

Thomas Albrecht

*Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen*

Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS

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

Tag der Einreichung:	12. März 2014
Tag der Promotion:	14. Juli 2014
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-368-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2014

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von
Thomas Albrecht
aus Memmingen

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 14.07.2014

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Produktions- und Werkstofftechnik der Daimler AG in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Department Maschinenbau der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die konstruktiven Anregungen und vor allem für den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum und das in diesem Zusammenhang entgegengebrachte Vertrauen. Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Inhaberin des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferats und die fachlichen Anregungen. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Frey, Leiter des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg, als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Ordinarius des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Bei den Kollegen der Daimler AG und des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik möchte ich mich für die sehr angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, für die stets sehr gute Zusammenarbeit und die zahlreichen fachlichen Diskussionen bedanken. Hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang meine Mentoren bei der Daimler AG, Herrn Dr.-Ing Christian Anders und Herrn Dipl.-Ing Werner König, für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit, die fachlichen Anregungen und stets fruchtbaren Gespräche. Großer Dank gebührt weiterhin Herrn Dipl.-Ing Florian Risch und Herrn Dipl.-Ing. Markus Hubert für die gemeinsamen Projekte und die freundschaftliche Unterstützung bei organisatorischen Herausforderungen als externer Doktorand. Herrn Dr.-Ing. Erik Lamprecht, meinem ehemaligen Bürokollegen und guten Freund, danke ich weiterhin für die Unterstützung und Motivation während unserer Promotionszeit. Weiterhin Danken möchte ich Herrn Georg Senn von der LCD Lasercut AG für die anregenden und innovativen Gespräche. Ferner bedanke ich mich bei allen Studenten, die durch ihre engagierte Arbeit zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen haben.

Besonders danken möchte ich meinen Eltern, meiner Schwester und meiner Oma, die mich seit meiner Kindheit stets gefördert und beim Erreichen meiner Ziele unterstützt haben. Mein größter Dank gilt meiner Freundin Marina für die Korrektur meiner Arbeit, die verständnisvolle Geduld und die Liebe, die sie mir während der Anfertigung dieser Dissertation entgegengebracht hat.

Inhaltsverzeichnis

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen permanenterregter Synchronmotoren für Hybridanwendungen	4
2.1 Der Hybridantrieb im automobilen Einsatzfeld	4
2.1.1 Klassifikation der Hybridkonzepte.....	6
2.1.2 Komponenten des Hybridantriebes	9
2.2 Entwicklungstrends permanenterregter Synchronmaschinen	10
2.2.1 Aufbau und Funktion von PM-Synchronmaschinen.....	10
2.2.2 Der Referenzrotor als typisches Beispiel für den Aufbau von Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren	12
2.3 Funktionsrelevante Werkstoffe – Elektroblech	13
2.3.1 Klassifizierung und Eigenschaften	14
2.3.2 Beschichtung als Isolations- und Verbindungsmaterial	17
2.4 Funktionsrelevante Werkstoffe – Magnete aus Seltenen Erden.....	19
3 Designrelevante Optimierungspotentiale in der Rotorproduktion	21
3.1 Prozesskette der konventionellen Fertigung von PM-Rotoren	21
3.1.1 Herstellung der Blechpakete.....	22
3.1.2 Magnetmontage.....	24
3.1.3 Aufbau und Fertigung des Rotorträgersystems	25
3.1.4 Montage der bestückten Blechpakete auf dem Rotorträger.....	26
3.1.5 Abschließende Prozessschritte	27
3.2 Bewertung der Einzelprozesse in der Produktion des Referenzrotors hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale	28
3.2.1 Fertigungsschritte in der Produktion des Referenzrotors.....	28
3.2.2 Bewertung der Fertigungsschritte hinsichtlich möglicher Optimierungspotentiale.....	31

3.3	Bisherige Ansätze zur kostenoptimierten Fertigung	32
3.3.1	Fertigungs- und Paketierungsverfahren zur Steigerung des Blechausnutzungsgrades	33
3.3.2	Technologien zur kostenoptimierten Fixierung der Permanentmagnete	36
3.3.3	Alternative Rotorträgersysteme	38
3.4	Forschungsbedarf zur Optimierung der Fertigung von PM-Rotoren.....	39
4	Entwicklung von Verbindungstechnologien der Rotorsegmentierung.....	40
4.1	Analyse der auf die Verbindungstechniken wirkenden Kräfte	42
4.1.1	Berechnung der Umfangskräfte nach d'Alembert.....	43
4.1.2	Verifizierung durch das Feder- und Kesselmodell	44
4.2	Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung.....	47
4.2.1	Entwicklung einer spannungs-homogenen Geometrieform	49
4.2.2	Optimierung der entwickelten Geometrie.....	52
4.2.3	Verifikation der Entwicklung mittels Schleuderversuchen.....	54
4.3	Magnet als Fügeelement der Rotorsegmentierung	59
4.3.1	Analytische Bestimmung der übertragbaren Umfangskräfte.....	60
4.3.2	Analyse der relevanten Einflussparameter durch lineare Simulation.....	61
4.3.3	Experimentelle Verifikation der simulierten Parameter	63
4.4	Fügeelement als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung.....	66
4.4.1	Entwicklung und Optimierung der Grundgeometrie mittels linearer Simulation	68
4.4.2	Empirische Untersuchungen an der optimierten Grundgeometrie durch Zugversuche	72
4.4.3	Verifizierung des optimierten Fügeelementes an der Referenzrotor-geometrie mittels Zugversuchen.....	74
4.5	Adhäsive Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung.....	75
4.5.1	Verfahrenstechnische Grundlagen der Adhäsion	76
4.5.2	Analytische Bestimmung der Tragfähigkeit.....	77
4.5.3	Empirische Grundlagenuntersuchungen zur Tragfähigkeit adhäsiver Verbindungstechniken.....	80
4.5.4	Verifizierung der Erkenntnisse durch Zug- und Schleuderversuche an der Referenzrotorgeometrie	83

4.6	Schweißen als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung	86
4.6.1	Verfahrenstechnische Grundlagen und Einflussfaktoren beim Laserschweißen von Elektroblech	87
4.6.2	Untersuchung der geometrischen und lokalen Randbedingungen der Schweißnaht mittels linearer Simulation	88
4.6.3	Experimentelle Vorversuche zur Ermittlung der Schweißparameter	93
4.6.4	Optimierung der Schweißparameter	96
4.6.5	Validierung der Entwicklung mittels Zug- und Schleuderversuchen	101
4.7	Einfluss der entwickelten Verbindungstechniken auf die Eisenverluste	106
4.8	Kombinationen diverser Verbindungstechniken im Brick-Wall- Design	108
4.9	Wirtschaftliches Potential der entwickelten Verbindungstechniken	112
5	Entwicklung alternativer Magnetfixierungstechnologien	118
5.1	Analyse der auf die innenliegenden Magnete wirkenden Kräfte	119
5.1.1	Belastungen aus Axialkräften	119
5.1.2	Belastungen aus Zentrifugalkräften und Einfluss der Fixierungstechnologie auf die resultierenden Haltekräfte	120
5.2	Verstemmen als Magnetfixierungstechnologie	121
5.2.1	Experimentelle Voruntersuchungen zur Identifikation prozessrelevanter Parameter	122
5.2.2	Generierung optimaler Verstemmwerkzeuge mittels Umformsimulationen	124
5.2.3	Verfahrensentwicklung der Verstemmparameter	126
5.2.4	Toleranzbetrachtung	131
5.3	Klemmen als Magnetfixierungstechnologie	132
5.3.1	Analytische Berechnung des Pressverbandes	133
5.3.2	Experimentelle Voruntersuchungen	138
5.3.3	Entwicklung der Technologie	138
5.3.4	Alternative Prozessvarianten zum Klemmen von beschichteten Magneten	140
5.4	Kleben als Magnetfixierungstechnologie	142

5.4.1	Konstruktion einer Klebevorrichtung und Auswahl der Klebstoffe.....	143
5.4.2	Experimentelle Untersuchungen der Haltekräfte	144
5.5	Wirtschaftliches Potential der untersuchten Fixierungstechnologien..	146
6	Entwicklung alternativer Rotorträgersysteme	150
6.1	Rotorscheiben mit Schachtschrauben als Rotorträgersystem.....	151
6.1.1	Analytische Berechnung der Drehmomentübertragung	152
6.1.2	Aufbau und Bewertung verschiedener Demonstratorrotoren.	153
6.2	Rotorscheiben mit Einlagen als Rotorträgersystem	155
6.2.1	Analyse und Auslegung der Einlagen	157
6.2.2	Bewertung der Konzepttauglichkeit verschiedener Aufbauvarianten	159
6.3	Wirtschaftliches Potential der entwickelten Rotorträgersysteme	161
7	Aufbau und Beurteilung des Technologieträgerrotors	164
7.1	Auswahl vorteilhafter Technologien hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Aspekte	164
7.2	Qualifizierung der ausgewählten Technologien.....	168
7.2.1	Qualifizierung der Verbindungstechnik Fügegeometrie	168
7.2.2	Qualifizierung der Magnetfixierung Verstemmen	171
7.3	Konzeption einer teilautomatisierten Montagelinie	174
7.4	Aufbau des Technologieträgerrotors	179
8	Zusammenfassung	181
9	Summary	185
	Literaturverzeichnis	189
	Lebenslauf.....	198

Abkürzungsverzeichnis

A	nicht kornorientiert	IEC	International Electro-technical Commission
Akku	Akkumulator	KO	kornorientiert
Al	Aluminium (Element)	KT	Kraftstofftank
ASTM	American Society for Testing and Materials	KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
B	Backlack	kW	Kilowatt
B	unlegiert, nicht schlussgeglüht	LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
Bat	Batterie	LC	Lifecycle
BT	Betriebstemperatur	LE	Leistungselektronik
C	Kohlenstoff (Element)	M	Elektrobleche
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	M1-M4	Magnetfixierungstechniken
CNC	Computerized Numerical Control	MB	Mercedes-Benz
DIN	Deutsches Institut für Normung	Mio.	Million
DM	Deutsche Mark	Mn	Mangan (Element)
Dy	Dysprosium	N	Ummagnetisierungsverl.
E	legiert, schlussgeglüht	NAK	Nasse Anfahrkupplung
EM	Elektrische Maschine	NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
E-Motor	Elektromotor	Nd-Fe-B	Neodym-Eisen-Bor
ET	Einpresstiefe	NO	nicht kornorientiert
EU	Europäische Union	n-K	n-Komponenten
FE	Fügeelement	P	Kornorientiert mit niedrigen Ummagnetisierungsverl.
FEM	Finite-Elemente-Methode	P	Phosphor (Element)
Fe-Si	Eisen-Silizium	PKW	Personenkraftwagen
FG	Fügegeometrie	PM	Permanent Magnet
GE	Geldeinheit	P1-P4	Parameterkombinationen
Get	Getriebe	PD1, PD2	Parameterkombinationen
HSD	Hybrid Synergy Drive		
IVD	Ion-Vapour-Deposition		

RA	Randabstand
RT	Raumtemperatur
RT1-RT3	Rotorträgersysteme
S	Schwefel (Element)
S	Schweißen
S	Kornorientiert mit eingeschränkten Ummagnetisierungsverlusten
SmCo	Samarium-Cobalt
SUV	Sport Utility Vehicle

Tb	Terbium (Element)
UNO	Vereinte Nationen
V1-V5	Verbindungstechniken
VDA	Verband der Automobilindustrie
VM	Verbrennungsmaschine
WIG	Wolframinertgasschweißen
Z1-Z3	Zugprobengeometrien
1-K	1-Komponente
2-K	2-Komponenten

1 Einleitung

Die durch Gesellschaft und Politik generierte Forderung nach umweltfreundlichen Fahrzeugen hat in den vergangenen Jahren zu einem massiven Anstieg der Entwicklung alternativer Antriebe geführt. Ein Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Reduktion der CO₂-Emission des Gesamtfahrzeuges durch eine schrittweise Abkehr von konventionellen Verbrennungskraftstoffen. [1] Das langfristige Ziel, die globale Verwendung von Elektrofahrzeugen, wird bis zur Lösung des Energiespeicherproblems durch speziell entwickelte Fahrzeughybridsysteme, bestehend aus einem konventionellen und einem elektrischen Antrieb, überbrückt. [2] Beim Großteil der bisher auf dem Markt erhältlichen Hybridfahrzeuge, wie dem Toyota Prius Hybrid [3], dem BMW 5er Active Hybrid [4] und dem Mercedes Benz S400 Hybrid [5], ist die elektrische Antriebskomponente im Getriebe des Fahrzeuges integriert. Dieser strukturelle Aufbau des Antriebsstranges stellt an die Elektromotoren hohe Anforderungen hinsichtlich Temperatur-, Umwelt- und Medienbeständigkeit, wodurch die Entwicklungs- und Fertigungskosten signifikant belastet werden. [2]

Zur Etablierung der Hybridtechnologie beim Kunden ist eine akzeptable Gestaltung des Preisniveaus der Anschaffungskosten des Fahrzeuges unerlässlich. Obwohl durch die potentielle Reduktion des Bedarfs an fossilen Kraftstoffen eine Reduzierung der laufenden Kosten zu erwarten ist, stellen die anfänglichen zusätzlichen Investitionskosten ein entscheidendes psychologisches Argument gegen den Kauf dar. [6] Aus diesem Grund ist eine permanente Optimierung der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Aufbau und Fertigung der einzelnen Bestandteile des Hybridantriebssystems erforderlich. Neben der Batterie ist der Elektromotor eine funktionale und wirtschaftliche Schlüsselkomponente des hybriden Antriebsstranges und bedarf insbesondere in der Konzeption einer detaillierten Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Konstruktionselemente und Fertigungsprozesse. [7]

Neben dem Aufbau der Wicklung und der Optimierung der Verschaltung von Statoren permanent erregter Synchronmotoren [8] liegt die Fertigung und Montage der Rotoren im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Dabei sind neben der Optimierung des Blechausnutzungsgrades in der Fertigung der Blechpakete, mittels der Technologie der Rotorsegmentierung, die Fixierungstechnik der Permanentmagnete und der strukturelle Aufbau des Rotorträgersystems die zentralen Themenfelder der Entwicklungsarbeiten. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung und diverse Magnetfixierungstechnologien entwickelt, validiert und verschiedene Rotorträgersysteme konzipiert. Neben den rein technischen Entwicklungsarbeiten erfolgt zudem eine Wirtschaftlichkeitsanalyse in den verschiedenen Themenfeldern, um anschließend ganz-

heitlich an Hand von Entscheidungsmatrizen die vorteilhaftesten Technologien für den Aufbau eines Technologieträgerrotors bereitzustellen.

Als Motivation werden zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen permanent erregter Synchronmotoren für Hybridanwendungen vorgestellt. Dies beinhaltet einen Überblick über die Geschichte und die Klassifikation von Hybridantrieben im automobilen Einsatzfeld und die Beschreibung der zugehörigen Komponenten. Der Fokus liegt dabei beim Aufbau und der Einordnung permanent erregter (PM) Synchronmotoren, insbesondere für die getriebeintegrierte Verwendung in Hybridfahrzeugen. Den Abschluss des Grundlagenteils der vorliegenden Arbeit bildet die Vorstellung der funktionsrelevanten Werkstoffe eines PM-Rotors – dem Elektroblech und den Permanentmagneten aus Seltenen Erden. Dabei wird besonderer Wert auf die Klassifizierung und die Eigenschaften der jeweiligen Werkstoffe gelegt.

Die Identifikation und Bewertung designrelevanter Optimierungspotentiale in der Prozesskette der konventionellen Rotorfertigung sind die zentralen Punkte des dritten Kapitels. Basierend auf den erkannten Rationalisierungspotentialen und den bisherigen Ansätzen zur kostenoptimierten Fertigung wird der Forschungsbedarf zur Verbesserung der Konzeption und Fertigung von PM-Rotoren begründet und konkretisiert.

Im vierten Kapitel erfolgt die Beschreibung der Entwicklung von verschiedenen Verbindungstechnologien der Rotorsegmentierung. Der erste Schritt ist dabei die Analyse der auf die Verbindungstechnik wirkenden Kräfte und der Bestimmung der resultierenden Umfangskraft. Durch lineare Finite Elemente Simulation und Zugversuche erfolgt anschließend die Entwicklung und Optimierung diverser Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung. Zur Verifizierung der optimierten Verbindungstechniken werden anschließend jeweils Schleuderversuche an der Referenzrotorgeometrie durchgeführt. Nach Sicherstellung der mechanischen Festigkeiten erfolgt anschließend eine Verlustbetrachtung zur Identifikation möglicher zusätzlicher Wirbelstromverluste, die durch die jeweiligen Verbindungstechniken generiert werden. Ein weiterer zentraler Punkt ist die Ausarbeitung der Einflüsse der Wechselwirkungen bei der Kombination der verschiedenen Verbindungstechniken und die Bestimmung der vorteilhaftesten Kombination. Den Abschluss des vierten Kapitels bildet eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der verschiedenen optimierten Verbindungstechniken.

Als weiterer Forschungsschwerpunkt erfolgt im fünften Kapitel die Entwicklung verschiedener Magnetfixierungstechnologien. Hierzu werden zunächst die auf die innenliegenden Magnete wirkenden Kräfte kalkuliert und der Einfluss der Fixierungstechnologien auf die resultierenden Haltekräfte analysiert. Die anschließenden Entwicklungsarbeiten an den Fixierungstechniken Verstemmen, Klemmen und Kleben erfolgen empirisch und werden punktuell durch analytische Berechnungen und Simulationen unterstützt. Die Untersuchung des wirtschaftlichen Potentials der entwickelten und optimier-

ten Magnetfixierungstechniken im Vergleich zur konventionellen Magnetfixierungstechnik des Referenzrotors bildet den Abschluss des fünften Kapitels.

Basierend auf die im dritten Kapitel identifizierten Rationalisierungspotentiale erfolgt im sechsten Kapitel die Konzeption alternativer Rotorträgersysteme. Hierzu werden zwei Konzepte entwickelt, hinsichtlich der Übertragbarkeit des wirkenden Drehmomentes rechnerisch analysiert und in mehreren Varianten aufgebaut. Für die abschließende Prüfung des wirtschaftlichen Potentials werden die jeweils vorteilhaftesten Varianten der beiden Konzepte ausgewählt und verglichen.

Das übergreifende Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau eines Technologieträgerrotors für PM-Synchronmotoren für Hybridfahrzeuge um einen, im Kontrast zum Referenzrotor, technologisch vergleichbaren und zur Reduzierung des Fahrzeugpreises wirtschaftlich optimierten Rotor bereitzustellen. Hierfür müssen zunächst an Hand von Bewertungsmatrizen die jeweils vorteilhafteste Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung, die geeignetste Magnetfixierung und das erfolgversprechendste Rotorträgerkonzept ausgewählt werden. Um den Nachweis der Serientauglichkeit zu erbringen, erfolgt anschließend eine Qualifizierung der gewählten Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung und der Magnetfixierungstechnik. Auf Basis der Entwicklungs- und Qualifizierungsmaßnahmen ist ein weiterer Schritt die Konzeption einer teilautomatisierten Montagelinie zur seriennahen Darstellung der ausgewählten Verbindungs- und Magnetfixierungstechniken. Als Abschluss dieser Dissertation wird der aus den technisch und wirtschaftlich vorteilhaftesten Technologien bestehende Technologieträgerrotor aufgebaut und vorgestellt. Dies dient einerseits der Leistung eines Beitrags zur Generierung eines akzeptablen Kostenniveaus von Hybridfahrzeugen und andererseits als Motivation zur weiterführenden Forschung und Entwicklung von technologisch hochwertigen aber gleichzeitig kostengünstigen PM-Synchronmotoren für Hybridfahrzeuge.

2 Grundlagen permanenterregter Synchronmotoren für Hybridanwendungen

Die Aufgabe von elektrischen Maschinen ist die Transformation elektrischer in mechanische Energie und umgekehrt. Diese Funktion resultiert aus der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Rotor und Stator. Der Einsatzort und das dadurch hervorgehende Konstruktionsprinzip der elektrischen Maschine beeinflussen dabei stark die Ausprägung dieser Effekte. [9] Die Platzierung der Elektromotoren im Getriebe eines Kraftfahrzeuges hat einen großen Einfluss auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit, die Entwicklung von Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung, die Untersuchung verschiedener Magnetfixierungstechniken und die Konzeption alternativer Rotorträgersysteme.

Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel zunächst die Grundlagen der Hybridtechnologie im automobilen Einsatzfeld, deren Komponenten und die Klassifikation der verschiedenen Hybridkonzepte erläutert. Danach erfolgen die Beschreibung des Aufbaus und der Funktion permanent erregter Synchronmaschinen und die Ausarbeitung der Besonderheiten bei Verwendung in einem getriebeintegrierten hybriden Antriebsstrang. Die Analyse der für Rotoren funktionsrelevanten Werkstoffe Elektroblech und Magnete aus Seltenen Erden, hinsichtlich ihrer Klassifizierung und Eigenschaften bilden den Abschluss dieses Kapitels.

2.1 Der Hybridantrieb im automobilen Einsatzfeld

Eines der Grundbedürfnisse der Menschheit ist die Mobilität, wobei das Auto zu den beliebtesten Fortbewegungsmitteln zählt und somit die Automobilindustrie zu einem der wichtigsten Industriezweige aufsteigen konnte. In der über 125-jährigen Geschichte des Automobils wurde dieses kontinuierlich in den Bereichen Sicherheit, Komfort und Effizienz weiterentwickelt. Dennoch bestehen Optimierungspotentiale speziell im Verbrauch fossiler Energieträger und der Reduzierung des CO_2 -Ausstoßes. [9] In der Europäischen Union (EU-15) beträgt der Anteil des Verkehrs (und Transports) rund ein Viertel der jährlichen anthropogenen CO_2 -Emissionen, wie in Abbildung 1 aus dem Jahr 2008 zu erkennen. [10] Um einem weiteren Anstieg entgegenzuwirken, hat die EU im Automobilbereich eine Zielemission von $130 \text{ g CO}_2/\text{km}$ als Durchschnittswert der Neuwagenflotte (Flottenverbrauch) ab 2012 vorgegeben. Diese Regelung tritt stufenweise in Kraft und soll ab 2015 zu 100 % erfüllt werden. Bei einem Nichterreichen dieser Vorgaben müssen die Automobilhersteller, je nach Größe der Abweichung, pro verkauften PKW empfindliche Strafen an die EU bezahlen. [11] Die Prüfung des Flottenverbrauchs ist genormt und erfolgt nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Diese Emissionsziele werden bereits von vielen Klein- und Kompaktfahrzeugen (Smart, Renault Twingo, VW Polo) erreicht. Der Käufertrend geht jedoch weiterhin zu größeren und stärkeren Fahrzeugen, insbesondere den SUV-Fahrzeugen. Somit ist es besonders

für die deutschen Hersteller von Premiumfahrzeugen schwierig, durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Antriebsstranges, ohne die Integration alternativer Antriebe, die angestrebten Flottenverbrauchswerte zu erreichen. [12]

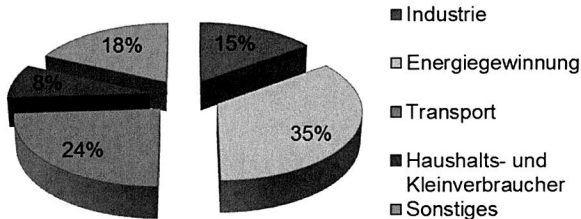


Abbildung 1: CO₂-Emittenten in der EU-15. [13]

Gemäß der Erfahrungen der letzten Jahre, dass trotz der steigenden Kraftstoffpreise kein Wandel im Kaufverhalten zu erwarten ist, müssen die Automobilkonzerne verstärkt in Technologien investieren, mit denen auch schwere, komfortable und gleichzeitig leistungsstarke Fahrzeuge effizient gefahren werden können. [12] Mit Hilfe dieser Technologien soll ein hoher Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung, größere Freiheitsgrade im Betrieb und eine Rekuperation der Energie während des Verzögerungsvorganges erzielt werden. Da die Kontrolle der Vorgaben der Europäischen Union über den NEFZ erfolgt, welcher überproportional durch den Stadtbetrieb repräsentiert wird, besteht ein großes Kraftstoffeinsparpotential durch die Hybridisierung des Antriebsstranges. Diese Antriebsform profitiert sowohl von der stetigen Optimierung der Verbrennungsmotoren – die primäre Energieumwandlung – als auch von der Flexibilität der Integration des sekundären Energiewandlers, dem Elektromotor, in den Antriebsstrang des Fahrzeuges. Zudem besteht die Möglichkeit der Rückgewinnung zuvor eingespeister Energie durch den generativen Betrieb des sekundären Energiewandlers während des Bremsvorganges des Fahrzeuges. Im Stop & Go des Großstadtverkehrs kann somit lokal emissionslos bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad das Fahrzeug bewegt werden. [2]

In der Literatur und einer UNO-Definition aus dem Jahr 2003 [14] wird als Hybridantrieb ein Antriebssystem bezeichnet, das aus mindestens zwei unabhängigen Energiewandlern mit dazugehörigen Energiespeichern besteht. Als solche Energiewandler zählen beispielsweise der Elektro-, Otto- oder Dieselmotor und als Energiespeicher können mechanische, elektrische und chemische Systeme, wie die Batterie oder der Kraftstofftank, genannt werden. [15] Die Idee eines Hybridfahrzeuges geht bis in die Anfänge der Automobilgeschichte zurück. Bereits auf der Weltausstellung im Jahre 1900 in Paris wurde der Lohner-Porsche vorgestellt. Allerdings konnte keines der zu diesem Zeitpunkt revolutionären Hybridantriebe den Durchbruch erlangen, da die niedrigen Preise für die fossilen Energieträger weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen

überflüssig machen. Erst während der Ölkrise in den 1970er Jahren investierten die europäischen, amerikanischen und japanischen Fahrzeughersteller wieder in die Entwicklung alternativer Antriebsysteme und stellten erste Testfahrzeuge und Kleinserien mit Hybridantrieb vor. [2]

Der erste gewerbliche Anbieter war Audi mit dem Audi 80 duo im Jahre 1994. Der Preis dieses Fahrzeuges, wie auch dessen Nachfolgers, dem Audi A4 duo (60.000 DM) war so hoch angesetzt, dass die Fahrzeuge quasi unverkäuflich waren. Den Durchbruch schaffte Toyota im Jahre 1997 mit dem Toyota Prius (inzwischen in der 3. Generation) durch enorme Entwicklungsanstrengungen und geschicktes Marketing. Da zwischenzeitlich die Nachfrage nach Hybridfahrzeuge gestiegen ist, arbeiten alle großen Automobilhersteller wieder verstärkt an dieser Technologie. [2] Dieser Trend wird durch die globalen und die lokalen (Deutschland) Zulassungsprognosen für Neufahrzeuge [6] bestärkt. Insbesondere in den weltweiten Ballungsgebieten, in denen Fahrzeuge überwiegend im Stop & Go betrieben werden, wird ein deutlicher Zuwachs an Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erwartet.

Durch diesen gezielten Rückblick auf die automobilen Geschichte ist ersichtlich, dass die europäischen Hersteller immer Vorreiter in der Erforschung dieser Technologie waren, allerdings die produktionsgerechte Entwicklung und wirtschaftliche Platzierung des Hybridantriebes verpasst haben und somit die Technologie- und Marktführerschaft die japanischen Hersteller übernommen haben. Basierend auf den Prognosen des Marktpotentials für Hybridfahrzeuge sollte jetzt und in Zukunft der Fokus der Entwicklungsinvestitionen der europäischen Hersteller im Bereich der alternativen Antriebe liegen, um den Vorsprung der asiatischen Hersteller zu egalisieren.

2.1.1 Klassifikation der Hybridkonzepte

Eine grundsätzliche Einteilung der Elektrohybridvarianten erfolgt entweder durch die verschiedenen Aufbauformen im Antriebsstrang (Powertrain) oder durch die Klassifizierung des Grades der Hybridisierung des Fahrzeuges. [2]

Klassifikation nach dem Grad der Hybridisierung

Eine Möglichkeit, die Hybridsysteme einzuteilen, ist die Angabe des Grades der Hybridisierung H , welcher durch Gleichung 2.1 mittels der elektrischen Antriebsleistung P_e und der verbrennungsmotorischen Antriebsleistung P_{VKM} , berechnet werden kann.

$$\text{Hybridisierungsgrad } H = \frac{P_e}{(P_e + P_{VKM})} * 100 [\%] \quad (2.1)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die elektrische Antriebsleistung durch die maximale Leistungsabgabe des elektrischen Energiespeichers bestimmt wird. In der Praxis lassen

sich die Fahrzeuge aus dem berechneten Hybridisierungsgrad in drei verschiedene Hybridkonzepte einteilen. [2]

Micro Hybrid ($H = 0 - 5\%$): BMW 320i Efficient Dynamics, ...

In diesem Konzept ist der elektrische Motor ein Start/Stopp-Generator, bei dem durch Rekuperation der Bremsenergie die Starterbatterie wieder aufgeladen werden kann. Dies ist das Einstiegskonzept für die Hybridisierung des Kraftfahrzeugverkehrs, welches inzwischen von vielen Herstellern angewandt wird und insbesondere im Stadtverkehr hilft erhöhten Kraftstoffverbrauch und Lärmemission zu vermeiden. [2]

Mild Hybrid ($H = 5 - 15\%$): Mercedes Benz S400 Hybrid, Honda Insight

Dieses Hybridkonzept ermöglicht kein selbstständiges, rein elektrisches Fahren, unterstützt aber den Verbrennungsmotor, da ein gemeinsamer Boost-Betrieb möglich ist. Dadurch lässt sich eine deutliche Steigerung der Fahrdynamik und der Effizienz des Gesamtfahrzeuges erreichen. [2]

Full Hybrid ($H = 15 - 50\%$): Mercedes Benz E300 Hybrid, Toyota Prius II

Das Konzept des Full Hybrid gewährleistet auf Grund der Struktur des Antriebsstranges und des Energiespeichers ein vollelektrisches Fahren mit einer aktuell relativ kurzen Reichweite. Das Ziel ist hier einen Hybridisierungsgrad von ungefähr 50 % zu erreichen, um im Stadtverkehr bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h vollelektrisch fahren zu können und den Verbrennungsmotor nur bei Langstreckenfahrten zuschalten zu müssen. Eine Alternative ist der „Range Extender“, bei dem ein im optimalen Drehzahlbereich arbeitender Verbrennungsmotor einen leistungsstarken Energiespeicher speist und somit die „rein elektrisch“ gefahrene Reichweite deutlich erweitert. Bei diesen autark arbeitenden Systemen erfolgt die Aufladung ausschließlich im Generatorbetrieb bzw. durch Rekuperation. Nur bei sogenannten „Plug-in-Hybriden“ können die Energiespeicher auch von einer externen Energiequelle geladen werden. [16]

Klassifikation nach der Struktur des Antriebsstranges

Eine weitere Möglichkeit, die verschiedenen Hybridvarianten zu klassifizieren, ist die Aufteilung gemäß des strukturellen Aufbaus des Antriebsstranges. Hier ist zwischen den drei grundsätzliche Varianten des seriellen, des parallelen und des leistungsverzweigten Hybrids zu unterscheiden. Da der in dieser Arbeit zu optimierende Rotor des Referenzmotors in einem parallelen Hybridsystem verbaut ist, wird im Folgenden ausschließlich auf die parallelen Hybridvarianten eingegangen. In [2] können der Aufbau, die Eigenschaften und die Funktion der seriellen und leistungsverzweigten Hybridvarianten recherchiert werden. In der schematischen Darstellung der Abbildung 2 symboli-

siert die „gestrichelte Linie“ den elektrischen Kraftfluss und die „strich-punktierte Linie“ den Fluss des fossilen Kraftstoffes.

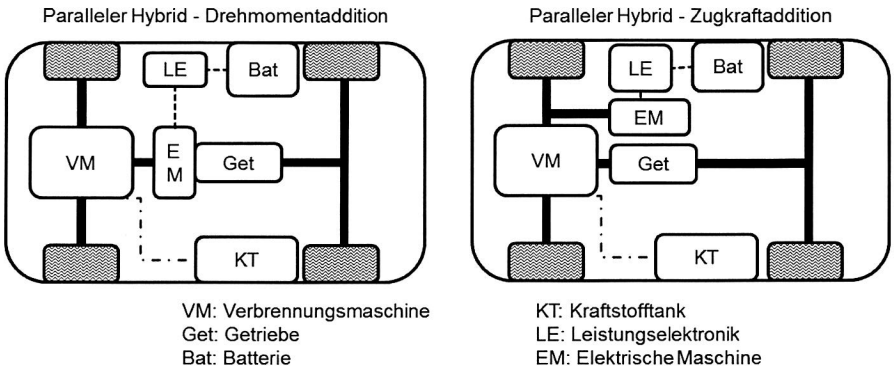


Abbildung 2: Klassifikation der Hybridkonzepte – Parallele Hybride. [2]

Beim parallelen Hybridantrieb wirken der oder die Elektromotor(en) gemeinsam mit dem Verbrennungsmotor auf den Antriebsstrang des Fahrzeuges. In mindestens einem Betriebszustand sind die Kräfte oder Drehmomente der einzelnen Antriebe gleichzeitig verfügbar (Drehmomentaddition). Zur Einkopplung des Drehmoments stehen nach dem Prinzip der Drehmomentaddition mehrere konstruktive Varianten zur Verfügung. Koaxial sind die beiden Antriebskomponenten beim Einwellenhybrid angeordnet, hingegen beim Zweiwellenhybrid die Kopplung über einen Zahnriemen oder einer Kette vollzogen werden muss. Das gleiche physikalische Prinzip der Drehmomentaddition verfolgt die Zugkraftaddition. Unterschieden wird lediglich nach dem Wirken der Antriebskomponenten auf die gleichen oder auf verschiedene Achsen. Die konstruktiven Randbedingungen des parallelen Hybrids erlauben eine schwächere Auslegung des Elektro- und Verbrennungsmotors. Resultat ist eine Kosten-, Gewichts- und Bauraumreduktion. Dieses Hybridkonzept ist besonders für Mild Hybrid Fahrzeuge geeignet. Hier ist zudem ein rein elektrisches Fahren möglich, da zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe eine Trennkupplung installiert wird, die automatisiert zwischen den verschiedenen Betriebsmodi wechseln kann. Mittels dieser Kupplung kann somit das hohe Schleppmoment des Verbrennungsmotors beim Modus „Elektrisches Fahren“ und „Rekuperation“ umgangen werden. Bei einer geeigneten Auslegung der elektrischen Maschine kann zudem auf den Starter des Verbrennungsmotors und die Lichtmaschine verzichtet werden, was zu einer Reduktion der zusätzlichen Investitionen für die Hybridisierung des Antriebsstranges des Fahrzeuges führt. [2]

2.1.2 Komponenten des Hybridantriebes

Durch die Einbindung der elektromotorischen Komponenten in die bestehenden konventionellen Fahrzeugkonzepte erhöht sich die Anzahl und zum Teil die Komplexität der unterschiedlichen Bestandteile des Fahrzeugantriebes deutlich. Abbildung 2 zeigt die für das Verständnis eines Hybridantriebes wesentlichen Komponenten. In diesem Abschnitt wird nur ein kurzer Überblick der Komponenten (PM-Synchronmotor in Abschnitt 2.2) eines Hybridantriebes aufgeführt. Dabei wird primär auf die relevanten Eigenschaften und Besonderheiten bei Verwendung in einem Hybridkonzept eingegangen. Für eine detaillierte und tiefgehende Darstellung und Beschreibung der einzelnen Komponenten wird auf die jeweilig angegebene Fachliteratur verwiesen.

Verbrennungsmotor

Ein Verbrennungsmotor ist im thermodynamischen Sinne eine Wärmekraftmaschine, welche durch Verbrennung mit Sauerstoff die chemische Energie eines Kraftstoffes in mechanische Arbeit umwandelt. Im Hinblick dessen können die konventionellen Verbrennungsmotoren in einen Otto- (Fremdzündung) und einen Dieselprozess (Selbstzündung) unterteilt werden, wobei je nach Anforderungen die beiden Verbrennungsmotortypen unterschiedliche spezifische Vorteile in Kombination mit einem Elektromotor haben und so Synergieeffekte generiert werden können. Die durch die Aufladung der Motoren resultierende Anfahrtschwäche (Turboloch) kann durch die Boost-Funktion des E-Motors kompensiert und dadurch das Potential besser ausgeschöpft werden. [17]

Getriebe

Die Aufgabe des Getriebes ist die Übersetzung der Motordrehzahl auf die Antriebsdrehzahl der Antriebsachse. Üblicherweise wird dieses als Wechselgetriebe (Verstellgetriebe) ausgeführt und ist im Automotive-Bereich notwendig, um das relativ schmale, nutzbare Drehzahlband des Verbrennungsmotors allen Geschwindigkeitsbereichen zur Verfügung zu stellen. Parallele Hybride mit Drehmomentaddition und Leistungsverzweigte Hybride haben in der Regel getriebeintegrierte Elektromotoren. Bei Automatikgetrieben wäre beispielsweise die Getriebeglocke eine adäquate Position für die Integration des Elektromotors in das Getriebekonzept. [18]

Leistungselektronik

Definitionsgemäß beschreibt die Leistungselektronik das Teilgebiet der Elektrotechnik, welches die Umformung elektrischer Energie mit elektronischen Bauelementen zur Aufgabe hat. Somit dient sie der Steuerung und Umwandlung elektrischer Energieströme und ist dadurch Bindeglied zwischen Energiespeicher (Akku) und den elektrischen Verbrauchern (E-Motor). Somit ist sie sowohl für die Versorgung des Elektromotors mit Energie, als auch für die Rekuperation der Bremsenergie in die Batterie zuständig. In

Folge dessen werden Frequenz und Spannungsniveau umgerichtet, sowie Gleichrichter- und Wechselrichterfunktionen übernommen. [19]

Die Energiespeicher

In einem Hybridfahrzeug sind zur Speicherung der für den Antrieb nötigen Energie zwei unterschiedliche Energiespeichersysteme notwendig. Zur Versorgung des Verbrennungsmotors mit Kraftstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis wird ein Tank im Fahrzeug verbaut. Während des Betriebes wird der Kraftstoff mit Hilfe der Kraftstoffpumpe und einem Leitungssystem dem Verbrennungsmotor zugeführt.

Der zweite wichtige Energiespeicher im Fahrzeug ist der elektrische Energiespeicher, der den im Getriebe integrierten Elektromotor mit Energie versorgt. In Hybridfahrzeugen finden üblicherweise drei verschiedene Systeme Anwendung, der Bleiakku, Nickel-Metallhydrid-Systeme und Lithium-Ionen-Systeme. Grundsätzlich sind alle drei Varianten Akkumulatoren, die elektrische Energie auf Basis eines elektrochemischen Systems speichern. Der aus einer oder mehreren wiederaufladbaren Zellen bestehende Akkumulator wandelt während des Ladens elektrische Energie in chemische Energie um. Bei Anschluss eines Verbrauchers (E-Motor) wird die gespeicherte chemische Energie in elektrische zurückgewandelt. Diese Energiewandlung erfolgt nach dem galvanischen Prinzip, unter dem jede Kombination von zwei verschieden edlen Elektroden und einem Elektrolyten verstanden wird. [20]

2.2 Entwicklungstrends permanenterregter Synchronmaschinen

Der Maschinentyp der permanent erregten Synchronmaschine, der sowohl als Motor als auch als Generator Anwendung findet, ist seit der Entwicklung moderner hochenergetischer Magnetmaterialien die bevorzugte Wahl der Konstrukteure, wenn auf Grund der Forderungen nach einem hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringem Bauraum die Fertigungskosten nur sekundären Einfluss haben. [21] In diesem Abschnitt werden die Funktion und der Aufbau von PM-Synchronmaschinen und die spezifischen Besonderheiten des Rotoraufbaus von getriebeintegrierten PM-Synchronmotoren für Hybridanwendungen am Beispiel des für diese Arbeit relevanten Referenzrotors erklärt.

2.2.1 Aufbau und Funktion von PM-Synchronmaschinen

Für die Transformation der mechanischen und elektrischen Energieformen sind beim Elektromotor zwei Komponenten verantwortlich. Im Stator, dem feststehenden Teil des Motors, wird die elektrische Energie eingespeist oder im generativen Betrieb abgeführt. Der drehbar gelagerte Rotor hingegen ist für die Übertragung der mechanischen Energie von oder zur Antriebswelle zuständig. [22] Die eigentliche Energiewandlung findet im Luftspalt zwischen Rotor und Stator statt. Nach diesem grundsätzlichen Funktionsprinzip arbeiten alle elektrischen Motoren. [23]

Die Untergliederung permanent erregte Synchronmotoren kann nach ihrem makroskopischen Aufbau grundsätzlich in Innenläufer- und Außenläufer-Synchronmotoren erfolgen. Die spezifischen Unterschiede und die daraus resultierenden Eigenschaften sind in [23] zu recherchieren. Da in dieser Arbeit, basierend auf dem im Folgenden beschriebenen Referenzrotor, nur Innenläufer-Synchronmotoren behandelt werden, ist unter dem Begriff Synchronmotor immer ein Innenläufer-Synchronmotor zu verstehen.

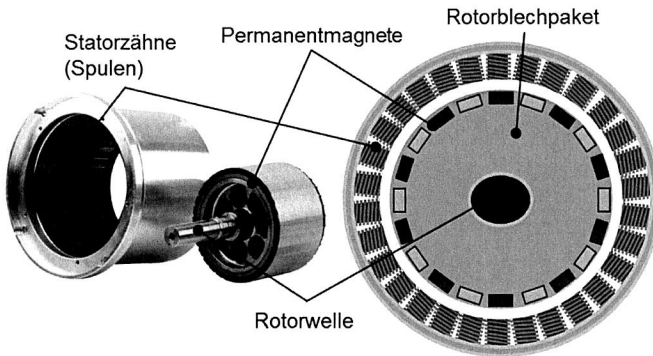


Abbildung 3: Permanent erregter Synchronmotor. Links: Motorkomponenten. [24]
Rechts: Schematischer Aufbau.

Bei einem PM-Synchronmotor wird der Rotor synchron von einem bewegten elektromagnetischen Drehfeld im umgebenden Stator mitgezogen. Die im Stator integrierten Ständerwicklungen werden dabei von, um jeweils 120° elektrisch phasenverschobenen, Wechselspannungen gespeist. Der makroskopische Aufbau des Stators kann entweder mittels einer verteilten Wicklung im Einzugsverfahren oder durch die Anwendung der Einzelzahntechnik (Statorzähne) erfolgen. [21] Die Rotation des Läufers entsteht durch dessen elektromagnetische Wechselwirkung mit dem umlaufenden Magnetfeld, das durch die zeitlich veränderlichen Ströme im Stator erscheint. Die Erzeugung des Feldes im Rotor erfolgt durch Permanentmagnete. Die Gestaltung des weichmagnetischen Grundkörpers, auf dem, bzw. in dem, die Permanentmagnete fixiert werden, ist neben der Bauform der Magnete ein wesentlicher Aspekt bei der Konstruktion des Rotors. [21] Da auf Grund der Aufgabenstellung dieser Arbeit ausschließlich quaderförmige Magnete Anwendung finden, wird auf die spezifischen applikationsbezogenen Vor- und Nachteile der verschiedenen Grundformen der Magnete nicht weiter eingegangen und auf [25] verwiesen. Die Anordnung der Magnetkörper auf dem Läufer ist dabei das grundlegende Unterscheidungsmerkmal, wobei zwischen innenliegenden und oberflächenmontierten Magneten differenziert wird. Das am weitesten verbreitete Konstruktionsprinzip von PM-Rotoren, insbesondere bei Klein- und Industriemotoren, sieht die Montage der Magnete auf der Rotoroberfläche vor. Da durch die hohen Drehzahlen von Hybrid- und

Elektrofahrzeugen, insbesondere von Traktionsmotoren, die Zentrifugalkräfte durch die Magnetkräfte, die Magnetklebung und die Bandagierung nur schwer aufgenommen werden können, wird hier das Prinzip der innenliegenden Magnete angewandt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf das Prinzip der oberflächenmontierten Magnete nicht weiter eingegangen und für weiterführende Informationen auf [26] und [27] verwiesen. Bei Rotoren mit innenliegenden Magneten muss nach [28] zwischen eingebetteten und vergrabenen Magneten differenziert werden. Die Lage der Magnete und deren Feldorientierung stellen die maßgeblichen Unterschiede dar. Als eingebettete Magnete werden die flach unter der Läuferoberfläche positionierten Magnete bezeichnet, deren Feldorientierung analog zu den oberflächenmontierten Magneten radial zur Achse des Rotors orientiert ist. Mit vergrabenen Magneten in Sammelanordnung, deren Magnetfelder tangential zur Läuferachse verlaufen, lassen sich höhere Flusssichten darstellen, die im Optimalfall über der Remanenzflussdichte der Einzelmagnete liegen können. [28] Das Blechpaket des Rotors, auf, bzw. in dem, die Permanentmagnete befestigt sind, ist mit der Rotorwelle fest verbunden.

2.2.2 Der Referenzrotor als typisches Beispiel für den Aufbau von Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren

Im Gegensatz zu klassischen PM-Synchronmotoren, die z. B. in Werkzeugmaschinen und Bahnantrieben Einsatz finden, ist der mechanische Aufbau des Rotors von getriebeintegrierten PM-Synchronmotoren für Hybridanwendungen deutlich unterschiedlich. In Abbildung 4 ist der in dieser Arbeit im Hinblick auf die Fertigungs- und Montagekosten zu optimierende Referenzmotor in seiner charakteristischen Position im Antriebsstrang eines Hybridfahrzeuges zu erkennen. Da Bauraum in Automobilen nur begrenzt verfügbar ist, müssen neue Komponenten geschickt in bestehende Systeme, wie dem konventionellen Antriebsstrang eines Kraftfahrzeuges, integriert werden. In Folge dessen wurde die Rotorwelle und das Rotorblechpaket mit dem vergleichsweise geringen Innendurchmesser klassischer PM-Synchronmotoren in ein Rotorträgersystem und ein Blechpaket mit einem großen Innendurchmesser umkonstruiert. Kausal ist die notwendige Integration weiterer Komponenten des Getriebes, wie z. B. die sogenannte Nasse Anfahrkupplung (NAK), innerhalb des Rotorträgersystems. Beim zu optimierenden Referenzrotor ist das Rotorträgersystem mehrteilig, bestehend aus einem Rotortopf und einer Stützscheibe, aufgebaut und ist baugruppenteknisch von der Getriebewelle (Antriebswelle) getrennt. Erst in der Endmontage des Fahrzeuggetriebes erfolgt die Einbindung der Baugruppe Rotor (und Stator) und somit die Verbindung mit der Antriebswelle. Zur Minimierung der Rastmomente besteht der Referenzrotor aus sechs Blechpaketen mit je 20 Magneten. Der Schrägungswinkel zwischen den Magneten zweier Blechpakete beträgt beim Referenzrotor $1,5^\circ$. Basis für die in dieser Dissertation durchzuführenden Arbeiten ist der in Abbildung 4 dargestellte Referenzrotor und dessen Position im automobilen Antriebsstrang.

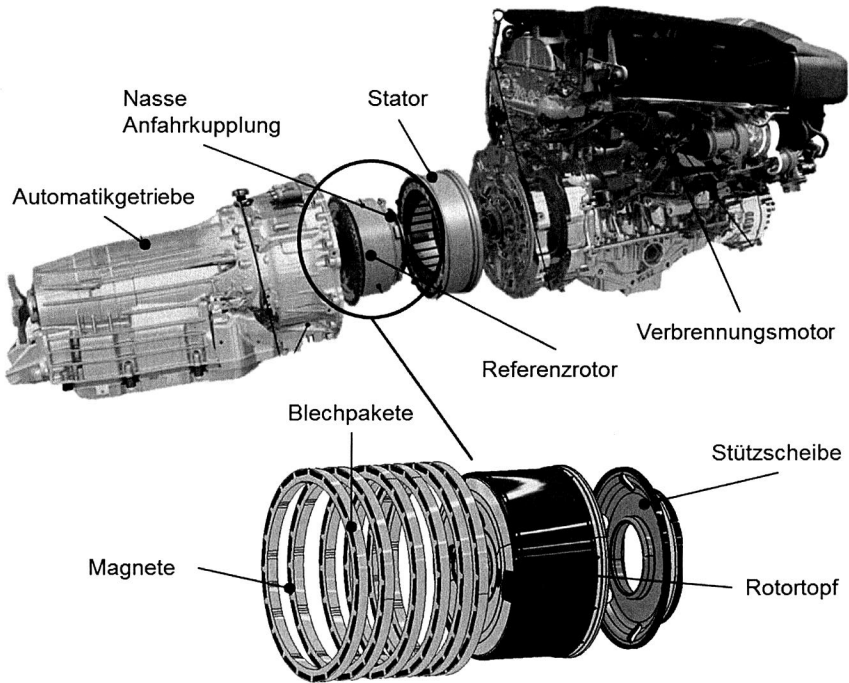


Abbildung 4: Oben: Platzierung des Referenzrotors im Antriebsstrang. [29] Unten: Aufbau des Referenzrotors.

Die einzelnen Fertigungsschritte zur Produktion des Referenzrotors und den daraus abgeleiteten Optimierungspotentialen sind zur Definition des Forschungsbedarfes in Abschnitt 3.1 - Prozesskette der konventionellen Fertigung von PM-Rotoren - dargestellt.

2.3 Funktionsrelevante Werkstoffe – Elektroblech

Die Aktivteile des Referenzrotors (Elektroblech und Permanentmagnete) können in Abhängigkeit ihrer spezifischen Auf- und Ummagnetisierungsverluste in hartmagnetische und weichmagnetische Materialien unterschieden werden. Dabei ist zu beachten, dass beide Materialien zu den ferromagnetischen Werkstoffen zählen. [30] Die physikalischen Hintergründe und die spezifischen Eigenschaften der ferromagnetischen Werkstoffe können in [31] nachgelesen werden.

Elektroband ist eine weichmagnetische Stahlsorte, die zur Bündelung und Verstärkung des magnetischen Flusses in elektrischen Maschinen Anwendung findet. Dabei trägt es als funktionsbestimmender Werkstoff wesentlich zur Energieeffizienz bei. Speziell bei

Elektromotoren im Automotive-Bereich sollte die begrenzt verfügbare elektrische Energie effizient genutzt werden, wofür lamellierte Eisenkerne mit minimalen Ummagnetisierungsverlusten zwingend notwendig sind. [32] Neben dem zukünftigen Einsatz in Traktionsantrieben im Fahrzeugbereich findet dieser Werkstoff in verschiedensten elektrischen Systemen, von Generatoren, Transformatoren, großen und kleinen Motoren, bis hin zu Vorschaltgeräten, Anwendung. Somit nimmt das Elektroband in der Welt-Rohstahlerzeugung mit einer jährlichen Menge von 9 bis 11 Mio. Tonnen einen Anteil von ca. 1 % ein. [31] Dieser Abschnitt klassifiziert die Elektrobleche hinsichtlich ihrer Kornorientierung und deren Einteilung nach ihrem Höchstwert der Ummagnetisierungsverluste. Daneben werden die Eigenschaften dieses Stahlwerkstoffes erläutert.

2.3.1 Klassifizierung und Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften von Werkstoffen können richtungsabhängig sein und werden in diesem Fall als anisotrop bezeichnet. Dies beruht auf der Kristall-Anisotropie des Eisens und seiner Legierungen, weshalb diese in einer kubischen Struktur kristallisieren (vgl. Abbildung 5). Die Würfelkantenrichtung des kubischen Gitters ist dabei, bezogen auf die magnetischen Eigenschaften, die am leichtesten magnetisierbare Richtung. Magnetisch ungünstig hingegen ist die Richtung der Raumdiagonale des kubischen Gitters. Werkstoffe, deren Eigenschaften orientierungsunabhängig sind, werden dagegen als isotrope Werkstoffe bezeichnet. Im Bereich des Elektromaschinenbaus können die Elektrobleche je nach Richtungsabhängigkeit ihrer Eigenschaften in kornorientierte (KO) und nichtkornorientierte (NO) eingeteilt werden. Für rotatorische Anwendungen, wie Motoren und Generatoren, bei denen isotrope Eigenschaften verlangt sind, wird nichtkornorientiertes Elektroblech verwendet. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf kornorientiertes Elektroblech nicht weiter eingegangen. [31]

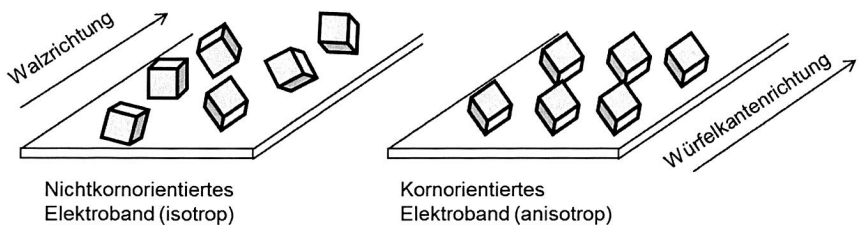


Abbildung 5: Gefüge in Abhängigkeit der Kornorientierung. [31]

Ein polykristallines Gefüge mit Korngrößen zwischen $20\text{ }\mu\text{m}$ und $200\text{ }\mu\text{m}$, in der die Kristallite ohne Vorzugsorientierung in der Blechebene ausgerichtet sind, ist die vorteilhafteste Struktur für NO-Elektroband. Diese idealen Bedingungen sind in der Praxis nicht anzutreffen. [31] In einem geringen Umfang sind die magnetischen Eigenschaften

von der Magnetisierungsrichtung (quer vs. längs), mit maximalen Verlustunterschieden von 10 %, abhängig. Verantwortlich für die Ausprägung der Isotropie ist die Herstellung, insbesondere die Warmumformung, Kaltumformung und Schlusssglühung. [31]

Neben den beschriebenen Charakteristika können die Fe-Si-Legierungen an Hand ihrer spezifischen Ummagnetisierungsverluste eingeteilt werden. Abbildung 6 zeigt eine typische Bezeichnung eines Elektrobleches. Dabei gilt nach den Normen DIN EN 10106 [33], DIN EN 10107 [34], DIN EN 10126 [35] und DIN EN10165 [36] der Buchstabe M als Symbol für Elektrobleche. Nachgestellt werden mit drei Ziffern der hundertfache Betrag der Ummagnetisierungsverluste in W/kg bei 1,5 T und 50 Hz, sowie nach dem Bindestrich mit zwei Ziffern der 100-fache Betrag der Blechdicke. Durch einen weiteren angehängten Buchstaben werden zusätzliche Merkmale hinsichtlich der Eigenschaften angegeben.

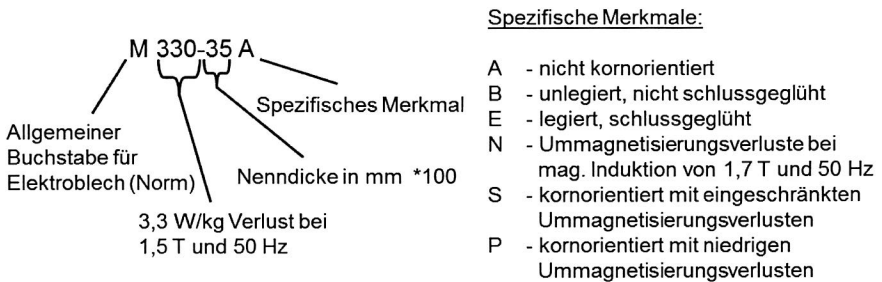


Abbildung 6: Bezeichnung Elektroblech und spezifische Merkmale. [33-36]

Die Lamellierung des magnetischen Werkstoffes ist die entscheidende Maßnahme zur Reduktion der Ummagnetisierungsverluste. Diese sind die Summe der Hystereseverluste und der Wirbelstromverluste. [37] Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Lamellierung auf die Höhe der Wirbelstromverluste. Entsprechend den Anforderungen sind Elektrobleche in der Regel in einer Dicke ab 0,2 mm bis 1,0 mm erhältlich. Die verschiedenen Güten sind in DIN EN 10106 [33] und DIN EN 10107 [34] genormt.

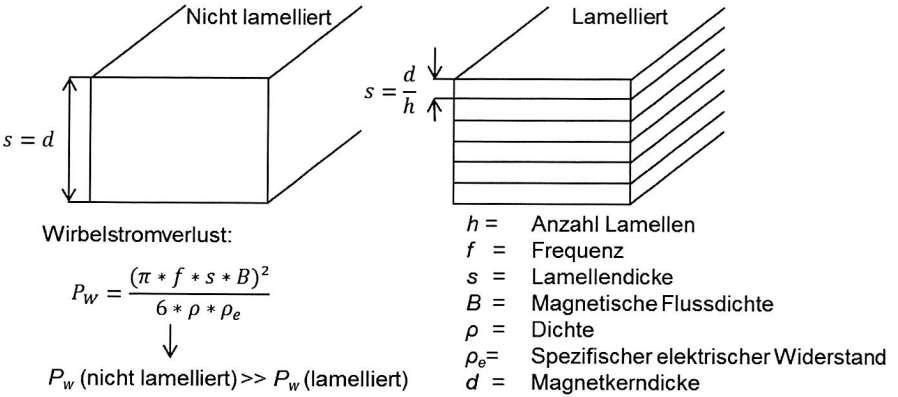


Abbildung 7: Reduzierung der Wirbelstromverluste durch Lamellierung. [31]

Die Variierung der Verluste und somit die Bezeichnung des Elektroblechs erfolgt zum einen durch die Gestaltung des Gefüges und zum anderen durch die chemische Zusammensetzung der Legierung. Tabelle 1 zeigt die chemischen Zusammensetzungen von potentiellen Elektroblechen für Hybridfahrzeuge. Hierbei ist insbesondere die Höhe des Silizium- und Aluminiumanteils für die Bewertung der Schweißbarkeit der Elektrobleche relevant. [38]

	C / %	Si / %	Mn / %	P / %	S / %	Al / %
NO30	0,003	2,680	0,195	0,016	0,002	0,964
M250-35A	0,002	2,660	0,181	0,011	0,003	0,726
M270-50A	0,002	2,642	0,190	0,014	0,003	0,731
M330-35A-HP	0,003	2,470	0,194	0,011	0,003	0,779
M330-35A-HS Isovac	0,004	2,450	0,722	0,020	0,005	0,758
M330-50A	0,002	2,396	0,193	0,018	0,001	0,361
M400-50A	0,002	2,396	0,193	0,018	0,001	0,361
M440-35AP-DC	0,006	1,250	0,260	0,045	0,001	0,113

Tabelle 1: Legierungsbestandteile ausgewählter Elektrobleche. ¹

¹ Ergebnisse der chemischen Analyse der Produktions- und Werkstofftechnik der Daimler AG

Für Anwendungen mit Frequenzen im kHz Bereich, z. B. für Elektrofahrzeuge, werden Materialdicken zwischen 0,2 und 0,5 mm und Legierungsanteile von bis zu 5 % (Silizium und Aluminium) verwendet. [32]

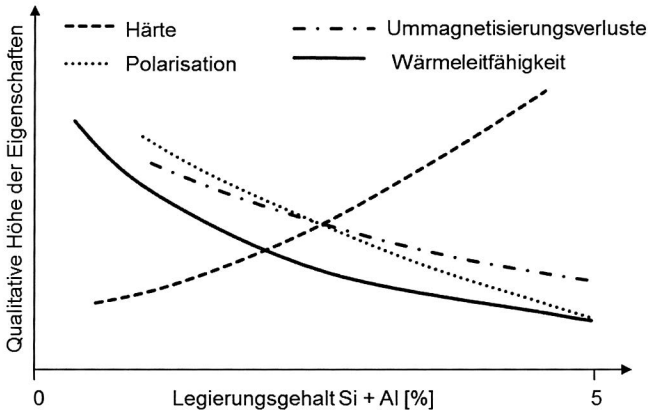


Abbildung 8: Eigenschaften in Abhängigkeit des Legierungsgehalts. [32]

Eine weitere Erhöhung der Legierungsanteile über 5 % ist zum jetzigen Zeitpunkt aus Gründen der Kaltwalzbarkeit nicht möglich. [32] Durch die hohen Legierungsanteile kann der elektrische Widerstand gesteigert und dadurch zusätzlich die Wirbelstromverluste reduziert werden. Des Weiteren nimmt die Festigkeit mit zunehmenden Legierungsanteilen zu. [32] Die Streckgrenzen der üblicherweise in Europa verwendeten Elektrobleche können in den jeweiligen Datenblättern der Firmen C.D. Wälzholz GmbH [39], Arcelor Mittal AG [40], Voestalpine Stahl GmbH [41] und Thyssen Krupp AG [42] nachgelesen werden. Typischerweise liegt die Streckgrenze für Elektrobleche der Dicke $s = 0,35$ mm zwischen 300 und 350 MPa. Bei hochfesten Elektroblechen äquivalenter Dicke liegt die Streckgrenze bei ca. 450 MPa. Niedrig legierte Bleche haben den Vorteil einer hohen Sättigungspolarisation und Permeabilität, sowie einer guten Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abbildung 8). [32]

2.3.2 Beschichtung als Isolations- und Verbindungsmaterial

Zur Minimierung der Wirbelstromverluste werden Elektrobleche üblicherweise in lackierter Ausführung verwendet. Die Auftragung des Lacksystems erfolgt bei schlussgeglühten Elektrobändern als finaler Produktionsschritt vor dem Zuschneiden. Gegenüber blanken Oberflächen bieten alle Lacke folgende Vorteile:

- Verbesserung der Stanzbarkeit → Erhöhung der Werkzeugstandzeiten

- Elektrische Isolation der einzelnen Bleche → Reduktion der Wirbelstromverluste
- Korrosionsschutz → Steigerung der Lebensdauer des Bleches

Die verschiedenen Beschichtungen sind genormt in DIN EN 10342 [43] und ASTM A976-2003 [44] und je nach Anforderung können diese, basierend auf ihren spezifischen Eigenschaften, ausgewählt werden. Von den bereits genannten führenden europäischen Blechherstellern werden üblicherweise wasserlösliche Lacke auf organischer und anorganischer Basis der Produzenten Rembrandtin Lack GmbH [45] und DuPont AG [46] verwendet. Resultierend aus den Anforderungen und Gegebenheiten des Marktes, wird in dieser Arbeit nur auf die für Elektrobleche gängigen Lacksysteme C3, C5 und C6 eingegangen. Für weiterführende Recherchen zu den übrigen Lacksystemen C0, C1, C2 und C4, wird auf die obengenannten Literaturhinweise der Normen und der Lackhersteller verwiesen. Die nachfolgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über den Aufbau und die spezifischen Eigenschaften der Lacksysteme C3, C5 und C6.

	C3	C5	C6
Chemische Zusammensetzung	Organisch (Kunstharze)	Organisch - Anorganisch	
Farbe	Gold	Grau	
Dicke (µm / Seite)	Ca. 4	1 - 4	4 - 10
Isolationswirkung	gut	ausreichend	sehr gut
Temperaturbeständigkeit (°C)	180 / 600	250 / 850	200 / 700
Dauer / kurzzeitig			
Schweißbarkeit	schlecht	gut	schlecht

Tabelle 2: Aufbau und Eigenschaften der Beschichtungssysteme. [45, 46]

Eine Besonderheit des Lacksystems C3 ist die mögliche Verwendung als Paketierungstechnik Backlack. Bei dieser Technologie wird das Lacksystem C3 unter Druck und Temperatur ausgehärtet und verbindet somit die einzelnen Lamellen des Blechpaketes adhäsiv. Ein Nachteil dieses Lacksystems im Vergleich zu den Lacksystemen C5 und C6 ist die etwas geringere Temperaturbeständigkeit und die schlechte Schweißbarkeit. Die Messung der Isolation ist gemäß des Franklin Verfahrens nach Norm IEC/CEI 60404-11 [47] und der Dauertemperaturbeständigkeit gemäß Norm IEC/CEI 60404-12 [48] definiert.

2.4 Funktionsrelevante Werkstoffe – Magnete aus Seltenen Erden

In Hybrid- und E-Fahrzeugen, aber auch in zunehmendem Maße in Kleinmotoren, werden hocheffiziente Synchronmotoren als Antrieb eingesetzt, die Permanentmagnete mit hohem Energieinhalt erfordern. Diese lassen sich bislang, vor allem bei E-Motoren für Hybridanwendungen, nur mit teuren Seltenerd-Metallen realisieren. Hohe technische Relevanz haben vor allem Magnete aus der Legierung Neodym-Eisen-Bor (Nd-Fe-B) mit Zusatz von sogenannten schweren Seltenen Erden wie Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb), die eine hohe Temperaturbeständigkeit und eine hohe Koerzitivfeldstärke bewirken. Daneben spielen Samarium-Kobalt-Werkstoffe zunehmend eine große Rolle, da diese zwar gegenüber NdFeB-Werkstoffen einen geringeren Energiegehalt, aber eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweisen. [49] Die Preise für die Seltenen Erden Neodym und insbesondere für Dysprosium sind seit Anfang 2011 stark gestiegen. Gründe sind der hohe Bedarf und die Quasi-Monopolstellung Chinas als globaler Lieferant. Die aktuelle Marktsituation führt dazu, dass außerhalb Chinas bislang unrentable alte Minen wieder in Betrieb genommen sowie neue Vorkommen erschlossen werden sollen. [50] Gleichzeitig wird verstärkt an Ansätzen für eine Reduktion des Einsatzes von Seltenerd-Materialien und Strategien für ein Recycling dieser Werkstoffe gearbeitet, basierend auf deren Herstellung und Montage. [51]

Die Klassifizierung der wichtigsten in DIN EN 60404-2 [52] genormten Magnetwerkstoffe erfolgt nach deren magnetischen Eigenschaften. In Tabelle 3 sind die Materialkennwerte der Grundlegierungen der Seltenerd-Materialien und zum Vergleich von Stahlmagneten und keramischen Magneten dargestellt.

	Energiedichte ($B \cdot H$) in kJm^{-3}	Remanenzfluss- dichte B_r in mT	Koerzitivfeldstärke H_c in kAm^{-1}	Curie Temperatur T_c in $^{\circ}\text{C}$
NdFeB	200 - 415	1030 - 1430	770 - 1090	310 – 400
SmCo	140 - 240	850 - 1120	580 - 820	720 – 800
AlNiCo	52 - 62	1250 - 1350	55 - 58	700 – 860
Hartferrit	25 - 30	370 - 390	230 - 245	450

Tabelle 3: Werkstoffkennwerte ausgewählter Hartmagnete. [53]

Wegen ihres stark negativen elektrochemischen Standardpotentials werden Seltenerd-Metalle zu den unedlen und somit reaktionsfreudigen Elementen gezählt. Um Korrosion zu vermeiden, werden daher entweder edlere Elemente (z. B. Kobalt) dazulegiert oder eine Beschichtung aufgetragen. [25] Neben dem Korrosionsschutz kann durch die Beschichtung die Handhabung und die Reinigung der Magnete erleichtert werden. Die verschiedenen Beschichtungstypen lassen sich in metallische und organische Be-

schichtungen untergliedern. [53] Deren Eigenschaften, Herstellungsverfahren und Erscheinungsbild sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Material	Verfahren	Schichtdicke [μm]	Farbe	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Zinn (Sn)	Galvanisch	> 15	Silber	< 160
Nickel (Ni)	Galvanisch	> 10	Silber	< 200
Sn + Ni	Galvanisch	Ni > 5, Sn > 10	Silber	< 160
Aluminium Passiviert	IVD	> 5	Silber/ Gelb	< 500
Aluminium Sprühlack	Lackierautomat	> 5	Gelb	< 180
Epoxy Sprühlack	Lackierautomat	> 10	Schwarz	< 200

Tabelle 4: Oberflächenbeschichtungen von Magneten. [53]

Typische metallische Beschichtungen aus Nickel und / oder Zinn werden durch galvanische Verfahren aufgebracht, wobei hier auf eine mögliche galvanische Elementbildung im fertigen System zu achten ist. Eine Alternative zu den galvanischen Verfahren bei den metallischen Beschichtungstypen ist die IVD (Ion-Vapour-Deposition) -Aluminium-Beschichtung. Deren kathodische Schutzwirkung erlaubt einen Dauereinsatz unter Wasser und bei Temperaturen bis 500 $^{\circ}\text{C}$. Organische Beschichtungen können in eine Aluminium- und eine Epoxysprühlackierung untergliedert werden. Ähnlich gute Klimabeständigkeiten wie IVD-Aluminium weist die mit Aluminiumflakes gefüllte Einbrennlackierung auf. Eine Besonderheit ist die Möglichkeit der Verwendung einer unausgehärteten Lackschicht als hochfeste Klebeverbindung, die sich durch das Einbrennen der Lackierung im Anschluss an die Montage des Magneten ausbildet. [53]

3 Designrelevante Optimierungspotentiale in der Rotorproduktion

Die Effizienz eines Produktionssystems ist grundsätzlich abhängig von organisatorischen, personellen und technologischen Einflussfaktoren. In der stückzahlintensiven Produktion wurden daher in den vergangenen Jahrzehnten größte Anstrengungen in der Optimierung der organisatorischen und personellen Fertigungsstrukturen durchgeführt. [54] Das Resultat, flexible hochautomatisierte Produktionsanlagen, ist quasi in allen stückzahlintensiven Fertigungen der Industrienationen anzutreffen. [55] Diese Entwicklung wird kontinuierlich fortgesetzt und zudem durch weitere Forschungsanstrengungen in Kooperation mit verschiedenen Instituten und Universitäten unterstützt. Die Qualifizierung der Produktionsmitarbeiter nimmt äquivalent mit dem Automatisierungsgrad der Fertigung zu, da die Mitarbeiter verschiedenste Aufgaben in der Bestückung und Entstörung ganzer Fertigungsstraßen übernehmen müssen. [56] Die gesteigerte Qualifizierung der Werker hat zudem den positiven Effekt der kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse durch eine motivierte und konsequente Anwendung verschiedenster Methoden des KVP². [57] In der Optimierung der Effizienz eines Produktionssystems muss aus diesem Grund der Fokus der Anstrengungen auf die technologische Gestaltung der zu fertigenden Komponenten gerichtet werden. [58] In diesem Kapitel wird daher zunächst im ersten Abschnitt die Prozesskette der konventionellen Fertigung von getriebeintegrierten PM-Rotoren für Hybridfahrzeuge mit den zugehörigen möglichen Fertigungsverfahren erläutert. Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Prozessschritte in der Produktion des Referenzrotors vorgestellt und die Einzelprozesse hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale bewertet. Basierend auf die identifizierten zu optimierenden Prozessschritte erfolgt eine Offenlegung und Beurteilung bisheriger Ansätze der kostenoptimierten Fertigung mittels einer Literatur- und Patentrecherche. Der Abschluss dieses Kapitels zeigt den Forschungsbedarf zur designrelevanten Optimierung der Fertigung dieser Rotoren, insbesondere des Referenzrotors und stellt somit die Motivation zur Anfertigung dieser Arbeit dar.

