

Stefan Junker

*Technologien und Systemlösungen  
für die flexibel automatisierte  
Bestückung permanent erregter  
Läufer mit oberflächenmontierten  
Dauermagneten*





Stefan Junker

*Technologien und Systemlösungen  
für die flexibel automatisierte  
Bestückung permanent erregter  
Läufer mit oberflächenmontierten  
Dauermagneten*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung:	20. April 2007
Tag der Promotion:	20. Juli 2007
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, TU München

### **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.

ISBN 978-3-87525-259-0  
ISSN 1431-6226

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 Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2007  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau, 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. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Ordinarius des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Anmerkungen. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Piepenbreier, Leiter des Lehrstuhls für Elektrische Antriebe und Steuerungen der Universität Erlangen-Nürnberg, als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg, Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Hans Roßmanith vom Lehrstuhl für Elektromagnetische Felder danke ich herzlich für seine stets freundliche und kompetente Unterstützung bzgl. Fragestellungen zur FEM-Feldberechnung sowie seine konstruktiven Anmerkungen.

All meinen Kolleginnen und Kollegen sei an dieser Stelle herzlich für die stets sehr gute Zusammenarbeit, die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die vielen gemeinsam durchgeführten Kooperationsprojekte und die stets sehr angenehme Arbeitsatmosphäre gedankt. Hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang Herrn Dipl.-Ing. Andreas Dobroschke für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und Herrn Dipl.-Inf. Matthias Weber für die vielen fruchtbaren Gespräche. Herrn Dr.-Ing. Stefan Lang, meinem langjährigen Bürokollegen, danke ich weiterhin für die stets freundschaftliche und kommunikative Zusammenarbeit während unserer Zeit am Lehrstuhl. Großer Dank gebührt weiterhin meinem ehemaligen Betreuer, Kollegen und gutem Freund Herrn Dr.-Ing. Stefan Slama für die stetige Unterstützung und Förderung, die er mir während des Studiums und meiner Zeit am Lehrstuhl zuteil werden ließ.

Ferner möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die mich während meiner Zeit am Lehrstuhl tatkräftig im Rahmen verschiedenster Projekte unterstützt und so einen wichtigen Beitrag zur Erstellung der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

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



# **Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen permanent erregter elektrischer Maschinen .....</b>	<b>7</b>
2.1	Physikalische Grundlagen .....	7
2.1.1	Elektromagnetische Felder .....	7
2.1.2	Ferro- und Permanentmagnetismus .....	10
2.1.3	Rechnerische Bestimmung von Magnetkräften .....	11
2.2	Entwicklungstrends permanent erregter elektrischer Maschinen .....	13
2.2.1	Einordnung von PM-Maschinen .....	14
2.2.2	Innovative leistungselektronische Bauteile .....	17
2.2.3	Entwicklung leistungsfähiger Magnetwerkstoffe .....	17
2.3	Konstruktionsprinzipien für Läufer mit Dauermagneten .....	18
2.3.1	Magnetkörper für Dauermagnetläufer .....	19
2.3.2	Oberflächenmontierte Magnete .....	20
2.3.3	Innen liegende Magnete .....	22
2.3.4	Auswirkung alternativer Läuferkonstruktionen und Magnetgeometrien auf Fertigung und Montage .....	23
2.4	Industrielle Bedeutung verschiedener Konstruktionsprinzipien und Magnetgeometrien .....	24
<b>3</b>	<b>Rationalisierungspotenziale bei der Läuferproduktion .....</b>	<b>31</b>
3.1	Prozesskette zur Herstellung von Dauermagnetläufern .....	31
3.1.1	Herstellung des eisenfertigen Läufers .....	31
3.1.2	Bestückung .....	33
3.1.3	Montage der Fliehkraftsicherung .....	38
3.1.4	Magnetisierung .....	39
3.1.5	Einbau des Läufers in den Ständer .....	40
3.1.6	Bewertung der Einzelprozesse hinsichtlich ihres Rationalisierungspotenzials .....	41

3.2	Bisherige Ansätze zur Steigerung der Bestückeffizienz.....	42
3.2.1	Ansätze zur montagegerechten Läufergestaltung .....	43
3.2.2	Vorrichtungen und Methoden zur sicheren Beherrschung der Prozesskräfte.....	44
3.2.3	Automatisierungskonzepte für die Läuferbestückung .....	47
3.3	Forschungsbedarf zur Rationalisierung der Magnetbestückung .....	50
<b>4</b>	<b>Prozesse und Technologien zur automatisierten Verarbeitung von Dauermagneten.....</b>	<b>53</b>
4.1	Analyse der beim Bestücken auftretenden Prozesskräfte .....	53
4.1.1	Radialer Kraftverlauf .....	54
4.1.2	Tangentialer Kraftverlauf .....	56
4.1.3	Transversaler Kraftverlauf .....	58
4.2	Einfluss der Bestückreihenfolge auf die Magnetkräfte .....	59
4.2.1	Zusammenhang von Prozesskräften und Zykluszeit .....	59
4.2.2	Gegenüberstellung unterschiedlicher Bestückfälle .....	61
4.2.3	Planung des Bestückprozesses .....	65
4.3	Ermittlung der magnetkörperinduzierten Prozesskräfte .....	65
4.3.1	Experimentelle Bestimmung der Prozesskräfte .....	66
4.3.2	Kraftermittlung mittels FEM-Berechnung .....	67
4.4	Konzeption und Entwicklung von Greifertechnologien zur Handhabung angeregter Dauermagnete .....	68
4.4.1	Analyse und Bewertung aktueller Greifertechnologien .....	68
4.4.2	Nutzung des magnetischen Felds zur Aufbringung der Greifkraft .....	71
4.4.3	Elektromagnetische Auslegung von Magnetgreifern mit einem Wirkpol ..	73
4.4.4	Alternative Konstruktionsprinzipien für Magnetgreifer mit einem Wirkpol	76
4.5	Automatische Bereitstellung von Dauermagneten .....	82
4.5.1	Alternative Prozessketten zur Magnetbereitstellung .....	83
4.5.2	Gerätekomponenten für die automatisierte Magnetzuführung .....	85
<b>5</b>	<b>Anlagenkonzepte für automatisierte Bestücklösungen .....</b>	<b>93</b>
5.1	Läufertransport und -handhabung.....	93
5.1.1	Läufertransport auf Basis von Werkstückträgern .....	93
5.1.2	Alternativen zur Lagerung von Läufern während der Montage .....	95

5.2 Kinematiken und Handhabungsgeräte für flexible Bestückstationen .....	101
5.2.1 Kinematische Ketten von Bestückanlagen .....	101
5.2.2 Dimensionierung von Handhabungsgeräten .....	102
<b>6 Beispielhafte Umsetzung automatisierter Bestückanlagen .....</b>	<b>107</b>
6.1 Montagezelle für große Fahrmotorläufer .....	107
6.2 Montagestation für Servomotorläufer .....	119
<b>7 Optimierung des Bestückprozesses .....</b>	<b>125</b>
7.1 Montagegerechte Gestaltung von Dauermagnetkörpern .....	125
7.1.1 Aktuelle Vorgehensweise bei der Magnetauslegung .....	126
7.1.2 Anforderungen an montagegerechte Magnetkörper .....	128
7.1.3 Versuchsplanung, Modellierung und FEM-Simulation .....	129
7.1.4 Bewertung der Magnetgeometrie in Abhängigkeit vom Bestückfall .....	130
7.1.5 Konstruktionsempfehlung für die Magnetgestaltung .....	135
7.2 Montagegerechte Läuferkonstruktion .....	135
7.3 Effiziente Programmierung von Bestückanlagen .....	137
7.3.1 Geometrische Grundlagen .....	137
7.3.2 Steuerungskonzept zur variantenflexiblen Roboterprogrammierung .....	140
<b>8 Wirtschaftliches Potenzial der entwickelten Montagetechnologien .....</b>	<b>143</b>
8.1 Rechenmodell zur monetären Beurteilung alternativer Bestüklösungen .....	143
8.1.1 Fixkosten .....	144
8.1.2 Variable Kosten .....	145
8.2 Kostenvergleichsrechnung am Beispiel permanent erregter Fahrmotorläufer .....	149
8.2.1 Technologieabhängige Kosten unterschiedlicher Montagekonzepte .....	150
8.2.2 Bestückkosten an unterschiedlichen Produktionsstandorten .....	155
8.2.3 Wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Technologien .....	159
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>161</b>
<b>Summary .....</b>	<b>163</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>165</b>





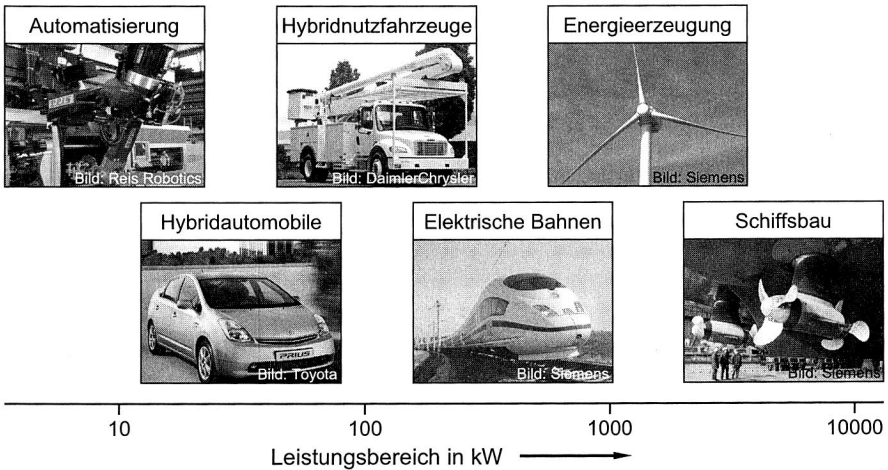
# 1 Einleitung

Elektrische Maschinen dienen der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie und umgekehrt. Dies geschieht durch die Nutzung elektromagnetischer Feldeffekte, die zwischen einem Magnetfeld, dem sog. Erregerfeld, und einem elektrischen Leiter, vorzugsweise Spulen, auftreten. Dabei werden im Generatorbetrieb, also zur Umwandlung mechanischer Arbeit in elektrische Energie, im relativ zum magnetfelderzeugenden System bewegten elektrischen Leiter Spannungen induziert, die zu elektrischen Strömen führen. Bei umgekehrter Form der Energiewandlung, dem Betrieb einer elektrischen Maschine als Motor, erfolgt dagegen die Ausbildung mechanischer Kräfte, die auf einen stromdurchflossenen Leiter oder als Grenzflächenkräfte an den Trennflächen zwischen Bauteilen unterschiedlicher Permeabilität, wie z. B. Luft-Eisen, wirken. Dabei ist es für Generatoren und Motoren grundsätzlich gleichgültig, ob das Erregermagnetfeld im stehenden Teil der Maschine, welcher auch Ständer oder Stator genannt wird, oder in der als Läufer, Rotor oder Anker bezeichneten, bewegten Komponente vorliegt. Somit besteht eine Vielzahl von Alternativen zur Nutzung des elektromagnetischen Effekts für die Energieumwandlung, die zu einer Reihe von Konstruktionsprinzipien für lineare und drehende elektrische Maschinen geführt haben. [11] [30] [71]

Der Entwicklungsschwerpunkt bei elektromechanischen Arbeitsmaschinen liegt derzeit auf dem Gebiet Permanentmagnet-Synchronmotoren und -generatoren, die auch als bürstenlose oder PM-Maschinen bezeichnet werden [8] [30] [80]. Bei dieser Technologie wird das Erregerfeld nicht mehr durch Elektromagnete, sondern durch moderne hartmagnetische Werkstoffe in Form von Permanentmagneten erzeugt. Da aufgrund der dauerhaft eingepprägten magnetischen Erregung keine elektrische Energie zur Magnetisierung benötigt wird und somit auch Ummagnetisierungsverluste entfallen, weisen Permanentmagnetmaschinen gegenüber solchen, die elektrisch erregt werden, zwischen 20 % und 45 % geringere Verluste sowie eine deutlich verminderte Wärmeentwicklung auf [58]. Neben ihrem ausgezeichneten Wirkungsgrad stellt der kompakte, einfache und wartungsarme mechanische Aufbau einen wesentlichen Vorteil dieser Geräte dar. Weitere Vorzüge permanent erregter Maschinen sind nach [8], [11], [32] und [71] unter anderem ihre hervorragende Dynamik, ihre sehr guten Rundlauf- und Positioniereigenschaften, ihre hohe Drehzahlsteifigkeit und der Entfall von Bürstenfeuer.

Voraussetzung für den technologischen und wirtschaftlichen Erfolg permanent erregter Arbeitsmaschinen waren vor allem Fortschritte in den Bereichen leistungselektronischer Systeme und hartmagnetischer Werkstoffe. Durch die Entwicklung von Halbleiterbauelementen zum schnellen und verlustarmen Schalten großer elektrischer Leistungen sowie die Entdeckung von Selten-Erd-Magnetlegierungen (SE-Werkstoffe) mit hoher Energiedichte wurden in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts die Grundlagen für die Konstruktion leistungsfähiger Permanentmagnet-Maschinen geschaffen [11] [32] [114]. Heute decken elektrische Motoren und Generatoren dieser Bauart ein sehr großes Leistungsspektrum ab (Bild 1). Angefangen bei kompakten Servo- und Linearmotoren für die Automatisierungstechnik mit einer Leistung von einigen Watt reicht es über Fahr-

zeugantriebe mit einigen hundert Kilowatt bis hin zu großen Windgeneratoren (ca. 3 MW) und Schiffsantrieben mit bis zu 20 Megawatt [7].



**Bild 1:** Beispielhafte Einsatz- und Leistungsbereiche elektrischer Arbeitsmaschinen mit permanentem Erregerfeld

Im industriellen Umfeld haben insbesondere die ausgezeichneten dynamischen Eigenschaften permanent erregter Motoren in den letzten Jahren dazu geführt, dass diese Antriebstechnologie heute den Standard im Bereich der Servoantriebe für die Automatisierungstechnik darstellt. Sie werden überall dort eingesetzt, wo es auf höchste Dynamik und Regelgüte ankommt. Beispielhafte Anwendungsfelder sind Industrieroboter sowie Haupt- und Positionierantriebe in Werkzeugmaschinen und Montageanlagen [33] [71]. Aufgrund ihres hohen Drehmoments werden permanent erregte Motoren in zunehmendem Maße auch als Direktantriebe eingesetzt, wobei gegenüber Lösungen mit Getrieben Teileanzahl, Kosten und Wartungsaufwand gesenkt und ein spielfreier Antrieb realisiert werden kann. Dies hat bspw. zu dem innovativen Konzept der „digitalen Königswelle“ geführt, das vor allem im Anlagenbau, z. B. bei Verpackungs-, Holz-, Druck- oder Papiermaschinen, erheblich zur Reduktion von Entwicklungs- und Investitionskosten beiträgt. Anstelle eines zentralen Hauptantriebs, dessen Antriebsenergie mechanisch über Wellen und Getriebe an die einzelnen „Verbraucher“ übertragen wird, werden dabei verteilte Direktantriebe mit intelligenten Steuergeräten eingesetzt, die untereinander informationstechnisch digital vernetzt und synchronisiert sind [113]. Die wesentlichen Vorteile dieser Anordnung sind der geringere Konstruktions- und Fertigungsaufwand, höhere Dynamik und Flexibilität sowie eine einfachere Ersatzteilbeschaffung [87]. Diese umfangreichen Vorteile haben dazu geführt, dass der Markt für Servoantriebe seit einigen Jahren konstante Wachstumsraten aufweist [44].

Neben den genannten Vorteilen bzgl. der Betriebseigenschaften bieten permanent erregte Motoren aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads auch aus ökologischer Sicht erhebliches Potenzial. Angesichts der Tatsache, dass etwa 65 % des industriellen elektrischen Energieverbrauchs auf Elektromotoren zurückzuführen sind [117], kann der Einsatz hocheffizienter Antriebslösungen heute maßgeblich zur Emissions- und Kostenreduktion in Unternehmen beitragen. Gemäß einer Ende 2006 vom ZVEI veröffentlichten Analyse können durch den flächendeckenden Einsatz von Energiesparmotoren und drehzahlgeregelten Antrieben in der deutschen Industrie jährlich ca. 27,5 Milliarden Kilowattstunden eingespart werden [88]. Dies gilt auch für den Bereich der Fluidtechnik, wo durch geregelte permanent erregte Pumpenantriebe Steigerungen des Systemwirkungsgrads von mehr als 10 % erreicht werden können [45].

Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz und der großen Leistungsdichte werden derzeit zudem verstärkt Applikationen mit bürstenlosen Motoren für den Bereich Verkehrstechnik entwickelt und zum Teil bereits eingesetzt. Insbesondere als Antriebe für straßen- oder schienengebundene Fahrzeuge bieten permanent erregte Motoren aufgrund ihrer guten Regelbarkeit und ihres bereits aus dem Stillstand heraus verfügbaren hohen Drehmoments gegenüber Asynchron- oder Verbrennungsmotoren hervorragende Anfahr- und Beschleunigungseigenschaften. Neben dem motorischen Einsatz können PM-Maschinen beim Abbremsen von Fahrzeugen im Generatorbetrieb zur Umwandlung der kinetischen Energie in elektrische genutzt werden, was sich wiederum positiv auf die Energieeffizienz des Fahrzeugs auswirkt. In Kombination mit klassischen Verbrennungsmaschinen sind permanent erregte elektrische Maschinen eine wichtige Komponente von Hybridantrieben, die vor allem im Kraftfahrzeugsektor zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Das derzeit mit Abstand erfolgreichste kommerziell vermarktete hybride Antriebssystem der Welt, das Toyota Hybrid System THS II, verfügt über einen umrichter gespeisten, permanent erregten Drehstrom-Synchronmotor, der im Toyota Prius 50 kW leistet und aus dem Stillstand bis 1.200 U/min. ein Drehmoment von 400 Nm bereitstellt [92] [103]. Daneben arbeiten weitere Hersteller von Kraftfahrzeugen an der Entwicklung hybrider Antriebskonzepte, denen ebenfalls Permanentmagnetmaschinen zugrunde liegen. Im Nutzfahrzeug- und Militärssektor wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten ebenfalls eine Reihe von Hybridfahrzeugen mit permanent erregten Antriebsmaschinen entwickelt, die von Omnibussen und Lastkraftwagen bis hin zu geländegängigen Transport- und Kettenfahrzeugen reicht [82].

Noch höhere Leistungen werden für den Antrieb elektrischer Bahnen benötigt, bei denen pulswechselrichter gespeiste Asynchrontriebemotoren Stand der Technik sind [48]. Da das Potenzial dieses Antriebskonzepts seit Ende der 1990er Jahre als ausgereizt gilt, konzentrieren sich aktuelle Forschungsarbeiten auf die Entwicklung getriebeloser Direktantriebe mit hochpoligen, permanent erregten Traktionsmotoren. Da diese Motoren gegenüber klassischen Asynchronmotoren bei gleichem Bauvolumen über das zwei- bis dreifache Drehmoment verfügen, kann auf die Drehmomentanpassung mittels Untersetzungsgetrieben verzichtet werden [66]. Zwischen 1997 und 2001 wurden dafür

sowohl permanent erregte Synchronmaschinen als auch permanent erregte Transversalflussmaschinen (TFM) auf ihre Eignung für den Einsatz in elektrischen Bahnen untersucht und als Prototypen realisiert [62]. Gegenüber konventionellen Asynchronmaschinen konnten mit beiden Konzepten deutliche Verbesserungen in Bezug auf den maximalen Wirkungsgrad, Masse und Bauvolumen erreicht werden.

Auch wenn Transversalflussmaschinen im direkten Vergleich mit PM-Synchronmaschinen noch größere technische Potenziale bieten, hat das letztere Konzept heute einen höheren Reifegrad erreicht. Dies spiegelt sich vor allem an den intensiven Entwicklungsaktivitäten großer Firmen aus der Schienenverkehrsbranche wider, künftig Fahrzeuge mit permanent erregten Maschinen auszustatten. So arbeiten sowohl die französische Firma Alstom<sup>1</sup> [70] [81] als auch die East Japan Railway<sup>2</sup> [21] und Siemens<sup>3</sup> [48] [49] an der Entwicklung permanent erregter Synchronmotoren für Traktionsfahrzeuge, die voraussichtlich bis 2010 bereitstehen und in die Serienproduktion überführt werden.

Lange Wartungsintervalle und eine hohe Zuverlässigkeit sind auch die Grundvoraussetzungen für den wirtschaftlichen Betrieb elektrischer Arbeitsmaschinen an schwer zugänglichen Orten. Als Beispiele seien hier Offshore-Windenergieanlagen, Direktantriebe für Unterseeboote und Schottelantriebe für Schiffe aufgeführt [58]. Aufgrund ihres robusten Aufbaus, ihres geringen Verschleißes und ihrer hohen Effizienz sind permanent erregte Maschinen auch für diese Anwendungsbereiche sehr gut geeignet und bereits vielfach im Einsatz.

Allen permanent erregten Maschinen gemein ist die Erzeugung der magnetischen Erregung durch moderne hartmagnetische Werkstoffe. Während diese bei rotierenden Motoren oder Generatoren grundsätzlich auf dem sich drehenden Läufer angebracht sind, kann das Dauermagnetfeld bei Linearmotoren sowohl vom festen als auch vom bewegten Teil des Motors ausgehen. Abhängig von der Baugröße und Leistung eines Motors oder Generators werden dabei pro Läufer teilweise mehrere tausend Einzelmagnete verbaut. Während es bei Ferritmagneten erforderlich war, diese zum Schutz vor Entmagnetisierung aufwändig in den Rotor einzubetten, wurde es mit der Einführung hochremanenter Neodym-Eisen-Bor-Magnetlegierungen möglich, die Magnetkörper auch direkt auf der Läuferoberfläche zu montieren. Dieses neue Konstruktionsprinzip führt zu einer signifikanten Vereinfachung des Aufbaus permanent erregter Läufer und ermöglicht die Realisierung wesentlich effizienterer Produktionsverfahren.

Angesichts des in Bild 2 dargestellten, seit Jahren kontinuierlich steigenden Bedarfs an elektrischer Antriebstechnik und der zu erwartenden stark zunehmenden Bedeutung der Permanentmagnetmotoren und -generatoren für die Bereiche Verkehrstechnik und Energieversorgung ist für die Zukunft mit einer dauerhaften Nachfragesteigerung nach

---

<sup>1</sup> Hersteller der TGV-Familie

<sup>2</sup> Mitbetreiber des japanischen Shinkansen-Netzes

<sup>3</sup> Mithersteller der ICE-Familie

Maschinen dieser Technologie zu rechnen. Dies erfordert neben der konsequenten Weiterentwicklung und Optimierung der Produkte vor allem die Bereitstellung optimierter Herstellungsverfahren, um die Produktionskosten spürbar zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller im globalen Umfeld zu stärken.

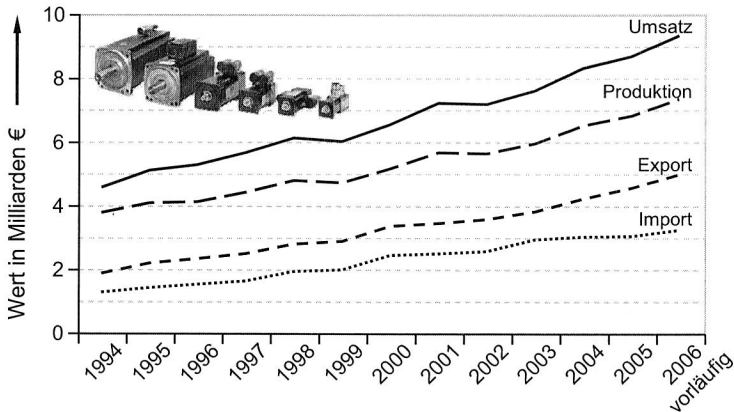


Bild 2: Entwicklung des Markts für elektrische Antriebstechnik in Deutschland seit 1994 nach [88]

Dabei stellt die wirtschaftliche Montage der magnetischen Bauteile auf den Läufer aus produktionstechnischer Sicht nach wie vor eine große Herausforderung dar. Obwohl diese Aufgabe angesichts der hohen benötigten Bestückleistung vorzugsweise automatisch durchgeführt werden sollte, sind bis heute keine geeigneten Montagetechnologien zur effizienten Bestückung großer Läuferstückzahlen mit Dauermagneten verfügbar. Der Grund hierfür liegt in den physikalischen Eigenschaften moderner Permanentmagnete, die während des Fügeprozesses sehr starke, mit konventionellen Betriebsmitteln nicht beherrschbare Magnetkräfte hervorrufen. Den aktuellen Stand der angewandten Automatisierungstechnik stellt daher die Montage von unmagnetisiertem Magnetmaterial dar, wobei die Magnetisierung in einem separaten, technisch und wirtschaftlich ineffizienten Herstellungsschritt erfolgt. Dagegen erfolgt die Bestückung von Läufers mit angeregten Dauermagneten in vielen Unternehmen immer noch in aufwändiger Handarbeit. In der vorliegenden Arbeit werden deshalb neue Lösungsansätze für die automatisierte Handhabung und Montage von magnetisierten Permanentmagnetkörpern vorgestellt.

Hierfür werden zunächst die für die Forschungsarbeit notwendigen physikalischen Grundlagen beschrieben. Gefolgt von einer kurzen Vorstellung bekannter Konstruktionsprinzipien und aktueller Entwicklungstrends im Bereich permanent erregter Maschinen werden am Ende des zweiten Kapitels die aktuell industriell eingesetzten Herstellungsverfahren für permanent erregte Läufer dargestellt und analysiert.

Die Identifikation und Bewertung von Rationalisierungspotenzialen bei der Herstellung von PM-Rotoren ist der Schwerpunkt des dritten Kapitels. Basierend auf der Darstellung der Prozesskette zur Läuferproduktion wird unter Berücksichtigung bisheriger Lösungsvorschläge die Notwendigkeit zur Automatisierung der Magnetmontage begründet und der Forschungsbedarf konkretisiert.

Angesichts des Defizits an Erkenntnissen über das Fügen von Permanentmagneten zu flächigen Anordnungen erfolgt im vierten Kapitel eine detaillierte Analyse des Montageprozesses. Diese bildet die Grundlage für die Planung des Fügeprozesses sowie die Konzeption und Auslegung spezifischer Betriebsmittel für die automatische Dauermagnetmontage. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung von Greifertechnologien zum sicheren Aufnehmen und Ablegen starker Dauermagnete.

Mit der Gestaltung kompletter Anlagenkonzepte zur effizienten Läuferbestückung befasst sich das fünfte Kapitel. Neben der Beschreibung alternativer Lösungen zur Handhabung von Rotoren werden Kinematikkonfigurationen zur Produktion unterschiedlich großer Läufer vorgestellt.

Um die Funktionsfähigkeit der entwickelten Montagetechnologien und Anlagenkonzepte nachzuweisen, wurden im Rahmen der Arbeit unterschiedliche Montagezellen als Versuchsmuster realisiert. Kapitel sechs umfasst eine detaillierte technische Beschreibung der umgesetzten Anlagenkonzepte sowie die Ergebnisse der durchgeführten Montageversuche.

Da insbesondere in der montagegerechten Konstruktion von Magnetkörpern und Läufern erhebliches Rationalisierungspotential hinsichtlich des Produktionsprozesses liegt, wird diesem Punkt ein eigenes Kapitel gewidmet. Basierend auf den bis dahin bereits gewonnenen Erkenntnissen werden in Kapitel sieben Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Montageprozesses dargestellt.

Im letzten Kapitel wird das wirtschaftliche Potenzial, das die im Rahmen der Arbeit entwickelten Produktionstechnologien bieten, am Beispiel permanent erregter Fahrmotorenläufer konventionellen manuellen und automatisierten Verfahren gegenübergestellt. Angesichts der zunehmenden Globalisierung von Produktionsstrukturen werden in diesem Zusammenhang zusätzlich die an unterschiedlichen internationalen Standorten und bei variierenden Nachfragesituationen anfallenden Produktionskosten diskutiert.

## 2 Grundlagen permanent erregter elektrischer Maschinen

Die Funktion elektrischer Maschinen beruht auf Wechselwirkungen zwischen stationären und bewegten Quellen elektromagnetischer Felder und den dadurch hervorgerufenen Lorentz- und Grenzflächenkräften. Die Ausprägung dieser Effekte wird dabei sehr stark vom Konstruktionsprinzip des Motors oder Generators beeinflusst. Auch bei der dieser Arbeit zugrunde liegenden Aufgabenstellung, der Montage von Dauermagneten auf weichmagnetische Grundkörper, kommt es aufgrund der präsenten Magnetfelder zu einer erheblichen Beeinflussung des Fügeprozesses.

Deshalb werden im Folgenden zunächst die zur Herleitung der erarbeiteten Prozesse und Technologien notwendigen physikalischen Grundlagen des Magnetismus kurz zusammengefasst. Im Anschluss daran erfolgt die Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus elektrischer Maschinen sowie der gängigen Konstruktionsprinzipien für permanent erregte Läufer. Die Relevanz der unterschiedlichen Läuferbauformen sowie die zu deren Herstellung eingesetzten Produktionskonzepte wurden im Rahmen einer Marktstudie untersucht, deren Ergebnisse das Kapitel abschließen.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

Das Phänomen des Magnetismus wird durch physikalische Vorgänge auf atomarer Ebene hervorgerufen, die anhand des Bohr'schen Atommodells zu erklären sind. Demnach umkreisen negativ geladene Elektronen den Atomkern, so dass sich um diesen kleine Kreisströme ausbilden, welche einen magnetischen Dipol darstellen. Gleichzeitig wird ein weiteres Dipolmoment durch den Spin der Elektronen hervorgerufen. Darüber hinaus erzeugen auch die positiv geladenen Protonen des Kerns einen magnetischen Effekt, der jedoch aufgrund der höheren Massen der Protonen vergleichsweise gering ist. Die magnetischen Eigenschaften von Materie lassen sich demnach abhängig von der Elektronenkonfiguration kategorisieren. Bei dia- und paramagnetischen Werkstoffen sind die Auswirkungen der Dipolmomente äußerst schwach ausgeprägt, so dass makroskopisch kein nennenswerter magnetischer Effekt feststellbar ist. Stattdessen überwiegt die statistisch verteilte Ausrichtung der Dipole aufgrund thermischer Bewegungen. Im Gegensatz dazu sind bei ferromagnetischen Stoffen beim Anlegen eines externen Magnetfelds sehr starke Effekte zu beobachten. Ursächlich hierfür sind das große natürliche Dipolmoment sowie die bei diesen Materialien vorhandenen starken Kopplungen zwischen den Spins, die zu einer gegenseitigen Ausrichtung benachbarter Atome führen [38].

