BRELA, N. URBAN, J. SPARRER und J. FRANKE. Fully automated rotor inspection apparatus with high flexibility for permanent magnet synchronous motors using an improved hall sensor line array [online], 2015
- [P22] MEYER, A., S. ABERSFELDER, N. URBAN, M. SCHNEIDER und J. FRANKE. Fertigungsbegleitende Qualitätskontrolle in der Elektromotorenfertigung [online]. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(4), 200-203. ISSN 0947-0085
- [P23] MEYER, A. und J. FRANKE. Influence of production processes on the performance of electric drives. 14th Powertrain Manufacturing Conference. Darmstadt, 22. November 2017
- [P24] MEYER, A. und J. FRANKE. Towards an Energy Efficient Series Production of High Performance Permanent Magnet Synchronous Motors by Selective Magnet Assembly [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, 111-118
- [P25] MAYR, A., A. MEYER, E. SCHÄFFER, M. MASUCH, J. von LIN-DENFELS, G. MÖSSINGER und J. FRANKE. Towards a Knowledge-Based Design Methodology for Managing the Complexity in the Integrated Product and Process Development of Electric Motors [online], 112-125
- [P26] MEYER, A., C. RINGELHAN, C. FISCHER und J. FRANKE. Energy Efficient Strategies for Processing Rare Earth Permanent Magnets [online]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 856, 195-200
- [P27] MAYR, A., A. MEYER, M. MASUCH, A. BRAUN und J. FRANKE. Towards a Software System Providing Knowledge about Energy and Resource Efficiency Potentials within the Product and Process Development of Electric Drives [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, 53-63
- [P28] SCHNEIDER, M., N. URBAN, A. MEYER und J. FRANKE. Neuartiger Ansatz zur flexiblen Fertigung verlustoptimierter

Statorblechpakete [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2017, 112(4), 225-228. ISSN 0947-0085

- [P29] URBAN, N., A. MEYER, S. KREITLEIN, F. LEICHT und J. FRANKE. Efficient near Net-Shape Production of High Energy Rare Earth Magnets by Laser Beam Melting [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, 137-144
- [P30] URBAN, N., A. MEYER, V. KELLER und J. FRANKE. Contribution of Additive Manufacturing of Rare Earth Material to the Increase in Performance and Resource Efficiency of Permanent Magnets [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, 135-141
- [P31] MEYER, A. und J. FRANKE. Influence of Production Processes on the Efficiency of Electric Drives and Measures for its Optimization. 10th international conference on energy efficiency in motor driven systems (EEMODS' 2017), 2017, 248-256

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] C. FISCHER. Validierung wesentlicher Einflussparameter auf den Magnetisierprozess hinsichtlich Energieeffizienz. Masterarbeit. Nürnberg. 2016
- [S2] M. FRIEDRICH. Erstellung prüftechnischer Anforderungen für eine automatisierte Rissdetektion in der Serienfertigung von Elektromotoren. Masterarbeit. Nürnberg. 2017
- [S3] R. GAI. Messsystemanalyse und Optimierung des Prozesses zur Bestimmung des magnetischen Moments mit Hilfe einer Helmholtzspule. Projektarbeit. Nürnberg. 2018
- [S4] H. GEHB. Konzeption und Realisierung eines Systems zur automatisierten Vereinzelung angeregter Permanentmagnete aus dem Stapel. Projektarbeit. Nürnberg. 2015
- [S5] H. GEHB. Entwicklung eines Magnetlogistikkonzepts zur selektiven Magnetmontage. Masterarbeit. Nürnberg. 2016
- [S6] M. GROßMANN. Weiterentwicklung eines Prüfstands zur Rotorvermessung mit dem Fokus der Verbesserung der Usability. Projektarbeit. Nürnberg. 2016
- [S7] C. HOFBAUER. Analyse der Prozesskette der Verarbeitung hochkoerzitiver Permanentmagnete. Bachelorarbeit. Nürnberg. 2015
- [S8] M. KLEBER. Evaluation magnetischer Messtechnik zur 100% Kontrolle von Permanentmagneten im Elektromaschinenbau. Projektarbeit. Nürnberg. 2016
- [S9] S. LINDERMAIER. Evaluierung von visuellen Systemen zur berührungslosen Vermessung der Geometrie von Permanentmagnetkörpern und Aufbau einer Demonstratoranwendung. Masterarbeit. Nürnberg. 2015
- [S10] C. LÖHNIG. Untersuchungen zu Gestaltveränderungen von Flussleitstücken im Magnetisierprozess. Projektarbeit. Nürnberg. 2018
- [S11] A. MAHR. Konzeption und Realisierung eines Systems zur automatisierten Fixierung von eingebetteten Magnetkörpern in Kavitäten von Synchronrotoren. Masterarbeit. Nürnberg. 2015
- [S12] N. MALYGIN. Development of a logistics automation system for rare earth permanent magnets. Masterarbeit. Nürnberg. 2017