3.1 Prozesskette der konventionellen Fertigung von PM-Rotoren

Von der produktspezifischen Konstruktion unabhängig durchlaufen Permanentmagnetrotoren in ihrer Herstellung grundlegende Fertigungs- und Montageschritte. Diese sind generell, wie in Abbildung 9 dargestellt, in die Herstellung der Blechpakete, die Montage der Magnete, die Fertigung des Rotorträgersystems und die Montage der bestückten Blechpakete auf dem Rotorträgersystem zu untergliedern. Als abschließende Prozessschritte sind je nach Ausführungsform die Aufmagnetisierung der Magnete und das Wuchten des finalen Produkts zu nennen. Die genannten Prozessschritte sind in

² Kontinuierlicher Verbesserungsprozess

einer Serienproduktion in der Regel vollautomatisiert verkettet und ermöglichen eine durchgängige Produktion von der Anlieferung der einzelnen Zulieferkomponenten bis zur Prüfung des finalen Produkts. In diesem Abschnitt werden daher die verschiedenen typischen Fertigungsverfahren der genannten Prozessschritte in der Produktion von PM-Synchronrotoren dargestellt.

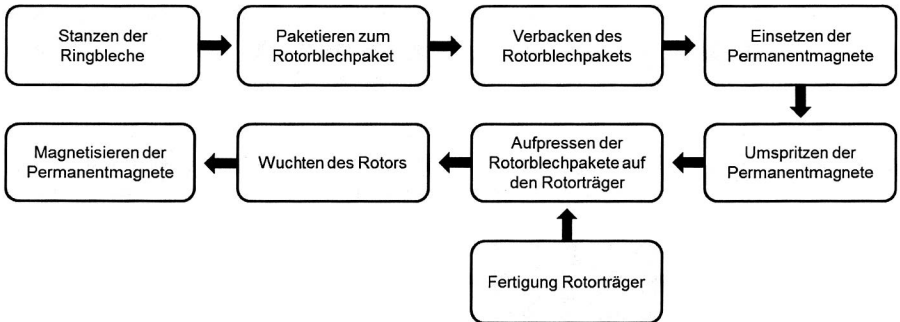


Abbildung 9: Ablaufdiagramm Fertigungsprozess Referenzrotor.

3.1.1 Herstellung der Blechpakete

Analog zum Stator und zu elektrisch erregten Rotoren stellt das Blechpaket auch bei permanent erregten Rotoren die Basiskomponente der Baugruppe Rotor dar. Im Gegensatz zu allen anderen Komponenten soll das Blechpaket bevorzugt aus einer möglichst hohen Anzahl zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten und zueinander elektrisch isolierter Elektrobleche aufgebaut werden. Die zu fertigende Stück- und Variantenanzahl des Motors gibt maßgeblich die Fertigungs- und Paketierungsverfahren und das notwendige Automatisierungskonzept vor. Für die Herstellung der Blechlamellen für den Prototypenbau und für Kleinserien, werden überwiegend thermische oder wirkmedienbasierte Schneidverfahren, wie zum Beispiel Laser- oder Wasserstrahlschneiden, angewendet.



Abbildung 10: Schneidtechnologien für Elektrobleche. [59-61]

Bei großen Stückzahlen in effizienten Serienprozessen kommen dagegen Folge- oder Komplettschnittwerkzeuge mit geometrisch definierten Schneidgeometrien zum Einsatz. Die genannten Schneidverfahren von Elektroblechen sind ausgereifte Prozesse, die neben der kontinuierlichen Entwicklungsarbeit der Industrie auch wissenschaftlich untersucht und optimiert wurden. [62] Die Produktion, insbesondere bei den werkzeuggebundenen Prozessen, ist entsprechend der Serienanforderungen hochautomatisiert gestaltbar. [31]

Im Anschluss an den Zuschnitt müssen die Blechlamellen gestapelt, verpresst und zu einem festen Blechpaket verbunden werden. In der Praxis geschieht dies bevorzugt durch Verkleben, Nieten, Klammern, Paketierungsschweißen oder Stanzpaketieren (siehe Abbildung 11).

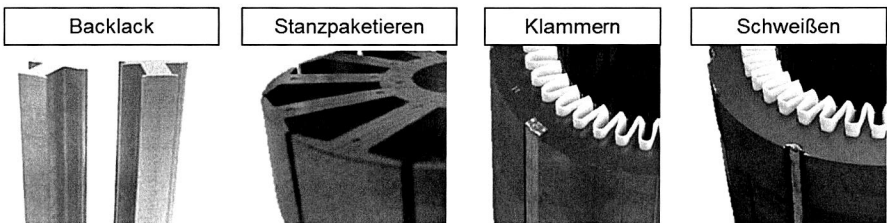


Abbildung 11: Paketierungstechnologien für Blechpakete. [63]

Die Wahl und der Automatisierungsgrad der gewählten Paketierungslösung erfolgt in Abhängigkeit der Blechgröße und Stückzahl. Im Prototypenbau, im Bereich von Kleinserien und bei Motoren für Hybridfahrzeuge, wird oftmals das Backlack-Verfahren angewendet, bei dem die Bleche mittels einer aushärtbaren C3-Isolierung nach dem Zuschneiden der Kontur und der Stapelung unter Druck und Temperatur zu Blechpaketen verbacken werden. Im Großserienumfeld erfolgt die Paketierung üblicherweise durch Stanzpaketieren. Bei diesem Verfahren ist der Paketiervorgang im Schneidprozess integriert, da ein weiterer Stempel des Stanzwerkzeuges Stanzmarken nach der Technik des Durchsetzfügens in die Folgebleche einprägt und somit eine kraftschlüssige Paketierung resultiert. Paketierungen durch Nieten und Klammern erfolgen meist bei mittleren Seriengrößen und Anwendungen mit geringer mechanischer Belastungen auf das Blechpaket, wie gehausten Statoren. Für Anwendungen, bei denen eine hohe mechanische Dauerfestigkeit garantiert werden muss und gleichzeitig eine mögliche Steigerung der Wirbelstromverluste akzeptabel ist, kann das Verfahren des Paketierungsschweißens verwendet werden. Hier wird eine definierte Anzahl von Schweißnähten (bis zu einer Tiefe von 1 mm) an elektromagnetisch günstigen Stellen entlang der Blechlamellen aufgebracht. Durch das immer stärker werdende Interesse der Automobilindustrie an kostengünstigen Hochleistungsmotoren wird die Entwicklung und Optimierung der diversen Paketierungstechnologien forciert. Als Resultat können das neuartige Klebe-

verfahren glulock® von [64], das schnelle Induktionsverbacken von [65] und das Spritzgusspaketieren von [66] genannt werden.

3.1.2 Magnetmontage

Die Bestückung und Fixierung der Permanentmagnete in den Slots der Blechpakete von PM-Rotoren stellt einen stark produktspezifischen Montageprozess dar. Die spezifische Auslegung der Maschine und die dadurch resultierende konstruktive Gestaltung des Rotors lässt die Anzahl und Geometrie der Magnete und somit auch den Automatisierungsgrad der Fertigung stark variieren. Zur Reduzierung von Parasitäreffekten, wie Rastmomente und lastabhängige Drehmomentpendelungen, muss entweder der Rotor oder der Stator geschrägt³ werden [67]. Durch eine axiale Staffellung des Rotors erhöht sich somit automatisch die Anzahl der Magnete und der Fügeoperationen. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Einteilung der Bestück- und Fixierungsstrategien ist der Magnetisierungsgrad der Magnete. Hier muss zwischen passiven (unmagnetisiert) und aktiven (magnetisiert) Magneten unterschieden werden. In der Handhabung passiver Magnete ist der größte Vorteil, dass während des Fügeprozesses keine Magnetkräfte auftreten. Dadurch können innerhalb eines Montagezykluses alle Magnete eines Blechpaketes mittels eines einfachen Pick&Places Vorganges positioniert werden. Der Investitionsanteil für die manuelle oder automatisierte Montagestation ist daher verhältnismäßig gering. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Prozesssicherheit der Montage, da eine fehlerhafte Feldorientierung bei passiven Magneten nicht möglich ist. Nachteilig ist in diesem Konzept die abschließende Magnetisierung der Magnete, wofür eine separate Station notwendig ist. Neben den Investitionen für die Aufmagnetisierungsanlage beeinträchtigt der zusätzliche Handhabungs- und Logistikaufwand die Wirtschaftlichkeit dieser Bestückstrategie. Des Weiteren ist die Energiedichte der passiven Magnete nach dem Aufmagnetisieren etwas geringer als bei aktiven Magneten [68]. Bei der Verarbeitung aktiver Magnete ist der finanzielle und logistische Mehraufwand der nachträglichen Magnetisierung nicht notwendig und Maschinen mit höchsten magnetischen Energiedichten sind fertigbar. Allerdings liegt ein nicht zu vernachlässigbarer Nachteil in den extrem hohen volumenbezogenen Magnetkräften, die während der Montage auf die Magnetkörper einwirken. Neben den dadurch erschwerten Vereinzelungsmechanismen, finden Wechselwirkungen der aktiven Magnete mit ferromagnetischen Materialien, wie dem Blechpaket, statt. Dies erschwert die Positionierung der Magnete in den Slots und kann nur durch ausgereifte und kostenintensive Montageanlagen kompensiert werden.

Im Anschluss an den Positionierungsprozess oder in diesen integriert, muss die Fixierung der aktiven oder passiven Magnete vollzogen werden. Neben den rein magnetischen Haltekräften müssen speziell bei getriebeintegrierten Motoren zusätzliche axiale Haltekräfte durch Fixierungstechniken aufgebracht werden. Dies ist notwendig, da im

³ Auch als Schränkung bezeichnet

Antriebsstrang heutiger Kraftfahrzeuge hohe Axialbeschleunigungen⁴ auftreten können. In der Regel erfolgt dabei die Fixierung der Magnete durch Kleben, Träufeln von Harz oder Umspritzen mit Kunststoff (siehe Abbildung 12).

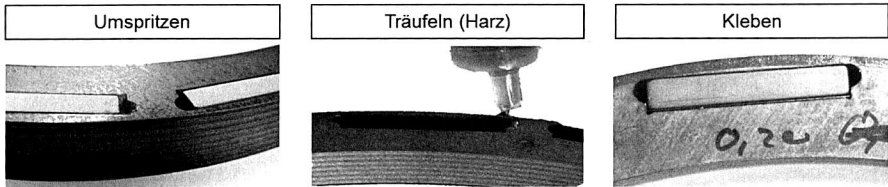


Abbildung 12: Fixierungstechnologien für PM-Magnete.

Beim Kleben der Magnete kann der verwendete Kleber während des Positionierprozesses oder als separater Prozessschritt im Anschluss an diesen hinzugefügt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine ausreichende Härtezeit eingehalten und währenddessen der Magnet in seiner Position gehalten wird. Das Umspritzen der Magnete mit Kunststoff oder das Träufeln von Epoxidharzen zur Fixierung muss im Anschluss an den Positionierprozess vollzogen werden. Ein ausreichender Fügespalt oder entsprechende Taschen im Bereich des Magnetslots sind notwendig, um genügend Kunststoff oder Harz in das System einbringen zu können. Nachteilig sind weiterhin die hohen Anlageninvestitionen für die Spritzgussmaschine und die Kavitäten. Zudem muss je nach Größe der Magneten ein großer Teil des Kunststoffes als Anguss entsorgt werden. Des Weiteren können je nach Auslegung des Motors Probleme bei der Entwärmung der Magnete entstehen, wegen der schlechteren Wärmeleitung der Kunststoffe.

3.1.3 Aufbau und Fertigung des Rotorträgersystems

Neben den bestückten Blechpaketen ist der Rotorträger eine weitere Basiskomponente des Rotors permanent erregter elektrischer Maschinen. Er dient der Übertragung resultierender Rotationsmomente und -kräfte auf die An- bzw. Abtriebswelle des Kraftfahrzeuges im motorischen und äquivalent im generatorischen Betrieb. Dafür müssen in der Konstruktion und Fertigung des Rotorträgers entsprechende Vorkehrungen zur drehmomentsicheren Aufnahme der Blechpakete (vgl. 3.1.4) getroffen werden. Grundsätzlich sind die Rotorträger permanent erregter elektrischer Maschinen, wie in Abbildung 13 gezeigt, in einfache einteilige Rotorwellen und deutlich komplexere mehrteilige Rotorträgersysteme zu unterteilen.

⁴ Resultierend bei Fahrzeugen mit Heckantrieb aus Sicherheitsbeiwert für Reparaturcrash - Beim Referenzrotor Werte bis zur dreißigfachen Erdbeschleunigung

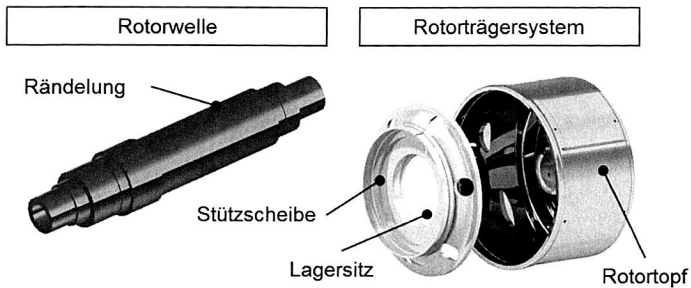


Abbildung 13: Rotorwelle und Rotorträgersystem.

Die deutlich kostengünstigeren, in der Regel als Drehteil ausgeführten, Rotorwellen finden überwiegend in Werkzeugmaschinen und Traktionsantrieben von Schienenfahrzeugen und elektrischen Automobilen Anwendung. Vorteilhaft ist hier die Gestaltung des Blechschnitts mit einem kleinen Innendurchmesser, um den Zerspanaufwand der Rotorwelle zu minimieren. Zudem werden insbesondere in der Massenproduktion die rohen Wellen oft lediglich über ihre gesamte Länge auf einen Durchmesser gedreht, bzw. geschliffen und zur Sicherung der Blechpakete gegen Verrutschen mit einem Rändel versehen. In modernen Serienfertigungen mit CNC-Werkzeugmaschinen, läuft der Zerspanprozess weitestgehend automatisiert ab, so dass der Personalaufwand überwiegend durch den stückzahlabhängigen Automatisierungsgrad der Werkstückhandhabung während des Bestück- und Entladeprozesses der Werkzeugmaschinen bestimmt wird. Bei komplexen Systemen, bei denen die optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums höchste Priorität hat, wie z. B. bei Hybridfahrzeugen mit getriebeintegrierten Elektromotoren, zu denen der Referenzmotor zählt, finden Rotorträgersysteme Anwendung (vgl. Abschnitt 2.2.2).

3.1.4 Montage der bestückten Blechpakete auf dem Rotorträger

Ein weiterer großer Schritt in der Fertigung eines PM-Rotors ist die Montage der bestückten Blechpakete auf dem Rotorträger. Unabhängig von dessen Gestaltung als Rotorwelle oder Rotorträgersystem wird als Verbindungstechnik in der Regel der Kraftschluss durch Aufpressen der Blechpakete gewählt. Bei Verwendung einer Presspassung kann die Festigkeit gesteigert und die Montage durch entgegengesetzte Temperierung der Fügepartner erleichtert werden. Dies ist aber mit den resultierenden ökonomischen Nachteilen, basierend auf den steigenden Investitions- und Betriebskosten, abzuwägen. Die Aufgabe des Kraftschlusses ist die axiale Fixierung und die Drehmomentsicherung der Blechpakete gegenüber dem Rotorträger und somit der Antriebswelle. Zur Gewährleistung der axialen Fixierung und zur Steigerung der Prozesssicherheit der Montage erfolgt das Aufpressen der Blechpakete mittels einer Presse in der Regel bis zu einem definierten Anschlag / Absatz der Rotorwelle oder des

Rotortopfes. Für einen laufruhigen Betrieb ist eine definierte Schrägung der Blechpakete notwendig. Diese kann je nach Auslegung der Maschine als V-Schrägung oder als Linear-Schrägung (Abbildung 14) mit einem definierten Schrägungswinkel ausgeprägt sein.

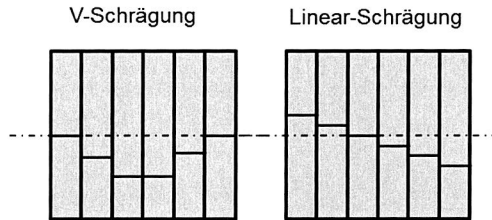


Abbildung 14: Schrägungsvarianten: Links: V-Schrägung. Rechts: Linear-Schrägung.

Für eine genau definierte Einstellung der Schrägung ist entweder eine hochpräzise Montageperipherie oder ein Feder-Nut-System im Blechpaket und Rotorträger notwendig. Eine weitere Alternative zur Realisierung einer Drehmomentsicherung stellt das Aufbringen einer Klebung zwischen Blechpaketen und Rotorträger dar.

3.1.5 Abschließende Prozessschritte

In der Regel sind die finalen Prozessschritte der Montage eines PM-Rotors die Magnetisierung der passiven Magnete (wenn keine aktiven Magnete verbaut wurden) und das Wuchten des fertigen Produkts.

Magnetisierung

Durch das Bestücken eines Rotors mit passiven Magneten muss dem Magnetmaterial vor der Montage im Getriebe die zur Felderzeugung notwendige magnetische Energie zugeführt werden. Mittels Anlegen eines sehr starken elektromagnetischen Feldes, dessen Feldstärke je nach Werkstoff zwischen dem Drei- und Siebenfachen der jeweiligen Koerzitivfeldstärke H_C liegt, werden die Magnete aktiviert. [53] Über einen der spezifischen Polgeometrie angepassten Magnetisierkopf, können, entsprechend den Dimensionen des Rotors und der Komplexität des Feldverlaufes, sequentiell die einzelnen Pole magnetisiert werden. Alternativ kann in spezifischen Anwendungsfällen auch der gesamte Rotor in einem Schritt magnetisiert werden. [69] Das Herzstück des Magnetisierkopfes sind stromdurchflossene Spulen. Abhängig von der Größe des zu magnetisierenden Werkstoffes liegt die Impulsdauer des Stromstoßes bei ungefähr 1 ms, wobei die Aufmagnetsierung nur wenige Nanosekunden dauert. Aus energetischer Sicht variiert die benötigte elektrische Energie je nach Magnetgeometrie zwischen einigen 100 J und 200 kJ bei einer Ladespannung von bis zu 3 kV. Da ein Großteil der benötigten

Energie als Verlustwärme abgeführt werden muss, ist in einer Serienfertigung eine Luft- oder Wasserkühlung notwendig, wodurch weitere Kosten durch eine aufwändige Kühlperipherie entstehen. [68]

Wuchten

Vibrationen, Geräusche und erhöhter Verschleiß sind das Resultat von Unwuchten starrer Körper, die in Rotation versetzt werden. Bei Erreichen sogenannter kritischer Drehzahlen regen die resultierenden Kräfte das schwingungsfähige Gesamtsystem (Rotor und Welle) zu Resonanz an, was zu einer Beschädigung des Systems führen kann. Falls aus fertigungstechnischen Gründen die Unwuchten anwendungsbezogene Grenzwerte überschreiten, muss ein Massenausgleich individuell an diesem Körper vollzogen werden. Dies wird als „Auswuchten“ bezeichnet und kann je nach Anforderungen positiv oder negativ erfolgen.

- Positiver Wuchtausgleich: Auftragen von Ausgleichsmassen, z. B. Anschweißen, Anlöten, Ankleben oder Anschrauben von Gewichten
- Negativer Wuchtausgleich: Abtragen von Massen durch Bohren, Schleifen oder Fräsen

Die Tolerierung für das Auswuchten ist in DIN ISO 1940 [70] standardisiert. Beim Wuchtprozess von Rotoren versetzt eine Wuchtmaschine den zu prüfenden Rotor in Rotation. Basierend auf den an der Achse gemessenen Werten der auftretenden Kräfte errechnet die Auswertungselektronik der Wuchtmaschine die Unwucht des Rotors und bestimmt die genaue Position und die zu ändernde Masse für den Wuchtprozess. [71] Eine Innovation stellt das in [72] beschriebene „Positiv-Wuchten“ dar. Bei diesem Prozess werden keine normierten Gewichte befestigt, sondern eine durch die Auswertelektronik genau berechnete Menge Lot präzise an definierter Stelle aufgetragen.

3.2 Bewertung der Einzelprozesse in der Produktion des Referenzrotors hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale

Um Ansatzpunkte für potentielle Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Prozesskette der Fertigung konventioneller PM-Synchronrotoren darzulegen, erfolgt eine Erläuterung der einzelnen Prozessschritte in der Fertigung des Referenzrotors. Anschließend werden die beschriebenen Einzelprozesse hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale bewertet.

3.2.1 Fertigungsschritte in der Produktion des Referenzrotors

Für die Serienfertigung des Referenzrotors finden Folgeschnittwerkzeuge zur Produktion der Rotorringe Anwendung. Die Auslegung des Innendurchmessers der Rotorringe ist ein Kompromiss zwischen den elektromagnetischen Anforderungen hinsichtlich

der Flussführung und den bauraumtechnischen Vorgaben der Getriebekonstruktion. Durch den so entworfenen dünnen Ring mit einer Breite von 13,7 mm und einem Innendurchmesser von 200 mm entsteht beim Stanzen ein immenser Blechverschnitt, woraus ein Blechausnutzungsgrad von nur 18 % resultiert. Aus wirtschaftlicher Sicht kann zwar ein Erlös durch den Verkauf des Blechverschnitts gewonnen werden, dieser beträgt beim Referenzrotor aber lediglich ca. 10 % des Neuwertes.

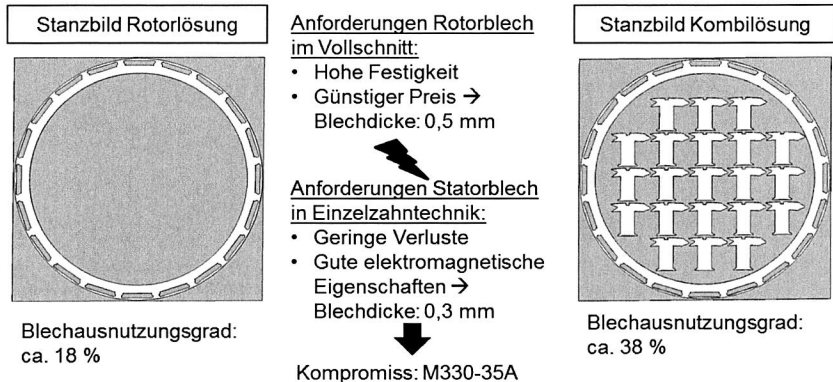


Abbildung 15: Stanzbildvergleich der separaten Rotorlösung und der Kombilösung – Verschiedene Anforderungen an Stator- und Rotorblech.

Zur Optimierung des Blechausnutzungsgrades besteht die Möglichkeit, bei Verwendung eines Stators in Einzelzahntechnik, wie in Abbildung 15 zu erkennen, einen Teil der Statorzähne aus dem Blechverschnitt des Rotors zu stanzen. In Abhängigkeit der Größe und der Positionierung der Statorzähne ist der Blechausnutzungsgrad beim Referenzrotor auf bis zu 38 % zu steigern. Nachteilig an diesem Verfahren sind jedoch die gesteigerten Investitionskosten für die Stanzwerkzeuge und die zugehörige Peripherie, der höhere Logistikaufwand durch die mehrgleisige Zahnproduktion und die zwingend notwendige Kopplung der Produktion von Rotor und Stator durch die Verwendung gleicher Bleche. Somit stellt das gewählte Blech einen Kompromiss zwischen den Festigkeitsanforderungen des Rotors und den elektromagnetischen Anforderungen des Stators dar.

Als Paketierungstechnologie wird in einem hochautomatisierten Prozess das Verbacken angewendet, da somit eine großflächige Verbindung (ohne Auffächern) der einzelnen Bleche garantiert und Kurzschlüsse (führen zu Wirbelstromverlusten) zwischen den Blechen vermieden werden können.

Die Montage der Permanentmagnete im Blechpaket des Referenzrotors erfolgt vollautomatisiert durch roboter-gesteuerte Greifersysteme. Basierend auf Abschätzungen hinsichtlich Stückzahl, Automatisierungsaufwand und Handhabungssysteme werden die Magnete im passiven Zustand montiert und in einem anschließenden Prozessschritt aktiviert. Als Fixierungstechnologie kommt das Umspritzen der Magnete mit einem Thermoplast zum Einsatz, wobei dieser in die halbkreisförmigen Flusssperren der Magnete im Blechpaket eingespritzt wird. Als Anguss müssen dabei deutlich mehr als 300 % des notwendigen Kunststoffes entsorgt werden.

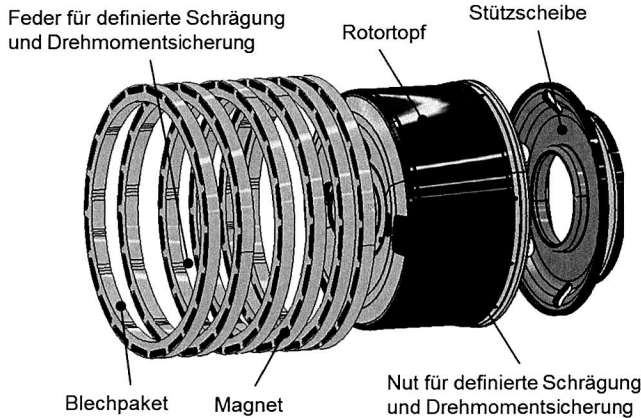


Abbildung 16: Komponenten des Referenzrotors.

In der technologischen Bearbeitung zur Herstellung des Rotortopfes des Referenzrotors kommen neben den klassischen spanenden Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen) umformtechnische Verfahren (Tiefziehen) zur Reduktion des Materialaufwandes zum Einsatz. Hierfür müssen spezifische Werkzeuge konstruiert und angefertigt werden, die einen prozesssicheren Produktionsschritt garantieren. Nach der Fertigstellung der Topfform werden durch spanende Verfahren die Passsitze für die Wellenmontage und die Aufnahmen und Sitze für die Blechpakete gefertigt. Eine weitere Komponente des Rotorträgersystems ist die Stützscheibe, deren Montage auf dem Rotortopf im Anschluss an die Montage der Blechpakete durch Aufpressen vollzogen wird. Neben der Lagerfunktion nimmt die spanend gefertigte Stützscheibe Axialkräfte der Blechpakete auf und dient als Wuchtebene des Rotors. Als Wuchtverfahren findet die in Abschnitt 3.1.5 beschriebene Technologie des Positiv-Wuchtens nach [72] Anwendung. In der Konstruktion des Referenzrotors ist das Feder-Nut-System so ausgelegt, dass die vorgegebene V-Schrägung durch drei Nuten mit definiertem Winkelversatz im Rotortopf von $1,5^\circ$ und einer Feder in den Gleichteil-Blechpaketen dargestellt wird. Das beschriebene Feder-

Nut-System hat zudem den Vorteil, die Drehmomentsicherung durch den entstehenden Formschluss zu garantieren.

3.2.2 Bewertung der Fertigungsschritte hinsichtlich möglicher Optimierungspotentiale

Neben dem Automatisierungsgrad und der Komplexität des Prozesses sind wesentliche Aspekte für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen und Produktionsanlagen die anfallenden Investitions- und Materialkosten, der Reifegrad des Fertigungs- und Montageprozesses und die Effizienz der Fertigung. Bei Betrachtung der beschriebenen Fertigungs- und Montageschritte des Referenzrotors ergibt sich hinsichtlich der genannten Faktoren ein heterogenes Bild. Da es sich hierbei um einen Großserienprozess im Automobilbereich handelt, ist der Automatisierungsgrad sehr hoch ausgebildet und prozesssicher entwickelt. Daraus resultieren ein im Vergleich zur variantenreichen Produktion von Industriemotoren geringer Personaleinsatz und ein hoher Reifegrad der angewendeten Prozesstechnologien, insbesondere der materialbearbeitenden Prozessabschnitte. Daher ist das Rationalisierungs- und Optimierungspotential, das durch eine Steigerung des Automatisierungsgrades gehoben werden kann, insgesamt als gering zu bewerten. In standardisierten Prozessen, bei denen der Grad der Automatisierung vollständig optimiert wurde, können durch Änderungen im Design und Konstruktion der zu fertigenden Komponenten und durch Umgestaltung von Montagetechnologien weitere Rationalisierungs- und Optimierungspotentiale erschlossen werden. Zur Identifikation der zur optimierenden Fertigungsschritte in der Produktion des Referenzrotors werden die in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Prozessschritte hinsichtlich der Kriterien Reifegrad des Prozesses, zu tätige Investitionen, Materialkosten während der Produktion und Effizienz (Kosten und Zeit) des Prozesses qualitativ bewertet.

Die Ergebnisse (Abbildung 17) der qualitativen Bewertung der Prozessschritte zeigen, dass die Reifegrade aller behandelten Prozesse durchwegs optimiert sind und durch Weiterentwicklungsarbeiten kein relevanter Beitrag zur Rentabilitätssteigerung zu leisten ist. Der hohe Investitionsbedarf für die großen und komplexen Stanzwerkzeuge und die hohen Materialkosten, resultierend aus dem geringen Blechsausnutzungsgrad, verdeutlichen die Notwendigkeit, im Design und der Konstruktion des Blechschnittes, Optimierungen vorzunehmen. Hinsichtlich der Paketierung besteht aktuell kein zwingender Handlungsbedarf, da diese Technologien konsequent durch die Lieferanten [63, 64, 73] weiterentwickelt und optimiert werden. Der geringe Investitionsanteil und die hohe Effizienz der Magnetbestückung werden durch die Aufwände der abschließenden Magnetisierung während der Folgeprozesse kompensiert. Allerdings ist bei einer zu erwartenden Zunahme der Stückzahlen ein kostengünstiger und effizienter Bestückprozess der passiven Magnete vorteilhafter, als ein Bestückprozess der aktiven Magnete ohne abschließende Magnetisierung. Durch den hohen Investitionsanteil für die Kavitäten samt

Spritzgussmaschine und die gleichzeitig hohen Materialkosten für den Kunststoff zur Magnetfixierung birgt hier die Entwicklung und Anpassung alternativer und effizienter Fixierungsverfahren hohe Rationalisierungspotentiale.

	Reifegrad	Investition	Materialkosten	Effizienz
Blechschnitt	●	◐	○	◑
Paketierung	●	◐	●	◐
Magnetbestückung	●	◑	●	●
Magnetfixierung	◑	◐	○	◐
Fertigung Rotorträger	●	◐	○	◑
Montage Rotor	●	◐	◑	◑
Folgeprozesse	●	◐	◑	◑

Legende: sehr positiv ● ... ○ sehr negativ

Abbildung 17: Ergebnis der qualitativen Bewertung der Prozessschritte zur Herstellung des Referenzrotors.

Ein weiterer wichtiger Optimierungsansatz zur Kostensenkung stellt die Fertigung des Rotorträgers dar. Neben den hohen Materialkosten für den aufwändig zu fertigenden Rotortopf fallen hohe Kosten für die Montagevorrichtung zum exakt positionierten Aufpressen der Blechpakete auf den Rotortopf an. Zusammenfassend ergeben sich drei wesentliche Ansatzpunkte zur kostenoptimierten Fertigung des Referenzrotors.

- Fertigungsverfahren zur Steigerung des Blechausnutzungsgrades
- Technologien zur kostenoptimierten Fixierung von passiven Permanentmagneten
- Alternative „topflose“ Rotorträgersysteme

3.3 Bisherige Ansätze zur kostenoptimierten Fertigung

Zum Erschließen von Rationalisierungspotentialen in der Fertigung und der Montage von getriebeintegrierten PM-Rotoren können diverse Ausgangspunkte verfolgt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse der in Abschnitt 3.2.2 durchgeführten Bewertungen der Einzelprozesse hinsichtlich ihrer Optimierungspotentiale drei Ansatzpunkte liefern, die separat beleuchtet werden müssen. In diesem Abschnitt werden die bisherigen Entwicklungs- und Forschungsarbeiten zu den genannten Aspekten beschrieben, die somit den Forschungsbedarf zur Optimierung der Fertigung von PM-

Rotoren aufzeigen und als Basis der in dieser Arbeit entwickelten und optimierten Fertigungs- und Montagelösungen dienen.

3.3.1 Fertigungs- und Paketierungsverfahren zur Steigerung des Blechausnutzungsgrades

Neben der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Integration der Einzelzähne des Stators in das Stanzbild des Rotors ist eine Möglichkeit zur Steigerung des Blechausnutzungsgrades die Rotorsegmentierung. Bei diesem Verfahren erfolgt die Formgebung der Einzelbleche des Rotors nicht im Vollschnitt, sondern wie in Abbildung 18 zu erkennen, in Kreissegmenten. Der Begriff der Rotorsegmentierung beschreibt somit die Aufteilung des Rotorringes in einzelne Ringsegmente deren Anzahl in Abhängigkeit der geometrischen Vorgaben variabel ist. Der Blechausnutzungsgrad kann in Abhängigkeit der angewandten Segmentierungsvariante signifikant gesteigert werden. Alle Segmente müssen entsprechend der Anzahl der Magnete gestanzt werden, daher sind bei einem Rotor mit zwanzig Magneten (Referenzrotor) nur fünf Segmentierungsvarianten (ein, zwei, vier, fünf und zehn Slots pro Segment) möglich.

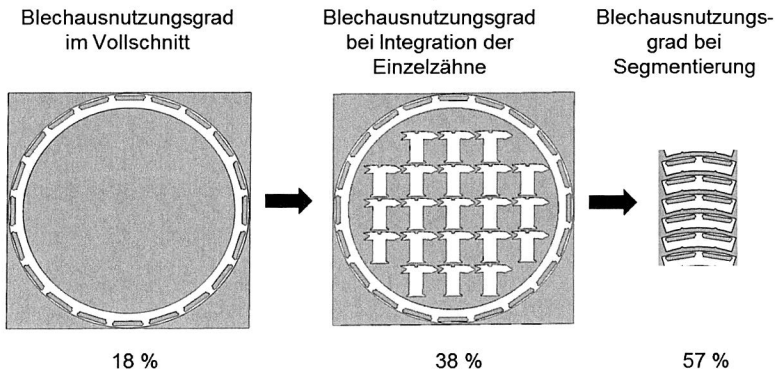


Abbildung 18: Prozentualer Vergleich des Blechausnutzungsgrades von Vollschnitt (inkl. Integration der Einzelzähne) und vorteilhaftester Segmentierung des Referenzrotors.

Für die durchzuführende Berechnung des Blechausnutzungsgrades wird als Mindestabstand zwischen den Segmenten aus stanztechnischen Gründen zwei Millimeter und zum Rand des Coils ein Abstand von einem Millimeter angenommen. Abbildung 19 zeigt als Ergebnis der Kalkulationen die Zunahme des Blechausnutzungsgrades mit zunehmender Segmentanzahl, da die Krümmung der Segmente bei steigender Anzahl deutlich minimiert wird und so die einzelnen Segmente auf dem Blech platzsparender angeordnet werden können. Am Beispiel der Ringhöhe (13,7 mm) des Referenzrotors

ist dieser Effekt erst ab einem Innendurchmesser von ca. 50 mm signifikant messbar, wodurch die Anwendung der Rotorsegmentierung aus wirtschaftlicher Sicht relevant wird.

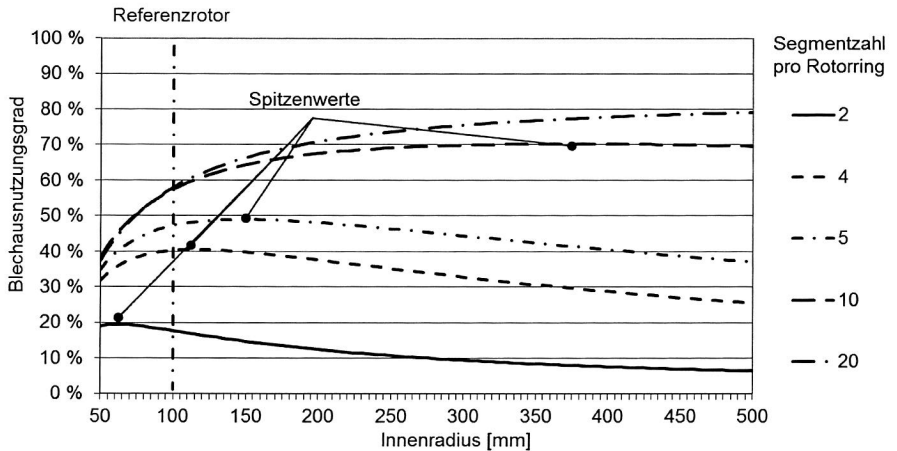


Abbildung 19: Blechausnutzungsgrade verschiedener Segmentierungsvarianten in Abhängigkeit des Innendurchmessers bei einer Ringhöhe von 13,7 mm.

Gleichzeitig sollte bei einer Verwendung von deutlich größeren Rotoren, bei gleichbleibender Ringhöhe, eine möglichst hohe Segmentanzahl gewählt werden, da auf Grund der Krümmung der Segmente deren Blechausnutzungsgrad nach Erreichen eines Spitzenwertes wieder abnimmt. Eine optimale Materialausnutzung liegt bei einer Segmentgröße von zwei Slots vor. Die Reduktion auf eine Segmentgröße von einem Slot führt zu keiner Steigerung des Blechausnutzungsgrades, da das Verhältnis von Fläche der Segmente zum Blechverschnitt durch die Slotaussparungen und den einzuhaltenden Stanzabständen abnimmt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine zunehmende Segmentanzahl weiterhin förderlich, da dadurch die Gestaltung der Stanzwerkzeuge samt Peripherie kleiner und einfacher ausfällt. Durch die somit mögliche Verwendung von kostengünstigen Schnellläuferpressen, kann die höhere Anzahl zu stanzender Segmente teilweise kompensiert werden. Logistisch gesehen bietet die Rotorsegmentierung zudem die Möglichkeit, die Kopplung der bisherigen Fertigung (integriertes Stanzen der Einzelzähne) aufzubrechen und ausschließlich von einer Statorlinie alle Zähne stanzen zu lassen. Des Weiteren können die Rotor- und Statorbleche standortunabhängig von verschiedenen Lieferanten bearbeitet werden, was in einem gesteigerten Wettbewerb resultiert. Durch die Entkopplung der Fertigung entsteht zusätzlich die Möglichkeit der Verwendung der jeweils den Anforderungen entsprechend optimalen Elektroblechtypen,

wodurch die Performance und der Wirkungsgrad der Maschine verbessert werden kann. Festigkeitssteigerungen und verbesserte elektromagnetische Eigenschaften sind das Resultat einer gezielten Nutzung der Walzrichtung des Elektrobleches. [31]

Die Herausforderung zur Nutzung der Technologie der Rotorsegmentierung liegt in der drehzahlfesten Verbindung der Segmente zu einem Kreisring. In großen elektrischen Maschinen, die mit geringen Drehzahlen betrieben werden, wie z. B. Windenergieanlagen, findet diese Technik bereits Anwendung. Der Rotor des Generators einer Windenergieanlage wird über ein Getriebe auf eine konstante Drehzahl von ca. 1500 U/min [74] zur Erzeugung von elektrischer Energie gebracht. Diese geringen Winkelgeschwindigkeiten sind allerdings nicht vergleichbar mit den Belastungen, die auf die Verbindungstechnik eines segmentierten Rotors eines getriebeintegrierten Elektromotors für Hybridanwendungen wirken. Der Stand der Technik zeigt zur Verbindung der Rotorsegmente von langsam drehenden Großmaschinen bereits eine Vielzahl verschiedener Technologien.

In den Patentschriften [75] und [76] sind Rotoren von Großmaschinen und Wasserkraftanlagen beschrieben, die zur Optimierung des Blechausnutungsgrades segmentiert aufgebaut sind. Dabei werden die einzelnen Blechschichten mit einem definierten Versatz gestapelt und an den Überlappungsflächen, zur Übertragung der tangential wirkenden Umfangskräften, Verkettungsbolzen bzw. Stifte eingefügt. Als alternative Verbindungstechnik wird das Verkleben mit einem Adhäsionsmittel genannt.

[77] beschreibt eine Verbindungstechnik zum Verbinden segmentierter Statoren. Die einzelnen Blechpaketsegmente werden hierbei mittels einer einfachen Schwalbenschwanzverbindung gefügt. Als Alternative wird die Verbindungstechnik Schweißen vorgeschlagen. An einer sich nach dem Zusammensetzen der Segmente ausbildenden Nut wird mittels der Technik des Paketierungsschweißens eine Schweißnaht gesetzt, die den statischen Zusammenhalt der Segmente garantiert, aber keine Fliehkräfte aufnehmen muss.

In einer weiteren Patentanmeldung [78] werden ebenfalls Verbindungstechniken großer, langsam drehender segmentierter Rotoren und Polräder beschrieben. Neben dem bereits bekannten Verbinden im schichtweisen Versatz gestapelter Bleche mit Stiften, Bolzen oder Stangen erfolgt ein zusätzlicher Formschluss zwischen den Blechsegmenten einer Schicht, vergleichbar zu [77]. Bezüglich der geometrischen Gestaltung wird explizit auf drei Schwalbenschwänze, wovon einer gegenläufig ausgerichtet ist, hingewiesen.

Einen innovativen Ansatz zum Aufbau eines segmentierten Stators einer Außenläufermaschine zeigt [79]. Dabei werden entweder die im schichtweisen Versatz gestapelten Bleche oder die Blechpaketsegmente mit dem Trägersystem über Verankerungsele-

mente, z. B. Haken, verbunden. Die Gestaltung der Verankerungselemente ist so gewählt, dass eine axiale Montage möglich ist und gleichzeitig in radialer Richtung eine formschlüssige Verbindung aufgebaut wird, die den Zusammenhalt des Stators garantiert. Es ist allerdings schwer vorstellbar, diese Technologie in schnell drehenden Rotoren anzuwenden, ohne signifikante konstruktive Änderungen vorzunehmen, da weder eine drehzahlfeste Verbindung nachweisbar, noch der Aufbau eines geschränkten Rotors möglich ist.

In [80] ist ein Verfahren und eine entwickelte Vorrichtung beschrieben, mit der eine stückzahlintensive Fertigung von segmentierten Rotoren und Statoren ermöglicht wird. Dabei erfolgt, vergleichbar zu der bereits beschriebenen Literatur, die Verbindung der im schichtweisen Versatz angeordneten Bleche durch Schweißen oder Kleben und Stanzpaketieren. Die eigentliche Erfindung ist hier die Integration der Paketiervorrichtung mit zugehöriger Positioniervorrichtung in die Stanzvorrichtung. Für die Realisierung einer stückzahlintensiven Produktion ist eine exakte Positionierung der einzelnen Segmente in der integrierten Vorrichtung von enormer Wichtigkeit. Dies ist durch die mit dem Stanzwerkzeug vollzogene Stanzpaketierung gewährleistet. Daher erfolgt die Auslegung der Stanzmarken nicht als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung, sondern ausschließlich als Hilfsmittel zur Positionierung der Segmente in der integrierten Vorrichtung.

Die dargestellte Literatur zeigt, dass die Rotorsegmentierung bereits seit langer Zeit zum Stand der Technik zählt. Allerdings ist die Anwendbarkeit der beschriebenen Verbindungstechniken aus Festigkeitsgründen nur auf langsam drehende Rotoren von Großmaschinen oder auf Statoren begrenzt. Dies liegt an der geringen Entwicklungstiefe der Verbindungstechniken, da bisher kein relevanter Markt für schnelldrehende größere Maschinen in hohen Stückzahlen, wie z. B. Elektromotoren für Hybridfahrzeuge, vorhanden war und somit die Motivation für die Forschung und Entwicklung diverser Verbindungstechniken begrenzt war.

3.3.2 Technologien zur kostenoptimierten Fixierung der Permanentmagnete

Neben der Fertigung und Paketierung der Rotorbleche wurde auch die Fixierung der Magnete als optimierungsbedürftige Prozessschritte bewertet. Als Motivation für die Entwicklung alternativer Technologien zur kostenoptimierten Fixierung der Permanentmagnete können mehrere Optimierungspotentiale genannt werden. Durch eine Integration der beiden Prozessschritte Positionieren und Fixieren besteht die Möglichkeit, die Fertigungs- und Montagezeiten zu reduzieren und dadurch die Stückkosten zu minimieren. Des Weiteren können durch eine Eliminierung vermeidbarer Komponenten und Werkstoffe, wie z. B. die Kunststoffumspritzung, die Material- und Fertigungskosten reduziert werden. Ein weiterer positiver Effekt wäre der Entfall der chemischen und thermischen Alterung der Fixierungstechnik. Durch eine geeignete konstruktive Änderung

der Slotgeometrie könnte eine Steigerung des Blechanteils und dadurch der Rotorwirkungsgrad erhöht werden. Neben dem bereits beschriebenen und im Referenzrotor umgesetzten Umspritzen der Magnete zeigt der Stand der Technik verschiedene alternative Montageverfahren zur Fixierung von innenliegenden Magneten. Diese werden im Folgenden beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung als alternative Magnetfixierungstechnologie bewertet.

In [81] wird eine elektrische Maschine beschrieben, deren Magnete nach dem Positionieren in ihren Slots mittels Einführen eines Klemmelements fixiert werden. Der Aufbau der Klemmung erfolgt durch das Einführen der Klemmelemente in eine Nut auf der Innenseite des Slots. Folge dessen ist der Aufbau einer Flächenpressung zwischen dem Magnet und der Außenseite des Slots. Vorteilhaft ist der Entfall einer möglichen Alterung der Fixierung. Allerdings sind weiterhin zwei Prozessschritte notwendig und eine Eliminierung vermeidbarer Komponenten kann nicht erreicht werden.

Die Patentanmeldung [82] zeigt eine elektrische Maschine, bei der die Magnete in die Slots des Rotors eingepresst werden. Durch das definierte Übermaß der Magnete erfolgt der Aufbau einer Flächenpressung mit dem Blechpaket. Positiv zu bewerten ist die Integration der Prozesse Positionieren und Fixieren zu einem Montageprozess und der Entfall vermeidbarer Komponenten. Vorteilhaft ist zudem die Erhöhung des Blechanteils durch die Verkleinerung der Slotbreite. Nachteilig zu bewerten ist die aufwändigere Positionieranlage und die resultierenden längeren Prozesszeiten. Des Weiteren ist eine Beschädigung der Magnetbeschichtung zu erwarten.

In [83] ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Fixieren von innenliegenden Magneten mittels Adhäsionskleber auf Epoxidharzbasis beschrieben. Dabei ist vorgesehen, den Kleber über eine Dosiervorrichtung in mindestens eine Vorratsausparung an der Schmalseite des Slots, vergleichbar der Flusssperren des Referenzrotors, einzuführen. Die Erfindung sieht, neben der sich durch die Aushärtung einstellenden Adhäsion, auch ein Aufschäumen des Klebers vor und daraus resultierend einen Aufbau einer Flächenpressung zwischen Magnet und Blechpaket. Als Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren können nur die niedrigeren Anlageninvestitionen bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Prozesszeiten in Folge der Aushärtezyklen gewertet werden.

Einen innovativen Ansatz zur Fixierung von innenliegenden Permanentmagneten zeigt [84]. Dabei sind die Slots an ihrer Innenseite, bis auf kleine Einführungs- und Positionierungshalterungen für ein montagegerechtes Einschieben der Permanentmagnete, offen und ein Hohlraum bis zum Innendurchmesser des Blechpaketes bildet sich aus. Zur Fixierung der Magnete und zur besseren Flussführung wird der hohle Bereich anschließend durch ein Ferrofluid aufgefüllt, das sich durch seine magnetorheologischen Eigenschaften durch das Aufmagnetisieren der Magnete verfestigt. Grundsätzlich bietet die beschriebene Patentanmeldung signifikante Vorteile durch die Verwendung perfor-

mancesteigernder Komponenten. Allerdings ist eine Anwendung des beschriebenen Verfahrens als alternative Magnetfixierungstechnologie nur schwer umsetzbar, da eine Montage der noch passiven Blechpakete auf dem Rotorträger wegen des drohenden Auslaufens des Fluid nicht möglich und aus handhabungstechnischen Gründen eine Aufmagnetisierung der Blechpakete vor der Montage nicht vorteilhaft ist.

Die Patentanmeldung [85] aus Japan zeigt ein Verfahren zur Fixierung von Permanentmagneten in den Slots des Blechpaketes durch Aufbau einer Flächenpressung mittels lokaler plastischer Deformation des Blechpaketes in Richtung der Magneten. In einer vorteilhaften Weiterentwicklung der Patentanmeldung könnten die zwei Prozessschritte des Positionierens und Verstemmens in einem integrierten Prozessschritt vereint werden. Dies wäre neben dem Entfall nicht funktionsrelevanter Komponenten ein weiterer Vorteil des Verfahrens. Nachteile könnten durch potentiell leitende Verbindung einzelner Bleche in Folge des Verstemmens durch zusätzliche Eisenverluste entstehen.

Die dargestellte Literatur zeigt, dass eine Vielzahl von Ansätzen und Ideen zur Befestigung von innenliegenden Permanentmagneten bestehen. Dennoch sind insbesondere für das Klemmen und Verstemmen der Magnete keine konkreten industriellen Anwendungen bekannt, mit Hilfe derer eine Übertragung dieser Technologien in den Referenzrotor ohne zusätzliche Entwicklungs- und Forschungsarbeiten bewerkstelligt werden könnte.

3.3.3 Alternative Rotorträgersysteme

Als drittes Rationalisierungspotential wurde das Rotorträgersystem identifiziert, bei dem durch gezielte konstruktive Änderungen deutliche Kosteneinsparungen erzielt werden können und gleichzeitig die Montage der Blechpakete vereinfacht werden kann. Auf Grund der neuartigen spezifischen Randbedingungen im Getriebe eines Hybridfahrzeuges sind bisher keine Maschinen oder Verfahren zur Herstellung eines Rotors, respektive Rotorträgers, bekannt, deren Anforderungen hinsichtlich der geometrisch konstruktiven Gestaltung auf einen maximalen Innendurchmesser des Rotors zur Bauraumgewinnung für weitere Getriebekomponenten zielen. Der Stand der Technik zeigt dabei lediglich ein in Ansätzen übertragbares Konzept, das im Folgenden beschrieben und bewertet wird.

In den Patentschriften [86], [87] und [88] sind Rotoren elektrischer Maschinen beschrieben, deren Rotorträgersystem aus zwei Rotorscheiben und Stiften, Schrauben oder Bolzen besteht. In entsprechende Aussparungen in den Blechpaketen werden die genannten Fügelemente entweder kraftschlüssig eingepresst oder mit den Rotorscheiben verschraubt. Dabei ist zu beachten, dass die Blechpakete mit den Magneten ohne Schrägung ausgeführt sind. Ein unvorteilhafter Aspekt sind die zu erwartenden Eisenverluste. Mittels einer gezielten Positionierung in flussarmen Bereichen kann der be-

schriebene Effekt minimiert werden. Vor einer Anwendung dieser Technologie wäre eine weitere Herausforderung die Sicherstellung der Übertragbarkeit des Drehmoments, da die Durchmesser der Bolzen wegen der spezifischen Anforderungen nicht beliebig gewählt werden können.

3.4 Forschungsbedarf zur Optimierung der Fertigung von PM-Rotoren

Obgleich die oben beschriebenen Konzepte und Verfahren tendenziell zur Kostenreduktion der Fertigung von PM-Rotoren beitragen, sind zum einen die erreichbaren Einsparungen an zeitlichem und monetärem Aufwand stark begrenzt. Zum anderen ist die Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen in das spezifische Anforderungsportfolio getriebeintegrierter Elektromotoren für Hybridanwendungen nicht nachgewiesen. Insbesondere die vorgeschlagenen Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung lassen große Zweifel aufkommen, hinsichtlich der Drehzahlfestigkeit ausreichende Sicherheit zu gewährleisten. Daher ist ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu erkennen, die diversen Verbindungstechniken ganzheitlich zu validieren und den Anforderungen entsprechend zu optimieren. Dabei sollen neben den spezifischen Optimierungsarbeiten zur Darstellung der Verbindungstechniken hinsichtlich der Geometrie des Referenzrotors der Fokus auf die grundsätzliche Eignung und die spezifischen Grenzen der einzelnen Verbindungstechniken und deren Kombinationen gelegt werden. Betreffend alternative Technologien zur Magnetfixierung sind bis heute keine technisch und wirtschaftlich ausgereiften Montage- und Fixierungslösungen bekannt, die den Anforderungen getriebeintegrierter Elektromotoren entsprechen. Basierend auf den dargestellten Technologien, insbesondere dem Klemmen und Verstemmen, besteht großer Forschungsbedarf, die technische Machbarkeit nachzuweisen und entsprechende Werkzeuge und Verfahren zur Implementierung im Referenzrotor zu entwickeln. Rotorträgersysteme mit großem Innendurchmesser zur Bereitstellung von Bauraum sind erst seit der Entwicklung getriebeintegrierter Elektromotoren von Bedeutung. Durch die in Zukunft voraussichtlich progressiv steigenden Stückzahlen ist eine große Nachfrage in der Automobilindustrie nach alternativen kostengünstigen Rotorträgersystemen zu erwarten. Da bis heute hierfür keine zufriedenstellenden Lösungen bekannt sind, besteht ein großer Forschungsbedarf zur Konstruktion und Entwicklung alternativer Konzepte für „topflose“ Rotorträgersysteme und deren beispielhafte Umsetzung in einem Technologieträgerrotor auf Basis des Referenzrotors.

4 Entwicklung von Verbindungstechnologien der Rotorsegmentierung

Die vergleichbar hohen Drehzahlen⁵ getriebeintegrierter Synchronmotoren stellen auf Grund der daraus resultierenden Umfangskräfte hohe Anforderungen an die eingesetzte Verbindungstechnik der Rotorsegmente. Prinzipiell können zum Verbinden der einzelnen Segmente unterschiedliche Basis-Designs, je nach Aufbau des Rotors, angewendet werden. Ein segmentierter Rotor kann entweder nach dem Stack-Prinzip oder nach dem Brick-Wall-Prinzip aufgebaut sein (vgl. Abbildung 20). Der Begriff Stack-Design beschreibt ein Blechpaket, das aus einem gleichförmigen Stapel von Einzelblechen gefertigt ist. Werden die Einzelbleche mit einem Winkelversatz je Schicht gestapelt, so wird dies im Folgenden Brick-Wall-Design genannt. [89]

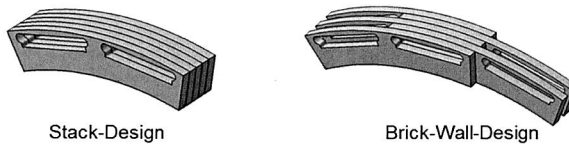


Abbildung 20: Vergleich Stack- und Brick-Wall-Design. [89]

Die Einteilung der Verbindungskonzepte erfolgt grundsätzlich in stoffschlüssige, kraftschlüssige und formschlüssige Verbindungen. Da die kraftschlüssige Verbindungstechnik „Stanzmarken“ nur einen minimalen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit einer Brick-Wall-Verbindung hat, wird diese in der Auslegung der Maschine als Paketierungstechnik und nicht als Verbindungstechnik angesehen⁶. Daher erfolgt keine Untersuchung der Stanzmarken als Verbindungstechnik in dieser Arbeit. In der Übersicht (Abbildung 21) sind ausschließlich die form- und stoffschlüssigen Verbindungstechniken dargestellt, die im Zuge dieses Kapitels entwickelt und optimiert werden. Die formschlüssige Verbindung wird durch eine Fügegeometrie realisiert. Die Kräfte werden zwischen den Fügepartnern über Kontaktflächen übertragen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Funktionserweiterung des Magneten als Fügeelement, wobei die einzelnen Segmente im Brick-Wall-Design aufgebaut und die Kräfte über die Kontaktflächen zwischen Permanentmagnet und Magnetslot übertragen werden. Vergleichbar ist das Konzept der Fügeelemente, bei dem im Brick-Wall-Design diese eingefügt werden. Die stoffschlüssige Verbindung mit Klebstoff oder Backlack setzt ebenfalls einen Aufbau im Brick-Wall-Design voraus, ähnlich der Verbindungsherstellung durch Laserschweißen. [89]

⁵ Gekoppelt an die maximale Drehzahl des Verbrennungsmotors, i.d.R. zwischen 6.000 und 8.000 U/min

⁶ Erkenntnis basierend auf Untersuchungsergebnisse der Verfahrensentwicklung E-Motor der Daimler AG

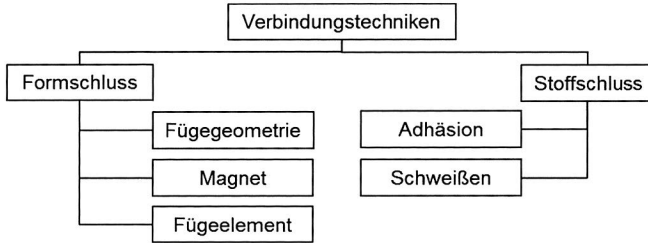


Abbildung 21: Konzepte zum Verbinden von Rotorsegmenten.

Für die Realisierung einer drehzahlfesten Verbindung von Rotorsegmenten ist die Kenntnis der technologischen Anforderungen an das Gesamtsystem zwingend notwendig. Basierend auf den spezifischen Randbedingungen und Anforderung des Referenzrotors erfolgt die Entwicklung und Optimierung der verschiedenen Verbindungstechnologien. Parallel dazu ist ein Ziel die Ableitung der gewonnenen spezifischen Erkenntnisse hin zu allgemeinen Aussagen zur Eignung der diversen Verbindungstechnologien in verschiedenen Rotoren für Hybridfahrzeuge.

Neben der für die Auslegung der Verbindungstechnik relevanten Grenzdrehzahl (im Falle des Referenzrotors wird eine Grenzdrehzahl von $n_{max} = 7000 \text{ U/min}$ angenommen) müssen nach Vorgaben des VDA-Lastenhefts „E-Antriebe“ [90] die segmentierten Rotoren eine definierte Schleuderdrehzahl⁷ ohne plastische Verformung standhalten und erst oberhalb der Berstdrehzahl⁸ versagen. Die Berechnung der beiden Werte erfolgt über die Multiplikation der Grenzdrehzahl mit einem definierten Sicherheitsfaktor.

$$n_{Schleuder} = 1,2 * n_{max} = 8400 \text{ U/min} \quad (4.1)$$

$$n_{Berst} = 1,4 * n_{max} = 9800 \text{ U/min} \quad (4.2)$$

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Verbindungstechniken hinsichtlich der Anforderungen entwickelt und optimiert und mögliche Kombinationen im Brick-Wall-Design validiert. Dafür ist es notwendig, zunächst präzise die auf die Verbindungstechnik wirkenden Kräfte abzuschätzen und zu verifizieren. Nach der Entwicklungs- und Optimierungsarbeit der einzelnen Verbindungskonzepte und der Untersuchung hinsichtlich entstehender Eisenverluste, erfolgt die wirtschaftliche Bewertung der verschiedenen Technologien.

⁷ Infolge kurzzeitigen Überdrehens, z. B. durch Schaltfehler

⁸ Zwischen Schleuder- und Berstdrehzahl ist eine plastische Verformung aber kein Bruch tolerierbar

4.1 Analyse der auf die Verbindungstechniken wirkenden Kräfte

Auf einen Rotor wirken während seiner Betriebszeit eine Vielzahl von Belastungen. Neben thermischen erfährt dieser insbesondere mechanische Belastungen durch die Zentrifugalkraft F_Z und das Drehmoment mit maximaler Kraftkomponente F_M . In Abbildung 22 sind die Kräfte skizziert. Die Zentrifugalkraft ist in radialer Richtung orientiert und wird in Form einer tangentialen Umfangskraft F_U durch die ringförmige Geometrie aufgenommen. Die aus dem Drehmoment resultierende Kraft wirkt tangential. Nach dem dritten Newtonschen Axiom ist der Drehmomentkraft eine Trägheitskraft entgegengerichtet, wenn diese nicht in einem Inertialsystem betrachtet wird. [91] Auf Grund der Betriebscharakteristik eines getriebeintegrierten Synchronmotors addieren sich die Kräfte nicht. Bei Verwendung der Technik der Rotorsegmentierung wirkt die aus dem Drehmoment basierende Kraftkomponente F_M gleichförmig auf die Segmente eines Blechpaketringes und belastet somit die Verbindungsstellen nicht. Daher wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen. [89] Die im nächsten Abschnitt Verwendung findenden Berechnungsformeln können in den Lehrbüchern [92] und [93] recherchiert werden.

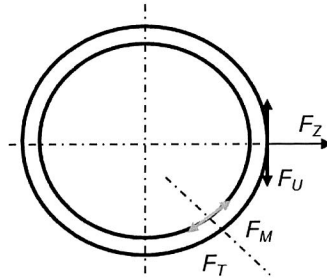


Abbildung 22: Wirkende Kräfte am Rotor. [89]

Die Quantifizierung der wirkenden Kräfte basiert auf der Grenzdrehzahl n_{max} und dem Gesamtgewicht $m_{Ringsegment}$ eines Rotorringes. Dieses errechnet sich aus der Addition des Gewichtes des Blechpaketes und der Summe der Massen der 20 Magnete pro Blechpaket. Das Gewicht der Magnetfixierung aus Kunststoff (ca. 0,005 kg) je Ringsegment ist vernachlässigbar. Relevant für die Berechnung sind die Dichte des Elektroblechs $\rho_{Elektroblech} = 7,65 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, die Dichte eines Magneten $\rho_{Magnet} = 7,7 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, das Volumen des Blechpaketes $V_{Blechpaket} = 77488 \text{ mm}^3$ und eines Magneten $V_{Magnet} = 1286,5 \text{ mm}^3$.

$$m_{Blechpaket} = \rho_{Elektroblech} * V_{Blechpaket} = 0,594 \text{ kg} \quad (4.3)$$

$$m_{Magnet} = \rho_{Magnet} * V_{Magnet} = 0,099 \text{ kg} \quad (4.4)$$

$$m_{\text{Ringsegment}} = m_{\text{Blechkpaket}} + 20 * m_{\text{Magnet}} = 0,792 \text{ kg} \quad (4.5)$$

Die Zentrifugalkraft F_Z errechnet sich aus der Multiplikation der Masse des Ringsegments mit dem entsprechenden mittleren Radius $r_m = 106,35 \text{ mm}$ und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ω .

$$\omega = \frac{2 * \pi * n_{\text{max}}}{60} = 733 \frac{1}{\text{s}} \quad (4.6)$$

$$F_Z = m_{\text{Ringsegment}} * r_m * \omega^2 = 45255,5 \text{ N} \quad (4.7)$$

4.1.1 Berechnung der Umfangskräfte nach d'Alembert

Auf Grund der Segmentierung des Blechkpaketes müssen die Verbindungsstellen die aus der Zentrifugalkraft resultierenden Umfangskräfte aufnehmen. Somit ist die Umfangskraft die entscheidende Zielgröße, nach welcher die Verbindungstechniken ausgelegt werden müssen. Die Berechnung der Umfangskräfte infolge der Zentrifugalkräfte erfolgt nach dem Prinzip von d'Alembert für umlaufende dünnwandige Ringe (vgl. Abbildung 23). Die radiale, elastische oder plastische Verformung u entspricht der elastischen oder plastischen Dehnung des Ringes infolge der Zentrifugalkraft.

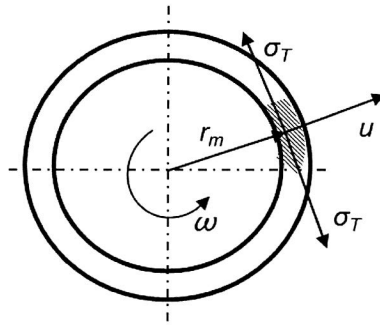


Abbildung 23: Spannungen und Verformungen am umlaufenden dünnwandigen Ring.

Durch Gleichsetzen der Tangentialspannung σ_T (Gleichung 4.9) mit der Newtonschen Spannung σ_N (Gleichung 4.11) resultiert der Zusammenhang (Gleichung 4.12) zwischen Umfangskraft F_U und der Zentrifugalkraft F_Z . Relevant für die Berechnung ist dabei die mittlere Dichte des Ringsegments $\rho_{\text{Ringsegment}}$ (Gleichung 4.8) und die Querschnittsfläche des Blechkpaketes A , berechnet nach Gleichung 4.10 mit der Ringhöhe $H_{\text{Ring}} = 13,7 \text{ mm}$ und der Pakethöhe $L_{BP} = 11,667 \text{ mm}$.

$$\rho_{Ringsegment} = \frac{m_{Ringsegment}}{V_{Blechkpaket} + 20 * V_{Magnet}} = 7,7 * 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \quad (4.8)$$

$$\sigma_T = \rho_{Ringsegment} * \omega^2 * r_m^2 = 46,79 \text{ MPa} \quad (4.9)$$

$$A = H_{Ring} * L_{BP} = 159,8 \text{ mm}^2 \quad (4.10)$$

$$\sigma_N = \frac{F_U}{A} \quad (4.11)$$

$$\sigma_T = \sigma_N$$

$$\frac{m_{Ringsegment}}{2 * \pi * r_m * A} * \omega^2 * r_m^2 = \frac{F_U}{A}$$

$$F_U = \frac{F_Z}{2 * \pi} = 7,20 \text{ kN} \quad (4.12)$$

Die Gleichung 4.12 stellt die These auf, dass die resultierende Umfangskraft F_U stets um den Faktor 2π kleiner ist, als die Zentrifugalkraft F_Z .

4.1.2 Verifizierung durch das Feder- und Kesselmodell

Die Verifizierung der Annahme erfolgt durch zwei physikalische Vergleichsmodelle, dem Federmodell und dem Kesselmodell.

Federmodell

Beim Federmodell werden die einzelnen Segmente als Punktmassen angenommen, die über Federn zusammengehalten werden. Dabei entspricht die Federkraft der Umfangskraft nach dem Prinzip von d'Alembert. Durch die Rotation des Ringes wirken auf die Punktmassen die Zentrifugalkräfte F_Z . In Folge bewegen sich diese radial nach außen und erfahren eine potentielle Energie W_P .

$$W_P(r) = \int_0^r F_Z(r_m) dr \rightarrow W_P(r_m) = m * \omega^2 * \frac{r_m^2}{2} \quad (4.13)$$

$$W_P(r) = F_Z * \frac{r_m}{2}$$

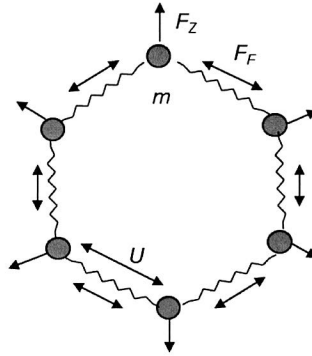


Abbildung 24: Federmodell als physikalisches Vergleichsmodell zur Berechnung der Umfangskraft.

Diese Energie wird durch die Dehnung U der Federn mit der Federkonstante K aufgenommen. Die Spannkraft der Federn ist homogen verteilt und unabhängig von der Gesamtzahl der Punktmassen. Jede Feder muss die gleiche tangential wirkende Umfangskraft F_F (Gleichung 4.14) übertragen, die als Federenergie W_F (Gleichung 4.15) über den Weg U aufgenommen wird.

$$F_F = K * U \quad (4.14)$$

$$W_F(U) = \int_0^U F_F(U) dU \quad (4.15)$$

$$W_F(U) = K * \frac{U^2}{2}$$

Durch Gleichsetzen über den Energiesatz resultiert wiederum Gleichung 4.12:

$$W_P(r) = W_F(U) \quad (4.16)$$

$$F_Z * \frac{r_m}{2} = F_F * \frac{U}{2}$$

$$F_F = \frac{F_Z * r_m}{U} = \frac{F_Z * r_m}{2 * \pi * r_m} = F_U$$

$$F_U = \frac{F_Z}{2 * \pi} \quad (4.12)$$

Kesselmodell

Beim Kesselmodell werden die verbundenen Segmente als dünnwandiger Kessel angenommen, der mit einem Innendruck p belastet wird. Der Innendruck entspricht der Zentrifugalkraft pro Ringfläche. Relevant für die Berechnung der Gleichung 4.18 ist die mittlere Innenfläche des Rotorringes A_{quer} .

$$A_{quer} = 2 * \pi * r_m * L_{BP} \quad (4.17)$$

$$p = \frac{F_Z}{A_{quer}} \quad (4.18)$$

Die Kesselformel ergibt:

$$\sigma_T = \frac{p * r_m}{H_{Ring}} = \frac{F_Z * r_m}{A_{quer} * H_{Ring}} \quad (4.19)$$

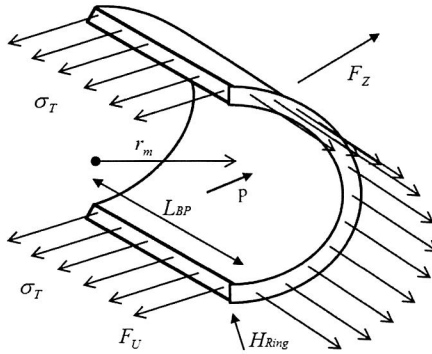


Abbildung 25: Kesselmodell als physikalisches Vergleichsmodell zur Berechnung der Umfangskraft.

Gleichsetzen der Kesselformel und der Tangentialspannung nach Newton σ_N (Gleichung 4.9) ergibt wiederum Gleichung 4.12.

$$\frac{F_U}{A} = \frac{F_Z * r_M}{A_{quer} * H_{Ring}}$$

$$F_U = \frac{F_Z * r_M}{H_{Ring}} * \frac{L_{BP} * H_{Ring}}{2 * \pi * L_{BP} * r_M}$$

$$F_U = \frac{F_Z}{2 * \pi} \quad (4.12)$$

Die Ergebnisse aus den physikalischen Vergleichsmodellen verifizieren die Annahme (Gleichung 4.12) nach dem Prinzip von d'Alembert. Die im Folgenden dieses Kapitels erarbeiteten Verbindungstechniken werden alle nach der in Gleichung 4.12 errechneten Umfangskraft von 7,20 kN ausgelegt.