#### 2.1.1 Elektromagnetische Felder

Der erste dokumentierte technische Einsatz des magnetischen Effekts geht auf das Jahr 1.000 n. Chr. zurück, wo die Eigenschaft eines leichtgängig gelagerten Permanentmagneten, sich gemäß des Erdmagnetfelds auszurichten, in China für den Bau der ersten Kompassse genutzt wurde [94]. Der Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus wurde erstmals 1819 von Hans Christian Oersted beschrieben, der expe-

rimentell die Einwirkung eines Drehmoments auf eine Kompassnadel durch einen mit konstantem Strom durchflossenen Leiter feststellte. Kurz darauf wurde von André-Marie Ampère der Zusammenhang zwischen der magnetischen Induktion  $B$ , auch Flussdichte genannt, und der auf eine mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegten Ladung  $Q$  einwirkende Kraft  $F_L$ , der sog. Lorentzkraft, beschrieben. [65]

$$\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

Auf Basis dieser auch als erstes Ampère'sches Gesetz bekannten Gleichung entwickelten Jean-Baptiste Biot und Felix Savart das Biot-Savart'sche Gesetz, das die magnetische Induktion  $B$  im Punkt  $r$  beschreibt. Es gibt die magnetische Flussdichte  $d\vec{B}$  an, die durch ein Stromelement  $I \cdot d\vec{l}$  einer Stromverteilung im Ursprung erzeugt wird, wobei  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante (Permeabilitätskonstante) des Vakuums ist. [65]

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot (d\vec{l} \times \vec{e}_r) \quad (2.2)$$

Die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  ist wie folgt definiert:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

Die magnetische Flussdichte  $B$  eines Punkts kann mittels Superposition durch Integration bestimmt werden [65].

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (2.3)$$

Daraus entstand das zweite Ampère'sche Gesetz, auch Durchflutungssatz genannt, welches besagt, dass das Wegintegral der magnetischen Induktion entlang einer geschlossenen Kurve  $s$  dem die eingeschlossene Fläche  $A$  durchflutenden Gesamtstrom entspricht. [38]

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2.4)$$

Da die ursprüngliche Form des Durchflutungssatzes (2.4) Unstimmigkeiten, z. B. bei Betrachtung eines Zweigs mit einem Kondensator, aufwies, führte James Clerk Maxwell die Verschiebungsstromdichte  $J_{vs}$  ein und erweiterte den Durchflutungssatz zur ersten Maxwell'schen Gleichung. [38]

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \cdot \frac{d}{dt} \cdot \int_A \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (2.5)$$

Aus dem Biot-Savart'schen Gesetz (2.2) folgte Maxwell, dass das Hüllenintegral der magnetischen Induktion über eine beliebige Oberfläche  $A$  stets null ist. Praktisch bedeutet dies, dass Magnetfelder über keine isolierbaren Quellen verfügen und somit keine magnetischen Monopole existieren können.

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.6)$$

Dieser Sachverhalt ist auch als vierte Maxwell'sche Gleichung bekannt.



Insgesamt formulierte Maxwell vier Gleichungen zur Beschreibung elektromagnetischer Felder, welche heute die fundamentalen Grundlagen angewandter Analysemethoden für Feldberechnungen darstellen. Außer den genannten sind diese jedoch für die in dieser Arbeit vorkommenden magnetostatischen Probleme nicht von Bedeutung [38], so dass an dieser Stelle nicht darauf eingegangen wird.

Der magnetische Fluss ist weiterhin die Ursache für magnetische Kräfte. Im Gegensatz zu messbaren physikalischen Kräften, die normalerweise taktil durch Druck, Kollision oder Reibung übertragen werden, brauchen elektromagnetische Kräfte weder Kontakt noch Trägermedien. Nach [38] wird ein elektromagnetisches Feld definiert als „ein Gebiet, in welchem Kräfte wirken können“. Um in einem Feld vorherrschende Kraftvektoren darzustellen, entwickelte Michael Faraday das Konzept der Fluss- oder auch Feldlinien. Wie Bild 3 verdeutlicht, handelt es sich dabei um räumliche Kurven, die in jedem Punkt tangential zu den dortigen Feldvektoren verlaufen. [38]

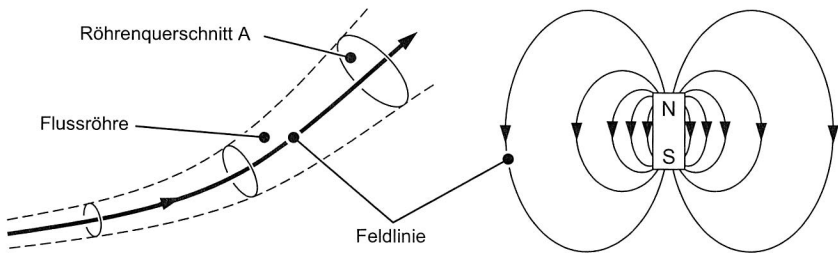


Bild 3: Flussröhren- und Feldlinienmodell von Faraday nach [38]

Mathematisch ergibt sich der magnetische Fluss  $\Phi$  nach [65] aus dem Flächenintegral der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  über den Querschnitt  $A$  der Flussröhre.

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.7)$$

Neben der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  ist die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  die zweite Größe zur Beschreibung magnetischer Felder. Diese auch magnetische Erregung genannte vektorielle Größe steht mit der Flussdichte in folgender Beziehung [65]:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.8)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  zwischen Flussdichte und Feldstärke ist die Permeabilität.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r(\vec{H}) \quad (2.9)$$

Diese materialabhängige Größe ergibt sich aus der magnetischen Feldkonstanten  $\mu_0$  und der relativen Permeabilität eines Stoffs  $\mu_r$ . Nichtlinearitäten des Werkstoffs, die vor allem im Sättigungsbereich auftreten, werden dabei als Funktion der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Feldstärke  $H$  berücksichtigt. [76]

Bei Stoffen, deren relative Permeabilität kleiner als eins ist, handelt es sich um diamagnetische Materialien, die den magnetischen Fluss aufweiten. Körper aus diesen Werk-

stoffen, wie bspw. Kupfer, Silber, Gold oder Wasser, werden sowohl von magnetischen Nord- als auch Südpolen grundsätzlich abgestoßen. Paramagnetische Werkstoffe, deren relative Permeabilität größer als eins ist, bündeln den magnetischen Fluss dagegen und werden dementsprechend von Magnetpolen angezogen. Beispielhafte Materialien paramagnetischer Materialien sind Aluminium, Platin, Titan oder Wolfram. Allerdings sind beide Effekte extrem klein, so dass die auftretenden Abstoßungs- und Anziehungskräfte für technische Anwendungen vernachlässigbar sind. Für Luft und alle gängigen technischen Gase kann für  $\mu_r$  ein Wert von eins angenommen werden. [65]

### 2.1.2 Ferro- und Permanentmagnetismus

Von großer Bedeutung sind dagegen ferromagnetische Materialien, die sich aufgrund ihrer relativen Permeabilität, die sehr viel größer ist als eins, hervorragend zur Flussbündelung eignen. Ursächlich für diesen spezifischen Effekt von Ferromagnetika sind kleinste, kristalline magnetische Dipole, die sog. Weiss'schen Bezirke, deren Ausrichtung im unmagnetisierten Zustand statistisch verteilt ist. Durch die Verteilung dieser auch als Elementarmagnete bezeichneten Zonen heben sich die Magnetfelder der einzelnen Kristalle im unmagnetisierten Zustand auf, so dass insgesamt kein resultierendes Magnetfeld festzustellen ist. Beim Anlegen eines externen magnetischen Felds richten sich die Weiss'schen Bezirke gemäß dem Feldlinienverlauf aus, so dass der magnetische Weg verkürzt und eine sehr hohe Flussdichte erreicht wird.

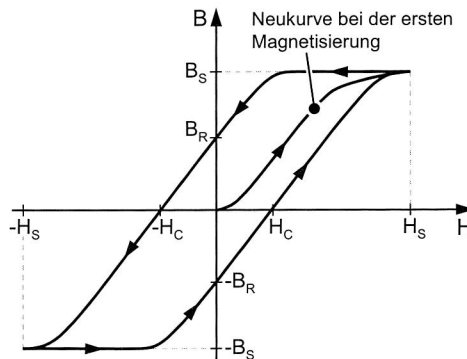


Bild 4: Schematischer Verlauf der Hysteresekurve von magnetischen Werkstoffen nach [65]

Sind alle Elementarmagnete ausgerichtet, kommt es zu einer Sättigung des Materials, bei der die Sättigungsflussdichte  $B_S$  erreicht wird. Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  und der Feldstärke  $H$  wird dabei durch eine Hysteresekurve dargestellt (Bild 4). Die Sättigungsflussdichte von Eisen und Baustählen liegt in der Regel zwischen einem und zwei Tesla. Von besonderer Bedeutung für den technischen Einsatz von Ferromagnetika sind die Remanenzflussdichte  $B_R$  und die Koerzitivfeldstärke  $H_C$ . Die Remanenzflussdichte entspricht dabei der magnetischen Flussdichte, die

nach dem Aufmagnetisieren eines ferromagnetischen Körpers bis zur Sättigung und der darauf folgenden Abschaltung eines externen Felds auf  $H = 0$  bestehen bleibt. Dagegen beschreibt die Koerzitivfeldstärke die benötigte Gegenfeldstärke, die zur Entmagnetisierung eines Körpers ( $B = 0$ ) führt. Darüber hinaus gibt die Hysteresekurve Aufschluss über die sog. Hysterese- oder Ummagnetisierungsverluste, welche die für die Ummagnetisierung aufzubringende Arbeit widerspiegeln. Die aufzubringende Energie, die bei jedem Ummagnetisierungsvorgang in Form von Wärme  $Q$  frei wird, entspricht der von der Hysteresekurve umschlossenen Fläche. Die bei der Frequenz  $f$  entstehende Verlustleistung  $P$  ist daher proportional zur Frequenz und zum Volumen.

$$P = Q \cdot f = \frac{dQ}{dV} \cdot V \cdot f \quad (2.10)$$

Abhängig vom charakteristischen Auf- und Ummagnetisierungsverhalten lassen sich ferromagnetische Stoffe in weich- und hartmagnetische Materialien einteilen. Weichmagnetische Ferromagnetika zeichnen sich durch eine schmale Hysteresekurve aus, die lediglich eine kleine Fläche einschließt. Solche Materialien ermöglichen eine verlustarme Ummagnetisierung und werden bevorzugt in elektrischen Maschinen oder Transformatoren eingesetzt. Die für den Elektromaschinenbau wichtigsten Vertreter dieser Werkstoffe sind Stahlbleche mit einem Legierungsanteil von bis zu 4 % Silizium [132], deren Eigenschaften in [14], [15], [16] und [17] genormt sind. Werkstoffe mit einer breiten, eine große Fläche umfassenden Hysteresekurve werden dagegen als hartmagnetische Ferromagnetika bezeichnet. Sie verfügen über eine hohe Remanenzflussdichte sowie eine hohe Koerzitivfeldstärke und eignen sich deshalb für Permanentmagnete.

Neben dem Anlegen eines Koerzitivfelds gibt es weitere Möglichkeiten zur Entmagnetisierung ferromagnetischer Körper. So ist bspw. die Curie-Temperatur ein Maß für die Temperatur, bei der die thermisch induzierte Molekülbewegung im Material so groß wird, dass die geordnete Ausrichtung der Weiss'schen Bezirke nicht mehr erhalten bleibt. Durch die dabei hervorgerufene, erneute statistische Verteilung kommt es zu einer gegenseitigen Aufhebung der intrakristallinen Felder, so dass als makroskopischer Effekt der Verlust des Magnetfelds festzustellen ist. Dieses Phänomen ist insbesondere für die thermische Auslegung permanent erregter elektrischer Maschinen von Bedeutung, da das Erregerfeld bei Überhitzung zumindest geschwächt wird und daraus dauerhafte Leistungseinbußen resultieren. [65]

Weitere nennenswerte Störgrößen für die einheitliche Ausrichtung der Elementarmagnete sind mechanische Einflüsse. Insbesondere dauerhafte Vibrationen oder Stöße können zum Verlust der Vorzugsorientierung der Weiss'schen Bezirke und somit zum Verlust der Magnetisierung führen. Darüber hinaus kann eine Entmagnetisierung durch die hochfrequente Rücknahme des magnetisierenden Felds erfolgen, bis die Magnetisierung des Körpers gegen null läuft. [65]

### 2.1.3 Rechnerische Bestimmung von Magnetkräften

Magnetische Kräfte treten grundsätzlich an Grenzflächen zwischen magnetisch durchfluteten Materialien auf, die unterschiedliche Permeabilitätswerte aufweisen. Zur rech-

nerischen Bestimmung der auf einen Körper wirkenden Magnetkraft müssen Betrag und Richtung aller seine Oberfläche durchflutenden magnetischen Flüsse berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch Integration der Grenzflächenkräfte über die Bauteiloberfläche. Zur Berechnung der resultierenden Gesamtkraft wird daher der Maxwell'sche Spannungstensor  $T_{ij}$  herangezogen. Da für den in dieser Arbeit untersuchten Fügeprozess die magnetischen Bauteile (entspricht magnetischen Quellen) im Sinne der Elektrodynamik sehr langsam bewegt werden, können die dadurch induzierten Ströme bei der Berechnung der Prozesskräfte vernachlässigt werden. Gleiches gilt auch für die von diesen Strömen wiederum angeregten magnetischen Felder. Daher ergibt sich für die weiteren Betrachtungen die Vereinfachung des Problems zu einem magnetostatischen System, für das der Maxwell'sche Spannungstensor  $T_{ij}$  wie folgt lautet:

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left( \vec{B}_i \cdot \vec{B}_j - \frac{1}{2} \cdot \delta_{ij} \cdot \vec{B}^2 \right) \quad (2.11)$$

Die Indizes  $i$  und  $j$  nehmen dabei jeweils die Raumrichtungen  $x$ ,  $y$  und  $z$  ein, so dass der Spannungstensor insgesamt aus neun Komponenten besteht [35]. Für statische Systeme ergibt sich die auf einen Körper wirkende Gesamtkraft somit nach [35] zu:

$$\vec{F} = \oint_A \vec{T} \cdot d\vec{A} \quad (2.12)$$

Zusammen mit den bereits beschriebenen Maxwell'schen Gleichungen bildet dies die Grundlage für den Einsatz numerischer Methoden zur Berechnung komplexer Magnetfelder. Das derzeit meistgenutzte und fortschrittlichste Verfahren ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Mit Hilfe der FEM lassen sich Randwertaufgaben, d. h. Differentialgleichungen unter gegebenen Randbedingungen, effizient und präzise lösen. Dabei können sowohl zwei- als auch dreidimensionale Probleme untersucht werden, wobei oftmals eine vereinfachte 2D-Betrachtung hinreichend genaue Ergebnisse liefert. [57]

Vor der Lösung eines Problems per FEM ist dieses zunächst zu modellieren. Da mit steigendem Detaillierungsgrad der Rechenaufwand im Vergleich zur Genauigkeit des Ergebnisses überproportional ansteigt, erfordert der effiziente Einsatz der FEM in der Regel eine Abstraktion des zu berechnenden Problems. Neben der geometrischen Beschreibung sind dabei auch physikalische Parameter und Randbedingungen zu definieren. Im Anschluss daran erfolgt die Diskretisierung der zu untersuchenden Geometrie in kleine Teilgebiete, sog. finite Elemente. Bei der FEM geschieht dies mittels unregelmäßiger Netze, so dass durch eine feinere Vernetzung kritischer Regionen nahezu ohne Mehraufwand ein präziseres Ergebnis erreicht werden kann. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Berechnung, die das Aufstellen des Gleichungssystems und dessen mathematische Lösung umfasst. Den Abschluss einer FEM-Analyse stellt die Auswertung des gelösten Problems dar. Diese beinhaltet neben der Visualisierung der Ergebnisse auch die Berechnung konkreter Größen, wie z. B. Flussdichten, magnetischer Kräfte oder Feldlinienverläufe. Um zur optimalen Auslegung eines elektromagnetischen Systems zu kommen, kann das Modell in einer iterativen Vorgehensweise systematisch modifiziert werden (Bild 5). [57]

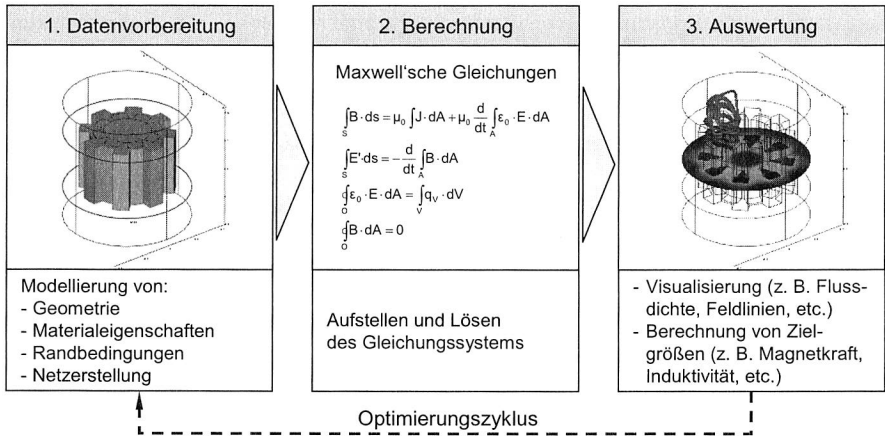


Bild 5: Prinzipielle Vorgehensweise zur Annäherung eines elektromagnetischen Systems an das Optimum mittels FEM nach [57]

Vereinfacht können senkrecht auf eine Oberfläche wirkende Magnetkräfte auch mit Hilfe der Maxwell'schen Zugkraftformel

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \int_A \mathbf{B}^2 \cdot dA \quad (2.13)$$

berechnet werden [57] [76]. Gemäß dieser Gleichung hängt die Magnetkraft unmittelbar von der magnetischen Flussdichte  $B$  ab, mit der die Kontaktfläche durchflutet wird. Die Flussdichte wiederum wird vom Verlauf der Feldlinien beeinflusst, der sich bei jeder infinitesimalen Änderung des Magnetsystems ebenfalls verändert. Die analytische Berechnung von magnetischen Kräften ist deshalb nur bei sehr einfachen Anwendungsfällen möglich, bei denen der Feldlinienverlauf bekannt ist, z. B. bei sehr engen Luftspalten. Zudem werden bei dieser Methode lediglich die Flusskomponenten erfasst, die die Fläche senkrecht durchdringen, so dass tangentielle Anteile unberücksichtigt bleiben.

## 2.2 Entwicklungstrends permanent erregter elektrischer Maschinen

Unter dem Begriff „elektrische Maschinen“ werden in der Literatur alle Geräte zur Umwandlung mechanischer in elektrische Energie und umgekehrt zusammengefasst. Dies schließt neben rotierenden und linearen Motoren und Generatoren auch ruhende Energiewandler, also Transformatoren, ein [32] [71]. Da die in der vorliegenden Arbeit behandelte Problemstellung nicht auf die letztgenannte Gruppe zutrifft, beschränkt sich die Bezeichnung „elektrische Maschine“ im weiteren Verlauf auf elektrische Motoren und Generatoren.

Eine wesentliche Komponente moderner energietechnischer Systeme sind permanent erregte elektrische Arbeitsmaschinen, die sowohl als Generator als auch als Motor betrieben werden können. Die Verwendung moderner hochenergetischer Magnetmaterialien

lien gestattet die Konstruktion von Permanentmagnetmaschinen, die gegenüber konventionellen, elektrisch erregten Motoren und Generatoren über einen um etwa 10 % höheren Wirkungsgrad bei bis zu 30 % weniger Bauvolumen verfügen [8]. Daneben ist die Entwicklung neuer leistungselektronischer Bauelemente eine grundlegende Voraussetzung für den breiten Einsatz permanent erregter Antriebs- und Generatorsysteme.

### 2.2.1 Einordnung von PM-Maschinen

Der Einsatz von Permanentmagneten in elektrischen Maschinen beschränkt sich aufgrund der dauerhaften Ausbildung eines Magnetfelds mit konstanter Richtung und Stärke auf die Erzeugung von stationären Erregerfeldern. Die Ausprägung der magnetischen Erregung ist dabei stark vom Konstruktionsprinzip abhängig. Die Einteilung elektrischer Arbeitsmaschinen kann demnach nach einer Vielzahl von Kriterien erfolgen. Das in der Literatur gebräuchlichste Gliederungsmerkmal ist die Art des Versorgungsstroms, wobei zwischen Gleichstrom- und Drehstrommaschinen unterschieden wird [32] [71].

#### Gleichstrommaschinen

Bei Gleichstrommaschinen erfolgt die Energiewandlung durch einen drehbaren Läufer mit einer Ankerwicklung, die vom räumlich und zeitlich stationären Erregerfeld des Ständers durchflutet wird. Die Ankerspule ist dabei mit den Lamellen des Kollektors (auch Kommutator oder Stromwender) verbunden, der über Schleifkontakte, sog. Bürsten, eine Übertragung elektrischer Ströme vom Stator auf den Rotor gestattet. Da beim Betrieb einer Gleichstrommaschine die Ankerwicklung stets von einer Wechselspannung durchflossen werden muss, erfolgt durch den Stromwender in Abhängigkeit von der Winkellage des Läufers ständig eine Kommutierung des Ankerstroms. Der Stromwender stellt damit eine mechanisierte Alternative der für den Generator- bzw. Motorbetrieb erforderlichen Gleich- bzw. Wechselrichterfunktion dar. Mechanisch kommutierte Gleichstrommaschinen werden vorwiegend im motorischen Betrieb eingesetzt. Aufgrund ihrer einfachen und kostengünstigen Bauweise und ihres sehr guten Regelverhaltens finden Gleichstrommotoren heute in unzähligen Bereichen Verwendung. Das Spektrum der Anwendungen reicht dabei von Mikromotoren, z. B. für die Feinwerktechnik, über kleine und mittelgroße Antriebe, z. B. für Automatisierungslösungen, bis hin zu großen Fahrantrieben in Kraftfahrzeugen oder Bahnen. [32] [71]

Bei mechanisch kommutierten Gleichstrommaschinen kann die Erregung des ruhenden Ständermagnetfelds neben einer mit Gleichstrom durchflossenen Spule auch durch den Einsatz von Dauermagneten erfolgen. Hierfür werden in der Regel Ferrit-Dauermagnete derart im Maschinengehäuse angeordnet, dass sie ein den Anker durchflutendes, dauerhaftes Magnetfeld erzeugen. Das aus einem weichmagnetischen Werkstoff gefertigte Gehäuse dient dabei als Joch, in welchem der magnetische Fluss geschlossen wird. Motoren dieses Konstruktionsprinzips werden in sehr großer Stückzahl als batterieversorgte Kleinst- und Kleinmotoren für Spielzeuge, die Feinwerktechnik und vor allem für den Einsatz in Automobiltechnik, z. B. als Scheibenwischer-, Gebläse- oder Fensterhebermotor, hergestellt. [71]

## Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen

Begünstigt durch die Fortschritte und Kostensenkungen im Bereich der Stromrichter werden Motoren mit klassischer, elektromechanischer Kommutierung zunehmend durch bürstenlose, elektronisch kommutierte Antriebe ersetzt. Bei diesen auch als EC- oder EK-Gleichstrommotoren bezeichneten Maschinen sind die Erregermagnete nicht mehr in den Ständer integriert, sondern Teil des Läufers [32]. Da aufgrund der permanenten Erregung auf die Übertragung elektrischer Energie vom Stator auf den Läufer verzichtet werden kann, entfallen bei dieser Variante die verschleißanfälligen und wartungsintensiven Elemente Kommutator und Bürsten. Allerdings kann die Stromwendung prinzipbedingt nicht mehr durch die Rotationsbewegung des Läufers erfolgen, so dass die zum Betrieb erforderlichen magnetischen Wechselfelder im Ständer erzeugt werden müssen. In der Praxis geschieht dies mit Stromrichterschaltungen, die durch gezielte Einspeisung von elektrischen Strömen in die Ständerwicklungen ein umlaufendes Magnetfeld im Stator erzeugen. Das Magnetfeld des Läufers wird dabei stets entsprechend der von den Statorwicklungen erzeugten Felder ausgerichtet, was zu einem synchronen Verhalten der Läuferdrehzahl und des Statorfelds führt. Moderne EK-Gleichstrommaschinen weisen daher bezüglich ihrer mechanischen Struktur eine große Ähnlichkeit zu permanent erregten Synchronmaschinen auf, die der Gruppe der Drehstrommaschinen zuzuordnen sind.

## Drehstrom-Synchronmaschinen

Im Gegensatz zu Gleichstrommaschinen sind bei Drehstrommaschinen drei Ständerwicklungen in den Stator integriert, die von sinusförmigen, um jeweils  $120^\circ$  phasenverschobenen Wechselspannungen gespeist werden. Durch die konstruktive Berücksichtigung der zeitlich veränderlichen Ströme wird im Ständer ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt, welches zu elektromagnetischen Wechselwirkungen mit dem Läufer führt und diesen in Rotation versetzt. Die Umlauffrequenz  $n_{\text{Drehfeld}}$  dieses Drehfelds hängt sowohl von der Frequenz  $f$  der Speisespannung als auch von der Anzahl der Polpaare  $p$  im Ständer ab. [71]

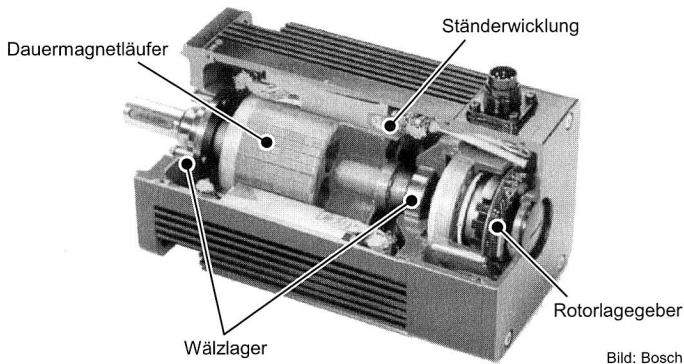
$$n_{\text{Drehfeld}} = \frac{f}{p} \quad (2.14)$$

Weicht die Drehzahl des Läufers von der Drehfelddrehzahl ab, so wird dies als Schlupf  $s$  bezeichnet. Entspricht die Drehzahl des Läufers exakt der Umlauffrequenz des Drehfelds, d. h.  $s$  gleich null, so spricht man von der Synchrondrehzahl. Abhängig davon, ob eine elektrische Arbeitsmaschine im Betrieb Schlupf aufweist oder nicht, werden Drehstrommaschinen in Synchron- und Asynchronmaschinen eingeteilt. Während beide Typen grundsätzlich über die gleiche Ständerbauweise verfügen, liegen die maßgeblichen Unterscheidungsmerkmale im elektromagnetischen und konstruktiven Gestaltungsprinzip der Läufer.

Das Erregerfeld einer Synchronmaschine wird durch einen Magnet erzeugt, dessen Feldorientierung bezogen auf den drehenden Läufer zeitlich unveränderlich ist. Auf-

grund der magnetischen Bindung zwischen dem Drehfeld des Ständers und dem stationären Läuferfeld beträgt die Drehzahldifferenz beider Felder und somit der Schlupf null [32]. Die direkte Abhängigkeit der Wellen- von der Drehfelddrehzahl erlaubt es dabei im motorischen Betrieb, die Drehzahl durch Veränderung der Speisefrequenz zu beeinflussen. In der Praxis geschieht dies durch Stromrichter, die unabhängig von der Netzfrequenz eine sehr feine und präzise Steuerung der Drehfeldfrequenz und somit der Drehzahl gestatten. Beim Betrieb einer Synchronmaschine als Generator werden dagegen die in den Ständerwicklungen induzierten Wechselspannungen mittels Frequenz- oder Gleichrichtern in das Stromnetz eingespeist. [71]

Die elektromagnetische Erregung des stationären Läufermagnetfelds einer Synchronmaschine kann sowohl mittels Elektro- als auch durch Dauermagneten erfolgen. Bei elektrischer Erregung ist dafür die Übertragung elektrischer Energie vom ruhenden Teil der Maschine auf den bewegten Rotor erforderlich, was in der Regel durch Schleifkontakte erfolgt. Da der Aufbau eines bezogen auf den Läufer ruhenden Magnetfelds die Erregung durch Gleichstrom erfordert, muss der Läufer entweder mit einer zusätzlichen Gleichspannung versorgt werden oder, bei Nutzung der Wechselspannung für das Ständerdrehfeld, eine Gleichrichtung des Drehstroms, z. B. mittels Gleichrichterioden, erfolgen.



**Bild 6:** Aufbau einer permanent erregten Synchronmaschine am Beispiel eines Serвомotors mit einer Nennleistung von 3 kW

Analog zur EK-Gleichstrommaschine ermöglicht der Einsatz von Dauermagnetläufern als Alternative zur elektrischen Erregung auch bei Drehstrom-Synchronmotoren eine deutliche Vereinfachung der Produktstruktur (Bild 6). Die Versorgung der Drehfeldwicklungen wird dabei durch Frequenzumrichter gewährleistet, mit denen eine Bestromung der einzelnen Phasen gemäß der für die gewünschte Leistung erforderlichen Frequenz und Spannung möglich ist.

Eine Sonderbauform permanent erregter Synchronmaschinen stellt die sog. Transversalflussmaschine dar. Auch wenn Motoren und Generatoren dieser Bauart nochmals



erhebliches Potenzial für Leistungssteigerungen bieten, sind sie wegen ihrer komplizierten elektromagnetischen Struktur und der teuren Fertigung als Sonderlösungen anzusehen [37]. Aufgrund ihrer geringen kommerziellen Bedeutung werden sie in der vorliegenden Arbeit nicht näher erörtert.

## **Drehstrom-Asynchronmaschinen**

Drehstrom-Asynchronmaschinen gelten als kostengünstige, einfache und betriebssichere Antriebe, die vor allem im industriellen Umfeld weit verbreitet sind [11] [32]. Eine Erregung durch Permanentmagnete ist aufgrund des zugrunde liegenden Wirkprinzips nicht möglich. Sie sind daher für diese Arbeit nicht relevant und werden an dieser Stelle nicht näher erläutert.

### **2.2.2 Innovative leistungselektronische Bauteile**

Die konsequenten Forderungen nach hohen Schaltgeschwindigkeiten, niedrigen Durchlass- und Schaltverlusten, einfachen Schutzkonzepten, leistungsarmer Ansteuerung sowie einfachen Steuergeräten führten gegen Ende der 1980er Jahre zur Entwicklung neuer Bauelemente für die Leistungselektronik, wie z. B. uni- und bipolarer Schalttransistoren (LTR, MOSFET), Mischtyptransistoren (IGBT) sowie Thyristoren (GTO, RLT) [11] [32]. Diese ermöglichen heute die Konstruktion kompakter und kostengünstiger Leistungsteile zur Ansteuerung und Regelung elektrischer Motoren und Generatoren. Der Einsatz moderner Frequenz-, Gleich- und Wechselrichter erlaubt dabei eine einfache Modulation der Netzspannung und -frequenz in die zum Betrieb moderner elektrischer Maschinen notwendigen Größen. Aufgrund der konsequenten Miniaturisierung der leistungselektronischen Komponenten und der zunehmenden Integration informationstechnischer Funktionalitäten stellen elektrische Antriebssysteme heute komplexe mechatronische Produkte dar [10]. Sie bilden die Grundlage für die Realisierung effizienter energietechnischer Systemlösungen, die gegenüber klassischen Konzepten ein hohes Maß an Flexibilität und Verfügbarkeit bei geringem Engineering- und Installationsaufwand bieten [8].