- [S13] A. MAYR. Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines innovativen Logistiksystems zur 100%-Prüfung und Lagerung von Permanentmagneten. Masterarbeit. Nürnberg. 2016
- [S14] C. NOLTE. Untersuchung des Magnetisierprozesses von Dauermagneten aus Neodym-Eisen-Bor. Masterarbeit. Nürnberg. 2017
- [S15] A. SAUERHÖFER. Energetische Analyse des Impulsmagnetisierungsvorgangs. Masterarbeit. Nürnberg. 2016
- [S16] J. SPARRER. Automatisierte Vermessung von permanenterregten Synchronrotoren mit Hilfe von Hallsensor-Arrays. Masterarbeit. Nürnberg. 2015
- [S17] M. STOCKER. Einflussanalyse von Markier- und Korrosionsprozessen auf beschichtete NdFeB-Dauermagnete. Projektarbeit. Nürnberg. 2017
- [S18] M. THANNER. Statistische Auswertung von einer Messreihe zur Klassifizierung von permanenterregten Synchronrotoren. Projektarbeit. Nürnberg. 2016
- [S19] N. URBAN. Visualisierung von Sensordaten aus der Vermessung von Magnetfeldern mittels Hall-Elementen. Masterarbeit. Nürnberg. 2015
- [S20] J. VON LINDENFELS. Marketinggerechtes Design eines Prüfstandes zur magnetischen Vermessung von permanenterregten Rotoren. Masterarbeit. Nürnberg. 2016
- [S21] T. WAGNER. Darstellung der Einflüsse magnetischer Kennwerte auf das Laufverhalten von Synchronmaschinen. Projektarbeit. Nürnberg. 2015
- [S22] Y. ZHANG. Development of an Algorithm for Creating an Optimized Magnet Arrangement to Improve Running Characteristics of PMSM. Masterarbeit. Nürnberg. 2017
- [S23] J. HE. Simulation von Fertigungseinflüssen bei permanenterregten Synchronmaschinen mit Halbach-Magnetisierung. Masterarbeit. Nürnberg. 2018

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Lehrstuhl für Photonische Technologien
Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2. Band 7: Wolfgang Scholz Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0. Band 13: Frank Vollertsen Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle

LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5. Band 19: Arnold vom Ende Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung

LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2. Band 25: Christoph Thim Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4. Band 31: Hubert Reinisch Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1. Band 37: Stephanie Abels Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1. Band 43: Werner Heckel Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0. Band 49: Wolfgang Greska Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3. Band 55: Henning Hanebuth Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6. Band 61: Andreas Brand Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5. Band 67: Klaus-Uwe Wolf Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4. Band 73: Volker Franke Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2. Band 79: Elke Rauh Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1. Band 85: Ralf Luchs Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9. Band 91: Horst Arnet Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans Laserstrahlsintern von Metallpulver -Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8. Band 97: Gunter Beitinger Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.

ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5. Band 103: Stefan Bobbert Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X. Band 109: Markus Korneli Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9. Band 115: Sami Krimi Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X. Band 121: Lars Pursche Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5. Band 127: Thomas Fröhlich Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch 3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X. Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.

ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.

ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0. Band 145: Stefan Hierl System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1. Band 151: Ralph Hohenstein Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche

LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto

Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments

FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger

Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl

Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8. Band 163: Adrienn Cser Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou

Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser

Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005. ISBN 3-87525-233-0. Band 169: Katrin Melzer Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall

LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9. Band 175: Peter Wölflick Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8. Band 181: Stefan Lang Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8. Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6. Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1. Band 199: Artur Giera Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7. Band 205: Wolfgang Wolf Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.

ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten

Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3. Band 211: Detlev Staud Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8. Band 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1. Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimuation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3. Band 227: Murat Arbak Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5. Band 233: Christian Ziegler Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4. Band 239: Rajesh Kanawade In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3. Band 244: Christian Neudel Mikrostrukturelle und mechanischtechnologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4. Band 249: Paul Hippchen Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil Versagensprognose bei der Prozess simulation von Biegeumform- und Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-379-5. Band 261: Christian Brock Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3. Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven

LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren

FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten

LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6. Band 276: Marcus Baum Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen

LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4. Band 281: Jochen Bönig Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5. Band 287: Johannes Koch Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4. Band 293: Jan Tremel Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8. Band 298: Peer Stenzel Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 294: Ioannis Tsoupis Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4. Band 299: Mario Lušić Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 295: Sven Hildering Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8. Band 300: Arnd Buschhaus Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2. Band 301: Tobias Laumer Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7. Band 303: Tommaso Stellin Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner

Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar A reliable methodology to deduce thermomechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5. Band 308: Maria Löffler Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungs-

bedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9. Band 313: Miriam Rauer Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7. Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigen-schaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.
Band 334: Thomas Kuhn Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1. Band 340: Simon Spreng Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti Evaluation of failure behaviour of sheet metals LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umformund Abschreckprozess LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4. Band 346: Toni Donhauser Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6. Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014

LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrol-lenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab.