4.2 Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung

Eine formschlüssige Verbindung hat die Aufgabe der Verhinderung einer Relativbewegung zwischen zwei Werkstücken durch Ineinandergreifen entsprechend geformter Werkstückelemente. Bei Betriebsbelastung wirken Druckkräfte rechtwinklig⁹ zu den Flächen der Verbindungspartner. Primär sind formschlüssig nur zwei Bauteile lösbar miteinander zu verbinden, in der Regel durch Feder-Nut- oder Schwalbenschwanzverbindungen. Oftmals wird dies durch ein weiteres, drittes Bauteil, einem Fügeelement, realisiert. Ein Beispiel ist die Verbindung sich überlappender Bleche (vgl. Abschnitt 4.4) mittels Nieten, Stifte oder Schrauben. [93]

Dieser Abschnitt beschreibt die Entwicklung und Optimierung einer ursprünglichen formschlüssigen Verbindung zweier Bauteile ohne zusätzliche Verbindungselemente. Der grundsätzliche Aufbau eines segmentierten Rotorringes mit Fügegeometrien als Verbindungstechnik der Segmente kann sowohl im Brick-Wall- als auch im Stack-Design erfolgen. Bei beiden Varianten ist eine zusätzliche Paketierungstechnik notwendig, wobei die Backlack-Technologie wegen der flächigen Verbindung, insbesondere im Bereich der Fügegeometrie, am vorteilhaftesten erscheint. Im Brick-Wall-Design unterstützt die gewählte Paketierungstechnologie zudem noch die Verbindungstechnik Fügegeometrie und wird somit in Abschnitt 4.7, Kombination verschiedener Verbindungstechniken, näher betrachtet. Zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Entwicklungsarbeit hinsichtlich der Simulation, dem Aufbau und der Durchführung der experimentellen Versuche, erfolgt die Entwicklung ausschließlich im Stack-Design. Dies ist möglich, da die Anforderungen an die Fügegeometrie bei beiden Designvarianten äquivalent sind. [89]

Im Zuge der Entwicklungsarbeit werden verschiedene Grundgeometrien hinsichtlich ihrer Eignung verglichen, weiterentwickelt und den Anforderungen entsprechend optimiert. Anschließend erfolgt die Optimierung der entwickelten Geometrie mittels Parame-

⁹ Auch „normal“ genannt

terstudien.¹⁰ Das Ziel ist die Entwicklung einer spannungshomogenen Fügegeometrie, welche die Anforderungen hinsichtlich statischer und dynamischer Festigkeit standhält. Die Bezeichnung „Spannung“ ist in dieser Arbeit immer mit „von Mises-Spannungen“ gleichzusetzen, außer es wird ausdrücklich auf eine andere Spannungsart verwiesen. Für die Optimierung der Festigkeit einer Fügegeometrie ist die Kenntnis der Spannungsverläufe im Bauteil unter definierter Belastung existentiell. Unter Verwendung des Programmes CATIA V5 der Fa. Dassault Systems werden lineare Simulationsmodelle zur Festigkeitsanalyse nach der Finite-Elemente-Methode¹¹ erstellt. Durch dieses numerische Verfahren können komplexe Lastfälle durch das Lösen partieller Differentialgleichungen präzise untersucht werden, deren analytische Berechnung nur näherungsweise durch vereinfachte Modellannahmen zu approximieren sind. [94] Für die Entwicklungsarbeit ist ausschließlich das linear-elastische Materialverhalten relevant, da plastische Verformungen des Rotors im Betrieb nicht zulässig sind. Um eine Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse dieser Arbeit garantieren zu können, sind alle Graphiken mit der gleichen Skalierung erstellt worden. Der kritische Bereich (rot), ab dem ein Versagen des Bauteils eintritt, entspricht der Streckgrenze klassischer Elektrobleche von 330 - 335 MPa. Zur Gewährleistung der Genauigkeit und Vergleichbarkeit aller Simulationsergebnisse, erfolgt eine gezielte und feine Netzanpassung, wodurch die Einhaltung des globalen Fehlergrades von unter 5 % für alle Simulationsmodelle garantiert werden kann.

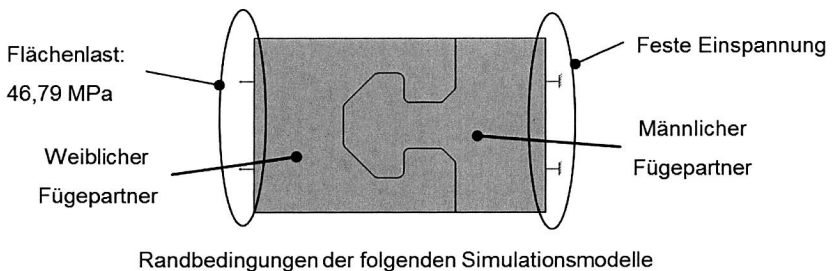


Abbildung 26: Aufbau und Randbedingungen der Simulationsmodelle in Catia V5.

Zur Abstraktion der Tangentialspannungen durch die Grenzdrehzahl von 7000 U/min wird in der Simulationsumgebung eine Flächenlast von 46,79 MPa am weiblichen Fügepartner angelegt (vgl. Abbildung 26). Der männliche Fügepartner wird mit einer festen Einspannung versehen. Zur Visualisierung der auftretenden Verformungen sind in den Simulationsergebnissen diese um den Faktor 20 - 60 überhöht. Der Entwicklungspro-

¹⁰ Bei der Entwicklung der Verbindungstechnik Fügegeometrie wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Cüneyt Gürsel unterstützt.

¹¹ Im Folgenden FEM genannt

zess der verschiedenen Verbindungstechniken wird von Versuchsdurchführungen begleitet und dient der Validierung der FE-Simulationen. Schleuderversuche können die Einsatzbedingungen im Fahrzeug realitätsnah darstellen, sind aber zeit- und kostenintensiv. Im Betrieb verursacht die wirkende Umfangskraft in der Verbindungsstelle eine Zugkraft, die stets tangential im Ringsegment wirkt. Mit Hilfe von Zugprüfmaschinen ist es möglich, mit geringem Aufwand die resultierenden Zugkräfte in die Verbindungsstelle einzuleiten. Für die Durchführung der Zugversuche mit einer Zugprüfmaschine Zwick Z200 werden die Ringsegmente mit der Verbindungsstelle zu geraden Segmenten abstrahiert, da die Herstellung von Zugproben günstiger ist und keine kompletten Ringe zur Validierung einer Geometrieform notwendig macht. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit ist eine einheitliche Querschnittsfläche für jede Zugprobe gegeben, die der Ringhöhe und der Paketierungshöhe, auch Stapelhöhe genannt, der Ringsegmente des Referenzrotors entspricht. Um statistisch hinreichend genaue Aussagen generieren zu können wird bei den Zugversuchen die minimale Versuchsanzahl von $N = 3$ nicht unterschritten. Um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse zu belegen werden abschließend komplette Ringe mit der entwickelten Fügegeometrie durch experimentelle Schleuderversuche geprüft. Da die Schleuderversuche die gewonnenen Ergebnisse nur bestätigen und keine neuen Erkenntnisse wissenschaftlich ermittelt werden sollen wird die Versuchsanzahl aus Kostengründen auf $N = 1$ gesetzt.

4.2.1 Entwicklung einer spannungs-homogenen Geometrieform

Für die Entwicklung einer spannungshomogenen Geometrieform werden zunächst verschiedene Grundgeometrien (Kreis, Schwalbenschwanz, T-Nut) mittels linearer Simulation und Zugversuchen, wie in Abbildung 27 zu erkennen, hinsichtlich ihrer Eignung als Verbindungstechnik verglichen. Das Simulationsergebnis der Kreisgeometrie zeigt hohe Spannungen im Kontakt- sowie im Stegbereich. Durch die resultierenden Scher- und Druckspannungen erzwingt die Zugkraft ein Aufklappen des weiblichen Fügepartners. Wegen der minimalen Kontaktfläche weist die Kreisgeometrie unter Zugbelastung einen quasi umlaufenden Spalt auf. Neben den nachteiligen Auswirkungen auf den magnetischen Fluss hat diese Geometrie daher eine mehrachsige Bewegungsfreiheit, die eine Verkipfung der Fügepartner zulässt. Die Rundheit des Rotors wird dadurch negativ beeinflusst. Allerdings kann dieser Effekt durch die Integration mehrerer Kreisgeometrien egalisiert werden. Im Gegensatz zur Kreisgeometrie verursachen die Schwalbenschwanz- und die T-Nut-Geometrien einen selbstzentrierenden Effekt unter der auftretenden Umfangskraft. Dadurch kann ein mehrachsiger Spannungszustand und eine somit resultierende Verkipfung vermieden werden. Großteils homogen verlaufende Spaltbreiten und ausgeprägte Kontaktflächen wirken sich positiv auf den magnetischen Fluss aus, bei einer gleichzeitigen Gewährleistung der Rundheit des Rotors. Auf Grund der genannten Defizite im Vergleich zu der Schwalbenschwanz- und T-Nut-Geometrie wird die Kreisgeometrie nach Abschluss der Simulation nicht weiterverfolgt. Die Spannungsverteilungen im Bereich der Fügegeometrie sind bei der T-Nut-Geometrie deutlich

homogener als bei der Schwalbenschwanzgeometrie. Dies bestätigt die Auswertung der Zugversuche. Im Vergleich der Steigung m_s des elastischen Bereichs besitzt die T-Nut-Geometrie mit $m_s = 10,14$ die höchste Steifigkeit. Die Zugfestigkeit ist im Vergleich zur Schwalbenschwanz-Geometrie mit einem 50 % höheren Wert ebenfalls vorteilhafter. Als Fazit erfolgt somit die weitere Entwicklung der Fügegeometrie auf Basis der T-Nut-Geometrie. [89]

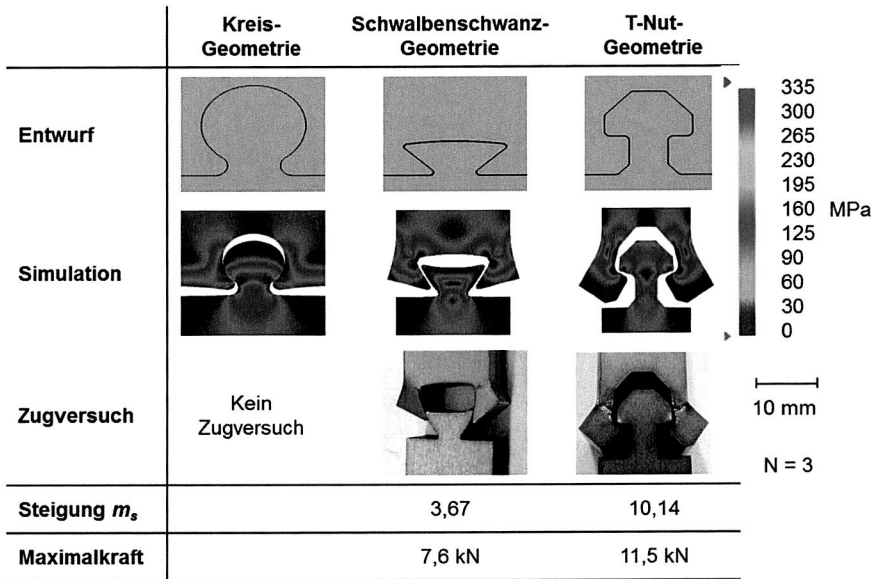


Abbildung 27: Vergleich der Simulationsergebnisse und der Zugversuche der Grundgeometrien. [89]

In weiteren Untersuchungen wird die T-Nut-Geometrie in mehrere Etagen weiterentwickelt. Der Aufbau als 2- und 3-Etagen-Modell ermöglicht eine Aufteilung der Krafteinleitung auf die entsprechende Anzahl an Etagen. Dadurch werden die Kontakt- bzw. Tragflächen erhöht, somit die Zugkräfte auf eine größere Fläche verteilt und die Druckspannungen reduziert. Die Ergebnisse der Weiterentwicklung durch den Ausbau von Etagen sind in Abbildung 28 zusammengefasst. Die Simulationsergebnisse zeigen eine schrittweise Reduzierung der maximalen Spannungen bei einer gleichzeitigen Homogenisierung der Spannungsverteilung. Vor allem im Bereich der Innenseiten des weiblichen Fügepartners sind Verbesserungen erkennbar. Der Aufbau vom 1-Etagen-Modell zum 2-Etagen-Modell erreicht eine Steigerung der Zugfestigkeit um 100 %. Der weitere Aufbau vom 2-Etagen-Modell zum 3-Etagen-Modell steigert die Zugfestigkeit um weitere 27 %. Die Kräfte an der Dehngrenze steigen äquivalent. Die allgemeine

Tendenz zeigt eine degressive Steigerung der Kräfte mit zunehmender Anzahl von Etagen. Da das 4-Etagen-Modell in der Simulation eine kaum messbare Steigerung der Festigkeit zeigt ($< 5\%$) und die Komplexität und der Blechbedarf der Geometrie sehr hoch sind, wird das 4-Etagen-Modell nicht weiter in Betracht gezogen. Daher wird für die weitere Entwicklung das 3-Etagen-Modell der T-Nut-Geometrie ausgewählt. [89]

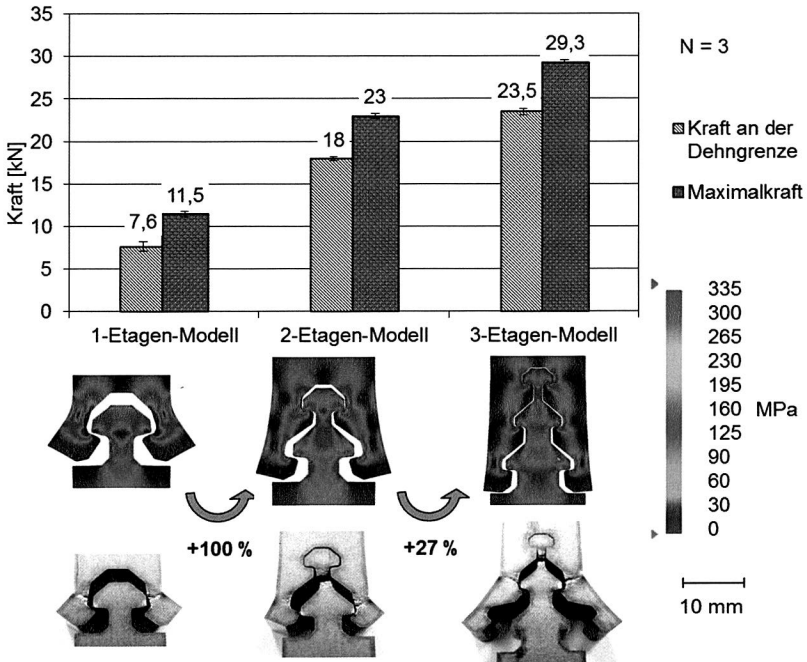


Abbildung 28: Vergleich der Simulationen und der ertragbaren Kräfte des 1-, 2- und 3-Etagen-Modells. [89]

Anschließend werden fünf Grunddesignvarianten der 3-Etagen-T-Nutgeometrie (konkav, konvex, Tannenbaum, parallel und V-förmig) durch Simulation und Zugversuche verglichen (siehe Abbildung 29). Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den Formvarianten werden nur einfache Geometrien ohne Rundungen und Winkel verwendet, da im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen bereits Vorkenntnisse in der Gestaltung der klassischen Tannenbaum Geometrie erlangt wurden. Zudem sind die projizierten Tragflächen der Formvarianten annähernd äquivalent entworfen. Der Aufbau als Tannenbaum-Form hat sich als potentialträchtigste Form durch die am höchsten ertragbare Kraft und Dehngrenze bestätigt. Der entscheidende Faktor dabei ist der mit steigender Höhe von außen nach innen verlaufende, horizontale Versatz der Trag-

flächen. Dies führt zu einer homogenen Kräfteinleitung, aus der eine homogene Spannungsverteilung resultiert. Der umgekehrte Aufbau als V-Form erzielt die schlechtesten Werte. Alle Zugversuche zeigen eine starke Deformation der obersten Etage, da in Folge der Scherspannungen der weibliche Fügepartner ausklappt und die Zugkräfte nur von der obersten Etage aufgenommen werden können. Durch eine homogenere Spannungsverteilung, wie in der klassischen Tannenbaumform, können die Scherspannungen minimiert und ein Ausklappen verzögert werden.

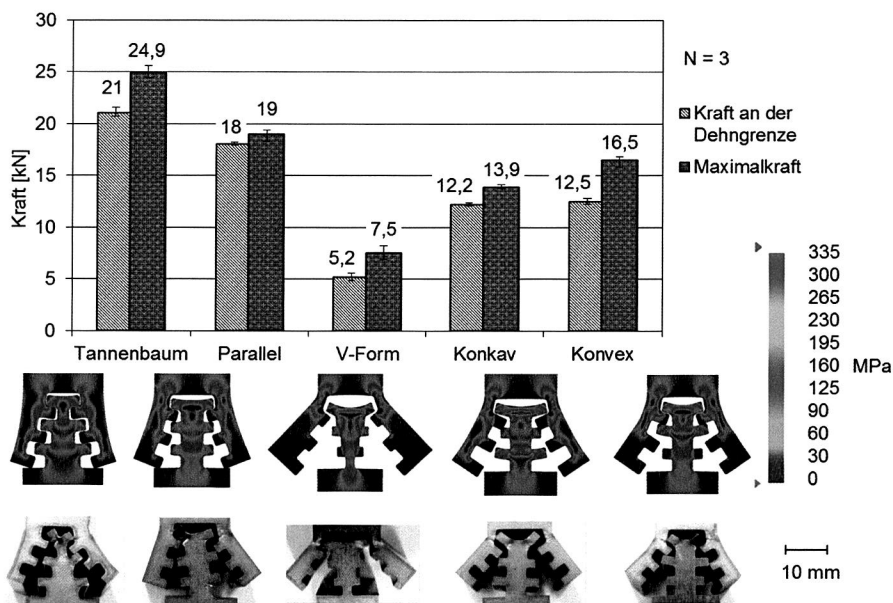


Abbildung 29: Vergleich der Simulationen und der ertragbaren Kräfte der Formvarianten des 3-Etagen-Modells. [89]

Die Tannenbaum-Geometrie als Ergebnis der Weiterentwicklung zeigt große Steigerungen in der Verbindungsfestigkeit. Somit besteht großes Potential, diese als Fügegeometrie zum Verbinden von Rotorsegmenten einzusetzen. Im nächsten Schritt soll mit Hilfe einer simulationsgestützten Optimierung mittels Parameterstudien eine weitere Festigkeitssteigerung angestrebt werden. [89]

4.2.2 Optimierung der entwickelten Geometrie

Das Ziel der Optimierung ist die Reduzierung der maximalen Spannungen bei einer gleichzeitigen Homogenisierung der Spannungsverläufe innerhalb der entwickelten Tannenbaum-Geometrie. Da wegen der Vielzahl an Parameterkombinationen experi-

mentelle Zugversuche zu aufwändig sind und die Simulationen verlässliche und qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern, wird die Optimierung durch simulationsgestützte Parameterstudien vollzogen und die Ergebnisse durch Zugversuche verifiziert.

Beim Vergleich der Spannungsverteilungen (vgl. Abbildung 30) in der Fügegeometrie vor und nach Anwendung der Parameteroptimierung ist eine deutliche Abnahme der Spannungsspitzen und eine Homogenisierung zu erkennen. Jedoch sind weiterhin plastische Verformungen (Aufklappen) des weiblichen Fügepartners, in Folge der Scherkräfte im unteren Bereich der Fügegeometrie ersichtlich. Eine weitere Steigerung der übertragbaren Umfangskräfte ist nur durch innovative konstruktive Änderungen, wie die Integration von Klemmhaken [95] an den Außenseiten der Fügegeometrie, möglich. Die Simulationsergebnisse zeigen eine signifikante Reduzierung der plastischen Verformungen durch die Klemmhaken und eine weitere Homogenisierung der Spannungsverteilung. Der so entstandene designoptimierte Tannenbaum wird nochmals einer Parameteroptimierung unterzogen. [89]

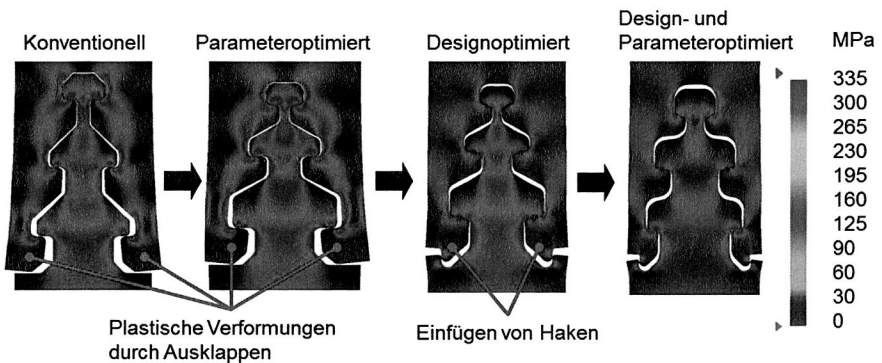


Abbildung 30: Entwicklungsschritte der Optimierung der Fügegeometrie. [89]

Zur Validierung der Simulationsergebnisse erfolgen Zugversuche. Da ausschließlich das Verhalten der Fügegeometrien betrachtet werden soll, wird zunächst auf die Integration der Magnetslots verzichtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt. Ein kontroverses Ergebnis zeigt sich beim Vergleich der Höchstkraft zwischen dem Modell „Konventionell“ und „Parameteroptimiert“. Erwartet wird eine Steigerung der Höchstkraft durch die Optimierung, stattdessen tritt jedoch eine Reduktion von 29,3 kN auf 26,5 kN ein. Ursächlich ist die in der Simulation zur Optimierung der Geometrie vorgegebene Belastung. Die Tannenbaum-Geometrie ist auf eine Umfangskraft von 7,2 kN optimiert, welche der Belastung bei Grenzdrehzahl entspricht. Bis zu dieser Kraft sind die Spannungsspitzen in dem Modell „Parameteroptimiert“ geringer als im Modell „Kon-

ventionell“. Die Verbesserung des parameteroptimierten Modells wird an der größeren Steigung der Kraft-Dehnungs-Kurve und der höheren Kraft an der Dehngrenze gezeigt.

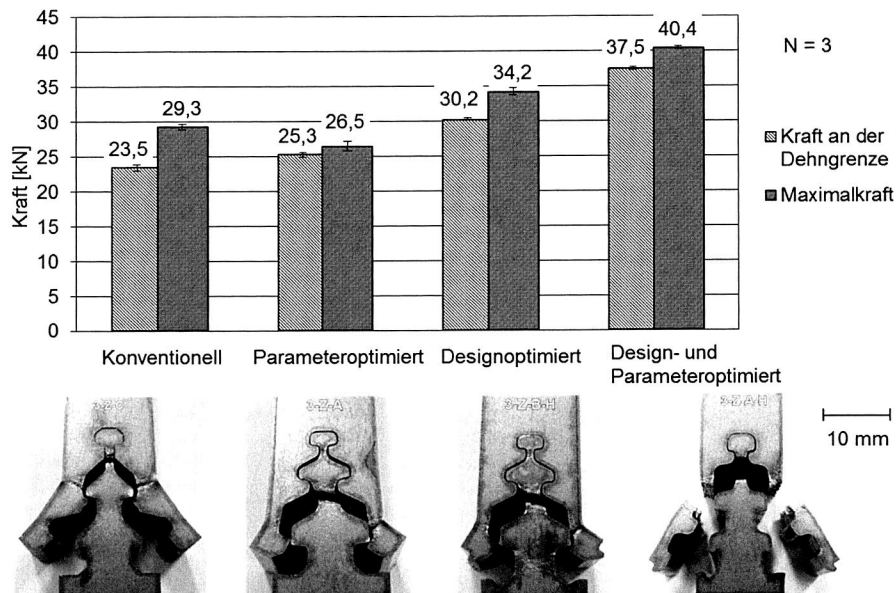


Abbildung 31: Ergebnisse der Zugversuche – „Konventionell“ bis „Design- und Parameteroptimiert“. [89]

Die Ergebnisse der Zugversuche des designoptimierten Tannenbaums (Maximalkraft von 34,5 kN) bestätigen den positiven Einfluss der Haken. Durch die definierte Parameteroptimierung konnte die ertragbare Maximalkraft auf 40,4 kN gesteigert werden. Im Zugversuch versagt diese Probe gleichzeitig an drei Stellen – ein Zeichen für die gezielt gewollte homogene Spannungsverteilung in der Fügegeometrie. Vor Erreichen der Maximalkraft kann nur eine minimale Verformung knapp unterhalb der Dehngrenze gemessen werden. Die Optimierungsarbeit steigert die Verbindungsfestigkeit insgesamt um ca. 38 %, bei einer gleichzeitigen Minimierung der Verformung und somit Aufweitung des Rotors. [89]

4.2.3 Verifikation der Entwicklung mittels Schleuderversuchen

Für eine zeit- und kostengünstige Entwicklung der Fügegeometrie wurde eine vereinfachte Form des Rotors angenommen. Die Aussparungen für die Magnete und die gebogene Form an der Verbindungsstelle wurden vernachlässigt. In diesem Abschnitt wird

die entwickelte Tannenbaum-Geometrie unter Berücksichtigung der geometrischen und stanztechnischen Einschränkungen in den Rotor integriert.

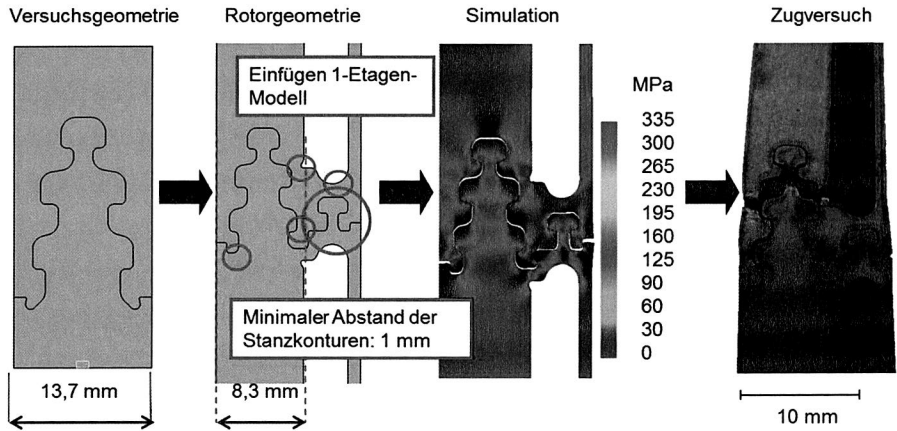


Abbildung 32: Anpassung in die Rotorgeometrie – Optimierung und Zugversuche. [89]

Zunächst erfolgt der Aufbau einer Zugprobe mit integriertem Magnetslot. Wie in Abbildung 32 zu erkennen, verkleinert sich der Bauraum und somit auch der 3-Etagen-Tannenbaum auf ca. 60 % der ursprünglichen Größe. In den Zwischenraum der beiden Magnetslots wird eine 1-Etagen-T-Nut Geometrie samt Klemmhaken eingefügt, um den verfügbaren Bauraum effektiv zu nutzen und Teile der verlorenen Tragfähigkeit zu kompensieren. Für die anschließende Parameteroptimierung der beiden Verbindungselemente wird ein Mindestabstand der Stanzkonturen von 1 mm vorausgesetzt. [89] Die anschließend durchgeführten Zugversuche ergeben eine Maximalkraft von $F_{max} = 27,5 \text{ kN}$. Über die nach Gleichung 4.20 ermittelte ertragbare Tangentialspannung von $\sigma_{t_ert} = 171 \text{ MPa}$ errechnet sich die theoretisch ertragbare Drehzahl von $n_{max_theo} = 13457 \text{ U/min}$ über die Gleichungen 4.6 und 4.9.

$$\sigma_{t_ert} = \frac{F_{max}}{A} = 171 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

$$n_{max_theo} = \frac{\omega}{2 * \pi} * 60 = \frac{\sqrt{\frac{\sigma_{t_ert}}{\rho_{Ringsegment} * r_m^2}}}{2 * \pi} * 60 = 13,457 \text{ U/min} \quad (4.6)$$

Äquivalent zum design- und parameteroptimierten Tannenbaum erfolgt das Versagen gleichzeitig an den selben drei Positionen bei minimaler Verformung. Diese Geometrie wird zur Durchführung der Schleuderversuche auf das Ringsegment übertragen. [89]

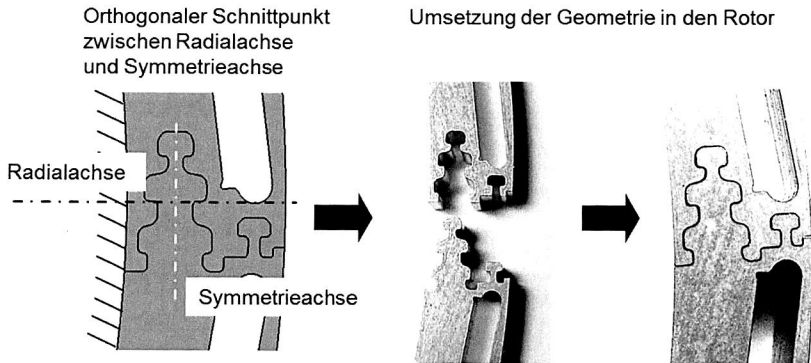


Abbildung 33: Konstruktive Umsetzung der Fügegeometrie in den Rotor. [89]

Dabei wird die Symmetrieachse der Tannenbaum-Geometrie als gerade Achse eingefügt und nicht der Bogenform des Ringsegments angepasst, um die optimalen Proportionen und Verhältnisse beizubehalten (siehe Abbildung 33). Die Krafteinleitung erfolgt stets senkrecht zur Radialachse. Die Orthogonalität der Symmetrieachse zur Radialachse wird in der Mitte der Tannenbaum-Geometrie bzw. direkt an den Tragflächen der 2. Etage gewählt. Somit wird die Polarwinkeldifferenz der Krafteinleitung zur 1. und zur 3. Etage am geringsten gehalten. Für die Durchführung der Schleuderversuche werden zwei Rotorringe mit fünf und zehn Segmenten gefertigt.

Um eine realitätsnahe Prüfumgebung darstellen zu können, entspricht die Gestaltung der Vorrichtung zur Aufnahme der Rotorringe, im folgenden Schleuderscheibe genannt, den geometrischen Randbedingungen und Anforderungen des Rotorträgersystems (vgl. Abschnitt 3.1.3). Zur Gewährleistung einheitlicher Prüfbedingungen werden alle Schleuderversuche dieser Arbeit mit der gleichen Schleuderscheibe auf dem gleichen Prüfstand der Firma PLB GmbH [96] durchgeführt. Die entwickelten Rotorringe werden auf der Schleuderscheibe montiert und zur formschlüssigen Drehmomentübertragung zwei Stifte eingesetzt. Zur axialen Fixierung erfolgt die Montage des Scheibendeckels und final die Befestigung der Schleuderscheibe auf der Antriebswelle des Prüfstandes. Der schematische Aufbau des Prüfstandes ist in Abbildung 34 dargestellt. [89]

Der Berstschutzbehälter erlaubt eine Prüfung bis zum Bruch des Rotorblechpakets bzw. bis zum Versagen der Verbindungsstelle, wobei ein Lasermesssystem den Außendurchmesser des Probekörpers durch einen höhenverstellbaren Laser und einen ortsfesten Detektor fortlaufend validiert und protokolliert.

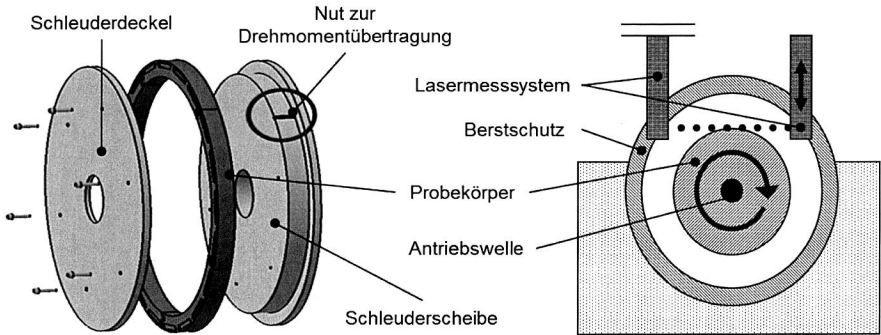


Abbildung 34: Schematischer Aufbau der Schleuderprüfung inkl. Vorrichtung. [89]

Zur Messung der relevanten plastischen Verformung wird nach Anfahren der zu prüfenden Drehzahl ein Messdurchlauf bei der Referenzdrehzahl von 1000 U/min durchgeführt. Nach diesem Messprinzip erfolgt schrittweise die Prüfung des Probekörpers (in Schritten zwischen 500 und 1000 U/min) bis zum finalen Versagen.

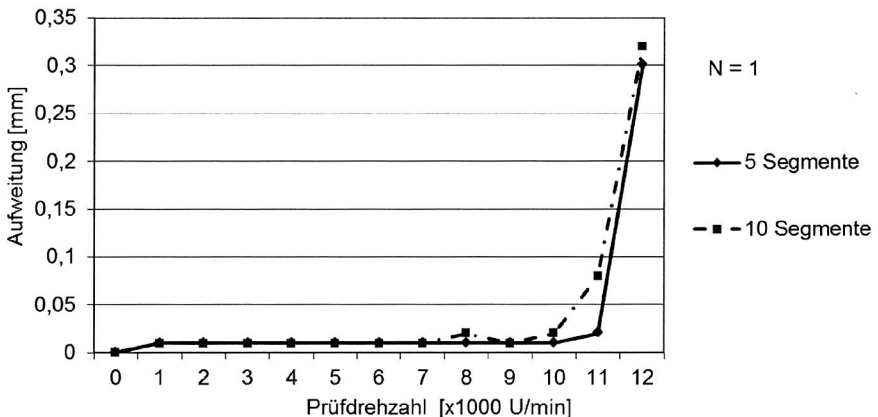


Abbildung 35: Ergebnisse der Schleuderprüfung der Verbindungstechnik Fügegeometrie. [89]

Der Abbruch der Prüfung erfolgt bei Zerstörung des Prüflings oder bei einer Aufweitung des Außendurchmessers über 2,0 mm. Dieser Wert entspricht dem Schließen des Luftspaltes zwischen Stator und Rotor im Einbaufall und ist daher ein signifikantes Versagens- und somit Abbruchkriterium. Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der Schleuderprüfung der zwei zu prüfenden Rotorringe mit fünf bzw. zehn Segmenten. Da die

Rotorringe aus prüftechnischen Gründen nicht auf die Schleuderscheibe des Prüfstandes aufgepresst werden können, erfolgt die Vorspannung nicht durch Montage des Rotorpotfes, sondern durch die Fliehkräfte zu Beginn der Prüfung. [89] Daher ist im Diagramm bereits eine leichte Aufweitung (0,01 mm) des Systems erkennbar. Bei allen Rotorringen findet keine Verformung im Betriebsbereich des Motors statt. Die Verbindungsfestigkeit ohne plastische Deformation ist bei beiden Prüflingen bis zu einer Drehzahl von 10.000 U/min gegeben. Erst nach dem Testlauf mit einer Testdrehzahl von 11.000 U/min bildet sich eine bleibende radiale Verformung aus. Der Bruch der Rotorblechpakete ist bei einer Drehzahl von 13.220 U/min (fünf Segmente) und 12.300 U/min (zehn Segmente) eingetreten. Die Ursache der Unterschiede zwischen den beiden Varianten liegt an der nicht vorhandenen Presspassung zwischen Prüfkörper und Schleuderscheibe. Die einzelnen Fügegeometrien werden während der Prüfung durch die Rotation und die daraus resultierenden Fliehkräfte in ihre Vorspannungslage versetzt. Durch die zusätzliche elastische Dehnung bei hohen Drehzahlen bildet sich ein Luftspalt zwischen Prüfling und Schleuderscheibe, der durch die Addition der Setzbewegungen der Verbindungsstellen mit zunehmender Segmentanzahl größer wird (siehe Abbildung 36). Der Luftspalt ermöglicht dann ein seitliches Aufklappen der Fügegeometrien und somit eine Schwächung der Verbindungsfestigkeit. Unter Serienbedingungen ist diese Setzbewegung nicht möglich und somit kein Unterschied zwischen den Varianten zu erwarten. [89] Die Korrelation der theoretischen Bruchdrehzahl mit der praktischen Bruchdrehzahl ist somit erwiesen.

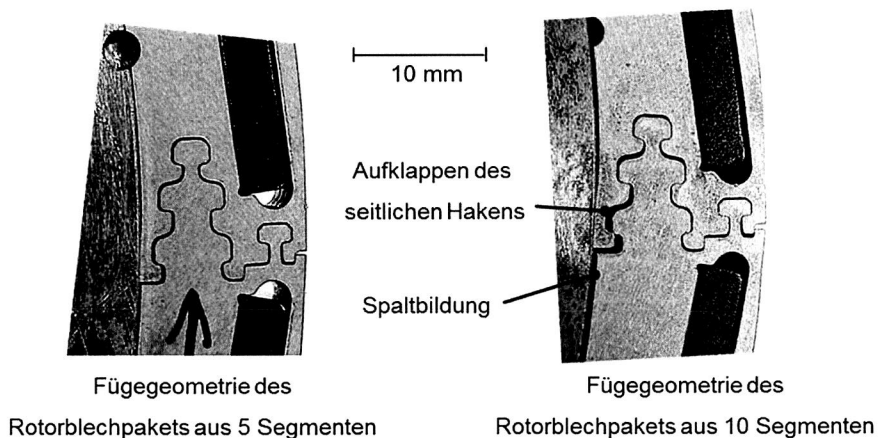


Abbildung 36: Spaltbildung beim Schleuderversuch und resultierendes Aufklappen der Fügegeometrie bei 10 Segmenten im Vergleich zu 5 Segmenten.

Zusammenfassung und Fazit

Die entwickelte und optimierte Fügegeometrie mit den integrierten designoptimierten Haken beweist anhand der Ergebnisse aus den Schleuderversuchen das große Potential der Fügegeometrie als Verbindungstechnik von Rotorsegmenten. Bis zum Erreichen der Streckgrenze sind bei der Referenzrotorgeometrie Umfangskräfte bis zu 24,5 kN übertragbar. Dies entspricht einer Drehzahl von ca. 11.000 U/min. Das finale Versagen der Verbindungstechnik tritt bei einer Drehzahl von 13.220 U/min und somit einer Umfangskraft von 27,5 kN auf. Zusammenfassend betrachtet übertrifft die Verbindungstechnik Fügegeometrie die bei einer Grenzdrehzahl von 7.000 U/min erforderlichen Schleuder- und Berstdrehzahlen deutlich. Somit ist eine Verwendung der entwickelten Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung des Referenzrotors aus festigkeitstechnischer Sicht empfehlenswert.

4.3 Magnet als Fügeelement der Rotorsegmentierung

Neben der in Abschnitt 4.2 entwickelten Fügegeometrie und dem Fügeelement (Abschnitt 4.4) ist die Funktionserweiterung des Permanentmagneten als Fügeelement eine weitere formschlüssige Verbindungstechnik.¹² Diese ist nur durch die Überlappung der Slots, der mit schichtweisem Versatz gestapelten Einzelbleche, möglich. Die Permanentmagnete stellen somit eine tangential Verbindung (vgl. Abbildung 37) zwischen den Segmenten her, wobei deren hohe Druckfestigkeit eine Übertragung der Umfangskräfte von Blechschicht zu Blechschicht möglich macht.

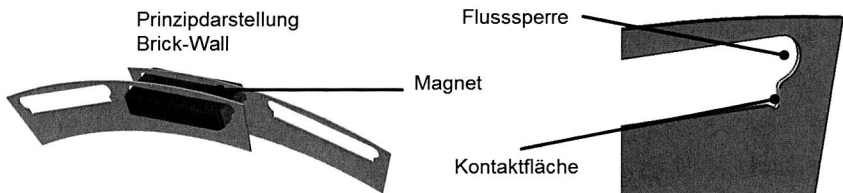


Abbildung 37: Prinzipielle Darstellung des Magneten als Fügeelement.

Vorteilhaft bei dieser Verbindungstechnik ist die Integration von Prozessen. Die Magnetmontage kann mit der Segmentmontage vereint werden. Im Idealfall besteht weiteres Einsparpotential durch die Verwendung der alternativen Magnetfixierungstechnologie des Klemmens (vgl. Abschnitt 5.3), da somit auch die Magnetfixierung in den Prozess integriert werden kann. Die Verwendung des Magneten als alleinige Verbindungstechnik hat als weiteren Vorteil die Kostenersparnis durch sehr kleine und einfache

¹² Bei der Entwicklung der Verbindungstechnik Magnet als Fügeelement wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Alexander Partheymüller unterstützt.

che Stanzwerkzeuge und den Entfall des Paketierprozesses. Als begrenzender Faktor für die Drehzahlfestigkeit der Verbindungstechnik kann sich die verhältnismäßig kleine Fläche (wegen der Flusssperren) zur Kraftübertragung erweisen. [97] In diesem Abschnitt wird die Verbindungstechnik des Magneten als Fügeelement durch analytische Berechnung, lineare Simulation sowie Zug- und Schleuderversuche analysiert und bewertet. Neben der maximalen Verbindungsfestigkeit in Abhängigkeit der Segmentanzahl werden zusätzlich die Spannungsverläufe hinsichtlich der Position der einzelnen Slots untersucht. Zur Vereinfachung der Simulationen und der praktischen Versuche werden die Untersuchungen mit geklemmten und nicht mit umspritzten Magneten durchgeführt. Da die Übertragung der Umfangskräfte über die Fläche unterhalb der Flusssperren erfolgt, hat die Fixierungstechnologie der Magnete keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

4.3.1 Analytische Bestimmung der übertragbaren Umfangskräfte

Die Berechnung der wirkenden Umfangskräfte auf die Kontaktfläche zwischen Magnet und Blechpaket basiert auf den resultierenden Druck- und Scherbelastungen. Zur vereinfachten Visualisierung und Berechnung wird ein symmetrischer Verbindungsausschnitt angenommen und auf zwei Blechschichten mit entsprechend skaliertem Magnetanteil reduziert. Im Belastungsfall erstreckt sich das Ringsegment S1 in die linke und S2 in die rechte Richtung, wobei die Umfangskraft in Form von Druckkräften auf den Magneten übertragen wird. In Abbildung 38 sind die Krafteinleitungszonen rot markiert.

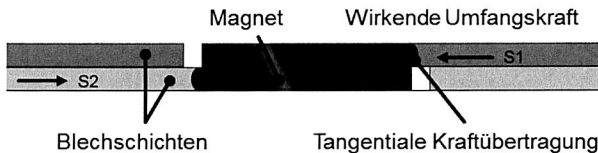


Abbildung 38: Umfangskraftwirkung auf den Magneten.

Da pro Kontaktfläche zwei Bleeschichten ($d_B = 0,35 \text{ mm}$) mit entsprechendem Magnetanteil wirken, reduziert sich die in Gleichung 4.21 berechnete Umfangskraft auf:

$$F_{U_2_Blech} = \frac{F_U}{\frac{L_{BP}}{2 * d_R}} = \frac{7,2 \text{ kN}}{16,667} = 0,43 \text{ kN} \quad (4.21)$$

Die Kontaktfläche zur Übertragung der Umfangskräfte hat eine Größe von $A_R = 0,354 \text{ mm}^2$. Die auftretenden Druckspannungen $\sigma_{D_2_Blech}$ errechnen sich durch den Quotienten der wirkenden Umfangskraft und der Kontaktfläche:

$$\sigma_{D,2,Blech} = \frac{F_{U,2,Blech}}{A_R} = 1214,7 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

Die Druckfestigkeit des verwendeten Permanentmagneten beträgt $\sigma_{DM} = 600 \text{ MPa}$ [53]. In der Literatur ist keine Druckfestigkeit für Elektroblech angegeben. Nach experimentellen Untersuchungen der Werkstoffprüfung der Daimler AG¹³ ist diese mit der angegebenen Streckgrenze von $\sigma_{DE} = 330 \text{ MPa}$ gleichzusetzen. Folglich ist das primäre Versagenskriterium plastische Deformation am Elektroblech. Die Verwendung eines Magneten als alleinige Verbindungstechnik segmentierter Rotoren ist somit nach den Randbedingungen des Referenzrotors nicht realisierbar, da die Kraftübertragungsfläche zu gering ist. Durch eine Designänderung des Magnetslots kann diese Fläche erhöht werden. Zudem ist eine Steigerung der Kraftübertragungsfläche durch eine Erhöhung der Magnetanzahl je Verbindung (Reduzierung des Blechausnutzungsgrades durch größere Segmente) möglich.

4.3.2 Analyse der relevanten Einflussparameter durch lineare Simulation

Vergleichbar mit einer Schraubenverbindung hat die Erhöhung der Kraftübertragungsfläche durch eine serielle Aneinanderreihung von Magneten keine linear proportionale Steigerung der übertragbaren Umfangskräfte zur Folge. In den beiden folgenden Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 soll diese These zunächst mittels linearer Simulation validiert und anschließend durch Zug- und Schleuderversuche verifiziert werden. Die Ziele der Simulationen sind das Erlangen von Kenntnissen hinsichtlich übertragbarer Umfangskräfte in Abhängigkeit der Slotanzahl und die Verteilung der Spannungen in Abhängigkeit der Zugrichtung und Position der Slots. Der Aufbau und die Randbedingungen der linearen Simulationen sind äquivalent zu Abschnitt 4.2, wobei hier der Fokus auf die zur Übertragung der Kräfte relevante Fläche unterhalb der Flusssperren gelegt wird. Die Ergebnisse der Simulationen müssen qualitativ betrachtet werden und stellen keine quantitativ exakten Werte dar. Die in Abbildung 39 dargestellten prozentualen Werte der Steigerung der übertragbaren Kräfte, dienen nur der Visualisierung der Bandbreite der qualitativen Resultate. Die übertragbaren Kräfte steigen degressiv mit zunehmender Slotanzahl. Vergleichbar mit einer Schraubverbindung führt ausschließlich eine Verdopplung von einem auf zwei Slots zu einer Verdopplung der übertragbaren Umfangskräfte. Im Verhältnis zur Segmentgröße und somit zum Blechausnutzungsgrad ist die Segmentierungsvariante mit zwei Slots Überdeckung am effektivsten.

¹³ Persönliches Gespräch mit der Konzernforschung der Daimler AG

Die Begründung für die degressive Steigerung der übertragbaren Kräfte mit zunehmender Slotanzahl liegt an der heterogenen Spannungsverteilung zwischen den Slots. Dabei nehmen die jeweiligen äußersten Slots der Zugprobe die höchsten Kräfte auf. Die Spannungen an den Slots reduzieren sich zur Mitte der Probe deutlich.

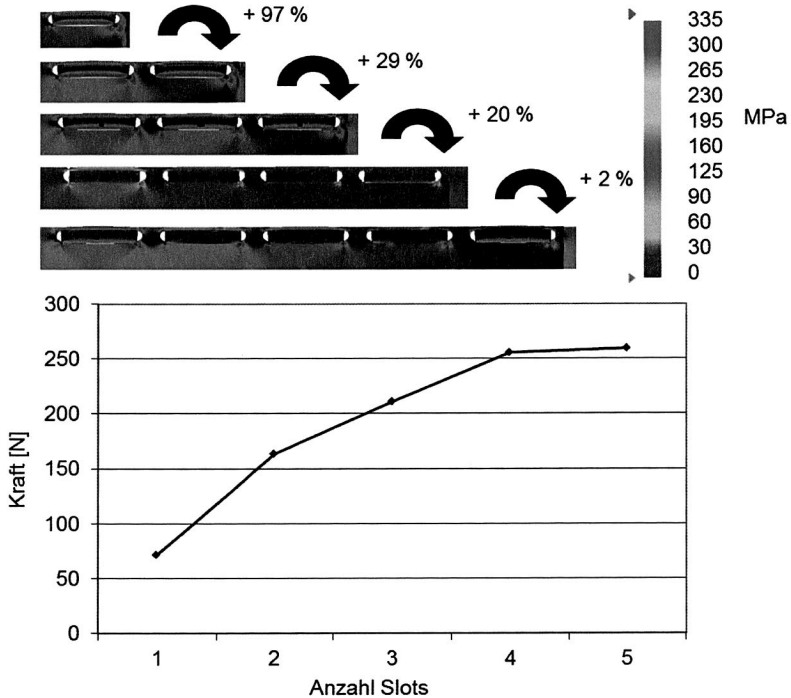


Abbildung 39: Simulationsergebnisse: Steigerung der übertragbaren Kräfte in Abhängigkeit der Slotanzahl.

Abbildung 40 zeigt am Beispiel der Zugprobe mit fünf Slot Überdeckung die Verteilung der Spannungen je Slot. Unabhängig von der Anzahl der Slots sind stets die Spannungen an den jeweils äußeren Slots vergleichbar groß. Somit ist die Spannungsverteilung bei einer Segmentierungsvariante mit zwei Slot Überdeckung am homogensten und ist daher eine Begründung für die hohe Effektivität. Simulationen mit anderen Blechdicken kommen qualitativ zu äquivalenten Ergebnissen und bestätigen die beschriebenen Erkenntnisse.

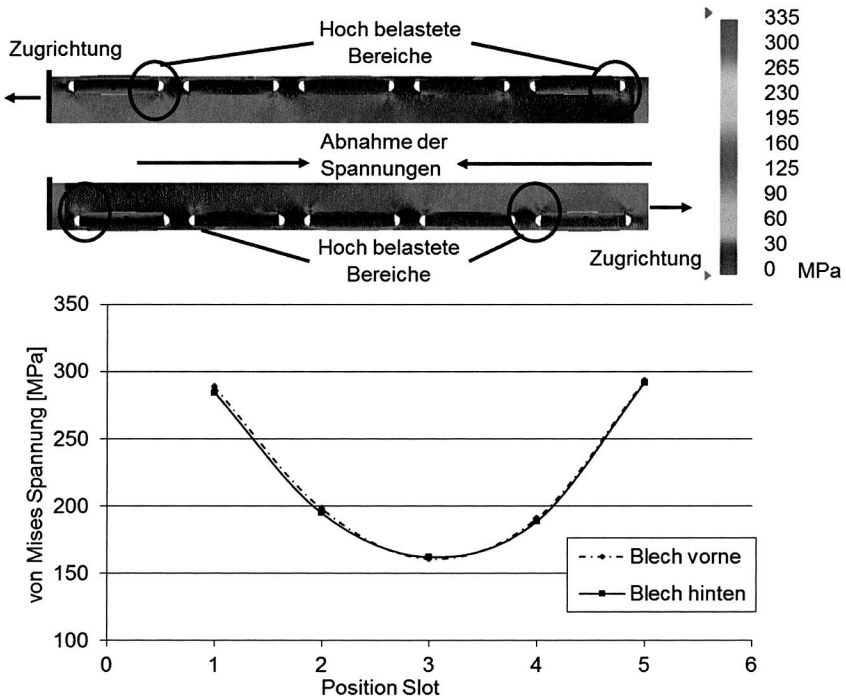


Abbildung 40: Simulationsergebnis: Verteilung der Spannungen entlang der Slots am Beispiel „Fünf Slot Überdeckung“

4.3.3 Experimentelle Verifikation der simulierten Parameter

Die gewonnenen Erkenntnisse durch die analytische Berechnung und die linearen Simulationen werden in diesem Abschnitt durch Zug- und Schleuderversuche verifiziert. Zur Minimierung kostenintensiver Schleuderversuche erfolgen zunächst Zugversuche, um für weitere Entwicklungsschritte relevante Segmentgrößen zu ermitteln. Der Aufbau und die Durchführung der Zugversuche ist äquivalent zu Abschnitt 4.2. Plastische Deformation ist das relevante Versagenskriterium und beginnt durch Belastung oberhalb der Streckgrenze. Geprüft werden Proben (Z10 – Z50) mit einer Überdeckung von einem Slot bis zu fünf Slots.

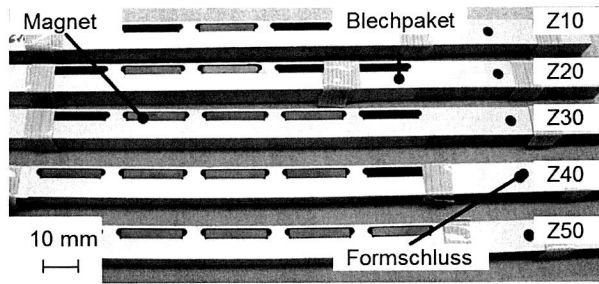


Abbildung 41: Zugproben (Z10 - Z50) Magnet als Fügeelement.

Die Zugversuche bestätigen den aus den Simulationen ermittelten kritischen Bereich der Kraftübertragungsfläche unterhalb der Flusssperren. Die Spannungsverteilungen und somit der Kraftfluss sind kongruent. Abbildung 42 zeigt einen Slot vom unbelasteten Ausgangszustand über die beginnende plastische Deformation bis zum vollständigen Versagen.

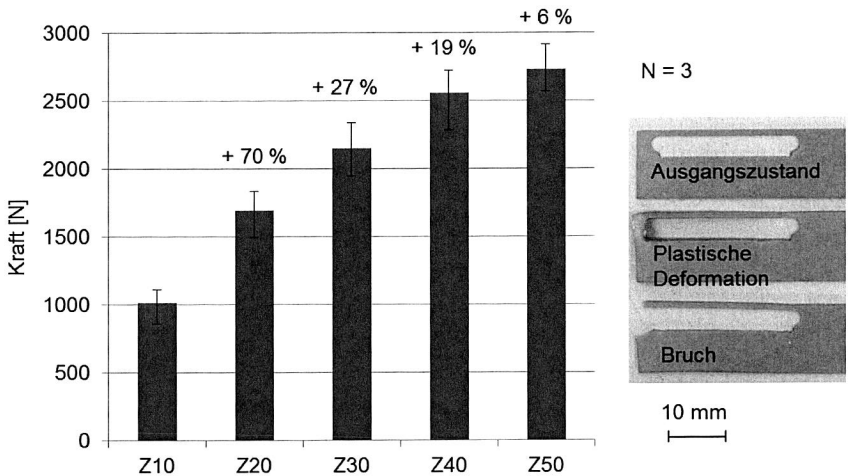


Abbildung 42: Ergebnisse der Zugversuche – Magnet als Fügeelement.

Äquivalent zu den Simulationsergebnissen steigen die aushaltbaren Kräfte bis zum Erreichen der Streckgrenze (335 MPa) des Elektrobleches M330-35A degressiv mit zu-

nehmender Slotanzahl. Allerdings sind die prozentualen Steigerungen¹⁴, insbesondere von der Variante Z10 zur Variante Z20 nicht ganz so groß wie durch die Simulation vorgegeben. Ursächlich sind die nicht idealen Randbedingungen des Versuchsaufbaus und der Zugproben. Aus fertigungs- und montagetechnischen Gründen ist in der Serienfertigung die Breite des Magneten immer geringer (ca. 0,5 mm) als die Stapelhöhe des Blechpaketes. Somit können die beiden Randbleche nicht vollständig belastet werden. Zudem findet während der Zugversuche eine Relativbewegung zwischen den einzelnen Blechen statt, da diese nicht paketierte sind und nur durch die Flächenpressung des Magneten und den Spannbacken der Zugprüfmaschine gehalten werden. Mit den Gleichungen 4.6 und 4.20 lassen sich aus den maximal aushaltbaren Umfangskräften die daraus resultierenden Maximaldrehzahlen (vgl. Tabelle 5) für die verwendeten Überdeckungen (Slotanzahl) der Zugproben berechnen.

Slotanzahl	Umfangskraft [N]	Maximaldrehzahl [U/min]
1	1018	2721
2	1692	3508
3	2149	3953
4	2560	4315
5	2730	4457

Tabelle 5: Berechnungsergebnis: Aushaltbare Umfangskräfte und Maximaldrehzahlen in Abhängigkeit der Überdeckung.

Die Ergebnisse in Tabelle 5 zeigen, dass der Magnet als alleinige Verbindungstechnik keine ausreichende Festigkeit garantieren und nur als unterstützende Komponente in der Kombination verschiedener Verbindungstechniken dienen kann. Das größte Potential hinsichtlich Verbindungsfestigkeit und benötigtem Material hat die Segmentierungsvariante mit einer Überdeckung von zwei Slots. Eine weitere Steigerung der Überdeckung hin zu drei oder mehr Slots führt zu keiner signifikanten Steigerung der aushaltbaren Umfangskräfte bei einer gleichzeitigen Verringerung des Blechausnutzungsgrades. In den abschließenden Schleuderversuchen werden daher Ringe im Brick-Wall-Design mit einer Segmentgröße von zwei¹⁵ und vier¹⁶ Magneten pro Segment aufgebaut und geprüft. Der Aufbau und die Prüfung sind äquivalent zu Abschnitt 4.2.3.

Die Schleuderversuche verifizieren die Ergebnisse der Simulationen und der Zugversuche. Eine Verwendung als alleinige Verbindungstechnik ist nicht möglich. Die dynami-

¹⁴ Die prozentualen Steigerungen beziehen sich immer auf die vorherige Zugprobe, also z. B. von Z20 auf Z30 und von Z30 auf Z40

¹⁵ Entspricht 36° Segmente

¹⁶ Entspricht 72° Segmente

sche Vermessung der Schleuderproben zeigt ein frühzeitiges Aufweiten des Ringes, resultierend aus den Relativbewegungen der Segmente. Für eine Serienanwendung muss daher zwingend eine Paketierung vorgesehen werden. Daher erfolgen weitere Untersuchungen des Magneten als Fügeelement, in Kombination mit anderen Verbindungstechniken, in Abschnitt 4.8.

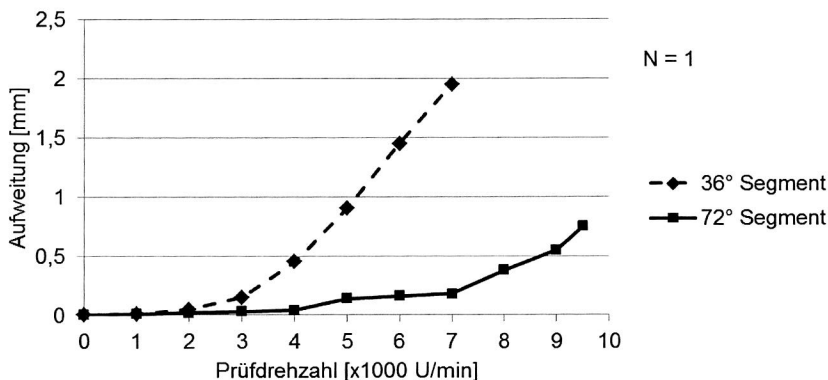


Abbildung 43: Ergebnisse der experimentellen Schleuderprüfung – Magnet als Fügeelement.

Zusammenfassung und Fazit

Auf Grund der Ergebnisse der Entwicklungsarbeiten ist für die alleinige Verwendung des Magneten als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung kein Potential erkennbar. Selbst bei einer für die Referenzrotorgeometrie maximal möglichen Überdeckung von fünf Slots lassen sich bis zum Erreichen der Streckgrenze lediglich Umfangskräfte bis maximal 2,7 kN übertragen. Dies entspricht einer Drehzahl von 4457 U/min. Allerdings besteht die Möglichkeit der Verwendung des Magneten als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung in Kombination mit weiteren Verbindungstechniken. Vorteilhaft wären dabei stoffschlüssige Verbindungstechniken zum Aufbau einer Paketierung, die das Auffächern der Einzelbleche unter Zugbelastung verhindern können.

4.4 Fügeelement als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung

Das Verbinden der Rotorsegmente mit Fügeelementen zählt nach DIN EN 22340 [98] zu den formschlüssigen Verbindungstechniken. Äquivalent zum Magnet als Fügeelement ist auch hier nur der Aufbau des Rotors im Brick-Wall-Design ausführbar. Die Fügeelemente stellen somit eine formschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Blechsegmenten her (vgl. Abbildung 44), wobei die werkstoffbedingte höhere Druckfestigkeit

der Fügeelemente eine Übertragung der Umfangskräfte von Blechschicht zu Blechschicht möglich macht. Aus Gründen des spezifischen Aufbaus der Blechpakete und der Rotoren sind nur einfache Fügeelemente ohne Kopf und Gewindezapfen denkbar. Des Weiteren muss auf Sicherungselemente, wie Splinte verzichtet werden. In Bezug auf klassische Normteile wie Bolzen oder Stifte, sind somit nur „Bolzen ohne Kopf“ nach Form A [98] anwendbar. Um eine flächige Übertragung der Umfangskräfte und eine axiale Fixierung der Fügeelemente zu garantieren, muss die Verbindung mindestens in Form einer Übergangspassung ausgeführt sein.

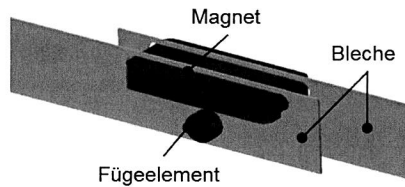


Abbildung 44: Prinzipdarstellung Fügeelement als Verbindungstechnik.

Vorteile dieser Verbindungstechnik sind die Verwendung kleiner einfacher Stanzwerkzeuge und die Integration der Paketierung in die Verbindungstechnik. Werkstoffbedingt ist zudem keine thermische oder kalendarische Alterung der Verbindungstechnik zu erwarten. Nachteilig ist der Zusatzaufwand für die präzise Positionierung der Segmente und das exakte Einfügen der Fügeelemente. Weiter können durch die Fügeelemente zusätzliche Wirbelstromverluste im Rotor entstehen. Um die Performance der Maschine nicht zu schwächen, sollte die Position der Fügeelemente möglichst in flussarmen Bereichen mittig unterhalb der Magneten gewählt werden.

Die einfachsten und kostengünstigsten Fügeelemente sind Normteile wie Bolzen oder Stifte. Da Kosteneinsparungen aber nur bei Erreichen der technischen Anforderungen möglich sind, ist das Ziel die Entwicklung eines für die Übertragung der Umfangskräfte optimalen Fügeelements.¹⁷ Daher erfolgen in diesem Abschnitt zunächst die Auswahl möglicher Grundgeometrieformen und deren Vergleich hinsichtlich Festigkeit und homogener Spannungsverläufe im Elektroblech mittels linearer Simulation. Auf eine analytische Berechnung und Auslegung der Fügeelemente kann somit verzichtet werden. Anschließend werden die Parameter der vorteilhaftesten Grundgeometrieform optimiert. Durch einfache Zugversuche mit jeweils zwei Elektroblechen wird anschließend der Einfluss der Anzahl der Fügeelemente auf die übertragbaren Umfangskräfte ermittelt. Der

¹⁷ Bei der Entwicklung der Verbindungstechnik Fügeelement wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Jan Raßkopf unterstützt.

Abschluss dieses Abschnitts ist die Verifizierung der gewonnenen Erkenntnisse durch Zugversuche an der Referenzgeometrie mit Integration der Magneten.

4.4.1 Entwicklung und Optimierung der Grundgeometrie mittels linearer Simulation

Für die Entwicklung einer spannungshomogenen Geometrieform des Fügeelementes werden zunächst vier einfach produzierbare Grundgeometrien ausgewählt – Zylinder, Dreieck, Viereck und Hexagon. Das Ziel der Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten ist neben der Generierung optimaler Parameterkombinationen auch die optimale Ausrichtung des Fügeelementes im Blechpaket. In Tabelle 6 sind die verschiedenen Grundgeometrien mit den zu variierenden Parametern und den möglichen Ausrichtungen (Rotation) dargestellt. Alle Radien r der Dreieck-, Viereck- und Hexagon-Geometrien beschreiben die jeweilige Kantenverrundungen an den Ecken der Geometrien.

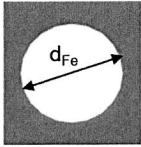
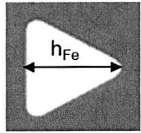
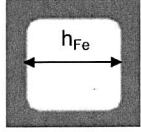
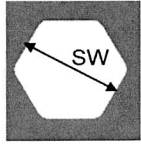
Bezeichnung	Form	Parameter	Ausrichtung (Rotation)
Zylinder		Durchmesser d_{Fe}	
Dreieck		Höhe h_{Fe} , Radius r	$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$
Viereck		Höhe h_{Fe} , Radius r	$0^\circ, 45^\circ$
Hexagon		Schlüsselweite SW , Radius r	$0^\circ, 30^\circ$

Tabelle 6: Grundgeometrien der Fügeelemente mit Parametern und Ausrichtungen.

Die Entwicklung und Optimierung des Fügeelementes erfolgt, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, mittels linearer Simulation mit CATIA V5. Die Baugruppe aus den zwei über-

lappenden Blechen wird ergänzt durch das entsprechende Fügeelement, welches sich in die ausgesparte Kontur der Einzelbleche fügt und sie somit verbindet. Da im Falle einer späteren Serienfertigung der Werkstoff des Fügeelementes höhere Festigkeitswerte im Vergleich zum Elektroblech annimmt, ist dies auch in der Simulation zu berücksichtigen. Daher wird bei den weiteren Simulationen der Werkstoff 42CrMo4 den Fügeelementen zugeordnet. Speziell bei der Dreieck-, Viereck- und Hexagon-Geometrie ist die Ausrichtung in Umfangsrichtung zu evaluieren, wobei die Anzahl der möglichen Winkelrotationen vergleichsweise gering ist. Um vergleichbare Ergebnisse zu generieren, werden alle Parameter der jeweiligen Rotationen auf einen konstanten Wert gesetzt. Durch einen Vergleich der Homogenität der Spannungsverteilung sowie der Vergleichsspannung kann die optimale Ausrichtung der jeweiligen Geometrieform definiert werden.

Die Ergebnisse in Abbildung 45 zeigen innerhalb der jeweiligen Grundgeometrien nur geringe Unterschiede hinsichtlich der Homogenität der Spannungsverteilung und der auftretenden mittleren Spannungen in den kritischen Bereichen. Für die Dreieck-Geometrie ist die 90°-Ausrichtung am vorteilhaftesten. Am besten geeignet bei der Viereck- und Hexagon-Geometrie ist jeweils die 0°-Ausrichtung.

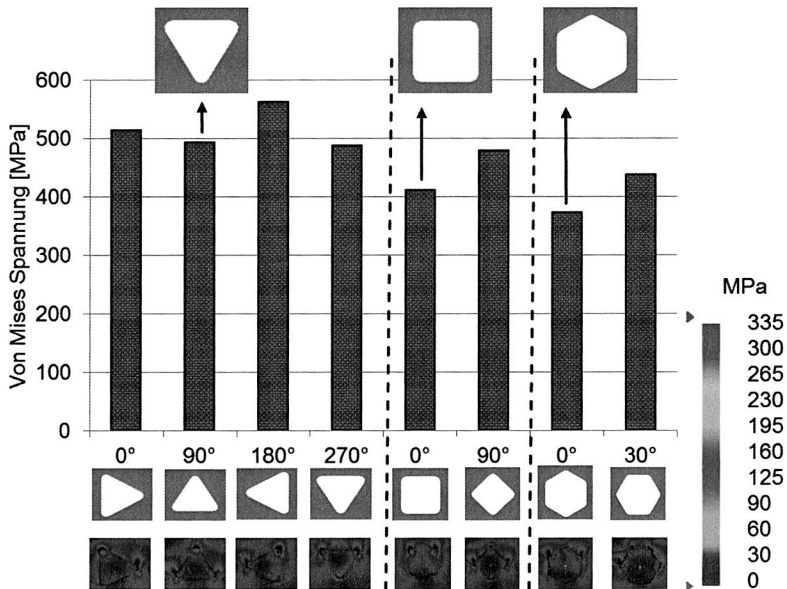


Abbildung 45: Simulationsergebnis: Definition der Ausrichtung der Grundgeometrien in Umfangsrichtung.

Der nächste Schritt in der Entwicklung eines optimalen Fügeelements ist die Parameteroptimierung der jeweiligen Grundgeometrien in ihrer vorteilhaftesten Ausrichtung. Die Simulationsbedingungen sind äquivalent zur vorherigen Simulation. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung sind in Abbildung 46 dargestellt. Wie zu erwarten, zeigen alle Grundgeometrien die vorteilhaftesten Ergebnisse bei maximalen äußeren Abmaßen. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die Referenzrotorgeometrie wird im Hinblick auf die geometrischen Randbedingungen der maximale Durchmesser auf 5 mm begrenzt. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist der Einfluss der Kantenverrundungen auf die Homogenität der Spannungsverteilung.

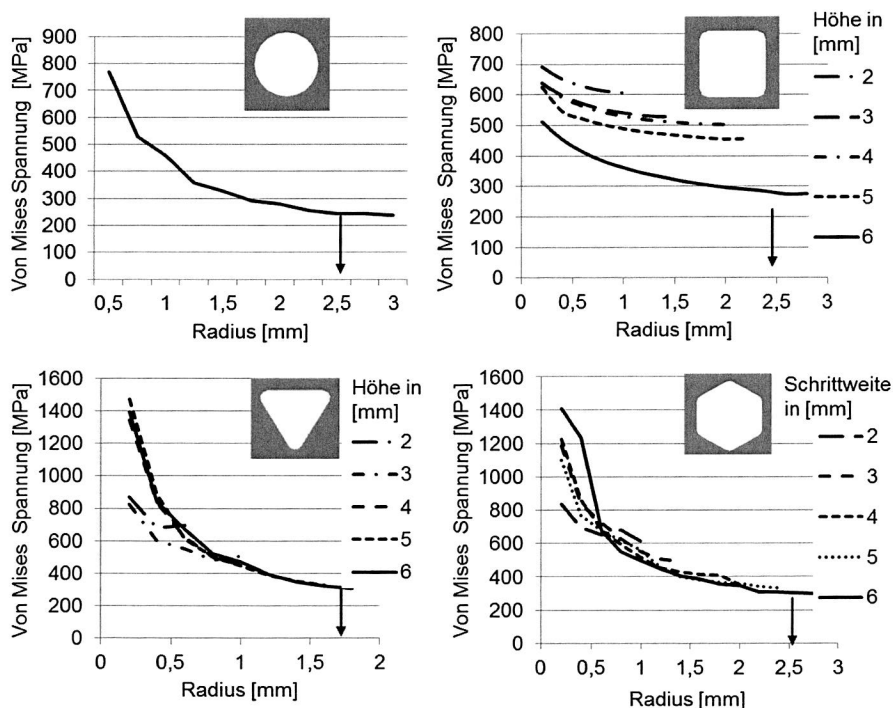


Abbildung 46: Simulationsergebnisse der Parameteroptimierung der Fügeelemente in vorteilhaftester Ausrichtung.