### **2.2.3 Entwicklung leistungsfähiger Magnetwerkstoffe**

Die zweite wesentliche Voraussetzung für den Durchbruch permanent erregter Maschinen war die Entwicklung moderner Magnetmaterialien auf Basis von Selten-Erd-Legierungen. Diese weisen gegenüber klassischen Werkstoffen, wie bspw. Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo) oder Hart-Ferriten, deutlich bessere magnetische Eigenschaften auf [32]. Von besonderer Bedeutung sind dabei die 1982 entdeckten Neodym-Eisen-Bor-Legierungen (NdFeB), aus denen im Jahr 2004 weltweit etwa 18.000 t gesinterte Magnete unterschiedlichster Abmessungen und Formen gefertigt wurden [86]. Dauermagnete aus NdFeB verfügen über die höchsten heute bekannten Energiedichten und eignen sich deshalb hervorragend für die Konstruktion kompakter und zugleich leistungsfähiger PM-Maschinen. Daneben spielen Samarium-Kobalt-Werkstoffe (SmCo) eine wichtige Rolle, die zwar gegenüber NdFeB-Werkstoffen ein geringeres Energie-

produkt aufweisen, dafür deutlich höher thermisch belastbar sind [114]. Die magnetischen Eigenschaften der wichtigsten, in [18] genormten Magnetwerkstoffe sind in Tabelle 1 dargestellt.

Werkstoff	Maximales Energieprodukt $(B \cdot H)_{\max}$ in $\text{kJm}^{-3}$	Remanenzflussdichte $B_R$ in mT	Koerzitivfeldstärke $H_C$ in $\text{kAm}^{-1}$	Relative Permeabilität $\mu_r$
Samarium-Kobalt (SmCo)	140 bis 240	850 bis 1120	580 bis 820	$\leq 1,1$
Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)	200 bis 415	1030 bis 1430	770 bis 1090	$\leq 1,05$
Hartferrit	25 bis 30	370 bis 390	230 bis 245	$\leq 1,1$
Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo)	52 bis 62	1250 bis 1350	55 bis 58	1,5 bis 3

*Tabelle 1: Materialkennwerte von hartmagnetischen Werkstoffen für den Elektromaschinenbau nach [32] [100]*

Bei der Herstellung von Selten-Erd-Magneten wird der Grundwerkstoff zunächst im schmelzförmigen Zustand unter Vakuum legiert. Anschließend folgt die Zerkleinerung des Rohmaterials durch Brech- und Mahlprozesse zu Pulver. Aus dem formlosen Stoff wird der Magnetkörper urgeformt und beim darauf folgenden Sintern ein fester Zusammenhalt zwischen den einzelnen Partikeln hergestellt. Aufgrund der fertigungsbedingten Toleranzen des Grünlings, die bis zu 1,5 % des Nennmaßes betragen können, werden die Magnete in der Regel geschliffen und mit einem Korrosionsschutz lackiert oder galvanisch beschichtet. Da das Schleifen der Magnete in Längs- und Querrichtung keine Vorteile für die Leistungsfähigkeit der Elektromaschine hat, aber mit Fertigungskosten verbunden ist, wird üblicherweise nur das Höhenmaß nachgearbeitet. Das Magnetisieren, also das Einprägen des permanenten Magnetfelds, schließt den Produktionsprozess ab. [100]

### 2.3 Konstruktionsprinzipien für Läufer mit Dauermagneten

Ein wesentlicher Unterschied von PM-Maschinen zu elektrisch erregten Motoren und Generatoren liegt in der konstruktiven Gestaltung ihrer Läufer, die sich prinzipbedingt grundlegend von konventionellen Konzepten unterscheidet. Insbesondere der Wegfall der bei elektrischer Erregung notwendigen Läuferwicklungen führt dazu, dass Dauermagnetläufer mechanisch deutlich einfacher aufgebaut werden können. Gegenüber Elektromagneten ermöglicht der Einsatz von modernen, permanentmagnetischen Werkstoffen bei gleichem Bauraum die Erzeugung deutlich stärkerer Magnetfelder, ohne dass dabei Wärmeverluste aufgrund des elektrischen Widerstands entstehen. Dennoch kommt es auch bei Läufern mit Dauermagneten aufgrund von Änderungen im Magnetfeld während des Betriebs zur Induktion von Wirbelströmen, weswegen die ferromagnetischen Komponenten auch bei dieser Bauweise bevorzugt geblecht ausgeführt werden. Für die Läuferkonstruktion ergibt sich durch den Wegfall von Erregerwick-

lungen weiter die Möglichkeit, die zur Leitung der magnetischen Flüsse benötigten Regionen aus Weicheisen deutlich kompakter zu dimensionieren und großzügige Aussparungen in das Blechpaket einzubringen. Dies trägt neben einer signifikanten Reduktion von Trägheitsmoment und Masse auch zu einer besseren Wärmeableitung bei. Zudem stellt die Bewicklung der rechteckigen Erregerspulen auf dem Läufer sehr hohe Anforderungen an die eingesetzte Wickeltechnik, was den Einsatz kostenintensiver Wickelverfahren erfordert [130]. Praktisch bedeutet dies, dass durch den Einsatz von Dauermagnetläufern eine deutliche Steigerung der volumenbezogenen Leistung gegenüber elektrisch erregten Konzepten realisiert werden kann.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Konstruktion von Dauermagnetläufern ist die Gestaltung des ferromagnetischen Grundkörpers. Da hierbei neben mechanischen Merkmalen vor allem die für die Leistung des Produkts maßgeblichen magnetischen Eigenschaften festgelegt werden, erfordert die Entwicklung von Rotoren für leistungsfähige permanent erregte Maschinen eine ganzheitliche Betrachtung des magneto-mechanischen Systems. Dabei ist durch geschickte Gestaltung des Querschnitts von Blechpaket und Magnetkörpern eine Beeinflussung des magnetischen Flusses im Weicheisen und somit eine Minimierung von Verlusten durch Streuflüsse möglich. Angesichts der vielfältigen Möglichkeiten bzgl. Flussführung und Magnetanordnung existiert heute eine Vielzahl alternativer Konstruktionsprinzipien für Dauermagnetläufer. Ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Anordnung der Permanentmagnetkörper auf dem Läufer, wobei zwischen oberflächenmontierten und innen liegenden Magneten unterschieden wird.

### 2.3.1 Magnetkörper für Dauermagnetläufer

In der Regel erfolgt die Integration hartmagnetischer Werkstoffe in permanent erregte Läufer durch den Einbau von festen Einzelmagneten mit definierter Geometrie. Magnete aus Ferrit- oder Selten-Erd-Werkstoffen werden pulvermetallurgisch urgeformt und sind hinsichtlich ihrer Gestaltung lediglich durch die technologischen Randbedingungen des Sinterverfahrens begrenzt. Da jede Magnetkörpergeometrie den Einsatz angepasster Presswerkzeuge erfordert und eine spanende Bearbeitung von SE-Werkstoffen problematisch ist [37] [100], können durch die Verwendung einfacher, standardisierter Magnetkörper erhebliche Kosten eingespart werden. Aus diesem Grund werden für in Serien produzierte permanent erregte Läufer vorwiegend die in Bild 7 gezeigten Bauformen eingesetzt.

Die Einzelmagnete sind sowohl magnetisiert als auch unmagnetisiert verfügbar [100]. Während die Verarbeitung magnetisierter Magnete aufgrund der wirkenden Magnetkräfte zu komplexen Montageprozessen führt, ist bei Verwendung von unmagnetisierten Magnetkörpern der Einsatz teurerer Magnetisieranlagen zur nachträglichen Einprägung des Magnetfelds notwendig (siehe Kapitel 3).

Eine Besonderheit stellt die Integration des Magnetwerkstoffs in den Läufer durch Urformen dar. Hierbei wird der formlose Magnetwerkstoff direkt in Kavitäten im Läufer gefüllt und dort magnetisiert. Dies kann durch Einpressen des Magnetpulvers in den Läu-

fer oder durch Spritzgießen eines mit Magnetpulver gefüllten Kunststoffs geschehen [19] [86].

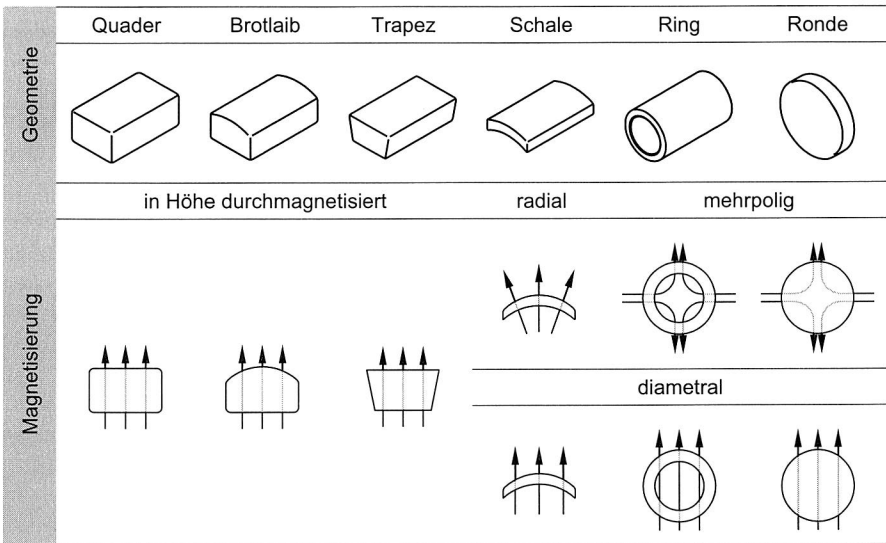


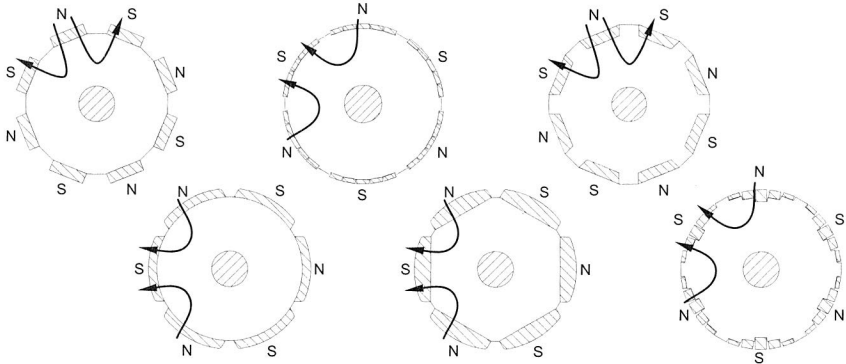
Bild 7: Standardbauformen und Magnetisierungsrichtungen für Dauermagnete zum Einsatz in permanent erregten Läufern nach [76] und [100]

### 2.3.2 Oberflächenmontierte Magnete

Das heute am weitesten verbreitete Konstruktionsprinzip sieht die Montage der Permanentmagnete auf der Läuferoberfläche vor. Ermöglicht wurde dies durch die Entwicklung neuer hartmagnetischer Werkstoffe, die gegenüber klassischen Ferriten über vielfach höhere Koerzitivfeldstärken verfügen. Diese gestatten die Anordnung von Magnetkörpern, die einer Entmagnetisierung durch die Statorfelder standhalten können, unmittelbar auf der Läuferoberfläche.

Die Grundstruktur des Rotors besteht dabei aus der Abtriebs- bzw. Antriebswelle, auf die das Blechpaket aufgeschraubt ist. Wie Bild 8 zeigt, werden die Magnete bei dieser Bauweise auf die Umfangsfläche des Blechpakets aufgeklebt [2] [71] [97]. Um den Luftspalt zwischen Läufer und Ständer klein zu halten, weist die Außenfläche des Läufers im Idealfall eine Zylinderform auf, was eine konstruktive Abstimmung von Blechpaket- und Magnetkörpergestaltung erfordert. Während bei runden Blechpaketquerschnitten durch die Verwendung schalenförmiger Magnetkörper eine annähernd zylindrische Hüllkurve erzielt werden kann, finden bei Läufern mit vieleckigen Querschnitten vorwiegend Quader oder brotlaibförmige Geometrien Verwendung. Dabei gestattet der Gebrauch brotlaibförmiger Magnete ebenfalls die Ausbildung einer runden Außenfläche, wohingegen beim Einsatz von Magnetquadern nur eine Approximation der anzustrebenden Zylinderform möglich ist. Zur Vermeidung von Verlusten aufgrund magnetischer

Kurzschlüsse muss zwischen zwei benachbarten Polen, die prinzipbedingt eine gegensätzliche Magnetfeldorientierung aufweisen, eine Pollücke vorgesehen werden. Diese wird üblicherweise in die Kontur des Blechpakets integriert und dient gleichzeitig als Positionier- und Fixierhilfe bei der Montage.



*Bild 8: Alternative Anordnungen oberflächenmontierter Magnete auf Läufern nach [31], [34], [37] und [109]*

Da die Festigkeit der Klebeverbindung während des Produktlebens insbesondere bei hochdrehenden Antrieben aufgrund hoher Fliehkräfte und starkem Wärmeeinfluss dauerhaft stark abnimmt, erfolgt die Aufnahme der Betriebslasten durch Kunstfaserbandagen<sup>4</sup> oder Metallhülsen aus nicht-magnetischem Stahl [5] [37] [71]. Lediglich bei wenigen Sonderlösungen erfolgt die Befestigung der Einzelmagnete durch Verschrauben [74] [106] oder Formschluss [36] [43] [63] [126]. Eine besonders innovative Interpretation dieses Konstruktionsprinzips stellt eine neuartige Magnetanordnung dar, bei der zur Optimierung der magnetischen Eigenschaften des Läufers unterschiedlich hohe Magnetkörper eingesetzt [109] oder mehrere Lagen von Einzelmagneten übereinander geschichtet werden [34].

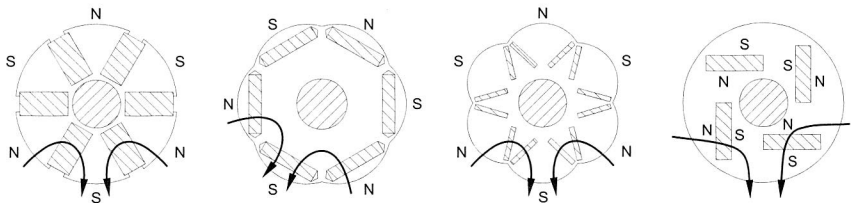
Zu den wichtigen Vorzügen dieses Konstruktionsprinzips zählen neben der vergleichsweise einfachen elektromagnetischen Auslegung und der kostengünstigen Fertigung auch die sehr guten dynamischen Eigenschaften [4] [37]. Darüber hinaus erlauben derart aufgebaute Rotoren die Verwendung preiswerter Stromrichter, da sie gegenüber Lösungen mit eingebetteten Magneten eine geringere Ankerrückwirkung aufweisen. Die Nachteile dieser Bauweise liegen vor allem im geringen Schutz der Magnetkörper gegen Entmagnetisierung aufgrund von Statorfeldern sowie in der Gefahr von Wirbelströmen, die bei Magneten aus elektrisch leitfähigen Werkstoffen, wie bspw. NdFeB, zu einer erheblichen Wärmeentwicklung und damit einer Herabsetzung der Remanenz füh-

<sup>4</sup> Spezifikationsabhängig kommen hierfür Bandagen aus GfK (Standardlösungen) bzw. Aramidfasern oder CfK (Hochleistungsmaschinen) zum Einsatz

ren können [31]. Aufgrund dieser Eigenschaften werden Maschinen mit Läufern dieser Bauweise vorzugsweise dort eingesetzt, wo es auf hohe Leistungen bei gleichzeitig geringen Kosten ankommt. Deshalb ist diese Bauweise vor allem für den Einsatz in Servomotoren für die Automatisierungs- und Anlagentechnik von großer Bedeutung [71].

### 2.3.3 Innen liegende Magnete

Eine alternative Gestaltungsmöglichkeit für Läufer mit Permanentmagneten stellen Konzepte mit innen liegenden Magneten dar (Bild 9), wobei nach [31] zwischen eingebetteten und vergrabenen Magnetkörpern unterschieden wird. Die maßgeblichen Unterschiede dieser beiden Konzepte liegen in der Lage der Magnetkörper im Läufer sowie in deren Feldorientierung. Flach unter der Läuferoberfläche angeordnete Magnete, deren Magnetfeld analog zu oberflächenmontierten nahezu radial zur Läuferachse orientiert ist, werden als eingebettete Magnete bezeichnet. Höhere Flussdichten, die zum Teil über der Remanenzflussdichte der Einzelmagnete liegen können, lassen sich dagegen mit vergrabenen Magneten in Sammleranordnung erreichen, bei denen die Magnetfelder in den Magnetkörpern tangential zur Läuferachse verlaufen.



*Bild 9: Alternative Bauformen von Läufern mit innen liegenden Magneten nach [31] und [37]*

Bei diesem Konstruktionsprinzip erfolgt der Einbau der Dauermagnete in das Innere des Blechpakets, das zu diesem Zweck über entsprechende Aussparungen verfügen muss. Im Gegensatz zu Lösungen mit oberflächenmontierten Magneten ist bei diesem Verfahren kein Einsatz von Klebstoffen notwendig, da die Magnetkörper im Läufer durch Formschluss ausreichend gegen Fliehkräfte fixiert sind. Nach dem Einbringen der Magnete erfolgt aus Gründen des Korrosionsschutzes eine Versiegelung der verbliebenen Kavität mit einer Vergussmasse, wie bspw. Epoxidharz.

Gegenüber Läufern mit außen liegenden Magneten gestatten insbesondere Lösungen mit vergrabenen Magneten signifikante Leistungssteigerungen aufgrund der hohen erreichbaren Luftspaltinduktionen. Darüber hinaus bietet die feste Struktur des Blechpakets einen effektiven Schutz gegen mechanische Beschädigungen, Wirbelströme sowie Entmagnetisierung der Dauermagnete und sichert diese auch bei sehr hohen Drehzahlen gegen Fliehkräfte [4] [31]. Um bei Läufern für Höchstleistungsmaschinen die Weichenbrücken zwischen dem Kern des Blechpakets und den außerhalb der Magnete liegenden Blechbereichen schmal zu gestalten und somit verlustbehaftete magnetische Streuflüsse zu minimieren, werden auch diese Läufer zum Teil mit einer Kunstfaser-

bandage zur Aufnahme von Fliehkräften versehen. Beim Blick auf die Kosten für die Entwicklung, Fertigung und Anschaffung von Antrieben mit innen liegenden Magneten offenbaren sich jedoch die Nachteile dieses Konstruktionsprinzips. So ist vor allem die elektromagnetische Auslegung derartiger Läufer aufgrund der komplexen Flussverläufe im Weicheisen sehr aufwändig [37]. Deshalb erfolgt der Einsatz permanent erregter Maschinen mit derartigen Läufern in erster Linie bei Applikationen, bei denen es auf höchste Leistungen bei kleinstem Bauraum ankommt.

### **2.3.4 Auswirkung alternativer Läuferkonstruktionen und Magnetgeometrien auf Fertigung und Montage**

Neben Auswirkungen auf die Leistungscharakteristik permanent erregter Maschinen hat das angewendete Konstruktionsprinzip zudem entscheidenden Einfluss auf den finanziellen und technischen Produktionsaufwand bei der Läuferherstellung. Insbesondere zwei Herstellungsschritte, die Fertigung des Blechpakets und die Montage und Befestigung der einzelnen Magnete, werden maßgeblich durch die Wahl des Läuferkonzepts beeinflusst.

#### **Einfluss auf die Fertigung**

Aussparungen im Blechpaket für die Rotorwelle und zur Gewichtseinsparung sind nicht konzeptspezifisch und fallen bei der Fertigung von Läufern mit innen liegenden und oberflächenmontierten Magnetkörpern gleichermaßen an. Da Rotoren mit innen liegenden Magnetkörpern in der Regel größer zu dimensionieren sind als solche mit oberflächenmontierten, fallen zum einen höhere Materialkosten für das Läuferblech an. Zum anderen ist in die Einzelbleche eine hohe Anzahl von Aussparungen zur Integration des Magnetmaterials einzubringen, was den Einsatz vergleichsweise komplexer und somit teurer Stanzwerkzeuge erfordert [37]. Die Komplexität von Stanzwerkzeugen für die Fertigung von Blechkonturen für Läufer mit außen liegenden Magneten ist dagegen geringer, da in diesem Fall neben der Wellenbohrung lediglich die Außenkontur des Pakets auszustanzen ist. Da aber auch hier oft Aussparungen zur Verringerung des Trägheitsmoments eingebracht werden müssen, egalisiert sich dieser vermeintliche Vorteil in der Praxis. Werden die Bleche durch Laserstrahlschneiden hergestellt, sind die Fertigungskosten aufgrund der hohen Flexibilität dieses Verfahrens unabhängig vom Konstruktionsprinzip.

#### **Einfluss auf die Montage**

Der Montageaufwand bei der Herstellung der Baugruppe Dauermagnetläufer wird primär durch den Aufwand für das Anbringen der Einzelmagnete bestimmt und hängt im Wesentlichen von der Anzahl und dem Magnetisierungsgrad der Magnetkörper ab. Da bei innen liegenden Magneten unmittelbar nach dem Einlegen eine formschlüssige Fixierung des Magnetmaterials vorliegt, ist diese Variante aus Sicht der Montage besonders günstig. Auch das abschließende Ausfüllen der verbliebenen Spalte zwischen Magnetkörpern und Blechpaket stellt einen gut beherrschbaren Prozess dar. Zudem

kann bei dieser Variante meist die Bandagierung der Läufer entfallen, was sich ebenfalls positiv auf den Produktionsaufwand auswirkt. Bei Läufern mit oberflächenmontierten Magneten hängt der Montageaufwand vor allem von der gewählten Magnetgeometrie ab. Während beim Einsatz von schalen- oder brotlaibförmigen Körpern ein Pol in der Regel lediglich aus einer Magnetreihe besteht, sind bei Verwendung von Quadern mehrere Reihen pro Pol und somit ein Vielfaches an Einzelmagneten mit Klebstoff zu versehen und zu bestücken. Darüber hinaus erfordern viele Lösungen mit außen liegenden Magneten zudem die Montage einer Fliehkraftsicherung.

## **2.4 Industrielle Bedeutung verschiedener Konstruktionsprinzipien und Magnetgeometrien**

Aufgrund der großen konstruktionsspezifischen Unterschiede bei der Herstellung von Dauermagnetläufern hängt der Nutzen von Forschungsarbeiten, die zur Rationalisierung des Produktionsaufwands beitragen sollen, maßgeblich von der Verbreitung der Bauformen und Herstellungsverfahren auf dem Markt ab. Da sich wissenschaftliche Arbeiten und Publikationen auf dem Gebiet der Elektromaschinen in erster Linie mit Möglichkeiten zur Leistungsoptimierung durch verbesserte Auslegung und Konstruktion befassen und die Veröffentlichungen von Herstellern vorwiegend werbenden Charakter haben, konnten im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche keine zufrieden stellenden Informationen über die industrielle Bedeutung der alternativen Läuferkonzepte und Montageverfahren gewonnen werden. Aus diesem Grund wurden diese Daten von Mitte 2005 bis Anfang 2006 im Rahmen einer Umfrage erhoben.

### **Umfeld der Studie**

Unter den insgesamt 39 befragten Herstellern permanent erregter Motoren und Generatoren waren 29 deutsche Unternehmen, neun weitere aus dem europäischen Raum sowie eine chinesische Firma. Eine deutlich stärkere internationale Ausrichtung ist bei Betrachtung der betriebenen Produktionsstandorte festzustellen. Während nahezu alle ausländischen Firmen auch die Herstellung in ihren Heimatländern durchführen, liegt die Anzahl der Produktionsstandorte in Deutschland mit 26 unter der Zahl der dort ansässigen Unternehmen. So führen viele der deutschen Firmen die Produktion an Standorten mit niedrigen Lohnkosten, wie bspw. der Tschechischen Republik (5), China und Taiwan (je 1), oder in unmittelbarer Nähe zu wichtigen Absatzmärkten, wie den USA (2), Schweden oder Japan (je 1), durch. Bei 29 % der befragten Firmen handelt es sich um kleine Betriebe mit maximal 50 Mitarbeitern, weitere 40 % sind der Gruppe der mittleren Unternehmen mit bis zu 250 Beschäftigten zuzuordnen. Große Unternehmen, die über mehr als 250 Mitarbeiter verfügen, stellen 31 % der Stichprobe dar<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Einordnung der Unternehmensgröße gemäß der Empfehlung der Europäischen Union [93]



## Produkt- und Variantenspektrum

Alle im Rahmen der Studie befragten Firmen produzieren rotierende, permanent erregte EK-Gleichstrom- und Synchronmaschinen. Läufer für diese Maschinen weisen in der Regel mehr als zwei, oft aus mehreren Einzelmagneten bestehende Pole auf, deren Bestückung mit Dauermagnetmaterial eine besondere Herausforderung darstellt. Daneben stellen elf der befragten Unternehmen zusätzlich permanent erregte Linear-motoren her, bei denen die Produktion der Sekundärteile zu einer ähnlichen Problemstellung führt.

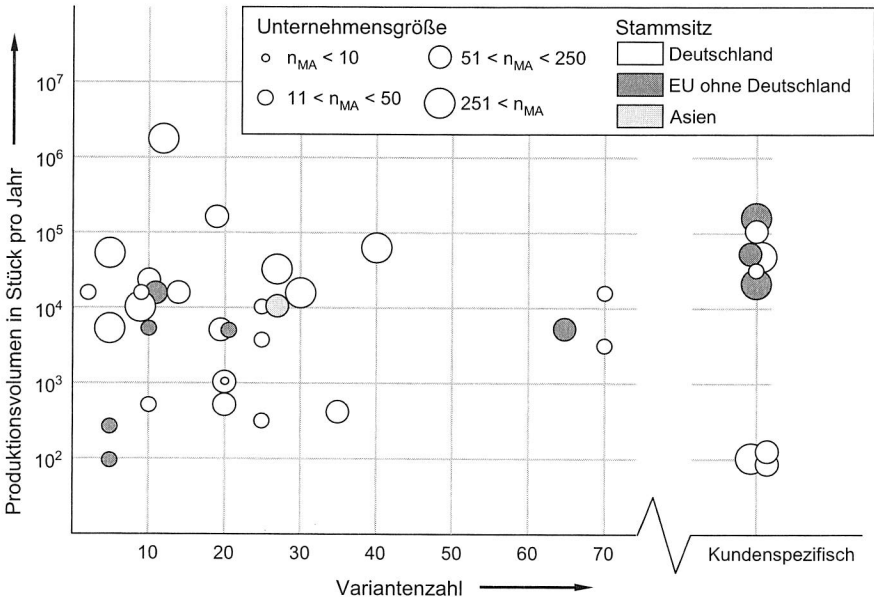


Bild 10: Verteilung der Jahresstückzahlen und Produktvarianten unter Berücksichtigung der Unternehmensgröße und ihrer Herkunft

Wie in Bild 10 dargestellt, umfasst das Spektrum der meisten Unternehmen zwischen 5 und 35 unterschiedliche Produkte und Varianten. Die Herstellung höherer Variantenzahlen bis hin zur Produktion kundenindividueller Lösungen erfolgt dabei vorwiegend durch mittlere und große Firmen. Die Anzahl der pro Jahr und Firma gefertigten Elektromaschinen bewegt sich in einem weiten Rahmen von 100 bis 1,5 Mio. Stück, wobei der Jahresdurchschnitt etwa zwischen 10.000 und 15.000 Maschinen liegt.

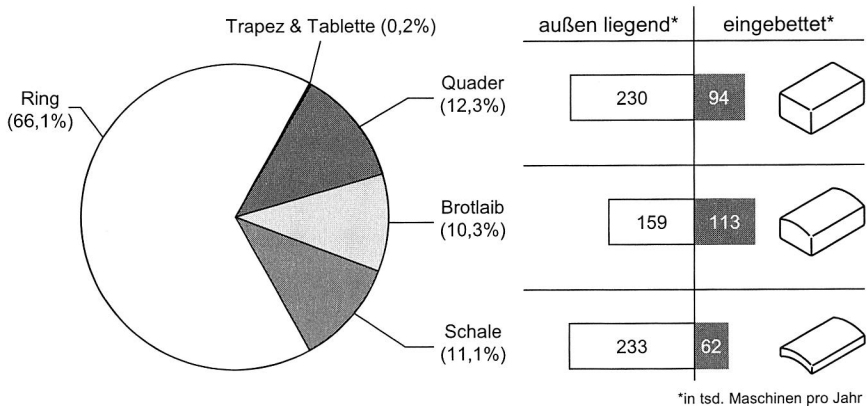
## Analyse der Läuferbauformen

Entsprechend der genannten Vorteile bei der elektrischen Auslegung sowie den günstigeren Fertigungskosten kommt Konstruktionen mit außen liegenden Dauermagneten größte Bedeutung zu. Nahezu 90 % der befragten Unternehmen gaben an, permanent

erregte Läufer dieser Bauweise herzustellen. Die produktionstechnisch aufwändigere, dafür jedoch leistungsfähigere Variante mit eingebetteten Magneten wird dagegen nur von 30 % der Firmen hergestellt. Gemessen an der jährlich von den befragten Unternehmen gefertigten Gesamtstückzahl beträgt der Marktanteil permanent erregter Maschinen mit innen liegenden Magneten weniger als 10 %, was die Marktrelevanz von Konstruktionen mit außen liegenden Magnetkörpern unterstreicht.

### Einsatzspektrum unterschiedlicher Magnetkörpergeometrien

Die Bedeutung der eingesetzten Magnetkörpergeometrien (vgl. Kapitel 2.3.1) für die befragten Unternehmen hängt neben dem Konstruktionsprinzip des Läufers sehr stark vom Typ der elektrischen Maschine ab. Während ringförmige Magnete lediglich von drei Firmen zur Läufererregung bei EK-Gleichstrommaschinen eingesetzt werden, nehmen sie gemessen an der Jahresstückzahl zwei Drittel der von den befragten Unternehmen insgesamt gefertigten Motoren und Generatoren ein. Da bei diesen Läufers jeweils ein Ringmagnet pro Läufer eingesetzt wird, beträgt die jährliche verbaute Menge etwa 1,75 Mio. Stück. Bei den Maschinen der übrigen Firmen erfolgt die Erregung des Läufermagnetfelds überwiegend durch eine Vielzahl von Einzelmagneten, die abhängig vom Konstruktionsprinzip im oder auf dem Läufer angebracht sind. Gemäß der durchgeführten Studie werden Magnetquader, -brotlaibe und -schalen sowohl auf der Läuferoberfläche als auch im Läufer befestigt. Eine genaue Aufschlüsselung der Montageposition in Abhängigkeit von der Bauform zeigt Bild 11. Sonderbauformen wie trapez- oder scheibenförmige Magnete sind dagegen gemessen am Gesamtvolumen für in Serie produzierte PM-Maschinen kaum von Bedeutung.