2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation

FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen

FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandyari Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks

FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess

LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen

FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production EAPS xy 11 160 Seiten for Bilder 12 Tab

FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –

KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosol-

basierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2. Band 370: Andreas Gröschl Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik

FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren

KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte

KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen

FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3- 96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2. Band 380: Tom Häfner Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems

LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen

FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5. Band 392: Bastian Zimmermann Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16

Tab. 2022 ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen FAPS, xxii u.151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-555-1.

Abstract

This contribution gives an overview of the production of permanently excited rotor assemblies and possible faults in this process chain. In addition, possibilities for error detection are described and the compensation of these imperfections by selective magnet assembly is illuminated. The focus of the work is on the reduction of the cogging torque using low-cost magnets. In addition to the controllability of servo drives, the cogging torque is particularly responsible for the vibrations caused by an electrical machine. There are dependencies on the one hand on the motor configuration and on the other hand on the angular deviation of the magnetic moment vector of the individual magnets. Especially in permanently excited synchronous machines with ironless Halbach rotors, field distortions cannot be compensated by the rotor iron, as is the case with embedded magnets, for example. This is also confirmed by the measurements carried out within the scope of this work. The selective magnet assembly makes it possible to raise an enormous cost saving potential by using cheaper magnets with minimised cogging torque. This is achieved by compensating for the angular deviations of the individual magnets from each other. For this purpose, a compensated set of magnets is formed by calculation algorithms. The implementation in a production environment is illustrated with the help of a storage system that can fully automatically measure, sort, store and provide magnets as a compensated magnet set. A concept demonstrator of such a storage system is presented, the cycle times are determined and optimisation potentials are identified. Based on an example scenario in which a modular motor design with different variants and a medium annual total number of units is to be manufactured with the help of selective magnet assembly, the savings potential through cheaper magnets is demonstrated. In the example, the material costs for high-quality magnets account for 25 % of the total manufacturing costs for a motor. In contrast, the material costs for the magnets are 70 % lower and the additional costs for a fully automatic storage system are 1.5 %, thus demonstrating the profitability of the strategy.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Fertigung von permanenterregten Rotorbaugruppen und Fehlermöglichkeiten dieser Prozesskette. Dazu werden Möglichkeiten zur Fehlererkennung beschrieben und die Kompensation dieser Fehler durch selektive Magnetmontage beleuchtet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Reduktion des Rastmomentes unter Verwendung kostengünstiger Magnete. Das Rastmoment ist neben der Regelbarkeit von Servoantrieben insbesondere für die von einer elektrischen Maschine verursachten Schwingungen verantwortlich. Abhängigkeiten bestehen einerseits von der Motorkonfiguration und andererseits von der Winkelabweichung des magnetischen Momentenvektors der Einzelmagnete. Dies wird ebenso durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen bestätigt. Durch die selektive Magnetmontage ist die Hebung eines enormen Kosteneinsparungspotentials durch Verwendung von günstigeren Magneten bei minimiertem Rastmoment möglich. Dies wird durch die Kompensation der Winkelabweichungen der Einzelmagnete untereinander erreicht. Dazu wird durch Berechnungsalgorithmen ein kompensierter Magnetsatz gebildet. Die Implementierung in eine Produktionsumgebung wird mit Hilfe eines Lagersystems dargestellt, das vollautomatisch Magnete vermessen, sortieren, speichern und als kompensierten Magnetsatz bereitstellen kann. Anhand eines Beispielszenarios, in dem ein Motorenbaukasten mit verschiedenen Varianten und einer mittleren jährlichen Gesamtstückzahl mit Hilfe der selektiven Magnetmontage gefertigt werden soll, wird das Einsparungspotential durch günstigere Magnete aufgezeigt. Die Materialkosten für hochwertige Magnete haben im Beispiel einen Anteil von 25 % an den gesamten Herstellkosten für einen Motor. Demgegenüber stehen 70 % günstigere Materialkosten für die Magnete und Mehrkosten von 1,5 % für ein vollautomatisches Lagersystem, womit die Rentabilität der Strategie nachgewiesen wird.