Alle untersuchten Fügeelemente liefern die besten Ergebnisse, wenn die Radien maximal gewählt werden und somit sich alle Geometrieformen der Zylinder-Geometrie annähern. Daher verwundert der in Abbildung 47 dargestellte Vergleich der optimierten Grundgeometrien nicht. Die Spannungsverteilung ist bei der Zylindergeometrie am homogensten und auch die mittleren Spannungen in Folge der wirkenden Umfangskräfte

sind am geringsten. Als vorteilhafteste Geometrie für eine Verwendung als Fügeelement wird daher die Zylindergeometrie definiert und für weitere Untersuchungen ausgewählt.

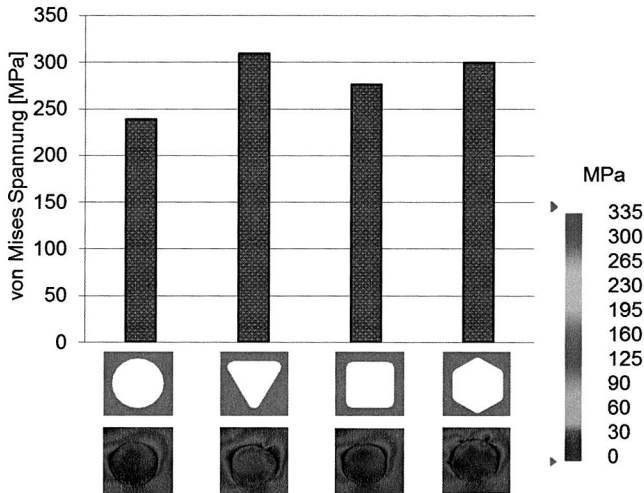


Abbildung 47: Simulationsergebnis: Vergleich der optimierten Geometrieformen.

Ein weiterer interessanter zu untersuchender Punkt ist die vorteilhafteste Position der Zylindergeometrie unterhalb des Magnetslots. Daher wird in der nachfolgenden Studie mittels linearer Simulation die horizontale Position des Mittelpunktes der Zylindergeometrie über den Bereich der Überlappungsfläche variiert.

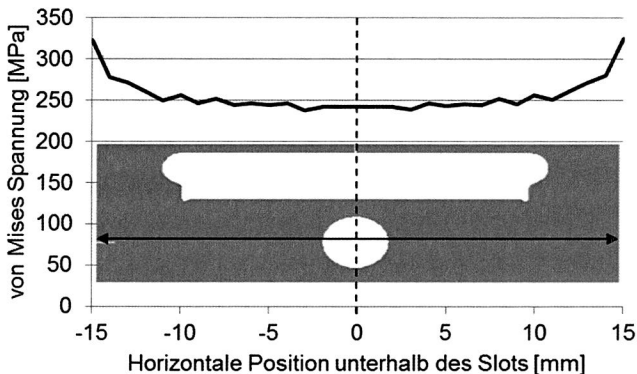


Abbildung 48: Simulationsergebnis: Horizontale Positionierung unterhalb des Slots.

Abbildung 48 zeigt den Verlauf der Spannungen in Abhängigkeit der Position der Zylindergeometrie unterhalb des Magnetslots. Bei einer zentralen Lage unterhalb des Slots sind diese am geringsten. Da dies auch aus elektromagnetischer Sicht die vorteilhafteste Position ist, wird in den weiterführenden experimentellen Untersuchungen die Zylindergeometrie immer zentral unterhalb des Magnetslots platziert.

4.4.2 Empirische Untersuchungen an der optimierten Grundgeometrie durch Zugversuche

Nachdem im vergangenen Abschnitt mittels linearer Simulation der Zylinderstift als geeignetste Fügeelementgeometrie identifiziert werden konnte, sollen im weiteren Verlauf dieses Abschnitts dessen Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit genauer analysiert werden. Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse erfolgt zunächst eine Untersuchung, bei der die übertragbaren Umfangskräfte in Abhängigkeit des Stiftdurchmessers gemessen werden. In Folge der Simulationsergebnisse und der geometrischen Randbedingungen des Referenzrotors liegt der Bereich der zu prüfenden Stiftdurchmesser zwischen 3 mm und 5 mm. Der Versuchsaufbau und die Randbedingungen sind äquivalent zu den bereits in dieser Arbeit beschriebenen Zugversuchen und können in Abschnitt 4.2 nachgelesen werden. Einziger Unterschied ist die Stapelhöhe der Zugproben und der Verzicht auf die Integration des Magnetslots und des Permanentmagneten, um allein das Fügeelement als Verbindungstechnik bewerten zu können.

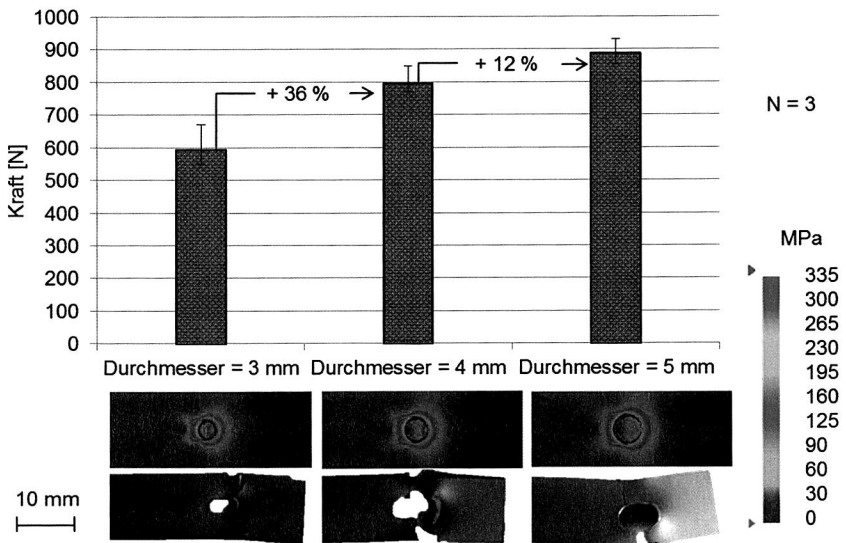


Abbildung 49: Ergebnisse der Zugversuche mit unterschiedlichen Stiftdurchmessern.

Die Zugproben bestehen in diesem Abschnitt immer aus jeweils zwei Elektroblechen, die mit entsprechenden Stiften verbunden werden. Da bei den verwendeten Werkstoffen bei Betriebstemperatur keine Veränderung der mechanischen Festigkeit zu erwarten ist, kann auf entsprechend temperierte Zugversuche verzichtet und diese bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Die in Abbildung 49 dargestellten Ergebnisse der Zugversuche bestätigen die Erkenntnisse der linearen Simulation, die einen Anstieg der übertragbaren Umfangskräfte mit größer werdenden Stiftdurchmessern prognostizierten. Obwohl die Steigerung von 12 % der übertragbaren Kräfte von $d_{Fe} = 4$ mm auf $d_{Fe} = 5$ mm verhältnismäßig gering ist, wird dennoch empfohlen den größtmöglichen Stiftdurchmesser zu wählen, da die monetären Unterschiede in Beschaffung und Montage vernachlässigbar sind und somit kostenneutral höhere Festigkeiten erzielt werden können.

In einer weiteren Untersuchung soll der Einfluss der Anzahl der Stifte auf die Verbindungsfestigkeit analysiert werden. Da nur Stifte mit $d_{Fe} = 5$ mm Verwendung finden sollen, ist der Einsatz von maximal drei Stiften unterhalb des Slots möglich.

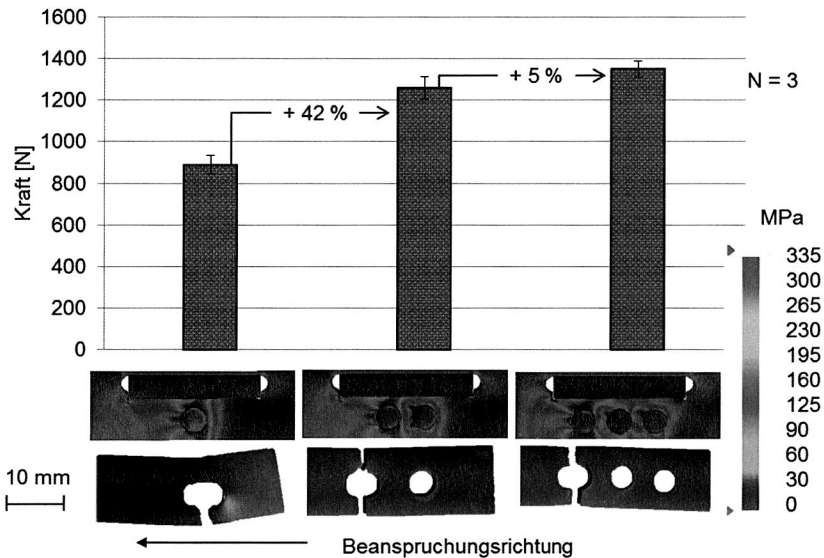


Abbildung 50: Ergebnisse der Zugversuche mit unterschiedlicher Stiftanzahl.

Erwartungsgemäß zeigt Abbildung 50 einen Anstieg der übertragbaren Kräfte mit zunehmender Anzahl an Stiften. Vergleichbar zum Magneten als Fügeelement ist keine proportionale Erhöhung der übertragbaren Kräfte mit der Stiftanzahl zu vernehmen. Der

Grund hierfür liegt, wie sowohl die Simulationen, als auch die Bruchbilder zeigen, an der inhomogenen Spannungsverteilung zwischen den Stiften. Vergleichbar zu Schraubverbindungen ist der erste in Beanspruchungsrichtung liegende Stift immer am höchsten belastet und versagt folglich anfänglich. Der Einsatz von drei Stiften sollte wegen der nur minimalen Festigkeitssteigerung von 5 % gegenüber zwei Stiften vermieden werden. Daher werden für die Durchführung der Zugversuche an der Referenzrotorgeometrie mit integrierten Magnetslots nur Zugproben mit einem oder zwei Stiften als Fügeelemente verwendet.

4.4.3 Verifizierung des optimierten Fügeelementes an der Referenzrotorgeometrie mittels Zugversuchen

Um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der anderen untersuchten und zu untersuchenden Verbindungstechniken herstellen zu können, müssen noch Zugversuche an der Referenzrotorgeometrie mit der Pakethöhe L_{BP} durchgeführt werden. Die Randbedingungen und der Aufbau zur Durchführung der Zugversuche sind äquivalent zum Abschnitt 4.2. Geprüft werden jeweils lose paketierte Zugproben mit einem oder zwei Stiften (Durchmesser: 5 mm) als Fügeelemente unterhalb des Magnetslots. Die Ergebnisse der Zugversuche in Abbildung 51 zeigen eine vergleichbare Steigerung (41 %) der übertragbaren Kräfte bei Erhöhung der Stiftnummen, wie bei den Zugversuchen mit nur zwei Blechen.

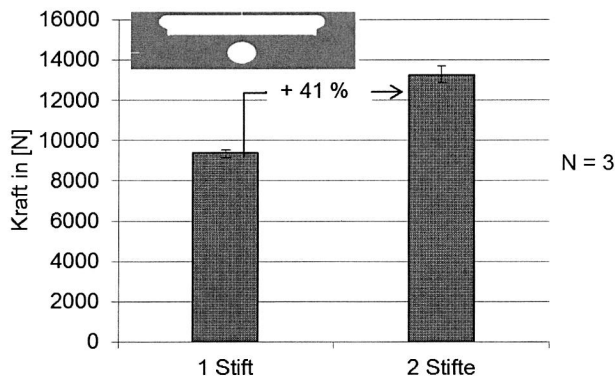


Abbildung 51: Ergebnisse der Zugversuche an der Referenzrotorgeometrie.

Allerdings ist festzustellen, dass vergleichbar zum Magneten als Fügeelement, die Randbleche während des Zugversuches auffächern und somit ihre tragende Funktion verlieren. Zudem findet während der Zugversuche eine Relativbewegung zwischen den einzelnen Blechen statt, da diese nicht paketierte sind und nur durch die Flächenpressungen des Magneten, der Stifte und den Spannbacken der Zugprüfmaschine gehalten

werden. Somit ist das Fügeelement als alleinige Verbindungstechnik wegen der fehlenden Stabilität des Blechpaketes nicht anwendbar. Auf eine Durchführung von Schleuderversuchen kann im Hinblick auf die gewonnenen Ergebnisse und den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.3.3 verzichtet werden. In Abschnitt 4.8 „Kombinationen diverser Verbindungstechniken“ soll dennoch die Verwendung des entwickelten Fügeelementes in Kombination mit anderen Verbindungstechniken validiert werden.

Zusammenfassung und Fazit

Vergleichbar zum Magnet als Fügeelement haben auch die entwickelten und optimierten Fügeelemente kein Potential als alleinige Verbindungstechnik. Kausal ist das Auffächern der Zugprobe und des Rotorringes unter Zugbelastung. Ursächlich ist die nicht vorhandene Paketierung der Blechpakete. Wegen diesem, bereits aus den Untersuchungen zum Magnet als Fügeelement, bekanntem Phänomen wurde auf eine Durchführung von Schleuderversuchen verzichtet.

4.5 Adhäsive Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung

Klebstoffe sind unter DIN EN 923 [99] als nichtmetallische Werkstoffe zum Fügen von Bauteilen durch Adhäsion und Kohäsion definiert. Bei Verwendung der Adhäsion als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung muss grundsätzlich zwischen den in Abbildung 52 gezeigten Konzepten der klassischen Klebstoffe und dem Backlack-Klebeverfahren unterschieden werden.

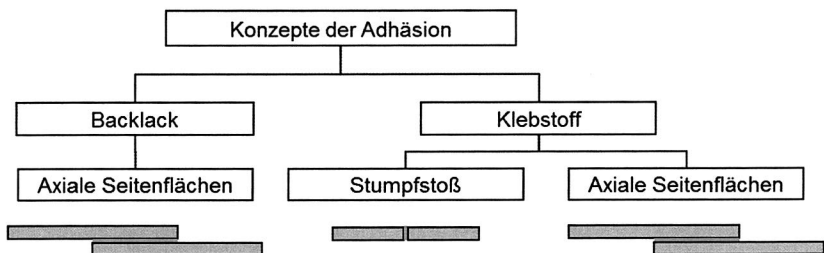


Abbildung 52: Konzepte der Adhäsion als Verbindungstechnik.

Prozessbedingt kann der Backlack als Verbindungstechnik nur über die axialen Seitenflächen Anwendung finden, da dieser vor der Formgebung (Stanzen) des Bleches aufgetragen wird und somit an den Schnittkanten nicht vorhanden ist. Vorteile der Adhäsion als Verbindungstechnik sind die vollständige Isolierung (keine Wirbelstromverluste zu erwarten) und die Vermeidung von Luftspalten in den Verbindungsstellen der Rotorsegmente. Des Weiteren können verhältnismäßig kleine Stanzwerkzeuge Anwendung finden. Nachteilig sind die monetären Aufwände für präzise Backwerkzeuge bzw. Dosiervorrichtung für den Klebstoffeinsatz. Zudem ist mit einer thermischen Alterung der

Verbindungstechnik und einer geringeren Festigkeit bei hohen Temperaturen zu rechnen. In diesem Abschnitt sollen zunächst die verfahrenstechnischen Grundlagen der Adhäsion erläutert und anschließend analytische Berechnungen der Tragfähigkeit der verschiedenen Verfahrensvarianten erfolgen. Dabei sollen allgemeingültige Abschätzungen am Beispiel eines Hochleistungsklebstoffes und eines Backlacksystems getroffen werden. In den nachfolgenden empirischen Grundlagenuntersuchungen sollen mit ausgewählten Klebstoffen und einem Backlacksystem exakte Ergebnisse hinsichtlich der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Klebflächen generiert werden. Auf Basis dessen erfolgen mit dem geeignetsten Adhäsionswerkstoff weitere Zug- und Schleuderversuche an der Referenzrotorgeometrie, um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Verbindungstechniken herzustellen.¹⁸

4.5.1 Verfahrenstechnische Grundlagen der Adhäsion

Unter Adhäsion wird die Haftung der Klebeschicht an den Fügeiteiloberflächen durch Molekularkräfte verstanden. Im Gegensatz dazu bezeichnet die Kohäsion die Kräfte, die den Zusammenhalt des Klebstoffs bewirken. Diese Kohäsionskräfte sind sowohl für die Viskosität und die Rheologie des unausgehärteten Klebstoffs bei der Verarbeitung, als auch für die Festigkeit des ausgehärteten Klebstoffs bei seiner Beanspruchung verantwortlich.

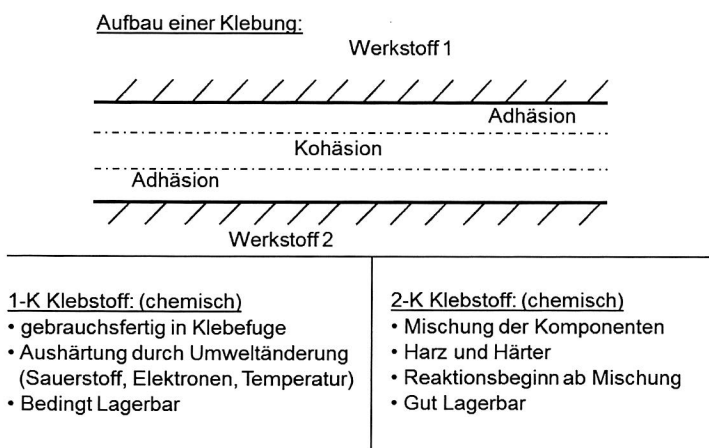


Abbildung 53: Oben: Aufbau einer Klebung. Unten: Charakteristische Eigenschaften der chemisch härtenden Klebstoffe. [100]

¹⁸ Bei der Entwicklung der adhäsiven Verbindungstechniken wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Jan Raßkopf und Herrn cand. Ing. Alexander Partheymüller unterstützt.

Die Unterteilung der Klebstoffe kann generell in physikalisch härtende Klebstoffe (z. B. lösemittelhaltige Klebstoffe, Dispersions-, Schmelz-, Kontaktklebstoffe, Plastisole) und chemisch härtende Klebstoffe (z. B. Silikone, Epoxidharzklebstoffe, anaerob-härtende-, cyanacrylat-, strahlenhärtende Klebstoffe) erfolgen. Bei den physikalisch härtenden Klebstoffen wird das Polymer in verarbeitbarer Form in die Klebefuge eingebracht und beginnt dann mit der Verfestigung. [100] Im Gegensatz dazu müssen bei den chemisch härtenden Klebstoffen die beteiligten Komponenten zunächst in die Klebefuge eingebracht werden, um anschließend durch eine chemische Reaktion zu verfestigen. [100] Die chemisch härtenden Klebstoffe sind zudem in 1-Komponenten-(1-K) und Mehrkomponenten-(n-K)-Systeme zu unterteilen. Abbildung 53 zeigt die charakteristischen Unterschiede der Eigenschaften und der Verarbeitung. Unabhängig von der Art des verwendeten Klebstoffes müssen die Klebeflächen gewisse Mindestanforderungen erfüllen. Neben einer der Auslegung entsprechenden Mindestfläche dürfen diese keine Verschmutzungen (Öl, Fett, Schmutz) aufweisen und zwischen den Fügepartnern muss ein auf den Klebstoff abgestimmter Fügspalt vorliegen.

4.5.2 Analytische Bestimmung der Tragfähigkeit

Die wirkenden Umfangskräfte können je nach Konzeption der Adhäsion über die axialen Seitenflächen oder über einen Stumpfstoß übertragen werden. Als Beispiel für einen Hochleistungsklebstoff wird der 2-Komponenten-Klebstoff „Loctite 9497“ der Henkel AG betrachtet. Dieser zeichnet sich durch eine hohe ideale Zugfestigkeit von $\sigma_{Z,ideal} = 52,6 \text{ MPa}$ und einen Einsatzbereich von -55°C bis 180°C aus. [101] Unter realen Einsatzbedingungen reduzieren sich die hohen Zugfestigkeitskennwerte deutlich durch Alterung der chemischen Verbindung und zeit- und belastungsabhängiges Kriechverhalten. In Abbildung 54 sind die nach [92] vorgegebenen Abminderungsfaktoren und die prozentuale Festigkeitsreduktion in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

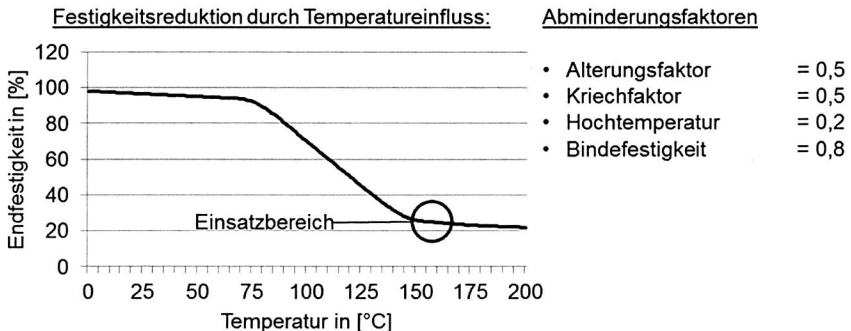


Abbildung 54: Links: Festigkeitsreduktion in Folge Temperatur. Rechts: Abminderungsfaktoren. [92]

Der unter Belastung zulässige Festigkeitskennwert, die sogenannte dynamische Bindefestigkeit, wird nach Gleichung 4.23 berechnet.

$$\sigma_{Z,Klebstoff,dyn} = 0,5 * 0,5 * 0,2 * 0,8 * \sigma_{Z,ideal} = 2,1 \text{ MPa} \quad (4.23)$$

Die ursprüngliche Zugfestigkeit reduziert sich unter Berücksichtigung der Betriebsfaktoren auf 4 % des Ausgangswertes. In einem ersten Schritt wird die Variante des radialen Stumpfstoßes betrachtet. Dabei wird die Verbindungsstelle im Betrieb des Rotors auf Zugkraft, durch die wirkende Umfangskraft, belastet. Mit der Querschnittsfläche $A = 159,8 \text{ mm}^2$ eines Ringsegmentes lässt sich nach Gleichung 4.24 die maximal auftretende Spannung $\sigma_{Z,real}$ berechnen.

$$\sigma_{Z,real} = \frac{F_U}{A} = 45,1 \text{ MPa} \gg \sigma_{Z,Klebstoff,dyn} \quad (4.24)$$

Da die Belastungen den zulässigen Festigkeitskennwert signifikant übersteigen, ist der Stumpfstoß keine Alternative und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet. Bei Verwendung des Brick-Wall-Prinzips werden adhäsive Verbindungen zwischen den axialen Seitenflächen möglich. Dabei wirken im Betrieb Scherkräfte. Die Scherfestigkeit einer Klebeverbindung ist immer abhängig von der Materialoberfläche. Da das Elektroblech mit einer Lackschicht überzogen ist, hat die statische Zugscherfestigkeit nach [101] einen Wert von ca. $\tau_{KS,ideal} = 5,0 \text{ MPa}$. Unter Berücksichtigung der in Abbildung 54 dargestellten Abminderungsfaktoren, errechnet sich die dynamische Zugscherfestigkeit nach Gleichung 4.25.

$$\tau_{KS,dyn} = 0,5 * 0,5 * 0,2 * 0,8 * \tau_{KS,ideal} = 0,2 \text{ MPa} \quad (4.25)$$

Die Klebeflächen $A_{x_Slot_Überdeckung}$ sind abhängig von der Segmentgröße und in Abbildung 55 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass nur 50 % der Seitenfläche (die Überdeckung) eines Segments zur Kraftübertragung beiträgt.




<u>Segmentgröße:</u>	<u>Wirkende Überdeckungsfläche:</u>
36° Segment	 $A_{1_Slot_Überdeckung} = 332 \text{ mm}^2$
72° Segment	 $A_{2_Slot_Überdeckung} = 664 \text{ mm}^2$
180° Segment	 $A_{5_Slot_Überdeckung} = 1660 \text{ mm}^2$

Abbildung 55: Wirkende Seitenflächen in Abhängigkeit der Segmentgröße.

Die wirkenden Schubspannungen in Abhängigkeit der Klebeflächen werden wie folgt berechnet. Wichtig dabei ist, dass bei n Blechen (Referenzrotor: $n = 33$) immer $n-1$ Klebeschichten vorhanden sind. Da in diesem Fall als Basis immer von einer Blechschicht ausgegangen wird, muss auch nur die in einer Blechschicht wirkende Umfangskraft $F_{U_1_Schicht} = 218,2 \text{ N}$ berücksichtigt werden.

$$\tau_{x_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{x_Slot_Überdeckung}} \quad (4.26)$$

$$\tau_{1_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{1_Slot_Überdeckung}} = 0,67 \text{ MPa} \gg \tau_{KS_dyn}$$

$$\tau_{2_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{2_Slot_Überdeckung}} = 0,33 \text{ MPa} > \tau_{KS_dyn}$$

$$\tau_{5_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{5_Slot_Überdeckung}} = 0,13 \text{ MPa} < \tau_{KS_dyn}$$

Ab einer Segmentgröße von 180° wäre eine Klebeverbindung beim Referenzrotor unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren tragfähig. Allerdings ist zu beachten, dass die Randschicht lokal bis zu einem Faktor von 1,5 höher belastet ist, da nur eine Klebefläche zur Umfangskraftübertragung vorhanden ist. Durch elastische Deformation findet in der Realität ein Lastausgleich statt, der analytisch nicht zu erfassen ist.

Wie bereits in Abschnitt 4.5.1 beschrieben, ist bei Verwendung des Backlacks als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung nur ein Aufbau im Brick-Wall-Design möglich. Da der Markt für diesen hochentwickelten adhäsiven Lack deutlich überschaubarer ist und sich deren Eigenschaften gleichen, kann sowohl für die Berechnung als auch für die experimentellen Versuche das Lacksystem Voltatex 1175W der Firma DuPont AG [102] verwendet werden. Vergleichbar zu den Klebstoffen reduzieren sich die idealen Festigkeitswerte (Zugscherfestigkeit: $\tau_{Backlack,ideal} = 19 \text{ MPa}$) nach [102] durch folgende Abminderungsfaktoren:

- Schichtdickenfaktor = 0,96
- Alterungsfaktor = 0,5
- Kriechfaktor = 0,5
- Hochtemperaturfaktor = 0,4
- Bindefestigkeitsfaktor = 0,8.

Unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren errechnet sich die dynamische Zug-scherfestigkeit nach Gleichung 4.27.

$$\tau_{Backlack,dyn} = 0,96 * 0,5 * 0,5 * 0,4 * 0,8 * \tau_{Backlack,ideal} = 1,5 \text{ MPa} \quad (4.27)$$

Die resultierenden Schubspannungen in Abhängigkeit der wirkenden Seitenflächen (äquivalentes Vorgehen wie bei den Klebeverbindungen, vgl. Abbildung 55) berechnen sich ebenfalls nach Gleichung 4.26.

$$\tau_{1_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{1_Slot_Überdeckung}} = 0,67 \text{ MPa} < \tau_{Backlack,dyn} \quad (4.26)$$

$$\tau_{2_Slot_Überdeckung} = \frac{n}{(n-1)} * \frac{F_{U_1_Schicht}}{A_{2_Slot_Überdeckung}} = 0,33 \text{ MPa} \ll \tau_{Backlack,dyn}$$

Bei einer Belastung mit der vorgegebenen Grenzdrehzahl wäre bereits ab einer Segmentgröße von 36° die Backlack-Verbindung tragfähig. Äquivalent zu den Klebeverbindungen ist die höhere Belastung der Randlebschicht nicht zu vernachlässigen.

4.5.3 Empirische Grundlagenuntersuchungen zur Tragfähigkeit adhäsiver Verbindungstechniken

Um exakte Aussagen zur Tragfähigkeit geeigneter spezifischer adhäsiver Verbindungstechniken vorzunehmen, sind experimentelle Grundlagenuntersuchungen unerlässlich. Ziel der Untersuchung ist die Generierung von Verlaufskurven der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Adhäsionsfläche (Überdeckung). Dabei soll mit vergleichenden Prüfungen (Raum- und Betriebstemperatur) der Nachweis der Temperaturabhängigkeit der Bindefestigkeit erbracht werden. Letztlich soll zusätzlich der lineare Verlauf der Tragfähigkeit mit zunehmender Blechanzahl (Paketierung) nachgewiesen werden. Die Auswertung der Prüfergebnisse soll als Resultat eine Empfehlung für die Auswahl eines geeigneten adhäsiven Verbindungswerkstoffes geben.

Zur Abschätzung der Tragfähigkeit der verschiedenen Verbindungsmedien werden einfache Zugproben, bestehend aus jeweils zwei sich überlappenden Elektroblechen (Breite: 13,7 mm) hergestellt. Die Überdeckung liegt dabei zwischen 2 mm¹⁹ und 20 mm²⁰ mit einer Schrittweite von 2 mm. Nach einer Empfehlung der Firma Henkel AG werden neben dem Backlack-System der Sekundenkleber „Loctite 401“ [103] und der anaerobe Dichtstoff „Loctite 586“ [104] geprüft. Die Studie wird, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, mit der Zugprüfmaschine Zwick Z200 durchgeführt.

¹⁹ ergibt eine Klebefläche von 27,4 mm²

²⁰ ergibt eine Klebefläche von 274 mm²

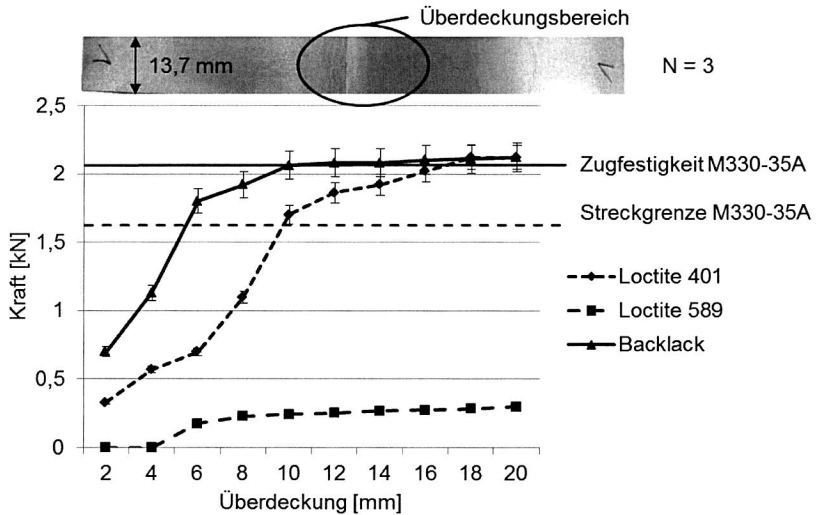


Abbildung 56: Ergebnisse der Zugversuche: Vergleich der übertragbaren Kräfte in Abhängigkeit der Überdeckung.

Die Ergebnisse in Abbildung 56 zeigen deutliche Vorteile des Backlack-Systems hinsichtlich der übertragbaren Kräfte. Der Klebstoff „Loctite 401“ benötigt bis zum Erreichen der Streckgrenze des Elektrobleches beinahe die doppelte Klebefläche als der Backlack. Unter geeigneten Randbedingungen (ausreichende Klebefläche) ist eine Anwendung als Verbindungsmedium denkbar. Der Dichtstoff „Loctite 586“ ist als Verbindungsmedium gänzlich ungeeignet. Wegen der im Referenzrotor zu übertragenden hohen Umfangskräfte wird als geeignetstes Verbindungsmedium der Backlack ausgewählt und die Klebstoffe im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Beim Vergleich der Backlackverbindung unter Raum- und Betriebstemperatur ist eine Abnahme der übertragbaren Kräfte um ca. 50 % festzustellen. Vergleichbar bleiben die quasi linearen Verläufe bis zum Erreichen der Streckgrenze des Elektrobleches. Die ideale Überdeckungsfläche des Backlacks ist abhängig von der Streckgrenze des verwendeten Trägermaterials (hier: M330-35A). Eine ideale Überdeckungsfläche liegt immer dann vor, wenn die übertragbaren Kräfte der Backlackverbindung äquivalent der übertragbaren Kräfte des Elektrobleches vor dem Einsetzen der plastischen Verformung sind. Abbildung 57 zeigt die ermittelten idealen Überdeckungsflächen bei Raum (RT)- und Betriebstemperatur (BT) für die drei gängigsten Blechdicken des Elektrobleches M330-35A. Bei der Referenzrotorgeometrie ist die Backlack-Verbindung bereits ab einer Überdeckung von 4 mm (ca. 55 mm²) bei Betriebstemperatur tragfähig.

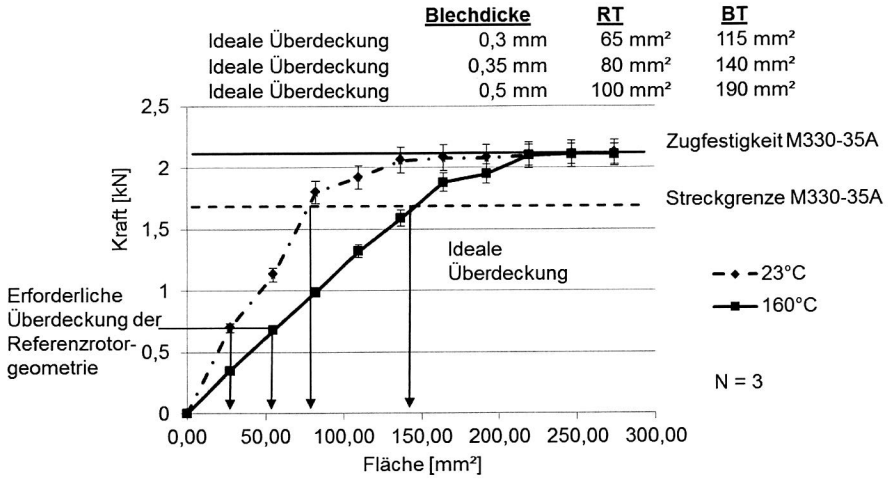


Abbildung 57: Ergebnisse der Zugversuche: Tragfähigkeit des Backlacks bei Raum- und Betriebstemperatur.

Die Untersuchungen zum Verlauf der Tragfähigkeit mit zunehmender Blechanzahl (Paketierung) des Elektrobleches M330-35A kommen zum erwarteten Ergebnis. Abbildung 58 zeigt die lineare Zunahme der Tragfähigkeit nach dem Faktor „ $n/(n-1)$ “.

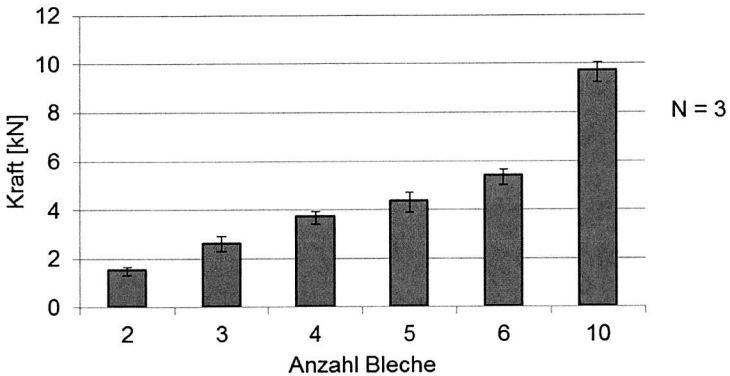


Abbildung 58: Ergebnisse der Zugversuche: Übertragbare Kräfte in Abhängigkeit der Anzahl der Bleche (Paketierung).

Somit können durch einfache Zugproben, bestehend aus zwei verbackenen Elektroblechen bereits Aussagen über die Tragfähigkeit eines verbackenen Paketes gemacht werden.

4.5.4 Verifizierung der Erkenntnisse durch Zug- und Schleuderversuche an der Referenzrotorgeometrie

Neben der Verifizierung der gewonnenen Erkenntnisse sollen die Zug- und Schleuderversuche an der Referenzrotorgeometrie den Einfluss des Magneten auf die Tragfähigkeit des Backlacks zeigen. Abbildung 59 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche mit den möglichen Überdeckungsvarianten von einem, zwei und drei Slots - mit und ohne Magnete.

Wie die Versuche des Abschnittes 4.5.3 bereits zeigten, ist bei Raumtemperatur der limitierende Faktor die Zugfestigkeit des Elektrobleches. An der kritischen Stelle unterhalb des Magnetslots (dünnster Bereich) können von der Referenzrotorgeometrie maximale Zugkräfte von ca. 37 kN aufgenommen werden.

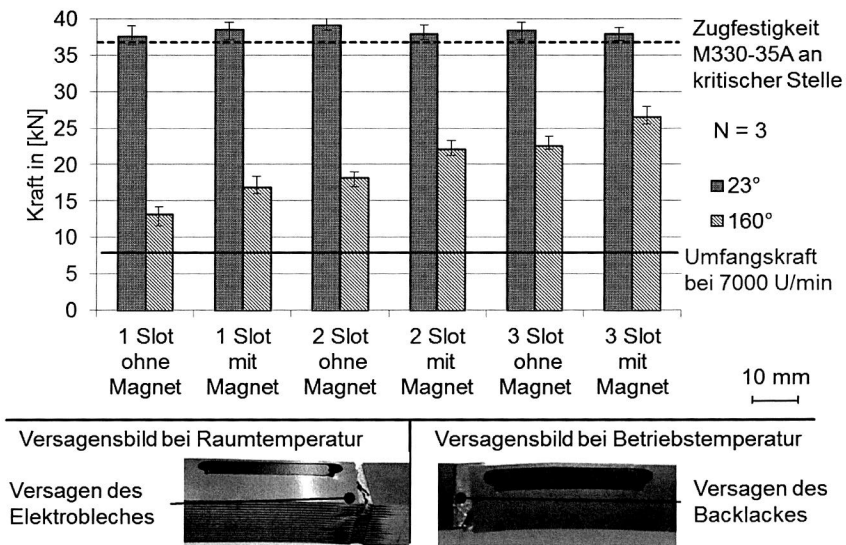


Abbildung 59: Oben: Ergebnisse der Zugversuche an der Referenzrotorgeometrie. Unten: Versagensbilder (jeweils mit Magnet).

Alle geprüften Zugproben (mit und ohne Magnet) versagen bei Raumtemperatur in diesem Bereich. Relevant für die mechanische Auslegung des Referenzrotors sind jedoch die Festigkeitswerte bei Betriebstemperatur (160 °C). Wie zu erwarten, liegen alle ge-

messenen Werte deutlich unterhalb der vergleichbaren, bei Raumtemperatur gemessenen Werte. Anders als bei Raumtemperatur versagt, wie in Abbildung 59 zu erkennen, die Adhäsion des Backlackes. Folglich nimmt die Tragfähigkeit mit zunehmender Überdeckung linear zu. Des Weiteren ist der Einfluss der Magneten auf die übertragbaren Kräfte ersichtlich. Da diese die Querschnittsfläche erhöhen und somit den Kraftfluss homogener verteilen, ertragen die Zugproben mit Magnet durchwegs höhere Kräfte. Das Versagensbild bei Betriebstemperatur bestätigt durch den Bruch des Magneten diese These. Alle geprüften Zugproben versagen oberhalb der resultierenden Umfangskraft bei 7000 U/min. Da aus fertigungs- und montagetechnischen Gründen²¹ bei segmentierten Rotoren nach dem Brick-Wall-Design nur minimale Segmentgrößen von 72° (zwei Slots Überdeckung) Anwendung finden können, werden für die Verifizierung der Ergebnisse durch Schleuderversuche zwei Rotorringe mit Segmentgrößen von 72° und 90° aufgebaut. Nach den Gleichungen 4.6 und 4.20 müssen somit die in Tabelle 7 dargestellten maximal ertragbaren Drehzahlen resultieren.

	Umfangskraft [N]	Maximaldrehzahl [U/min]
72° bei BT	22060	12253
72° bei RT	37980	16077
90° bei BT	26490	13427
90° bei RT	37990	16079

Tabelle 7: Berechnete aushaltbare Umfangskräfte und Maximaldrehzahlen der 72°- und 90°- Varianten bei Raum (RT)- und Betriebstemperatur (BT).

Mit dem in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Aufbau des Schleuderprüfstandes lassen sich nur sehr schwer reproduzierbare Ergebnisse einer Prüfung bei Betriebstemperatur generieren. Daher erfolgt die Prüfung ausschließlich bei Raumtemperatur. Die so ermittelten Werte können, basierend auf den gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen, unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, mit dem Faktor 0,75 auf Betriebstemperatur umgerechnet werden. Um eine Vergleichbarkeit mit den anderen entwickelten Verbindungstechniken zu garantieren, erfolgt die Schleuderprüfung stets mit montierten Magneten. Die Ergebnisse der Schleuderprüfung sind in Abbildung 60 dargestellt.

Die errechneten Bruchdrehzahlen korrelieren mit den realen Schleuderergebnissen. Die Verbindungstechnik Backlack wäre somit als alleinige Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung denkbar. Nicht dargestellt sind die Ergebnisse der Schleuderprüfung mit äquivalenten Proben ohne integrierte Magnete. Da keine Unterschiede feststellbar sind,

²¹ Basierend auf Erkenntnissen der Produktionsplanung E-Motor der Daimler AG zur wirtschaftlichen Produktion von segmentierten Rotoren

hat der Magnet in dieser Kombination keinen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindungstechnik.

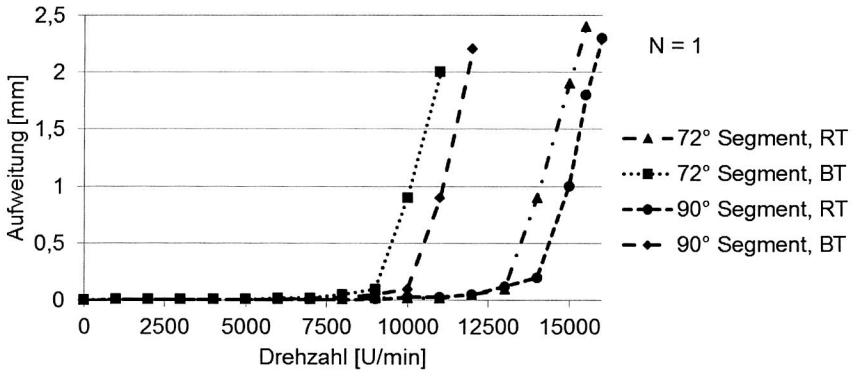


Abbildung 60: Ergebnisse der experimentellen Schleuderprüfung der Verbindungstechnik „Backlack“.

Falls der Backlack als alleinige Verbindungstechnik gewählt werden sollte, ist in weiterführenden Qualifizierungsmaßnahmen die Festigkeit gealterter Proben zu prüfen. Eine Reduzierung der Verbindungsfestigkeit ist zu erwarten.

Zusammenfassung und Fazit

Die empirischen Untersuchungen der adhäsiven Verbindungstechniken zeigten eindeutig, dass die Verwendung des Backlacks hinsichtlich der übertragbaren Umfangskräfte vorteilhafter ist als die Verwendung von Klebstoffen. Die daher für die weiterführenden Entwicklungsarbeiten gewählte adhäsive Verbindungstechnik Backlack beweist anhand der Ergebnisse aus den Schleuderversuchen ihr großes Potential als Verbindungstechnik von Rotorsegmenten. Bis zum Erreichen der Streckgrenze sind bei der Referenzrotorgeometrie bei Betriebstemperatur und der Verwendung von 72° Segmenten Umfangskräfte bis zu 11,9 kN übertragbar. Dies entspricht einer Drehzahl von ca. 9.000 U/min. Das finale Versagen der Verbindungstechnik tritt bei einer Drehzahl von 10.900 U/min und somit einer Umfangskraft von 17,5 kN auf. Zusammenfassend betrachtet übertrifft die adhäsive Verbindungstechnik Backlack die bei einer Grenzdrehzahl von 7.000 U/min erforderlichen Schleuder- und Berstdrehzahlen. Somit ist eine Verwendung der entwickelten Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung des Referenzrotors aus technischer Sicht möglich.

4.6 Schweißen als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung

Nach DIN 1910-100 [105] ist Schweißen als unlösbares Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Druck oder Wärme, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe definiert. Im Allgemeinen werden beim Schweißvorgang die zu fügenden Bauteile an den zu verbindenden Stellen erhitzt, bis sie in den flüssigen Aggregatzustand übergehen und im Idealfall eine homogene Schmelze bilden. Beim anschließenden Abkühlen erstarrt die Schmelze und die zu fügenden Bauteile sind verbunden. Beim Schweißpaketieren von Elektrolech kommen die Verfahren Laserschweißen, Plasmaschweißen und WIG-Schweißen zum Einsatz. [38] Für eine stückzahlintensive Serienproduktion ist das Laserschweißen empfehlenswert, da es gegenüber konventioneller Lichtbogenschweißverfahren eine hochpräzise Strahlführung bei gleichzeitig um den Faktor 3-4 höherer Vorschubgeschwindigkeiten (bis zu 7 m/s) aufweist. Wegen der hohen Automatisierbarkeit und Prozesssicherheit können sehr schmale und präzise Schweißnahtformen realisiert werden. Dies hat zudem den positiven Effekt der Minimierung der Wärmeeinflusszone und somit des thermischen Verzugs und der Gefügeumwandlungen. Nachteilig ist der hohe Investitionsbedarf zur Anschaffung von Laserschweißanlagen. [106]

Zur Verbindung der Segmente mit Schweißnähten ist ein Aufbau des Rotorringes im Brick-Wall-Design am vorteilhaftesten. Um eine negative Beeinflussung des magnetischen Flusses zu verhindern, müssen die Schweißnähte möglichst unterhalb der Magnetslots am Innendurchmesser des Ringes angebracht werden. Zur Gewährleistung der Drehzahlfestigkeit des Ringes ist eine vollständige Verbindung aller Bleche mit der Schweißnaht Voraussetzung. Zudem ist zur Aufnahme der durch die Rotation resultierenden Umfangskräfte eine große Angriffsfläche durch breite und tiefe Schweißnähte notwendig. Nach umfänglichen Literatur- und Patentrecherchen sind bisher keine Verfahren und Anwendungen bekannt, bei denen Elektroleche mit Schweißnähten > 1 mm versehen werden. Eine große Herausforderung an die Entwicklung der Verbindungstechnik Schweißen sind die für Elektroleche charakteristischen hohen Siliziumanteile (vgl. Tabelle 1), die für Schweißanwendungen nach [38] nachteilig sind. Zudem erschwert die zum Ausgasen neigende Lackisolation die Bildung einer homogenen Schmelze. Im Zuge dieses Abschnittes sollen zunächst die für das Schweißen von Elektrolechen notwendigen verfahrenstechnischen Grundlagen des Laserschweißens und die Einflussfaktoren zur Generierung tiefer Schweißnähte erläutert werden. Anschließend erfolgen Untersuchungen zur Optimierung der Geometrieform und Positionierung der Schweißnaht mittels linearer Simulation. Durch experimentelle Vorversuche wird parallel die Planung der Schweißversuche zur Entwicklung und Optimierung der Schweißparameter durchgeführt. Mit Hilfe von Zug- und Schleuderversuchen werden die Ergebnisse der linearen Simulationen und der Optimierung der Schweißparameter validiert.

4.6.1 Verfahrenstechnische Grundlagen und Einflussfaktoren beim Laserschweißen von Elektrolech

Laserschweißen kann je nach Intensität des Laserstrahls am Bauteil in Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen unterschieden werden. Für das bereits in Serienanwendungen eingesetzte Paketierungsschweißen ist die Technologie des Wärmeleitungsschweißens mit einer Strahlintensität bis 10^6 W/cm^2 und einer Einschweißtiefe bis ca. 1 mm ausreichend. Für die drehzahlsichere Aufnahme der Fliehkräfte sind beim Schweißen als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung nach ersten Abschätzungen Nahttiefen von 2 bis 6 mm gefordert. Daher muss hier die Technik des Tiefschweißens mit Strahlintensitäten größer 10^6 W/cm^2 eingesetzt werden. Die verfahrenstechnischen Grundlagen und Besonderheiten des Tiefschweißens sind beispielhaft in [106] erklärt.

Für die Schweißversuche findet ein Scheibenlaser (diodengepumpter Festkörperlaser Yb: YAG) der Firma Trumpf AG mit einer maximalen Ausgangsleistung von 5 kW Anwendung. In [107] kann die genaue Funktionsweise, die Unterschiede zu anderen Lasertypen und die spezifischen Vor- und Nachteile eines diodengepumpten Festkörperlaser nachgelesen werden. Der aus dem Scheibensystem austretende Laserstrahl wird über Umlenk- und Strahlformungslinsen in die Lichtleitfaser (Durchmesser von 100 – 300 μm) und damit in die Fokussierungsoptik der Schweißkabine geleitet. Neben der Fokussierung ist die Aufgabe der Optik die Kollimation²² und Aufweitung des Laserstrahls.

Aus prozesstechnischer Sicht haben die Parameter „Schweißgeschwindigkeit“, „Laserleistung“ und „Fokuslage“ den größten Einfluss auf das Schweißergebnis. Die Fokuslage beschreibt dabei die Position des Fokus in Strahlrichtung und kann sowohl oberhalb, als auch unterhalb der Werkstückoberfläche liegen. Durch gezielte Veränderung dieser Parameter kann die Nahtform, Nahtbreite und Nahttiefe variiert werden. Weitere Parameter zur Beeinflussung des Schweißergebnisses sind fertigungsbedingt. Dazu zählt insbesondere die Oberfläche des zu schweißenden Werkstückes – am Beispiel des Elektrolechpaketes bedeutet dies, dass die Schnittkanten möglichst gratfrei, rostfrei, eben und sauber sein sollten. Diese Vorgaben zeigen die Herausforderung an die Prozessentwicklung, da ein Elektrolechpaket in den wenigsten Fällen schnittgratfrei gefertigt werden kann und die Oberflächenrauheit selten besser als $R_z 30$ ist. [38]

²² Parallelisierung

4.6.2 Untersuchung der geometrischen und lokalen Randbedingungen der Schweißnaht mittels linearer Simulation

Für die Neuentwicklung der Schweißnaht als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung²³ ist die Kenntnis der hinsichtlich der Festigkeit optimalen geometrischen Nahtparameter von Bedeutung. Neben der Parametrisierung haben Erkenntnisse über die optimale Anzahl und die jeweilige Positionierung der Nähte unterhalb des Magnetslots Wichtigkeit. Mit Hilfe der linearen Simulation lassen sich diese Fragestellungen mit verhältnismäßig geringem Aufwand qualitativ hochwertig beantworten. Die Randbedingungen und der Aufbau der Simulationen sind äquivalent zu den bisher durchgeführten und in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Simulationen.

Die Schweißnaht lässt sich in die Parameter „Breite an der Spitze“, „Breite am Rand“ und „Länge der Naht“ aufteilen. Dabei ist zu beachten, dass aus prozesstechnischen Gründen die „Breite an der Spitze“ maximal gleich groß der „Breite am Rand“ sein kann. Nach Ermittlung der optimalen geometrischen Nahtparameter sollen mittels der Zugprobengeometrien Z1 bis Z3 (vgl. Abbildung 61) die verhältnismäßige Steigerung der Verbindungsfestigkeit mit zunehmender Nahtanzahl validiert werden.

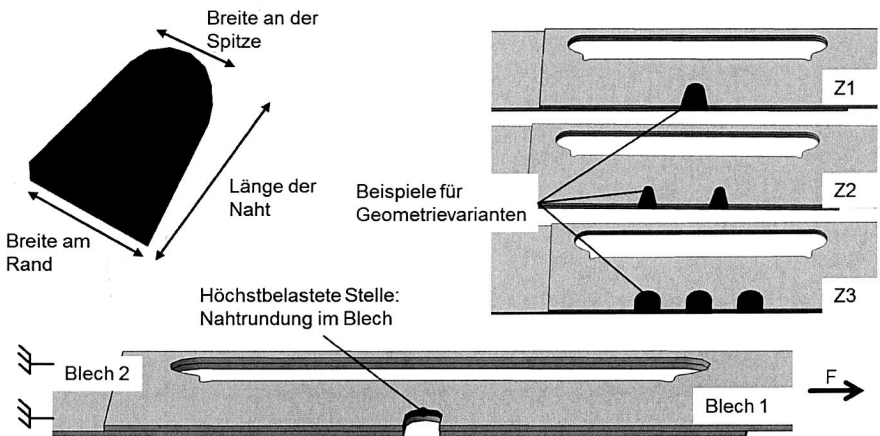


Abbildung 61: Parametrisierung der Schweißnaht.

Zudem können Erkenntnisse über die Einflüsse der Position der Nähte und der mittleren Abstände zwischen den Nähten gewonnen werden. Aus werkstoff- und prozesstechnischen Gründen sind die hinsichtlich der Festigkeit kritischen Stellen idealer Schweiß-

²³ Bei der Entwicklung der Verbindungstechnik Schweißen wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Tobias Henke unterstützt.

nähte immer im Bereich der Wärmeeinflusszone (martensitische Versprödung) des Grundwerkstoffes, in Folge der Kerbwirkung der Schweißnaht [108]. Daher wird als kritische Stelle zur Homogenisierung der Spannungen in den Simulationen die Rundung oberhalb der Schweißnaht angenommen. Die Validierung der im Verhältnis Festigkeit zu Nahtgröße (und somit zur Wärmeeinflusszone) optimalen Nahtgeometrie erfolgt mittels der Zugstabvariante Z1. Die Ergebnisse der Simulationen in Abbildung 62 zeigen bei einer konstanten „Breite an der Spitze“ von 1 mm eine deutliche Reduzierung der mittleren Spannungen an der kritischen Stelle mit einer zunehmenden „Breite am Rand“ und „Länge der Naht“.

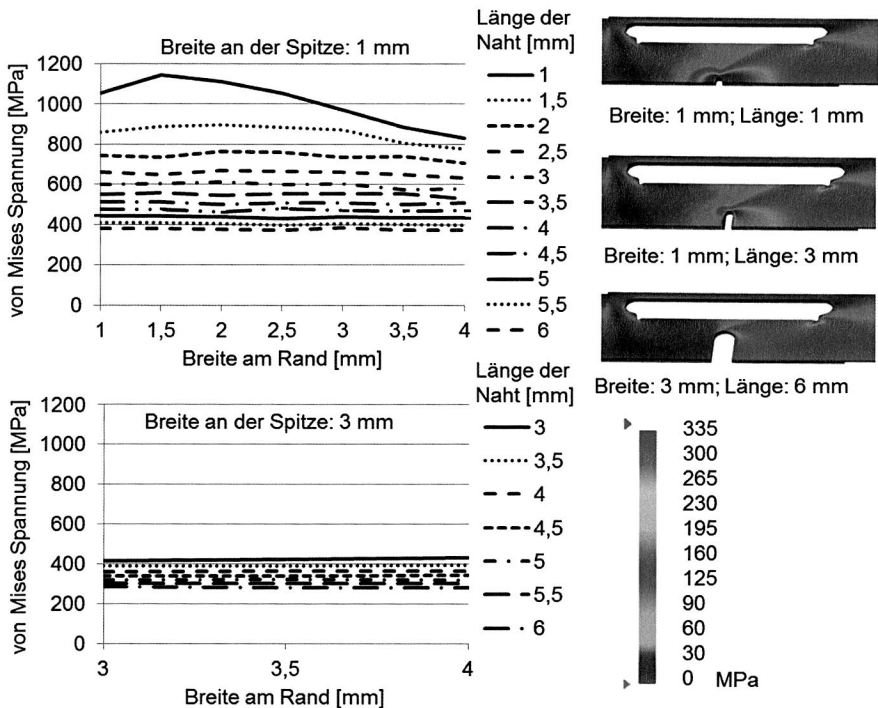


Abbildung 62: Simulationsergebnis: Einfluss der Nahtparameter auf die mittleren Spannungen der kritischen Stelle.

Dabei hat der Einfluss der „Länge der Naht“ eine deutlich höhere Relevanz, da ab einer „Länge der Naht“ von 2 mm eine weitere Erhöhung der „Breite am Rand“ keine signifikante Steigerung der Festigkeit nach sich zieht. Bei einer Erhöhung der „Breite an der Spitze“ auf 3 mm ist der Einfluss der „Breite am Rand“ vernachlässigbar. In diesen Bereichen bringt eine „Länge der Naht“ von mehr als 3,5 mm bis 4 mm im Verhältnis zu

den Prozess- und Energieaufwänden und der steigenden Wärmeeinflusszone keine relevante Steigerung der Festigkeit.

In Bezug auf die Parametrisierung ergeben äquivalente Simulationen mit zwei und drei Nähten bei einem reduzierten Spannungsniveau qualitativ vergleichbare Spannungsverläufe. Unter idealen Verhältnissen können somit als optimale Nahtparameter die „Breite am Rand“ und Breite an der Spitze“ mit je 3 mm und die „Länge der Naht“ mit 4 mm definiert werden. Auf Basis dessen erfolgt die Untersuchung zur Auswirkung der steigenden Nahtanzahl auf die Verbindungsfestigkeit. Die Ergebnisse in Abbildung 63 zeigen eine deutliche Reduzierung der Spannungen um 33 % bei einer Verdopplung der Nahtanzahl von einer auf zwei Nähte pro Slot. Durch ein weiteres Hinzufügen einer dritten Naht kann die Verbindungsfestigkeit nur noch um ca. 8 % gesteigert werden.

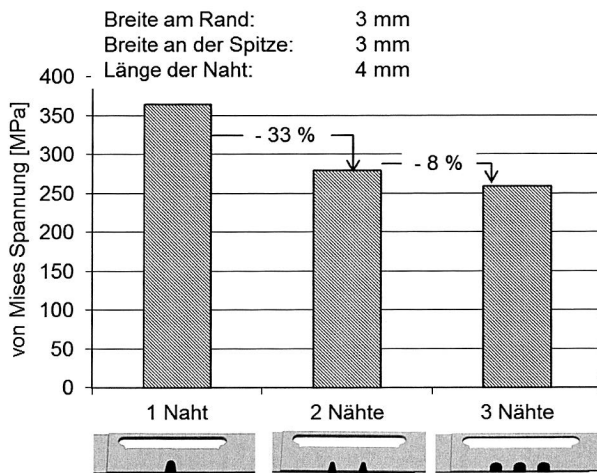


Abbildung 63: Simulationsergebnis: Reduzierung der Spannungen durch Erhöhung der Nahtanzahl je Slot.

Die Vermutung liegt daher nahe, dass ähnlich der Simulationsergebnisse „Magnet als Fügeelement“ in Abschnitt 4.3.2 eine ungleichmäßige Verteilung der Spannungen zwischen den Nähten vorliegt. Zur Validierung dieser These wird in Abbildung 64 die Verteilung der Spannungen der Probe Z3 mit drei Nähten dargestellt. Dabei wird die These der inhomogenen Spannungsverteilung bestätigt. Die mittlere Naht nimmt dabei weniger als 50 % der Spannungen der linken Naht auf. Auffallend ist der Unterschied zwischen den beiden äußeren Nähten. Die in Zugrichtung vordere Naht (in diesem Fall „Links“) wird deutlich stärker belastet. Dies erklärt die im Vergleich verhältnismäßig geringe Steigerung der Festigkeit von einer auf zwei Nähte pro Slot.

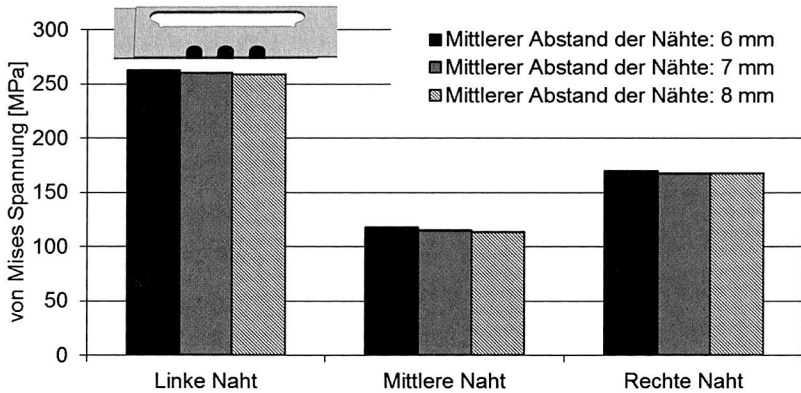


Abbildung 64: Simulationsergebnis: Spannungsverteilung je Naht und Vergleich der mittleren Abstände.

Parallel dazu wird der Einfluss des mittleren Abstandes der Nähte (jeweils von Rand zu Rand der Nähte gemessen) zueinander untersucht. Zur Vermeidung von Schweißvorgängen innerhalb der Wärmeeinflusszone der ersten Naht wird nach einer Empfehlung²⁴ ein Mindestabstand von 6 mm festgelegt. Die Ergebnisse der Simulation in Abbildung 64 zeigen, dass keine messbaren Unterschiede auftreten.

In weiteren Simulationen soll der Einfluss der Nahtposition unterhalb des Slots untersucht werden.

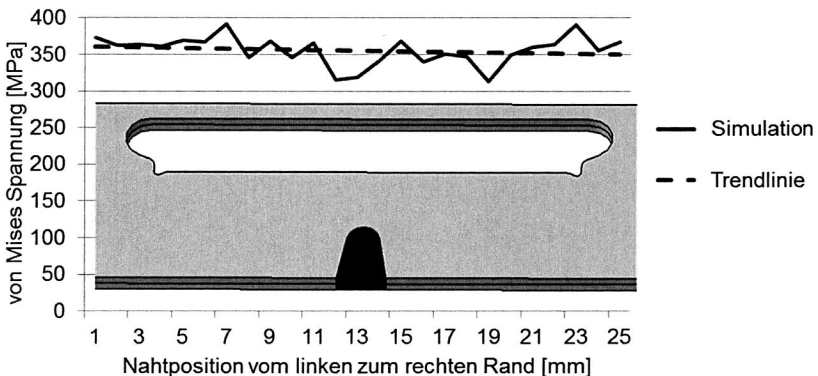


Abbildung 65: Simulationsergebnis: Flexible Positionierung der Naht

²⁴ Persönliches Gespräch mit den Schweißwerken Densbüren AG (SWD AG)

Bei der Durchführung dieser Simulationen ist aus Kapazitätsgründen ein globaler Fehlergrad von bis zu 5 % tolerierbar. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen (Abbildung 65) zeigen die Möglichkeit der flexiblen Positionierung der Schweißnaht bzw. Nähte unterhalb des Slots, da die Trendlinie der ermittelten Simulationsergebnisse einen horizontalen Verlauf aufweist.

Die Verbindungstechnik „Schweißen“ kann wie alle Brick-Wall-Konzepte nur in Kombination mit dem Magneten als Fügeelement Anwendung finden. Daher wird in der nachfolgenden Abbildung 66 der Einfluss des Magneten auf die Verbindungsfestigkeit der Schweißnähte in Abhängigkeit deren Geometrie und der Segmentgröße validiert. Da hier die Anzahl der durchzuführenden Simulationen deutlich geringer ist, kann auf den aufwändigeren, aber realitätsgetreueren, Simulationsaufbau in Segmentbauweise zurückgegriffen werden. Zur Vereinfachung werden die Schweißnähte jeweils mit einheitlichen Breiten und Längen (z. B. Breite / Tiefe = 1 mm bedeutet: „Breite am Rand“, „Breite an der Spitze“ und „Länge der Naht“ = 1 mm) angegeben und variiert. Verglichen werden dabei Ringe mit jeweils fünf oder zehn Segmenten pro Schicht. Die Simulationsergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit durch die Integration des Magneten. Der Einfluss des Magneten nimmt mit zunehmender Größe der Schweißnaht deutlich ab. Des Weiteren ist ein bedeutender Unterschied des Einflusses je nach Größe der Segmente festzustellen. Bei einer Verwendung von fünf Segmenten pro Schicht und Schweißnähte mit der zuvor ermittelten optimalen Größe, ist durch die Magnete quasi keine Steigerung der Verbindungsfestigkeit zu erwarten.

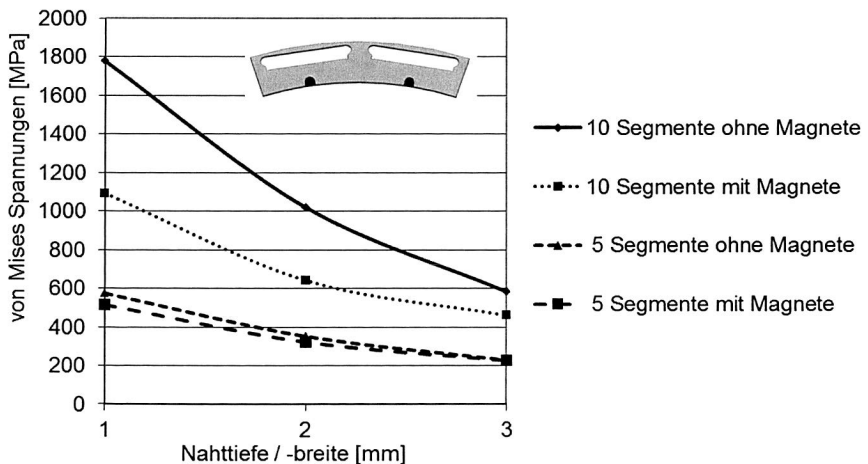


Abbildung 66: Simulationsergebnis: Vergleich der Segmentierungsvarianten mit und ohne Magnet

Zusammenfassend wurden durch die Simulation folgende Erkenntnisse gewonnen und sollen in den experimentellen Schweißversuchen Anwendung finden.

- Optimale Schweißnahtgeometrie: Breite am Rand und an der Spitze: 3 mm und Länge der Naht: 4 mm
- Effizienteste Nahtanzahl je Slot: zwei Nähte
- Keine homogene Verteilung der Spannungen je Naht
- Flexible Positionierung der Nähte unterhalb des Slots möglich

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass die Erkenntnisse nur bei idealen Schweißnähten verlässlich gelten.

4.6.3 Experimentelle Vorversuche zur Ermittlung der Schweißparameter

Nach [38] ist die Schweißreignung von Elektroblechen abhängig von deren chemischer Zusammensetzung und der verwendeten Beschichtung. Des Weiteren ist bisher keine Anwendung bekannt, bei der Elektrobleche tiefer als 1 mm geschweißt wurden. Daher sollen in diesem Abschnitt durch experimentelle Vorversuche die grundsätzliche Tiefenschweißbarkeit von Elektroblechen geprüft und erste Parameterbereiche zur Entwicklung und Optimierung solcher Schweißnähte definiert werden.

Zur Durchführung der Vorversuche wird ein Elektroblech vom Typ M400-50A gewählt, da dieses auf Grund des verhältnismäßig geringen Siliziumgehaltes von 2,39 % als gut schweißbar eingestuft wird. Als Isolationsmaterial findet die ebenfalls gut schweißbare C5-Beschichtung Verwendung. Zur Einspannung der Schweißprobe (gestapelt und mit Klebeband fixiert) wird eine flexible Vorrichtung konstruiert und gefertigt. Diese besteht aus einem Ober- und einem Unterteil, die durch Stifte die exakte Lage der Schweißprobe definieren. Durch drehmomentgesteuertes Anziehen der Schrauben kann ein definierter Anpressdruck eingestellt werden. Wie in Abbildung 67 zu erkennen, sind auf beiden Seiten der Schweißprobe Kupferblöcke als Opfermaterial zur Ein- und Auskoppelung des Laserstrahls in die Vorrichtung integriert. Durch den höheren Reflexionsgrad des Kupfers kann eine vollständige Schweißung der Schweißproben, insbesondere der Randleche, garantiert werden, ohne eine stoffschlüssige Verbindung der Kupferblöcke mit der Schweißprobe herzustellen.

Aus prozess- und anlagentechnischen Gründen²⁵ müsste ein zu schweißender Ring um mindestens 12° geneigt werden, damit der Laserstrahl die Innenseite des Ringes zum Schweißen erreichen kann. Da das Ziel der Entwicklungsarbeit das Schweißen kom-

²⁵ Laseroptik kann nicht im Ring platziert werden

pletter Rotorringe ist, wird auch während der Vorversuche eine Neigung von 12° eingestellt.

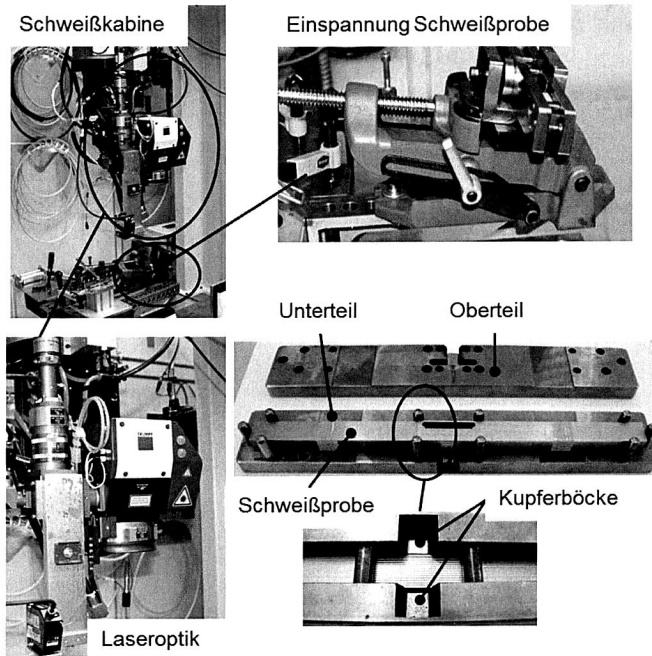


Abbildung 67: Schweißkabine, Laseroptik und Einspannung der Schweißproben.

Nach [109] können tiefe Schweißnähte mit einer geringen Wärmeeinflusszone durch Schweißen mit hoher Leistung und hoher Schweißgeschwindigkeit erzeugt werden. Die ersten Schweißversuche werden daher mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Schweißgeschwindigkeit = 5 m/min
- Laserleistung = 5 kW
- Anpressdruck = 1 N/mm².