**Bild 11:** Bedeutung unterschiedlicher Magnetkörpergeometrien und Konstruktionsprinzipien bezogen auf die Menge jährlich produzierter PM-Maschinen

Auch wenn der Anteil mit Einzelmagneten versehener Maschinen gegenüber Produkten mit Ringmagneten vergleichsweise gering ist, so lässt dies noch keinen Schluss auf den

absoluten Bedarf der einzelnen Magnetkörpergeometrien zu. Während die Anzahl der mit ringförmigen Läufermagneten produzierten EK-Gleichstrommotoren gleichzeitig der Menge der insgesamt verbauten Ringmagnete entspricht, ist diese Folgerung bei Konstruktionen mit Einzelmagneten nicht möglich. Insbesondere Faktoren wie Polzahl, Motorgröße und Magnetgeometrie bestimmen die Menge der pro Läufer benötigten Magnetkörper. Da moderne, permanent erregte Maschinen häufig über mehr als zwei Polpaare mit jeweils mehr als einem Einzelmagneten verfügen, relativiert sich die absolute Verbrauchsmenge von Ringmagneten gegenüber quader-, brotlaib- und schalenförmigen Körpern. Unter den nichtringförmigen Magneten weisen Magnetquader die höchsten Verbrauchszahlen auf, da sie zur Annäherung einer zylindrischen Läuferumfangsfläche in mehreren Reihen pro Pol aufgebracht werden. Schalen und Brotlaibe werden dagegen mit entsprechenden Außenradien gefertigt, so dass ein Pol mit einer einzelnen Magnetreihe bedeckt werden kann. Eine präzise Quantifizierung der absoluten Verbrauchszahlen war im Rahmen der Studie nicht möglich, da die genauen Zahlen der Einzelmagnete pro Läufer bei den Herstellern der Vertraulichkeit unterliegen.

### **Analyse der eingesetzten Magnetwerkstoffe**

Hinsichtlich der eingesetzten Magnetwerkstoffe ist festzustellen, dass die Marktdurchdringung von Selten-Erd-Legierungen heute annähernd 100 % beträgt. Während SmCo-Legierungen noch in geringen Mengen für Sonderanwendungen bei höheren Temperaturen eingesetzt werden, erfolgt die magnetische Erregung in nahezu allen modernen Dauermagnetläufern mittels Werkstoffen auf NdFeB-Basis. Daneben spielen lediglich Ferrite (7 Nennungen) noch eine Rolle für Low-Cost-Anwendungen, während AlNiCo-Legierungen und kunststoffgebundene Magnete nur bei drei bzw. zwei Unternehmen zum Einsatz kommen.

### **Automatisierungs- und Magnetisierungsgrade bei der Magnetbestückung**

Bezüglich des Automatisierungsgrads bei der Magnetmontage gaben 37 Firmen an, das Magnetmaterial manuell aufzubringen. Lediglich acht Unternehmen betreiben ergänzend dazu oder als ausschließliches Verfahren Anlagen zur automatisierten Magnetbestückung. Dass der Einsatz von Montageautomaten dabei weniger von der Produktionsmenge als vielmehr von der Magnetisierung der Magnete abhängt, verdeutlicht Bild 12. Demnach bringen 20 Firmen, von denen sieben automatisierte Bestückprozesse eingeführt haben, die Magnetkörper im unmagnetisierten Zustand auf. Bei den übrigen 13 Unternehmen erfolgt das Aufbringen der unmagnetischen Magnetkörper manuell. Demgegenüber steht die Bestückung von zum Zeitpunkt der Montage bereits magnetisierten Magneten, die bei insgesamt 32 der befragten Unternehmen und nahezu ausschließlich manuell durchgeführt wird. Lediglich ein Hersteller gab an, innen liegende Magnetkörper im magnetisierten Zustand automatisiert in den Läufer einzubetten.

Bei Betrachtung des Erregungszustands der Magnete während der Montage unter Berücksichtigung der in den befragten Unternehmen vorherrschenden Stückzahlen fällt auf, dass auch bei großen Stückzahlen und geringer Varianz die Handbestückung ein

weit verbreitetes Montageprinzip darstellt. Bemerkenswert ist dabei, dass unabhängig von den produzierten Stückzahlen und Varianten keine deutliche Abgrenzung automatisierter Bestüchlösungen von der manuellen Magnetmontage zu erkennen ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Unternehmen zwar bevorzugt magnetisierte Magnete verarbeiten, allerdings nicht auf geeignete Automatisierungstechnologien zugreifen können.

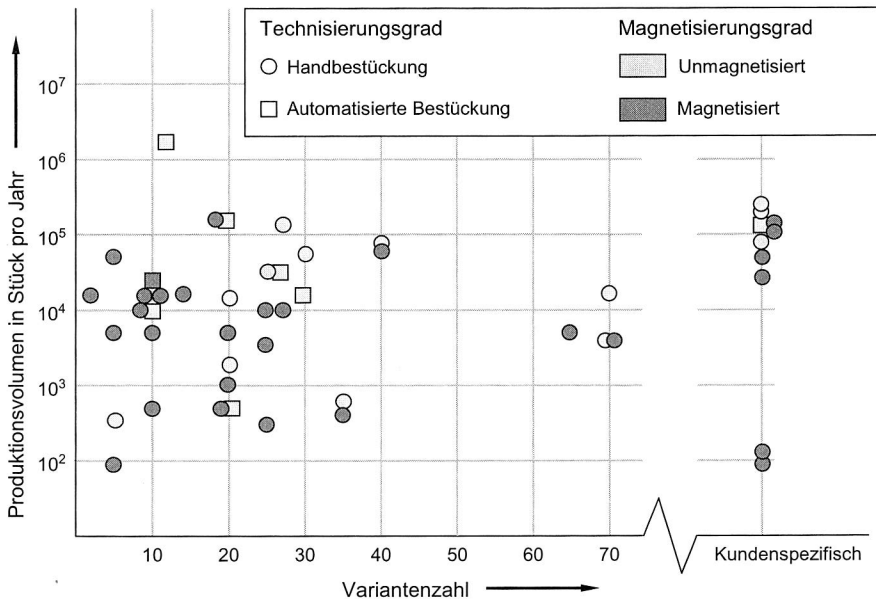
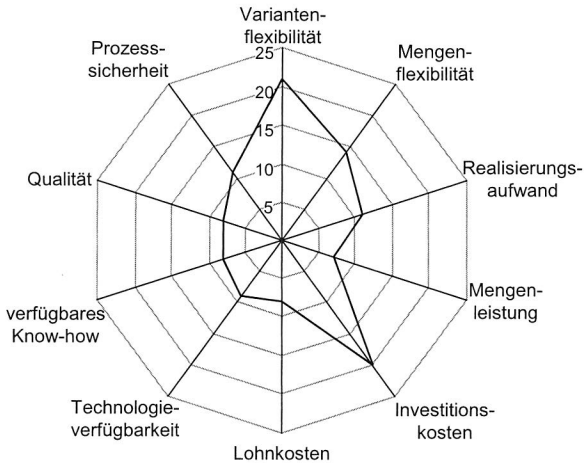


Bild 12: Automatisierungs- und Magnetisierungsgrad bei der Montage von Magneten unter Berücksichtigung von Stückzahlen und Varianz (inklusive Mehrfachnennungen)

Neben der eigentlichen Bestückung von Läufern und Sekundärteilen ist die dauerhafte Befestigung der Magneten ein weiterer Aspekt für die Läuferproduktion. Dies wird in der industriellen Produktion bei 90 % der Unternehmen durch 1- und 2-Komponentenklebstoffe realisiert. Ein weiteres oft angewendetes Konstruktionsmerkmal sind kraftschlüssige Kunstfaserverbände, die mehr als 50 % der befragten Unternehmen neben Klebstoffen zur zusätzlichen Sicherung der Magnete gegen im Betrieb auftretende Fliehkräfte einsetzen. Die ausschließliche Befestigung der Magnete durch eine mechanische Fixierung erfolgt dagegen nur bei einem Unternehmen. Bei sieben weiteren dient dies zur zusätzlichen Unterstützung der Klebung. Eine alternative, von insgesamt fünf Firmen angewandte Methode zur dauerhaften Fixierung der Magneten auf dem Läufer besteht im Aufschrumpfen einer Hülse aus unmagnetischem Metall.

### Anforderungen der Hersteller an geeignete Bestückverfahren

Für die Auswahl der angewendeten Montagekonzepte sind für die befragten Unternehmen vor allem eine große Flexibilität bzgl. Varianten und Stückzahlen sowie geringe Investitionskosten entscheidend. Darüber hinaus haben der Realisierungsaufwand, die erreichbare Prozesssicherheit sowie die verfügbaren Bestückstechnologien einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahl von Montageverfahren. Weniger wichtig bewerten die Firmen dagegen Aspekte wie bspw. Lohnkosten, im Unternehmen vorhandenes Wissen über Montageprozesse oder Qualitätsvorteile (Bild 13).



*Bild 13: Bedeutung verschiedener Zielkriterien für die Planung und Gestaltung von Montagesystemen zur Bestückung permanent erregter Läufer in Unternehmen*

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach permanent erregten Maschinen und dem zunehmenden Preisdruck scheint jedoch fraglich, ob die derzeit angewandten Produktionsverfahren auch zukünftig wettbewerbsfähig bleiben werden. Dies gilt insbesondere für Unternehmen, die ihre Produkte an Standorten mit hohen Arbeitskosten herstellen. Angesichts der fortschreitenden Globalisierung von Produktionskapazitäten ist von einer Verlagerung der Wertschöpfungskette in Niedriglohnregionen auszugehen, um die Herstellungskosten durch niedrige Löhne zu reduzieren. Eine Alternative zu dieser Strategie stellt die nachhaltige Rationalisierung der Wertschöpfungskette an bestehenden Standorten dar, bspw. durch die Automatisierung von Herstellungsprozessen.



### **3 Rationalisierungspotenziale bei der Läuferproduktion**

Die Effizienz von Produktionssystemen wird grundsätzlich von personellen, organisatorischen und technologischen Faktoren beeinflusst. Dabei bietet die Verbesserung der Organisationsstruktur im Fertigungs- und Montagebereich oft das größte Potenzial zur Steigerung der Produktivität im Herstellungsablauf. Dies wird besonders durch den aktuellen Trend zur Realisierung fließender, produktorientierter Produktionssysteme deutlich [111]. Gleichzeitig können die kontinuierliche Verbesserung bestehender Prozesse sowie die Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien zur nachhaltigen Senkung des Herstellungsaufwands beitragen. Auf Personalseite ist vor allem das Qualifizierungsniveau [120] der Mitarbeiter ausschlaggebend für die Effizienz des Herstellungsprozesses. Die Bedeutung des Faktors Personal nimmt mit der steigenden Komplexität von Arbeitsinhalten, Produkt- und Variantenstrukturen stark zu, so dass gut qualifizierte Arbeitskräfte für die Ausführung anspruchsvoller Montageaufgaben und die Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte von großer Bedeutung sind.

Auch wenn personellen und organisatorischen Maßnahmen bei der Durchführung von Rationalisierungsprojekten große Bedeutung zukommt, so handelt es sich dabei doch stets um unternehmensspezifische Lösungen, die in der Regel nicht uneingeschränkt auf Arbeitssysteme in anderen Firmen übertragbar sind. Anders verhält sich dies bei der Entwicklung und Verbesserung standardisierter Produktionsverfahren, die allgemein zur Effizienzsteigerung in der industriellen Produktion beitragen können. Bei den folgenden Betrachtungen liegt der Schwerpunkt deshalb auf Rationalisierungspotenzialen, die sich aus der Verbesserung bzw. Neuentwicklung produktionstechnischer Lösungen für die Läuferproduktion ergeben.

#### **3.1 Prozesskette zur Herstellung von Dauermagnetläufern**

Unabhängig von der produktspezifischen Konstruktion von Dauermagnetläufern durchlaufen diese bei ihrer Herstellung generell einige grundlegende Fertigungs- und Montageprozesse. Basierend auf der Baugruppe „eisenfertiger Läufer“ erhalten die Läufer während der Montage der Dauermagnete bzw. beim Arbeitsschritt „Magnetisieren“ ihre magnetischen Eigenschaften, die ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit und Qualität des fertigen Motors oder Generators sind. Die endgültige Formgebung des Läufers erfolgt während der Montage der Fliehkraftsicherung. Die abschließenden Arbeitsschritte stellen das Wuchten und der Einbau des Dauermagnetrotors in den Ständer dar. Abhängig von Konstruktionsmerkmalen kann zusätzlich die Durchführung weiterer, produktspezifischer Arbeitsschritte notwendig sein. Um Ansatzpunkte für potenzielle Rationalisierungsmaßnahmen innerhalb dieser Prozesskette aufzuzeigen, werden die Inhalte der einzelnen Arbeitsschritte im Folgenden kurz beschrieben.

##### **3.1.1 Herstellung des eisenfertigen Läufers**

Analog zu elektrisch erregten Rotoren stellt der eisenfertige Läufer auch bei der Dauermagnettechnologie die Basiskomponente der Baugruppe dar. Er besteht im Wesentli-

chen aus der Ab- bzw. Antriebswelle der Maschine sowie einem Blechpaket, das auf die Welle gefügt wird. Während Rotorwellen stets als Drehteil ausgeführt sind, wird das Blechpaket zur Minimierung von Wirbelstromverlusten bevorzugt aus einer hohen Anzahl konturierter, zur Vermeidung von Wirbelströmen gegeneinander elektrisch isolierter Elektrobleche zusammengesetzt. Die Auswahl des geeigneten Automatisierungskonzepts für die Fertigung der Einzelkomponenten sowie das Stapeln des Blechpakets wird dabei vorrangig von der zu fertigenden Stückzahl, der Anzahl unterschiedlicher Varianten sowie Gewicht und Größe der Läuferwelle und der Bleche beeinflusst (Bild 14).

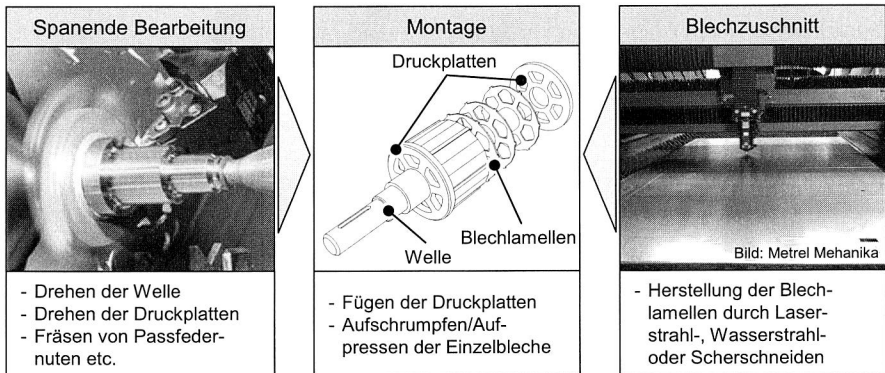


Bild 14: Arbeitsschritte zur Fertigung eisenfertiger Läufer

Zur spanenden Fertigung von Läuferwellen sind heute für jeden Bedarf sehr ausgereifte und vielfach erprobte Technologie- und Anlagenkonzepte verfügbar, die aufgrund ihrer hohen Produktivität und Flexibilität unter verschiedensten Rahmenbedingungen wirtschaftlich einsetzbar sind. So werden bei in großen Stückzahlen benötigten Wellen einfache Konturen mit möglichst wenigen unterschiedlichen Durchmessern angestrebt, um den Zerspanungsaufwand gering zu halten. Insbesondere bei der Massenproduktion werden die rohen Wellen daher oft lediglich über ihre gesamte Länge auf einen Durchmesser gedreht bzw. geschliffen und mit einem Rändel [13] versehen, um so das aufgesessene Blechpaket dauerhaft gegen Verrutschen zu sichern. Die Serienfertigung variantenreicher oder aufwändigerer Wellen erfolgt dagegen abhängig von der Werkstückkomplexität, den Stück- und Variantenzahlen auf kurvengesteuerten oder CNC-Drehmaschinen bzw. Bearbeitungszentren. Der Zerspanprozess läuft bei modernen Werkzeugmaschinen auch bei geringen Stückzahlen und vielen Varianten weitestgehend automatisiert ab, so dass der anfallende Personalaufwand maßgeblich durch den wiederum stückzahl- und größenabhängigen Automatisierungsgrad bei der Werkstückhandhabung zur Maschinenbeschickung und -entladung bestimmt wird. Da die Feinbearbeitung der Lagersitze bereits in diesem frühen Bearbeitungsschritt erfolgt, ist bei den Folgeprozessen auf den Erhalt der hohen Oberflächengüte an diesen Stellen zu achten.

Die Herstellung der Blechlamellen für den Aufbau des Blechpakets erfolgt durch an die Stückzahl angepasste Schneidprozesse. Einzelbleche für den Prototypenbau oder klei-



ne Stückzahlen werden dabei vorwiegend durch thermische oder wirkmedienbasierte Schneidverfahren, wie bspw. Laser- oder Wasserstrahlschneiden, gefertigt. Zur Produktion größerer Stückzahlen kommen dagegen Folge- oder Komplettschneidwerkzeuge mit geometrisch definierter Schneidengeometrie zum Einsatz, die eine effiziente Großserienproduktion von Einzelblechen gestatten [89] [132].

Bei all diesen Verfahren handelt es sich heute um ausgereifte Prozesse, deren spezifische Interdependenzen mit den Werkstoffeigenschaften des Elektroblechs bereits ausführlich wissenschaftlich untersucht wurden [12] [67]. Analog zur spanenden Fertigung weisen auch Anlagen für die Blechherstellung technologiebedingt einen sehr hohen Automatisierungsgrad auf. Insbesondere bei den nichtwerkzeuggebundenen Schneidverfahren handelt es sich zudem um hochflexible Prozesse, die mit geringem Aufwand an neue Blechkonturen angepasst werden können. Dementsprechend wird auch bei diesen Verfahren der notwendige Personalaufwand durch den Automatisierungsgrad der Teilehandhabung bestimmt.

Abhängig von Größe und Stückzahl werden die Blechlamellen anschließend gestapelt, verpresst und zu einem festen Blechpaket verbunden. Dies geschieht in der Praxis bevorzugt durch Verschweißen, Verkleben oder Vernieten der Einzelbleche. Hinsichtlich des Paketierens der Blechpakete liegt ebenfalls eine sehr starke Abhängigkeit des Automatisierungsgrads von den erforderlichen Läuferstückzahlen und -geometrien vor, der je nach Bedarf von rein manueller Ausführung bis hin zur Vollautomatisierung reichen kann. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der verstärkte Einsatz kombinierter Verfahren, wie bspw. des Stanz-Laser-Paketierens, die zur Erschließung bisher ungenutzter Rationalisierungspotenziale beitragen. [124]

Die endgültige Fertigstellung der Baugruppe eisenfertiger Läufer erfolgt durch die Montage der gestapelten und verbundenen Einzelbleche auf die Läuferwelle. Abhängig von den Stückzahlen und dem zu übertragenden Drehmoment wird das Blechpaket entweder direkt aufgepresst oder als Pressverbindung aufgeschrumpft und gegebenenfalls mit der Läuferwelle verschweißt.

### 3.1.2 Bestückung

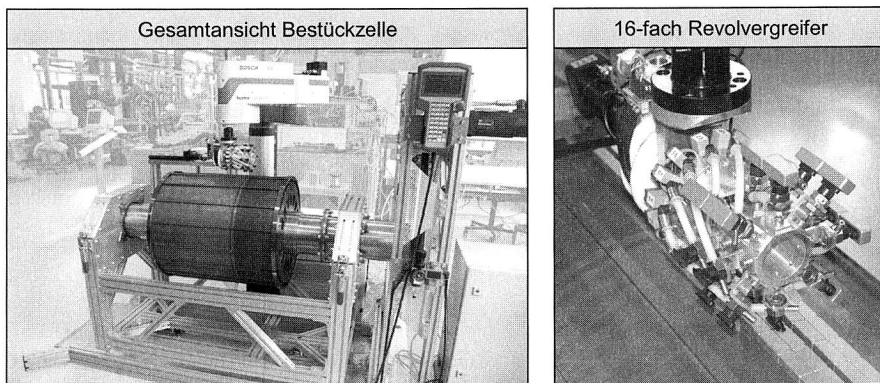
Die Bestückung der eisenfertigen Läufer mit hartmagnetischem Material stellt einen stark produktspezifischen Montageprozess dar. Abhängig von der konstruktiven Gestaltung des Läufers müssen dabei einer oder mehrere Dauermagnete gleicher Feldorientierung auf jede Polfläche aufgebracht werden. Um eine hohe Leistungsfähigkeit der Maschine zu erzielen, ist eine spaltfreie Anordnung der Magnete notwendig. In diesem Arbeitsgang erfolgt neben der mechanischen Komplettierung vor allem die Festlegung der magnetischen Eigenschaften der Baugruppe, deren Güte sich unmittelbar auf die Leistung der fertigen elektrischen Maschine auswirkt. Dies führt zu sehr hohen Anforderungen an die Prozesssicherheit, die maßgeblich vom Automatisierungsgrad und dem Magnetisierungsgrad der verwendeten Magnetkörper beeinflusst wird.

Aufgrund des in vielen Unternehmen der Elektrobranche vorherrschenden großen Variantenspektrums erfordert die wirtschaftliche Durchführung dieser Montageaufgabe eine

hohe Flexibilität bzgl. wechselnder Läufer- und Magnetkörpervarianten. Eine besondere Herausforderung bei der Auslegung und Gestaltung von Bestückssystemen stellt die teilweise äußerst hohe Anzahl von Einzelmagneten dar, die abhängig von der Läuferkonstruktion zwischen vier und mehreren tausend Stück pro Rotor betragen kann. Daher sind bei kleinen Läufers mit wenigen Magneten, die jedoch in großen Stückzahlen produziert werden, hohe Bestückleistungen ebenso erforderlich wie bei großen, in Kleinserien hergestellten Rotoren mit vielen Einzelmagneten. Neben dem Automatisierungsgrad ist der Magnetisierungsgrad, den die Einzelmagnete bei der Verarbeitung aufweisen, ein wichtiges Kriterium zur Einteilung unterschiedlicher Montagekonzepte.

#### **Bestückung unmagnetisierter Magnetkörper**

Verfügen die Einzelmagnete zum Zeitpunkt der Montage noch nicht über ein eigenes Magnetfeld, so spricht man von der Bestückung unmagnetisierter Magnete. Der wichtigste Vorteil dieses Montagekonzepts liegt darin, dass während des Fügeprozesses keine Magnetkräfte auftreten. Dies ermöglicht die gleichzeitige Ablage mehrerer Magnetkörper im Rahmen eines einzigen Montagezyklus. Da es sich bei der eigentlichen Fügebewegung um einen einfachen Pick & Place-Vorgang handelt, lässt sich dieses Verfahren sowohl manuell als auch automatisiert sehr effizient umsetzen. Die Realisierung manueller Arbeitsstationen kann bereits mit sehr geringem Investitionsaufwand erfolgen und eignet sich in erster Linie für die variantenreiche Kleinserienproduktion.



*Bild 15: Roboterassistierte Bestückungszelle zur flexibel automatisierten Bestückung von Läufers mit unmagnetisierten Magnetkörpern durch einen mit Vakuumsaugern ausgestatteten Revolvergreifer [25] [26] [28]*

Für die Bestückung größerer Magnetmengen bieten sich dagegen automatisierte Lösungen an, die abhängig von der geforderten Flexibilität von einfachen NC-Achssystemen bis hin zu roboterassistierten Lösungen, wie bspw. in Bild 15 dargestellt, reichen können. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass neben der eigentlichen Bestückung weitere Prozessschritte, wie die Bereitstellung der Einzelmagnete, das Auf-

tragen des Klebstoffs oder die Handhabung des Läufers, ebenfalls automatisiert auszuführen sind. Die Auswahl des Automatisierungsgrads hängt dabei weniger von der Anzahl der herzustellenden Läufer als vielmehr von der zu bestückenden Magnetmenge ab. Somit kann es auch bei der Kleinserienproduktion großer Läufer mit einer entsprechend hohen Anzahl von Einzelmagneten durchaus sinnvoll sein, den Bestückprozess zu automatisieren. Ein weiterer Vorteil dieses Montagekonzepts liegt darin, dass unabhängig von der Magnetkörpergeometrie keine zusätzliche Diversifizierung der Magnetvarianten aufgrund unterschiedlicher Feldorientierungen anfällt. Dies trägt zur Vereinfachung der Produktionslogistik und zur Steigerung der Prozesssicherheit bei, da die Montage von Magneten mit falscher Polarität ausgeschlossen ist.

Ein gravierender Nachteil, der sich unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit dieses Montagekonzepts auswirkt, liegt in der Notwendigkeit des nachträglichen Aufmagnetisierens der bestückten Läufer. Neben dem zusätzlichen Handhabungs- und Logistikaufwand, der zur Durchführung dieses Arbeitsschritts zu bewältigen ist, belasten vor allem die hohen Investitionskosten für Magnetisieranlage und -köpfe die Produktionskosten erheblich. Dies führt zu hohen Prozesskosten, die erst bei großen Stückzahlen durch leistungsfähige Bestückautomaten kompensiert werden können. Somit eignet sich die nachträgliche Magnetisierung primär für den Einsatz in der Serien- und Massenproduktion. Auch können dabei nicht ganz so hohe Energiedichten realisiert werden, wie dies bei der Montage angeregter Magnete möglich ist [56]. Dies hat zur Folge, dass das Leistungsvermögen der fertigen Läufer bei dieser Methode geringfügig schlechter ausfällt als bei der Bestückung mit angeregten Magneten.

### **Bestückung magnetisierter Dauermagnete**

Die mit finanziellem und produktionstechnischem Mehraufwand verbundene nachträgliche Magnetisierung der Läufermagnete ist bei der Verarbeitung bereits magnetisierter Einzelmagnete dagegen nicht notwendig. Durch den Wegfall des Magnetisierungsprozesses entfallen weitere nicht wertschöpfende Tätigkeiten, wie bspw. Transport- und Handhabungsarbeiten. Analog zur manuellen Bestückung unmagnetisierter Magnete können auch bei diesem Konzept hochflexible Handarbeitsplätze mit geringem Invest realisiert werden. Darüber hinaus gestattet diese Methode den Bau von Läufern mit höchster magnetischer Energiedichte.

Der gravierende Nachteil dieses Verfahrens liegt in den extrem hohen volumenbezogenen Magnetkräften, die während der Montage auf die Einzelmagnetkörper einwirken [97]. Dabei ist zwischen den Anziehungskräften der Magnete untereinander sowie der Anziehung an Objekte aus ferromagnetischem Material, bspw. dem Blechpaket, zu unterscheiden. Aufgrund der vorhandenen Magnetfelder wirken während des Fügeprozesses sehr starke anziehende und abstoßende Kräfte und Momente auf die Magnete ein. Dies führt zu komplexen und schwer beherrschbaren Montage- und Positioniervorgängen. Für eine ordnungsgemäße Montage magnetisierter Magnete sind deshalb hohe Haltekräfte notwendig, die mittels geeigneter Werkzeuge auf den zu montierenden Permanentmagnet übertragen werden müssen. Zudem ist wegen der großen Kräfte pro

Montagezyklus stets nur die Ablage einzelner Magnete möglich. Um einem Verrutschen des abgelegten Magnets aufgrund von Anziehungs- und Abstoßungskräften durch benachbarte, zuvor montierte Magnete vorzubeugen, ist eine Fixierung der Einzelmagnete mit einem Klebstoff unerlässlich (Bild 16). Da für die automatisierte Montage angeregter Magnete bisher keine geeigneten Handhabungs- und Montagetechnologien bekannt sind, erfolgt die Oberflächenmontage von Läufern mit magnetisierten Magneten derzeit ausschließlich manuell (vgl. Kap. 2.4).

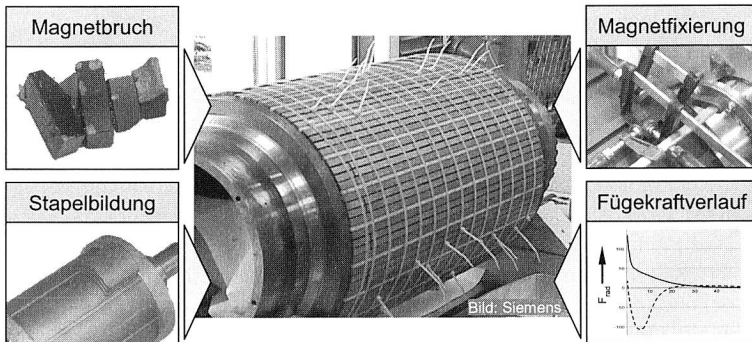


Bild 16: Problemfelder bei der Bestückung magnetisierter Magnetkörper [50] [52]

Die hohen Energiedichten moderner Selten-Erd-Legierungen und die damit verbundenen Magnetkräfte führen zudem zu sehr hohen Anforderungen an die Konzentration sowie an die motorischen Fähig- und Fertigkeiten des ausführenden Montagepersonals und stellen somit eine Hauptfehlerquelle dar [48] [97]. Aufgrund der starken magnetischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte können die zu handhabenden Dauermagnete beim Fügen unvermittelt sehr stark beschleunigt werden, wodurch es zu schnellen und unkontrollierbaren Bewegungen der Magnetkörper kommen kann. Da Körper aus sintergepressten Dauermagnetwerkstoffen eine sehr hohe Sprödigkeit aufweisen, brechen Magnete aus Selten-Erd-Legierungen beim unkontrollierten Aufschlagen auf das Blechpaket in den meisten Fällen auseinander. Die dabei frei werdenden Magnetpartikel setzen sich auf der Oberfläche des Blechpakets bzw. auf bereits bestückten Magneten ab und sind umständlich zu entfernen. Zusätzlich besteht erhebliches Verletzungspotenzial für die Mitarbeiter, insbesondere durch Quetschungen an Fingern und Händen. Darüber hinaus kann es passieren, dass der zu fügende Magnet kurz vor dem Ablagepunkt eine Drehung vollführt und mit falscher Feldorientierung auf dem Läufer zum liegen kommt. Dies ist insbesondere bei der Verwendung quaderförmiger Magnetkörper kritisch bzgl. der Prozesssicherheit, da eine fehlerhafte Feldorientierung aufgrund der vollständigen Symmetrie von Quadern visuell nicht erkennbar ist. Derart falsch orientierte Magnete innerhalb eines Pols führen zu erheblichen magnetischen Verlusten und mindern die Leistung der fertigen elektrischen Maschinen spürbar. Sie müssen deshalb vor dem Abschluss der Montage demontiert und erneut aufgebracht werden. Da dieser Fall einem Kurzschluss im magnetischen Kreis entspricht kommt es zu einer extrem starken

Anziehung des verkehrt herum liegenden Magnets an den Läufer, während gleichzeitig die Aushärtung des Klebstoffs beginnt. Da ein nachträgliches Lösen der Klebstoffverbindung nur unter hohen Temperaturen möglich ist, muss die Demontage fehlerhaft orientierter Magnetkörper sehr schnell durchgeführt werden. Wegen der dabei eingebrachten Wärme ist eine Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften bereits korrekt montierter Dauermagnete nicht auszuschließen.

Darüber hinaus ist zu bedenken, dass die Orientierung des Magnetfelds bei nicht flächensymmetrischen Geometrien, wie z. B. bei Schalen oder Brotlaiben, ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal darstellt. Wie Bild 17 verdeutlicht, können quaderförmige Magnetkörper im Gegensatz zu Körpern mit lediglich zwei Symmetrieebenen universell sowohl zur Montage von Nord- als auch von Südpolen verwendet werden. Die Magnetisierungsrichtung ist somit eine variantenspezifische Eigenschaft, die im Produktionsbereich nur durch farbliche Kennzeichnung oder durch geeignete Messgeräte, wie z. B. Gaußmeter oder Hallsonden, unterschieden werden kann.

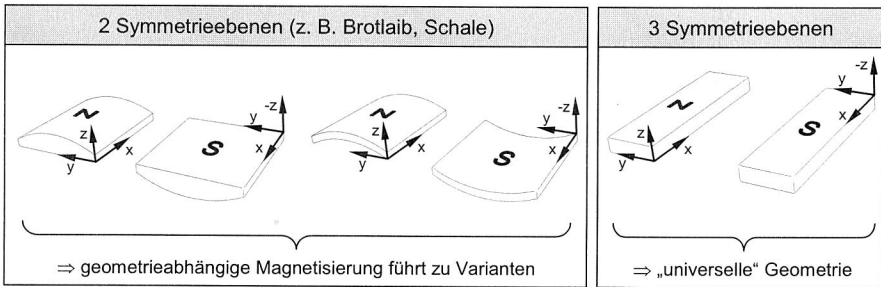
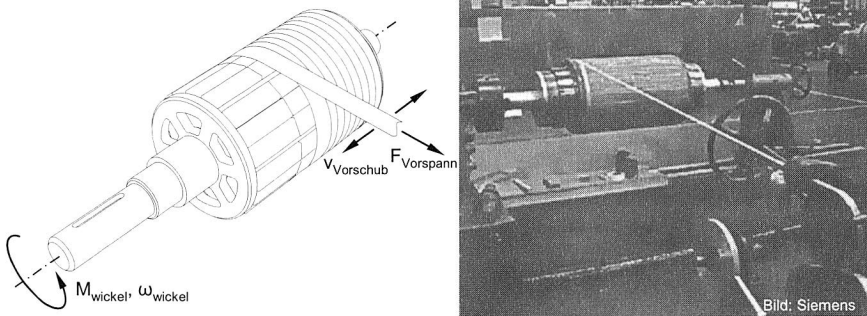


Bild 17: Einfluss der Magnetgeometrie auf die magnetisierungsrichtungsbedingte Variantenbildung

Eine Vereinfachung des Montageprozesses kann durch Fügehilfen erfolgen, mit deren Hilfe der Magnet in einer Zwangslage an den Ablagepunkt geführt wird. Alternativ dazu kann der Einzelmagnet auch zunächst etwas abseits der bereits montierten Magnetkörper auf dem Läufer abgelegt und anschließend an seine Endposition geschoben werden. In jedem Fall ist es bei diesem Montagekonzept jedoch erforderlich, dass der gefügte Magnet so lange an seiner Ablageposition fixiert wird, bis der Klebstoff die von den benachbarten Magneten hervorgerufenen Anziehungs- und Abstoßungskräfte vollständig aufnehmen kann. Dies führt zu vergleichsweise langen Haltezeiten, die in erster Linie vom verwendeten Klebstoffsystem abhängen. Aufgrund des komplizierten Montageprozesses sowie der zeitintensiven Fixierung fallen bei dieser Methode hohe Arbeitskosten an, die einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Eine Automatisierung dieses Montagekonzepts ist nach dem bisherigen Kenntnisstand nicht möglich, da keine bekannte Greifertechnologie den Anforderungen an die automatisierte Handhabung und Montage von Dauermagneten (vgl. 4.3.2) gerecht wird.

### 3.1.3 Montage der Fliehkraftsicherung

Für viele Anwendungen reicht die Langzeitfestigkeit der bei der Magnetmontage hergestellten Klebeverbindung nicht aus, um die auftretenden Betriebslasten während der gesamten Produktlebensdauer zuverlässig aufzunehmen. Dies gilt sowohl für die statischen Abstoßungs- und Anziehungskräfte, die nach der Magnetisierung permanent zwischen den Einzelmagneten wirken, als auch für die dynamischen Lasten, wie bspw. Fliehkkräfte oder die zyklische Erwärmung und Abkühlung. Um die Dauermagnetanordnungen auf den Polen des Läufers dennoch dauerhaft gegen Anheben zu sichern, wird im Regelfall eine harzgetränkte Kunstfaserbandage oder eine unmagnetische Metallhülse als zusätzliche Fixierung angebracht. Die dafür eingesetzten Verfahren müssen für die präzise Herstellung dünner Ummantelungen geeignet sein, um einen möglichst kleinen Luftspalt und somit eine hohe Luftspaltinduktion zu ermöglichen.



*Bild 18: Schematische Darstellung des Bandagierprozesses zum Aufbringen einer Kunstfaserbandage auf einen Läufer*

Das Bandagieren bestückter Läufer erfolgt im sog. Wickelverfahren [5]. Hierbei handelt es sich um ein weitgehend mechanisiertes Verfahren, bei dem mit Harz getränkte Glas- oder Carbonfaserrovings mit einer definierten Vorspannkraft auf das Blechpaket mit den Magneten gewickelt werden. Neben der Rotationsbewegung des Läufers ist dabei eine gesteuerte Vorschubbewegung des Fadenführers notwendig, um die konstruktiv vorgesehene Überlappung der einzelnen Lagen sicherzustellen (Bild 18). Die Einhaltung der Vorspannkraft wird dabei durch gezieltes Abbremsen der Vorratsrolle gewährleistet. Während des Wickelns durchlaufen die Rovings ein Tränkbad, in dem die Benetzung der Fasern mit dem Matrixwerkstoff – vorwiegend Epoxidharz – erfolgt. Alternativ dazu kann das Harz auch nach dem Wickeln in die Bandage injiziert werden. Um eine maximale Festigkeit der Faserverbundmatrix zu erreichen, wird der Matrixwerkstoff in der Regel heißgehärtet. Hierbei ist besonders bei bereits magnetisierten Läufers darauf zu achten, dass die zulässige Betriebstemperatur des Magnetwerkstoffs während der Aushärtung nicht überschritten wird, da dies zur Beschädigung des Läufers durch partielle thermische Entmagnetisierung führen würde.

Weiterhin kann die Aufnahme der Fliehkräfte bzw. die dauerhafte Fixierung der Einzelmagnete während des Betriebs auch durch eine Metallhülse aus unmagnetischem Stahl erfolgen, die als Pressverband auf den bestückten Läufer aufgebracht wird. Die Verbindung kann dabei als Schrumpfpres- oder als Dehnpressverband realisiert werden. Da die dünne Hülse gegenüber dem Läufer eine geringere thermische Masse aufweist, ist eine deutlich schnellere Erwärmung und Abkühlung der Hülse möglich, so dass Metallhülsen in der industriellen Produktion vorwiegend im Schrumpfpresverfahren aufgebracht werden. Allerdings ist, wie auch beim Aushärten von harzgetränkten Kunstfasersbandagen bei bereits magnetisierten Läufern, darauf zu achten, dass die Hülse nicht über die Betriebstemperatur des Magnetwerkstoffs aufgeheizt wird.

Ähnlich wie bei der Anfertigung von Läuferwellen und Einzelblechen kann auch bei diesem Arbeitsschritt auf bewährte Montageverfahren zurückgegriffen werden. Insbesondere Faserwickelverfahren können heute mit hohen Automatisierungsgraden realisiert werden und gestatten somit eine sehr wirtschaftliche Bandagierung der bestückten Läufer [20] [91]. Mit deutlich günstigeren Investitionskosten verbunden und damit auch für kleinere Stückzahlen geeignet ist dagegen das manuelle Aufbringen einer Metallhülse als Pressverband.

### 3.1.4 Magnetisierung

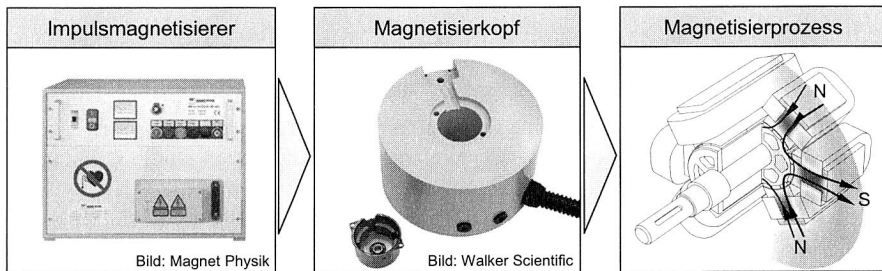
Werden Läufer mit unmagnetisierten Magneten bestückt, muss dem Material vor dem Einbau des Rotors in den Stator die zur Felderzeugung erforderliche magnetische Energie eingeprägt werden. Dies erfolgt durch Anlegen eines sehr starken elektromagnetischen Felds, das von außen auf den Läufer wirkt. Die dafür erforderlichen Feldstärken liegen je nach Werkstoff zwischen dem Drei- bis Siebenfachen der jeweiligen Koerzitivfeldstärke  $H_C$  und werden über einen der spezifischen Polgeometrie angepassten Magnetisierkopf erzeugt [97]. Entsprechend den Dimensionen des zu bestückenden Läufers sowie der Komplexität des zu realisierenden Feldverlaufs ist sowohl eine sequentielle Magnetisierung von Einzelpolen [46] [83] als auch das Aufmagnetisieren kompletter Läufer in einem Schritt [68] [123] möglich.

Die Erzeugung derart starker magnetischer Felder erfolgt mittels stromdurchflossener Spulen mit geblechten Weicheisenkernen, die gemäß der zu magnetisierenden Anordnung zu gestalten sind. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Realisierung eines kleinen Luftspalts zwischen Magnet und Magnetisierkopf, der nicht mehr als 0,5 mm betragen sollte. Die Impulsdauer des Stromstoßes liegt abhängig von der zu magnetisierenden Werkstoffmenge und den zu erwartenden Wirbelströmen bei etwa 1 ms, wobei die eigentliche Aufmagnetisierung binnen einiger Nanosekunden vonstatten geht. Die umgesetzte elektrische Energie beträgt dabei zwischen einigen 100 J und 200 kJ bei Ladespannungen von bis zu 3 kV. Weil ein großer Teil der elektrischen Impulsenergie in Verlustwärme umgesetzt wird, erfordern Magnetisierköpfe für die Serienfertigung bei Impulsabständen von weniger als 30 s eine Luft- oder Wasserkühlung. [56]

Da das Magnetisierungsergebnis maßgeblich von der Gestaltung des Magnetisierkopfs abhängt, ist dieser an jede Läuferform anzupassen. Dies hat zur Folge, dass für jeden zu



magnetisierenden Querschnitt ein produktspezifischer Magnetisierkopf notwendig ist [56], was aufgrund der komplexen elektromagnetischen und thermischen Auslegung sowie der aufwändigen Herstellung zu erheblichen Kosten führt. Die Versorgung des Magnetisierkopfs mit elektrischer Energie erfolgt durch einen Impulsmagnetisierer, der im Wesentlichen eine Kondensatorbatterie zur Energiespeicherung sowie die zugehörige Leistungselektronik und Steuerung umfasst (Bild 19) [96] [98].



*Bild 19: Betriebsmittel und Prozess zum Einprägen des Läufermagnetfelds nach der Bestückung unmagnetisierter Magnetkörper*

Neben den reinen Investitionskosten führt die nachträgliche Magnetisierung zu weiterem Aufwand in der Produktion. Abgesehen von Transport und Pufferung der Läufer für den zusätzlichen Prozessschritt verursacht insbesondere die Handhabung der Läufer bei der Beschickung der Magnetisieranlage zusätzlichen Aufwand. Zudem ist nach jedem Magnetisierimpuls Zeit zum Aufladen der Kondensatorbatterie notwendig, die abhängig von der benötigten Impulsenergie bei mehr als einer Minute liegen kann [56].

### 3.1.5 Einbau des Läufers in den Ständer

Die abschließenden Produktionsschritte sind das Wuchten und der Einbau des mechanisch und magnetisch fertigen Rotors in den Stator. Auch hier stellt die sichere Beherrschung der hohen Magnetkräfte, die zwischen Dauermagnetläufer und weichmagnetischem Ständerblechpaket wirken, die maßgebliche Herausforderung dar. Während zu Beginn des Einführens bereits bei kleinen bis mittleren Baugrößen sehr hohe Axialkräfte auf den Läufer wirken, treten mit zunehmender Eindringtiefe verstärkt radiale Kräfte auf, deren Höhe mit dem Fügeweg exponentiell ansteigt. Die radiale Komponente der Magnetkraft ist insofern kritisch, da sie, sobald der Läufer nicht mehr exakt koaxial zur Ständerbohrung ausgerichtet ist, zum Anlegen des Rotors an den Stator führt. Dies kann abhängig von der konstruktiven Ausführung des Läufers eine Beschädigung der Bänder oder den Ausbruch von Magnetmaterial zur Folge haben, was eine aufwändige Nachbearbeitung des Läufers erfordert. Darüber hinaus besteht insbesondere bei Schäden an den Magnetkörpern die Gefahr, dass sich ausgebrochene Magnetpartikel in der Bohrung festsetzen und während des späteren Betriebs zu Ausfällen führen. Bei Läufern mit eingebetteten Magnetkörpern oder Metallhülsen anstelle einer Kunststoff-



serbandage ist die Beschädigungsgefahr dagegen deutlich geringer, da die empfindlichen Magnetkörper besser gegen mechanische Einwirkung geschützt sind.

Zur Lösung dieser Aufgabenstellung werden in der Serienproduktion Montagehilfen eingesetzt, mit denen eine präzise Zentrierung des Magnetläufers gegenüber dem Ständer erfolgt [125]. Hierdurch kann um den kompletten Läuferumfang ein nahezu konstanter Luftspalt zwischen Umfangsfläche und Statorblechpaket realisiert werden, so dass sich die radialen Magnetkräfte gegenseitig aufheben. Die Aufnahme der Magnetkräfte in axialer Richtung geschieht dagegen über eine Fügevorrichtung, die ein präzises und berührungsloses Einfahren des Läufers in den Stator ohne die Gefahr von mechanischen Schäden durch Kollision mit dem Stator gestattet.

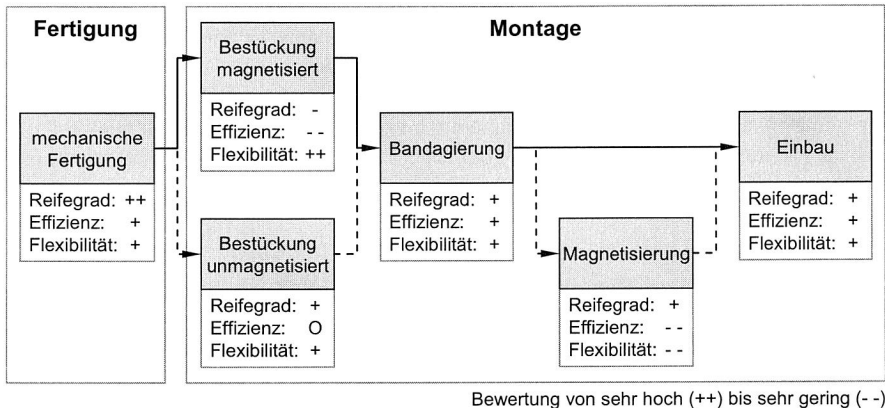
Ein alternativer Ansatz zur Beherrschung bzw. Verringerung der auftretenden Fügekräfte wird in [108] beschrieben. Hierbei sollen durch gezielte Bestromung der Statorwicklungen geregelte Gegenfelder erzeugt werden, mit denen eine Kompensation der magnetischen Kraftwirkung des Läufers auf den Stator möglich ist. Dafür sind durch in den Ständer integrierte Hall-Sensoren die während des Einführens des Läufers auftretenden Magnetfelder zu messen und über eine Steuerelektronik die zugehörigen Phasen der Ständerwicklung so zu bestromen, dass die resultierende Radialkraft stets null ist.

### **3.1.6 Bewertung der Einzelprozesse hinsichtlich ihres Rationalisierungspotenzials**

Wesentliche Aspekte für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen sind neben den anfallenden Investitions- und Personalkosten vor allem deren Automatisierungsgrad, die Komplexität der Produktionsprozesse sowie die Flexibilität der eingesetzten Betriebsmittel. Hinsichtlich dieser Faktoren ergibt sich bei Betrachtung der Arbeitsschritte zur Läuferproduktion ein sehr heterogenes Bild. Während es sich bei den eingesetzten mechanischen Fertigungsverfahren um an die spezifischen Werkstückgeometrien der Läuferkomponenten anpassbare, hochautomatisierte Universalprozesse handelt, sind die erforderlichen Montagevorgänge produktspezifische Arbeiten. Deshalb ist das Rationalisierungspotenzial, das durch technische Innovationen bei der Herstellung eisenfertiger Läufer erreicht werden kann, insgesamt als eher gering zu bewerten.

Bei den zur Läuferproduktion durchzuführenden Montageschritten handelt es sich dagegen vorwiegend um Tätigkeiten, für die standardmäßig keine automatisierbaren Prozesse und Betriebsmittel verfügbar sind. Während zur Montage der Fliehkraftsicherung und für das Fügen der fertigen Läufer in den Stator hinreichend effiziente Verfahren bekannt sind, stellt insbesondere die Bestückung der Läufer mit dauermagnetischem Material eine Schwachstelle in der Wertschöpfungskette dar. Wie das Ergebnis der in Kapitel 2.4 näher beschriebenen Studie zur Montage von Läufermagneten verdeutlicht, kommen dafür in der industriellen Produktion heute Verfahren zum Einsatz, die entweder mit sehr hohem Personalaufwand oder hohen Investitionskosten behaftet sind. Insofern ist die Entwicklung leistungsfähiger und effizienter Verfahren zur Montage von

Magnetkörpern notwendig, um weit reichende Rationalisierungspotenziale bei der Läuferproduktion zu erschließen.



*Bild 20: Qualitative Bewertung der Prozessschritte zur Herstellung von PM-Läufern bei der Verarbeitung magnetisierter (durchgezogen) und unmagnetisierter (gestrichelt) Magnetkörper mit aktuellen Montagetechnologien*

Die in Bild 20 vorgenommene Bewertung der beschriebenen Verfahrensschritte hinsichtlich der Kriterien Reifegrad, Effizienz und Flexibilität verdeutlicht das bestehende Defizit bei der Magnetmontage. Während bei der Bestückung magnetisierter Magnetkörper der zeit- und arbeitsaufwändige manuelle Fügeprozess selbst maßgeblich für die niedrige Effizienz dieser Methode ist, mindern vor allem die hohen Investitionskosten sowie die geringe Flexibilität des Magnetisierprozesses den Wirkungsgrad bei der Montage von unmagnetisiertem Material. Da für die Einzelprozesse des letztgenannten Verfahrens mittlerweile weitestgehend ausgereifte Systeme und Anlagen zur Verfügung stehen, ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis weiterer Optimierungsmaßnahmen vergleichsweise groß. Dagegen weist die Verarbeitung magnetisierter Einzelmagnete aufgrund der bisher ausschließlich manuellen Durchführung dieses Prozesses weitaus größeres Potenzial für Kosteneinsparungen auf. Neben Effizienzsteigerungen beim Bestückprozess liegen vor allem in der Verkürzung der gesamten Prozesskette durch die Eliminierung unnötiger Arbeitsinhalte weitere Möglichkeiten zur Verringerung des Produktionsaufwands.

### 3.2 Bisherige Ansätze zur Steigerung der Bestückerffizienz

Um Rationalisierungspotenziale bei der Bestückung zu erschließen, können unterschiedliche Ansatzpunkte verfolgt werden. Einerseits können die Entwicklung und Realisierung leistungsfähiger, automatisierter Bestückprozesse und -anlagen zur Produktivitätssteigerung und zur Qualitätsverbesserung beitragen, was sowohl unmittelbar als auch indirekt zu geringeren Stückkosten führen kann. Auf der anderen Seite besteht die

Möglichkeit, die Montageaufgabe durch eine montagegerechte Konstruktion von Läufer und Permanentmagnetkörpern einfacher und besser automatisierbar zu gestalten. Um in der Praxis eine rationelle Läuferbestückung zu erreichen, ist ein ganzheitliches Vorgehen notwendig, das sowohl montagegerechte Gestaltungsmerkmale als auch den Einsatz effizienter, automatisierter Bestückprozesse berücksichtigt. Im Folgenden werden die bisherigen Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Läuferbestückung beschrieben, wobei dies sowohl Maßnahmen zur montagegerechten Rotorkonstruktion als auch zur Vereinfachung und Automatisierung der Montage einschließt.

### 3.2.1 Ansätze zur montagegerechten Läufergestaltung

Eine Möglichkeit, den Aufwand für den Aufbau von Dauermagnetanordnungen auf der Läuferoberfläche gering zu halten, liegt in der Berücksichtigung von Montageaspekten bereits in der Konstruktionsphase. Obwohl im Rahmen der Produktentwicklung nur ein geringer Anteil der Gesamtkosten verursacht wird, beeinflusst die Produktgestaltung die Höhe der im Verlauf der Wertschöpfung entstehenden Kosten entscheidend [22]. Bezogen auf die Läuferbestückung ist dies sowohl durch die Vereinfachung von Fügeprozessen mittels konstruktiver Maßnahmen, wie bspw. Einführschrägen, als auch durch Modifikationen der Produktstruktur, bspw. durch Modularisierung oder Verringerung der Teilezahl, umsetzbar.

#### Vormontage von Polsegmenten aus unmagnetisierten Einzelmagneten

Der Einsatz vormontierter Magnetpole stellt eine Möglichkeit zur Verringerung des Endmontageaufwands dar. In [107] wird eine Methode beschrieben, bei der die Einzelmagnete im ersten Schritt auf ein ferromagnetisches Trägerelement aufgebracht werden. Die Fixierung der Magnetkörper auf dem produktspezifischen Trägerelement erfolgt dabei bevorzugt durch Kleben. Im zweiten Prozessschritt erfolgt die Magnetisierung des hartmagnetischen Materials durch ein starkes externes Magnetfeld. Den letzten Montageschritt stellt die Montage der jetzt magnetischen Baugruppe auf den eisenfertigen Läufer dar. Bild 21 zeigt alle Prozesse dieses Verfahrens im Überblick.

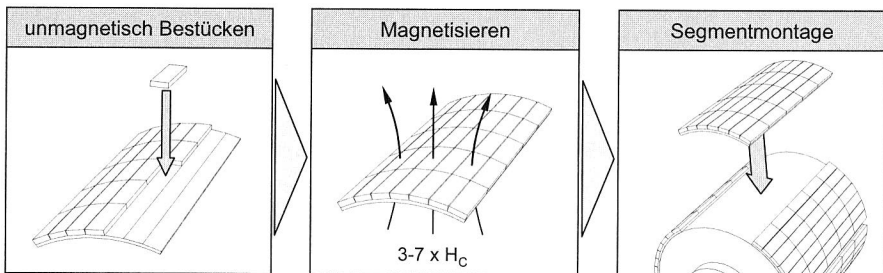


Bild 21: Prozesskette zur Herstellung von Dauermagnetanordnungen nach [107]

Hinsichtlich des Montageaufwands bietet diese Methode kaum Verbesserungen gegenüber der klassischen Direktmontage von Einzelmagneten auf den Läufer. So sind neben der eigentlichen Magnetbestückung, die in diesem Fall als separater Vormontageschritt

durchgeführt wird, die mit Magneten versehenen Trägerelemente in einem zusätzlichen Arbeitsgang auf den Läufer aufzubringen. Entscheidend ist dabei, dass die Polbaugruppe zu diesem Zeitpunkt bereits über ein entsprechendes Magnetfeld verfügt, so dass ihre magnetischen Eigenschaften mit denen eines großen, einen kompletten Pol bedeckenden Einzelmagneten vergleichbar sind. Dies hat zur Folge, dass bei der Annäherung der magnetischen Baugruppe an den weichmagnetischen Läufer gegenüber der Montage magnetisierter Einzelmagnete ein Vielfaches der Magnetkräfte wirkt. Um die hohen Anziehungskräfte sicher zu beherrschen, ist der Einsatz geeigneter Montagehilfen notwendig. Jedoch kann ein Großteil der Montagearbeiten bei dieser Methode mit unmagnetisierten Magneten durchgeführt werden, so dass letztlich eine Minderung des Handhabungs- und Montageaufwands realisiert werden kann. Da bei diesem Verfahren das externe Magnetfeld zum Aufmagnetisieren der Baugruppe gleichzeitig von der Ober- und Unterseite angelegt werden kann, vereinfacht sich auch die elektromagnetische Auslegung der Magnetisierköpfe deutlich. Dennoch fallen bei der Umsetzung dieses Konzepts ebenfalls beträchtliche Investitionskosten für die Magnetisieranlage an, so dass das Rationalisierungspotenzial vor allem in der Reduzierung des Bestückaufwands liegt.

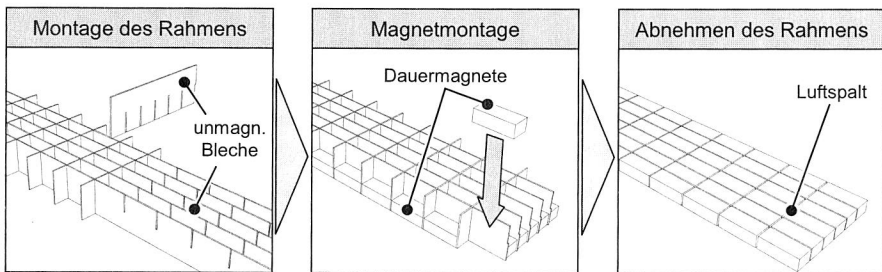
Eine diesem Verfahren sehr ähnliche Lösung zur Gestaltung und Montage der Läuferpole wird in [61] vorgeschlagen. Auch bei diesem Konzept werden die Einzelmagnete zu Magnetmodulen vormontiert und anschließend als fertige Baugruppen auf dem Läufer befestigt. Die Einzelmagnete sind dabei vorzugsweise fest in eine Matrix aus einem Vergusswerkstoff eingebettet. Durch entsprechende Gestaltung von Magnetmodul und Blechpaketkontur ist eine formschlüssige Fixierung der Magnetanordnungen auf dem eisenfertigen Läufer ohne die Verwendung von Klebstoffen möglich, z. B. mittels einer schwalbenschwanzartigen Verbindung. Die Aufnahme der Betriebslasten erfolgt durch eine zusätzliche Fliehkraftsicherung. Allerdings ergibt sich auch bei dieser Methode das mögliche Rationalisierungspotenzial primär aus der zusammengefassten Montage eines kompletten Pols innerhalb eines Arbeitsschritts. Unberücksichtigt bleibt dabei der Aufwand, der zur Vorfertigung der Magnetmodule zu bewältigen ist. So müssen die einzelnen Module nach wie vor entweder aufwändig aus magnetisierten Einzelmagneten zusammengesetzt oder mit einer teuren Magnetisieranlage aufmagnetisiert werden. Insgesamt ergeben sich dadurch Möglichkeiten zur Aufwands- bzw. Kostenreduktion, deren Höhe in etwa auf dem Niveau der vorherigen Lösung liegt.

#### **3.2.2 Vorrichtungen und Methoden zur sicheren Beherrschung der Prozesskräfte**

Die grundlegende Voraussetzung für die Gestaltung effizienter Bestücklösungen ist die zuverlässige Beherrschung der während der Montage auftretenden Prozesskräfte. Dies kann sowohl durch den Einsatz geeigneter Montagehilfsmittel und Vorrichtungen als auch durch eine Absenkung der Magnetkräfte mittels angepasster Montageverfahren erfolgen.

### Fügehilfen zur Vereinfachung der Magnetmontage

Zur Vereinfachung des Aufbaus einer aus vielen Einzelmagneten bestehenden flächigen Anordnung wird in [110] eine Montagevorrichtung vorgeschlagen, die die beim Fügen angeregter Dauermagnete auftretenden Querkräfte aufnimmt. Die Führung der Einzelmagnete an ihre Ablageposition wird dabei durch eine aus einem unmagnetischen Werkstoff angefertigte Rahmenstruktur sichergestellt, die relativ zu einem Trägerelement, wie bspw. dem Blechpaket, fixiert sein muss. Während der Stegabstand des Gitters dabei durch die Länge bzw. Breite der zu montierenden Magnetkörper vorgegeben ist, sollte die Stegbreite möglichst schmal sein. Mit Hilfe einer solchen schablonenförmigen Montagehilfe ist es möglich, die Bewegungsmöglichkeiten der Magnete auf den zur Durchführung der Fügeoperation notwendigen Freiheitsgrad zu reduzieren.



*Bild 22: Aufbau einer Gitterstruktur zur gesicherten Positionierung von Einzelmagneten bei der Montage flächiger Magnetanordnungen nach [110]*

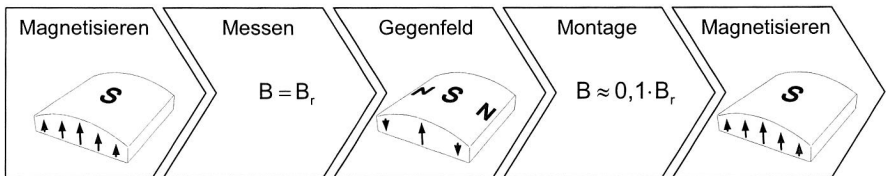
Indem die Höhe des Rahmens auf etwa das Zwei- bis Dreifache der Magnethöhe ausgelegt wird, kann das Einführen der Magnetkörper nahezu querkräftfrei erfolgen. Somit ist zur Ausführung des eigentlichen Montageprozesses nur noch eine bezogen auf die Ablagefläche senkrechte Kraft aufzubringen. Wie die Prinzipdarstellung in Bild 22 zeigt, können mit einer derartigen Schablone alle Magnete einer flächigen Magnetanordnung an ihre Ablageposition herangeführt werden, wobei durch die Querkräfte hervorgerufene Bewegungen durch die Gitterwände verhindert werden. Die Befestigung der Magnete erfolgt dabei durch einen Kleber, bis zu dessen Aushärtung der Rahmen auf dem Trägerelement der Magnetanordnung verbleiben muss.

Durch den Einsatz einer derartigen Montagevorrichtung ist eine erhebliche Vereinfachung des Bestückvorgangs möglich. So können mit dieser Methode durch die Verarbeitung bereits magnetisierter Magnete der Arbeitsaufwand reduziert und hohe Investitionskosten für eine Magnetisieranlage vermieden werden. Prinzipbedingt ist dabei eine spaltfreie Anordnung der Magnete auf dem Läufer jedoch nicht möglich, so dass sich dieses Verfahren nicht zur Produktion von Hochleistungsrotoren eignet. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass beim Aufsetzen des Magnets auf dem Blechpaket Klebstoff aus dem Klebspalt gequetscht wird, was zum ungewünschten Anhaften des Rahmens führen kann. Außerdem können mit derartigen Montagerahmen nur Magnete mit einer

ausreichenden Seitenwandhöhe verarbeitet werden, da ansonsten eine verkippsichere Führung nicht gewährleistet ist.

### Montage teilmagnetisierter Magnetkörper

Eine Methode zur Verringerung der während der Montage auftretenden magnetischen Wechselwirkungen wird in [60] beschrieben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die zu verarbeitenden Einzelmagnete vor dem Bestücken auf ihre magnetischen Eigenschaften überprüft und dafür magnetisiert werden müssen. Um die Magnetkräfte bei der anschließenden Montage möglichst gering zu halten, wird eine Entmagnetisierung der einzelnen Magnete in einem Gegenfeld auf 10 % oder weniger der ursprünglichen Remanenzflussdichte vorgeschlagen. Dadurch ergeben sich beim Aufbringen des Magnetmaterials deutlich niedrigere Prozesskräfte, was eine sehr einfache Bestückung ermöglicht. Zusätzlich kann, wie in Bild 23 dargestellt, insbesondere bei sich nach außen verjüngenden Magnetgeometrien, wie bspw. Brotlaiben oder Schalen, durch Anlegen eines Gegenfelds gezielt eine lokale Invertierung der ursprünglichen Feldorientierung in den dünnen Randbereichen erfolgen. Hierdurch ergibt sich innerhalb jedes einzelnen Körpers ein nahezu geschlossener Magnetkreis, so dass die magnetischen Wechselwirkungen mit angrenzenden Objekten stark reduziert werden. Da die Magnete während des kompletten Montagevorgangs einen Teil ihrer magnetischen Erregung beibehalten, sind laut [133] zum erneuten Aufmagnetisieren des fertigen Läufers nur vergleichsweise kleine Feldstärken notwendig.