Zur qualitativen Beurteilung der Schweißnaht werden optische Bewertungskriterien festgelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in einer potentiellen Serienanwendung, meist in einer Noppengeometrie zur optimierten Ausgasung geschweißt wird und so eine definierte Nahtüberhöhung von 0,5 mm zulässig ist.

- Prozentualer Porenanteil bezogen auf gesamte Nahtoberfläche < 1 %
- Zulässige Nahtüberhöhung < 0,5 mm

Die Schweißnähte der ersten Schweißproben weisen große Poren an der Oberfläche und deutliche Nahtüberhöhungen auf. Durch Variation des Prozesses und der Parameter kann die optische Qualität der Schweißnähte deutlich gesteigert werden. Dabei sind zwei Optimierungsmaßnahmen besonders hervorzuheben. Ein wiederholtes, mehrmaliges Überschweißen einer bereits geschweißten Naht führt zu einer Homogenisierung und somit zu einem Abbau der Nahtüberhöhung und zur Füllung der Poren. Nachteilig sind allerdings die resultierende große Wärmeinflusszone und die gesteigerten Prozesszeiten. Vorteilhafter hingegen ist die Veränderung der Prozessparameter durch eine Reduzierung des Anpressdruckes, eine Verringerung der Schweißgeschwindigkeit und eine Reduzierung der Laserleistung. Da mittels dieser Optimierungsmaßnahme ebenfalls Nähte mit einer Tiefe von 3 mm hergestellt werden können, wird in der folgenden Optimierung der Schweißparameter ausschließlich mit reduzierten Laserleistungen und verringerten Schweißgeschwindigkeiten gearbeitet. Der vorteilhafteste Anpressdruck kann auf 0,125 N/mm² festgelegt werden.

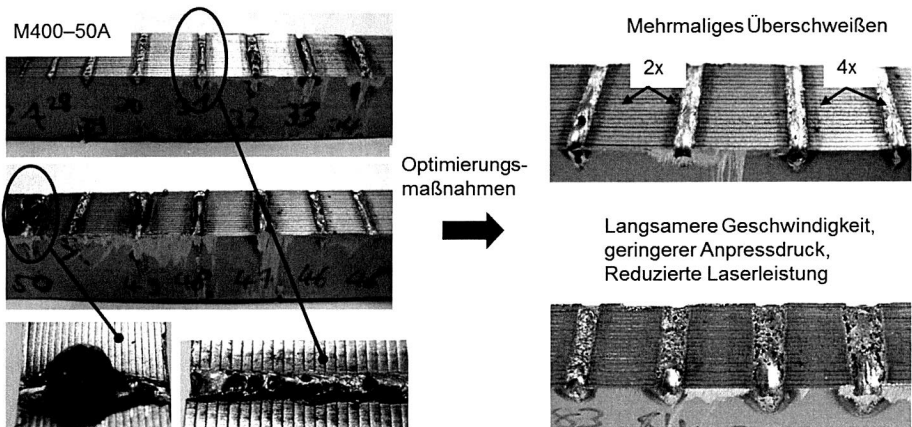


Abbildung 68: Ergebnisse der Schweiß – Vorversuche. Optimierungsmaßnahmen.

Als Ergebnis der Voruntersuchungen kann neben dem Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit des Tiefschweißens von Elektroblech die in Tabelle 8 dargestellte Bandbreite der zu variierenden Parameter zur Optimierung der Schweißparameter protokolliert werden.

Parameter	Obere Grenze	Untere Grenze	Schritte
Laserleistung [kW]	1,5	3,5	0,5
Geschwindigkeit [m/min]	0,5	1,5	0,5

Tabelle 8: Ermittelte Bandbreite der zu variierenden Parameter für die Schweißversuche.

4.6.4 Optimierung der Schweißparameter

Für die Optimierung und Qualifizierung der Schweißparameter werden die in Tabelle 8 dargestellten Parameter variiert – dies führt in der Summe zu 15 Parameterkombination je untersuchten Werkstoff. Zur Darstellung einer möglichst großen Bandbreite an Werkstoffen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung werden alle in Tabelle 1 aufgelisteten Elektrobleche verschiedener Hersteller in die Studie aufgenommen. Mittels dieser Studie sollen ein Grenzwert für den Siliziumanteil der zu schweißenden Elektrobleche definiert und gleichzeitig den Anforderungen als Verbindungstechnik gerechte Nähte generiert werden. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen und zu verifizieren, entsprechen die geometrischen Abmaße (Breite und Höhe) der Schweißprobe denen eines Rotorringes des Referenzrotors.

Nach Durchführung der Parameterstudie erfolgt eine optische und mikroskopische Bewertung der Schweißnähte anhand von Schliffbildern. Zur Generierung qualitativ hochwertiger Schliffbilder müssen die Proben, wie in Abbildung 69 zu erkennen, zunächst mit einem 2-Komponenten-Epoxydharzes eingegossen und anschließend entlang einer definierten Trennlinie, mittig der Probe, geschnitten und geschliffen werden. Anschließendes Ätzen mit einer verdünnten Salpetersäure greift die verschiedenen Gefügebestandteile unterschiedlich stark an, was zu einer Beeinflussung des Reflexionsvermögens der Korngrenzen und Kornflächen führt und so die diversen Gefügebestandteile evident macht.

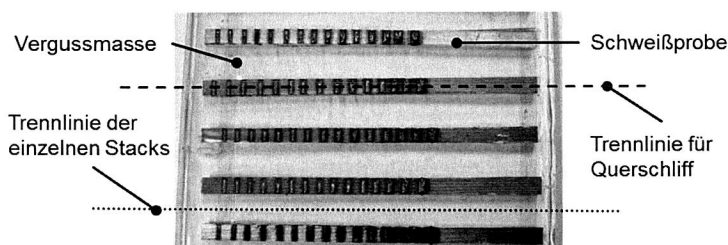


Abbildung 69: Präparierte Schweißproben zur Erstellung von Schliffbildern.

In einem ersten Schritt erfolgt eine Untersuchung der verschiedenen Elektroblechwerkstoffe mit einer C5-Beschichtung. Die Auswertung der Schliffbilder aller Parameterkombinationen der verschiedenen Elektroblechwerkstoffe zeigt ein eindeutiges Ergebnis. Basierend auf den definierten Bewertungskriterien zur optischen Beurteilung von Schweißnähten können die Nähte aller Parameterkombinationen von Elektroblechtypen mit einem Siliziumgehalt $> 2,5\%$ als qualitativ nicht ausreichend gut schweißbar definiert werden.

Die in Abbildung 70 dargestellten exemplarischen Schliffbilder wurden mit einer Schweißgeschwindigkeit von 1 m/min und Laserleistungen von 2,5 kW hergestellt.

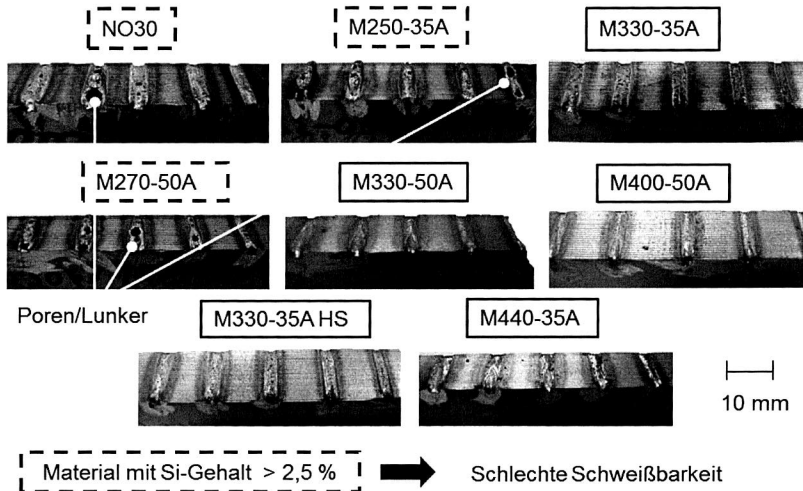


Abbildung 70: Untersuchte Elektroblechwerkstoffe für die exemplarische Parameterkombination 1 mm/min Geschwindigkeit und 2,5 kW Leistung.

Zur Verdeutlichung der beschriebenen Erkenntnisse sind in Abbildung 71 die mikroskopischen Aufnahmen der geätzten Querschliffe des Elektroblechwerkstoffes M250-35A dargestellt. Alle Parameterkombinationen der als „nicht schweißbar“ definierten Elektroblechtypen weisen äquivalente Schliffbilder auf – deutlich erkennbare Nahtüberhöhungen und eine Vielzahl großer und kleiner Poren und Lunker oberhalb der definierten Grenzwerte.

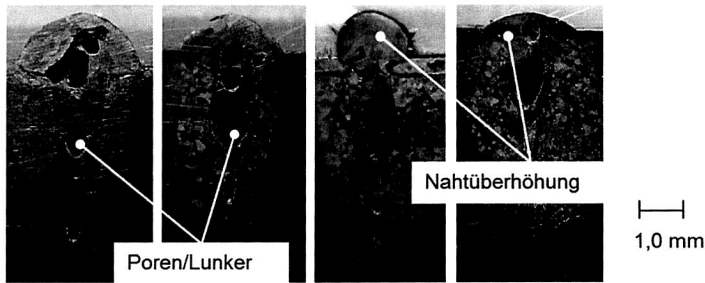


Abbildung 71: Querschliffe des Elektrobleches M250-35A mit der exemplarischen Parameterkombination 1 mm/min Geschwindigkeit und 2,5 kW Leistung.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 72 beispielhaft für die als „gut schweißbar“ identifizierten Werkstoffe die Querschliffe des Elektroblechtyps M330-35A mit exemplarischen Parameterkombinationen. Die Schliffbilder zeigen ein überwiegend homogenes Gefüge der Schweißnaht mit vereinzelt auftretenden, verhältnismäßig kleinen Poren, die dennoch einen negativen Einfluss auf die Festigkeit der Naht haben können.

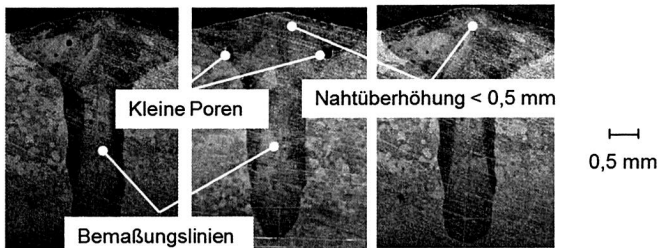


Abbildung 72: Mikroskopische Aufnahme von Querschliffen des Elektrobleches M330-35A mit der exemplarischen Parameterkombination 1 mm/min Geschwindigkeit und 2,5 kW Leistung.

Mittels dieser Schliffbilder können durch digital-mikroskopische Vermessung die charakteristischen Hauptmaße²⁶ der verschiedenen Nähte bestimmt werden. Die drei rot dargestellten Bemaßungslinien markieren die Hauptmaße der Schweißnaht, welche für alle Parameterkombinationen der geschweißten Elektroblechtypen aufgenommen werden. In 3D-Oberflächendiagrammen wird dann der Verlauf der einzelnen Hauptmaße in Abhängigkeit der beiden Laserparameter dargestellt. An Hand von Abbildung 73 werden stellvertretend für alle geprüften Elektroblechwerkstoffe die Ergebnisse der aufgezeich-

²⁶ In Abschnitt 4.6.2 - Simulation - auch geometrische Nahtparameter genannt

neten 3D-Oberflächendiagramme des Werkstoffes M330-50A erklärt. Die qualitativen Verläufe der jeweiligen 3D-Oberflächendiagramme der verschiedenen Werkstoffe sind annähernd äquivalent, jedoch sind quantitative Unterschiede im Wertespektrum zu erkennen.

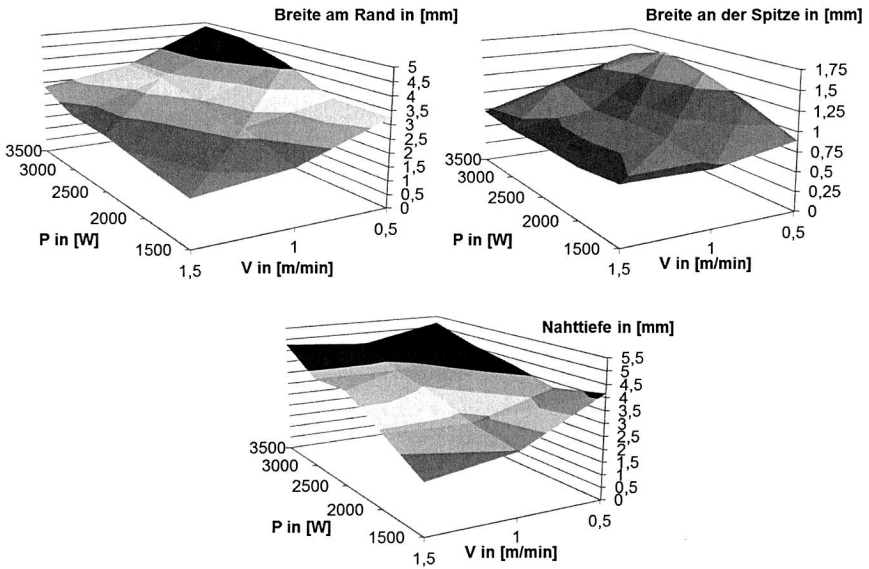


Abbildung 73: 3D-Oberflächendiagramme der Hauptmaße in Abhängigkeit der Laserparameter, exemplarisch für M330-50A.

In den Diagrammen stellen die Abszisse und die Ordinate die Laserparameter dar, an der Altitude (Höhenachse) ist jeweils der Nahtparameter (Hauptmaß) aufgetragen. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass die Schweißnähte mit steigender Leistung und sinkender Lasergeschwindigkeit sowohl breiter, als auch tiefer werden. Primär wirkt sich dieser Effekt auf die „Nahtbreite am Rand“ und die „Tiefe der Naht“ aus, wobei das gemessene Spektrum je nach Parameterkombination zwischen 1,5 und 5 mm liegt. Der beschriebene Effekt ist auch bei der „Breite an der Nahtspitze“ zu erkennen, jedoch ist die Steigung des Graphen signifikant geringer, weshalb nur maximale Werte von 1,7 mm erzielt werden können. Die durch die Simulationen ermittelte optimale Nahtgeometrie – eine parallele Naht mit einer Breite von 3 mm und einer Tiefe von 4 mm – lässt sich aus prozesstechnischen Gründen nicht realisieren. Daher müssen für die Durchführung der Zugversuche die festigkeitstechnisch bestmöglich realisierbaren Schweißnähte ausgewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass breite und tiefe Nähte eine große Wärmeeinflusszone nach sich ziehen und so das umliegende Gefüge be-

schädigen, respektive die elektromagnetischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Daher ist eine Aufgabe der Zugversuche, einen Kompromiss zwischen der für die Festigkeit mindestens benötigte Schweißnahtgröße und den Anforderungen an die Wärmeinflusszone zu finden.

Der gleiche Versuchsplan wird ebenfalls mit verbackenen Elektroblechpaketen (C3-Beschichtung) durchgeführt, jedoch, basierend auf den bereits gewonnenen Erkenntnisse, nur mit Elektroblechen mit einem Siliziumanteil $< 2,5\%$. Unter Berücksichtigung der optischen Bewertungskriterien hat keine Parameterkombination zu einem ausreichenden Ergebnis (vgl. Abbildung 74) geführt, weshalb keine Schliiffbilder erstellt und ausgewertet werden müssen. Bei Vergleich der diversen Elektrobleche ist keine Materialabhängigkeit der Schweißergebnisse festzustellen. Ursächlich für die schlechte Schweißbarkeit müsste daher die deutlich höhere Schichtdicke der C3-Beschichtung, dessen chemische Zusammensetzung und ein erschwertes Ausgasen des Lackes, basierend auf der Paketierungstechnik, sein. In weiterführenden Arbeiten könnten hier Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen zur Tiefschweißbarkeit von C3-Paketen gefunden werden.

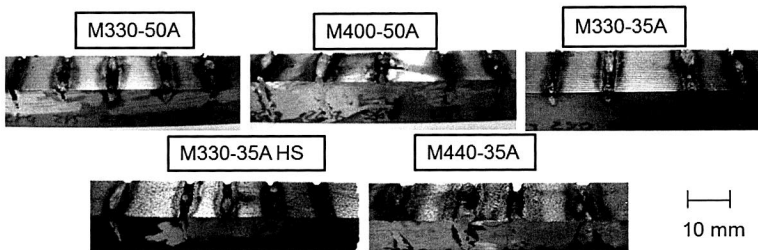


Abbildung 74: Untersuchte Elektroblechwerkstoffe mit C3-Beschichtung mit der exemplarischen Parameterkombination 1 mm/min Geschwindigkeit und 2,5 kW Leistung.

Zusammenfassend konnten durch die Optimierung der Schweißnahtparameter Erkenntnisse für das Tiefschweißen von Elektroblechen mit einer C5-Beschichtung gewonnen werden. Elektrobleche mit einem Siliziumgehalt $< 2,5\%$ sind für das Tiefschweißen grundsätzlich geeignet. Die je nach Anwendung geforderten Maße der Schweißnaht können durch eine definierte, in diesem Abschnitt aufgezeigte, Kombination der Schweißparameter „Laserleistung“ und „Laservorschubgeschwindigkeit“ (vgl. Abbildung 73) eingestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Anpressdruck des Paketes bei ca. $0,125 \text{ N/mm}^2$ liegen sollte.

4.6.5 Validierung der Entwicklung mittels Zug- und Schleuderversuchen

Die Validierung der optimierten Schweißnähte hinsichtlich ihrer Festigkeit erfolgt in zwei Schritten - Zugversuche und anschließende Schleuderversuche. Zunächst werden lineare Zugproben mit geeigneten Elektroblechwerkstoffen nach dem Brick-Wall-Prinzip vorbereitet und mit den in Tabelle 9 beschriebenen Parameterkombinationen als Verbindungstechnik geschweißt. Die Auswahl der vier zu verwendenden Parameterkombinationen stellt einen breiten Querschnitt der möglichen Nahtgeometrieformen dar, die basierend auf den Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und Wärmeeinflusszone validiert werden sollen.

Parameterkombination	P1	P2	P3	P4
Leistung in [W]	1500	2500	3500	3000
Geschwindigkeit in [m/min]	1,5	1,0	1,5	0,5
Durchschnittliche Einschweißtiefe in [mm]	1,8	3,5	4,5	5,2
Charakteristische Nahtbreite	schmal	mittel	schmal	breit

Tabelle 9: Definition der Schweißparameter der Zugproben.

Mit dem Werkstoff M330-35A werden zudem Doppelnahtkonzepte mit den Parameterkombinationen P1 und P2 hergestellt. Diese Doppelnahtkonzepte werden im Folgenden PD1 und PD2 genannt. Der Aufbau und die Durchführung der Zugversuche erfolgt äquivalent zu Abschnitt 4.2.2. Unter Beachtung der beiden möglichen Schadensmechanismen „Blechriss“ und „Bruch der Naht“, können die geschweißten Nähte qualitativ beurteilt werden. Ideale Schweißnähte haben eine höhere Festigkeit als das umgebene Basismaterial. Daher sollte bei statischen Prüfungen die Zugprobe an der kritischen Stelle knapp außerhalb der Naht nach dem Schadensmechanismus „Blechriss“ versagen. Andernfalls ist der Schweißprozess, respektive die Schweißparameter, nicht vollständig entwickelt und die Naht weist im Inneren eine kritische Anzahl von Poren und Lunkern auf, was im Schadensmechanismus „Bruch der Naht“ resultiert. Die Schadensbilder zeigen bei den Proben P1, P2 und PD1 den Schadenmechanismus „Blechriss“ und haben somit ideale Nähte. Alle anderen Parameterkombinationen weisen einen „Bruch der Naht“ auf und können daher in der weiteren Auswertung nicht mehr in Betracht gezogen werden. Äquivalente Schadensbilder in Abhängigkeit der gewählten Parameterkombination können bei allen geprüften Elektroblechwerkstoffen nachgewiesen werden. Durch gezielte Abstimmung der einzelnen Parameter in weiteren Entwicklungsschritten und der Integration geeigneter Noppengeometrien nach [38] besteht dennoch die Möglichkeit der Herstellung idealer Schweißnähte mit den gewünschten Parameterkombinationen.

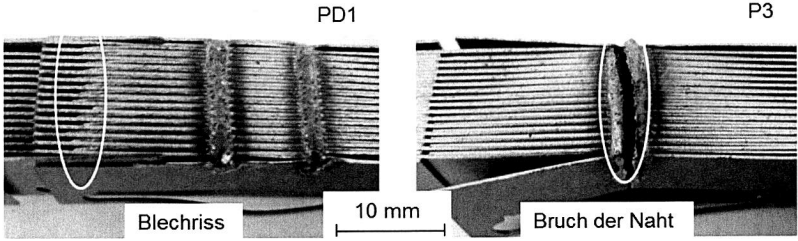


Abbildung 75: Schadensmechanismen der geschweißten Zugproben des Werkstoffes M330-35A an ausgewählten Parameterkombinationen.

Die Auswertung der Zugversuche ist in Abbildung 76 dargestellt. Die Anordnung der Werkstoffe im Säulendiagramm ist gezielt gewählt und entspricht von links nach rechts dem steigenden Silizium-Aluminium-Anteil der Elektrobleche. Dieser spiegelt die unterschiedlichen Festigkeitswerte der geprüften Elektrobleche wieder, die in der Parameterkombination P1 äquivalent zum Si-Al-Anteil steigen.

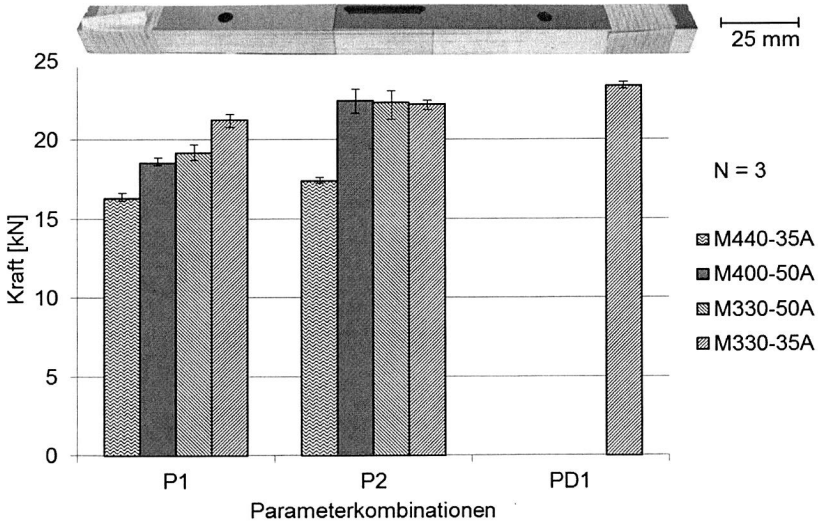


Abbildung 76: Auswertung der Zugversuche; Anordnung von links nach rechts mit steigendem Si-Al-Anteil je Parameterkombination.

Dieser Effekt ist bei den geometrisch signifikant größeren Nähten der Parameterkombination P2 weniger gut erkennbar, da bis auf das Elektroblech M440-35A die Si-Al-

Anteile der Elektrobleche vergleichsweise ähnlich sind. Ein erneutes Vermessen der Schlißbilder der Zugproben zeigt insbesondere bei der Parameterkombination P1 Divergenzen in den Hauptmaßen, wobei die Bleche mit höheren Si-Al-Anteilen hinsichtlich der Festigkeit vorteilhaftere Hauptmaße aufweisen. Die Nähte der Parameterkombination P2 sind geometrisch vergleichbar. Hier liegen die Festigkeitswerte der aus Sicht der chemischen Zusammensetzung ähnlichen Werkstoffe auf gleichem Niveau, nur M440-35A weist, wie zu erwarten, signifikant geringere Festigkeitswerte auf. Im Mittel kann somit eine Steigerung der Festigkeit um ca. 17 % durch die Parameterkombinationen P2 im Vergleich zu P1 vernommen werden. Dies korreliert mit den Erkenntnissen der linearen Simulation. Für unterschiedliche Festigkeitswerte, basierend auf den verschiedenen Blechdicken, können keine Hinweise gefunden werden. Bei Vergleich des Einzelnaht- mit dem Doppelnahtkonzept der Parameterkombination P1 ist lediglich eine Steigerung von ca. 10 % messbar – die Simulation hat hier Steigerungen von bis zu 33 % vorhergesagt. Eine Erklärung könnten negative Einflüsse auf das Gefüge im Bereich der zweiten Schweißnaht in Folge der Wärmeeinflusszone der ersten Schweißnaht sein. Konsequenterweise sind alle zweiten Schweißnähte unter Berücksichtigung des optischen Bewertungskriteriums qualitativ schlechter als die ersten Schweißnähte.

Für die Durchführung der Schleuderversuche wird daher im Doppelnahtkonzept der mittlere Abstand der Schweißnähte erhöht, um die Wärmeeinflüsse der ersten auf die zweite Schweißnaht zu minimieren. Aus den Erkenntnissen der Zugversuche werden als geeignete Werkstoffe das M330-35A und das M400-50A gewählt, da diese die qualitativ hochwertigsten Nähte liefern, aber dennoch Unterschiede in ihrer chemischen Zusammensetzung aufweisen. Die zwei basierend auf den Zugprobenresultaten besten Kombinationen aus Parameternahtkonzept und Werkstoff werden an komplett segmentierten Rotorringen validiert. Dabei wird jede Kombination jeweils auf einen Rotorring mit fünf und zehn Segmenten übertragen, wodurch ein direkter Vergleich zwischen den beiden Segmentanzahlen ermöglicht wird.

Zur Positionierung der Segmente und für die Durchführung der Schweißungen wird eine spezielle Vorrichtung benötigt und entwickelt. Diese besteht, wie in Abbildung 77 zu erkennen, aus vier Hauptkörpern: einer Grundplatte, einer Drehplatte und einem oberen und unteren Fixierungsring. Die Drehplatte, auf der die Fixierungsringe montiert sind, ist drehbar auf der Grundplatte gelagert und lässt sich mittels eines Positionierungsrasters um den Winkel eines Magnetslots verstellen. Dies gewährleistet eine exakte und konstante Schweißposition. Zwischen dem oberen und unteren Fixierungsring lassen sich mittels Passstiften und Positionierplättchen die einzelnen Segmente nach dem Brick-Wall-Design prozesssicher aufschichten.

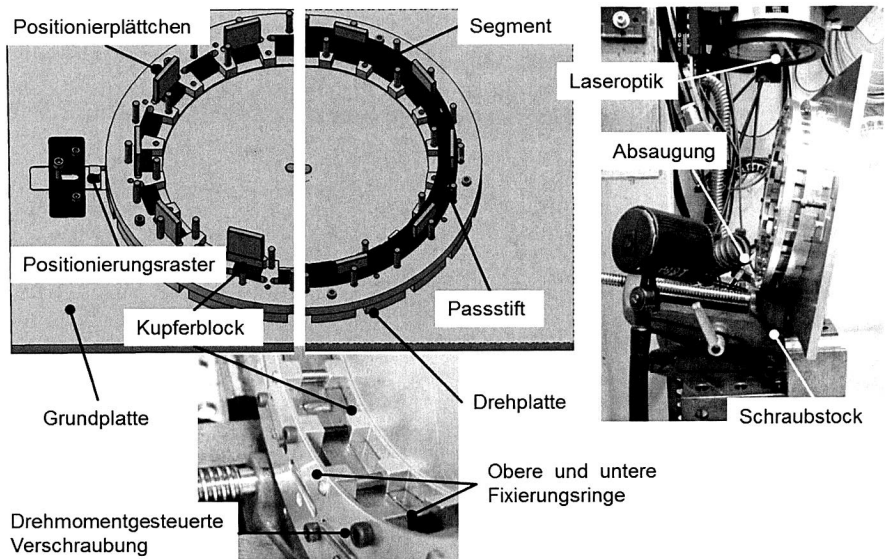


Abbildung 77: Vorrichtung zum Verbindungsschweißen von segmentierten Rotoren.

An den potentiellen Schweißbereichen sind zur Sicherstellung einer vollständigen Schweißung Kupferblöcke zur Ein- und Auskopplung des Laserstrahls in den Fixierungsringen integriert. Um den vorgegebenen Anpressdruck zu garantieren werden die Fixierungsringe drehmomentgesteuert verschraubt. [110] In der Schweißkabine wird die Vorrichtung mit einem winkelverstellbaren Schraubstock unter einem prozesstechnisch vorgegebenen Mindestwinkel von 12° positioniert und fixiert. Einzelne Nähte im Doppelnahtkonzept weisen eine überhöhte Anzahl an Poren und Lunker auf. Eine Erklärung könnte eine noch nicht ausreichende Abkühlzeit zwischen den beiden Schweißungen sein. Prozesssicher können nur die Nähte im Einzelnahtkonzept geschweißt werden.

Der Aufbau und die Durchführung der Fliehkraftprüfung ist äquivalent zu Abschnitt 4.2.3. Die Auswertung der Ergebnisse in Abbildung 78 zeigt keine messbare Verformung der geprüften Ringe bis zu einer Drehzahl von 9500 U/min. Dabei sind die Verläufe der jeweiligen Graphen je Segmentanzahl im Einzelnaht- und Doppelnahtkonzept vergleichbar. Erwartungsgemäß versagen die beiden Ringe mit jeweils fünf Segmenten pro Schicht später, als die Ringe mit je zehn Segmenten, da sich die resultierenden Umfangskräfte, wie in den Simulationen gezeigt, auf mehr Nähte aufteilen können. Im direkten Vergleich der beiden Schweißnaht-Werkstoff-Kombinationen zeigt das M330-35A im Doppelnahtkonzept PD1 bessere Resultate, als das M400-50A im Einzelnahtkonzept P2. Dies korreliert mit den Ergebnissen der linearen Simulation und

der Zugversuche. Die höchste Drehzahl von 12500 U/min konnte somit ebenfalls beim M330-35A im Doppelnahtkonzept P1 mit fünf Segmenten pro Schicht gemessen werden.

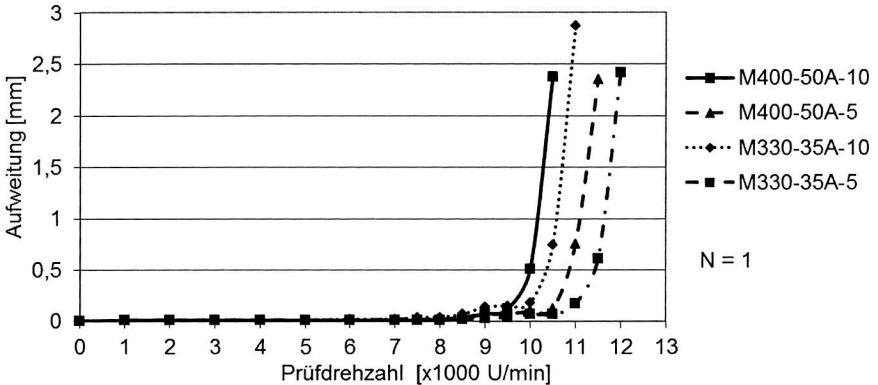


Abbildung 78: Ergebnisse der experimentellen Schleuderversuche.

Bei Betrachtung der Bruchstellen fällt auf, dass die Schadensmechanismen der Einzelnahtkonzepte jeweils „Blechrisse“ waren und bei den Doppelnahtkonzepten ein „Bruch der Naht“ zu erkennen war. Somit könnten beim Doppelnahtkonzept gesteigerte Festigkeitswerte erzielt werden, wenn durch geeignete Maßnahmen der Schadensmechanismus verlegt werden könnte. Den Anforderungen des Referenzrotors entsprechend, sind beide geprüften Ringe mit fünf Segmenten je Schicht ausreichend drehzahlfest. Die beschriebenen Ergebnisse geben Hinweise auf eine noch nicht für Serienanwendungen ausreichende Reproduzierbarkeit des Schweißprozesses und weisen auf die Notwendigkeit weiterer Entwicklungsarbeiten zum Erlangen der Prozessfähigkeit hin.

Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurde zunächst die Tiefenschweißbarkeit von Elektroblech nachgewiesen und die dafür erforderlichen Randbedingungen hinsichtlich Schweißparameter und der chemischen Zusammensetzungen der Elektrobleche definiert. Aus der anschließend durchgeführten Parameterstudie resultierten die für die Rotorsegmentierung vorteilhaftesten Schweißparameter. Die entwickelten und optimierten Schweißnähte beweisen anhand der Ergebnisse aus den Schleuderversuchen das große Potential der Schweißnaht als Verbindungstechnik von Rotorsegmenten. Bis zum Erreichen der Streckgrenze sind bei der Referenzrotorgeometrie des Bleches M330-35A mit fünf Segmenten je Rotorring Umfangskräfte bis zu 17,1 kN übertragbar. Dies entspricht einer Drehzahl von ca. 10.800 U/min. Das finale Versagen der Verbindungstechnik tritt

bei einer Drehzahl von 12.500 U/min und somit einer Umfangskraft von 22,9 kN auf. Zusammenfassend betrachtet übertrifft die Verbindungstechnik Fügegeometrie die bei einer Grenzdrehzahl von 7.000 U/min erforderlichen Schleuder- und Berstdrehzahlen deutlich. Allerdings ist zu beachten, dass zum aktuellen Stand noch keine serienreife Reproduzierbarkeit der Schweißnähte erreicht werden kann. Hierfür sind noch weiterführende Untersuchungen und Qualifizierungsmaßnahmen erforderlich.

4.7 Einfluss der entwickelten Verbindungstechniken auf die Eisenverluste

Neben den festigkeitstechnischen Anforderungen müssen die entwickelten Verbindungstechniken auch hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Eigenschaften vergleichbar zum Referenzrotor sein. Daher erfolgen in diesem Abschnitt experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Verbindungstechniken auf die Eisenverluste. Im Vergleich zum Referenzrotor sind nur erhöhte Eisenverluste detektierbar, wenn eine elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Blechen vorhanden ist. Aus diesem Grund sind bei der adhäsiven Verbindungstechnik Backlack und beim Magnet als Fügeelement keine zusätzlichen Wirbelstromverluste zu erwarten. Für die folgende Verlustbetrachtung werden daher ausschließlich die Verbindungstechnik Fügegeometrie, das entwickelte Fügeelement und die Verbindungstechnik Schweißen validiert.

Zur Untersuchung des Einflusses der entwickelten Verbindungstechniken auf die Eisenverluste wird ein Versuchsaufbau entworfen. Der Aufbau nach [111] besteht, wie in Abbildung 79 zu erkennen, aus einer abstrahierten Ringkernprobe mit der zu prüfenden Fügegeometrie, einer Primär- und einer Sekundärwicklung. Der Strom der Primärwicklung generiert die magnetische Flussdichte. Die über die Sekundärwicklung detektierte Sekundärspannung gibt Auskunft über die Höhe der magnetischen Flussdichte. Die daraus resultierende Verlustleistung berechnet sich wie folgt nach DIN 50460 [112]:

$$P_V = \frac{N_1}{N_2} * \frac{1}{T} * \int_0^T i_1 * u_2 dt \quad (4.28)$$

Als Referenzprobe wird ein „ideales“ Blechpaket in äquivalenter Geometrie ohne die zu prüfende Verbindungstechnik mit einer identischen Primär- und Sekundärwicklung gefertigt. Zur Validierung des Messaufbaus wird neben der zu prüfenden Verbindungstechnik eine Ringkernprobe mit einer beidseitigen elektrischen Verbindung durch Schweißnähte hergestellt. Durch die beidseitige Verbindung werden nach [37] signifikante Verluste generiert und sind durch den Versuchsaufbau messbar.

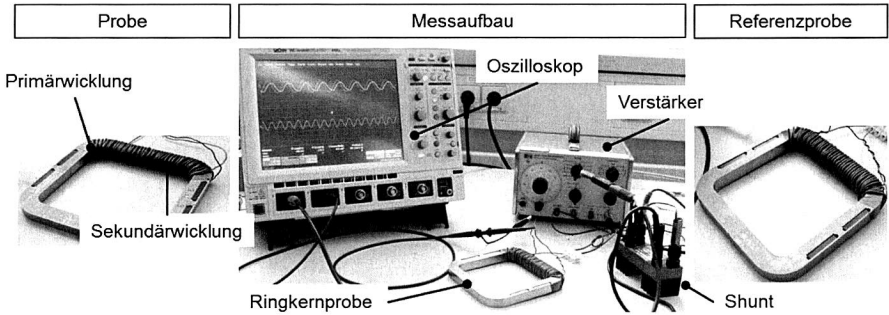


Abbildung 79: Messaufbau Verlustmessung. [111]

Der Verlauf des Graphen der Ringkernprobe mit der beidseitigen Verbindung in Abbildung 80 zeigt eine deutliche Erhöhung der Verlustleistung. Der entworfene Versuchsaufbau kann somit für Verlustbetrachtungen verwendet werden. Die Graphen der zu prüfenden Ringkernproben der Verbindungstechniken Fügegeometrie und Schweißen weisen im Vergleich zur Referenzprobe keine Verlusterhöhung auf. Es konnte daher kein Hinweis ermittelt werden, dass die Fügegeometrie und die Schweißnaht als Verbindungstechnik zu erhöhten Verlusten führen.

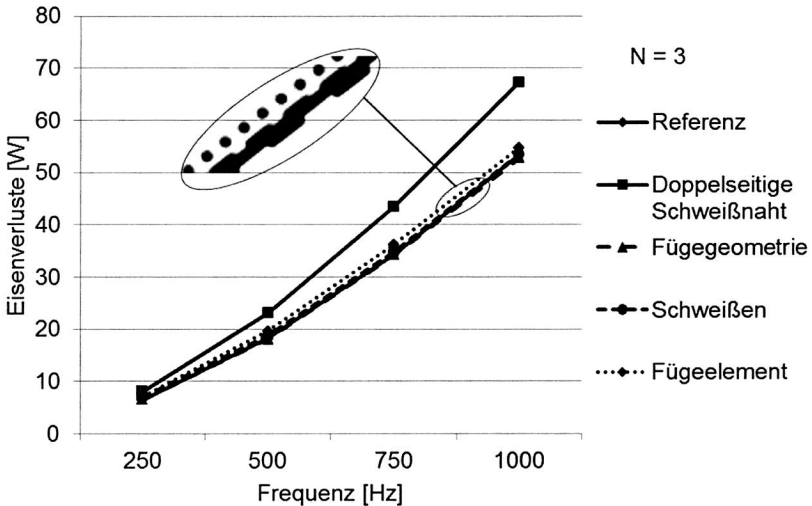


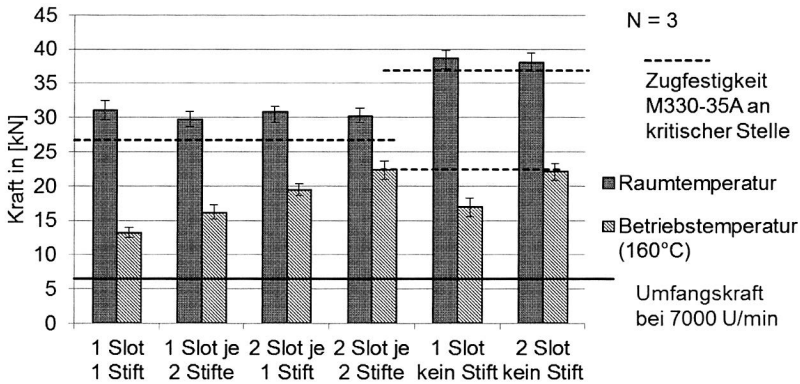
Abbildung 80: Ergebnisse der experimentellen Verlustbetrachtung.

Der Graph der Ringkernprobe des Fügeelements als Verbindungstechnik weist im Vergleich zur Referenzprobe eine geringe Verlusterhöhung auf. Bei einer Verwendung der Fügeelemente in Kombination mit anderen Verbindungstechniken sollte dieser Effekt berücksichtigt werden.

4.8 Kombinationen diverser Verbindungstechniken im Brick-Wall-Design

Kombinationen der verschiedenen, in dieser Arbeit entwickelten und optimierten, Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung sind nur bei einem Aufbau der Rotorringe im Brick-Wall-Design möglich. Zu beachten sind allerdings die dadurch erwarteten und in Abschnitt 4.9 zu analysierenden monetären Nachteile der Kombinationen im Vergleich zu den jeweiligen einzelnen Verbindungstechniken. Durch vermutete Festigkeitssteigerungen, die in diesem Abschnitt validiert werden sollen, können die resultierenden monetären Nachteile kompensiert werden. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch die Möglichkeit von, in Bezug auf die Verbindungsfestigkeit, negativen Wechselwirkungen in der Kombination bestimmter Verbindungstechniken. Die vorausgegangenen Abschnitte zeigten, dass das optimierte Fügeelement und der Magnet als Fügeelement als alleinige Verbindungstechnik keine Anwendung finden und nur in Kombination mit weiteren Verbindungstechniken aufgebaut werden können. Aus funktionstechnischen Gründen ist der Magnet (als Fügeelement) bei permanent erregten Rotoren, die nach dem Brick-Wall-Prinzip aufgebaut sind, immer Bestandteil der Verbindungstechnik und wird daher im weiteren Verlauf dieses Abschnitts nicht mehr als solche bezeichnet. Vor Durchführung der Schleuderversuche erfolgt eine separate Betrachtung der einfachsten Kombinationsmöglichkeit des optimierten Fügeelementes mit der adhäsiven Verbindungs- und Paketierungstechnik Backlack durch Zugversuche. Die Randbedingungen und die Durchführung der Zugversuche mit der Referenzrotorgeometrie sind äquivalent zu den Zugversuchen der vergangenen Abschnitte.

Die in Abbildung 81 dargestellten Ergebnisse der Zugversuche zeigen bei Raumtemperatur (ca. 23 °C) eine deutlich niedrigere Verbindungsfestigkeit als bei Zugproben, die ausschließlich mit der adhäsiven Verbindungstechnik Backlack gefertigt wurden. Kausal für diese Ergebnisse sind die vergleichsweise dünnen Stege um die Fügeelemente, an denen Spannungsspitzen resultieren und somit ein lokales Versagen des Elektroblesches auftritt. Die für die Auslegung des Rotors relevanten Ergebnisse müssen bei Betriebstemperatur erzielt werden. Hier ist bei der technologisch relevanten Segmentgröße von 72° (2 Slot Überdeckung) kein Unterschied der Verbindungsfestigkeit zwischen den reinen Backlack-Proben und den kombinierten, mit zwei Stiften versehenen Proben zu erkennen. In diesem Temperaturbereich ist immer ein Versagen der Backlackverbindung Ursache für den Bruch der Zugproben.



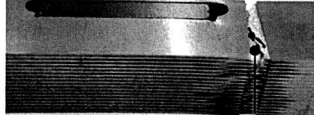
Versagensbild 2 Stifte und Backlack



Versagen des Elektrobleches

Jeweils bei Raumtemperatur

Versagensbild nur Backlack



Versagen des Elektrobleches

10 mm

Abbildung 81: Ergebnisse der Zugversuche. Verbindungstechnik: Backlack und teilweise eine variable Anzahl an Stiften. Unten: Bruchbilder.

Obwohl die Fügefläche bei den kombinierten Proben geringer ausfällt, ist zumindest bei einer Verwendung von zwei Stiften die Zugfestigkeit vergleichbar zu den reinen Backlack-Proben. Ursächlich ist eine Kompensation der niedrigeren stoffschlüssigen Festigkeit durch den entstandenen Formschluss. Die Verwendung der Fügelemente in Kombination mit der adhäsiven Verbindungstechnik Backlack ist wegen der nicht erkennbaren Festigkeitssteigerung und den folglich höheren Fertigungskosten nicht empfehlenswert.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in den folgenden Schleuderversuchen verifiziert werden. Neben der bereits untersuchten Kombination sollen die in Tabelle 10 dargestellten Kombinationsmöglichkeiten der diversen Verbindungstechniken hinsichtlich ihrer Festigkeit analysiert werden. Zur Sicherstellung einer besseren Übersichtlichkeit werden im Folgenden die in Tabelle 10 definierten Abkürzungen verwendet.






Bezeichnung	Abkürzung	3D-Darstellung
Backlack + Fügegeometrie	B+FG	
Backlack + Fügeelement	B+FE	
Backlack + Fügeelement + Fügegeometrie	B+FE+FG	
Schweißen + Fügegeometrie	S+FG	
Schweißen + Fügegeometrie + Fügeelement	S+FG+FE	

Tabelle 10: Bezeichnung, definierte Abkürzung und 3D-Darstellung der in den Schleuderversuchen zu prüfenden Kombinationen der Verbindungstechniken.

Der Aufbau und die Durchführung der Schleuderversuche ist äquivalent zu Abschnitt 4.2.3. Die Ergebnisse in Abbildung 82 zeigen, bis auf die Kombination „Backlack und Fügegeometrie“, die aus den vorangegangenen Schleuderversuchen bekannten Kurvenverläufe. Da die Abweichung vom üblichen Kurvenverlauf nur temporär auftritt, ist dies auf eine fehlerhafte Aufnahme der Messwerte durch die Messsoftware zurückzuführen. Wie bereits durch die Zugversuche gezeigt, ist durch die Integration eines Fügeelementes keine Festigkeitssteigerung identifizierbar. Beim Vergleich der Kombinationen „B+FG“ und „B+FG+FE“ fällt auf, dass das Fügeelement sogar einen minimalen negativen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit aufweist. Die deutlich geringere Festigkeit der Kombination „S+FG+FE“ im Vergleich zu „S+FG“ resultiert aus der niedrigeren Anzahl an Schweißnähten, da unter jedem zweiten Slot ein Fügeelement positioniert ist und diese eine niedrigere Festigkeit aufweisen als die Schweißnähte. Zusammenfassend betrachtet ist bei Raumtemperatur im Hinblick auf die Festigkeit, die Kombination „Backlack und Fügegeometrie“ am vorteilhaftesten.

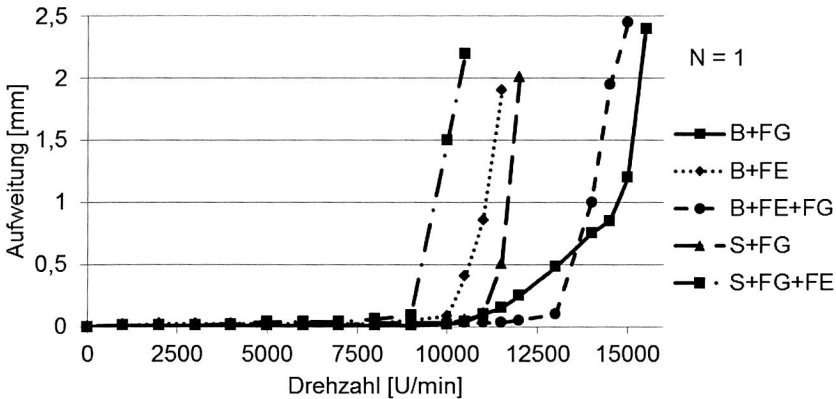


Abbildung 82: Ergebnisse der Schleuderversuche bei Raumtemperatur (RT).

Zusammenfassung und Vergleich der entwickelten Verbindungstechniken

Den Abschluss dieses Abschnittes bildet der Vergleich aller entwickelten Verbindungstechniken hinsichtlich ihrer Festigkeit bei Betriebstemperatur (BT). Die Festigkeitskurven der Varianten, bei denen unter anderem die adhäsive Verbindungstechnik Backlack Anwendung findet, sind nicht experimentell ermittelt, sondern basierend auf den Erkenntnissen der Zugversuche bei Betriebstemperatur durch approximative Abschätzungen dargestellt. Die in Abbildung 83 dargelegten Ergebnisse und Erkenntnisse beziehen sich auf die spezifische Geometrie des Referenzrotors, sind aber ebenfalls als Anhaltspunkte für vergleichbare Rotorkonstruktionen zu sehen.

Mit der Kombination „B+FG“ sind höhere Drehzahlen erreichbar als bei alleiniger Verwendung des Backlackes als Verbindungstechnik, da durch die hochentwickelte Fügegeometrie bei beginnendem Versagen des Backlackes noch Kräfte aufgenommen werden können. Die geprüften Ringe mit der Verbindungstechnik Schweißen und der Kombination „S+FG“ erreichen höhere Festigkeitswerte als die adhäsiven Verbindungstechniken. Da beide Kurvenverläufe äquivalent sind und auch die Bruchdrehzahlen die gleichen Werte aufweisen, ist darauf zu schließen, dass die Integration der Fügegeometrie hinsichtlich der Festigkeit keine Vorteile bringt und somit bei Verwendung der Verbindungstechnik „Schweißen“ auf diese verzichtet werden kann. Den signifikant vorteilhaftesten Kurvenverlauf und auch die größte maximal aushaltbare Drehzahl ist durch den Rotor im Stack-Design mit der Verbindungstechnik Fügegeometrie erzielt worden.

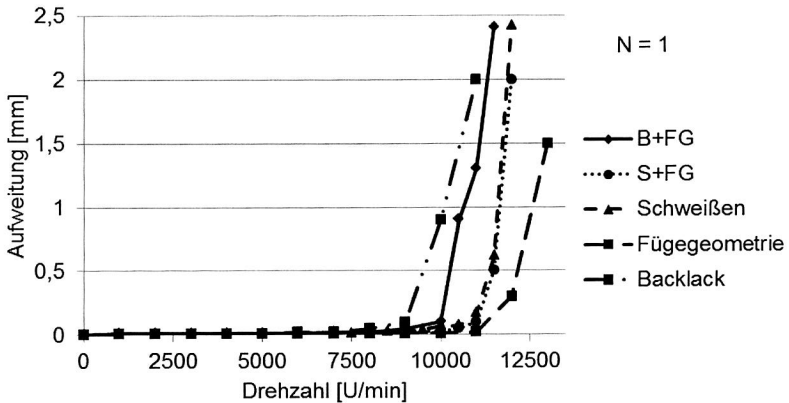


Abbildung 83: Vergleich aller entwickelten Verbindungstechniken. Prüfung bei Betriebstemperatur (BT).

Im Hinblick auf die Verbindungsfestigkeit ist somit die entwickelte Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung für den Referenzrotor am besten geeignet.

4.9 Wirtschaftliches Potential der entwickelten Verbindungstechniken

Wirtschaftlichkeit ist ein allgemeines Maß für die ökonomische Effizienz und wird als das Verhältnis zwischen erreichtem Erfolg und dafür benötigtem Mitteleinsatz definiert. Dabei ist das Ziel, entweder mit minimalem Aufwand einen vorgegebenen Ertrag oder mit einem gegebenen Aufwand einen maximalen Ertrag zu erreichen. Eine der Aufgaben der Produktionsplanung besteht darin, unter verschiedenen Fertigungs- und Montageverfahren, das technologisch und qualitativ hochwertigste (Produktionstheorie) und gleichzeitig kostengünstigste (Kostentheorie) Verfahren auszuwählen. Die Kennzahl der Kostentheorie ist wiederum die Wirtschaftlichkeit. [113] Die Wirtschaftlichkeitsrechnung untersucht ein oder mehrere Investitionsmodelle auf deren Vorteile unter bestimmten Voraussetzungen. Diese auch als Investitionsrechnung bekannte Kalkulation umfasst alle Verfahren, die eine rationale Beurteilung der rechenbaren Gesichtspunkte einer Investition ermöglichen. Die finanziellen Konsequenzen einer Investition sollen dazu quantifiziert und verdichtet werden, um basierend darauf eine Entscheidungsempfehlung bieten zu können. Bei diesen Investitionsrechnungen können unterschiedliche Verfahren bedient werden. Zum Vergleich mehrerer Investitionsalternativen wird die Kostenvergleichsrechnung angewendet, die sich auf die Kosten pro Stück bzw. pro Stückzahl bezieht unter der Annahme der Äquivalenz des Erlöses bei allen Verfahren.

Kernpunkt ist dabei die Ermittlung der Kosten jeder Alternative und die Auswahl des kostengünstigsten Verfahrens. [114]

Da in der hier durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lediglich Abschätzungen der einzelnen Kostenpunkte getätigt werden können und der qualitative Vergleich der erwartbaren Kostenunterschiede für eine Differenzierung der einzelnen Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit vollkommen ausreichend ist, kann auf eine klassische Kostenvergleichsrechnung und die Unterteilung in fixe und variable Kosten verzichtet werden. Die Relevanz zur Generierung einer Entscheidungsgrundlage liegt hierbei lediglich an der Herausarbeitung der Stückkosten basierend auf den Summen der Kostenanteile der Anlagen-, Werkzeug-, Material- und Personalkosten.

Der durchgeführten modifizierten Kostenvergleichsrechnung der diversen entwickelten Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung liegt eine jährliche Stückzahl von 150.000 Rotoren in einem Produktionszeitraum (Lifecycle = LC) von 6 Jahren zugrunde. Dabei ist zu beachten, dass als Produkt immer ein vollständig gefügter Rotorring angesehen wird. Neben den Grunddaten der Stückzahlkalkulation zeigt Tabelle 11 die Berechnung der Taktzeiten je Rotor bzw. je Ring in Sekunden, bei einer Anlagenverfügbarkeit von 80 % in einer Vollzeitproduktion.

Produktionszeitraum (LC) in Jahren	6
Stückzahl Rotoren pro Jahr	150.000
Stückzahl Rotoren über LC	900.000
Anzahl Ringe je Rotor	6
Stückzahl Ringe pro Jahr	900.000
Stückzahl Ringe über LC	5.400.000
Taktzeit je Rotor in s	168
Taktzeit je Ring in s	28

Tabelle 11: Grunddaten der Stückzahlkalkulation und Berechnung der Taktzeiten.

Um die folgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung übersichtlicher darstellen zu können, zeigt Tabelle 12 die jeweiligen Abkürzungen der zu vergleichenden Verbindungstechniken. Neben dem konventionellen Verfahren im Vollschnitt werden die technologisch einsetzbaren Verbindungstechniken (Fügegeometrie im Stack-Design, Backlack, Schweißen und die vorteilhafteste Kombination der Verbindungstechniken im Brick-Wall-Design) hinsichtlich ihrer Stückkosten untersucht.

Verbindungstechnik Nr.:	Abkürzung:	Bezeichnung:
Verbindungstechnik 1	V1	Konventionell im Vollschnitt
Verbindungstechnik 2	V2	Fügegeometrie (Stack) in 36° Segmenten
Verbindungstechnik 3	V3	Adhäsion (Backlack) in 72° Segmenten
Verbindungstechnik 4	V4	Schweißen in 72° Segmenten
Verbindungstechnik 5	V5	Kombination in 72° Segmenten

Tabelle 12: Zu vergleichende Verbindungstechniken – Bezeichnungen.

Die Investitionskosten der verschiedenen, in Abhängigkeit der benötigten Verbindungstechnik gewählten, Produktionsanlagen und der Automatisierungsperipherie ist zu Beginn die größte monetäre Belastung, da diese Investition bereits vor den ersten produzierten Bauteilen getätigt werden muss. Vor allem für kleine Zulieferbetriebe können diese Kosten schnell in Bereiche des bisherigen Jahresumsatzes vordringen und somit im Zuge nicht prognostizierbarer Absatzrückgänge in Folge von Krisen existenzbedrohliche Formen annehmen. Im Bereich der Produktion der Rotorringe, können die Investitionskosten je nach angewandter Verbindungstechnik in die Gesamtkosten für die Stanzpresse(n)²⁷, den Ofen, die Laserschweißanlage, den Stack-Rundtakter zum Fügen der Rotorsegmente nach dem Stack-Design und die Kosten für die Transferstraßen und die Automatisierungstechnik addiert und auf die Stückkosten umgerechnet werden.

	V1	V2	V3	V4	V5
Hubzahl Stanze	100	400	200	200	200
Anzahl benötigter Stanzen	0,71	1,77	1,77	1,77	1,77
Stanze in GE	1.200.000	400.000	1.500.000	1.500.000	1.500.000
Gesamt Stanzen in GE	847.602	706.335	2.648.758	2.648.758	2.648.758

Tabelle 13: Berechnung der Investitionskosten für die Stanzen in Geldeinheiten (GE).

Die Gesamtkosten für die Stanzen sind abhängig vom Preis der Stanze und von der kalkulierten Anzahl der Stanzen basierend auf der maximalen Hubzahl in Folge der gewählten Verbindungstechnik (vgl. Tabelle 13). In Bezug auf die Gesamtkosten für die Stanzen ist aus monetärer Sicht die vorteilhafteste Variante die Verbindungstechnik Fügegeometrie, da wegen der verhältnismäßig kleinen Stanzgeometrie kleine kostengünstige Schnellläuferpressen angeschafft werden können. Bei Betrachtung der Gesamtsumme für die Investitionen der Anlagen verursacht die konventionelle Fertigung der Rotorringe die geringsten Kosten, da neben der vergleichbar kostengünstigen Presse nur ein Ofen und dem zu Folge wenige Transferstraßen und Automatisierungskomponenten angeschafft werden müssen. Die verschiedenen Varianten im Brick-Wall-Design sind demnach relativ kostenintensiv, da neben den deutlich höheren Investitionen für

²⁷ Im Folgenden Stanze genannt

die langsam laufenden Pressen²⁸ weitere Anlagen zum Verbinden der Segmente benötigt werden.

Investitionskosten in GE	V1	V2	V3	V4	V5
Gesamt Stanzen	847.602	706.335	2.648.758	2.648.758	2.648.758
Ofen	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000
Laserschweißanlage	0	0	0	1.500.000	0
Stack-Rundtakter	0	350.000	0	0	0
Transferstraße u Automatisierung	1.000.000	1.250.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000
Summe Anlagenkosten	2.347.602	2.806.335	4.148.758	5.148.758	4.148.758
Investanteil an Stückkosten in GE	2,61	3,12	4,61	5,72	4,61

Tabelle 14: Berechnung des Investitionsanteils der Stückkosten.

Neben den Investitionskosten für die Fertigungsanlagen haben die Werkzeugkosten einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Stückkosten.

Werkzeugkosten in GE	V1	V2	V3	V4	V5
<i>Stanzen+Stapeln</i>					
Werkzeugkosten einmalig (Grundaufbau)	100.000	20.000	150.000	150.000	150.000
Werkzeugkosten für Verschleißteile	100.000	20.000	50.000	50.000	70.000
Werkzeugstandzeit in produzierten Teilen	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000
Werkzeuginvest über LC	1.882.000	3.584.000	4.605.000	4.605.000	6.387.000
Werkzeuganteil an Stückkosten	2,09	3,98	5,12	5,12	7,10
<i>Backen</i>					
Anzahl Backwerkzeuge	1	10	1	1	1
Werkzeugkosten für Komponente einmalig	100.000	5.000	100.000	0	100.000
Werkzeugkosten gesamt	100.000	50.000	100.000	0	100.000
Werkzeugstandzeit in produzierten Teilen	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000
Werkzeuginvest über LC	1.080.000	540.000	1.080.000	0	1.080.000
Werkzeuganteil an Stückkosten	1,20	0,60	1,20	0,00	1,20
<i>Schweißen</i>					
Werkzeugkosten für Komponente einmalig	0	0	0	100	0
Werkzeugstandzeit in produzierten Teilen	10000	10000	10000	10000	10000
Werkzeuginvest über LC	0	0	0	54000	0
Werkzeuganteil an Stückkosten	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00
Summe Werkzeuganteil an Stückkosten	3,29	4,58	6,32	5,18	8,30

Tabelle 15: Berechnung des Werkzeuganteils an den Stückkosten.

Grundsätzlich müssen die Werkzeugkosten in zwei Bereiche eingeteilt werden. Das sind zum einen die Kosten für den Grundaufbau des Werkzeuges, der während des gesamten Produktionszeitraumes unverändert bleibt. Zum anderen fallen standzeitabhän-

²⁸ Integration eines Rundtackers zum Positionieren der Segmente nach dem Stanzen

gige Kosten für die Verschleißteile des Werkzeuges an. Im Falle der Rotorfertigung sind die Werkzeugkosten auf die verschiedenen Anlagen zu untergliedern. Nach Addition der Werkzeugkostenanteile an den Stückkosten fällt wiederum auf, dass die konventionelle Fertigung die geringsten Kosten verursacht, gefolgt von der Fertigung nach der Fügegeometrie-Stack-Variante. Deutlich höhere Werkzeugkosten verursachen die verschiedenen Fertigungsvarianten nach dem Brick-Wall-Prinzip.

Materialkosten in GE	V1	V2	V3	V4	V5
<i>Blech</i>					
Materialeinsatz je Rotor in kg	20,00	5,50	6,00	6,00	6,50
Materialkosten	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Materialanteil an Stückkosten	30,00	8,25	9,00	9,00	9,75

Tabelle 16: Berechnung des Materialanteils an den Stückkosten.

Die Materialkosten sind der entscheidende Faktor in der Wirtschaftlichkeitsanalyse der verschiedenen Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung. Der Blecheinsatz je Rotor ergibt sich nach Abbildung 19 (Abschnitt 3.1.1) aus dem Blechausnutzungsgrad der Segmentierungsvarianten. Das berechnete Ergebnis des Materialanteils an den Stückkosten bestätigt die Motivation zur Realisierung eines segmentierten Rotors. Im Optimalfall (Fügegeometrie-Stack-Variante) können die Materialkosten im Vergleich zum konventionellen Rotor (Vollschnitt) um 72,5 % gesenkt werden. Auch bei den Rotoren im Brick-Wall-Aufbau liegt die Reduktion der Materialkosten zwischen 66 % und 70 %.

Um vergleichbare Bedingungen realisieren zu können, wird für die Wirtschaftlichkeitsanalyse bei allen Varianten ein einheitlicher Automatisierungsgrad (benötigtes Personal) und einheitliche Betriebskosten für Instandhaltung, Energie, Logistik etc. angenommen. Als Betriebsanteil werden daher auf die Stückkosten jeweils 1,75 Geldeinheiten aufgeschlagen.

Tabelle 17 zeigt zusammenfassend die kalkulierten Stückkosten der entwickelten Verbindungstechniken. Dabei ist klar ersichtlich, dass der Materialanteil der Stückkosten einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Rotorfertigung hat. Aus monetären Gründen muss daher eine Empfehlung zur Realisierung einer Fertigung für segmentierte Rotoren ausgesprochen werden. Bei der Auswahl der Segmentierungsvarianten bezüglich der Verbindungstechnik ist hinsichtlich der Stückkosten die Verwendung der Variante V2 - Fügegeometrie (Stack) in 36° Segmenten am vorteilhaftesten.

Stückkosten in GE	V1	V2	V3	V4	V5
Investitionsanteil an Stückkosten	2,61	3,12	4,61	5,72	5,28
Werkzeuganteil an Stückkosten	3,29	4,58	6,32	5,18	8,30
Materialanteil an Stückkosten	30,00	8,25	9,00	9,00	9,75
Betriebsanteil an Stückkosten	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Summe Stückkosten	37,65	17,70	21,67	21,78	25,27

Tabelle 17: Berechnung der Summe der Stückkosten.

Ein interessanter Ausblick ist der prognostizierte Verlauf der Stückkosten bei unterschiedlichen Stückzahlenszenarien (siehe Abbildung 84). Bis zu einem Bereich von ca. 50.000 Rotoren pro Jahr wirken sich Schwankungen der Stückzahl signifikant auf die Stückkosten aus, da hier der Investitionsanteil einen überproportionalen Einfluss hat und diese Kosten stückzahlunabhängig getragen werden müssen. Ab einer Stückzahl von 100.000 Rotoren pro Jahr beginnt der Sättigungsbereich der Stückkosten. Der in diesem Bereich relativ niedrige Investitionsanteil reduziert sich bei einer weiteren Zunahme der Stückzahlen nur minimal – die weiteren Stückkostenanteile bleiben nahezu konstant.

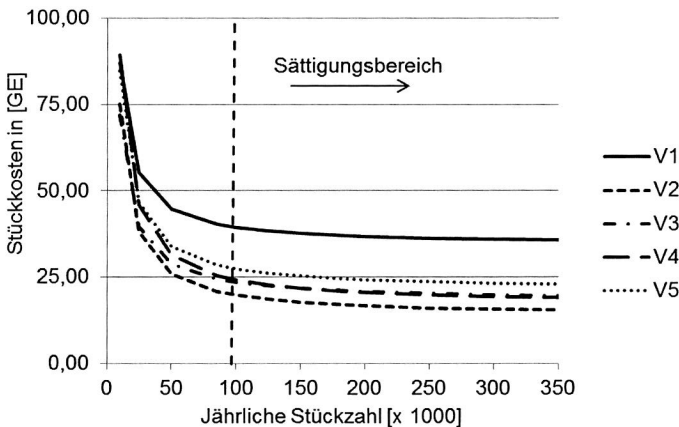


Abbildung 84: Verlauf der Stückkosten bei verschiedenen Stückzahlenszenarien.

5 Entwicklung alternativer Magnetfixierungstechnologien

Nach der in Kapitel 3 durchgeführten Analyse und Bewertung der Prozesse und bisherigen Ansätze zur kostenoptimierten Montage der Magnete, werden drei vielversprechende Ansätze ausgewählt und hinsichtlich ihrer Eignung als Montage- und Fixierungstechnologie in getriebeintegrierten Elektromotoren untersucht. In Abbildung 85 sind die drei Montagetechnologien dargestellt, die im Zuge dieses Kapitels entwickelt und den Anforderungen entsprechend optimiert werden.

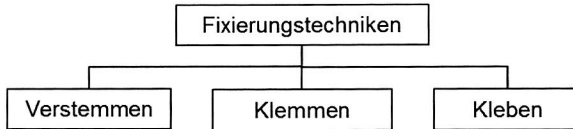


Abbildung 85: Konzepte zur Fixierung von Magneten.

Neben den beiden innovativen Montagetechniken „Verstemmen“ und „Klemmen“ wird auch die konventionelle Montagetechnik „Kleben“ analysiert, um einen ganzheitlichen Überblick der verschiedenen Technologien darzustellen und anschließend eine objektive Bewertung hinsichtlich technischer und monetärer Eignung leisten zu können. Beim Kleben ist, vergleichbar zum Umspritzen, die Montage in zwei Teilschritte Positionieren und Fixieren zu unterteilen. Als Fixierungstechnik können verschiedenste Adhäsionskleber in unterschiedlichen Ausführungsformen als Flanken- oder Taschenklebung Anwendung finden. Im Gegensatz dazu, wird beim Klemmen die Montage in einem Prozessschritt vollzogen, indem die Magnete durch eine entsprechende Passungswahl in die Slots eingepresst werden und somit kraftschlüssig fixiert sind. Beim Verstemmen erfolgt die Fixierung durch Aufbau einer Flächenpressung zwischen Magnet und Blechpaket in Folge einer lokalen plastischen Deformation des Blechpaketes in Richtung der Magneten mittels entsprechend entwickelter Werkzeuge. Je nach Ausführungsform kann das Einlegen der Magneten in die Slots und das anschließende Verstemmen in zwei separaten oder einem kombinierten Prozessschritt erfolgen.

Für die Realisierung einer prozesssicheren Fixierung der Magnete ist die Kenntnis der technologischen Anforderungen an das Gesamtsystem zwingend notwendig. Basierend auf den spezifischen Randbedingungen und Anforderung des Referenzrotors erfolgt die Entwicklung und Optimierung der verschiedenen Magnetfixierungstechnologien. In Abhängigkeit der Randbedingungen und konstruktiven Vorgaben sollen bei einer gleichzeitigen Ableitung der gewonnenen spezifischen Erkenntnisse allgemeine Aussagen zur Eignung der entwickelten Technologien für verschiedenste Rotoren für Hybridanwendungen gewonnen werden. Dafür ist es notwendig, zunächst präzise die auf die Magnete wirkenden Kräfte abzuschätzen und zu verifizieren. Nach den Untersuchungen und

Entwicklungen der verschiedenen Fixierungstechnologien bildet deren wirtschaftliche Analyse den Abschluss dieses Kapitels.

5.1 Analyse der auf die innenliegenden Magnete wirkenden Kräfte

Die wirkenden Kräfte auf einen innenliegenden Magneten im Betrieb eines getriebeintegrierten Elektromotors sind in Axial- und Zentrifugalkräfte zu unterteilen. Dabei muss ein besonderes Augenmerk auf die resultierenden Biegespannungen durch die Zentrifugalkräfte in Folge der gewählten Fixierungstechnologie gelegt werden.

5.1.1 Belastungen aus Axialkräften

In axialer Richtung sollen die Magnete durch die gewählte Fixierungstechnik in ihrer Position im Slot gehalten werden. In Folge des Winkelveersatzes der Rotorsegmente und der Gestaltung des Rotorträgersystems ist ein vollständiges Herausrutschen der Magnete nicht denkbar. Allerdings wären bei einer ungenügend ausgelegten Fixierungstechnik Relativbewegungen des Magneten möglich, da toleranzbedingt ein Höhenunterschied zwischen Magnet und Blechpaket vorliegt. Diese Bewegungen führen zum einen zu einer erhöhten Geräuschentwicklung, zum anderen können sich Magnetpartikel lösen, die im Getriebe zu Schäden führen. Die Auslegung der Fixierungstechnik in axialer Richtung basiert auf den maximal erwartbaren Axialkräften. Diese errechnen sich aus den maximalen Beschleunigungen in axialer Richtung, resultierend aus im Lastenheft definierten Sonderereignissen²⁹ oder in Folge eines Reparaturcrashes³⁰. Für die Auslegung des Referenzrotors werden nach [90] maximale Beschleunigungen von

$$a_{max} = 30 * g \quad (5.1)$$

angenommen. Die daraus resultierenden maximalen Axialkräfte F_{ax} , die auf einen Magneten wirken, errechnen sich dann durch Gleichung 5.2.

$$F_{ax} = m_{mag} * a_{max} = 2,913 \text{ N} \quad (5.2)$$

Das Lastenheft des Referenzrotors fordert eine minimale Haltekraft von $F_H = 225 \text{ N}$. Dies ist mit Erfahrungswerten anderer vergleichbarer Motoren verschiedenster Hersteller und schwer zu berechnenden Einflussfaktoren hinsichtlich Alterung und Vibration im Dauerbetrieb des Fahrzeuges rechtfertigbar³¹. Daher wird in der folgenden Entwicklung der Magnetfixierungstechnologien von einer mindestens erreichbaren Haltekraft $F_H = 225 \text{ N}$ ausgegangen.