*Bild 23: Vereinfachung der Läuferbestückung durch temporäre Verringerung der magnetischen Feldstärke vor und erneutes Aufmagnetisieren nach der Montage*

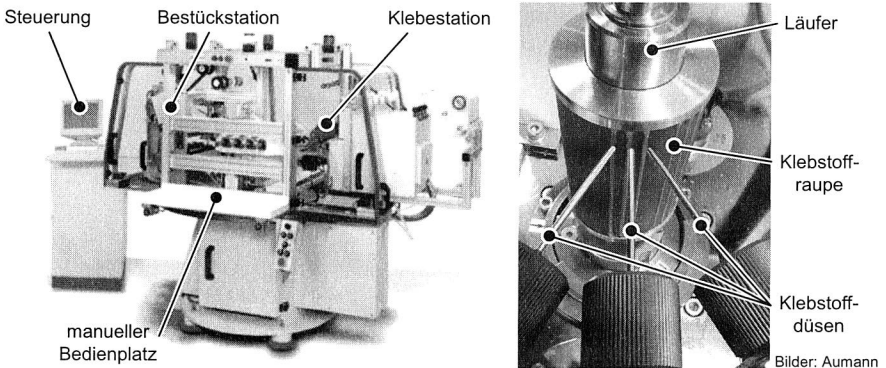
Auch wenn mit diesem Verfahren eine signifikante Vereinfachung des Bestückungsprozesses bei brotlaibförmigen Magnetkörpern möglich ist, erfordern die vielen Auf- und Entmagnetisierungsvorgänge einen hohen Anteil zusätzlicher Arbeitsschritte, die nicht zur Wertschöpfung beitragen. Um den Effekt der einfacheren Aufmagnetisierung nutzen zu können, muss darüber hinaus gewährleistet werden, dass alle Magnete eines Pols die richtige Feldorientierung aufweisen. Dies erfordert zusätzlich die Markierung der unterschiedlich polarisierten Einzelmagnete, da das Vermessen der magnetischen Eigenschaften unmittelbar vor der Montage aufgrund des nahezu geschlossenen Magnetkreises innerhalb der Magnete nur schwierig mit einer ausreichenden Prozesssicherheit durchzuführen ist. Zudem ist auch bei dieser Vorgehensweise der finanzielle Aufwand für die Beschaffung einer Magnetisierungsanlage zu berücksichtigen, der den Einsparungen durch die effizientere Bestückung entgegensteht.

### 3.2.3 Automatisierungskonzepte für die Läuferbestückung

Anlagen zur automatisierten Bestückung von Läufern mit Dauermagnetmaterial werden überwiegend kunden- und anwendungsspezifisch auf Basis von Standardkomponenten der Automatisierungstechnik realisiert. Wie die Ergebnisse der in Kapitel 2.4 vorgestellten Analyse zum Stand der Technik in der Magnetmontage verdeutlichen, benötigt die Industrie dabei vor allem Systeme zur automatisierten Verarbeitung unmagnetisierter Magnetkörper. Darüber hinaus wurden in der Vergangenheit auch Systemkomponenten und Prozesse für die automatische Handhabung und Bestückung angeregter Magnete entworfen. Auch wenn diese Lösungsansätze derzeit keine nennenswerte Rolle in der industriellen Läuferproduktion spielen, so sind sie für den weiteren Verlauf der Arbeit dennoch zu berücksichtigen.

#### Maschinenbauliche Sonderlösungen

Aktuelle Lösungen zur automatisierten Montage von Dauermagnetarrays zielen ausschließlich auf die Montage unmagnetisierter Magnetkörper ab. In der Regel werden dafür kundenspezifische Bestückanlagen eingesetzt, bei denen die Montage der Einzelmagnete abhängig von der geforderten Flexibilität mit NC-gesteuerten Achssystemen oder Industrierobotern erfolgt. Bild 24 zeigt exemplarisch einen hybriden Rundtakt-automaten, der mit Prozessen zur Bestückung unmagnetisierter Magnetkörper ausgestattet ist.



*Bild 24: CNC-gesteuerter und kameraüberwachter Klebstoffauftrag (rechts) in einem Rundtaktsystem zur automatisierten Läuferbestückung (links) [105]*

Um eine hohe Bestückleistung zu erzielen, werden meist mehrere und im Idealfall eine komplette Reihe Einzelmagnete pro Montagezyklus montiert. Zur Handhabung der Magnetkörper kommen Vakuumsauggreifer zum Einsatz. Die Vereinzelung und Bereitstellung der Magnetkörper geschieht bei diesen Konzepten vorrangig automatisiert durch Vibrationswendelförderer. Neben dem eigentlichen Bestückvorgang verfügen automatisierte Bestückssysteme darüber hinaus auch über Komponenten zum automati-

sierten Klebstoffauftrag, um die Magnete während des Montagevorgangs auf dem Grundkörper zu fixieren [105].

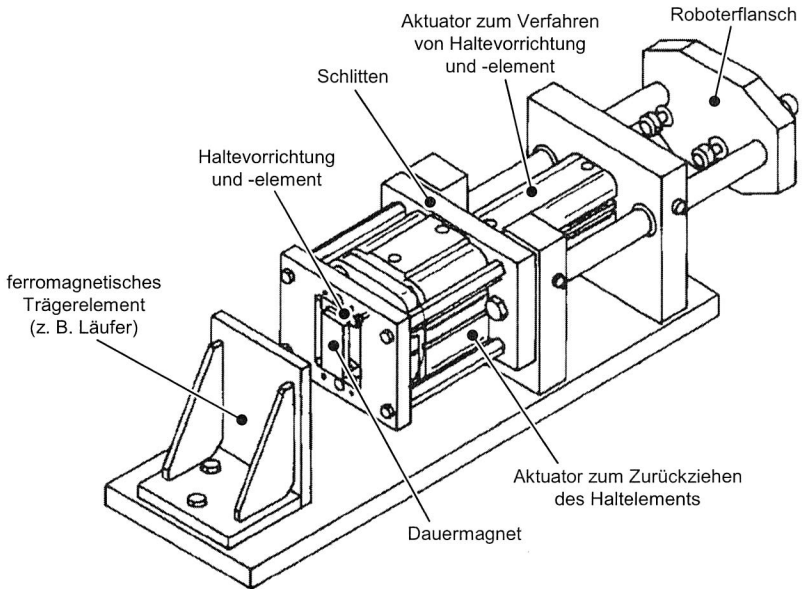
Aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrads lassen sich mit derartigen Systemen sehr hohe Bestückleistungen realisieren. Gleichzeitig kann durch eine integrierte Überwachung des Klebeprozesses eine hohe Prozesssicherheit und somit eine hohe Qualität des Montageergebnisses sichergestellt werden. Jedoch ist auch bei dieser Lösung eine nachträgliche Magnetisierung der Läufer notwendig. Da die Investitionskosten für die Magnetisieranlage binnen kurzer Zeit durch die Einsparungen, die sich aus der hocheffizienten Automatisierung des Bestückprozesses ergeben, egalisiert werden, eignen sich derartige Bestückssysteme in erster Linie zur wirtschaftlichen Serien- und Großserienproduktion permanent erregter Rotoren kleiner, automatisch gut handhabbarer Baugrößen.

#### **Montagevorrichtung zur Bestückung angeregter Dauermagnete**

In [47] werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Aufbringen eines vollständig magnetisierten Permanentmagnets auf einem weichmagnetischen Grundkörper vorgeschlagen. Wie in Bild 25 gezeigt, wird die benötigte Haltekraft dabei durch die magnetische Anziehung realisiert, die zwischen dem zu handhabenden Dauermagnet und dem beweglichen, ferromagnetischen Halteelement des Greifers vorherrscht. Die Fixierung des Magnets gegenüber Querkraften erfolgt formschlüssig über eine unmagnetische Haltevorrichtung. Das gesamte System ist so ausgelegt, dass die Haltekräfte während des Heranführens des Magnets an die Zielposition stets größer sind als die mit sinkendem Abstand überproportional zunehmenden Anziehungskräfte zwischen gehandhabtem Magnet und Läufer.

Auch wenn eine derartige Anordnung grundsätzlich eine automatisierte Handhabung und Montage einzelner Dauermagnetkörper ermöglicht, ist eine spaltfreie Anordnung mehrerer Einzelmagnete auf einem Pol damit nicht herstellbar. Der Grund hierfür liegt in der formschlüssigen Aufnahme von Querkraften. Prinzipiell ist eine Annäherung des Greifers an die Läuferoberfläche soweit möglich, bis die dem Läufer zugewandte Seite der Haltevorrichtung auf den vorher montierten Magnetkörpern aufliegt. Der Abstand zwischen Blechpaket und dem zu montierenden Magnet entspricht zu diesem Zeitpunkt exakt der Tiefe der Haltevorrichtung, so dass nach wie vor die Anziehungskraft an den Halter des Greifers überwiegt. Da die Magnetfelder der angrenzenden Magnete jedoch unmittelbar vor Erreichen der Ablageposition bereits sehr starke Querkräfte bewirken, würde der zu handhabende Magnet beim Verlassen der Haltevorrichtung, bspw. durch Ausfahren des Halteelements, verrutschen und das gewünschte Montageergebnis somit nicht erreicht werden. Darüber hinaus handelt es sich beim beschriebenen Konzept um eine aufwändige mechanische Lösung mit sehr vielen seriell gekoppelten, vorwiegend linearen Übertragungselementen, was einen hohen maschinenbaulichen Aufwand zur Realisierung einer steifen Konstruktion erfordert.





*Bild 25: Vorrichtung zur automatisierten Montage einzelner Permanentmagnete unter Ausnutzung des permanentmagnetischen Felds nach [47]*

### Sortierautomat für Dauermagnete

Untrennbar mit der Automatisierung der Magnetmontage verknüpft ist die automatische Zuführung der Magnetkörper. Während diese Teilaufgabe bei der Verarbeitung unmagnetischer Objekte sehr effizient durch Vibrations- oder Stufenförderer ausführbar ist, sind für die mechanisierte Vereinzelung und Bereitstellung angeregter Permanentmagnete keine Standardlösungen verfügbar. Wegen der wenigen Entwicklungen zur automatischen Montage magnetisierter Körper sind nahezu keine Methoden oder Automatisierungskonzepte dokumentiert, bei denen die spezifischen Eigenschaften von Permanentmagneten berücksichtigt werden.

Einzig der in [127] beschriebene Sortierautomat für Permanentmagnete mit hoher Energiedichte (vgl. Bild 26) verfügt über Funktionen, die zumindest teilweise zur technisierten Zuführung angeregter Magnete nutzbar sind. Mit dem vorgestellten System sollen eine automatische Prüfung der magnetischen Eigenschaften der einzelnen Magnete vorgenommen und solche mit einem zu schwachen Magnetfeld aussortiert werden. Zu diesem Zweck verfügt der Automat über einen Speicher, in dem die Magnete gestapelt bereitzustellen sind. Durch einen Vereinzelungsprozess wird jeweils ein Magnetkörper automatisch aus dem Stapel entnommen und in die Messstation eingelegt. Dort erfolgt mittels einer Hall-Sonde die Messung der Feldstärke des betreffenden Magnets. Erfüllt das magnetische Feld die in der Gerätesteuerung hinterlegten Kriterien, wird der Mag-

net in einem Speicher, der alle ausreichend starken Magnete enthält, abgelegt. Andernfalls erfolgt die Aussortierung des Magnetkörpers. Mit diesem Verfahren kann eine gleich bleibend hohe Qualität der fertigen Produkte gewährleistet werden, da keine zu schwachen Magnetkörper die Endmontage erreichen können.

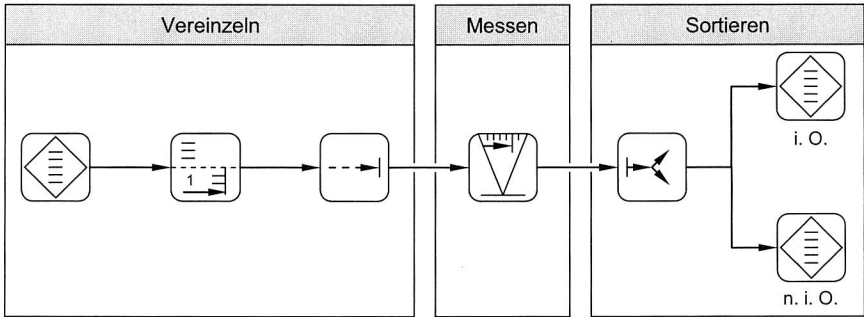


Bild 26: Prozesskette des in [127] beschriebenen Sortierautomaten für Permanentmagnete (Darstellung gemäß VDI-Richtlinie 2860)

### 3.3 Forschungsbedarf zur Rationalisierung der Magnetbestückung

Wenngleich auch die oben beschriebenen Methoden zur Vereinfachung der Magnetmontage beitragen können, so sind die damit bei der Läuferbestückung erreichbaren Einsparungen an Arbeits- und finanziellem Aufwand dennoch stark eingeschränkt. Insbesondere für die vielen kleinen und mittelständischen Hersteller permanent erregter Maschinen bedeuten hohe Investitionskosten in Bestückautomaten und Magnetisieranlagen ein beträchtliches finanzielles Risiko, dessen Vermeidung eine zeitraubende manuelle Montage magnetisierter Magnete erfordert. Bei der variantenreichen Fabrikation von Dauermagnetläufern in großen Unternehmen führen die teuren, variantenspezifischen Magnetisierköpfe in Summe ebenfalls zu erheblichen monetären Belastungen. Die geometrischen Beschränkungen, die sich aus dem nachträglichen Magnetisierungsprozess ergeben, sind zugleich limitierende Faktoren bzgl. der Flexibilität bei der Verarbeitung unmagnetisierter Magnete. Tabelle 2 verdeutlicht die konkurrierenden Zielsetzungen geringer Arbeits- und Investitionskosten bei gleichzeitig hoher Produktivität sowie weitere wesentliche Vor- und Nachteile der alternativen Montagekonzepte.

Ein ganzheitlicher Ansatz zur Erschließung von Rationalisierungspotenzialen bei der Magnetmontage muss daher gegenüber heutigen Lösungen sowohl eine Reduzierung der erforderlichen Investitionskosten als auch die Senkung des personellen Arbeitsaufwands umfassen. Gleichzeitig muss das hohe Flexibilitätsniveau aktueller Lösungen beibehalten werden. Aus Sicht der Investitionskosten ist die Verarbeitung magnetisierter Magnete zu bevorzugen, da dabei keine teuren Magnetisieranlagen benötigt werden. Eine Senkung der Arbeitskosten kann durch die Automatisierung des Montagevorgangs erfolgen. Dies führt zu der Hypothese, dass in der automatisierten Bestückung magneti-

sierter Dauermagnete noch erhebliche Potenziale zur Minderung des finanziellen und personellen Aufwands liegen. Die Chancen und Herausforderungen, die mit diesem Verfahren einhergehen, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Verfahrensalternative	unmagnetisiert		magnetisiert
	manuell	automatisch	manuell
<b>Wirtschaftlichkeit</b>			
Investitionskosten			
Arbeitskosten			
Bestückleistung			
<b>Flexibilität</b>			
Variantenflexibilität			
Mengenflexibilität			
Variantenbildung durch Feldorientierung			
<b>Prozess und Technologie</b>			
Fügekräfte			
Verschmutzungsgefahr			
Bruchgefahr			
Erreichbare Energiedichte			
Prozesssicherheit			

Legende: ● sehr vorteilhaft ... ○ sehr unvorteilhaft

**Tabelle 2:** Zusammenfassung wesentlicher Vor- und Nachteile alternativer Konzepte zur Bestückung von Läufern mit Dauermagneten

Chancen	Herausforderungen
- Verkürzung der Prozesskette	- Entwicklung von Greifertechnologien zur Beherrschung starker Magnetkräfte
- Senkung von Investitionskosten	- Senkung von Nebenzeiten durch verbesserte Prozessführung und Magnetgestaltung
- Reduzierung von Arbeitskosten	- Automatische Magnetvereinzelung und -bereitstellung
- Steigerung der Produktivität	- Vermeidung von Verschmutzung durch ferromagnetische Partikel
- Kontrolle der magnetischen Eigenschaften jedes einzelnen Magnetkörpers	
- Erhöhung der Prozesssicherheit	

**Tabelle 3:** Potenziale und Herausforderungen der automatischen Montage magnetisierter Dauermagnetkörper

Da für dieses Produktionskonzept bis heute keine technisch und wirtschaftlich ausgereiften Montagelösungen bekannt sind, wird basierend auf dieser Annahme im weiteren

Verlauf dieser Arbeit eine umfassende Lösung zur automatisierten Verarbeitung von Dauermagneten entwickelt. Da sich alle weiteren Ausführungen ausschließlich auf die Verarbeitung magnetisierter Magnetkörper beziehen, erfolgt ab diesem Punkt der Arbeit keine explizite Unterscheidung des Begriffs „Magnet“ bzgl. des Magnetisierungsgrads mehr.

## 4 Prozesse und Technologien zur automatisierten Verarbeitung von Dauermagneten

Die automatische Handhabung und Montage von Dauermagnetkörpern stellt aufgrund der starken magnetischen Wechselwirkungen hohe Anforderungen an die eingesetzten Montagesystem- und Anlagenkomponenten. Besonders die Kenntnis der Magnetkräfte sowie deren sichere Beherrschung während des Fügeprozesses sind elementare Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung dieses Montagekonzepts. Dies erfordert einerseits den Einsatz geeigneter Greiftechnologien, mit denen die auftretenden Magnetkräfte sicher aufgenommen werden können, und führt andererseits zu höheren Ansprüchen an die verwendeten Handhabungsgeräte und Montagevorrichtungen, da auch diese Systeme verglichen mit klassischen Bestückkonzepten deutlich höheren mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

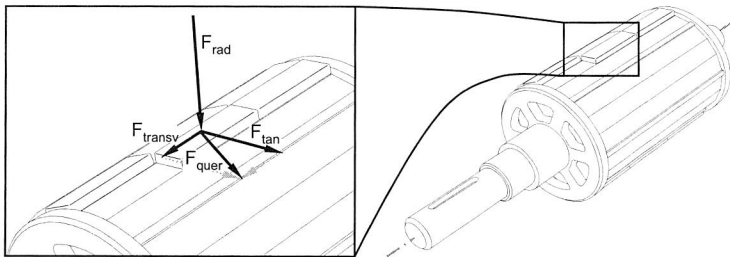


Bild 27: Wirkrichtung der magnetischen Radial-, Tangential- und Transversalkraftkomponenten  $F_{rad}$ ,  $F_{tan}$  und  $F_{transv}$  sowie der resultierenden Querkraft  $F_{quer}$

Die präzise Abschätzung der während des Montageprozesses zu erwartenden Magnetkräfte ist wichtig für die erfolgreiche Konzeption und Auslegung von Systemen und Anlagenkomponenten zur automatisierten Magnetbestückung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das Magnetfeld einer Anordnung aus vielen Einzelmagneten mit jedem hinzugefügten oder weggenommenen magnetischen Körper ändert. Grundsätzlich ist es zwar möglich, die Kräfte aller theoretisch darstellbaren Magnetanordnungen rechnerisch zu bestimmen. Aufgrund der großen Anzahl von Einzelmagneten ist die Menge potenzieller Montagezustände jedoch immens groß, so dass eine Eingrenzung möglicher Konstellationen auf einige wenige, für die Magnetmontage relevante Bestückreihenfolgen notwendig ist.

### 4.1 Analyse der beim Bestücken auftretenden Prozesskräfte

Betrag, Richtung und Orientierung der auf einen Magnet während des Fügens einwirkenden Gesamtkraft werden mit jeder infinitesimalen Veränderung der Magnetanordnung verändert. Dies hat zur Folge, dass bei der Durchführung der gleichen Fügebewegung bei unterschiedlichen Magnetkonfigurationen auf dem Läufer starke Schwankungen der resultierenden Anziehung- und Abstoßungskräfte auftreten können, die den

Montagevorgang deutlich erschweren. Dabei ist zwischen radial, tangential und parallel zur Läuferachse wirkenden Kraftkomponenten zu unterscheiden, deren Wirkrichtung in Bild 27 dargestellt ist. Zu den in diesem Zusammenhang im Folgenden dargestellten Kurven ist jedoch anzumerken, dass diese lediglich charakteristische Kraftverläufe zeigen. Abhängig von der geometrischen Gestaltung von Magneten und Fügezone sowie von den magnetischen Eigenschaften der im System enthaltenen Körper kann die Höhe der realen Kräfte bereits bei geringen Abweichungen von den dargestellten Modellen abweichen.

#### **4.1.1 Radialer Kraftverlauf**

Den größten Schwankungen unterliegen die radialen Kräfte, die parallel zur Richtung der Hauptfügebewegung wirken. Sie werden in erster Linie durch die magnetische Anziehung des zu montierenden Magnets an das Blechpaket des Läufers hervorgerufen. Gemäß Gleichung 2.13 ist der Verlauf der magnetischen Anziehungskraft proportional zum Quadrat der magnetischen Flussdichte  $B$  und zur Kontaktfläche  $A$ . Während die Kontaktfläche durch die Geometrie des Magnetkörpers fest vorgegeben ist, hängt die Flussdichte maßgeblich vom Verlauf der magnetischen Feldlinien zwischen dem zu montierenden Magnet und der Läuferoberfläche ab. Der Feldverlauf wird wiederum sowohl vom Luftspalt als auch von weiteren eventuell vorhandenen magnetischen Quellen beeinflusst. Eine präzise Aussage über die tatsächlich wirkende Kraft kann demnach nur bei exakter Kenntnis der magnetischen Feldlinien erfolgen. Auch wenn aufgrund dessen keine pauschalen Rückschlüsse auf die genaue Höhe der Prozesskräfte möglich sind, können dennoch qualitative Aussagen über die Komplexität des jeweiligen Montagefalls getroffen werden. Zur Veranschaulichung dieser Thematik wird das feldtheoretisch komplexe Problem der Läuferbestückung zunächst auf die Montage von Dauermagneten auf ein einfaches Trägerelement aus weichmagnetischem Material abstrahiert und anhand dreier exemplarischer Bestückfälle in Bild 28 erläutert. Dabei sind die Fälle  $F_{\text{rad } 2}$  und  $F_{\text{rad } 3}$  die Extremfälle der Kraftverläufe, die während der Läuferbestückung auftreten können.

Wie anhand des Falls  $F_{\text{rad } 1}$  in Bild 28 dargestellt, sind die Feldlinien bei der Annäherung eines einzelnen Magnets auf das Trägerelement zunächst aufgeweitet. Der magnetische Kreis wird in diesem Fall vorwiegend durch die Luft geschlossen, so dass die Feldenergie primär auf das magnetnahe Umfeld entfällt. Beim Herablassen des Magnets auf den Weicheisenblock nähern sich die Feldlinien einander an, bis sie unmittelbar vor dem Aufsetzen quasi parallel zueinander im Luftspalt ausgerichtet sind. Die magnetische Anziehungskraft nimmt dabei mit sinkendem Abstand zur Oberfläche des Weicheisens gemäß einer  $e$ -Funktion zu. Nach dem Aufsetzen des Magnets wird die Kontaktfläche von einer hohen Zahl von Feldlinien durchdrungen, was einer großen Flussdichte und somit einer starken Anziehungskraft entspricht.

Die mittlere Darstellung  $F_{\text{rad } 2}$  in Bild 28 zeigt dagegen den Feldverlauf, der bei der Bestückung eines Magnets zwischen zwei benachbarte, bereits vorher montierte Magnetkörper mit zum neuen Magneten gegensätzlicher Magnetisierungsrichtung auftritt. Wie

deutlich zu erkennen ist, liegt in diesem Fall bereits zu Beginn ein annähernd geschlossener Magnetkreis vor, bei dem die Feldlinien der Einzelmagnete teilweise verkettet sind. Beim Austritt aus der Unterseite der vorher bestückten Magnete in deren Kontaktfläche mit dem Eisenblock werden die Feldlinien erneut gekrümmt. Sie verlassen das Trägerelement im Bereich zwischen den beiden äußeren Magneten und schließen den magnetischen Kreis, indem sie nahezu parallel in die Unterseite des zu fügenden Magnets eintreten. Bei dieser Konstellation liegen bereits bei vergleichsweise großen Distanzen zum Ablagepunkt große Flussdichten vor, die mit zunehmender Annäherung deutlich schneller steigen als im ersten Fall. Der damit einhergehende Kraftanstieg wird lediglich bei einem Abstand von etwas weniger als der halben Magnethöhe zum Ablagepunkt verlangsamt, da an dieser Stelle die abstoßenden Kräfte, die durch die räumliche Annäherung zweier gleichartiger Pole erzeugt werden, am stärksten wirken. An der Endposition angekommen liegt ein auf der Unterseite durch das Trägerelement und auf der Oberseite durch die Luft geschlossener magnetischer Kreis vor. In Kombination mit den vorab montierten Einzelmagneten tritt somit eine deutlich höhere Flussdichte in der Kontaktfläche auf als im Fall  $F_{\text{rad 1}}$ , mit der entsprechend auch höhere Haftkräfte einhergehen.

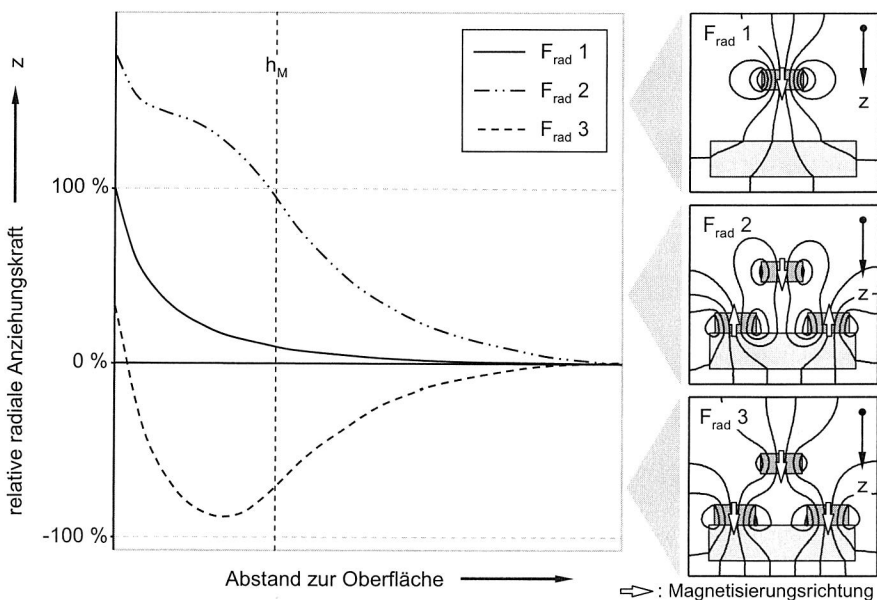


Bild 28: Prinzipielle Feldlinien- und Radialkraftverläufe beim Ablegen eines Permanentmagnets (dunkelgrau) auf ein ferromagnetisches Trägerelement (hellgrau) in unterschiedlichen Montagesituationen

Der Fall  $F_{\text{rad 3}}$  verdeutlicht den Kraftverlauf beim Fügen mehrerer Einzelmagnete mit einheitlicher Magnetisierungsrichtung. Im Gegensatz zu Fall  $F_{\text{rad 2}}$  werden dabei die auf

der Unterseite des zu fügenden Magnets austretenden magnetischen Feldlinien oberhalb des Montagepunkts von den zugehörigen Gegenpolen zunächst gekrümmt, so dass sie in die Oberseite der beiden äußeren montierten Magnetkörper eintreten. Im weiteren Verlauf des Fügeprozesses werden die Feldlinien zwischen den Magneten immer weiter gekrümmt und enger aneinander gedrängt. Da von einem System ohne elektrische Ströme ausgegangen wird, kann die dafür benötigte Energie nur durch die Verrichtung mechanischer Arbeit aufgebracht werden. Daraus resultieren zeitweise sehr starke magnetische Abstoßungskräfte, deren Maximum im Falle von quaderförmigen Magneten etwa beim 0,65-fachen der Magnetkörperhöhe  $h_M$  liegt. Allerdings bilden sich auch in diesem Szenario bis zum Erreichen des Ablagepunkts Anziehungskräfte zwischen dem zu fügenden Magnet und dem Weicheisenblock aus, die wegen des nach wie vor offenen Magnetkreises jedoch deutlich geringer ausfallen als in den Fällen  $F_{\text{rad 1}}$  und  $F_{\text{rad 2}}$ .

Bezogen auf die beim Bestücken permanent erregter Läufer radial zur Läuferachse wirkenden Kräfte bedeutet dies, dass die höchste Beanspruchung beim Ablegen benachbarter Magnete mit gegensätzlicher Feldorientierung vorliegt. In der Praxis ist dies stets dann der Fall, wenn nach abgeschlossener Bestückung eines Pols die ersten Magnete des Nachbarpols gesetzt werden oder wenn ein Pol lediglich aus einer einzigen Magnetreihe besteht, z. B. bei Verwendung von schalen- oder brotlaibförmigen Magnetkörpern. Eine weitere wichtige Erkenntnis ergibt sich aus Fall  $F_{\text{rad 3}}$ . Wie anhand des Kurvenverlaufs in Bild 28 zu erkennen ist, wird der mittlere Magnet trotz der zwischenzeitlich sehr hohen Abstoßungskraft beim Erreichen der endgültigen Ablageposition an das ferromagnetische Trägerelement angezogen. Eine weitergehende Betrachtung der sich hieraus ergebenden Potenziale erfolgt in Kapitel 7.1.

#### **4.1.2 Tangentialer Kraftverlauf**

Neben den radial zur Läuferachse gerichteten Anziehungs- und Abstoßungskräften kommt es in einigen Situationen auch zu Kraftwirkungen, die tangential zur Umfangsfläche des Blechpakets orientiert sind. Diese Effekte treten vor allem dann auf, wenn bzgl. einer Ebene, in der zum einen die Läuferachse und zum anderen die senkrechte Hauptachse des Magnetkörpers liegen, eine lokale Asymmetrie zwischen der Geometrie und den magnetischen Feldern bereits gesetzter Einzelmagnete auftritt. Als „lokal“ wird in diesem Zusammenhang das unmittelbare Umfeld eines Magnets bezeichnet, d. h. der Raum, den ein virtueller, direkt angrenzender Magnet gleichen Typs und gleicher Magnetisierungsrichtung einnimmt. Bei einer lokal symmetrischen Magnetanordnung heben sich die auf den zu montierenden Einzelmagnet wirkenden tangentialen Kräfte dagegen annähernd auf. Aufgrund des dritten Newtonschen Axioms<sup>6</sup> wirken die tangentialen Kräfte allerdings auch auf die benachbarten Magnetkörper, was deren Fixierung erfordert. Alle in Bild 28 dargestellten Montagefälle weisen die zur tangentialkraftfreien Montage erforderliche lokale Symmetrie des Magnetsystems auf.

---

<sup>6</sup> Wechselwirkungsprinzip (Aktion ist gleich Reaktion)



In asymmetrischen Systemen können Tangentialkräfte sowohl durch das Fügen zweier benachbarter Magnetkörper mit einheitlicher als auch mit unterschiedlicher Feldorientierung hervorgerufen werden. Wie Bild 29 zeigt, unterliegt der Kraftverlauf dabei in Abhängigkeit vom Abstand zur Läuferoberfläche sehr starken Schwankungen, wobei es in jedem Fall sowohl zu anziehenden als auch abstoßenden Krafteinwirkungen kommt.

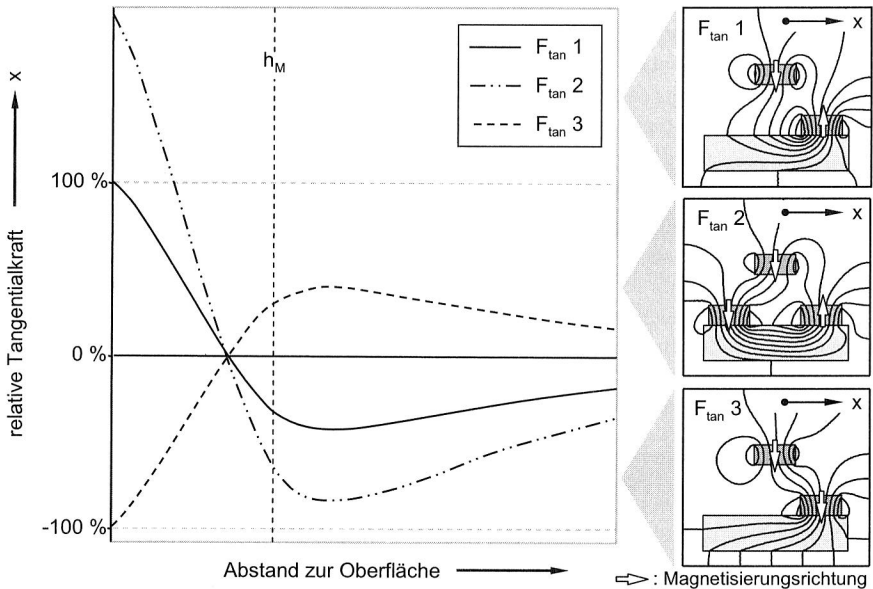


Bild 29: Charakteristische Verläufe von Tangentialkraft und Feldlinien bei lokaler Asymmetrie während des Fügens in unterschiedlichen Montagesituationen

Höhe und Verlauf der tangentialen Kraftkomponente hängen vor allem von der jeweiligen Montagesituation ab. Wie Bild 29 verdeutlicht, ist der Betrag der Tangentialkraft in den Fällen  $F_{\text{tan 1}}$  und  $F_{\text{tan 3}}$  nahezu gleich. Dies lässt die Folgerung zu, dass es für die absolute Tangentialkraft unerheblich ist, ob zwei Magnete mit gleicher oder gegensätzlicher Magnetisierung nebeneinander abgelegt werden. Der Feldlinienverlauf ähnelt in beiden Situationen grundsätzlich dem Fall  $F_{\text{rad 3}}$  aus Bild 28, da die Feldlinien hier ebenfalls während des Fügens stark verformt und aneinander gedrängt werden. Der maßgebliche Unterschied dieser beiden Fälle liegt in der Richtung, in der die tangentialen Kraft am Ablagepunkt auf den zu fügenden Magnet wirkt. In Fall  $F_{\text{tan 1}}$  liegen als Montageergebnis zwei Einzelmagnete nebeneinander, deren Magnetisierung jeweils umgekehrt zu der des anderen ist. Dies führt dazu, dass sich stets zwei ungleiche Magnetpole gegenüberstehen, so dass eine hohe Flussdichte erreicht wird, die wiederum zu starken tangentialen Anziehungskräften führt. Im Fall  $F_{\text{tan 3}}$  dagegen werden zwei Magnete mit gleichartiger Feldorientierung angeordnet. Während der zu fügende Magnet-

körper in diesem Fall zunächst in Richtung des bereits montierten gezogen wird, erfolgt am Ablagepunkt eine Abstoßung. Der Grund hierfür liegt in der Parallelität der Feldlinien beim Austritt aus den beiden Einzelmagneten, die zu einer stark abstoßenden Tangentialkraftkomponente führt.

Verstärkt wird die in Fall  $F_{\text{tan 1}}$  gezeigte Situation im Beispiel  $F_{\text{tan 2}}$ . Hierbei werden die Feldlinien durch einen bereits vorab montierten Magnet, dessen Feldorientierung mit der des zu fügenden übereinstimmt, an der Ablageposition zusätzlich in Richtung des ebenfalls bereits montierten Magnetkörpers mit entgegengesetzter Magnetisierungsrichtung gedrückt. Dadurch addieren sich die abstoßenden und anziehenden Kräfte, so dass in diesem Fall die höchsten Tangentialkräfte auftreten.

Bemerkenswert ist insgesamt die Tatsache, dass die tangentialen magnetischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte einen Gleichgewichtszustand einnehmen, wenn die Unterseite des zu fügenden Magnets einen Abstand vom 0,68-fachen von  $h_M$  zum Weicheisenblock hat. Diese Erkenntnis ist für die Planung der eigentlichen Fügebewegung besonders wichtig, da in dieser Höhe eine nahezu tangentialkraftfreie Annäherung des zu montierenden Magnets über die Zielposition möglich ist. Bei der Läuferbestückung können grundsätzlich alle drei der in Bild 29 beschriebenen Montagesituationen auftreten. Allerdings lassen sich ungünstige Zustände, wie bspw. der Fall  $F_{\text{tan 2}}$ , in den meisten Fällen durch eine geeignete Planung und Festlegung der Bestückreihenfolge vermeiden.

#### 4.1.3 Transversaler Kraftverlauf

Im Gegensatz zu den radialen und tangentialen Komponenten der Magnetkräfte treten Kräfte mit einer Wirkrichtung parallel zur Läuferachse ausschließlich innerhalb einer Magnetreihe auf. Diese Transversalkräfte werden durch die magnetische Abstoßung hervorgerufen, die zwischen zwei spaltfrei aneinander gereihten Einzelmagneten (vgl. Bild 30 links) mit einer einheitlichen, zur Berührungsfläche parallelen Feldorientierung wirkt. Der Verlauf der Transversalkraft entspricht dabei dem Fall  $F_{\text{tan 3}}$  aus Bild 29.

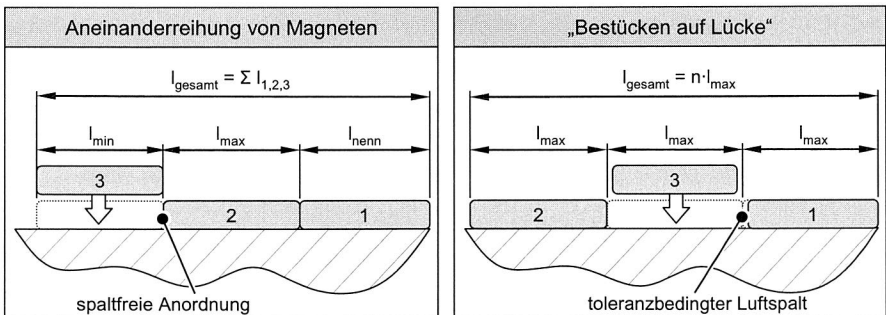


Bild 30: Alternative Prozessabläufe und -ergebnisse beim Aneinanderlegen von Einzelmagneten und beim „Bestücken auf Lücke“

Alternativ dazu ist es grundsätzlich auch denkbar, zunächst jeden zweiten Magnet einer Reihe zu bestücken, so dass bei der abschließenden Montage der Einzelmagnete in die entstandenen Lücken wiederum eine lokale Symmetrie und damit quasi Transversalkraftfreiheit herrscht. Wie in Bild 30 rechts dargestellt, kann bei der Methode „Bestückung auf Lücke“ eine absolut spaltfreie Anordnung der Einzelmagnete innerhalb einer Reihe nicht gewährleistet werden. Der Grund hierfür liegt in den fertigungsbedingten Presstoleranzen die dazu führen, dass die erforderliche Länge der Lücke jeweils dem maximal zulässigen Längenmaß  $l_{\max}$  der Einzelmagnete entsprechen müsste. Daraus resultieren bei kürzeren Magnetkörpern Luftspalte zwischen zwei benachbarten Magneten einer Reihe, was in einer Leistungsminderung der endgültigen Maschine resultiert. Darüber hinaus führt dieses Verfahren zu sehr hohen Ansprüchen hinsichtlich der Präzision, mit der die Fügeoperationen durchgeführt werden, um die Magnete angesichts der starken Kräfte kollisionsfrei in die Lücken einzusetzen.

## 4.2 Einfluss der Bestückreihenfolge auf die Magnetkräfte

Grundvoraussetzung für die Realisierung effizient automatisierter Bestücklösungen ist das Erreichen einer hohen Bestückleistung. Dies erfordert es, die Anlage derart auszuführen, dass viele Magnete binnen kurzer Zeit präzise auf einen Läufer aufgebracht werden können. Einen maßgeblichen Einflussfaktor stellt dabei die Höhe der während des Bestückprozesses auftretenden Magnetkräfte dar. Auch wenn diese größtenteils durch die hartmagnetischen Eigenschaften des Magnetwerkstoffs und die Dimensionierung der Magnetkörper bestimmt werden, können kritische Bestücksituationen durch Festlegung einer günstigen Montagereihenfolge vermieden werden. Die Alternativen zur Auswahl einer geeigneten Bestücksequenz werden stark von der spezifischen Läuferkonstruktion, d. h. von deren Polzahl, den Magnetreihen pro Pol sowie der Anzahl der Einzelmagnete pro Reihe bestimmt.

### 4.2.1 Zusammenhang von Prozesskräften und Zykluszeit

Die Zykluszeiten zur Bestückung eines einzelnen Magnets setzen sich aus der Handhabungszeit sowie der zur Aushärtung des Klebstoffs erforderlichen Haltezeit zusammen. Während die Ausführungsdauer der Fügebewegung maßgeblich durch die Beschleunigung und Geschwindigkeit des verwendeten Handhabungsgeräts sowie durch die räumliche Anordnung von Magnetbereitstellung und Ablageposition festgelegt wird, hängt der benötigte zeitliche Fixieraufwand beim Kleben primär von der Höhe der wirkenden Magnetkräfte und von der Aushärtegeschwindigkeit des Klebstoffs ab.

Die wichtigste Störgröße ist hierbei die aus tangentialen und transversalen Kraftkomponenten resultierende Querkraft

$$F_{\text{quer}} = \sqrt{F_{\text{tan}}^2 + F_{\text{transv}}^2} \quad (4.1)$$

die senkrecht zum Normalenvektor der zu bestückenden Oberfläche auf jeden Einzelmagnet einwirkt. Um einen Magnet unter diesen Voraussetzungen gegen Verrutschen zu sichern, ist eine ausreichend hohe Haftfestigkeit zwischen Magnet und Blechpaket

notwendig. Diese setzt sich sowohl aus der Scherfestigkeit des Klebstoffs als auch aus der Haftreibung zwischen Magnet und Weicheisen zusammen. Die Höhe der Reibkraft  $F_{\text{reib}}$  hängt dabei von der magnetischen Anziehungskraft des Einzelmagnets auf das Blechpaket  $F_{\text{rad}}$  und der in der Kontaktfläche Magnet-Läufer vorherrschenden Reibzahl  $\mu_{\text{reib}}$  ab.

$$F_{\text{reib}} = F_{\text{rad}} \cdot \mu_{\text{reib}} \quad (4.2)$$

Da die radiale Anziehungskraft unmittelbar ab dem Ablagezeitpunkt wirkt, steht die Reibkraft sofort zur Aufnahme von Querkräften zur Verfügung. Im Gegensatz dazu hängt die Haftkraft von Klebstoffen von der Scherfestigkeit  $\tau_B$  in der Kontaktfläche  $A_{\text{Kontakt}}$  ab. Da  $\tau_B$  im Verlauf der Aushärtezeit zunimmt, lässt sich die zum Zeitpunkt  $t$  verfügbare Klebkraft  $F_{\text{kleb}}$  als Funktion über die Zeit darstellen, wobei der exakte Verlauf der Aushärtung wesentlich vom gewählten Klebstoffsystem abhängt.

$$F_{\text{kleb}}(t) = \tau_B(t) \cdot A_{\text{Kontakt}} \quad (4.3)$$

Um einen Magnet unter diesen Voraussetzungen gegen Verrutschen zu sichern, muss demnach die Bedingung

$$F_{\text{reib}} + F_{\text{kleb}}(t) \geq F_{\text{quer}} \quad (4.4)$$

erfüllt sein. Für den Fall, dass die verfügbare Reibkraft bereits größer ist als die angreifenden Querkräfte, ist nach dem Ablegen des Einzelmagnets keine weitere Fixierung mehr notwendig, da der Magnet durch die magnetischen Anziehungskräfte gegen unbeabsichtigte Bewegungen geschützt wird. Übersteigt die Querkraft die Reibkraft, muss der Magnet so lange gegen Verrutschen gesichert werden, bis der Klebstoff eine ausreichende Scherfestigkeit ausgebildet hat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz von Klebstoffen aufgrund ihrer Viskosität zu einer starken Herabsetzung des Reibwerts führt. Zudem bilden vor allem Kleber mit einer hohen Viskosität einen Luftspalt zwischen der Magnetunterseite und dem Blechpaket aus, wodurch die reibkraftbestimmende Normalkraft abnimmt. Deshalb sind für das Verkleben von Läufermagneten dünnflüssige Klebstoffe zu bevorzugen, die nur sehr dünne Klebspalte erfordern und einen punktuellen Kontakt zwischen Magnet und Blechpaket ermöglichen.

Da der Halteaufwand die erreichbare Zykluszeit maßgeblich beeinflusst, sind die Verwendung schnell aushärtender Klebstoffsysteme und das Erreichen niedriger Querkräfte grundlegende Voraussetzungen für die Realisierung leistungsfähiger Bestücklösungen. Der in Bild 31 dargestellte Zusammenhang macht deutlich, dass eine Verdopplung der Querkraft ( $F_{\text{quer}2}$  zu  $F_{\text{quer}3}$ ) zu einer Vervielfachung der Haltzeit führt. Im Gegensatz dazu können die angreifenden Querkräfte im Fall  $F_{\text{quer}1}$  komplett durch die Reibkraft aufgenommen werden, so dass unmittelbar nach dem Ablegen des Magnets mit dem nächsten Magnetkörper fortgefahren werden kann. Eine eingehende Untersuchung des Einflusses der Magnetkörpergestaltung auf das Verhältnis von Quer- zu Haftkräften und damit auf die gesamte Zykluszeit erfolgt in Kapitel 7.1.

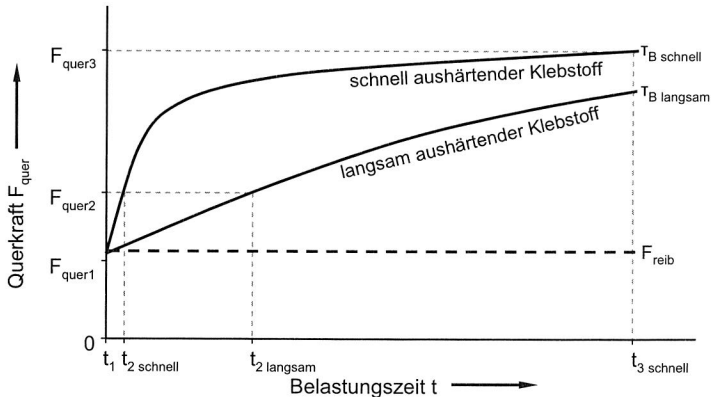


Bild 31: Abhängigkeit der Haltezeit vom Aushärteverhalten des Klebstoffs und den am Ablageort vorherrschenden Magnetkräften

Um eine sichere Montage aller Magnete eines Pols zu gewährleisten, muss die Betrachtung neben dem aktuell zu montierenden Einzelmagnet auch dessen benachbarte Magnete umfassen. Durch das Hinzufügen eines neuen Magnets in die unmittelbare Nähe bereits vorher abgelegter Magnetkörper kann es zu einer spürbaren Erhöhung der auf diese wirkenden Querkraften kommen. Daraus resultiert die Anforderung, dass die Aushärtung des Klebstoffs zu diesem Zeitpunkt bereits so weit fortgeschritten sein muss, dass die Klebverbindung die zuvor montierten Magnete auch gegenüber den gestiegenen Kräften sicher an ihren Positionen hält.

#### 4.2.2 Gegenüberstellung unterschiedlicher Bestückfälle

Die Bestückung von Polen mit je einer einzelnen Magnetreihe ist eine in der Praxis häufig anzutreffende Montageaufgabe. Insbesondere bei kompakteren permanent erregten Maschinen, wie bspw. Servomotoren für die Automatisierungstechnik mit Achshöhen<sup>7</sup> bis ca. 100 mm, werden oftmals schalen- oder brotlaibförmige Magnete eingesetzt, die aufgrund ihrer Geometrie einen kompletten Pol mit einer einzigen Reihe bedecken. Im Gegensatz dazu erfolgt beim Einsatz von Magnetquadern der Aufbau der Einzelpole in der Regel aus mehreren Magnetreihen.

##### Einreihige Polbedeckung

Wie Bild 32 zeigt, können bei einreihigen Polanordnungen bzgl. der radialen Kraftkomponenten abhängig von der Bestückreihenfolge nur zwei unterschiedliche Fälle auftreten. Werden zunächst alle gleichartigen Pole des Läufers mit Magnetkörpern bestückt, tritt bei der Montage der entgegengesetzt magnetisierten die Montagesituation  $F_{rad\ 2}$

<sup>7</sup> Die Achshöhe beschreibt die Höhe der Läuferachse einer elektrischen Maschine über der Aufstellenebene; Sie ist ein Richtmaß für die Baugröße von Motoren und Generatoren

aus Bild 28 ein. Dabei treten sehr starke radiale Anziehungskräfte auf. Dafür kommt es in diesem Fall aufgrund der lokalen Symmetrie des Magnetsystems nicht zu Tangentialkräften (Bild 32 oben). Die resultierende Prozesskraft setzt sich dementsprechend aus der radialen Anziehung sowie der transversalen Abstoßung (nur bei Verwendung mehrerer Magnete in einer Reihe) zusammen.

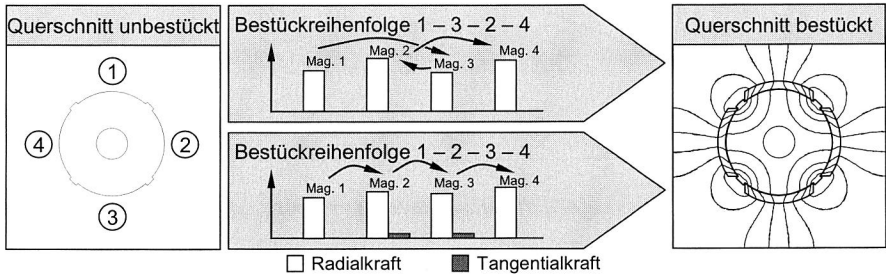


Bild 32: Alternative Reihenfolgen für die Bestückung einreihiger Läuferpole mit Schalenmagneten und Relation der jeweils resultierenden Prozesskräfte

Alternativ dazu kann die Bestückung von Magnetreihen, die einen kompletten Läuferpol bedecken, auch Pol für Pol erfolgen (Bild 32 unten). Neben radialen Anziehungskräften treten dabei auch Tangentialkräfte auf. Dennoch führt dies insgesamt zu einer niedrigeren resultierenden Prozesskraft als bei der zuvor beschriebenen Bestücksequenz. Eine Ausnahme stellt dabei lediglich die Bestückung der ersten und der letzten Magnetreihe dar, da hier ebenfalls ein symmetrisches Magnetsystem vorliegt und sich sonst keine Unterschiede zum oben beschriebenen Ablauf ergeben.

### Mehrreihige Polbedeckung – ungerade Reihenanzahl

Während beim Einsatz schalen- oder brotlaibförmiger Magnetkörper die komplette Polbreite von einer Magnetreihe bedeckt wird, bestehen mit Magnetquaden bestückte Pole in der Regel aus mehreren Magnetreihen. Dementsprechend ergeben sich daraus deutlich mehr Freiheitsgrade für die Gestaltung der Bestückreihenfolge, wobei sich die resultierenden Alternativen vor allem hinsichtlich ihrer Montageeignung sowie den auftretenden Prozesskräften unterscheiden.

Bei der Bestückung mehrreihiger Pole ist es vorteilhaft, mit den außen liegenden Magnetreihen zu beginnen. Dies gilt auch für den Fall, dass der angrenzende Pol bereits mit entgegengesetzt magnetisierten Einzelmagneten versehen ist. Dabei kommt es beim Aufsetzen des zu bestückenden Magnetkörpers zu einem starken magnetischen Fluss, der von den Magneten des Nachbarpols durch das Blechpaket in die Kontaktfläche des gehandhabten Dauermagnets gerichtet ist. Dies führt zu einer erhöhten radialen Anziehungskraft auf den zu montierenden Magnet, ähnlich Bild 28, Fall  $F_{\text{rad}} 2$ . Diesem Nachteil steht jedoch ein wesentlich günstigerer Tangentialkraftverlauf gegenüber, der im ungünstigsten Fall, wenn der Nachbarpol bereits besetzt ist, bei lokaler Betrachtung

dem in Bild 29 dargestellten Fall  $F_{\text{tan}} 1$  entspricht. Erfolgt dagegen zuerst die Bestückung der zweiten Reihe, so tritt bei der Montage des zweiten Randmagnets der Fall  $F_{\text{tan}} 2$  ein, bei dem die Tangentialkraft beim Fügen der Randmagnete durch die zusätzliche magnetische Abstoßung nochmals erhöht wird.

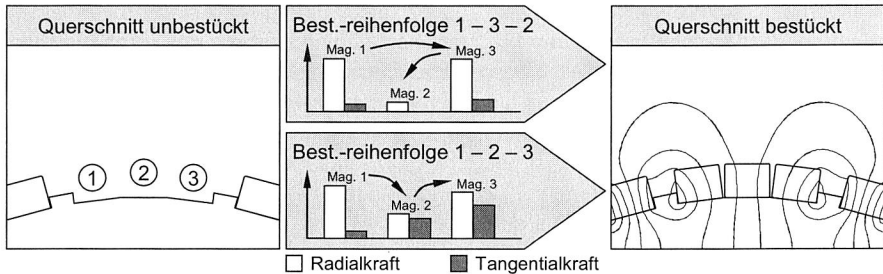


Bild 33: Einfluss der Bestückungsreihenfolge auf die radialen und tangentialen Prozesskräfte am Beispiel eines Pols mit drei Magnetreihen

Im weiteren Montageverlauf können bei Polen, auf denen eine ungerade Anzahl von Magnetreihen anzuordnen ist, bei den kritischen Montageschritten ebenfalls Symmetrieeffekte genutzt und die maximalen Prozesskräfte, insbesondere deren tangentialen Komponenten, deutlich gesenkt werden (Bild 33). Nach der Bestückung der beiden am Polrand angeordneten Magnetreihen liegt so stets eine symmetrische Anordnung bzgl. der Winkelhalbierenden des Polwinkels vor. Um im fortschreitenden Bestückverlauf weiterhin lokale Symmetrien nutzen und tangentialen Prozesskräfte klein halten zu können, sind anschließend zunächst alle ungeraden Reihen eines Pols zu bestücken, so dass zwischen den einzelnen Magnetreihen zunächst ein Abstand verbleibt. Dies führt zu einem magnetkörperbreiten Luftspalt zwischen den Fügezonen, in dem die Stärke des Magnetfelds und somit auch die der tangentialen Kraftkomponente exponentiell abfällt. Dadurch können bei allen Magneten ungerader Reihen Prozessbedingungen erzielt werden, die annähernd der in Bild 28 am Beispiel  $F_{\text{rad}} 1$  erläuterten Situation entsprechen.

Für die anschließende Montage der Magnetreihen mit geradem Index ergeben sich sehr niedrige Tangentialkräfte, da sich die von den vorab montierten Reihen hervorgerufenen tangentialen Abstoßungskräfte größtenteils gegenseitig aufheben. Der charakteristische Verlauf der radialen Anziehungskraft entspricht dabei dem in Bild 28 dargestellten Fall  $F_{\text{rad}} 3$ , bei dem nur geringe Anzugskräfte auftreten. Allerdings ist dabei sicherzustellen, dass die Reaktionskräfte nicht zum Verrutschen der bereits abgelegten Magnete führen. Dies kann sowohl durch Stoffschluss, z. B. beim Verkleben der Einzelmagnete, als auch formschlüssig, z. B. durch Anlegen der Randmagnete an die Poltrennung oder an benachbarte und bereits festgeklebte Magnetkörper, erfolgen.

### Mehrreihige Polbedeckung – gerade Reihenanzahl

Im Gegensatz dazu lassen sich bei Polen, die aus einer geraden Anzahl von Magnetreihen bestehen, die Symmetrievorteile nur eingeschränkt nutzen. Auch in diesem Fall sollte mit der Bestückung der Randreihen begonnen werden, um ungünstige Prozesskraftverhältnisse, wie sie in Bild 29 als  $F_{\text{tan 2}}$  beispielhaft dargestellt sind, zu vermeiden. Auch bei der Montage der inneren Magnetreihen ist eine Nutzung der vorab beschriebenen Symmetrieeffekte soweit möglich anzustreben, was bei einer geraden Anzahl von Polen konstruktionsbedingt nur bis zur vorvorletzten Reihe möglich ist. Wie in Bild 34 verdeutlicht wird, liegen die beiden zuletzt zu bestückenden Magnetreihen in jedem Fall nebeneinander, so dass lokal betrachtet die Montagesituation  $F_{\text{tan 3}}$  aus Bild 29 vorliegt. Da die dabei auf den zu bestückenden Magnet wirkende Tangentialkraft in diesem Fall nicht durch Formschluss aufgenommen werden kann, ist dieser so lange zu fixieren, bis der verwendete Klebstoff ausreichend große Haftkräfte zur Aufnahme der magnetischen Tangential- und Transversalkräfte ausgebildet hat.

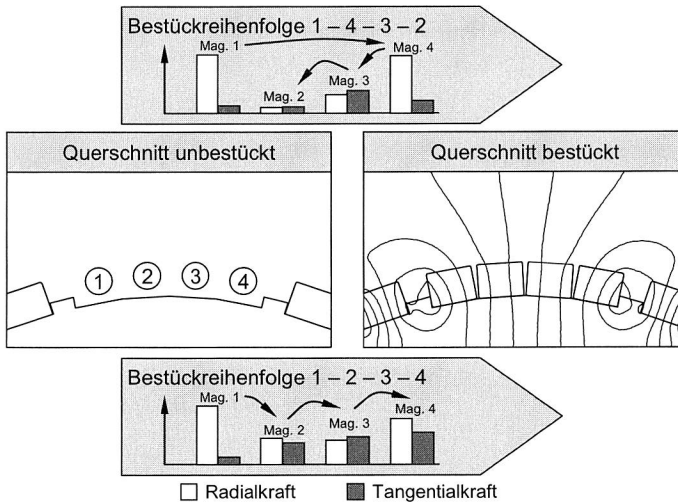


Bild 34: Unterschiedliche Polgeometrien und Magnetanordnungen bei gerader Anzahl von Magnetreihen pro Pol und mögliche Bestückungsreihenfolgen

Da Haltetätigkeiten nicht zur Wertschöpfung am Läufer beitragen, kann bei der Bestückung von Polen mit einer geraden Anzahl von Magnetreihen nur eine vergleichsweise geringe Montageeffizienz erreicht werden. Aus diesem Grund sind bei der konstruktiven Gestaltung des Läufers Magnetlayouts mit einer ungeraden Anzahl von Reihen je Pol zu bevorzugen (vgl. Kapitel 7.2).



### 4.2.3 Planung des Bestückprozesses

Der richtigen Reihenfolge beim Ablegen der Einzelmagnete auf den Läufer kommt aufgrund der signifikanten Abhängigkeit der Kraftverläufe von der jeweiligen Montagesituation große Bedeutung zu. Durch die Wahl einer geeigneten Montagesequenz ist es möglich, die Höhe der auftretenden Prozesskräfte und damit die Haltezeiten zu begrenzen, was besonders zur Realisierung kurzer Taktzeiten wichtig ist. Durch Beachtung einiger weniger Kriterien kann dies bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden, so dass die Möglichkeit zur effizienteren Auslegung des Montageprozesses ohne wesentlichen Mehraufwand besteht. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 4.2.1 ist dafür vor allem die Senkung der tangentialen und transversalen Kraftkomponenten anzustreben. Insgesamt lassen sich daher für die Planung der Bestückreihenfolge folgende maßgeblichen Kriterien zusammenfassen:

- Nutzung lokaler Symmetriezustände
- Nutzung von Formelementen (z. B. Poltrennungen, bereits befestigte Magnete) zur Aufnahme von Querkraften
- Reihen in axialer Richtung lückenlos von einem Polrand aus über die komplette Länge bestücken
- Bei mehreren Reihen pro Pol zunächst die Reihen an den Poltrennungen bestücken
- Bestückreihenfolge derart festlegen, dass eine vollständige Aushärtung des Klebstoffs möglich ist, bevor der nächste angrenzende Magnet gesetzt wird
- Beim Ablegen einer Magnetreihe zwischen zwei vorher montierte Reihen die Unterseite des abzulegenden Magnets zunächst bis auf eine Höhe von zwei Drittel der Magnethöhe an das Blechpaket heranfahren, dann zwischen die Reihen einfahren (Vermeidung unnötiger Querkraften)
- Nord- und Südpole gleichermaßen abwechselnd bestücken, um Sättigungseffekten im Blechpaket und damit verminderten Haftkräften vorzubeugen

### 4.3 Ermittlung der magnetkörperinduzierten Prozesskräfte

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist eine präzise analytische Bestimmung magnetischer Kräfte nur für stark vereinfachte Magnetsysteme, bei denen der Feldlinienverlauf bekannt ist, hinreichend genau. Sollen dagegen die Wechselwirkungen in komplexeren Magnetsystemen, wie sie bspw. an den Polen noch nicht in den Stator eingebauter Läufer vorliegen, bestimmt werden, ist eine experimentelle Bestimmung der Kräfte oder deren Berechnung mit Hilfe von FEM-Analysen notwendig.

Grundlage aller Verfahren zur Ermittlung der zu erwartenden Magnetkräfte ist die Kenntnis der Magnetanordnung, bei der auch bei einer günstigen Bestückreihenfolge die größten Kräfte auf den zu fügenden Magneten wirken. Gemäß Kapitel 4.2 ist dies

dann der Fall, wenn mit der Bestückung eines neuen Pols, dessen benachbarte Polflächen bereits ganz oder zum Teil mit Magneten versehen sind, begonnen wird.