²⁹ z. B. Fahrt mit 30 km/h über einen Randstein

³⁰ Bei Blechschäden unterhalb einer definierten Aufprallgeschwindigkeit darf der Antriebsstrang keine Schäden aufweisen

³¹ Vorgabe des Entwicklungslastenheftes des Referenzmotors der Daimler AG

5.1.2 Belastungen aus Zentrifugalkräften und Einfluss der Fixierungstechnologie auf die resultierenden Haltekräfte

Im Konstruktionsprinzip der eingebetteten Magnete werden die wirkenden Zentrifugalkräfte durch den Steg oberhalb des Magneten kompensiert. Nicht zu vernachlässigen sind die Einflüsse der gewählten Fixierungstechnologie auf die Biegefestigkeit der Magneten. In Folge einer unvorteilhaften Wahl der Auflageflächen des Magneten im Slot kann es zu einer Biegebeanspruchung des Magneten kommen. Falls dieser, wie in Abbildung 86 gezeigt, an der Innenseite des Slots flächig anliegt und an der Außenseite des Slots lokal gehalten wird, entsteht eine Dreipunkt-Biegebelastung.

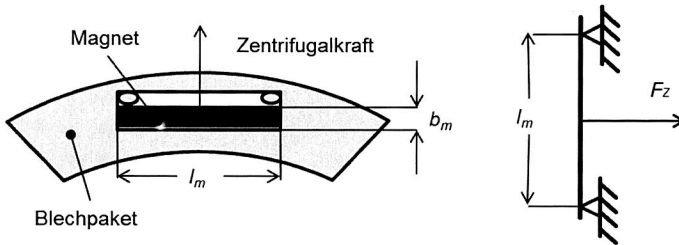


Abbildung 86: Dreipunkt-Biegebelastung. Links: Beispiel. Rechts: Schematische Darstellung.

Die Berechnung der wirkenden Biegespannung σ_b durch den Quotienten des Biegemomentes M_b mit dem Widerstandmoment W_b erfolgt nach [93]. Dabei wird die Position des Magneten im Rotor durch den mittleren Radius $r_{mag} = 109,2 \text{ mm}$ definiert. Für die Berechnung wird die Grenzdrehzahl von 7000 U/min zu Grunde gelegt. Die Maße der Magnete betragen: $b_m = 4,5 \text{ mm}$, $l_m = 25,2 \text{ mm}$ und $h_m = 10,6 \text{ mm}$.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = 105,17 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Wobei

$$M_b = F_{Zmag} * \frac{l}{2} = 3760 \text{ Nmm} \quad (5.4)$$

Mit

$$F_{Zmag} = m_{mag} * r_{mag} * \omega^2 = 579,3 \text{ N} \quad (5.5)$$

Und

$$W_b = \frac{b_m^2 * h_m}{6} = 35,75 \text{ mm}^3 \quad (5.6)$$

Die zulässige Biegespannung σ_{bzul} entspricht der Zugfestigkeit $R_m = 600 \text{ MPa}$ des Magneten. In Abbildung 87 ist der Verlauf der Biegespannung mit zunehmender Drehzahl dargestellt.

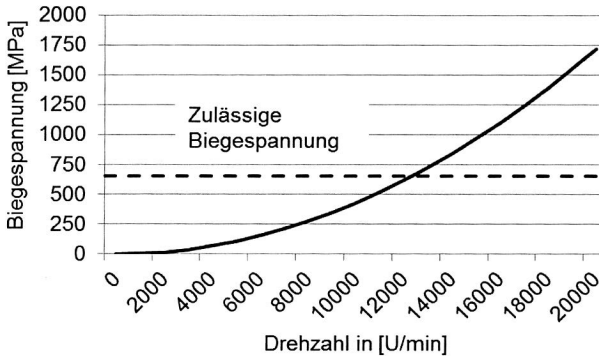


Abbildung 87: Biegespannung in Abhängigkeit der Drehzahl.

Auch im Grenzbereich des Motors wird die zulässige Biegespannung nicht überschritten. Da aber durch Sonderereignisse zusätzliche Belastungen auf den Magneten einwirken können, wird empfohlen, Dreipunkt-Biegebelastungen zu vermeiden. Eine flächige Auflage des Magneten an der Außenseite des Slots sollte bei der Entwicklung der Magnetfixierung angestrebt werden.

5.2 Verstemmen als Magnetfixierungstechnologie

In der Mechanik wird als Verstemmen das Herstellen einer kraft- und formschlüssigen Verbindung zwischen zwei einzelnen Werkstücken durch plastisches Verformen bezeichnet. Die Verformung des Randbereiches mindestens eines der beiden Fügepartner führt zu einer nur zerstörend lösbaren Verkeilung. [115] Vergleichbar dazu sind die Produktionsschritte der Magnetfixierungstechnologie Verstemmen, das Positionieren der Magnete in den Slots und das anschließende punktuelle Umformen des Blechpaketes mittels eines Werkzeuges zum definierten Aufbau einer Flächenpressung zwischen Magnet und Blechpaket. In einem Produktionsschritt kann die Positionierung und Fixierung mit Hilfe eines Kombinationswerkzeuges erfolgen. Gegenüber konventionellen Befestigungstechniken hat die Magnetfixierungstechnologie Verstemmen eine Vielzahl von Vorzügen. Durch die Integration von Prozessen (Positionieren und Fixieren in einem Prozessschritt) können die Fertigungs- und Montagezeiten minimiert werden. Die Eliminierung vermeidbarer Komponenten und Werkstoffe, wie die Kunststoffumspritzung, ist ein weiterer Vorteil. Aus mechanischer Sicht entsteht durch die Fixierungstechnik Verstemmen zwischen Magnet und Blechpaket eine nahezu optimale Flächenpressung. Das Resultat ist eine Steigerung der mechanischen (Dauer-) Festigkeit der Fixierung. Ein weiterer Vorteil der Fixierung des Magneten ohne die Verwendung von Zusatzwerkstoffen ist die prozesssichere und rückstandsfreie Demontage durch Auspressen nach

dem Produktlebensende des Motors. Nach Prüfung können die Magnete in einer „Second Life“ Anwendung wiederverwendet oder sortenrein recycelt werden. [116]

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung der Magnetfixierungstechnologie Verstemmen beschrieben.³² Zunächst erfolgen durch experimentelle Voruntersuchungen der Nachweis der technischen Machbarkeit und die Identifikation prozessrelevanter Parameter. Basierend darauf ist der nächste Schritt die Generierung optimaler Verstemmwerkzeuge mittels nicht linearer Umformsimulationen. Durch experimentelle Parameterstudien können anschließend die exakten Verstemmparameter definiert werden. In abschließenden Toleranzbetrachtungen wird die Prozessfähigkeit der Technologie nachgewiesen.

5.2.1 Experimentelle Voruntersuchungen zur Identifikation prozessrelevanter Parameter

Die Entwicklung der Magnetfixierung Verstemmen bietet zwei große Herausforderungen. Zum einen muss die Konstruktion eines optimalen Werkzeuges hinsichtlich Effizienz und Verschleiß erfolgen. Zum anderen müssen zur Gewährleistung der geforderten Haltekräfte bei minimaler Beschädigung der Lackschicht der Magnete optimale Parameter der Verstemmpunkte definiert werden. Die Gewinnung von Erkenntnissen für die anschließende Optimierung der Verstemmwerkzeuge und die Festlegung der Grenzwerte für die anstehende Parameterstudie sind die Ziele der Voruntersuchungen. Als Startdesign werden für die Durchführung der Vorversuche zwei Start-Werkzeuge (Geo1) mit folgenden prozessrelevanten Parametern gefertigt:

- Halbkugel: Radius = 0,4 mm; Winkel = 25°
- Pyramidenstumpf: Winkel = 25°; Kantenlänge = 0,7 mm [116]

Die Durchführung der Vorversuche und der nachfolgenden Parameterstudie erfolgt mit der Zugprüfmaschine Z20 der Firma Zwick GmbH und dient der Gewinnung genauer Kraft-Weg-Verläufe während der definierten plastischen Verformung des Elektroblesches durch die Werkzeuge. In ersten Voruntersuchungen sollen Grundlageninformationen zur Wechselwirkung Verstemmwerkzeug - Elektroblech generiert werden. Dabei treten erste Verformungen am Einzelblech und am Blechpaket bei Einpresskräften von:

- Halbkugel: Einzelblech = 70 N; Blechpaket = 200 N
- Pyramidenstumpf: Einzelblech = 80 N; Blechpaket = 220 N [116]

³² Bei der Entwicklung der Fixierungstechnik Verstemmen wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Dominik Flum und Herrn cand. Ing. Max Schleemilch unterstützt.

auf. Zudem ergeben die Voruntersuchungen den Zusammenhang zwischen Einpresstiefe, Randabstand und den daraus resultierenden Einpress- und Haltekräften der Magnete. In Abbildung 88 sind die ermittelten Grenzparameter der Parameterkombinationen aufgetragen, bei denen die Magnete entweder gerade noch fixiert oder bereits beschädigt werden. Der Bruch oder die Beschädigungen des Magneten entstehen je nach Werkzeug grundsätzlich bei zu geringem Randabstand und zu großen Einpresstiefen. Gegenteilige Parameter haben als Resultat eine nicht ausreichende Fixierung der Magnete. Ein relevanter Faktor ist ebenso die Anzahl der Verstemmpunkte je Magnet. Des Weiteren können signifikante Unterschiede der Fixierung zwischen einseitiger und beidseitiger Verstemmung beobachtet werden. Basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen können die betrachteten Parameter in Haupt- und Nebenparameter unterteilt werden. [116]

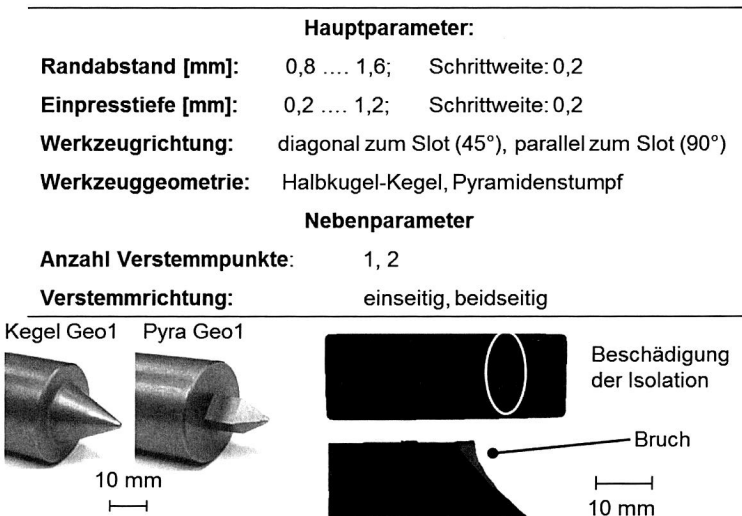


Abbildung 88: Voruntersuchungen: Haupt- und Nebenparameter, Werkzeuge und Beschädigungen der Magnete. [116]

Um einen prozesssicheren Betrieb des Motors zu garantieren, wird für die weiteren Untersuchungen festgelegt, dass nach der Montage mindestens 95 % der Isolation des Magneten unbeschädigt sein muss. Zur Prüfung der Haltekräfte müssen die Magnete bei einseitiger Verstemmung immer in Verstemmrichtung ausgedrückt werden, da in dieser Richtung die geringsten Haltekräfte resultieren. Im Hinblick auf die Verstemmgeschwindigkeit kann bei Geschwindigkeiten bis 1000 mm/min keinen Einfluss auf die Hal-

tekräfte registriert werden. Daher wird in der folgenden Entwicklungsarbeit auf diesen Parameter nicht weiter eingegangen. [116]

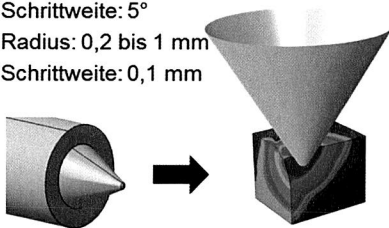
5.2.2 Generierung optimaler Versteformwerkzeuge mittels Umformsimulationen

Eine maximale Effizienz bei einem gleichzeitig minimalen Verschleiß ist das Ziel der Optimierung des Versteformwerkzeuges. Die Effizienz eines Werkzeuges wird durch den Quotienten aus Einpresskraft und Verformung des Bleches definiert. Das Werkzeug ist dann am effizientesten, wenn der Quotient gegen ein Minimum strebt. Die Durchführung erfolgt mittels mechanischer Strukturanalyse mit dem FEM-Simulationsprogramm ABAQUS. Die Besonderheit von ABAQUS sind die Verbindungselemente, mit denen eine Modellierung von Mehrkörpermechanismen innerhalb einer nichtlinearen FEM-Analyse möglich ist. Dadurch kann auch nicht lineares Materialverhalten, wie z. B. die Umformung eines Bleches durch einen Stempel, berechnet werden. [117]

Die Geometriedaten des Halbkugel-Kegelwerkzeuges und des Pyramidenstumpfwerkzeuges werden im Zuge einer Parameterstudie variiert. Zur Sicherstellung reproduzierbarer und vergleichbarer Ergebnisse wird der Abstand vom Rand des Slots des Blechpaketes zur Mittelachse des Halbkugel-Kegelwerkzeuges und zum Rand des Pyramidenstumpfwerkzeuges konstant bei einem Millimeter gehalten. Der Winkel der beiden Werkzeuge wird dabei jeweils von der Mittelachse des Werkzeuges gemessen. Die Parametervariationen der Simulationen für die Optimierung der beiden Werkzeugtypen sind in Abbildung 89 dargestellt. [116]

Parametervariation für Simulation:

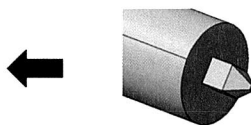
- Winkel: 10° bis 60°
- Schrittweite: 5°
- Radius: 0,2 bis 1 mm
- Schrittweite: 0,1 mm



Halbkugel-Kegelwerkzeug

Parametervariation für Simulation:

- Winkel: 10° bis 60°
- Schrittweite: 5°
- Kantenlänge: 0,4 bis 2 mm
- Schrittweite: 0,2 mm



Pyramidenstumpfwerkzeug

Abbildung 89: Simulation der Werkzeuge – Parametervariationen. [116]

Die Auswertung der Simulationsergebnisse der beiden Werkzeugtypen erfolgt getrennt voneinander, aber nach dem gleichen Prinzip. Bei dem Halbkugel-Kegelwerkzeug (vgl. Abbildung 90) zeigt die Abszisse die verschiedenen Radien der Halbkugel und die Ordinate die Effizienz des Werkzeuges. Aufgetragen sind die Graphen der verschiedenen

Winkel des Kegels. Die höchste Effizienz haben Werkzeuge mit einem Radius zwischen 0,8 und 1 mm und einen Winkel zwischen 10° und 15° (Kegel Geo2). Die Steigerung der Effizienz im Vergleich zum Startwerkzeug (Kegel Geo1) beträgt somit ca. 35 %.

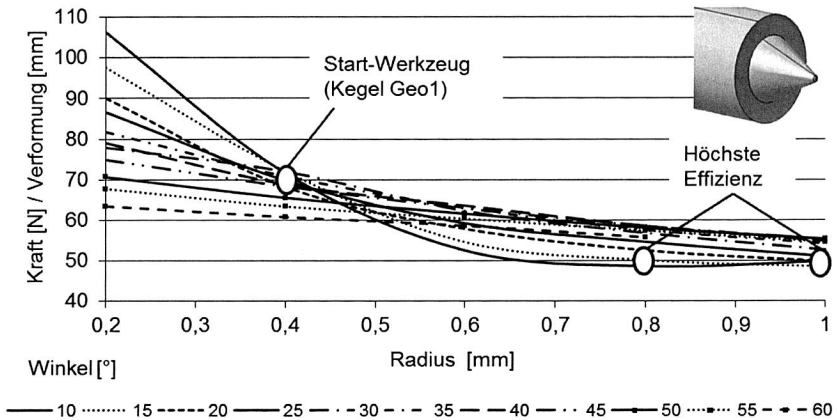


Abbildung 90: Simulationsergebnisse Halbkugel-Kegelwerkzeug. [116]

Nach dem gleichen Prinzip verläuft die Auswertung der Simulationsergebnisse des Pyramidenstumpfwerkzeuges (siehe Abbildung 91).

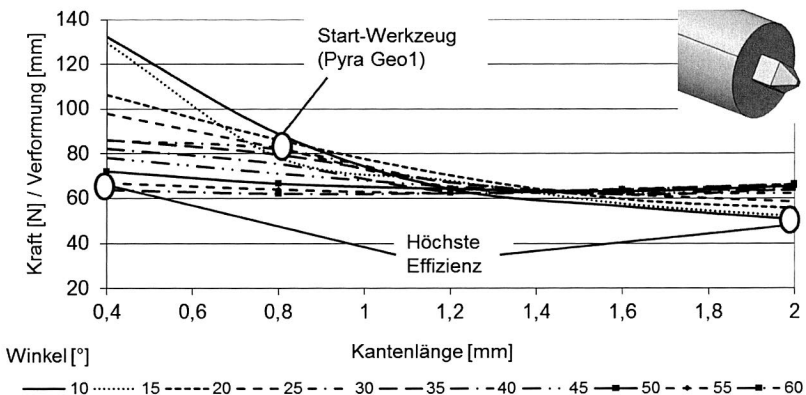


Abbildung 91: Simulationsergebnisse Pyramidenstumpfwerkzeug. [116]

Allerdings beschreibt in diesem Fall die Abszisse die verschiedenen Kantenlängen des Pyramidenstumpfes. Äquivalent zum Kegelwerkzeug steht jede Kurve für einen definierten Winkel der Pyramide. Die effizientesten Parameterkombinationen sind im Gegensatz zum Halbkugel-Kegelwerkzeug beim Pyramidenstumpfwerkzeug gegenläufig. Vorteilhaft sind kleine Winkel in Kombination mit großen Kantenlängen oder große Winkel mit kleinen Kantenlängen. Im Vergleich zum Startwerkzeug (Pyra Geo1) ist bei beiden Varianten eine Steigerung der Effizienz um ca. 33 % möglich. [116] Daher werden für die Durchführung der experimentellen Parameterstudie die drei als „optimal“ bewerteten Werkzeuggeometrien gefertigt. Für die Verfahrensentwicklung der Verstemmparameter erfolgt somit die Erprobung von insgesamt fünf verschiedenen Werkzeugen mit folgenden Parameterwerten:

- Pyra Geo1: Winkel: 25°; Kantenlänge: 0,7 mm
- Pyra Geo2: Winkel: 60°; Kantenlänge: 0,4 mm
- Pyra Geo3: Winkel: 10°; Kantenlänge: 2,0 mm
- Kegel Geo1: Winkel: 25°; Radius: 0,4 mm
- Kegel Geo2: Winkel: 10°; Radius: 1,0 mm

5.2.3 Verfahrensentwicklung der Verstemmparameter

Neben den Verstemmwerkzeugen ist die Konstruktion und Fertigung einer flexiblen Verstemmvorrichtung zur Integration ins Prüfumfeld der Zugprüfmaschine eine weitere Voraussetzung zur Durchführung der Parameterstudie. Die Aufgabe der Vorrichtung ist die Aufnahme und Fixierung der Ringsegmente und deren drehbare Lagerung zur geschwindigkeitsoptimierten Durchführung der Verstemmversuche. [118]

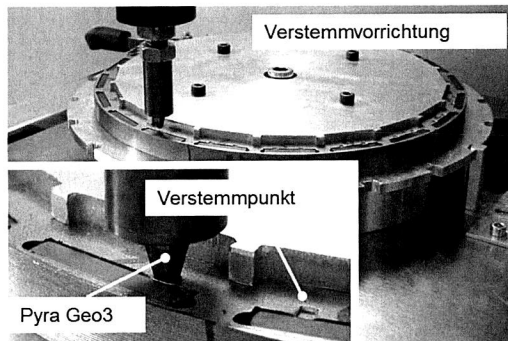


Abbildung 92: Verstemmvorrichtung mit Verstemmung. [116]

Des Weiteren muss die Vorrichtung eine flexible Positionierung im kartesischen Koordinatensystem zur Einstellung eines definierten Randabstandes und die exakte Positionierung entlang des Slots garantieren. Abbildung 92 zeigt die in Betrieb genommene Vorrichtung und eine Verstemmung eines Magneten mit dem Werkzeug „Pyra Geo3“. [116] Der exakte Aufbau der Verstemmvorrichtung ist in [118] nachzulesen.

Basis für die Parameterstudie sind die in den Voruntersuchungen bestimmten Grenzwerte für die Haupt- und Nebenparameter. Ziele der Parameterstudie sind die Gewinnung von Erkenntnissen hinsichtlich des Einflusses und der Wechselwirkungen der verschiedenen Parameter in Abhängigkeit der diversen Werkzeuge und die Ermittlung der optimalen Parameterkombinationen für den Referenzrotor. Zur Gewinnung möglichst präziser Ergebnisse wird der in Abbildung 93 dargestellte Versuchsplan generiert.

Studie [Nr]		Einpresstiefe [mm]:					
Randabstand [mm]:		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
	0,8						
	1,0						
	1,2						
	1,4						
	1,6						

30 Parameterkombinationen pro Studie

↓

Versuchsplan Verstemmen				
	1PE	1PB	2PE	2PB
Pyra Geo1-90	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Studie 4
Pyra Geo1-45	Studie 5	Studie 6	Studie 7	Studie 8
Kegel Geo1	Studie 9	Studie 10	Studie 11	Studie 12
Pyra Geo2-90	Studie 13	Studie 14	Studie 15	Studie 16
Pyra Geo2-45	Studie 17	Studie 18	Studie 19	Studie 20
Pyra Geo3-90	Studie 21	Studie 22	Studie 23	Studie 24
Pyra Geo3-45	Studie 25	Studie 26	Studie 27	Studie 28
Kegel Geo2	Studie 29	Studie 30	Studie 31	Studie 32

Legende: **P** = Verstemmpunkt; **E** = Einseitig; **B** = Beidseitig;
45, 90 = Ausrichtung Werkzeug in [°]; **1, 2** = Anzahl

Abbildung 93: Versuchsplanung Verstemmen. Oben: Aufbau einer Studie. Unten: vollständiger Versuchsplan mit eingebetteten Studien.

Die einzelnen Studien des Versuchsplanes beinhalten dabei jeweils die 30 möglichen Parameterkombinationen aus den Prozessparametern „Randabstand“ und „Einpresstiefe“. Die beschriebene Studie wird, wie in Abbildung 93 dargestellt, für alle Werkzeuge in ihrer jeweiligen Ausrichtung und den möglichen Nebenparameter-Kombinationen abgearbeitet.

Auf Grund der großen Anzahl an durchgeführten Studien erfolgt die Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse exemplarisch mittels ausgewählter Diagramme. Die erzielbaren Haltekräfte (Ordinate) der Parameterkombinationen sind in allen Darstellungen gegen die Einpresstiefe (Abszisse) aufgetragen. Dabei ist der relevante Faktor die erzielbare Haltekraft. Abbildung 94 zeigt exemplarisch den Verlauf der Haltekräfte mit zunehmenden Einpresstiefen bei verschiedenen Randabständen für ein Werkzeug des Typs Pyra Geo1. Die Verformung erfolgt dabei immer beidseitig mit jeweils zwei Verstempunkten in paralleler Ausrichtung.

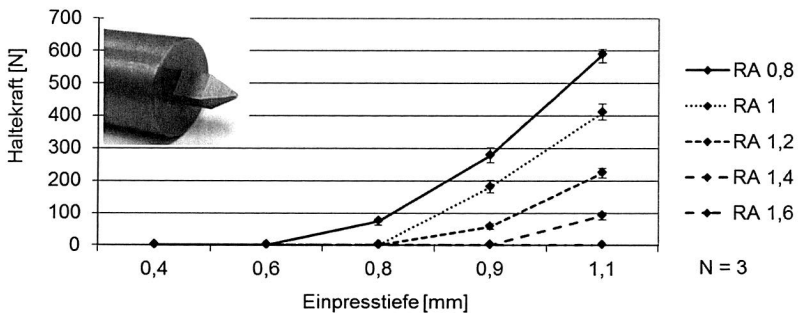


Abbildung 94: Experimentelle Verformungsversuche: Steigerung der Haltekräfte durch Minimierung der Randabstände am Beispiel der Studie 4.

Die höchsten Haltekräfte werden werkzeugunabhängig immer bei maximalen Einpresstiefen erzielt, da so die größten Verformungen des Elektrobleches resultieren. Allerdings sind aus elektromagnetischen Gründen Einpresstiefen $< 1,0$ mm zwingend notwendig, da nur so eine geringe Anzahl an Blechen beschädigt und kontaktiert wird und somit Wirbelstromverluste vermieden werden können. Vergleichbar zu den Einpresstiefen ist, unabhängig von den anderen Parametern bei allen Werkzeugen, die erzielbare Haltekraft immer bei minimalem Randabstand³³ am größten. Dieser sollte bei den vorgegebenen maximalen Einpresstiefen immer mindestens 0,2 mm größer gewählt werden als die halbe Kantenlänge des Pyramidenstumpfes³⁴, da sonst eine Ver-

³³ von der Werkzeugachse zum Rand des Slots gemessen

³⁴ gültig für spitze Winkel

formung des Bleches hin zu den Magneten nicht mehr möglich ist bzw. der Magnet durch die Werkzeuge zerstört wird. Bei den optimierten Halbkugel-Kegelwerkzeugen wird empfohlen, den Randabstand nicht kleiner als den Durchmesser der Halbkugel zu wählen. [116]

Für die Entwicklung und Bewertung der Versteimmung als Magnetfixierungstechnologie sind Kenntnisse über den Einfluss der Anzahl der Versteimpunkte und der Versteimrichtung (einseitige und beidseitige Versteimmung) existentiell. Da für alle Werkzeuge die Parameter kombiniert werden, zeigt Abbildung 95 exemplarisch die Verläufe der Haltekräfte in Abhängigkeit der Einpresstiefe für das Werkzeug des Typs Pyra Geo3. Die einzelnen Graphen sind die jeweils besten Ergebnisse der Studien 21 bis 28 bezogen auf die Parameterwerte Einpresstiefe und Randabstand.

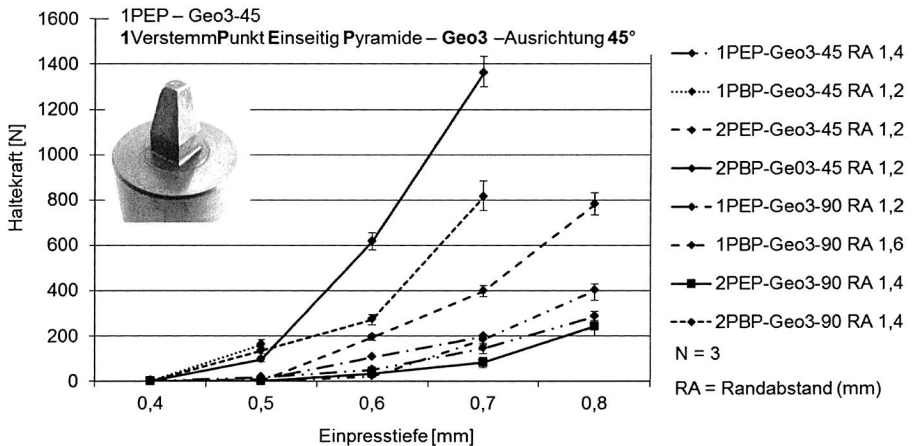


Abbildung 95: Experimentelle Versteimmversuche: Einfluss der Anzahl der Versteimpunkte und der Versteimrichtung des Werkzeuges Pyra Geo3 auf die Versteimmung.

Die größten Haltekräfte erzielen dabei die Magnete, die mit zwei diagonal ausgerichteten Versteimpunkten auf beiden Seiten versteimt werden. Die geringsten Haltekräfte weisen entweder die einseitig versteimten Magnete oder die nur mit einem Versteimpunkt versteimten Magnete auf. Einen signifikanten Einfluss auf die Haltekräfte hat die Ausrichtung des Werkzeuges. Unabhängig von den anderen Parametern sind die Haltekräfte bei einer diagonalen Ausrichtung des Werkzeuges am größten. Die qualitativen Verläufe der Graphen und somit die beschriebenen Erkenntnisse sind bei allen Werkzeugen äquivalent. Um die verschiedenen Werkzeuge quantitativ vergleichen zu können

nen, werden die jeweils besten Parameterkombinationen der Werkzeuge hinsichtlich der Haltekräfte in Abbildung 96 dargestellt.

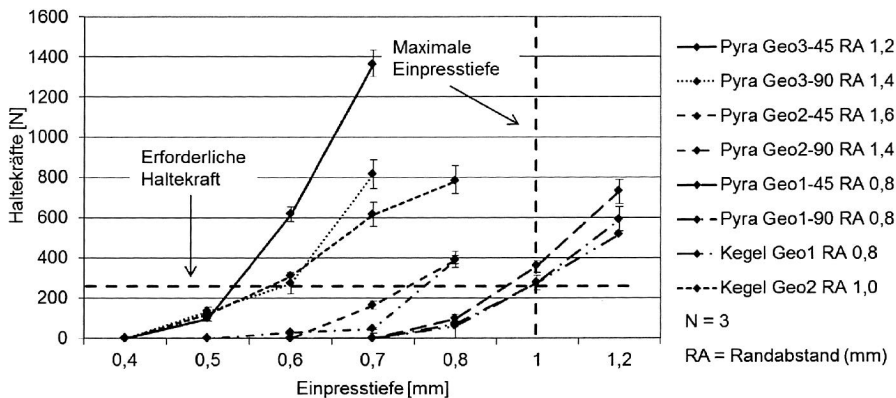


Abbildung 96: Experimentelle Versteummversuche: Haltekräfte der besten Parameterkombinationen. [116]

Die Graphen zeigen jeweils die maximal erzielbaren Haltekräfte – bei einer weiteren Erhöhung der Einpresstiefe ist mit Magnetbrüchen zu rechnen. Die erforderliche Haltekraft zur prozesssicheren Magnetfixierung ist in Abbildung 96 durch eine horizontale gestrichelte Hilfslinie gekennzeichnet. Ebenso ist die geforderte maximale Einpresstiefe durch eine vertikale gestrichelte Hilfslinie dargestellt. Diese beiden Hilfslinien zeichnen ein Fenster auf, in dem die Haltekräfte der Parameterkombinationen liegen müssen, um die Anforderungen zu erfüllen. Die größten Haltekräfte von ca. 1350 N können mit der optimierten „Pyra Geo3“ in diagonaler Ausrichtung und einem Randabstand von 1,2 mm bei einer Einpresstiefe von 0,7 mm generiert werden. Ebenfalls deutlich im Prozessfenster liegen die optimierten „Pyra Geo3“ in paralleler Ausrichtung und die „Kegel Geo2“, wobei die maximalen Haltekräfte deutlich niedriger liegen. Überraschenderweise sind die Ergebnisse der ebenfalls optimierten „Pyra Geo2“ in beiden Ausrichtungen deutlich schlechter als durch die Simulationen erwartet. Allerdings sind die Einpresskräfte auch deutlich niedriger als bei der diagonalen Ausrichtung, weshalb die Effizienz des Werkzeuges vergleichbar ist. Die beiden Startgeometrien (Pyra Geo1 und Kegel Geo1) liegen erwartungsgemäß nahezu komplett außerhalb des geforderten Prozessfensters. [116] Die simulative Optimierung des Werkzeuges und die Durchführung der Parameterstudie führen zu einer Verdopplung der maximalen Haltekräfte im Vergleich zur Startgeometrie bei einer gleichzeitigen Halbierung der Einpresstiefe. Das Werkzeug Pyra Geo3 in diagonaler Ausrichtung ist für eine prozesssichere und recyclinggerechte Magnetmontage bei minimaler Beeinträchtigung des Blechpaketes am besten geeignet.

5.2.4 Toleranzbetrachtung

Zur prozesssicheren und reproduzierbaren Fixierung der Magnete im Blechpaket des Referenzrotors muss, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, eine geeignete Parameterkombination ermittelt werden. Dabei spielen die Fertigungstoleranzen der beteiligten Fügepartner, insbesondere der Magnete (Fertigungstoleranz: 4,3 - 0,15 mm), eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Eine stichprobenartige Vermessung der in der Parameterstudie verwendeten Magnete ergibt eine Breite von 4,22 +/- 0,01 mm. Da mittels dieser Magnetcharge keine Grenzmusterbetrachtung ausgeführt werden kann, wird stattdessen eine alternative Toleranzbetrachtung definiert und durchgeführt. Diese sieht vor, statt der Verwendung von Grenzmustern ein Toleranzfenster von je +/- 0,1 mm der Parameterwerte der Einpresstiefe und des Randabstandes aufzuspannen. Basierend auf den Fertigungstoleranzen entspricht dies den minimalen (kleinster Magnet in größten Slot) und maximalen (größter Magnet in kleinsten Slot) Grenzmustern. Als Ausgangsparameter für die Durchführung der Toleranzbetrachtung werden die vorteilhaftesten, in Abschnitt 5.2.3 ermittelten Parameterwerte (Einpresstiefe: ET = 0,7 mm und Randabstand: RA = 1,2 mm) des Werkzeuges Pyra Geo3 in diagonalen Ausrichtung verwendet. Für die Durchführung der Toleranzbetrachtung wird der in Tabelle 18 dargestellte Versuchsplan erstellt. Auf Basis der Erkenntnisse aus Abschnitt 5.2.3 ist beim Werkzeug Pyra Geo3 der minimale Randabstand = 1,2 mm. Zudem darf die Einpresstiefe den Wert ET = 0,75 mm nicht überschreiten, da sonst ein Bruch oder eine Beschädigung der Magnete die Folge ist.

	RA = 1,2 mm	RA = 1,3 mm	RA = 1,4 mm	RA = 1,5 mm
ET = 0,5 mm	N = 6	N = 6	N = 6	N = 6
ET = 0,55 mm	N = 6	N = 6	N = 6	N = 6
ET = 0,6 mm	N = 6	N = 6	N = 6	N = 6
ET = 0,65 mm	N = 6	N = 6	N = 6	N = 6
ET = 0,7 mm	Ausgangs- kombination	N = 6	N = 6	N = 6
ET = 0,75 mm		N = 6	N = 6	N = 6

RA = Randabstand, ET = Einpresstiefe, N = Anzahl Verstemmungen

Tabelle 18: Versuchsplanung Toleranzbetrachtung Verstemmen.

Der zu definierende optimale Verstemmpunkt für den Referenzrotor darf innerhalb des Toleranzfensters weder zu Bruch gehen, noch die geforderte Haltekraft unterschreiten.

ET: 0,5 mm	ET: 0,55 mm	ET: 0,6 mm	ET: 0,65 mm	ET: 0,7 mm	ET: 0,75 mm
RA: Kraft [N]:	RA: Kraft [N]:	RA: Kraft [N]:	RA: Kraft [N]:	RA: Kraft [N]:	RA: Kraft [N]:
1,2 479	1,2 746	1,2 846	1,2 968	1,2 1002	1,2 1357
1,2 489	1,2 721	1,2 822	1,2 850	1,2 1120	1,2 1420
1,2 471	1,2 611	1,2 721	1,2 780	1,2 1095	1,2 1359
1,2 459	1,2 665	1,2 730	1,2 914	1,2 1123	1,2 1390
1,2 467	1,2 671	1,2 786	1,2 909	1,2 1127	1,2 1327
1,2 423	1,2 692	1,2 801	1,2 889	1,2 1099	1,2 1335
1,3 245	1,3 521	1,3 675	1,3 715	1,3 716	1,3 860
1,3 268	1,3 479	1,3 594	1,3 695	1,3 733	1,3 845
	1,3 489	1,3 622	1,3 722	1,3 746	1,3 887
1,3 254	1,3 493	1,3 579	1,3 687	1,3 712	1,3 833
1,3 264	1,3 474	1,3 578	1,3 698	1,3 768	1,3 849
1,3 231	1,3 510	1,3 654	1,3 702	1,3 745	1,3 803
	1,4 267	1,4 421	1,4 476	1,4 589	1,4 731
	1,4 284	1,4 435	1,4 498	1,4 605	1,4 759
	1,4 276	1,4 403	1,4 487	1,4 632	1,4 723
	1,4 301	1,4 416	1,4 445	1,4 591	1,4 715
	1,4 294	1,4 389	1,4 465	1,4 611	1,4 756
	1,4 295	1,4 395	1,4 489	1,4 586	1,4 743
		1,5 247	1,5 267	1,5 384	1,5 455
		1,5 246		1,5 391	1,5 482
			1,5 276	1,5 376	1,5 510
			1,5 276	1,5 387	1,5 497
		1,5 264	1,5 268	1,5 379	1,5 475
	1,5 254	1,5 266	1,5 257	1,5 402	1,5 501

RA = Randabstand [mm], ET = Einpresstiefe [mm].

Minimale Haltekraft: 225 N

> 225 N

Abbildung 97: Ergebnis der experimentellen Toleranzbetrachtung mit dem Werkzeug Pyra Geo3 in diagonalen Ausrichtung.

Abbildung 97 zeigt das Ergebnis der Toleranzbetrachtung und somit die optimale Parameterkombination des Verstemmpunktes. Dabei entsprechen die grün markierten Felder den Parameterkombinationen, bei denen reproduzierbar die geforderte Haltekraft erfüllt und gleichzeitig keiner der Magnete beschädigt wird. Die optimale Parameterkombination zum Verstemmen der Magnete des Referenzrotors mit je zwei Verstemmpunkten je Seite hat folgende Werte:

- Einpresstiefe: 0,65 mm
- Randabstand: 1,3 mm.

5.3 Klemmen als Magnetfixierungstechnologie

Kraftschlüssiges Klemmen der Magnete in den Slots der Blechpakete von Rotoren ist eine Sonderform des Pressfügens. In dieser mechanischen Verbindungstechnik ent-

steht nach dem Fügen an den Verbindungsstellen eine Pressspannung. Somit können Längs- und Querkräfte kraftschlüssig übertragen werden. Vorteilhaft sind die funktionsbedingte gute Selbstzentrierung und die Eignung der Verbindungstechnik für stoß- und wechselartige Beanspruchungen. [108] Vergleichbar zum Verstemmen hat die Fixierungstechnologie des Klemmens eine Vielzahl von vorteilhaften Eigenschaften gegenüber konventioneller Magnetfixierungstechnologien. Der Entfall vermeidbarer, nicht funktionsrelevanter Komponenten, wie die Kunststoffumspritzung ist nur einer von mehreren Vorzügen. Prozessbedingt findet eine Integration der beiden Montageschritte Positionieren und Fixieren statt. Neben den dadurch resultierenden temporären Vorteilen können aus monetärer Sicht Ersparnisse durch den Entfall von Produktionsanlagen generiert werden. Nachteilig hingegen wirken sich die Mehrkosten durch die prozessbedingt aufwendige Sensorik und Steuerung der Klemmanlage aus. Aus mechanischer Sicht entsteht durch die Fixierungstechnik Klemmen eine nahezu optimale Flächenpressung. Das Resultat ist eine Steigerung der mechanischen (Dauer-) Festigkeit der Fixierung. Als Risiko ist die Beschädigung der Magnetbeschichtung einzustufen, wodurch Korrosion entstehen könnte. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit zur Optimierung des Wirkungsgrades des Rotors, da im Blechpaket zum Einspritzen des Kunststoffes kein Luftspalt vorgesehen werden muss. Ein weiterer Vorteil der Fixierung des Magneten ohne die Verwendung von Zusatzwerkstoffen ist die prozesssichere und rückstandsfreie Demontage durch Auspressen nach dem Produktlebensende des Motors.

Die Entwicklung der Magnetfixierungstechnologie Klemmen wird in diesem Abschnitt beschrieben. Durch analytische Berechnung der Fixierungstechnik werden zunächst die Randbedingungen, Abmaße und Toleranzbereiche des Pressverbandes definiert. Anschließend erfolgen durch experimentelle Voruntersuchungen der Nachweis der technischen Machbarkeit und die Identifikation prozessrelevanter Parameter. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden durch experimentelle Parameterstudien der Einfluss der Überdeckung auf die Haltekräfte und die Beschichtung der Magneten untersucht. Gleichzeitig sollen optimale Prozessparameter für die Fixierung der Magnete im Referenzrotor mittels der Fixierungstechnik Klemmen ermittelt werden. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet der Ausblick auf alternative Prozessvarianten zum Klemmen von beschichteten Magneten.

5.3.1 Analytische Berechnung des Pressverbandes

Zur Realisierung eines Pressverbandes muss die Breite b_m des Slots den Anforderungen entsprechend reduziert werden. Die Berechnung des Toleranzbereiches zum Aufbau der erforderlichen Flächenpressung gibt als Ergebnis die passende Breite des Slots aus. In der Literatur ist allerdings keine genormte Berechnungsform zur Auslegung kraftschlüssiger nicht-zylindrischer Pressverbände bekannt. Daher kann nur eine näherungsweise Berechnung nach dem Prinzip der kraftschlüssigen zylindrischen Pressver-

bänder nach [92] und [93] erfolgen. Für die Berechnung zylindrischer Pressverbände sind der Fugendurchmesser d_F und die wirkende Fügefläche A_m die relevanten Größen. Die notwendige Flächenpressung p_{min} bei einer maximalen Belastung mit der Axialkraft F_{ax} berechnet sich mit der näherungsweise wirkenden Fügefläche A_m (vgl. Abbildung 98) wie folgt:

$$p_{min} = \frac{F_{ax} * S_F}{A_m * \mu} \quad (5.7)$$

Mit $A_m = 2 * (h_m * l_m) = 603,2 \text{ mm}^2 \quad (5.8)$

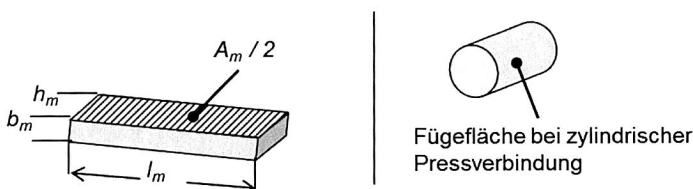


Abbildung 98: Fügeflächen: Links: Wirkende Flächen des Magneten. Rechts: Zylinder.

Abbildung 99 zeigt je nach geforderter Axialkraft die berechnete notwendige Flächenpressung in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten mit einem Sicherheitsfaktor $S_F = 1,5$. Im Falle des Referenzrotors liegt die notwendige Flächenpressung bei $p_{min} = 2,9 \text{ MPa}$ mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,2$ nach [30].

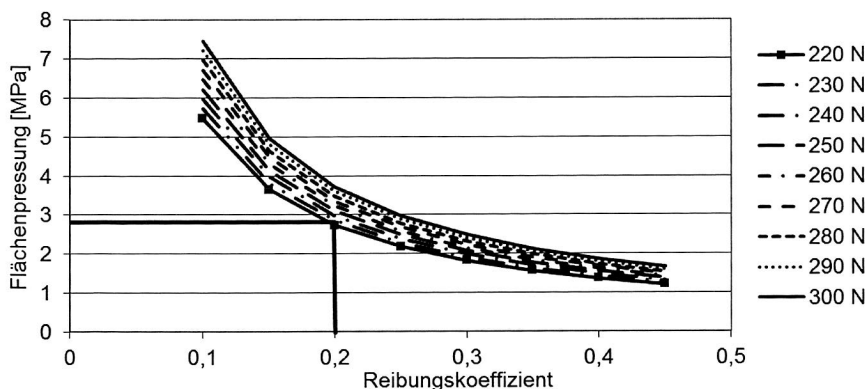


Abbildung 99: Berechnung der notwendigen Flächenpressung in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten.

Für die Berechnung der zulässigen Flächenpressungen p_{FzulA} und p_{FzulI} der beiden beteiligten Werkstoffe ist die Kenntnis der jeweiligen Vergleichsspannungen σ_{vA} und σ_{vI} notwendig. Diese unterscheiden sich durch die werkstofftechnischen Eigenschaften der Fügepartner. Dabei wird für duktile Werkstoffe (z. B. Elektroblech) die jeweilige Streckgrenze R_e und der Sicherheitsfaktor $S_f = 1,1 \dots 1,3$ verwendet. Für spröde Werkstoffe (z. B. Magnet) findet die Zugfestigkeit R_m und der Sicherheitsfaktor $S_B = 2 \dots 3$ Anwendung.

$$\sigma_{vA} = \frac{R_e}{S_f} = 253,8 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{vI} = \frac{R_m}{S_B} = 300 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

Des Weiteren ist die Kenntnis der Durchmesser verhältnisse Q_A und Q_I erforderlich. Hierfür sind der wirkende Fugendurchmesser d_f , der Außendurchmesser der Nabe d_A und der Innendurchmesser der Hohlwelle d_I relevant. Diese müssen unter Berücksichtigung der Abbildung 100 näherungsweise berechnet werden.

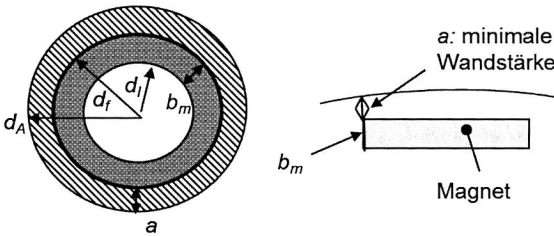


Abbildung 100: Links: Verschiedene Durchmesser einer Flächenpressung. Rechts: Relevante Größen der Magnetverbindung.

Für die näherungsweise Berechnung des wirkenden Fugendurchmessers d_f ist eine Umrechnung des Umfanges U_W einer Welle auf den wirkenden „Umfang“ U_{Mag} des Magneten erforderlich. Dies entspricht den in einer Flächenpressung wirkenden Flächen des Magneten.

$$U_{mag} = 2 * l_m = 52 \text{ mm} \quad (5.11)$$

$$U_W = d_f * \pi \quad (5.12)$$

$$U_W = U_{mag} \quad (5.13)$$

Einsetzen von Gleichung 5.11 in Gleichung 5.12 liefert den wirkenden Fugendurchmesser d_f des Magneten.

$$d_f = \frac{U_{mag}}{\pi} = 16,56 \text{ mm} \quad (5.14)$$

Analog zum Fugendurchmesser verläuft die Berechnung des Außendurchmessers d_A und des Innendurchmessers d_I . Dabei entspricht die minimale Wandstärke a des Steges oberhalb des Magneten der Breite der Nabe und die Wandstärke b des Magneten der Breite der Hohlwelle.

$$d_A = \frac{U_A}{\pi} = \frac{2 * (l_m + a)}{\pi} = 17,19 \text{ mm} \quad (5.15)$$

$$d_I = \frac{U_I}{\pi} = \frac{2 * (l_m - b_m)}{\pi} = 13,82 \text{ mm} \quad (5.16)$$

Somit sind die Durchmessererhältnisse Q_A und Q_I berechenbar.

$$Q_A = \frac{d_f}{d_A} = 0,96 \quad (5.17)$$

$$Q_I = \frac{d_I}{d_f} = 0,80 \quad (5.18)$$

Damit sind die zulässigen Flächenpressungen für die beiden Fügepartner zu berechnen.

$$p_{FzulA} = \sigma_{vA} * \frac{1 - Q_A^2}{\sqrt{3 + Q_A^4}} = 10,12 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

$$p_{Fzull} = \sigma_{vI} \frac{1 - Q_I^2}{2} = 54 \text{ MPa} \quad (5.20)$$

Da beide zulässigen Flächenpressungen deutlich größer sind als die notwendige Flächenpressung ist aus analytischer Sicht die technische Machbarkeit nachgewiesen. Durch die Berechnung des kleinsten Mindestübermaß \check{U}_u und des größten zulässigen Übermaß \check{U}_o lassen sich der Bereich der Überdeckung und damit die notwendige Breite des Slots kalkulieren. Dabei setzt sich das kleinste Mindestübermaß \check{U}_u aus dem kleinsten Haftmaß Z_k und der Glättung G zusammen. Das kleinste Haftmaß entspricht dabei dem Produkt aus der notwendigen Flächenpressung p_{min} , dem Fugendurchmesser d_f und der Summe der inneren und äußeren Hilfsgrößen K_A und K_I . Die beiden Hilfsgrößen berechnen sich mit den entsprechenden Poissonzahlen und E-Moduli wie folgt:

$$K_A = \frac{(1 + \nu_A) + (1 - \nu_A) * Q_A^2}{E_A * (1 - Q_A^2)} = 0,000184 \quad (5.21)$$

$$K_I = \frac{(1 - \nu_I) + (1 + \nu_I) * Q_I^2}{E_I * (1 - Q_I^2)} = 0,0000287 \quad (5.22)$$

Dies ergibt ein kleinstes Haftmaß Z_k :

$$Z_k = p_{min} * d_f * (K_A + K_I) = 0,0096 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Die aus dem Fügevorgang resultierende Glättung der beiden Fügepartner berechnet sich mit Hilfe der gemessenen Rauhtiefen des Elektrobleches $R_{ZA} = 0,05 \text{ mm}$ und des Magneten $R_{ZI} = 0,01 \text{ mm}$.

$$G = 0,8 * (R_{ZA} + R_{ZI}) = 0,048 \text{ mm} \quad (5.24)$$

Damit ist das kleinste Mindestübermaß \ddot{U}_U zu berechnen.

$$\ddot{U}_U = Z_k + G = 0,0576 \text{ mm} \quad (5.25)$$

Äquivalent dazu setzt sich das größte zulässige Übermaß \ddot{U}_O aus dem größten Haftmaß Z_G und der Glättung G zusammen.

$$Z_G = p_{FzulA} * d_f * (K_A + K_I) = 0,0356 \text{ mm} \quad (5.26)$$

$$\ddot{U}_O = Z_G + G = 0,0836 \text{ mm} \quad (5.27)$$

Die Überdeckung von Blechpaket (Slot) und Magnet muss daher rein rechnerisch zwischen 0,0576 mm und 0,0836 mm liegen. Dies würde bei einer mittleren Magnetbreite von 4,22 mm einer Slotbreite von 4,136 mm bis 4,162 mm entsprechen. Diese analytische Berechnung ist allerdings nur gültig für Magnete ohne Beschichtung, da diese zumindest teilweise abgeschabt werden kann und somit die analytischen Resultate verfälscht werden. Zur Validierung der analytischen Berechnung der Magnetfixierung und zur Gewinnung von Erkenntnissen zum Verhalten beschichteter Magnete sind daher experimentelle Untersuchungen notwendig.

5.3.2 Experimentelle Voruntersuchungen

Das Ziel der experimentellen Vorversuche ist der Nachweis der Prinziptauglichkeit und der Definition des Spektrums der zu untersuchenden Slotbreiten. Erste Versuche mit einer manuell betriebenen Handhebelpresse zeigen die prinzipielle Machbarkeit der Magnetmontage, wobei auf eine exakte Positionierung der Magnete besonders geachtet werden muss.

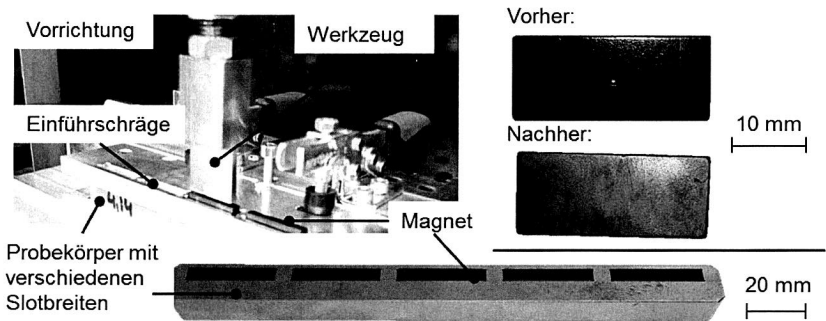


Abbildung 101: Links: Entwickelte Vorrichtung. Rechts: Magnete vor und nach dem Klemmen. Unten: Probekörper für die Entwicklung der Technologie.

In Folge dessen sind die Konstruktion und der Aufbau einer flexiblen Vorrichtung zur prozesssicheren Positionierung und Führung der Magnete erforderlich. Die Vorrichtung dient zur Aufnahme der zu untersuchenden Probekörper und ist flexibel auf der für die Durchführung der Studie verwendeten Zugprüfmaschine montierbar. Einführschrägen garantieren die Positionierung der Magnete oberhalb der Slots. Bezüglich der Haltekräfte sind die geforderten Werte bereits in den ersten Versuchen erreicht. Allerdings sind, wie in Abbildung 101 zu erkennen, deutliche Unterschiede der Beschädigung der Beschichtung feststellbar. Neben den Verlaufskurven der Haltekräfte in Abhängigkeit der Überdeckung sollte äquivalent die Beschädigung der Magnetbeschichtung betrachtet werden. Basierend auf den beschriebenen Erkenntnissen werden für die Entwicklung der Technologie Probekörper mit Slotbreiten von 4,14 mm bis 4,24 mm in Schritten von 0,02 mm gefertigt.

5.3.3 Entwicklung der Technologie

Ziel der Entwicklungsarbeit zur Technologie Klemmen ist die Generierung von Erkenntnissen hinsichtlich der Abhängigkeit der Überdeckung auf die Einpress- und die Haltekräfte. Des Weiteren soll der Einfluss der magnetischen Kräfte aktiver Magnete im Gegensatz zu passiven Magneten erörtert werden. Eine Beurteilung der Beschädigung der Magnete in Abhängigkeit der Überdeckung schließt diesen Abschnitt ab.

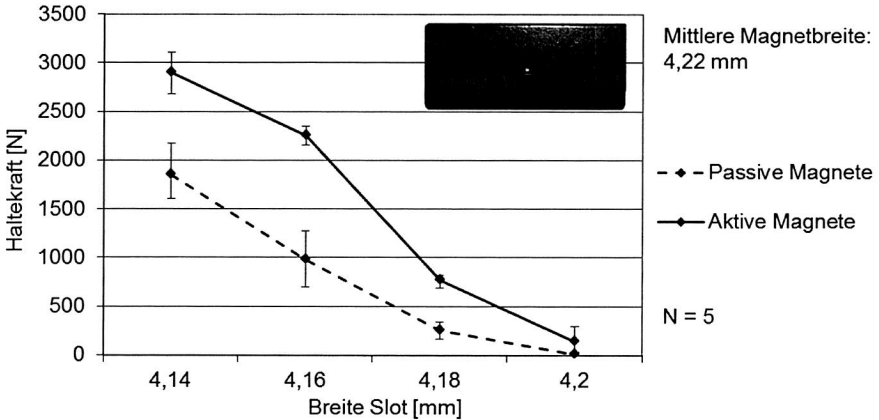


Abbildung 102: Experimentelle Messung der Haltekraften passiver und aktiver Magnete in Abhängigkeit der Breite der Slots.

In Abbildung 102 sind als Ergebnis der Studie die Verlaufskurven der Haltekraften (äquivalenter Verlauf der Einpresskräfte) aktiver und passiver Magnete in Abhängigkeit der Überdeckung gegeneinander aufgetragen. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die aktiven Magnete durchwegs höhere Haltekraften aufweisen, selbst in Bereichen der Übergangspassung. Dies ist durch die magnetischen Wechselwirkungen mit dem metallischen Probekörper zu erklären, wodurch zusätzliche Haltekraften in Folge der Magnetkräfte generiert werden. Die Haltekraften steigen jeweils mit abnehmender Slotbreite linear an, ab einer Slotbreite von 4,18 mm mit einer größeren Steigung. Bei Nichtberücksichtigung der Beschichtung (Schichtdicke 0,01 mm) beginnt ab diesem Wert die in Abschnitt 5.3.1 kalkulierte minimal notwendige Überdeckung, ab welchem die erforderliche Presspassung tragfähig wird. Ab einer Slotbreite von 4,18 mm werden die geforderten Haltekraften von 225 N reproduzierbar erreicht.

Bei Analyse der Beschädigungen der Magnetbeschichtung in Folge des Einpressens fällt auf, dass bereits ab einer Slotbreite, die der Breite des Magneten entspricht, leichte Fehlstellen auftreten. Ab einer Überdeckung von 0,02 mm (entspricht der Gesamtschichtdicke des Lackes) treten starke Beschädigungen bis zum kompletten Entfall der Beschichtung auf. Oberhalb des in Abschnitt 5.3.1 berechneten größten zulässigen Übermaßes kann es zu Brüchen der Magnete oder zu einer plastischen Verformung des Blechpaketes kommen. Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen die entwickelte näherungsweise Berechnung „nicht zylindrischer Pressverbände“.

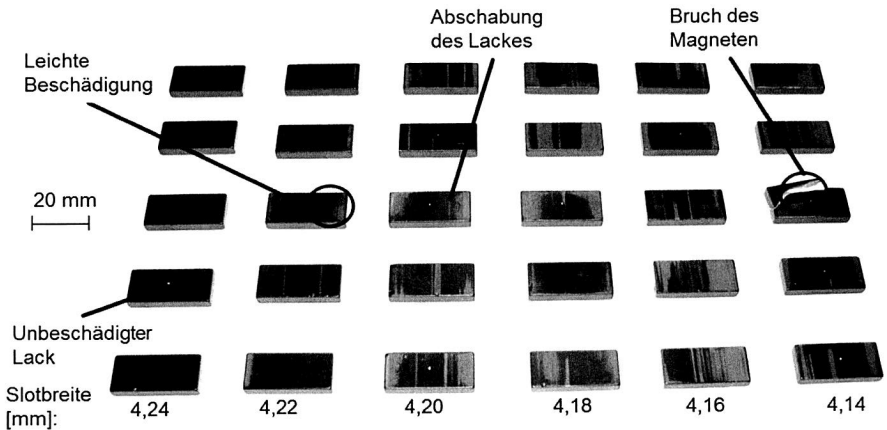


Abbildung 103: Beschädigung der Beschichtung in Folge der experimentellen Messung der Haltekräfte in Abhängigkeit der Breite des Slots (vgl. Abb. 102).

Zusammenfassend ist die Technologie Klemmen für beschichtete Magnete ohne zusätzliche Entwicklungsschritte nicht realisierbar. Grund hierfür sind die unter Serienbedingungen nicht tolerierbaren Beschädigungen der Beschichtung. Hinsichtlich der Festigkeit können die Anforderungen erfüllt werden, weshalb diese Technologie für unbeschichtete Magnete durchaus eine interessante Alternative darstellt.

5.3.4 Alternative Prozessvarianten zum Klemmen von beschichteten Magneten

Um beschichtete Magnete beschädigungsfrei fixieren zu können, bedarf es der Entwicklung und Anwendung alternativer Prozessvarianten. Einen ersten Vorschlag nimmt die klassische Technologie des thermischen Fügens vorweg. Dabei soll der zu verarbeitende Magnet einer Kühlung auf eine definierte Temperatur unterzogen und anschließend in den Slot des erwärmten Blechpaketes eingeschoben werden. In Folge der thermischen Anpassung auf Raumtemperatur soll der Magnet mit dem Blechpaket einen Presssitz generieren. Um innerhalb der in der Komponentenqualifizierung vorgegebenen Temperaturbereiche zu bleiben, kann der Magnet ($\alpha_{mag} = 3,5 \cdot 10^{-6}/K$) [53] auf maximal $-40^\circ C$ abgekühlt und das Blechpaket ($\alpha_{BP} = 11,8 \cdot 10^{-6}/K$) [119] auf maximal $160^\circ C$ erwärmt werden. Durch Addition der nach [93] berechneten Längenänderungen Δl_{mag} und Δl_{BP} der beiden Fügepartner lässt sich die gesamte Längenänderung abschätzen.

$$\Delta l_{mag} = l_0 \cdot \alpha_{mag} \cdot \Delta T = 0,0009 \text{ mm} \quad (5.28)$$

$$\Delta l_{BP} = l_0 \cdot \alpha_{BP} \cdot \Delta T = 0,0068 \text{ mm} \quad (5.28)$$

$$\Delta l_{ges} = \Delta l_{mag} + \Delta l_{BP} = 0,0078 \text{ mm} \ll \ddot{U}_U \quad (5.29)$$

Da die gesamte Längenänderung deutlich kleiner ist als das kleinste Mindestübermaß, kann diese Prozessvariante für den Referenzrotor nicht angewendet werden.

Als weiteren Lösungsvorschlag kann die vom Autor in [120] entwickelte Prozessvariante Anwendung finden. Dabei wird der Magnet mit einer zusätzlichen Opferschicht versehen, bzw. mit einer dickeren Lackschicht angeliefert. Durch das Einpressen in den Slot wird ein gewisser Teil der Lackschicht abgeschabt, bis eine Flächenpressung entsteht. Der Magnet bleibt vollständig isoliert. Um den Nachweis der Prinziptauglichkeit zu erbringen, werden konventionelle Magnete mit verschiedenen Lackschichtdicken³⁵ in 0,05 mm Schritten versehen und die Einpress- und Haltekräfte beim Fügen in die Slots (Breite $b_s = 4,5 \text{ mm}$) des Referenzrotors gemessen. Abbildung 104 zeigt qualitativ vergleichbare Verläufe der Einpress- und Haltekräfte, wobei die Einpresskräfte geringfügig höher ausfallen, da neben dem Aufbau der Flächenpressung bestimmte Kraftkomponenten zum „Abschaben“ der Opferschicht benötigt werden.

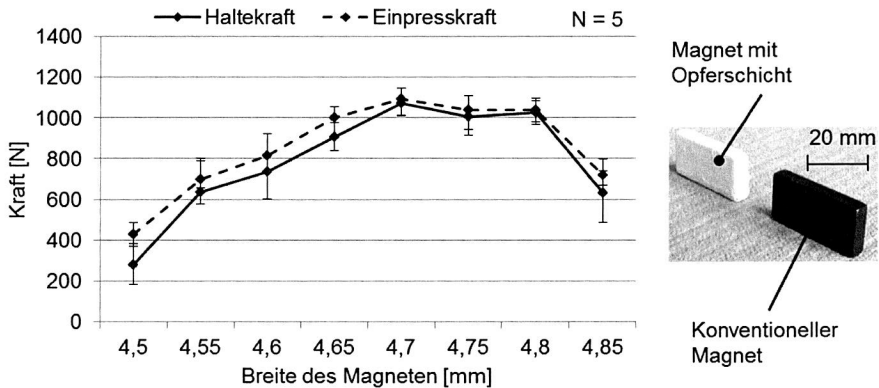


Abbildung 104: Experimentelle Messung der Halte- und Einpresskräfte von Magneten mit Opferschicht in Abhängigkeit der Schichtdicke.

Bis zu einer Überdeckung von 0,2 mm steigen die jeweiligen Kräfte linear an – die Opferschicht wird gleichmäßig abgetragen, ohne die konventionelle Beschichtung des Magneten zu beschädigen. Die Kräfte liegen ab einer Überdeckung von 0,05 mm reproduzierbar oberhalb der vorgegebenen Haltekraft von 225 N. Ab einer Überdeckung von 0,3 mm fallen die Kräfte deutlich ab, da in Folge des Abschabens der verhältnismäßig dicken Opferschicht diese auf einer Seite vollständig „abgesprengt“ wird und so-

³⁵ Gesamtbreite der Magnete inklusive Lackschicht von 4,5 mm bis 4,8 mm

mit einer inhomogenen Kraftverteilung resultiert. Zudem sind erste Beschädigungen der konventionellen Beschichtung ersichtlich. Daher wird empfohlen, die Opferschicht nur bis zu einer maximalen Überdeckung von 0,3 mm anzuwenden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine prinzipielle Tauglichkeit dieser Alternativtechnologie gegeben ist, diese aber hinsichtlich Qualifizierung der Opferschicht und Bedenken gegenüber Restschmutzanforderungen keine Serienreife aufweist. Daher besteht Bedarf in nachfolgenden Arbeiten diese Technologie weiterzuentwickeln.

5.4 Kleben als Magnetfixierungstechnologie

Wie in Kapitel 3 und der Literatur beschrieben, zählt das Kleben von Magneten zu den konventionellen Magnetfixierungstechnologien. Insbesondere in Arbeiten zur automatisierten Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten wurde viel Forschungsarbeit in die Fixierungstechnologie Kleben investiert. Zum besseren Verständnis und zum monetären und technologischen Vergleich mit den in Abschnitt 5.2 und 5.3 entwickelten Fixierungstechnologien wird in diesem Abschnitt das Kleben von eingebetteten Magneten als Fixierungstechnik genau analysiert.³⁶

Die Klebetechnik kann dabei in zwei grundsätzliche Verfahren (siehe Abbildung 105) unterteilt werden – dem Taschenkleben und dem Flankenkleben. Beim Flankenkleben besteht die Möglichkeit der Differenzierung in der Art der Klebstoffdosierung durch Verstreichen und Raupenauftrag. Die Dosierung des Klebstoffes erfolgt dabei vor der Positionierung des Magneten im Slot des Blechpaketes. Wie in Abbildung 105 zu erkennen, befindet sich beim Taschenkleben der Magnet während dem Dosiervorgang bereits im Slot des Blechpaketes.



Abbildung 105: Dosierungstechniken beim Magnetkleben.

Beide Klebetechnologien sind unter Serienbedingungen vollautomatisiert darstellbar. Vorteilhaft gegenüber dem konventionellen Umspritzen mit Kunststoff ist der deutlich

³⁶ Bei der Entwicklung der Fixierungstechnik Kleben wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. David Scheufler unterstützt.

geringere Investitionsbedarf für die automatisierte Dosiereinrichtung. Zudem können die Materialkosten reduziert werden, da beim Dosieren des Klebstoffes ein Ausnutzungsgrad von nahezu 100 % vorliegt. Nachteilig sind die längeren Aushärtezeiten und die Zusatzkosten für Investitionen und Energie für die Durchlauföfen zum beschleunigten Aushärten des Klebstoffes.

Zur Abschätzung der Haltekräfte sind analytische Berechnungen nicht zielführend, da in dieser spezifischen Anwendung sowohl Adhäsionskräfte als auch schwer zu definierende Reibkräfte wirken. Die Reibkräfte resultieren aus der entstehenden Flächenpressung in Folge der Aushärtung des Klebstoffes. Um Aussagen zur Festigkeit der Fixierungstechnologie Kleben zu generieren, werden in diesem Abschnitt empirische Untersuchungen mit verschiedenen Kleb- und Dichtstoffen durchgeführt. Ein erster Schritt ist dabei die Konstruktion einer speziellen Vorrichtung und die Auswahl geeigneter Klebstoffe. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Haltekräfte in Abhängigkeit der Dosierungstechnik am Beispiel des Referenzrotors.

5.4.1 Konstruktion einer Klebevorrichtung und Auswahl der Klebstoffe

Die speziellen Anforderungen des Klebeprozesses machen die Konstruktion einer Klebevorrichtung notwendig. Um eine reproduzierbare Klebung zu garantieren, ist die Position des Magneten im Slot des Blechpaketes die relevante Stellgröße. Dieser sollte immer parallel zur Oberfläche des Blechpaketes liegen und während des Aushärteprozesses diese Position nicht verlassen. Die entwickelte Vorrichtung dient der Aufnahme des Blechpaketes und sichert diese gegen Verdrehen. Wie in Abbildung 106 zu erkennen, befinden sich unterhalb der Slots Stellschrauben, die nach dem Positionieren der Magnete diese axial halten. Als Werkstoff wird Aluminium gewählt, da dieser den Anforderungen entsprechend temperaturfest und gleichzeitig nicht magnetisch ist.

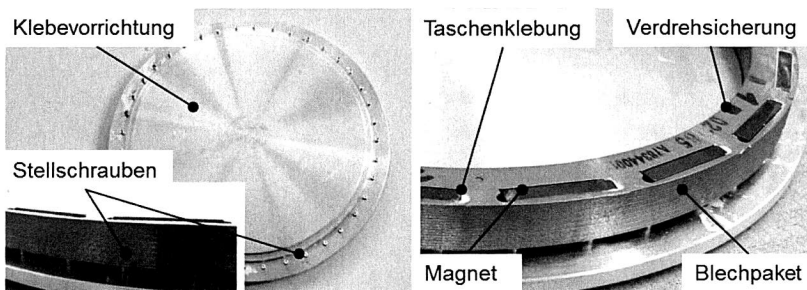


Abbildung 106: Konstruierte Klebevorrichtung mit geklebten Magneten.

Zur Ermittlung der Haltekräfte findet die Zugprüfmaschine Zwick Z200 und die in Abschnitt 5.2 beschriebene Vorrichtung Anwendung. Auf Empfehlung der Fa. Henkel AG

werden für die Durchführung der Studie der 2-Komponenten-Epoxidklebstoff Loctite 9492 Hysol [121] und der 1-Komponenten-Epoxidklebstoff Loctite 9514 Hysol [122] ausgewählt.

5.4.2 Experimentelle Untersuchungen der Haltekräfte

Aus verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Motoren ist die Injektion von Klebstoff in die Flusssperren (Taschen) eingebetteter Magnete bekannt. In einer ersten Versuchsreihe werden daher die beiden empfohlenen Klebstoffe an Hand dieses konventionellen Verfahrens bezüglich ihrer resultierenden Haltekräfte verglichen. Ein mögliches monetäres Einsparpotential ist dabei die einseitige Fixierung der Magnete mit nur einer Tasche. Diesbezüglich sollen in dieser Versuchsreihe die Haltekraftdifferenzen zwischen einseitiger und zweiseitiger Fixierung der Magnete ermittelt werden. Da sich, wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, die Festigkeitseigenschaften der Klebstoffe unter Temperatureinfluss ändern, erfolgt die Ermittlung der Haltekräfte bei Raum- (RT) und Betriebstemperatur (BT).

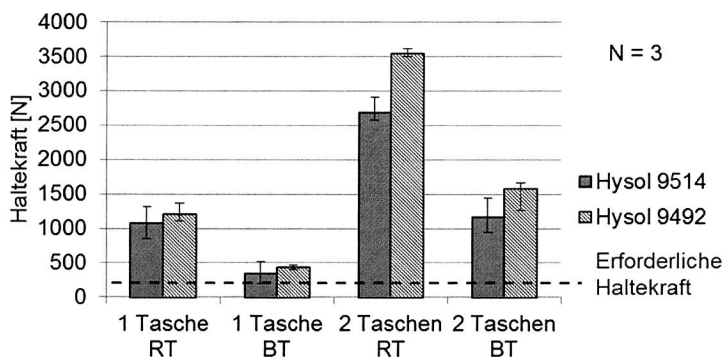


Abbildung 107: Ergebnisse der Zugversuche: Vergleich der Haltekräfte verschiedener Taschenklebungen bei Raum- (RT) und Betriebstemperatur (BT).

Die Auswertung der in Abbildung 107 dargestellten Ergebnisse zeigt beim Vergleich der Fixierung mit einer oder zwei Taschen eine annähernde Verdopplung der Haltekräfte bei Verwendung der „Zwei-Taschen“-Lösung. Zu erwarten war die deutliche Reduzierung der Haltekräfte bei Betriebstemperatur um ca. 50 %. Bei einer Fixierung durch nur eine Tasche liegt die ermittelte Haltekraft bei beiden geprüften Klebstoffen nur im Bereich der erforderlichen Haltekraft von 225 N. Daher wird dringend empfohlen, trotz möglicher monetärer Vorteile, auf die „Ein-Taschen“-Lösung zu verzichten und konsequent die Fixierung mit zwei Taschen zu forcieren. Beim Vergleich der beiden Klebstoffe erzielt der Hysol 9492 durchwegs höhere Haltekräfte und wird daher zur Reduktion

des Versuchsaufwandes für die weiteren Untersuchungen als alleiniger Klebstoff ausgewählt.

Eine Alternative zur Taschenklebung ist die Flankenklebung mit den beiden Dosierungsvarianten „Raupenauftrag“ und „Verstreichen“. Äquivalent zur Taschenklebung wird die einseitige und zweiseitige Flankenklebung bei Raum- und Betriebstemperatur verglichen.

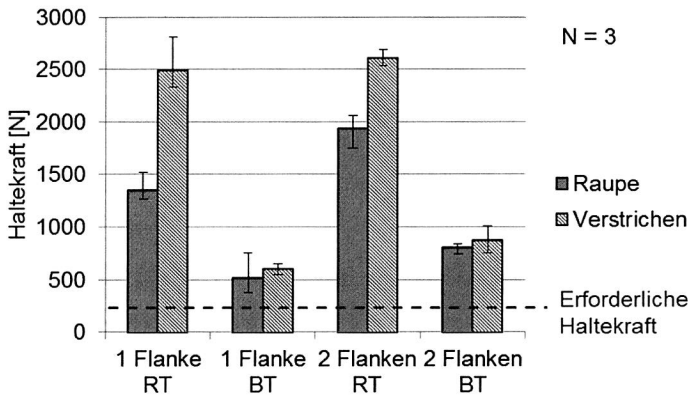


Abbildung 108: Ergebnisse der Zugversuche: Vergleich der Haltkräfte verschiedener Flankenklebungen bei Raum- und Betriebstemperatur.

Die Steigerung der Haltkräfte bei einer Erhöhung der Klebefläche von ein auf zwei Flanken ist tendenziell ersichtlich, fällt aber deutlich geringer aus, als die Ergebnisse der Taschenklebung erwarten lassen. Vergleichbar ist allerdings die Reduktion der Haltkräfte bei einer Prüfung bei Betriebstemperatur. Der Vergleich der beiden Dosierungsvarianten zeigt deutliche Vorteile der Variante „Verstreichen“. Kausal ist die geringere Klebefläche bei einem mittigen vollzogenen Raupenauftrag. Die Analyse der ausgepressten Magnete bestätigt den Verdacht der Verteilung des mittig aufgetragenen Klebstoffes ausschließlich entgegen der Einführrichtung in den Slot. Ein Auftrag der Raupе am unteren Rand des Magneten lässt daher eine flächige Verteilung des Klebstoffes, vergleichbar dem „Verstreichen“, vermuten. Somit wären äquivalente Haltkräfte erzielbar. Obwohl die einseitige Flankenklebung bei quantitativer Betrachtung deutlich oberhalb der erforderlichen Haltkräfte liegt, muss die Empfehlung dennoch zur zweiseitigen Flankenklebung tendieren, da der zusätzliche Aufwand vergleichsweise gering ausfällt und ein Absinken der Haltkräfte in Folge von Alterungseinflüssen zu erwarten ist.

In der abschließenden Studie zum Kleben von Magneten findet ein Vergleich der empfohlenen Varianten der Taschen- und Flankenklebung mit einer kombinierten Taschen- und Flankenklebung statt. Die Abbildung 109 zeigt die gemessenen Haltekräfte bei Raum- und Betriebstemperatur.

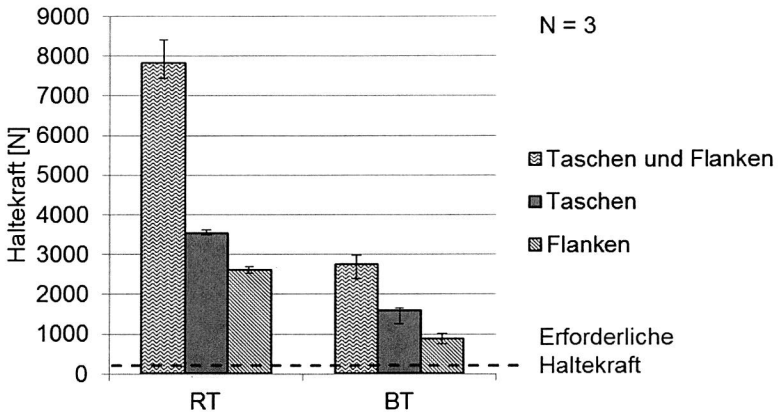


Abbildung 109: Ergebnisse der Zugversuche: Vergleich der empfohlenen Flanken- und Taschenklebung mit einer kombinierten Flanken- und Taschenklebung.

Durch die Anwendung der kombinierten Flanken- und Taschenklebung können die erzielbaren Haltekräfte, im Vergleich zu den empfohlenen Varianten, nahezu verdoppelt werden. Da selbst bei Betriebstemperatur die erzielbaren Haltekräfte die erforderlichen Haltekräfte um mehr als den Faktor 10 übertreffen, wäre am Beispiel des Referenzrotors die kombinierte Flanken- und Taschenklebung überdimensioniert. Beim Vergleich der empfohlenen Varianten sind hinsichtlich der Haltekräfte deutliche Vorteile bei der Taschenklebung zu sehen. Daher ist in einer Serienapplikation die vorteilhafteste Dosierungstechnik die zweiseitige Taschenklebung.

5.5 Wirtschaftliches Potential der untersuchten Fixierungstechnologien

Vergleichbar zu der in Abschnitt 4.8 durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der entwickelten Verbindungstechniken, erfolgt die Analyse des wirtschaftlichen Potentials der untersuchten Fixierungstechniken für Permanentmagnete. Da die Randbedingungen im Vergleich zu den Verbindungstechniken unverändert bleiben, gelten weiterhin die in Tabelle 11 aufgelisteten Grunddaten der Stückzahlkalkulation zur Berechnung der Taktzeiten.

Um die folgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung übersichtlicher darstellen zu können, zeigt Tabelle 19 die jeweiligen Abkürzungen der zu vergleichenden Fixierungstechniken. Neben dem konventionellen Verfahren durch Umspritzen werden die entwickelten Magnetfixierungstechniken (Verstemmen, Klemmen und Kleben) hinsichtlich ihrer Stückkosten analysiert.

Magnetfixierungstechnik Nr.	Abkürzung	Bezeichnung
Magnetfixierungstechnik 1	M1	Konventionell durch Umspritzen
Magnetfixierungstechnik 2	M2	Verstemmen
Magnetfixierungstechnik 3	M3	Klemmen
Magnetfixierungstechnik 4	M4	Kleben

Tabelle 19: Zu vergleichende Magnetfixierungstechniken – Bezeichnungen.

Da die diversen Fixierungsverfahren im Hinblick auf die benötigten Anlagen deutliche Unterschiede aufweisen, ist eine detaillierte Aufgliederung der Kosten erforderlich. Einzig das Portalsystem mit integriertem Rundtakter zum Positionieren der Magnete ist bei allen Verfahren vergleichbar. Ein signifikanter Unterschied besteht insbesondere bei der zugehörigen Sensorik, der Regelungstechnik und der Greiferapplikation bei Anwendung der Fixierungstechnik Klemmen, da hier ein Höchstmaß an Präzision bei gleichzeitig deutlich höheren Kräften zum Einpressen der Magnete erforderlich ist. Tabelle 20 zeigt die jeweiligen Investitionsanteile an den Stückkosten der verschiedenen Fixierungstechniken. Die geringsten Stückkosten weist dabei die Fixierungstechnik Verstemmen auf – die höchsten die Fixierungstechnik Kleben, da hier eine zusätzliche Fertigungsstation samt Transferstraßen und Automatisierungstechnik integriert werden muss.

Investitionskosten in GE	M1	M2	M3	M4
Portalsystem mit Greifer und Rundtakter	500.000	500.000	1.000.000	500.000
Spritzgussmaschine	750.000	0	0	0
Klebedosiereinrichtung	0	0	0	350.000
Absaugeinrichtung	0	0	250.000	0
Ofen	0	0	0	350.000
Presse	0	500.000	0	0
Transferstraße und Automatisierung	500.000	500.000	500.000	750.000
Summe Anlagenkosten	1.750.000	1.500.000	1.750.000	1.950.000
Investitionsanteil an Stückkosten in GE	1,94	1,67	1,94	2,17

Tabelle 20: Berechnung des Investitionsanteils der Stückkosten.

Neben den Investitionskosten für die Fertigungsanlagen haben die Werkzeugkosten einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Stückkosten. Grundsätzlich müssen die Werkzeugkosten in zwei Bereiche eingeteilt werden. Dies sind zum einen die Kosten für den Grundaufbau des Werkzeuges, der während des gesamten Produktionszeit-

raumes unverändert bleibt. Zum anderen fallen standzeitabhängige Kosten für die Verschleißteile des Werkzeuges an.

Werkzeugkosten in GE	M1	M2	M3	M4
Werkzeugkosten einmalig (Grundaufbau)	50.000	25.000	25.000	0
Werkzeugkosten für Verschleißteile	200.000	5.000	5.000	20.000
Werkzeugstandzeit in produzierten Teilen	500.000	20.000	50.000	50.000
Werkzeuginvest über LC	2.210.000	1.375.000	565.000	2.160.000
Werkzeuganteil an Stückkosten in GE	2,46	1,53	0,63	2,40

Tabelle 21: Berechnung des Werkzeuganteils an den Stückkosten.

Bei Betrachtung der Werkzeugkosten, insbesondere für die Verschleißteile, fallen explizit die hohen Kosten des Spritzgusswerkzeuges auf. Diese werden zwar durch die relativ lange Werkzeugstandzeit teilweise kompensiert. Dennoch ist das Resultat ein, im Vergleich zum Verstemmen oder Klemmen, deutlich höherer Werkzeuganteil an den Stückkosten. Am vorteilhaftesten ist dabei die Fixierungstechnik Klemmen, da die äußerst simplen Werkzeuge in einem vergleichbar niedrigen Werkzeugkostenanteil resultieren. Die Fixierungstechnik Verstemmen rangiert im Hinblick auf die Werkzeugkosten im Mittelfeld, da durch die verschleißanfalligen, aber kostengünstigen Verstemmwerkzeuge eine sehr geringe Werkzeugstandzeit die Folge ist.

Die final zu betrachtenden Kostenanteile sind die in Tabelle 22 dargestellten Material- und Betriebskosten. Da bei den Fixierungstechnologien Verstemmen und Klemmen keine zusätzlichen Materialkosten anfallen, sind hier die Vorteile klar verteilt. Die etwas geringeren Materialkostenanteile beim Kleben, im Vergleich zum Umspritzen, sind die Folge des zusätzlich benötigten Kunststoffes für den Anguss.

Materialkosten in GE	M1	M2	M3	M4
Materialeinsatz je Bauteil in kg	0,60	0,00	0,00	0,50
Materialkosten in GE/kg	5,00	0,00	0,00	5,00
Materialanteil an Stückkosten in GE	3,00	0,00	0,00	2,50
Betriebskosten				
Betriebskosten p.a	300.000	100.000	150.000	220.000
Personal (Einrichter) in MJ	0,5	0,1	0,1	0,5
Personal (Bediener) in MJ	0,1	0,1	0,1	0,1
Personal- + Betriebskosten p.a. in GE	335.000	111.000	161.000	255.000
Betriebsanteil an Stückkosten in GE	2,23	0,74	1,07	1,70

Tabelle 22: Berechnung des Material- und Betriebskostenanteils an den Stückkosten.

Die ebenfalls deutlich höheren Betriebskostenanteile der Fixierungstechniken Umspritzen und Kleben resultieren aus dem deutlich höheren Energiebedarf und den höheren Personalkosten in Folge der Notwendigkeit des Einfahrens der Anlagen nach Produktionspausen.

Tabelle 23 zeigt zusammenfassend die kalkulierten Stückkosten der entwickelten Magnetfixierungstechniken. In allen Anteilen der Stückkosten sind die Fixierungstechniken, die ohne zusätzliches Material und mit einfachen Werkzeugen auskommen, deutlich kostengünstiger. Einzig bei den Investitionen für die Fertigungsanlagen sind die Stückkostenanteile bei allen untersuchten Varianten vergleichbar. Daher muss aus wirtschaftlichen Gründen die Empfehlung zur Verwendung der Magnetfixierungstechniken Verstemmen oder Klemmen ausgesprochen werden. Eine Festlegung auf ein aus wirtschaftlicher Sicht optimales Fixierungsverfahren kann auf Grund der nur minimalen monetären Vorteile der Fixierungstechnik Klemmen nicht erfolgen.

Stückkosten in GE	M1	M2	M3	M4
Investmentanteil an Stückkosten	1,94	1,67	1,94	2,17
Werkzeuganteil an Stückkosten	2,46	1,53	0,63	2,40
Materialanteil an Stückkosten	3,00	0,00	0,00	2,50
Betriebsanteil an Stückkosten	2,23	0,74	1,07	1,70
Summe Stückkosten	9,63	3,93	3,65	8,77

Tabelle 23: Berechnung der Summe der Stückkosten.

6 Entwicklung alternativer Rotorträgersysteme

Die in Kapitel 3 durchgeführte Analyse und Bewertung der Einzelprozesse der Fertigung und Montage des Referenzrotors hatte neben weiteren Verfahren und Komponenten das Rotorträgersystem als zu optimierender Kostentreiber identifiziert. Daher werden in diesem Kapitel zwei alternative Rotorträgersysteme (vgl. Abbildung 110) konzipiert, entwickelt und als Demonstratoren aufgebaut. Bei beiden Konzepten wird der Rotortopf durch Rotorscheiben ersetzt, die je nach Konzept über Schaftschrauben oder Einlagen verbunden werden. Mittels dieser Komponenten erfolgt die Übertragung des Drehmoments form- oder kraftschlüssig.

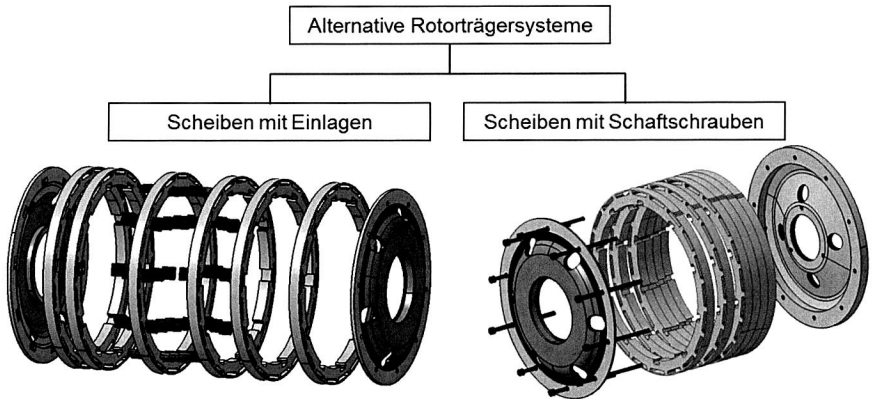


Abbildung 110: Konzepte alternativer Rotorträgersysteme.

Dabei ist zu beachten, dass hier ausschließlich Konzepte entwickelt und analytisch berechnet werden, da experimentelle Untersuchungen hinsichtlich Vermessung der elektromagnetischen Eigenschaften und der mechanischen Belastungen einen geometrisch veränderten Prüfstands Aufbau notwendig machen, und dies den Umfang dieser Arbeit deutlich überschreiten würde. Der Aufbau von Demonstratorrotoren der beiden entwickelten Konzepte soll hingegen den Nachweis der technischen Machbarkeit hinsichtlich Fertigung und Montage geben und eine Anregung für weiterführende Entwicklungsarbeiten liefern. Die Ziele der Konzeptionen sind, neben der Reduzierung der Fertigungskosten durch die Verringerung des Werkstoffbedarfs und der Verwendung einfacher geometrischer Formen, die Reduktion der monetären und temporären Montageaufwände durch geringere Anlageninvestitionen und ein montagegerechtes Design der Komponenten. Letztlich soll durch alternative Rotorträgersysteme auch die Qualifizierung der Prozesse vereinfacht und beschleunigt werden. Dies kann durch eine form- oder kraftschlüssige Übertragung des Drehmoments und einer definiert einstellbaren Schrägung realisiert werden.

6.1 Rotorscheiben mit Schachtschrauben als Rotorträgersystem

In den Patentanmeldungen [86], [87] und [88] ist das Grundkonzept des topflosen Rotorträgersystems beschrieben. Wie in Abbildung 111 zu erkennen, erfolgt dabei die formschlüssige Übertragung des Drehmoments über Bolzen oder Schachtschrauben, deren Durchmesser und Anzahl entsprechend den Anforderungen gewählt werden müssen. Zur Integration der erforderlichen Bohrungen können durch den Entfall des Rotortopfes die geometrischen Abmaße des Innendurchmessers des Blechpaketes denen des Rotortopfes angeglichen werden. Die Platzierung der Bolzen bzw. Schachtschrauben findet somit in hinsichtlich des magnetischen Flusses irrelevanten Bereichen statt. Es ist zu beachten, dass bei einer vorteilhaften Verwendung des Gleichteilkonzeptes³⁷ keine Schrägung des Rotors einstellbar ist. Ursächlich ist der geringe Schrägungswinkel von $1,5^\circ$.

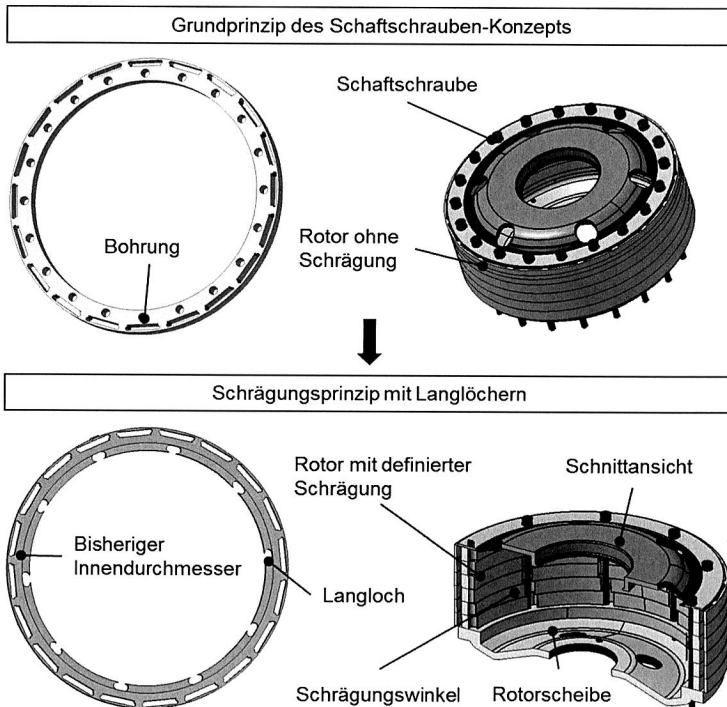


Abbildung 111: Varianten des Schachtschraubenkonzepts. Oben: Grundprinzip. Unten: Schrägungsprinzip.

³⁷ nur ein Stanzwerkzeug, somit sind alle Bleche gleich

Daher ist eine Positionierung einer der Schrägungsschritte entsprechenden Anzahl an Bohrungen unterhalb der Magnetslots nicht möglich. Um eine Schrägung des Rotors zu realisieren, müssen in einer vorteilhaften Weiterentwicklung die Bohrungen im Blechpaket durch radiale Langlöcher ersetzt werden. Die Länge der Langlöcher entspricht dabei dem maximalen Winkelversatz der Schrägung. Folglich ist ein Wechsel der formschlüssigen zu einer kraftschlüssigen Drehmomentübertragung notwendig, da kein durchgängiger Formschluss aller Blechpakete aufgebaut werden kann. Der Kraftschluss durch Reibung resultiert aus der Flächenpressung zwischen den Blechpaketen mittels drehmomentgesteuerter Verschraubung der beiden Rotorscheiben.

Inhalt dieses Abschnittes ist, neben der analytischen Auslegung der kraftschlüssigen Drehmomentübertragung, folglich der Aufbau und die Bewertung verschiedener Demonstratorrotoren hinsichtlich Konzepttauglichkeit und Montage.

6.1.1 Analytische Berechnung der Drehmomentübertragung

Zur Auslegung der Schaftschrauben und der Langlöcher ist eine analytische Berechnung des erforderlichen Kraftschlusses notwendig. Da die Schraube zu den am häufigsten und vielseitigsten verwendeten Maschinen- und Verbindungselementen zählt, ist diese in den verschiedenartigsten Formen herstellbar und genormt. Für die Auswahl und Auslegung ist daher die genaue Funktion der Schraube als Befestigungs-, Bewegungs- oder Dichtungsschraube relevant. Gemeinsam haben alle Schraubenvarianten die formschlüssige Paarung des Gewindestifts mit Außengewinde und dem Bauteil mit Innengewinde (oftmals Mutter). Für die Herstellung von Spannverbindungen sind Befestigungsschrauben mit Schaftanteil die vorteilhafteste Alternative. Die Drehbewegung der Schraube führt dabei zum Verspannen von zwei oder mehreren Bauteilen, indem die kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt wird. Dies führt zu einer Kompensation der Betriebskraft in axialer Schraubenrichtung und zum Aufbau eines Reibschlusses zwischen den Kupplungspartnern. [123]

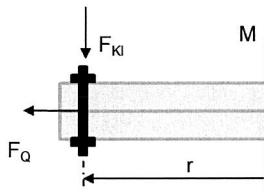


Abbildung 112: Prinzipiskezze der wirkenden Kräfte und Momente.

Für die Vorauslegung der Schraubenverbindung kann der erforderliche Schraubendurchmesser mit Hilfe von TB 8-13 [92] grob vorausgewählt werden. Im beschriebenen Betriebsfall ist die quer wirkende Betriebskraft F_Q auf den nächsthöheren Tabellenwert aufzurunden. Die wirkende Querkraft F_Q ist abhängig von der Position der Schrauben

und dem wirkenden Drehmoment M (vgl. Abbildung 112) und berechnet sich nach Gleichung 6.1. Die Auslegung erfolgt beispielhaft mit einem Radius von $r_r = 95 \text{ mm}$.

$$F_Q = \frac{M}{r_r} = 3,16 \text{ kN} \quad (6.1)$$

Die Berechnung der erforderlichen Klemmkraft F_{Kl} ist abhängig vom Reibkoeffizienten ($\mu = 0,1$) und von der Anzahl der verwendeten Schrauben z_s und berechnet sich nach Gleichung 6.2.

$$F_{Kl} = \frac{F_Q}{\mu * z_s} \quad (6.2)$$

Nach TB 8-13 können unter Berücksichtigung der Minimalanforderungen entweder zehn Schrauben vom Typ M5-12.9 oder 20 Schrauben vom Typ M4-10.9 verwendet werden. Die radiale Position kann dabei flexibel bis zu einem Wert von $r_r = 101,5 \text{ mm}$ verändert werden. Zur Absicherung unter Serienanwendung ist eine Nachrechnung hinsichtlich Setzverhalten, Dauerhaltbarkeit, Anziehmoment, Montagevorspannkraft und Flächenpressung notwendig. Für den Aufbau von Demonstratorrotoren ist diese standardisierte Rechenmethode nach [92] nicht erforderlich. Allerdings besteht die Möglichkeit, zur genaueren Absicherung der Vorauslegung die Schraubenverbindung nach der Gleichung von Kübler [124] nachzurechnen. Mit der aus der Konstruktion bekannten Klemmkraft F_{Kl} und der Klemmlänge ($l_k = 70 \text{ mm}$) ist in Kombination mit dem gewählten Anziehverfahren ($k_A = 1,5$ – drehmomentgesteuert), dem Reduktionsfaktor ($\kappa = 1,15$), dem Setzbetrag ($f_z = 0,011 \text{ mm}$) und dem Nachgiebigkeitsfaktor ($\beta = 1,1$) der mindestens erforderliche Spannungsquerschnitt A_s der Schraube errechenbar.

$$A_s \geq \frac{F_{Kl}}{\frac{R_{p0,2}}{\kappa - k_A} - \beta * E * \frac{f_z}{l_k}} = 5,2 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{min. M4} \quad (6.3)$$

Beim Verzicht auf eine vollständige Nachrechnung der Schraubenverbindung muss zumindest die Flächenpressung p_s (Gleichung 6.4) unter dem Schraubenkopf überschlägig kontrolliert werden. [92]

$$p_s = \frac{F_{sp}/0,9}{A_p} = 0,52 \text{ MPa} \leq p_G = 710 \text{ MPa} \rightarrow i. O. \quad (6.4)$$

6.1.2 Aufbau und Bewertung verschiedener Demonstratorrotoren

Zwischen der Bewertung reiner Konzeptionen und tatsächlich aufgebauter Demonstratoren liegen signifikante Unterschiede. In Folge der Handhabung und Montage von echten Bauteilen lassen sich bedeutend realistischere Einschätzungen hinsichtlich mögli-

cher Fehlerquellen und Schwierigkeiten in einer Serienfertigung darlegen. Aus diesem Grund erfolgt der Aufbau von zwei Rotoren mit unterschiedlichen Schaftschrauben basierend auf der analytischen Auslegung des vergangenen Abschnittes. Diese empfiehlt entweder die Verwendung von zehn M5-Schaftschrauben oder 20 M4-Schaftschrauben. Zur Gewährleistung der Sicherheit sollte jeweils die Festigkeitsklasse 12.9 gewählt werden. Zur Sicherstellung der elektromagnetischen Vergleichbarkeit mit dem konventionellen Rotortopf müssen die Schaftschrauben innerhalb des bisherigen Innendurchmessers der Blechpakete positioniert sein. Dies hat zur Folge, wie in Abbildung 113 zu erkennen, dass bei Verwendung von M5-Schaftschrauben die gebogenen Langlöcher an ihrem Innendurchmesser geöffnet sind.

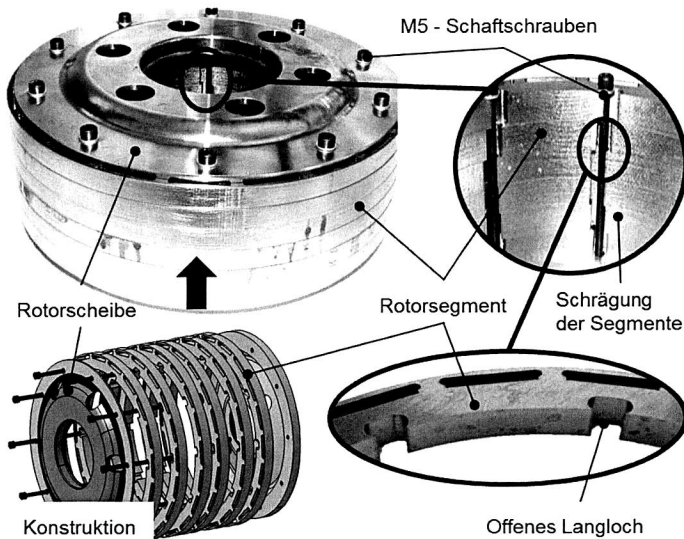


Abbildung 113: Aufbau und Besonderheiten eines Rotors mit M5-Schaftschrauben.

Nachteil der offenen Langlöcher ist der fehlende Formschluss in radialer Richtung. In einem Szenario mit manueller Montage zum Aufbau von Musterrotoren ist daher besondere Vorsicht im Hinblick auf eine konzentrische Ausrichtung der Rotorsegmente zu legen, da wegen des fehlenden Formschlusses keine Selbstzentrierung erfolgen kann. In einer automatisierten Serienfertigung ist folglich die Zentrierung der Segmente, neben der exakten Ausrichtung in Umfangsrichtung zur Gewährleistung der Schrägung, zu berücksichtigen. Aus monetärer Sicht überwiegen allerdings die Vorteile des geringeren Montage- und Logistikaufwandes und die niedrigere Summe der Stückkosten der Schaftschrauben bei Verwendung des Konzeptes mit zehn M5-Schrauben. Unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen ist das Konzept mit zehn M5-

Schrauben vorteilhafter und wird daher in der Bewertung des wirtschaftlichen Potentials mit dem in Abschnitt 6.2 entwickelten Konzept verglichen.

6.2 Rotorscheiben mit Einlagen als Rotorträgersystem

Als konzeptionelle Weiterentwicklung des im vorausgegangenen Abschnitt 6.1 beschriebenen Rotorträgersystems kann die entwickelte Idee der Rotorscheiben mit Einlagen [125] gesehen werden. Das Konzept sieht vor, das Rotorträgersystem durch zwei Rotorscheiben, die durch eine definierte Anzahl von treppenförmigen Einlagen miteinander verbunden sind, zu ersetzen. Dabei bilden die Einlagen, wie in Abbildung 114 zu erkennen, eine formschlüssige Verbindung zur Aufnahme des wirkenden Drehmoments mit den Rotorsegmenten. Deren Innendurchmesser kann durch den Wegfall des Rotorstopfes auf dessen Innendurchmesser reduziert werden, wodurch ausreichend Bauraum für die Integration der für den Aufbau des Formschlusses notwendigen Aussparungen (Nuten) entsteht, ohne dass der magnetische Fluss beeinträchtigt oder zusätzliche Wirbelstromverluste generiert werden. Die Treppenstruktur der Einlagen ermöglicht zudem die Einstellung einer genau definierten Schrägung der Rotorsegmente. Um das Drehmoment weiter auf die mit der Antriebswelle verbundenen Rotorscheiben zu übertragen, muss eine formschlüssige Verbindung zwischen den Einlagen und den Rotorscheiben hergestellt werden.

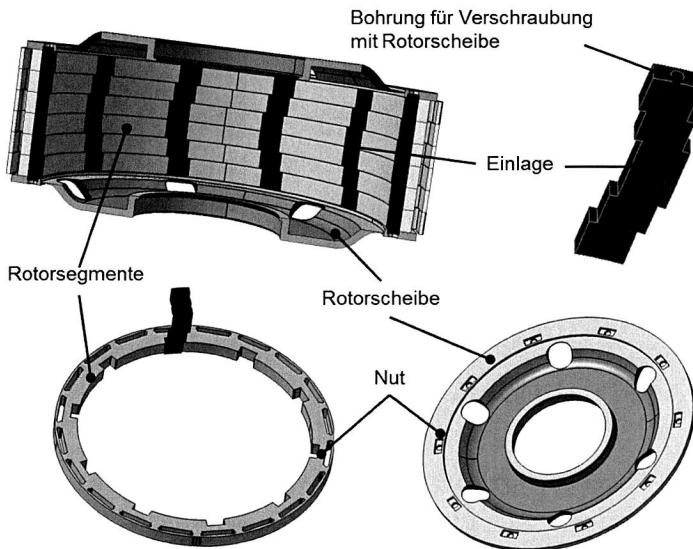


Abbildung 114: Konzept und Komponenten am Beispiel der Variante A. [125]

Zur Realisierung des Formschlusses sind mehrere Varianten denkbar. Die Variante A sieht verhältnismäßig breite, gegossene oder spanend gefertigte Einlagen vor, die in entsprechende Nuten der Rotorscheiben eingeführt und durch Verschraubung mit diesen axial gesichert werden. Das Konzept der Variante B unterscheidet sich, wie in Abbildung 115 zu erkennen, durch die verhältnismäßig geringe Breite der gestanzten Einlagen und den durchgängigen Aussparungen in den Rotorscheiben, durch welche die Einlagen durchgesteckt werden. Die axiale Sicherung kann anschließend durch Umbördeln oder Verschweißen mit den Rotorscheiben erfolgen.

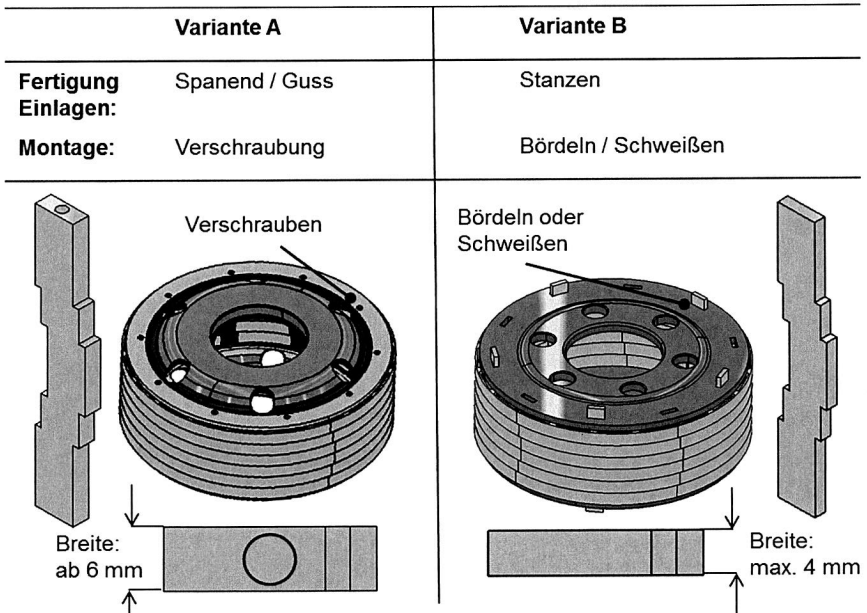


Abbildung 115: Besonderheiten und Unterschiede der Varianten A und B des Rotorträgerkonzeptes Scheiben mit Einlagen.

In diesem Abschnitt sollen zunächst die beiden Aufbauvarianten analytisch berechnet und die limitierenden Faktoren offengelegt werden. Dabei soll das zulässige Drehmoment in Abhängigkeit der Anzahl der Einlagen und deren tragende Fläche, bestehend aus Höhe h_e und Breite b_e , ermittelt werden. Anschließend erfolgt die Bewertung der Konzepttauglichkeit der beiden Aufbauvarianten hinsichtlich Fertigung und Automatisierbarkeit an Hand von Demonstratoren.

6.2.1 Analyse und Auslegung der Einlagen

Für die Auslegung der Einlagen und der Rotorscheiben müssen die erforderlichen Flächen zur Aufnahme des Drehmoments nach dem Berechnungsmodell der Passfeder nach DIN 6885 [126] ermittelt werden. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Überprüfung der Flächenpressung an der kritischen Stelle an den Rotorscheiben. Die Breite b_e der Einlage entspricht dabei der „tragenden Länge“ der Passfeder. Falls „tragende Länge“ < „Länge“ gilt, ist die Auslegung als unkritisch anzusehen. [92]

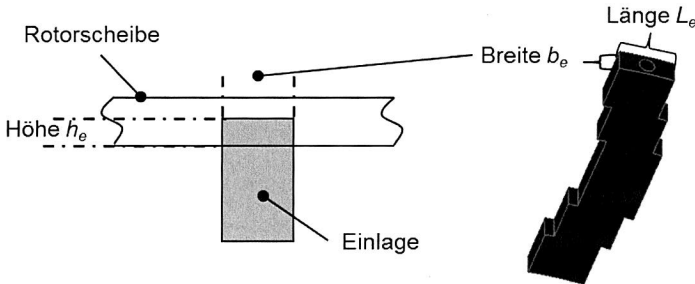


Abbildung 116: Definition der Abmaße der Rotorscheiben und der Einlagen.

Für die Berechnung der zulässigen Flächenpressung p_{zul} nach Gleichung 6.5 muss immer der „schwächere“ Werkstoff der Fügepartner gewählt werden. In der beispielhaften Auslegung des Rotorträgersystems wird als Werkstoff der Rotorscheiben die Stahlsorte S295 mit der spezifischen Streckgrenze $R_e = 160 \text{ MPa}$ definiert.

$$p_{zul} = 0,9 * R_e = 144 \text{ MPa} \quad (6.5)$$

Die Kenntnis der zulässigen Flächenpressung p_{zul} ermöglicht die Berechnung des zulässigen Drehmoments M_{zul} , nach Gleichung 6.6, unter Berücksichtigung der geometrischen Abmaße (h_e und b_e) des Formschlusses und der Anzahl der Einlagen n_e . Der Tragfaktor $\varphi = 0,75$ berücksichtigt dabei den ungleichmäßigen Eingriff der Einlagen. [92]

$$M_{zul} = p_{zul} * b_e * h_e * r * n_e * \varphi \quad (6.6)$$

Abbildung 117 zeigt die in Gleichung 6.6 berechneten zulässigen Drehmomente für die im Demonstratorrotor mögliche Anzahl an Einlagen in Abhängigkeit der tragenden Fläche A_e aus Höhe h_e und Breite b_e . Da die Auslegung des Rotorträgersystems rein analytisch erfolgt, wird ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor $S = 1,5$ miteinberechnet, der das Drehmoment auf das erforderliche Drehmoment $M_{erf} = 450 \text{ Nm}$ anhebt.

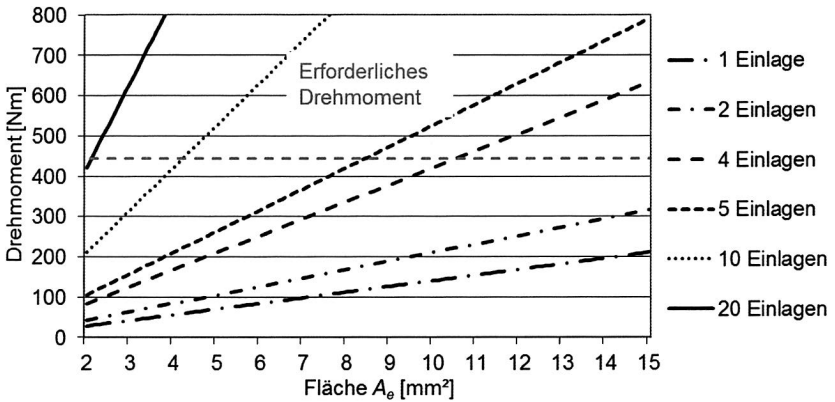


Abbildung 117: Berechnungsergebnisse: Zulässiges Drehmoment in Abhängigkeit der Anzahl der Einlagen.

Daher sind folgende Minimalflächen je wirkender Einlage zur Übertragung des Drehmomentes notwendig:

- Minimalfläche bei 20 Einlagen: $2,2 \text{ mm}^2$
- Minimalfläche bei 10 Einlagen: $4,3 \text{ mm}^2$
- Minimalfläche bei 5 Einlagen: $8,5 \text{ mm}^2$
- Minimalfläche bei 4 Einlagen: $10,7 \text{ mm}^2$

Die Abbildung 118 zeigt am Beispiel von gewählten fünf Einlagen das erforderliche Drehmoment in Abhängigkeit der Höhe und der Breite der wirkenden Fläche je Einlage. Somit kann entsprechend der konstruktiven Vorgaben eine passende Parameterkombination ausgewählt werden.

Für den Aufbau der Demonstratorrotoren werden unter Berücksichtigung der Anforderungen der Rotorsegmentierung jeweils fünf Einlagen gewählt. Die Variante A benötigt zur Integration der Bohrungen zur axialen Sicherung eine minimale Breite von $b_e = 6 \text{ mm}$. Somit ist zur Übertragung des Drehmoments eine Höhe $h_e = 1,5 \text{ mm}$ erforderlich. Um die Stanzbarkeit der Einlagen der Variante B zu garantieren, darf die Breite nicht größer als $b_e = 4 \text{ mm}$ gewählt werden. Dies resultiert in einer minimalen Höhe von $h_e = 2 \text{ mm}$.

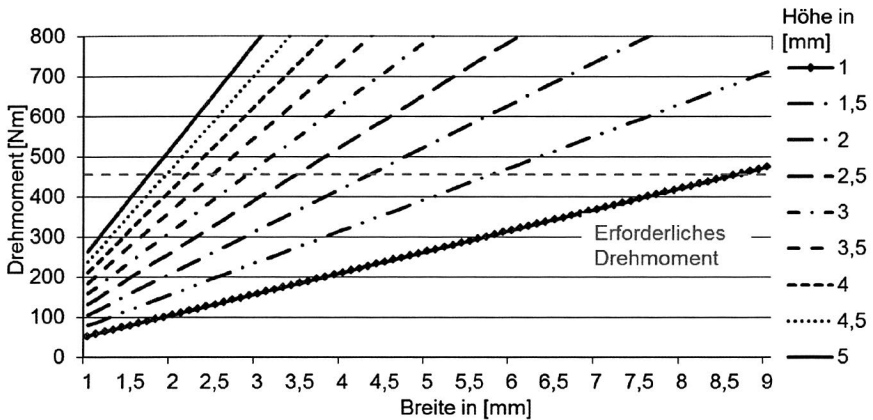


Abbildung 118: Berechnungsergebnis: Ertragbares Drehmoment in Abhängigkeit der Höhe und Breite.

6.2.2 Bewertung der Konzepttauglichkeit verschiedener Aufbauvarianten

Nach den im vorherigen Abschnitt berechneten Vorgaben, werden zwei Rotoren nach den beschriebenen Varianten A und B aufgebaut. An Hand dieser Demonstratoren sollen, vergleichbar zu Abschnitt 6.1.2, mögliche Schwachstellen und Probleme hinsichtlich der Konzeption und potentieller Automatisierungslösungen identifiziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden abschließend die beiden Varianten verglichen und die vorteilhaftere ausgewählt. In Folge der im vergangenen Abschnitt durchgeführten Analyse und Auslegung der Einlagen, werden für die beiden Varianten die empfohlenen konstruktiven Maße eingesetzt. In Abbildung 119 sind die Demonstratorrotoren der beiden Varianten mit ihren spezifischen Besonderheiten zu sehen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit werden bei beiden Varianten die gleichen Blechpakete eingesetzt. Durch die erforderliche V-Schrägung des Rotors besteht nach der Montage kein vollständiger Flächenkontakt zwischen den gleichstehenden Flächen der Rotorsegmente und den Einlagen. Um diesen Effekt zu minimieren, sollten während der Montage die Blechpakete 2 und 5 als Referenz dienen. Durch diese Maßnahme ist die zur Übertragung des Drehmomentes verfügbare Fläche an den Blechpaketen ausreichend vorhanden, da sich die Auslegung der Einlagen auf die deutlich kleineren Flächen der Rotorsegmente bezieht.

Da sich die abschließenden Montageschritte „Schrauben“ (Variante A) und „Bördeln“ (Variante B) in Aufwand und Kosten, im Hinblick auf eine mögliche Serienanwendung, nur minimal unterscheiden, ist das relevante Auswahlkriterium der Fertigungspreis der Einlagen. Da in den prognostizierten Stückzahlenszenarien die gestanzten Einlagen deut-

lich günstiger zu produzieren sind als spanend gefertigte, wird die Variante B als vorteilhafter angesehen und daher in der Bewertung des wirtschaftlichen Potentials mit dem in Abschnitt 6.1 entwickelten Konzept verglichen.

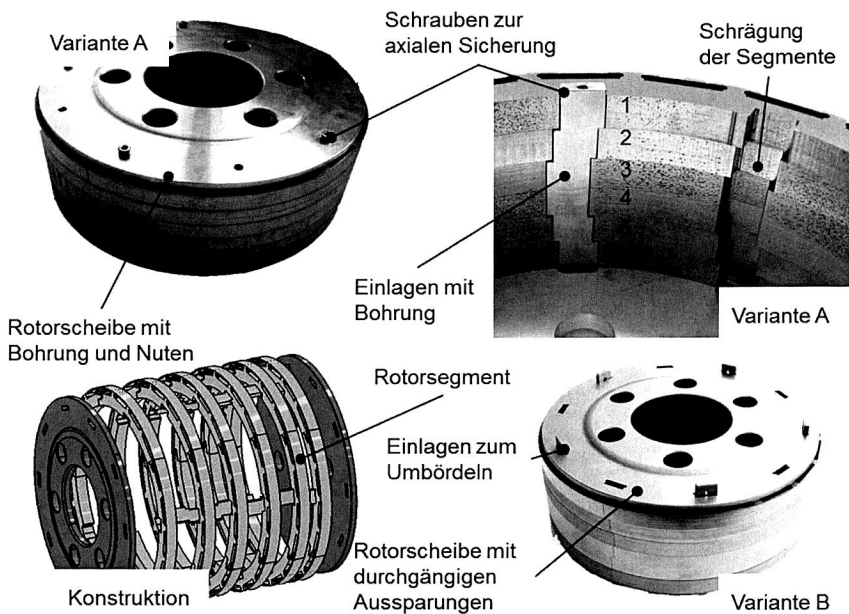


Abbildung 119: Aufbau und konstruktive Besonderheiten der Varianten A und B des Konzeptes „Rotorscheiben mit Einlagen“.

6.3 Wirtschaftliches Potential der entwickelten Rotorträgersysteme

Die Analyse des wirtschaftlichen Potentials der entwickelten Rotorträgersysteme ist vergleichbar zu der in Abschnitt 4.8 durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der entwickelten Verbindungstechniken. Grundsätzlich bleiben die Randbedingungen erhalten, nur die Taktzeit erhöht sich auf 168 Sekunden, da jetzt nicht einzelne Ringsegmente gefertigt bzw. bearbeitet werden, sondern als Produkt der Rotor angesehen werden muss. Zur übersichtlicheren Darstellung zeigt Tabelle 24 die jeweiligen Abkürzungen der zu analysierenden Rotorträgersysteme.

Rotorträgersystem Nr.	Abkürzung	Bezeichnung
Rotorträgersystem 1	RT1	Konventionell - Rotortopf
Rotorträgersystem 2	RT2	Rotorscheiben mit Schaftschrauben
Rotorträgersystem 3	RT3	Rotorscheiben mit Einlagen

Tabelle 24: Zu vergleichende Rotorträgersysteme – Bezeichnungen.

Abweichend von der Entwicklung der Verbindungstechniken und der Magnetfixierungen wurde bei der Entwicklung alternativer Rotorträgersysteme der Fokus auf die Konzeption und Konstruktion und nicht auf die Prozessentwicklung gelegt. Daher können für die wirtschaftliche Analyse der erforderlichen Anlagen und Werkzeuge, für eine automatisierte Montage der Rotorsegmente mit den entwickelten Rotorträgersystemen, nur sehr abstrakte Annahmen getroffen werden. Basis dessen ist die wirtschaftliche Bewertung der Montage des konventionellen Referenzrotors unter Einbeziehung der Kosten für die benötigten Zukaufteile (Rotortopf und Stützscheibe). Die Investitionskosten der zu analysierenden Systeme (vgl. Tabelle 25) sind vergleichsweise gering und setzen sich überwiegend aus diversen Positionier- und Montagevorrichtungen (Portal-, Rundtakt-, Robotik- und Greifersysteme) zusammen.

Investitionskosten in GE	RT1	RT2	RT3
Presse	350.000	0	0
Positioniervorrichtung Rotortopf bzw. Scheiben	150.000	150.000	150.000
Positioniervorrichtung Segmente	50.000	150.000	150.000
Montagevorrichtung Einlagen	0	0	50.000
Montagevorrichtung Verschraubung	0	100.000	0
Bördelautomat	0	0	100.000
Transferstraße und Automatisierung	100.000	150.000	150.000
Summe Anlagenkosten	650.000	550.000	600.000
Investitionsanteil an Stückkosten in GE	0,72	0,61	0,67

Tabelle 25: Berechnung des Investitionsanteils der Stückkosten.

Geringer als der Investitionsanteil fällt der Werkzeuganteil an den Stückkosten (vgl. Tabelle 26) aus. Da, mit Ausnahme des Einpressens der Rotorsegmente (RT1), des Verschraubens der Schaftschrauben (RT2) und des Bördelns der Einlagen ausschließlich werkzeugeungebundene Positionieraufgaben vollzogen werden müssen, findet je Rotorträgersystem nur eine werkzeuggebundene Montageaufgabe statt. Zudem sind die Werkzeug entweder vergleichsweise kostengünstig oder haben eine lange prognostizierte Werkzeugstandzeit.

Werkzeugkosten in GE	RT1	RT2	RT3
Werkzeugkosten (Presse, Bördeln, Schrauben)	50.000	1.000	15.000
Werkzeugstandzeit in produzierten Teilen	500.000	10.000	500.000
Werkzeuginvestment über LC	90.000	90.000	27.000
Werkzeuganteil an Stückkosten in GE	0,10	0,10	0,03

Tabelle 26: Berechnung des Werkzeuganteils an den Stückkosten.

Da in der Montage des Rotorträgersystems keine Bearbeitung von Werkstücken vollzogen wird, fallen auch keine Materialkosten an. Die wesentlichen Komponenten der Rotorträgersysteme werden von Lieferanten als Zukaufteile bezogen. Die in Tabelle 27 berechneten Stückkosten zeigen deutliche Unterschiede je nach gewähltem Rotorträgerkonzept. Die Kosten von 60 Geldeinheiten (GE) für den tiefgezogenen Rotortopf (RT1) sind verfahrensbedingt um den Faktor 6 größer als für die spanend oder gegossen produzierten Rotorscheiben (RT2 und RT3). Die in den Konzepten RT2 und RT3 zusätzlich zu addierenden Kosten für die Normteile (Schaftschrauben) oder die gestanzten Einlagen relativieren den berechneten Materialanteil an den Stückkosten nur minimal.

Zukaufteilkosten in GE	RT1	RT2	RT3
Rotorträger (Topf und Scheiben)	60,00	10,00	10,00
Normteile	0,00	1,00	0,00
Einlagen	0,00	0,00	2,50
Zukaufteileanteil an Stückkosten in GE	60,00	11,00	12,50

Tabelle 27: Berechnung des Zukaufteileanteils an den Stückkosten.

Um vergleichbare Bedingungen realisieren zu können, wird für die Wirtschaftlichkeitsanalyse bei allen Varianten ein einheitlicher Automatisierungsgrad (benötigtes Personal) und einheitliche Betriebskosten für Instandhaltung, Energie, Logistik etc. angenommen. Als Betriebsanteil werden daher auf die Stückkosten jeweils 1,07 GE aufgeschlagen.

Tabelle 28 zeigt zusammenfassend die kalkulierten Stückkosten der konzipierten Rotorträgersysteme. Dabei ist klar ersichtlich, dass der Zukaufanteil die Stückkosten dominiert und einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Rotorfertigung hat. Aus monetärer Sicht ist daher die Entwicklung alternativer Rotorträgersysteme zu forcieren, da somit beträchtliche Kosten eingespart werden können. In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit hat das Konzept der Rotorscheiben mit den Schafschrauben leichte Vorteile gegenüber dem Konzept der Rotorscheiben mit den Einlagen.

Stückkosten in GE	RT1	RT2	RT3
Investmentanteil an Stückkosten	0,72	0,61	0,67
Werkzeuganteil an Stückkosten	0,10	0,10	0,03
Zukaufanteil an Stückkosten	60,00	11,00	12,50
Betriebsanteil an Stückkosten	1,07	1,07	1,07
Summe Stückkosten in GE	61,90	12,78	14,27

Tabelle 28: Berechnung der Summe der Stückkosten.

Allerdings ist zu beachten, dass die dargestellten Zahlen der entwickelten Rotorträgersysteme RT2 und RT3, wegen der bestehenden Konzeptphase, als reine Abschätzungen zu werten und Abweichungen der Kosten zu erwarten und zu tolerieren sind.

7 Aufbau und Beurteilung des Technologieträgerrotors

Zur finalen Beurteilung technischer Systeme und Prozesse ist eine ganzheitliche Betrachtung der spezifischen Eigenschaften der Einzelkomponenten unter Berücksichtigung der Randbedingungen hinsichtlich Umwelteinflüsse und den Wechselwirkungen mit den weiteren Komponenten erforderlich. Im letzten Kapitel dieser Arbeit sollen daher die verschiedenen entwickelten Technologien bezüglich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eignung verglichen und bewertet werden. Die vorteilhafteste Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung und die erfolgversprechendste Magnetfixierungstechnik durchlaufen anschließend eine Umweltqualifizierung zur Identifikation möglicher Schwachstellen und zur Gewährleistung verschiedenster festigkeitstechnischer und elektromagnetischer Anforderungen. Den Abschluss dieses Kapitels stellt die Konzeption einer teilautomatisierten Montagelinie zur Montage der Rotorsegmente und zur Fixierung der Magnete dar. Da die konzipierten Rotorträgersysteme nur als Anregung für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu sehen sind, wird auf deren Qualifizierung und die Konzeption einer entsprechenden Montageanlage verzichtet. Als Resultat dieser und als Motivation für weitere Arbeiten, erfolgt abschließend die Präsentation des aufgebauten Technologieträgerrotors.

7.1 Auswahl vorteilhafter Technologien hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Aspekte

Die Wahl geeigneter Bewertungskriterien, die zur Auswahl der erfolgversprechendsten Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung, der besten Magnetfixierung und des vorteilhaftesten Rotorträgerkonzeptes führen, ist grundlegend für die erfolgreiche Realisierung eines den technischen Anforderungen entsprechenden und gleichzeitig kostengünstigen Technologieträgerrotors. Die identifizierten Bewertungskriterien können grundsätzlich in die Gruppen „Kosten“, „Produkteigenschaften“, „Prozesseigenschaften“ und „Qualitätssicherung“ untergliedert werden. Da alle entwickelten Technologien der Rotorsegmentierung mit den Technologien der Magnetfixierung und den Rotorträgerkonzepten kombinierbar sind, müssen mögliche Wechselwirkungen der Konzepte untereinander nicht als Bewertungskriterium aufgenommen werden. Zu beachten ist, dass die hier aufgestellten Kriterien den spezifischen Randbedingungen eines getriebeeintegrierten Elektromotors geschuldet sind und somit nur als Empfehlung für vergleichbare Produkte gesehen werden können.

Zunächst erfolgt die Bewertung und Auswahl der geeignetsten Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung. Vergleichbar zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden nur die in einer möglichen Serienanwendung tatsächlich realisierbaren Verbindungstechniken in die Entscheidungsmatrix aufgenommen. Zur besseren Übersichtlichkeit werden in Tabelle 29 die Abkürzungen aus Tabelle 12 verwendet.

	Gewichtung	V2	V3	V4	V5
Kosten					
Fertigungskosten	3	●	●	●	●
Produkteigenschaften					
Verbindungsfestigkeit	3	●	●	●	●
Alterungs- und Umweltbeständigkeit	2	●	○	●	○
Elektromagnetische Eigenschaften	2	●	●	●	●
Qualitätssicherung					
Prozessfähigkeit	2	●	●	○	●
Nacharbeitungsmöglichkeit	1	●	○	○	○
Gleichteile (Verwechselbarkeit)	0,5	●	●	●	●
Prozesseigenschaften					
Restschmutz bei Fertigung	0,5	○	○	○	○
Toleranzen / Robustheit	1	○	●	○	●
Automatisierung verfügbar	2	●	●	●	●
Gesamtbeurteilung		●	●	○	●

Legende: ● sehr vorteilhaft ○ sehr unvorteilhaft

Tabelle 29: Gegenüberstellung und Bewertung der verschiedenen Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung.

Nachdem sich die Bewertung der Kosten und der Produkteigenschaften aus den Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten des vierten Kapitels erschließen, wird im Folgenden nur auf die Qualitätssicherung und die Prozesseigenschaften eingegangen. Hinsichtlich der Prozessfähigkeit ist lediglich, wie in Abschnitt 4.6 bereits erwähnt, beim Schweißen als Verbindungstechnik (V4) großer Entwicklungsbedarf, da hier sowohl die Technologie, als auch der Prozess vollständig neu entwickelt wurden. In Bezug auf die Nacharbeit, bei fehlerhafter Anwendung der Verbindungstechnik, besteht nur bei der „Fügegeometrie“ (V2) die Möglichkeit einer manuellen Reparatur des Rotorringes durch Einsetzen eines unbeschädigten Segments. Das Auftreten von Restschmutz in der Produktion ist bei allen Verbindungstechniken in begrenztem Umfang möglich, insbesondere durch Spritzer beim „Schweißen“. Vergleichbar zur Prozessfähigkeit sind einzig beim „Schweißen“ die Fertigungstoleranzen und somit die Robustheit des Prozesses nicht auf Serienniveau. Hinsichtlich einer automatisierten Serienanlage sind für V3 und V5 bereits Lösungen auf dem Markt erhältlich. [73] Für die anderen beiden Technologien sind automatisierte Produktionsanlagen denkbar. Das Ergebnis der Gesamtbeurteilung

der entwickelten Verbindungstechniken zeigt die „Fügegeometrie“ als vorteilhafteste Verbindungstechnologie der Rotorsegmentierung hinsichtlich der Anforderungen des Referenzrotors. Für die Darstellung und den Aufbau eines Technologieträgerrotors wird daher als Verbindungstechnik der Rotorsegmente die Fügegeometrie ausgewählt.

Die Beurteilung und Auswahl der am besten geeigneten Magnetfixierungstechnologie erfolgt mit Hilfe von Tabelle 30. In die Entscheidungsmatrix gehen ausschließlich die in Bezug auf den Referenzrotor technologisch realisierbaren Fixierungstechniken ein.

	Gewichtung	Verstemmen	Klemmen mit Opferschicht	Kleben
Kosten				
Fertigungskosten	3	●	●	○
Produkteigenschaften				
Verbindungsfestigkeit	3	●	●	●
Alterungs- und Umweltbeständigkeit	2	●	○	○
Elektromagnetische Eigenschaften	2	●	●	●
Rezyklierbarkeit der Magnete	2	●	●	○
Qualitätssicherung				
Prozessfähigkeit	2	●	○	●
Nacharbeitungsmöglichkeit	2	●	●	○
Prozesseigenschaften				
Restschmutz bei Fertigung	2	●	○	○
Toleranzen / Robustheit	1	●	●	●
Automatisierung verfügbar	1	●	●	●
Gesamtbeurteilung		●	●	○

Legende: ● sehr vorteilhaft ○ sehr unvorteilhaft

Tabelle 30: Gegenüberstellung und Bewertung der verschiedenen entwickelten Magnetfixierungstechnologien.

Die Bewertung der Kosten und der Produkteigenschaften erfolgt im Hinblick auf die gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 5. Eine ausreichende Prozessfähigkeit kann entweder durch bereits bestehende Erfahrungen oder tiefgreifende Entwicklungsarbeit generiert werden. Da das „Klemmen mit Opferschicht“ lediglich ein Alternativprozess des klassischen „Klemmens“ ist, sind robuste Prozessschritte zwar erwartbar aber zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Hinsichtlich der Nacharbeit, bei einer nicht durchgeführten oder fehlerhaften Magnetfixierung, ist die Technik des „Klemmens mit Opferschicht“ prozessbedingt unkritisch. Durch leichte Beschädigungen des Blechpa-

ketes oder Kleberückstände kann die Nacharbeit bei den beiden anderen Prozessen erschwert werden. Prozessbedingt ist die Restschmutzproblematik beim „Verstemmen“ als vollkommen unkritisch zu bewerten – das Gegenteil ist bei den beiden anderen Technologien der Fall. Sehr vorteilhaft bei allen zu beurteilenden Techniken sind die Fertigungstoleranzen und somit die Robustheit der Prozesse in Folge der erfolgreichen Entwicklungsarbeit (Verstemmen) oder der prozessspezifischen Eigenschaften. Automatisierungslösungen für die beschriebenen Technologien sind bisher nicht verfügbar, sollten aber dem Stand der Technik entsprechen. Zusammenfassend ist die Magnetfixierungstechnik „Verstemmen“ am vorteilhaftesten und findet daher beim Aufbau des Technologieträgerrotors Anwendung.

Final zu beurteilen (vgl. Tabelle 31) und für den Technologieträger auszuwählen, sind die beiden Konzeptionen der Rotorträgersysteme.

	Gewichtung	Rotorscheiben mit Schaftschrauben	Rotorscheiben mit Einlagen
Kosten			
Fertigungskosten	3	●	●
Produkteigenschaften			
Schrägung des Rotors	3	○	●
Drehmomentübertragung	3	●	●
Alterungs- und Umweltbeständigkeit	2	●	●
Qualitätssicherung			
Prozessfähigkeit	2	○	○
Nacharbeitungsmöglichkeit	1	●	●
Prozesseigenschaften			
Restschmutz	0,5	●	●
Toleranzen / Robustheit	1	○	●
Automatisierung verfügbar	2	○	○
Beurteilung		●	●

Legende: ● sehr vorteilhaft ○ sehr unvorteilhaft

Tabelle 31: Gegenüberstellung und Bewertung der Konzeptionen der Rotorträgersysteme.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abschnitt 6.3 sind beide Konzepte als sehr vorteilhaft zu bewerten. Da beide Rotorträgersysteme als reine Konzeptionen anzusehen sind, besteht im Hinblick auf die Produkteigenschaften

genschaften nur die Möglichkeit, Einschätzungen abzugeben. Infolge des formschlüssigen Aufbaus des Konzeptes der „Rotorscheiben mit Einlagen“ ist über die Lebensdauer mit einer garantierten Einhaltung der vorgegebenen Schrägung des Rotors und einer sicheren Drehmomentübertragung zu rechnen. Im Gegensatz dazu ist ein Setzen bzw. Auflockern der kraftschlüssigen Verbindungen im Konzept der „Rotorscheiben mit Schachtschrauben“ in Folge von Temperaturwechsel und Vibrationen denkbar. Werkstoffseitige Ausfälle in Folge kalendarischer Alterung³⁸ und Umwelteinflüssen sind bei beiden Konzepten höchst unwahrscheinlich. Die in Kapitel 6 beschriebenen Demonstratoren wurden ausschließlich manuell aufgebaut, wobei automatisierte Montageanlagen, wegen des verhältnismäßig einfachen Aufbaus der Konzepte, denkbar wären. Präzise Aussagen über die Prozessfähigkeit sind daher nur schwer generierbar und müssen mit „neutral“ gewertet werden. Eine Nacharbeit bei einer fehlerhaften Montage ist bei beiden Konzepten problemlos und ohne materielle Verluste möglich. Unter Berücksichtigung aller Kriterien ist das Konzept „Rotorscheiben mit Einlagen“ geeigneter als die „Rotorscheiben mit Schachtschrauben“. Als Rotorträgersystem des Technologieträgerrotors wird folglich das Konzept der „Rotorscheiben mit Einlagen“ gewählt.

7.2 Qualifizierung der ausgewählten Technologien

Die Qualifizierung beschreibt den Vorgang zur Validierung erforderlicher Fähigkeiten eines Produktes oder Prozesses, um im praktischen Einsatz reproduzierbar die gestellten Anforderungen zu erfüllen. [127] Hier bedeutet dies konkret die Sicherstellung der Funktionalität der ausgewählten Technologien, der Verbindungstechnik Fügegeometrie und der Magnetfixierung Verstemmen, über die Lebensdauer des Motors. Neben der Ableitung geeigneter Prüfmechanismen zur Simulation der während der Lebensdauer wirkenden mechanischen Belastungen müssen auch Umwelteinflüsse (u. a. Getriebeöl und schnelle thermische Wechsel) ausreichend berücksichtigt werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Validierung der elektromagnetischen Eigenschaften im Vergleich zum Referenzmotor.

7.2.1 Qualifizierung der Verbindungstechnik Fügegeometrie

Zur Absicherung der Technologie unter Serienbedingungen erfolgt eine Validierung durch diverse Qualifizierungsmaßnahmen. Neben einer simulierten kalendarischen Alterung der Verbindungstechnik durch zyklische Thermoschockbelastung (800 Zyklen von -40 °C bis 160 °C) ist die Untersuchung der Medienbeständigkeit im Entwicklungsprozess ein wichtiger Schritt. Da die Verbindungstechnik eine „Metall-Metall-Verbindung“ darstellt, kann erwartungsgemäß keine Minderung der Festigkeit gemessen werden. Weniger vorhersehbar hingegen sind die Einflüsse der Verbindungstechnik auf die Führung des magnetischen Flusses durch die Luftspalte der Fügegeometrie und die daraus resultierende Minderung der Leistungsfähigkeit des Motors. Daneben ist die Absiche-

³⁸ z. B. Chemische Selbstzerstörung über die Zeit

rung der Betriebsfestigkeit der Verbindungstechnik eine maßgebliche Voraussetzung zur Qualifizierung unter Serienbedingungen.

Einfluss der Luftspalte der Fügegeometrie auf den magnetischen Fluss

Einen großen Einfluss auf die Performance einer elektrischen Maschine hat die Führung des magnetischen Flusses und somit die Relevanz der Materialien und Gase im Rotor (vgl. Abschnitt 2.2.1). Ein nicht realisierbarer Optimalfall wäre eine elektrische Maschine, die ohne Luftspalt zwischen Rotor und Stator reibungsfrei betrieben werden kann. Da dies technisch nicht möglich ist, sollte das Ziel der Entwickler eine Maschine sein, in der die Flussführung von Rotor und Stator durch möglichst wenige und gleichzeitig kleine Luftspalte, gewährleistet wird. Die Auslegung der Referenzmaschine sieht einen Luftspalt von 1 mm zwischen Rotor und Stator und von 0,1 mm zwischen den Magneten und dem Blechpaket des Rotors vor. Dabei muss, wie in Abbildung 120 zu erkennen, der magnetische Fluss je Pol (Magnet) jeweils zweimal die Luftspalte der Fügegeometrie passieren, was einer Gesamtstrecke von 4,2 mm entspricht.

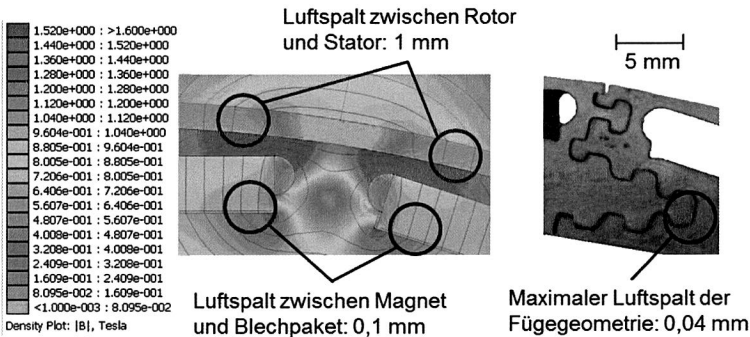


Abbildung 120: Einfluss der Luftspalte auf die Performance. Links: Magnetischer Flussverlauf am Referenzrotor. Rechts: Luftspalt an der Fügegeometrie.

Im Gegensatz dazu beträgt der montagebedingte Luftspalt der Fügegeometrie maximal 0,04 mm. Bei Verwendung einer Segmentanzahl von 10 Segmenten (jeder zweite Magnet ist betroffen) muss der magnetische Fluss je Pol 0,5 mal den Luftspalt passieren. Die Gesamtlänge des Luftspaltes erhöht sich durch die Fügegeometrie um 0,4 % und ist somit unterhalb der Messtoleranz und im Betrieb nicht relevant.

Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit ist eine Belastungsgrenze, die ein dynamisch, z. B. schwingend, belasteter Werkstoff ohne nennenswerte Ermüdungserscheinungen bzw. Ausfallerscheinungen ertragen kann und abhängig von der Art der auftretenden Belastung ist. [128] Aussagen über die Betriebsfestigkeit von Werkstoffen oder Verbindungen lassen sich durch die Erstellung von Wöhlerdiagrammen mittels Wöhlerversuchen treffen. Dabei wird der Versuchskörper bzw. die Verbindungstechnik zyklisch, meist unter einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, belastet. [129] Die Prüfung zur Ermittlung der Werte des Prüfkörpers erfolgt auf verschiedenen Lasthorizonten. Der Versuch endet, sobald ein definiertes Versagen (Bruch, Anriss) eintritt oder eine festgelegte Anzahl Schwingungen (Schwingspielzahl) überstanden wird. Im klassischen Wöhlerdiagramm ist die Nennspannungsamplitude S_a linear oder logarithmisch über der logarithmisch dargestellten, ertragbaren Schwingspielzahl aufgetragen.

Die Vorgehensweise zur Erstellung einer Wöhlerlinie ist nicht genormt, wobei drei Verfahrensstrategien nach [130] Anwendung finden – Horizontenverfahren, Perlenschnurverfahren und Mischverfahren. Das so entstandene Diagramm ist nach [130] in die Bereiche der Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit einzuteilen. Dabei können Verbindungen und Bauteile im Bereich der Dauerfestigkeit unterhalb der Nennspannungsamplitude beliebig viele Schwingspiele aushalten, ohne Schaden zu nehmen und können daher als „dauerfest“ angesehen werden. Die Betriebsfestigkeit hingegen stellt einen empirisch ermittelten Belastungsgrenzwert dar, den ein Bauteil oder eine Verbindungstechnik eine definierte Schwingspielzahl, die der Lebensdauer entspricht, aushalten muss.

Für getriebeintegrierte Elektromotoren sind nach [90] folgende Grenzwerte für die Betriebsfestigkeit nicht zu unterschreiten:

- 100 % der Nennbelastung bei 80.000 Lastspielen
- 80 % der Nennbelastung bei 100.000 Lastspielen

Die Auswertung der in Abbildung 121 dargestellten Wöhlerlinie erfolgt nach dem Mischverfahren. Die so entstandene Wöhlerkurve liegt vollständig oberhalb der nach [90] definierten Grenzlinie für getriebeintegrierte Elektromotoren. Somit kann die zu qualifizierende Fügegeometrie im Hinblick auf die gegebenen Randbedingungen als Betriebsfest angesehen werden. Die positiven Ergebnisse der Prüfung der Betriebsfestigkeit schließen die Qualifizierung der Fügegeometrie ab.

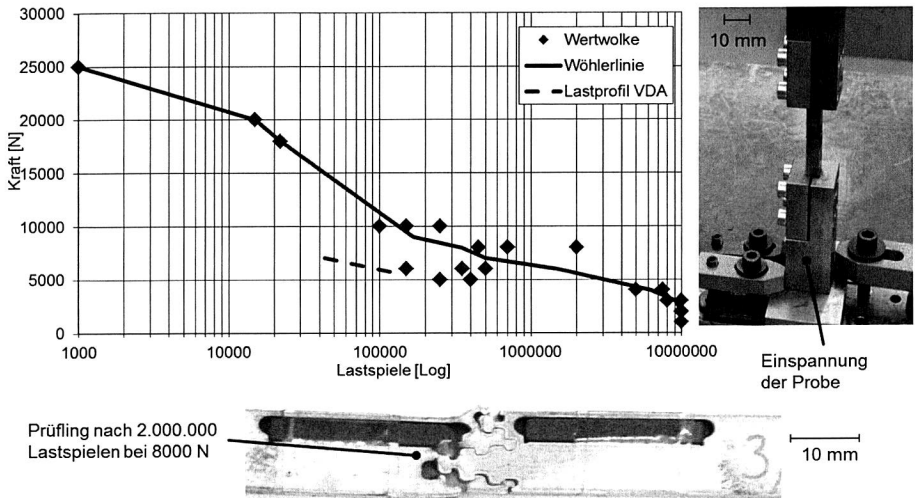


Abbildung 121: Experimentelle Ermittlung der Betriebsfestigkeit nach dem Mischverfahren. Wöhlerdiagramm und Einspannung der Probe.

7.2.2 Qualifizierung der Magnetfixierung Verstemmen

Vergleichbar zu Abschnitt 7.2.1 müssen zur Absicherung der Technologie unter Serienbedingungen verschiedene Qualifizierungsmaßnahmen durchlaufen werden. Da an der Geometrie des Magneten und des Blechpaketes im Bereich des Magnetslots keine Änderungen vorgenommen wurden, ist eine Veränderung des Verlaufes des magnetischen Flusses nicht zu erwarten und muss somit nicht untersucht werden. Äquivalent dazu ist eine Untersuchung der Medienbeständigkeit nicht notwendig, da weiterhin die gleichen, bereits qualifizierten Materialien Anwendung finden und Korrosion des Magneten an den tolerierten Beschädigungsbereichen der Beschichtung wegen der permanenten Umspülung durch das Getriebeöl nicht zu erwarten ist. Weniger vorhersehbar ist die kalendarische bzw. thermische Alterung der Magnetfixierung, da die Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Fügepartner, wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben, deutlich verschieden sind und somit ein Lösen oder Aufbrechen der Fixierungstechnik die Folge sein kann. Daneben sind die Absicherung der Vibrationsfestigkeit und der Einfluss der Verbindungstechnik auf die Eisenverluste eine maßgebliche Voraussetzung zur Qualifizierung unter Serienbedingungen.

Verlustbetrachtung

Zur Betrachtung und Abschätzung des Einflusses der Magnetfixierungstechnik Verstemmen auf die Eisenverluste wird der Versuchsaufbau von Abschnitt 4.7 nach [37] verwendet.

Wie der Graph in Abbildung 122 zeigt, sind im Vergleich zur Referenzprobe keine zusätzlichen Eisenverluste detektierbar. Es kann daher kein Hinweis ermittelt werden, dass die Magnetfixierungstechnik Verstemmen zu erhöhten Verlusten führt.

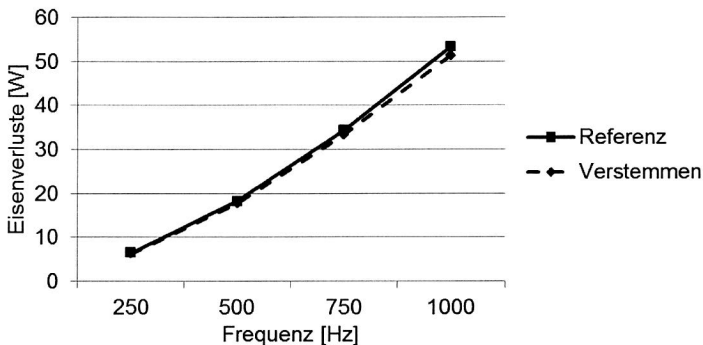


Abbildung 122: Ergebnis der experimentellen Verlustbetrachtung der Magnetfixierung Verstemmen.

Thermische Alterung

Im klassischen Sinne simuliert eine konstante oder zyklische thermische Belastung eine kalendarische Alterung von Werkstoffen oder Verbindungstechniken. Während der Betriebszeit eines Fahrzeuges, insbesondere des Getriebes, können, z. B. durch den morgendlichen Start³⁹ bei -40 °C und einer anschließenden Belastungsfahrt, schnelle thermische Wechselbelastungen auftreten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die relevanten Komponenten durch zyklische Thermoschockbelastung⁴⁰ qualifiziert werden.

Die Durchführung der Alterung der Proben erfolgt durch eine entsprechende Einlagerung in Klimaschränke der Fa. Vötsch Industrietechnik GmbH. Vergleichbar dazu wird zudem eine Hochtemperatur-Alterung (1000 h bei 160 °C) durchgeführt. Die anschließend ermittelten Haltekraften der Magnete sind in Abbildung 123 dargestellt.

³⁹ z. B. in Sibirien

⁴⁰ 800 Zyklen von -40 °C bis 160 °C

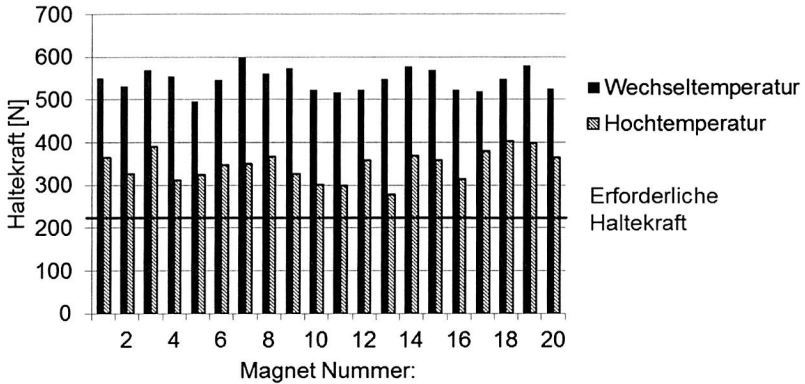


Abbildung 123: Ergebnis der thermischen Alterung der Verbindungstechnik Verstemmen.

Die Haltekraften aller Magnete der beiden geprüften Ringe liegen deutlich über die im Lastenheft geforderten Haltekraften. Somit ist hinsichtlich der thermischen Alterung kein Ausfall der Fixierungstechnik zu erwarten.

Vibrationsfestigkeit

Ähnlich zur Überprüfung der Betriebsfestigkeit der Verbindungstechnik Fügegeometrie, soll die Validierung der Vibrationsfestigkeit die, während der Produktlebenszeit auftretenden, mechanischen Belastungen abbilden. Die Durchführung der Prüfung des Vibrationsprofils⁴¹ erfolgt auf einem Prüfstand der Fa. Vibtec GmbH. Die anschließend ermittelten Haltekraften sind in Abbildung 124 dargestellt.

Alle ermittelten Haltekraften der geprüften Magnetfixierungen liegen deutlich oberhalb der erforderlichen Haltekraft. Der erfolgreiche Abschluss der Qualifizierungsmaßnahmen zur Magnetfixierungstechnik Verstemmen bestätigt das Potential für einen möglichen Serieneinsatz in Hybridfahrzeugen.

⁴¹ Vorgegeben durch das Entwicklungslastenheft des Referenzmotors

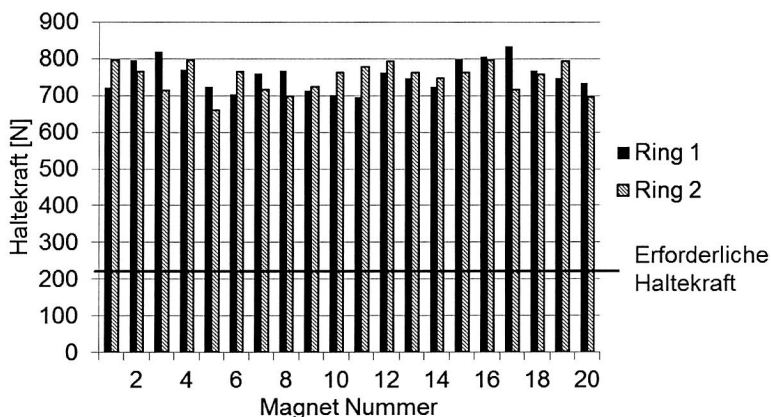


Abbildung 124: Ergebnisse der Vibrationsprüfung an der Magnetfixierungstechnik Verstemmen.

7.3 Konzeption einer teilautomatisierten Montagelinie

Neben den Qualifizierungsmaßnahmen zur Absicherung der technologischen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und elektromagnetischer Eigenschaften der Verbindungstechnik Fügegeometrie und der Magnetfixierungstechnik Verstemmen ist die Automatisierbarkeit zum seriennahen Aufbau der Produkte von zentraler Bedeutung. Hierfür soll in diesem Abschnitt, basierend auf der Entwicklungsarbeit in [131], eine teilautomatisierte Montagezelle zum prozesssicheren Fügen der Rotorsegmente zu Rotorringen und dem Fixieren der Magnete durch Verstemmen konzipiert und aufgebaut werden.⁴²

Zur Abklärung der technischen Randbedingungen ist folglich die Definition der Eingangsgrößen relevant. Um einen maximalen Blechausnutzungsgrad zu garantieren, erfolgt in der ersten Station die Anlieferungen der qualifizierten Rotorsegmente in 10er-Teilung (36° Segmente) in magaziniert Ausführung. Äquivalent dazu ist die Bereitstellung der Permanentmagnete in Magazinen für die zweite Montagestation. Detaillierte Untersuchungen der Schnittstellen des Produktes und des Montageablaufes sind Basis der Konzeption von automatisierten Montageanlagen.

Die Analyse des isolierten Fügevorganges und somit die Schnittstellen zum Greifer konnten in [131] als primärer Angriffspunkt der Entwicklungsarbeit identifiziert werden. Als vorteilhaftester Greifertyp erweist sich nach [131] der Vakuumgreifer. Durch den ein-

⁴² Bei der Entwicklung der teilautomatisierten Montageanlage wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Simon Kuchenreuther, Herrn cand. Ing. Max Schleemilch und Herrn cand. Ing. Michael Zeilmann unterstützt.

fachen Aufbau des Greifers und der somit denkbaren flächigen Aufnahme der Segmente ist eine Positionierung über die Magnettaschen mit entsprechenden Stiften möglich, ohne resultierende Störkonturen am Außen- oder Innendurchmesser. Die Aufnahme der Segmente auf dem Rundtakter ist nach [131] am vorteilhaftesten als flache Ringnut ausgeführt. Um die exakte Position der Rotorsegmente gewährleisten zu können, muss das erste Segment über dessen Kühlkanal und einem einstellbaren Eingriffelement in der Aufnahme fixiert werden. Über zusätzliche Stifte, die in die Magnettaschen des vorherigen Segmentes eingreifen, kann eine exakte winkelige Positionierung der Segmente garantiert werden. Abbildung 125 zeigt den schematischen Aufbau der Montagestation zum Fügen der Rotorsegmente.

Die Verfahrbewegung des Vakuumgreifers im kartesischen Koordinatensystem wird über Kompaktschlitten verschiedener Ausführung und Hubzylinder bewerkstelligt. Des Weiteren ist in die Konzeption eine Vorrichtung zum Positionieren der Magnete samt Aufnahme von Magnetmagazinen integriert. Somit ist die Schnittstelle zur nachfolgenden zweiten Montagestation „Verstemmen“ definiert.

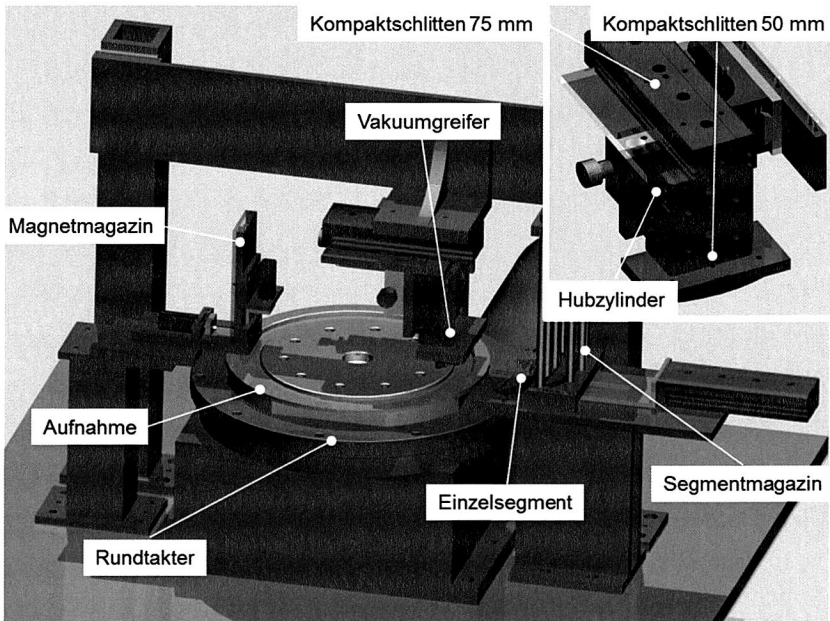


Abbildung 125: Konzeption der Demonstratoranlage zum automatisierten Fügen der Rotorsegmente.

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen und in [131] beschriebenen Untersuchungen wird mittels einer prototypischen automatisierten Fertigungszelle die serientaugliche Montage der Segmente zu vollständigen Rotorringen gezeigt. Bei einem Zulieferbetrieb erfolgt zunächst vollautomatisiert die Fertigung der Rotorsegmente durch ein verkettetes Stanzen und Verbacken. Die Bereitstellung für den nachfolgenden Montageprozess erfolgt in Magazinen. Abbildung 126 zeigt mit der dargestellten prototypischen Montageanlage die analysierten Einzelprozesse Vereinzelung, Handling der Segmente und Fügen Rotorring. Nach der Aufnahme des vereinzelten Segments mit dem Vakuumgreifer erfolgt der Transport zur Fügeposition. Über Vakuum erfolgt das Halten des Segments. Dadurch ist ein beschädigungsfreies Handling gewährleistet. Zudem wird über die ebene Auflagefläche des Segments eine planare Krafteinleitung beim Fügen erreicht. Nach dem Fügen des jeweiligen Segments wird die Aufnahme über einen Rundtaktisch in die nächste Position geleitet.

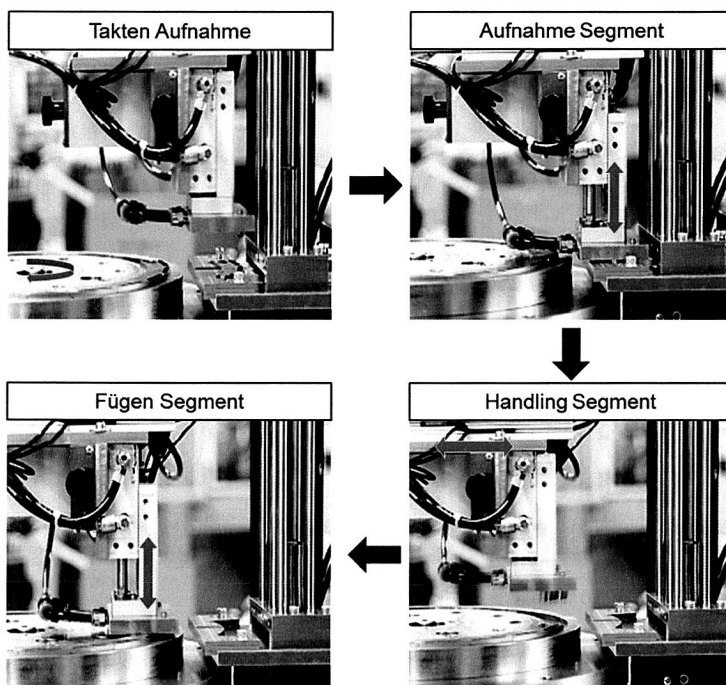


Abbildung 126: Automatisierte Montage der Rotorringe – Einzelprozessschritte. [131]

Nicht in der Anlage automatisiert dargestellt ist die nachfolgend durchzuführende axiale Fixierung des vollständig gefügten Ringes mittels Verstemmen. In Abbildung 127 ist das

entwickelte Verstemmwerkzeug und die Position der Verstemmung an der Spitze der Tannenbaumstruktur zu erkennen. [132] Die so entstehenden minimalen plastischen Verformungen resultieren in einer zur Fixierung ausreichenden formschlüssigen Verbindung.

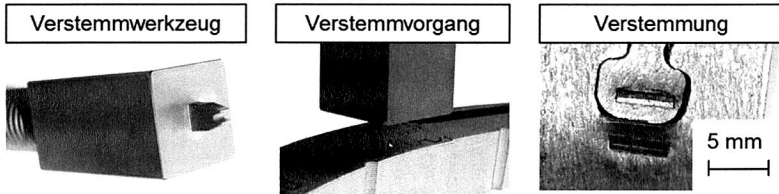


Abbildung 127: Verstemmung und Verstemmwerkzeug zur axialen Fixierung der Rotor-segmente.

Der nächste zu automatisierende Schritt ist die Bestückung und Fixierung der Permanentmagnete in den Slots der montierten Rotorringe. Die Bestückung kann, wie in Abbildung 125 dargestellt, entweder mittels eines Magnetmagazins und Vereinzelungsschieber in der Anlage zur Montage der Rotorringe integriert oder separat ausgeführt werden. Da das Positionieren von Magneten als Standardprozess gewertet werden kann, ist dies nicht explizit in einer automatisierten Demonstratoranlage ausgeführt. Eine deutlich größere Herausforderung ist die Entwicklung einer automatisierten Verstemmanlage zur Fixierung der Magnete.

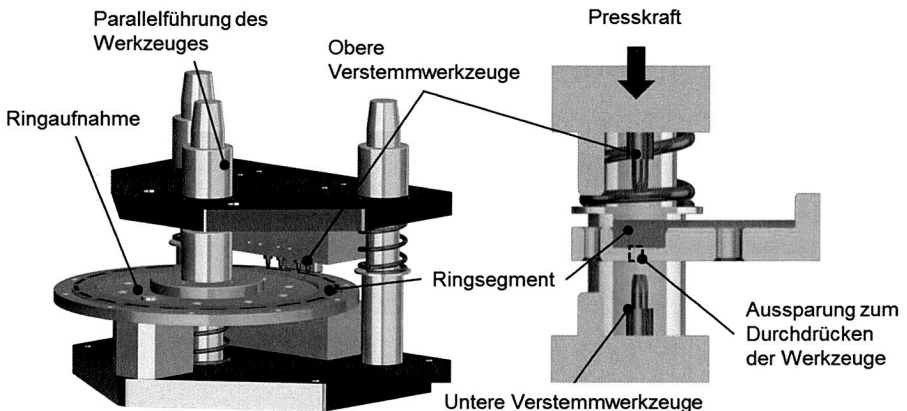


Abbildung 128: Links: Pressvorrichtung mit integrierten Verstemmwerkzeugen. Rechts: Schnittansicht.

Um auf mögliche Stückzahlerhöhungen flexibel reagieren zu können, sollen zwei Magnete und somit insgesamt acht Verstemmpunkte gleichzeitig verstemmt werden. Abbildung 128 zeigt die Konzeption der entwickelten Pressvorrichtung mit den integrierten Verstemmwerkzeugen. Die für die Verstemmung erforderliche Kraft wird über eine Presse, deren Hubzylinder an der Oberseite der Parallelführung angebracht ist, eingeleitet. Auf die oberen Verstemmwerkzeuge wirkt direkt die resultierende Kraft der Presse. Dadurch drücken die oberen Verstemmwerkzeuge die Ringaufnahme mit dem Ringsegment in axialer Richtung nach unten, bis die unteren Verstemmwerkzeuge durch eine entsprechende Aussparung auf das Ringsegment treffen. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der eigentliche Verstemmprozess mit der plastischen Verformung des Blechpaketes zur Fixierung der Magnete. Die Parallelführung gewährleistet dabei die gleichmäßige Aufteilung der resultierenden Presskraft auf die oberen und unteren Verstemmwerkzeuge. Abbildung 129 zeigt exemplarisch die typischen Schritte des Verstemmprozesses auf der teilautomatisierten Demonstratoranlage.

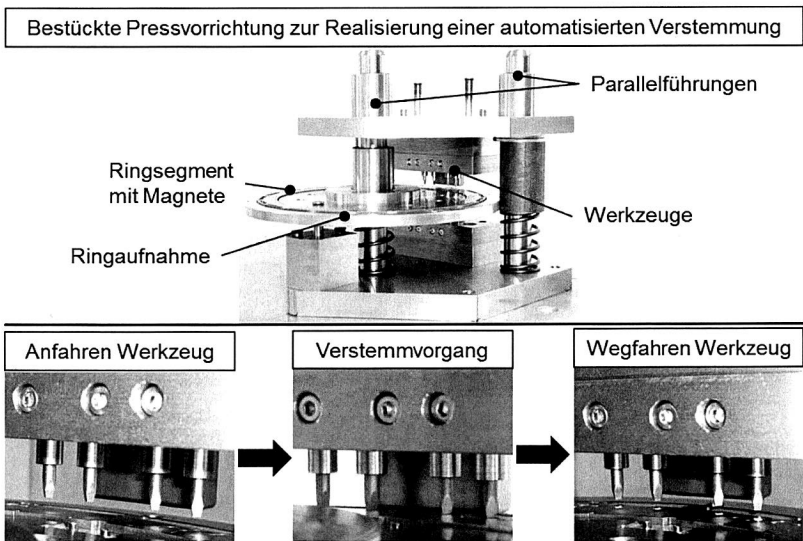


Abbildung 129: Automatisiertes Verstemmen der Magnete – Oben: Aufbau Pressvorrichtung. Unten: Prozessschritte des automatisierten Verstemmens.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen, erfolgreichen Entwicklungsarbeiten zur Abbildung automatisierter Montageprozesse zum Fügen der Rotorsegmente und zum Fixieren der Magnete mittels Verstemmen zeigen, dass eine prozesssichere Automatisierung unter Serienbedingungen möglich ist.

7.4 Aufbau des Technologieträgerrotors

Der letzte Abschnitt dieser Arbeit zeigt den Technologieträgerrotor als Ergebnis der in dieser Dissertation erbrachten Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und als Motivation für weiterführende Arbeiten. Hinsichtlich der elektromagnetischen und festigkeitstechnischen Eigenschaften ist der Technologieträgerrotor, nach bestandenen Qualifizierungsmaßnahmen der Magnetfixierung Verstemmen und der Verbindungstechnik Fügegeometrie der Rotorsegmentierung technisch vergleichbar mit dem Referenzrotor. In Abbildung 130 sind die entwickelten Komponenten einzeln, beginnend mit dem montierten Ringsegment und im vollständig aufgebauten Zustand dargestellt.

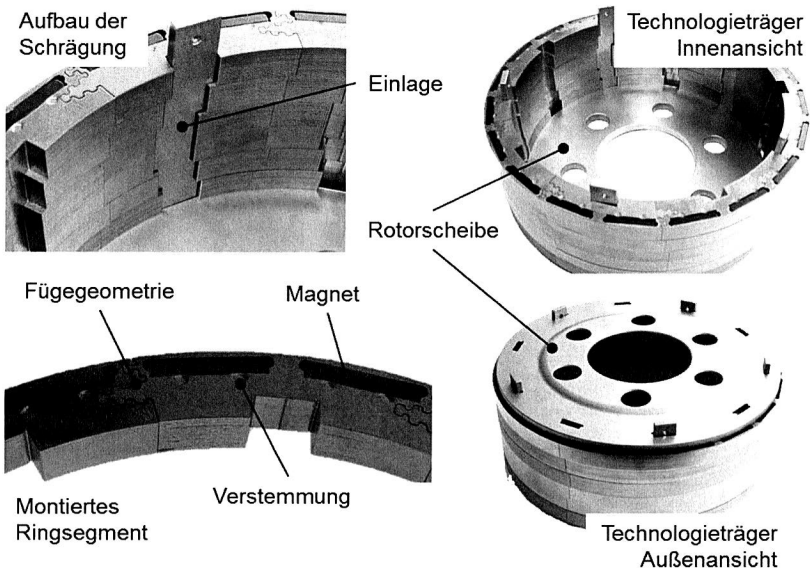


Abbildung 130: Entwickelter Technologieträgerrotor und seine Komponenten.

Die Innenansicht des Technologieträgerrotors zeigt explizit die vergleichsweise einfache Montage und Demontage und verdeutlicht nochmals die erfolgreichen Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf mögliche Serienanwendungen und den immer stärker werdenden Forderungen nach recyclinggerechten Montagelösungen. In Hinblick auf eine spätere Serienentwicklung können durch gezielte Blechauseinsparungen in den Bereichen zwischen den Fügegeometrien und den Einlagen weitere Gewichts- und somit CO₂-Reduktionen erreicht werden. Beim Vergleich der Stückkosten pro Rotor werden die in Abschnitt 3.2.2 prognostizierten Einsparpotentiale hervorgehoben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Tabelle 32 ausschließlich den Vergleich der drei entwickelten Verfahren

und Konzepte des Technologieträgerrotors mit denen des Referenzrotors aufzeigt und die gleichbleibenden Kosten für die weiteren Fertigungsschritte vernachlässigt. Einsparungen von ca. 25 GE pro Rotor sind allein durch die in dieser Arbeit zur Serienreife entwickelte und qualifizierte Rotorsegmentierungs- und Magnetfixierungstechnik im Vergleich zu den entsprechenden Technologien des Referenzrotors erzielbar. Prozentual können in diesen beiden Fertigungsabschnitten jeweils über 50 % der Kosten eingespart werden.

Stückkosten jeweils in GE	Referenz- rotor	Technologie- trägerrotor	Einsparung in GE	Einsparung in %
Stückkosten Rotorringe	37,65	17,70	19,95	52,99 %
Stückkosten Magnetfixierung	9,63	3,93	5,70	59,19 %
Stückkosten Rotorträgersystem	61,90	14,27	47,63	76,95 %
Summe Stückkosten in GE	109,18	35,90	73,28	67,12 %

Tabelle 32: Vergleich der Stückkosten zwischen Referenz- und Technologieträgerrotor und die daraus resultierenden Einsparungen.

Bei Betrachtung der Einsparmöglichkeit von über 75 % durch eine Verwendung des konzipierten Rotorträgersystems des Technologieträgerrotors wird dessen großes Potential noch deutlicher. In weiterführenden Arbeiten sollte daher dieses Konzept aufgenommen, den Anforderungen entsprechend angepasst und zur Serienreife optimiert und qualifiziert werden. Zusammenfassend können die konzipierten und entwickelten Technologien des dargestellten Technologieträgerrotors, mit den daraus resultierenden Einsparmöglichkeiten in der Produktion von PM-Synchronmotoren, einen wichtigen Beitrag für die Generierung eines für den Kunden erträglichen Preisniveaus und der dadurch möglichen globalen Hybridisierung des Kraftfahrzeugverkehrs mit signifikant reduzierten Emissionswerten leisten.

8 Zusammenfassung

Die Bedeutung alternativer Antriebssysteme für Kraftfahrzeuge nimmt im Hinblick auf die Emissionswerte und die stetig steigenden Kosten für Mobilität und Transport immer weiter zu. Um eine ausreichende Akzeptanz bei den Kunden für die, in der Übergangsphase zu den reinen Elektrofahrzeugen, entwickelten Hybridfahrzeuge zu generieren, ist die Gestaltung eines marktfähigen Preisniveaus unerlässlich. Das übergreifende Ziel der vorliegenden Dissertation war daher die Entwicklung eines hinsichtlich der Fertigungs- und Montagekosten optimierten Rotors eines getriebeintegrierten PM-Synchronmotors für Hybridfahrzeuge.

Zur Identifikation möglicher Rationalisierungs- und Optimierungspotentiale in der Produktion und Montage eines für Hybridantriebe typischen Referenzrotors wurde daher die Prozesskette der Fertigung detailgenau analysiert und bewertet. Der unbefriedigende Blechsausnutzungsgrad der im Vollschnitt gestanzten Rotoreinzelbleche und die daraus resultierende Notwendigkeit des Einsatzes der deutlich vorteilhafteren Rotorsegmentierung ist neben der Anwendung der konventionellen Magnetfixierungstechnologie Umspritzen und dem topfförmigen Rotorträgersystem der Kostentreiber in der Produktion des Referenzrotors. Durch das Aufzeigen und Bewerten des spezifischen Standes der Technik konnten die separaten Einzelziele dieser Arbeit, die Entwicklung von Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung, die Entwicklung alternativer Magnetfixierungstechnologien und die Entwicklung alternativer Rotorträgersysteme, präzisiert und somit der Forschungsbedarf definiert werden.

Bezüglich der Entwicklung und Optimierung verschiedener Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung wurden zunächst die auf die Verbindungstechnik der Rotorsegmente wirkenden Kräfte analysiert. Unter Berücksichtigung des Satzes von d'Alembert konnte aus der drehzahlabhängigen Zentrifugalkraft F_Z die resultierende, auf die Verbindungstechnik wirkende Umfangskraft $F_U = 7200 \text{ N}$ kalkuliert werden.

Die anschließenden Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten an den Verbindungstechniken Fügegeometrie, Fügeelement, Magnet als Fügeelement, Schweißen und den adhäsiven Verbindungstechniken erfolgten mittels linearer Simulation mit CATIA V5 und Zug- und Schleuderversuchen an der Referenzrotorgeometrie.

Als Ergebnis der Untersuchungen und Optimierungsarbeiten an der Verbindungstechnik Fügegeometrie konnte auf Basis des Referenzrotors eine spannungshomogene 3-Etagen-Tannenbaum-Geometrie präsentiert werden, welche Drehzahlen bis zu 13.200 U/min standhält.

Die Untersuchungen an der Funktionserweiterung des Magneten als Fügeelement zeigten, dass diese Technologie als alleinige Verbindungstechnik nicht realisierbar ist, da

zum einen die geforderten Umfangskräfte am Beispiel des Referenzrotors nicht erreicht wurden und zum anderen die einzelnen Bleche wegen der nicht vorhandenen Paketierung zum Auffächern neigen. Aus gleichwertigen Gründen sind klassische Fügeelemente als einzige Verbindungstechnik nicht realisierbar.

In Folge der Studien zur Verbindungsfestigkeit der adhäsiven Verbindungstechniken Backlack und verschiedener Klebeverbindungen erfolgte eine analytische und empirische Bestimmung der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des Adhäsionsmediums und der Überdeckungsfläche. Als vorteilhafteste adhäsive Verbindungstechnik erwies sich dabei die Backlack-Technologie mit der Drehzahlen bis zu 11.000 U/min möglich sind.

Im Zuge der Entwicklungsarbeiten zum Schweißen als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung waren Grundlagenuntersuchungen notwendig, da bisher keine Erfahrungen und Anhaltswerte zum Tiefschweißen von Elektroblechpaketen vorhanden waren. Mit Hilfe der neu gewonnenen Erkenntnisse und Parameterwerte wurden anschließend mittels Parameterstudien die für die Referenzrotorgeometrie vorteilhaftesten Parameterkombinationen erarbeitet. Diese wurden abschließend durch Schleuderversuche verifiziert und hielten Drehzahlen bis 12.000 U/min stand.

Die Validierung der Kombinationen der verschiedenen optimierten Verbindungstechniken im Brick-Wall-Design zeigte interessante Ergebnisse. Der Backlack als Verbindungstechnik dominiert in jeglicher Kombination die übrigen Verbindungstechniken. Lediglich durch die Fügegeometrie können minimale Steigerungen der Verbindungsfestigkeit erzielt werden. Der Magnet als Fügeelement hat keinen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit. Die Integration eines zusätzlichen Fügeelements reduziert diese sogar leicht.

Zum Abschluss des vierten Kapitels wurde das wirtschaftliche Potential der untersuchten Verbindungstechniken im Hinblick auf die Stückkosten des prognostizierten Serienprozesses am Beispiel des Referenzrotors analysiert. Dabei zeigte sich deutlich, dass die Verbindungstechnik Fügegeometrie, insbesondere durch die niedrigeren Investitions- und Materialkostenanteile als die wirtschaftlich vorteilhafteste Verbindungstechnik zu werten ist.

Der nächste Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Dissertation war die Entwicklung der alternativen Magnetfixierungstechnologien Verstemmen, Klemmen und Kleben. Die Entwicklungsarbeiten an der Magnetfixierungstechnologie Verstemmen beinhalteten zunächst eine Optimierung der Verstemmwerkzeugtypen (Pyramidenstumpf- und Kegelwerkzeug) mittels nicht-linearer Umformsimulation mit ABAQUS. Anschließend wurden mit den optimierten Verstemmwerkzeugen umfangreiche Parameterstudien und Toleranzbetrachtungen zur Generierung der vorteilhaftesten Verstemmparameter durchgeführt. Die höchsten reproduzierbaren Haltekräfte von 1350 N ohne Beschädi-

gung der Magneten können durch je zwei auf beiden Seiten des Blechpaketes aufgebraachte Verstemmpunkte (Pyramidenstumpfwerkzeug) erreicht werden.

Die analytischen Berechnungen und empirischen Untersuchungen an der Magnetfixierungstechnologie Klemmen zeigten, dass diese Technologie wegen der engen Toleranzlage zum Aufbau einer geeigneten Flächenpressung und den daraus resultierenden starken Beschädigungen der Magnetbeschichtung für eine mögliche Serienanwendung nicht geeignet ist. In Folge dessen wurden verschiedene, auf dieser Technologie basierende, Alternativlösungen erprobt. Am vorteilhaftesten erwiesen sich Magnete, die mit einer zusätzlichen Opferschicht zur Generierung einer ausreichenden Flächenpressung überzogen wurden.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen an der Magnetfixierungstechnologie Kleben wurden verschiedene Kleber der Fa. Henkel AG und diverse Klebeverfahren (Taschenklebung, Flankenklebung und kombinierte Taschen- und Flankenklebung) erprobt. Aus wirtschaftlicher und technischer Sicht konnte für die spezifischen Randbedingungen des Referenzrotors der Kleber Hysol 9492 im Taschenklebeverfahren als am geeignetsten definiert werden.

Die Analyse des wirtschaftlichen Potentials der untersuchten Magnetfixierungstechnologien bezüglich der Stückkosten am Beispiel des Referenzrotors war der Abschluss des fünften Kapitels. Aus monetärer Sicht vergleichbar vorteilhaft erwiesen sich dabei die Fixierungstechniken Verstemmen und Klemmen.

Die Entwicklung alternativer, topfloser Rotorträgersysteme war der dritte Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit. Im Zuge dessen wurden zwei Rotorträgersysteme in je zwei Varianten konzipiert, analytisch hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Drehmomentübertragung berechnet und als Demonstratoren aufgebaut. Dabei erwiesen sich das Konzept der „Rotorscheiben mit Schaftschrauben“ mit zehn Schaftschrauben und das Konzept der „Rotorscheiben mit Einlagen“ mit fünf gestanzten Einlagen als am vorteilhaftesten. Bei der abschließenden Analyse des wirtschaftlichen Potentials wurden beiden Konzepten signifikante Vorteile im Vergleich zum konventionellen Rotorträgersystem attestiert. Da beide alternativen Rotorträgersysteme als Konzeptionen anzusehen sind und in weiterführenden Arbeiten detaillierter betrachtet und entwickelt werden sollten, konnte aus betriebswirtschaftlicher Sicht keine Empfehlung für eines der beiden Konzepte gegeben werden.

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wurden für den Aufbau eines Technologieträgerrotors die verschiedenen entwickelten Technologien bezüglich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eignung verglichen und bewertet. Als am geeignetsten erwiesen sich dabei die entwickelte Fügegeometrie als Verbindungstechnik der Rotorsegmentierung, die entwickelte Magnetfixierungstechnologie Verstemmen und das konzipierte Rotorträger-

system Rotorscheiben mit Einlagen. Neben der erfolgreichen Durchführung von Qualifizierungsmaßnahmen zur Absicherung der technologischen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und elektromagnetischer Eigenschaften der Verbindungstechnik Fügegeometrie und der Magnetfixierungstechnik Verstemmen wurde für die beiden Technologien eine teilautomatisierte Montagelinie konzipiert und aufgebaut, um die Automatisierbarkeit in einer möglichen Serienproduktion zu gewährleisten.

Der zum Abschluss dieser Arbeit präsentierte Technologieträgerrotor dient als Motivator und Demonstrator für den Einsatz und die Entwicklung innovativer Technologien und Verfahren, die eine kostengünstige Fertigung von Rotoren permanent erregter Synchronmotoren für Hybridfahrzeuge ermöglichen und so einen wichtigen Beitrag zur stetig wachsenden Hybridisierung des automobilen Verkehrs leisten.

Vergleichbar zu den Forschungsschwerpunkten der vorliegenden Arbeit kann der Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten in drei Themenfelder gegliedert werden. Bei den Verbindungstechniken der Rotorsegmentierung sollte der Fokus auf die Verbindungstechnik Schweißen gelegt werden. Dies beinhaltet insbesondere eine Optimierung der erarbeiteten Parameterkombinationen zur Erlangung von serienreifen Qualitätsanforderungen und die Entwicklung von vorteilhaften Noppengeometrien. Des Weiteren sollten Untersuchungen zum Einfluss der Schichtdicken der Isolationslacke auf die Qualität und Tiefe der erzielbaren Schweißnähte durchgeführt werden. Darüber hinaus stellen tiefgehende Entwicklungsarbeiten zum Schweißen von gebackenen Paketen ein weiteres Forschungsfeld dar. Bei den Forschungsarbeiten im zweiten Themenfeld konnte im Bereich der Magnetfixierung Klemmen der Optimierungsmaßnahme Opferschicht ein großes Potential für einen möglichen Serieneinsatz nachgewiesen werden. Um dies zu realisieren sind aber noch weitreichende Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Bereich der Werkstofftechnik und den erforderlichen Schichtdicken notwendig um seriennahe Qualitätsansprüche zu erreichen. Im dritten Forschungsschwerpunkt sind ausschließlich Konzepte alternativer Rotorträgersysteme entwickelt und der Nachweis der technischen Machbarkeit hinsichtlich Fertigung und Montage erbracht worden. Im Hinblick auf die Qualifizierung und Bewertung der verschiedenen Systemlösungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften und deren Einfluss auf die elektromagnetische Auslegung des Motors besteht noch großer Forschungsbedarf. Neben Prüfstandsversuchen zur Bewertung und Optimierung der elektromagnetischen Eigenschaften sind empirische Festigkeitsanalysen insbesondere für die Betriebsfestigkeit der Konzepte erforderlich.

9 Summary

The importance of alternative drive systems for automobiles increases due to growing importance in emission data and the continuously rising costs for transportation and mobility. In order to generate a sufficient customer acceptance for hybrid vehicles that are developed in the transition phase to the pure electric vehicles a reasonable price level is essential. The overarching aim of this doctoral thesis was the development of an optimized rotor of a gearbox-integrated PM synchronous motor for hybrid vehicles, by focusing on the production and assembly costs.

To identify possible rationalization and optimization potentials in the production and assembly of the reference rotor of a typical hybrid drive, the chain of production was analyzed and evaluated. The sheet utilization factor for the production of the rotor which uses single sheets punched in full cut is unsatisfactory. This result in the necessary use of much more favorable rotor segmentation. This, in addition to the application of the conventional magnet fixation technology molding and the cup-shaped rotor carrier system, are the main cost drivers in the production of the reference rotor. By demonstrating and evaluating the specific state of the art, the separate individual goals of this work, the development of joining technologies of the rotor segmentation, the development of alternative magnet fixation technologies and the development of alternative rotor carrier systems, could be clarified and thus the need for research could be defined.

For the development and optimization of various joining techniques of the rotor segmentation, the forces acting on the joining technology of the rotor segments were initially analyzed. In consideration of the set of d'Alembert, the circumferential force $F_U = 7200 \text{ N}$ could be calculated from the speed-dependent centrifugal force F_Z acting on the joining technology.

The subsequent development and optimization work on the joining techniques joint geometry, joining element, magnet as a joining element, welding and adhesive joining techniques were performed using linear simulation with CATIA V5, tensile and centrifugally tests with the reference rotor geometry. As a result of the investigation and optimization work on the joining technology joint geometry on the basis of the reference rotor, a stress homogeneous 3-level fir tree geometry, which withstands speeds up to 13,200 rpm, was presented.

The studies on the functional expansion of the magnet as a joining element showed that this technology is not feasible as a sole joining technology, because the required circumferential forces on the reference rotor were not achieved and because the individual sheets tend for fanning due to the absence of packaging. For equivalent reasons classic joining elements are not feasible as a sole joining technology.

In consequence of the studies on the joint strength of the adhesive joining techniques backlack and various adhesive joints was carried out an analytical and empirical determination of capacities depending on the adhesion medium and the coverage area. The favorable adhesive joining technique proved to be the backlack technology, with speeds up to 11,000 rpm are possible.

As part of the development work for welding as a joining technology of the rotor segmentation, basic research work was needed, since no experience and reference values for keyhole welding of laminated cores were available. By using the newly acquired knowledge and parameter values then the most advantageous parameter combinations for the reference rotor geometry were developed using parametric studies. The most favorable parameter combinations were then tested at the reference rotor geometry by centrifugal tests and kept speeds up to 12,000 rpm.

The validation of the optimized combinations of the various joining techniques in brick-wall design showed interesting results. The backlack as a joint technology dominates in any combination over the other joining techniques. Only minimal increases of the bonding strength can be obtained by the joint geometry. The magnet in function as a joining element does not affect the connection strength. The integration of an additional joining element reduces this even slightly.

At the end of the fourth chapter, the economic potential of the investigated joining techniques in regard to the unit costs of the forecasted series process were analyzed for the example of the reference rotor. It is clearly shown that the joining technology joint geometry is the most economically favorable joining technology, in particular by lower investment and material cost shares.

The next focus of research of this doctoral thesis was the development of the alternative magnet fixation technologies caulking, clamping and gluing. The most extensive investigations and development work in this research area has been performed on the magnet fixation technology caulking. The development work on the magnet fixation technology caulking included first an optimization of the caulking tools (truncated pyramid and cone tool) by non-linear simulation with ABAQUS. With the optimized caulking tools then extensive parameter studies and tolerance considerations were performed to generate the most beneficial combination of caulking parameters. The highest reproducible holding forces, without damage of the magnets, can be achieved by two applied caulking points on both sides of the laminated sheets (truncated pyramid tool).

The analytical calculations and empirical studies on the magnetic fixation technology clamping showed that this technology is not suitable for a possible in series application, because of the close tolerance fit to build a suitable surface pressure and the resulting serious damage of the magnetic coating. In consequence, based on this technology,

different alternative solutions have been tested. Most advantageous are magnets that have been coated with an additional sacrificial layer.

In the course of experimental studies on the magnet fixation technology gluing various adhesives from Henkel AG and various gluing processes (bags-gluing, flanks-gluing and combined bags- and flanks-gluing) were tested. From an economic and technical point of view, the adhesive Hysol 9492 used in the bags-gluing process could be defined as most suitable for the specific conditions of the reference rotor.

The analysis of the economic potential of the investigated magnet fixation technologies regarding the unit costs for the example of the reference rotor was discussed in the conclusion of the fifth chapter. From a monetary point of view the fixation techniques caulking and clamping proved to be comparably advantageous

The development of alternative, cup-less rotor carrier systems was the third research focus of this work. In the course of the development work two rotor carrier systems were designed in each two variants, calculated analytically in terms of their ability for transmitting torque and built as demonstrators. The concept of "rotor disks with shank bolts" with ten shank bolts and the concept of "rotor disks with deposits" with five punched deposits proved to be as the most advantageous. At the final analysis of the economic potential, both concepts have been attested with significant advantages compared to the conventional rotor carrier system. Since both alternative rotor carrier systems can be considered, they should be developed in more detail in further studies. No recommendation for one of the two concepts could be given from a business perspective.

In the last chapter of this thesis the various developed technologies have been compared and evaluated for their technical and economic suitability for building a technology carrier rotor. The most suitable combination proved to be the developed "joint geometry" as a joining technique of the rotor segmentation, the developed magnet fixation technology "caulking" and the designed rotor carrier system "rotor discs with inserts". In addition to the successful implementation of qualification measures to secure the technological requirements in terms of strength and electromagnetic properties of the connection technology joint geometry and the magnetic fixation technique caulking, a partially automated assembly line was designed and built to ensure the automation in a possible series production for the two technologies.

In conclusion, the technology carrier rotor, which was presented at the end of this thesis, serves as a motivator and demonstrator for the use and development of innovative technologies and processes which enable a cost-effective manufacturing of rotors of permanent-magnet synchronous motors for hybrid vehicles and thus make an important contribution to the growing hybridization of automobile traffic.

Similar to the research focus of this thesis the outlook for further research work can be divided in three areas. For the joining techniques of the rotor segmentation the focus should be placed on the joining technology welding. This includes in particular the optimization of the developed parameter combinations to obtain production-ready quality requirements and the development of advantageous nubs geometries. Further investigations should be carried out on the influence of the layer thickness of the insulation coatings on the quality and depth of the achievable welds. In addition, deep development work for the welding of baked laminations provides another area of research. In the research work of the second topic area a high potential for a possible use in series could be detected in the optimization action “sacrificial layer” of the magnet fixation technique clamps. But to realize this extensive research and development efforts are required in the field of materials technology and the required layer thicknesses to achieve close to series quality. In the third research focus exclusive concepts of alternative rotor carrier systems have been developed. The evidence of the technical feasibility has been rendered in respect of manufacture and assembly. With regard to the qualification and evaluation of the various system solutions in terms of mechanical properties and their influence on the electromagnetic design of the motor, there is still a high demand for research. In addition to bench tests for the evaluation and optimization of the electromagnetic properties empirical strength analyzes are particularly necessary for the operational stability of the concepts.

Literaturverzeichnis

- [1] Nationale Plattform für Elektromobilität, *Fortschrittsbericht der nationalen Plattform für Elektromobilität (3.Bericht)*. Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). 2012.
- [2] Hofmann, P., *Hybridfahrzeuge*. Wien: Springer Verlag. 2010.
- [3] N.N., *Hybrid Synergy Drive*. Toyota Motor Europe, <http://www.toyota.de/innovation/hsd/vollhybrid/landingpage.tmex>, Zugriff am 02. Januar 2013.
- [4] N.N., *BMW Active Hybrid*. BMW AG, <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/efficientdynamics/activehybrid.html>, Zugriff am 13. März 2013.
- [5] N.N., *Daimler Hybridantriebe*. Daimler AG, <http://www.daimler.com/technologie-und-innovation/antriebe/hybridantriebe>, Zugriff am 23. Juli 2011.
- [6] Diez, W., Kohler, M., *Otto-, Diesel- oder Elektromotor - Wer macht das Rennen? Handlungsfelder zur Sicherung des Automobilstandortes*. Stuttgart: Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart. 2010.
- [7] Redelbach, M., Propfe, B., Friedrich, H.E. *Competitive Cost Analysis of Alternative Powertrain Technologies*. in: *International Advanced Mobility Forum IAMF 2012*. Genf. 2012. S. 1-7.
- [8] Albrecht, T., König, W., Bickel, B. *Proceedings for wiring integrated winding of segmented stators of electric machines*. in: *Electric Drives Production Conference EDPC 11*. Nürnberg. 2011. S. 180-185.
- [9] Stan, C., *Alternative Antriebe für Automobile*. Heidelberg: Springer Verlag. 2005.
- [10] N.N., *Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik - Emissionen*. Wien: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik. 2010.
- [11] N.N., *Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ - Emissionen von Personenkraftwagen*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf, Zugriff am 20. November 2012.
- [12] Reh, W., Chen, F., *Deutsche Autohersteller und die Reduzierung von CO₂ bei Neuwagen*. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). 2007.
- [13] N.N., *BMW Energiedaten 2008, Tabelle 9*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html>, Zugriff am 22.11.2012.

- [14] Voß, A., Blesl, M., Hartmann, N., *Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität*. Universität Stuttgart, <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5218/>, Zugriff am 15.01.2013.
- [15] Wöhl-Bruhn, H., *Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe*. Göttingen: Cuvillier Verlag. 2010.
- [16] Pucher, E., Sekanina, A., *Vom Hybridauto zum Brennstoffzellen-Elektroauto*. in *e&i Elektrotechnik & Informationstechnik*, Wiesbaden: Springer Verlag. 2006. S. 410-413.
- [17] Braess, H.-H., Seiffert, U., *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag. 2005.
- [18] Naunheimer, H., Bertsche, B., Lechner, G., *Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Heidelberg: Springer Verlag. 2007.
- [19] Wallentowitz, H., Reif, K., *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag. 2006.
- [20] Linden, D., *Handbook of Batteries*. New York: Mcgraw-Hill. 2008.
- [21] Fuest, K., Döring, P., *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Wiesbaden: Vieweg Verlag. 2004.
- [22] Babel, G., *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag. 2007.
- [23] Schröder, D., *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. Heidelberg: Springer Verlag. 2000.
- [24] Stühler, G., *Die Nase im Wind: Generatoren für die regenerative Energiegewinnung*. Wittenstein GmbH, http://www.wittenstein.de/files/WAG_PM_WindTec_WCM_24042012_de.pdf, Zugriff am 22.12.2012.
- [25] Michalowsky, L., Schneider, J., *Magnettechnik - Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*. Essen: Vulkan Verlag. 2006.
- [26] Heikkilä, T., *Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications - analysis and design*. Lappeenranta University of Technology, <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31173/TMP.objres.359.pdf?sequence=1>, Zugriff am 28.12.2012.
- [27] Paul, M., Hofmann, W., *Permanentmagnetanordnung, vorzugsweise für Rotoren permanenterregter Synchronmotoren*. Patentschrift: DE19942000A1. 2001.
- [28] Gieras, J., Wing, M., *Permanent Magnet Motor Technology*. New York: Verlag Marcel Dekker. 2002.
- [29] N.N., *Mercedes-Benz E 300 BlueTEC HYBRID*. Daimler AG, <http://media.daimler.com>, Zugriff am 05. Januar 2013.

- [30] Junker, S., *Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten*. Bamberg: Meisenbach Verlag. 2007.
- [31] Wuppermann, C.-D., Schoppa, A., *Merkblatt 401: Elektroband und -blech*. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum. 2005.
- [32] Brachthäuser, N. *Elektromobilität - Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband*. in: 11. Umformtechnisches Kolloquium. Darmstadt. 2012. S. 209 - 216.
- [33] Norm DIN EN 10106. *Kaltgewalztes, nicht kornorientiertes Elektroblech und -band*. Berlin: Beuth Verlag. 2007
- [34] Norm DIN EN 10107. *Kornorientiertes Elektroblech und -band im schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag. 2005
- [35] Norm DIN EN 10126. *Kaltgewalztes Elektroblech und -band aus unlegierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag. 1996
- [36] Norm DIN EN 10165. *Kaltgewalztes Elektroblech und -band aus legierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag. 1996
- [37] Lamprecht, E., Gräf, R. *Fundamental Investigations of Eddy Current Losses in Laminated Stator Cores Created Through the Impact of Manufacturing Processes*. in: *Electric Drives Production Conference EDPC 11*. Nürnberg. 2011. S. 52-58.
- [38] Brachthäuser, N., dePaoli, A., Schäfer, P., Senn, G., *Laserstrahlschweißen von paketierte Elektroblechen*. in *ATZ Produktion*, Berlin: Springer Verlag. 2011. S. 1-7.
- [39] N.N., C.D. *Wälzholz*. C.D. Wälzholz - Elektroband, http://www.cdw.de/Produkte/Elektroband/0_331.html, Zugriff am 04. Mai. 2011.
- [40] N.N., *Arcelor Mittal - Products and Solutions*. Arcelor Mittal AG, http://www.arcelormittal.com/industry/app/new_web_list?langlist=DE, Zugriff am 20. April 2012.
- [41] N.N., *ISOVAC - Elektorband*. Voestalpine Stahl GmbH, <http://www.voestalpine.com/stahl/Produkte/Produkte/Stahlbaender/Elektroband>, Zugriff am 20.02.2012.
- [42] N.N., *Thyssen Krupp Electical Steel*. Thyssen Krupp AG, http://www.tkes.com/web2010/tkeswebcms.nsf/www/en_index.html, Zugriff am 20. April 2012.
- [43] Norm DIN EN 10342. *Magnetische Werkstoffe - Einteilung der Isoalitionen auf Elektroblech und -band und daraus gefertigten Stanzteilen*. Berlin: Beuth Verlag. 2005

- [44] Norm ASTM A976. *Classification of Insulating Coating for Electrical Steel*. Berlin: Beuth Verlag. 2003
- [45] N.N., *Rembrandtin*. Rembrandtin GmbH,
<http://www.rembrandtin.at/index.php?id=180>, Zugriff am 18. Juli 2011.
- [46] N.N., *Du Pont Elektroblechlacke*. Du Pont AG,
http://www2.dupont.com/Wuppertal/de_DE/assets/downloads/elektroblech-d.pdf,
Zugriff am 19. Juli 2011.
- [47] Norm IEC/CEI 60404-11. *Franklin Verfahren zur Messung der Isolation*. Berlin: Beuth Verlag. 1999
- [48] Norm IEC/CEI 60404-12. *Dauertemperaturbeständigkeitsprüfung zu Messung der Isolation*. Berlin: Beuth Verlag. 1992
- [49] Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 2009.
- [50] Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., *Recycling of rare earths: a critical review*. in *Journal of Cleaner Production* 51, München: Elsevier Fachverlag. 2013. S. 1-22.
- [51] Klier, T., Risch, F., Franke, J. *Disassembly, Recycling, and Reuse of Magnet Material of Electric Drives*. in: *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*. Xi'an (China). 2013.
- [52] Norm DIN EN 60404-2. *Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband mit Hilfe eines Epsteinrahmens*. Berlin: Beuth Verlag. 2009
- [53] N.N., *Vacodym / Vacomax*. Hanau: Firmenschrift: Vacuumschmelze GmbH & Co. KG. 2007.
- [54] Gausemeier, J., Plass, C., *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung*. München: Carl Hanser Verlag. 2009.
- [55] Regber, H., Zimmermann, K., *Change Management in der Produktion*. Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie AG & Co. KG. 2001.
- [56] Gerst, D., Möhwald, H., *Qualifizierung von Produktionspersonal in flexiblen Montagesystemen*. in *wt Werkstatttechnik online*, Düsseldorf: Springer- VDI-Verlag. 2003. S. 404-412.
- [57] Fröschle, U., Geiger, W., Weck, L., *Die KVP-Studie: eine Studie der Agamus Consult GmbH im Auftrag von Otto Wolff von Amerongen*. Starnberg: Agamus Consult Verlag. 1996.
- [58] Slama, S., *Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz*. Bamberg: Meisenbach Verlag. 2004.

- [59] N.N., *Blechbearbeitung Koppe*. Erwin Koppe - Keramische Heizgeräte GmbH, <http://www.blechbearbeitung-koppe.de/impressum.htm>, Zugriff am 28. Dezember 2012.
- [60] N.N., *Schuler Group*. Schuler AG, <http://www.schulergroup.com/index.html>, Zugriff am 19. Dezember 2012.
- [61] N.N., *Stanzwerk Home Elektroblech*. Stanzwerk AG, <http://www.stanzwerk.com/de/home/index.php>, Zugriff am 19. Dezember 2012.
- [62] Dickmann, K., *Untersuchungen über den Einsatz von Hochleistungslasern zum Trennen von Elektroblechen*. Düsseldorf: VDI Verlag. 1989.
- [63] N.N., *LCD Lasercut AG*. LCD Lasercut AG, <http://www.lcd-lasercut.ch/home.php>, Zugriff am 09. September 2011.
- [64] N.N., *Kienle + Spiess Gruppe*. Kienle + Spiess GmbH, <http://www.kienle-spiess.de/stormcms2/c3view.php?sid=llbb9W3wbQezzcebOwRIllCQbEwbwqcgzbzSwelwl&ieb=1356022278&c3p=6&c3l=de>, Zugriff am 19. Dezember 2012.
- [65] N.N., *SWD Schweißwerk Densbüren*. SWD AG, <http://www.swd-schweisswerk.ch/>, Zugriff am 18. Dezember 2012.
- [66] Tremel, J., Dobroschke, A., *Verfahren zur Herstellung eines Blechpakets*. Patentschrift: DE102011015761A1. Universität Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [67] Scheidt, M., *Entwurfskriterien für permanenterregte Synchronmaschinen in Zahnspulentechnik unter besonderer Berücksichtigung der Zusatzverluste*. Kaiserslautern: Shaker Verlag. 2009.
- [68] Jurisch, F., *Scharfe Polübergänge bei hoher Polbedeckung bei permanenterregten Maschinen*. in *Tagungsband Elektrisch-mechanische Antriebssysteme*, Offenbach: VDE Verlag. 2004. S. 827-834.
- [69] Kuroda, K., Miyazaki, H., *Magnetizer for Rotor Magnet Material*. Patentschrift: JP09168259. Toyota Motor Corporation, 1997.
- [70] Norm DIN ISO 1940. *Auswuchten einschließlich Auswuchtmaschinen*. Berlin: Beuth Verlag. 2004
- [71] Lingener, A., *Auswuchten. Theorie und Praxis*. Berlin: Verlag Technik. 1992.
- [72] Anders, C., Schweizer, U., Eyssele, G., Herrmann, R., *Verfahren zum Wuchten eines Massebauteils durch CMT-Schweißen*. Patentschrift: DE102009054103A1. Daimler AG, 2009.
- [73] N.N., *Roos und Kübler Gruppe*. Roos und Kübler GmbH, <http://www.roos-kuebler.de/>, Zugriff am 19. Dezember 2012.
- [74] Grothe, S., Hemke, S., Lepinski, A., *A bis Z - Fakten zur Windenergie*. Berlin: Bundesverband Windenergie e.V. 2012.

- [75] Bendziula, H., *Aus einzelnen Blechsegmenten geschichteter Läufer elektrischer Großmaschinen*. Patentschrift: DE1140638. Licentia GmbH, 1962.
- [76] Leukert, W., *Aus einzelnen Blechsegmenten aufgebauter Jochring für den umlaufenden Erreger teil großer Generatoren*. Patentschrift: DE974711. Siemens AG, 1951.
- [77] Felisa, P., *Verfahren zur Herstellung eines Statormagnetkreises von rotierenden elektrischen Maschinen oder eines Magnetkreises eines Transformators und ein so erhaltener Magnetkreis*. Patentschrift: DE3906368. Trancerie Emiliane S.p.A., 1989.
- [78] Grando, P., Jeanbart, J., *Blechringe*. Patentschrift: DE69204322. Jeumont-Industrie S.A., 1992.
- [79] Baumeister, J., Welke, K., Wurst, S., *Elektrische Maschine mit Außenläufer und einer gegossenen Nabe*. Patentschrift: EP1385252B1. ZF Sachs AG, 2004.
- [80] Bareis, A., Röver, M., Drescher, T., Kauffmann, J., *Verfahren zur Herstellung von aus Blechteilen bestehenden Paketen*. Patentschrift: EP1269608. Schuler Pressen GmbH and Roos & Kübler GmbH & Co.KG, 2000.
- [81] Esch, G., Rode, P., *Rotor und Verfahren zur Positionierung eines Magneten eines Rotors*. Patentschrift: DE102009025622A. Miele & Cie KG, 2009.
- [82] König, W., *Rotor für eine elektrische Maschine*. Patentschrift: DE102010012322. Daimler AG, 2010.
- [83] Bayer, H., Zaps, K., *Vorrichtung zur Halterung eines Magneten und Verfahren zur Herstellung*. Patentschrift: DE102008023999A. Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG 2008.
- [84] Büttner, K., Könen, M., *Rotor mit Strangpressprofil und Ferrofluid*. Patentschrift: DE102008027759A1. Siemens AG, 2008.
- [85] Aguchi, E., *Rotor for Permanent Magnet Embedded type motor and method and device for assembling the same*. Patentschrift: JP2004015781. Neomax Co. LTD., 2005.
- [86] Amemiya, Y., Sogabe, M., Tagami, K., *Permanent Magnet Field Rotor Assembly*. Patentschrift: EP215129B1. Fanuc LTD, 1985.
- [87] Branzi, F., *Polar package construction for permanent magnet rotors of alternators and the like*. Patentschrift: EP0803962A1. Bamo Elettrotensili S.R.L., 1996.
- [88] Yusuke, M., Yoshio, F., *MOTOR*. Patentschrift: US2008/0174203A1. Nidec Corp., 2008.
- [89] Albrecht, T., Gürsel, C., Lamprecht, E., Klier, T. *Joining Techniques of the Rotor Segmentation of PM- Synchronous Machines for Hybrid Drives*. in: *Electric Drives Production Conference EDPC12*. Nürnberg. 2012. S. 255-262.

- [90] Witt, S., Löhrke, A., König, W., Bautz, R., Lemke, M., *VDA Arbeitskreis E-Antriebe: Prüf- und Qualifikationslastenheft E-Maschine*. Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V. 2013.
- [91] Schulz, J., *Inertialsystem*. <http://www.relativitätsprinzip.info/inertialsystem>, Zugriff am 12. Dezember 2012.
- [92] Muhs, D., Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J., *Roloff/Matek - Maschinenelemente*. Wiesbaden: Vieweg Verlag. 2005.
- [93] Grote, K.-H., Feldhusen, J., *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Aachen und Magdeburg: Springer Verlag. 2007.
- [94] Gawehn, W., *Finite Element Methode*. Norderstedt: Books on Demand GmbH. 2009.
- [95] Albrecht, T., König, W., Anders, C., Gürsel, C., *Verbindungsanordnung zweier Ringsegmente eines Ringelements für eine elektrische Maschine*. Patentschrift: DE102012013836A1. Daimler AG, 2012.
- [96] N.N., *PLB Prüflabor für Betriebsfestigkeit GmbH*. PLB Prüflabor für Betriebsfestigkeit GmbH, <http://www.plb-gmbh.de/Pruefstand/Messsysteme.html>, Zugriff am 20.08.2011.
- [97] Albrecht, T., König, W., Partheymüller, A., *Ringelement für eine elektrische Maschine sowie Verfahren zum Herstellen eines solchen Ringelements*. Patentschrift: DE102011115159A1. Daimler AG, 2011.
- [98] Norm DIN EN 22340. *Bolzen ohne Kopf*. Berlin: Beuth Verlag. 1992
- [99] Norm DIN EN 923. *Klebstoffe - Benennungen und Definitionen*. Berlin: Beuth Verlag. 2008
- [100] Habenicht, G., *Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Heidelberg: Springer Verlag. 1997.
- [101] N.N., *Loctite 9497 Hysol - Technisches Datenblatt*. Düsseldorf: Henkel AG. 2008.
- [102] N.N., *Voltatex 1175W*. DuPont AG, http://www2.dupont.com/Electrical_Insulation_Systems/en_DE/products/core%20sheet/Product%20infos/CSV%20Product%20info.html, Zugriff am 11. September 2011.
- [103] N.N., *Loctite 401 - Technisches Datenblatt*. Düsseldorf: Henkel AG. 2013.
- [104] N.N., *Loctite 586 - Technisches Datenblatt*. Düsseldorf: Henkel AG. 2013.
- [105] Norm DIN 910-100. *Welding and allied processes*. Berlin: Beuth Verlag. 2008
- [106] Poprawe, R., *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin: Springer Verlag. 2005.
- [107] Brunner, W., Junge, K., *Lasertechnik*. Heidelberg: Hüthig Verlag. 1982.

- [108] Bergmann, W., *Werkstofftechnik 2 - Werkstoffherstellung, Werkstoffbearbeitung und Werkstoffanwendung*. München: Carl Hanser Verlag. 2009.
- [109] Klocke, F., König, W., *Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*. Berlin: Springer Verlag. 2007.
- [110] Albrecht, T., Brandner, M., Henke, T., *Verfahren und Vorrichtung zum Verbindungsschweißen von segmentierten Rotorringen*. Patentschrift: Patentnummer nachtragen. Daimler AG, 2013.
- [111] Lamprecht, E., Albrecht, T., Hömme, M. *Investigations of Eddy Current Losses in Laminated Cores Due to the Impact of Various Stacking Processes*. in: *Electric Drives Production Conference EDPC 12*. Nürnberg. 2012. S. 61-68.
- [112] Norm DIN 50460. *Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von weichmagnetischen Werkstoffen; Allgemeines, Begriffe, Grundlagen der Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag. 1988
- [113] Wöhle, G., Döring, U., *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Vahlen Verlag. 2009.
- [114] Kruschwitz, L., *Investitionsrechnung*. München: Oldenbourg Verlag. 2005.
- [115] Arendes, D., Degand, M., *Forschungsbericht: UMFÜ, Umformtechnisches Fügen von Welle-Nabe Verbindungen*. Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, http://www.htw-saarland.de/forschung/fakten/berichte/ingwi/umfue_arendes_2005.pdf/view, Zugriff am 03. März 2013.
- [116] Albrecht, T., Franke, J., Risch, F., Tremel, J., *Recyclinggerechte Montagetechnik für permanent erregte Synchronmotoren*. in *ATZ Produktion*, Wiesbaden: Springer Verlag. 2012. S. 146-151.
- [117] Bathe, K.-J., *Finite Elemente Methode*. Berlin / Heidelberg: Springer Verlag. 2002.
- [118] Albrecht, T., König, W., *Vorrichtung und Verfahren zur Demontage von Permanentmagnete eines Rotorelements für eine elektrische Maschine*. Patentschrift: DE102012003630. Daimler AG, 2012.
- [119] Fischer, U., *Tabellenbuch Metall*. Wuppertal: Europa Lehrmittel Verlag. 2011.
- [120] Albrecht, T., König, W., *Permanentmagneteinheit, Rotor und Verfahren zur Herstellung des Rotors*. Patentschrift: DE102012003453A1. Daimler AG, 2012.
- [121] N.N., *Loctite 9492 Hysol - Technisches Datenblatt*. Düsseldorf: Henkel AG. 2013.
- [122] N.N., *Loctite 9514 Hysol - Technisches Datenblatt*. Düsseldorf: Henkel AG. 2013.
- [123] Wiegand, H., Kloos, K.-H., Thomala, W., *Schraubenverbindungen - Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften und Handhabung*. Heidelberg: Springer Verlag. 2007.

- [124] Kübler, K.-H., *Handbuch der hochfesten Schrauben*. Essen: Girardet Verlag. 1986.
- [125] Albrecht, T., König, W., *Rotor für eine elektrische Maschine*. Patentschrift: DE102011118398A1. Daimler AG, 2012.
- [126] Norm DIN 6885-1. *Mitnehmerverbindungen ohne Anzug; Paßfedern, Nuten, hohe Form*. Berlin: Beuth Verlag. 1968
- [127] Gengenbach, R., *GMP - Qualifizierung und Validierung von Wirkstoffanlagen*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag. 2008.
- [128] Radaj, D., Vormwald, M., *Ermüdungsfestigkeit*. Berlin: Springer Verlag. 2005.
- [129] Ilschner, B., Singer, R., *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*. Berlin: Springer Verlag. 2005.
- [130] Haibach, E., *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Berlin: Springer Verlag. 2006.
- [131] Albrecht, T., Hubert, M., Franke, J., König, W., *Segmentierte Rotoren in leistungsstraken Hybridantrieben*. in *Antriebstechnik - ANT Journal*, Mainz: Vereinigte Fachverlage. 2013. S. 30-34.
- [132] Albrecht, T., König, W., *Verstemmen als Montagesicherung segmentierter Rotorringe*. Patentschrift: DE10201219182. Daimler AG, 2012.

Lebenslauf

Thomas Andreas Albrecht

Geboren am 04. Dezember 1984 in Memmingen

Ledig

09/1991 – 07/1995	Grundschule Memmingerberg
09/1995 – 06/2004	Bernhard-Strigel-Gymnasium Memmingen Abschluss: Abitur
09/2004 – 05/2005	Zivildienst beim Marianum der Salesianer Don Boscos in Buxheim bei Memmingen
10/2005 – 11/2010	Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung Fertigungs- technik, an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen- Nürnberg Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
01/2011 – 06/2013	Doktorand in der Verfahrensentwicklung Elektromotor der Daimler AG in Stuttgart
Seit 01/2011	Externer Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Leiter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Seit 07/2013	Entwicklungsingenieur in der Forschung / Vorentwicklung Alternative Antriebssysteme der Daimler AG in Stuttgart

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52

Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53

Meisenbach Verlag, Bamberg

45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme**
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik**
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen**
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion**
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung
am Beispiel der Schraubtechnik**
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung**
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrice
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp
**Anlagen– und Prozessdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel

**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**

149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt

**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**

180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke

**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie

**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.

ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-079-6

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

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

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

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

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

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

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

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
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**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

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

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

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

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meißner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schuberth

**Regelung der Fokusbildung beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 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**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontage Technologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
 ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
 ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
 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
 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
 ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
 ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
 ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 18 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

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

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

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

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

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

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 65 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

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

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

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

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

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

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

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

Band 114: Alexander Huber
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser
unter Einsatz von Aktoren**
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen
in der Elektronikproduktion**
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

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

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

Band 118: Markus Koch
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau
durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

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

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
**Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung**
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

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

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßler

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen

ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002

ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.

ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendack

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen

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**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen

ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Mäßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestructuren und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 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

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung:

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile

bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung

des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit

trockenschmierstoffbeschichteter

Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie,

zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

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

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtel

**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –
System- und Prozesstechnik**

154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert

**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**

131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller

**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**

147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-243-9

ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wöflück

**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0

ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-248-4

ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren
von Kaltmassivumformwerkzeugen**

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-249-1

ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung
Für kooperierende Industrieroboter**

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.

ISBN 978-3-87525-250-7

ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-251-4

ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

**Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und
Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)**

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

**Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und
Prozesssicherheit in der Produktion**

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere

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**
173 Seiten, 75 Bilder, 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

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

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

Band 186: Bernd Zolleiß
**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung
mechatronischer Baugruppen**
180 Seiten, 117 Bilder, 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch
**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal
wärmebehandelter Aluminiumplatten**
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5

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

Band 189: Thomas Frick
**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

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

Band 191: Ralf Völkl
**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff
**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

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

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

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

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 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
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

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

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

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

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 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
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 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
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

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

Band 216: Florian Schüller
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

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

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

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

Band 221: Michael Rösch
**Potenziale und Strategien zur Optimierung des
Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion**
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 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**
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 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**
165 Seiten, 65 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner
**Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte
Werkzeugoberflächen**
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber
**Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei
höchstfesten Stahlgüten**
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 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, Prozesssimulation
und funktionale Untersuchung**
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 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**
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

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

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

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

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.

ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-349-8

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blech-massivumformung

163 Seiten, 108 Bilder, 207 Tabellen 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

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidlinchverfahrens

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013

ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen

ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunkteschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen

ISBN 978-3-87525-358-0

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

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen
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
148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen
ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen
ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen
ISBN 978-3-87525-365-8

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

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