#### 4.3.1 Experimentelle Bestimmung der Prozesskräfte

Um die während des Fügeprozesses wirkenden Kräfte messtechnisch zu erfassen, muss die verwendete Messvorrichtung die simultane Aufnahme von radialen, tangentialen und transversalen Kräften gestatten. Hierfür besonders geeignet sind Drei-Komponenten-Kraftaufnehmer auf Basis von Piezosensoren, mit denen Kraftverläufe in allen drei Raumrichtungen zeitgleich mit einer Sensoreinheit erfasst werden können. Eine hohe Verwindungssteifigkeit der Messvorrichtung ist dabei wichtig für die Aussagekraft der aufgenommenen Messwerte. Diese Voraussetzung wird von einzelnen Kraftaufnehmern nicht erfüllt, da die experimentelle Bestimmung von Kräften in der Regel auf der Erfassung elastischer Verformungen beruht, die wiederum bei bekannter mechanischer Steifigkeit des Messwertaufnehmers Rückschlüsse auf die damit korrespondierenden Kräfte gestatten. Um magnetische Wechselwirkungen zwischen Sensor und Versuchsmagnet auszuschließen, muss zwischen diesen beiden Komponenten zudem ein ausreichender Abstand vorgesehen werden. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass der Abstand mindestens der fünffachen Magnethöhe entsprechen sollte. Allerdings können vor allem die bezogen auf den Läufer tangentialen und transversalen Kraftkomponenten während der Messung zu hohen Biegemomenten führen, die eine zu starke Verformung des Kraftaufnehmers und damit eine Verfälschung des Messergebnisses zur Folge haben können. Um dennoch eine genaue Ermittlung der Magnetkräfte sicherzustellen, ist der Einsatz einer Messplattform, die an insgesamt vier Drei-Komponenten-Kraftaufnehmern befestigt ist, sinnvoll [84]. Durch die in Bild 35 dargestellte Anordnung können Verformungen der Sensoren aufgrund von Biegemomenten ausgeschlossen und die Gesamtsteifigkeit des Messaufbaus gesteigert werden, so dass eine präzise Bestimmung aller während des Fügeprozesses auftretenden Kraftkomponenten möglich ist.

Da alle drei Prozesskraftkomponenten ihren größten Wert beim Aufsetzen des Magnets auf dem Läufer an der Zielposition erreichen, muss die Messung exakt an diesem Punkt erfolgen. Hierfür wird der am Probenhalter befestigte Magnet zunächst an seinem Ablagepunkt auf dem Läufer positioniert und anschließend ein Nullabgleich der Kraftaufnehmer durchgeführt. Nach Beginn der Messung wird der Magnet zunächst so lange mit einer von der Läuferachse weg gerichteten Radialkraft beaufschlagt, bis er von der Oberfläche minimal angehoben wird. Der dabei gemessene Höchstwert entspricht der maximalen radialen Haft- bzw. Prozesskraft. Um bei der anschließenden Messung der Querkräfte Messfehler aufgrund der Reibung zwischen Magnet und Blechpaket auszuschließen, wird der Magnet vor der Querkraftmessung gerade soweit angehoben, dass er frei über der Läuferoberfläche schwebt. Anschließend wird der Probenhalter mit dem Magnet parallel zur Auflagefläche vom Ablagepunkt weg bewegt und die dabei auftretenden Höchstwerte der Tangential- und Transversalkräfte dokumentiert.

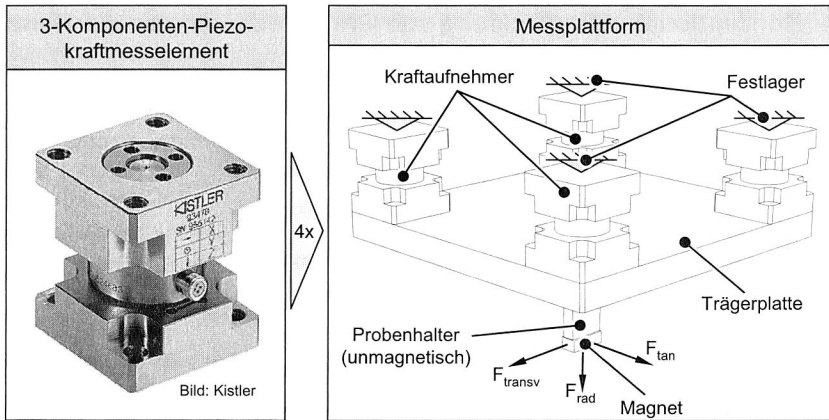


Bild 35: Aufbau verwindungssteifer Messplattformen zur präzisen Messung von Prozesskräften unter Ausschluss von Biegemomenten

Die Durchführung der Messungen erfolgt vorzugsweise an einem Prototyp des zu bestückenden Rotors. Sollte dies, bspw. wegen großer Läuferabmessungen, nicht möglich sein, sind entsprechende Probenkörper herzustellen, die vergleichbare magnetische Eigenschaften aufweisen wie das Originalbauteil. Dies gilt insbesondere für das verwendete Grundkörpermaterial, dessen Blechung sowie die Pol- und Magnetgeometrie.

#### 4.3.2 Kraftermittlung mittels FEM-Berechnung

Der Einsatz rechnergestützter numerischer 2D- und 3D-Berechnungsmethoden zur elektromagnetischen Auslegung zählt heute zum Stand der Technik bei der Konstruktion elektrischer Maschinen. Neben der Bestimmung magnetischer Feldverläufe ist mit Hilfe moderner FEM-Softwarepakete auch eine schnelle und aufwandsarme Berechnung von Magnetkräften möglich. Im Gegensatz zur experimentellen Prozesskraftermittlung kann bei dieser Methode auf den Einsatz kostenintensiver Sensorik und aufwändige Versuchsaufbauten verzichtet werden.

Zur Bestimmung der bei der Montage von Dauermagneten auftretenden radialen, tangentialen und transversalen Kraftkomponenten ist der Einsatz eines 3D-Berechnungstools notwendig. Da die Berechnung dreidimensionaler Probleme deutlich rechenintensiver ist als bei ebenen Modellen, ist eine Vereinfachung des Simulationsmodells anzustreben. So ist es zur Abschätzung der Prozesskräfte ausreichend, wenn lediglich das nähere Umfeld, also der zu bestückende Pol sowie der oder die benachbarten Polflächen und Magnetanordnungen berücksichtigt werden. Da die Qualität des Berechnungsergebnisses maßgeblich von den vorgenommenen Vereinfachungen abhängt, sollten Modellerstellung, Versuchsdurchführung und -auswertung durch einen Berechnungsexperten erfolgen.

## **4.4 Konzeption und Entwicklung von Greifertechnologien zur Handhabung angeregter Dauermagnete**

Die Kenntnis der zu erwartenden Prozesskräfte stellt die Grundlage für die weitere Planung des Fügeprozesses dar. Ein weiteres elementares Problem, das im Zuge der Automatisierung der vorliegenden Montageaufgabe zu lösen ist, ist die sichere Beherrschung dieser Kräfte während der Bauteilhandhabung. Der Auswahl eines geeigneten Greifprinzips kommt dabei große Bedeutung zu, da es sowohl die Anforderungen an die Haltekräfte als auch an die Zugänglichkeit der Ablageposition erfüllen muss.

### **4.4.1 Analyse und Bewertung aktueller Greifertechnologien**

Wegen ihren Auswirkungen auf den Montageprozess führen die extrem hohen volumenbezogenen Magnetkräfte auch zu neuen Anforderungen an die eingesetzten Greifer. Während bei der Handhabung unmagnetischer Werkstücke die benötigte Greifkraft primär durch das Eigengewicht sowie die Trägheit von Objekten beim Beschleunigen und Abbremsen bestimmt wird, stehen bei der Auswahl von Greifern zur Handhabung von Dauermagneten vor allem die starken Magnetkräfte im Vordergrund. Darüber hinaus muss zur Realisierung einer spaltfreien Magnetanordnung die Zugänglichkeit auch beim Fügen von Magneten zwischen zwei vorher montierten Reihen gewährleistet sein, was das Einbringen der Greifkraft über die Oberfläche des Magnetkörpers erfordert.

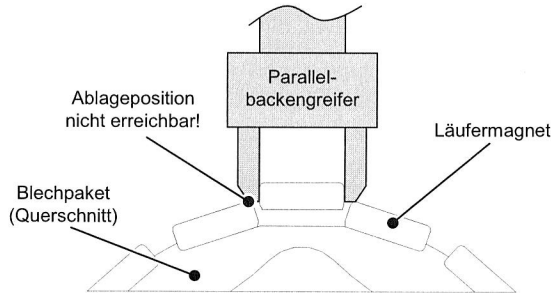
Konventionelle Greifer lassen sich gemäß [41] hinsichtlich ihres physikalischen Wirkprinzips in mechanische, pneumatische, pneumostatische und -dynamische, elektrische sowie adhäsive Greifer unterteilen. Im Folgenden werden die für den industriellen Einsatz bedeutendsten Greifertypen kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Handhabung und Montage von Dauermagneten analysiert und bewertet.

#### **Mechanische Greifer**

Die gebräuchlichsten Bauformen mechanischer Greifer sind Parallelbacken- und Zangengreifer. Die Einbringung von Haltekräften erfolgt bei dieser Bauart entweder kraftschlüssig, z. B. durch Einklemmen des Bauteils zwischen den Greiferbacken, oder durch Formschluss. Da zur formschlüssigen Aufnahme ein Umfassen des Werkstücks möglich oder dieses mit geeigneten Formelementen ausgestattet sein muss, scheidet dieses Prinzip zur Handhabung von Dauermagnetkörpern bei der Läufermontage aus. Der Einsatz klemmkraftbasierter Greifer gestattet die Aufbringung sehr starker Haltekräfte, die zur Bewältigung der vorliegenden Aufgabenstellung ausreichen. Allerdings erfordert die Realisierung von Klemmkraften generell eine Zugänglichkeit an mindestens zwei gegenüberliegenden Flächen des zu handhabenden Objekts. Während dieser Anforderung bei der Montage frei auf einer Oberfläche liegender Einzelmagnete noch nachzukommen wäre, ist damit, wie in Bild 36 verdeutlicht, kein spaltfreies Aneinanderlegen mehrerer Magnetreihen auf einem Läuferpol möglich.

Darüber hinaus verfügen Greifer dieses Typs über mechanische Antriebs- oder Gehäusekomponenten, die oft aus ferromagnetischen Werkstoffen gefertigt sind. Dies kann zu

unerwünschten magnetischen Wechselwirkungen zwischen dem zu handhabenden Magnet und der Greiferkonstruktion führen, die die Prozesssicherheit der Greif- und Ablegevorgänge negativ beeinflussen können, z. B. durch Anhaften des Magnets am Greifer vor dem Schließen oder nach dem Öffnen der Greiferbacken.



*Bild 36: Zugänglichkeitsproblematik beim Ablegen von Dauermagnetkörpern mittels mechanischer Greifer*

### Vakuumsauggreifer

Vakuumsauger stellen die industriell bedeutendste Gruppe aus dem Spektrum fluidbetriebener Greifer dar. Die Krafteinleitung erfolgt dabei durch Flächenkräfte, die sich aus dem Anlegen eines Unterdrucks zwischen Sauger und Greiffläche ergeben [41]. Die Höhe der verfügbaren Greifkraft hängt sowohl von der Stärke des Vakuums als auch von der Kontaktfläche zwischen Sauger und Objekt ab. Im Gegensatz zu mechanischen Greifern ist damit auch die spaltfreie Bestückung eng aneinander liegender Objekte möglich.

Einen gravierenden Nachteil stellen jedoch die vergleichsweise geringen Greifkräfte von maximal  $10 \text{ N/cm}^2$  dar, die sich aus dem zugrunde liegenden Wirkprinzip ergeben. Dies hat zur Folge, dass die Magnete nicht bis zum Erreichen der endgültigen Ablageposition am Greifer verbleiben, sondern vorher so stark von den umliegenden Magneten bzw. dem Blechpaket angezogen werden, dass sie sich vom Saugnapf lösen und unkontrolliert auf dem Läufer aufschlagen. Zudem führen die auf das gehandhabte Bauteil wirkenden Magnetkräfte während der Annäherung an die Ablageposition zu einer Verformung des elastischen Saugers, so dass eine präzise Positionierung ausgeschlossen ist.

### (Elektro-)magnetische Greifer

Das Wirkprinzip elektromagnetischer Greifer basiert auf der Ausbildung magnetischer Haftkräfte zwischen dem Greifer und dem zu handhabenden Objekt. Die Erzeugung des Magnetfelds geschieht dabei entweder durch eine Spule mit einem Weicheisenkern oder durch einen Permanentmagnet. Die elementare Voraussetzung für den Einsatz von Magnetgreifern ist daher, dass zwischen Greifer und zu handhabendem Objekt

magnetische Wechselwirkungen möglich sind. Daher eignen sich diese Haltevorrichtungen besonders zur Handhabung ferromagnetischer Bauteile. Klassische Magnetgreifer verfügen stets über mindestens zwei Polschuhe, die beide auf das Montageobjekt aufgesetzt werden. Die Realisierung der Greifkraft erfolgt durch das Anlegen eines Magnetfelds, wobei der magnetische Fluss ausgehend von einem Greiferpol durch das Werkstück zum anderen Polschuh gerichtet ist. Hierdurch ergibt sich an den Kontaktflächen ein sehr starker magnetischer Fluss, der zur Ausbildung starker Haftkräfte führt.

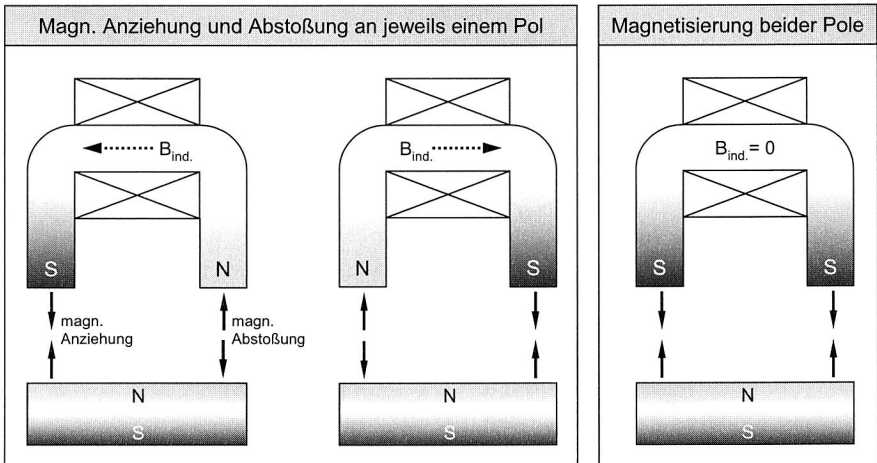


Bild 37: Magnetkräfte bei der Handhabung von Läufermagneten mit einem mehrpoligen Elektromagnetgreifer

Wie in Bild 37 dargestellt, ist die Verwendung mehrpoliger Magnetgreifer zur Handhabung von Dauermagneten, die über ein eigenes starkes Magnetfeld verfügen, nicht möglich [41]. Aufgrund der bezogen auf die Rotorachse radialen Magnetisierungsrichtung der Läufermagnete stehen zum Greifen nur Oberflächen einheitlicher Polarität (Nord oder Süd) zur Verfügung, so dass sich dabei jeweils zwei ungleiche sowie zwei gleichartige Magnetpole gegenüber stehen. Dies hat zur Folge, dass sich die Anziehungskraft des Läufermagnets an den Weicheisenkern des Elektromagnets durch das Greifermagnetfeld an einem Pol verstärkt, während es am anderen zu einer Minderung derselben kommt. Aufgrund der grundsätzlichen Feldorientierung der Rotormagnete tritt dieses Problem unabhängig von der Polarität der Greiferpole auf. Den größten Nachteil stellen jedoch die nach dem Abschalten des Greifermagnetfelds verbleibenden Anziehungskräfte zwischen dem gehandhabten Läufermagnet und den ferromagnetischen Polschuhen dar, die zu einem dauerhaften Anhaften des hartmagnetischen Montageobjekts führen und ein definiertes Ablegen permanentmagnetischer Objekte verhindern.

## Adhäsive Greifer

Das Funktionsprinzip adhäsiver Greifer beruht auf der Erzeugung von Haltekräften mittels elektrischer Felder oder durch Hilfsstoffe, wie bspw. Flüssigkeiten oder Klebstoffe. Da die mit elektroadhäsiven oder Klebegreifern erzielbaren Greifkräfte sehr klein sind, eignen sie sich nicht für die Handhabung starker Magnete. Im Gegensatz dazu ermöglicht der Einsatz von thermisch-adhäsiven Gefriergreifern das Aufbringen von Greifkräften, die etwa das 50- bis 100-fache vergleichbarer Vakuumsauger betragen [41] [122]. Da die Haltekraft dabei über die Oberfläche in das zu handhabende Objekt eingebracht wird, entspricht dieses Prinzip auch den Anforderungen an die Zugänglichkeit. Allerdings ist zur Erzeugung der Greifkraft die Applikation eines Kontaktmediums, z. B. Wasser, notwendig, dass durch ein Peltierelement in der Kontaktfläche zwischen Greifer und Bauteil gefroren wird. Somit bietet dieses Verfahren nur bei kompakten Bauteilen mit einer sehr geringen thermischen Masse ausreichend kurze Gefrier- und Auftauzeiten. Es ist daher nicht für den Einsatz bei kürzesten Taktzeiten geeignet.

## Gegenüberstellung konventioneller Greifprinzipien

Auch wenn mit den beschriebenen Lösungen nahezu alle industriellen Handhabungsaufgaben zufriedenstellend gelöst werden können, eignet sich keines der konventionellen Greifprinzipien zur automatischen Bestückung von Läufnern mit Bauteilen aus hartmagnetischen Werkstoffen. Um dieses Defizit zu verdeutlichen, sind die wichtigsten Greifprinzipien in Tabelle 4 gegenübergestellt.

Greifprinzip	mechanisch	pneumatisch	magnetisch mehrpoleig	thermisch- adhäsiv
Greifkraft	●	◐	◐	●
Zugänglichkeit	○	●	●	●
Steifigkeit	●	○	●	◐
Greif-/Lösezeit	◐	◐	○	○
Magn. Wechselwirkung	◐	●	○	◐

Legende: ● sehr vorteilhaft ... ○ sehr unvorteilhaft

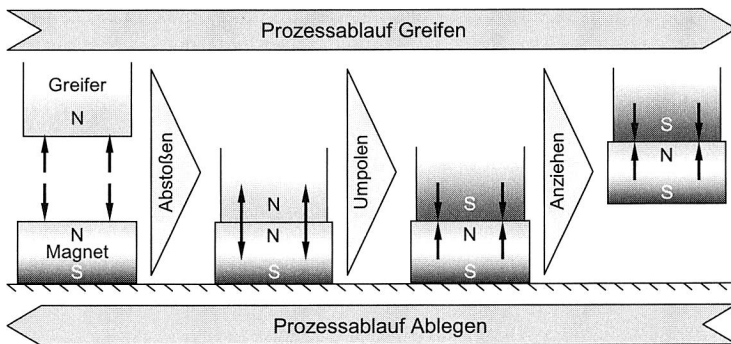
*Tabelle 4: Gegenüberstellende Bewertung konventioneller Greifprinzipien hinsichtlich ihrer Eignung zur Handhabung angeregter Permanentmagnete*

Somit ist die Entwicklung eines neuen Greifprinzips für die Magnethandhabung eine elementare Voraussetzung für die erfolgreiche Automatisierung dieser Montageaufgabe.

### 4.4.2 Nutzung des magnetischen Felds zur Aufbringung der Greifkraft

Trotz des Ausschlusses konventioneller (elektro-)magnetischer Greifer stellt die Nutzung magnetischer Wechselwirkungen einen aussichtsreichen Ansatz zur Realisierung der benötigten starken Greifkräfte dar. Im Gegensatz zu klassischen Magnetgreifern,

die über mindestens zwei gegensätzlich polarisierte Pole verfügen, muss der zur Aufbringung der Greifkraft erforderliche magnetische Fluss zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung über einen einzigen Pol in den zu handhabenden Läufermagnet eingebracht werden. Da der magnetische Fluss des Greifermagnetfelds in diesem Fall nicht durch das zu handhabende Objekt geschlossen werden kann, ist somit nur ein geringer Teil der magnetischen Feldenergie zur Aufbringung der Greifkraft nutzbar, während der Großteil im Luftspalt des magnetischen Kreises gespeichert wird. Um gleichzeitig eine spaltfreie Montage mehrerer Magnete zu ermöglichen, müssen die beim Fügen auftretenden Querkkräfte ohne Formelemente, vorzugsweise reibschlüssig, aufgenommen werden (Bild 38).



**Bild 38:** Funktionsprinzip der Handhabung von Läufermagneten durch einen Magnetgreifer mit einem Wirkpol

Durch Ausbildung eines starken magnetischen Greiferfelds, dessen Orientierung dem Magnetfeld des zu handhabenden Magnets entspricht, kann eine sehr hohe Haftkraft zwischen Greiferpol und Läufermagnet erreicht werden. Bei der Annäherung des Magnetkörpers an den Ablagepunkt kommt es zusätzlich zu magnetischen Wechselwirkungen mit dem ferromagnetischen Grundkörper des Rotors. Da hierbei abhängig vom Montagefall (vgl. Bild 28) starke, der Greifkraft entgegen gerichtete radiale Anziehungskräfte in Richtung der Läuferachse auf den gehandhabten Magnet wirken, kommt es während des Fügeverlaufs zu einem starken Abfall der resultierenden Haltekraft. Gleichzeitig führt das Greifermagnetfeld ebenfalls zu magnetischen Anziehungskräften zwischen Greifer und Blechpaket, so dass die vom Handhabungsgerät aufzunehmenden Prozesskräfte bei diesem Greifprinzip nochmals größer sind als die in Kapitel 4.3 bestimmten Kräfte.

Nach Erreichen der Ablageposition muss die magnetische Anziehung zwischen Greifer und gehandhabtem Magnet aufgehoben werden. Dies kann, sofern der Greifer ausschließlich aus unmagnetischen Werkstoffen gefertigt ist, einfach durch Abschalten des Greifermagnetfelds erfolgen. In diesem Fall wird der Läufermagnet gemäß Bild 28 in jedem Fall vom Blechpaket angezogen, so dass er sich vom Greifer löst. Sind im Greifer dagegen weichmagnetische Komponenten verbaut, so ist beim Heranfahren des



Greifers an den bereitgestellten Läufermagnet und zum Lösen des zu handhabenden Magnets am Ablagepunkt die Umkehrung des Greifermagnetfelds notwendig. Dadurch kommt es zur Abstoßung des dauermagnetischen Bauteils. So kann vermieden werden, dass der zu handhabende Magnet beim Aufnehmen zu früh und unkontrolliert an den Greifer hingezogen wird bzw. dass er sich an der Ablageposition undefiniert vom Greifer löst. Dabei ist es wichtig, dass beim Abstoßen die Koerzitivfeldstärke und die Remanenzflussdichte an keinem Punkt des Magnets überschritten werden, da dies eine (partielle) Entmagnetisierung desselben zur Folge hätte.

#### 4.4.3 Elektromagnetische Auslegung von Magnetgreifern mit einem Wirkpol

Grundlage für die Auslegung von Magnetgreifern mit einem Wirkpol ist die Kenntnis der zu erwartenden Prozesskräfte. Um die während der Montage auftretenden Magnetkräfte sicher zu beherrschen und dem vorzeitigen Lösen des Montageobjekts vom Greifer vorzubeugen, muss die Greifkraft  $F_{\text{greif,normal}}$  größer sein als die Kraft  $F_{\text{rad,max}}$ , mit welcher der zu montierende Magnet an den Läufer gezogen wird.

$$F_{\text{greif,normal}} \geq F_{\text{rad,max}} \quad (4.5)$$

Bei dieser Betrachtung werden jedoch ausschließlich radiale Anziehungskräfte berücksichtigt, so dass dieser Zusammenhang nur für Montagefälle gilt, in denen keine Querkkräfte auftreten bzw. sich alle Querkraftkomponenten aufheben. In der Praxis ist dies nur bei solchen Läufern der Fall, bei denen die Pole jeweils nur aus einem einzelnen Magnet bestehen. Da bei einem Großteil aller Läufer die Pole jedoch aus mehreren, zu einer Reihe angeordneten Magneten und/oder mehreren Magnetreihen bestehen und somit erhebliche Querkkräfte wirken können, ist eine Erweiterung der o. g. Gleichung notwendig. Zur reibschlüssigen Aufnahme der maximalen tangentialen und transversalen Kraftkomponenten  $F_{\text{quer,max}}$  (vgl. Formel 4.1) muss in der Berührfläche zwischen Greifer und Magnet bei bekannter Reibzahl  $\mu_{\text{reib}}$  mindestens die Normalkraftkomponente  $F_{\text{greif,quer}}$  zur Ausbildung einer ausreichend großen Reibkraft vorliegen.

$$F_{\text{quer,max}} \leq F_{\text{greif,quer}} \cdot \mu_{\text{reib}} \quad (4.6)$$

Die insgesamt zur sicheren Magnethandhabung erforderliche Greifkraft  $F_{\text{greif}}$  ergibt sich durch Addition der Gleichungen 4.5 und 4.6 zu

$$F_{\text{greif}} \geq F_{\text{greif,normal}} + F_{\text{greif,quer}} \quad (4.7)$$

Nach Einsetzen der gemäß Kapitel 4.3 bestimmten Prozesskräfte in Gleichung 4.7 berechnet sich die notwendige Greifkraft somit zu

$$F_{\text{greif}} \geq F_{\text{rad,max}} + \frac{1}{\mu_{\text{reib}}} \cdot \sqrt{F_{\text{tan,max}}^2 + F_{\text{transv,max}}^2} \quad (4.8)$$

was die Basis für alle weiteren Berechnungen darstellt.

Die Höhe der Greifkraft hängt gemäß der Maxwell'schen Zugkraftformel (2.13) sowohl von der Größe der Grenzfläche als auch vom Quadrat der magnetischen Flussdichte  $B$  ab. Die für einen sicheren Halt mindestens benötigte Flussdichte  $B_{\text{greif}}$  lässt sich somit

bei bekannter Kontaktfläche  $A_{\text{Kontakt}}$  durch Umstellen der Zugkraftformel aus der nach Gleichung 4.8 ermittelten Greifkraft  $F_{\text{greif}}$  näherungsweise bestimmen.

$$B_{\text{greif}} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{\text{greif}}}{A_{\text{Kontakt}}}} \quad (4.9)$$

Das zur Realisierung der Greifflussdichte  $B_{\text{greif}}$  erforderliche Magnetfeld wirkt dabei jedoch nicht nur lokal in der Grenzfläche Greifer-Magnet, sondern auch in der Kontaktzone Magnet-Läufer, wo es die Streuflussdichte  $B_{\text{Greifer,Streu}}$  hervorruft. Überlagert wird das Greifermagnetfeld von dem starken, durch die eingeprägte Magnetisierung ausgehenden Feld des zu montierenden Magnetkörpers (Bild 39).

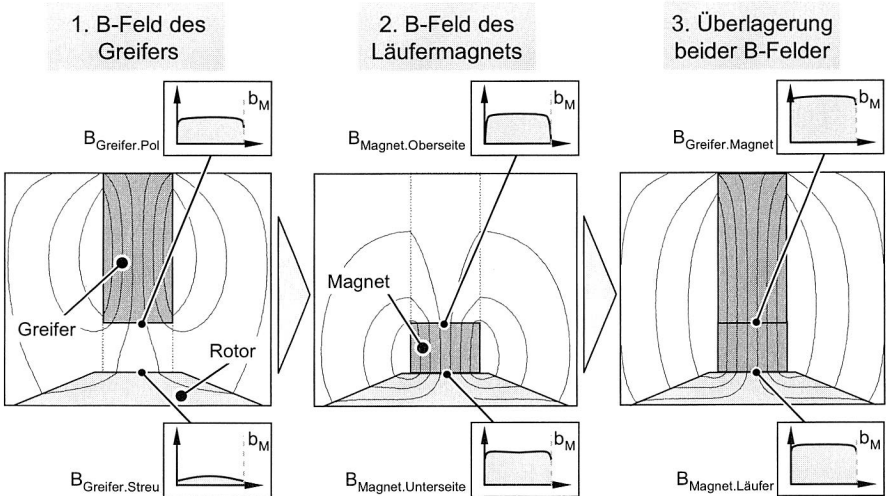


Bild 39: Darstellung von Greifer- (links) und Läufermagnetfeld (mittig) sowie deren Überlagerung (rechts) mit den charakteristischen Verläufen der in den Grenzflächen vorherrschenden magnetischen Flussdichte bei der Handhabung eines SE-Magnets

Die in der Grenzfläche zwischen der dem Greifer zugewandten Oberseite des zu montierenden Magnets und dem Greiferpol vorliegende magnetische Flussdichte  $B_{\text{Greifer,Magnet}}$  bestimmt die Höhe der Kraft, mit der der Magnet an den Greifer herangezogen wird. Ihre Höhe entspricht der Summe der vom Greiferfeld und der eingepprägten Magnetisierung des Magnets in der Kontaktfläche hervorgerufenen Flussdichten  $B_{\text{Greifer,Pol}}$  und  $B_{\text{Magnet,Oberseite}}$ .

$$B_{\text{Greifer,Magnet}} = B_{\text{Greifer,Pol}} + B_{\text{Magnet,Oberseite}} \quad (4.10)$$

Analog dazu ergibt sich die Anziehungskraft, mit der der Magnetkörper auf den Läufer gezogen wird, aus der in der Grenzfläche zwischen Magnetunterseite und Blechpaket

vorliegenden magnetischen Flussdichte  $B_{\text{Magnet,Läufer}}$ . Diese setzt sich aus der durch den Magnet selbst hervorgerufenen Flussdichte  $B_{\text{Magnet,Unterseite}}$  und der Streuflussdichte des Greifers  $B_{\text{Greifer,Streu}}$  zusammen.

$$B_{\text{Magnet,Läufer}} = B_{\text{Magnet,Unterseite}} + B_{\text{Greifer,Streu}} \quad (4.11)$$

Da  $B_{\text{Greifer,Magnet}}$  und  $B_{\text{Magnet,Läufer}}$  Kräfte mit gegensätzlicher Wirkrichtung hervorrufen, ergibt sich die zum Greifen effektiv nutzbare magnetische Flussdichte  $B_{\text{greif,eff}}$  vereinfacht aus der Differenz der an der Magneto-oberseite und der zwischen Magnet und Blechpaket wirkenden Flussdichten.

$$B_{\text{greif,eff}} = B_{\text{Greifer,Magnet}} - B_{\text{Magnet,Läufer}} \quad (4.12)$$

Der Betrag der Greifkraft kann demnach durch die Verstärkung des Greifermagnetfelds beeinflusst werden. Da damit aber auch eine Erhöhung des vom Greifer induzierten Streuflusses und somit eine Steigerung der Anziehungskraft des Magnets auf den Läufer einhergeht, sollte zunächst der vom Magnet hervorgerufene, in der Grenzfläche Greifer-Magnet wirkende Fluss  $B_{\text{Magnet,Oberseite}}$  maximiert werden. Dies erfolgt vorzugsweise durch Verwendung eines ausreichend dimensionierten Greiferpols aus einem hochpermeablen Material. Da die relative Permeabilität des Greifers dadurch ähnlich hoch ist wie die des Blechpakets, können so bei ausreichendem Weicheisenvolumen nahezu gleich große Flussdichten auf Magneto-ober- und -unterseite realisiert werden, was annähernd zu einem Gleichgewicht von Radial- und Greifkraft führt.

Der darüber hinaus zur Aufbringung der Greifkraft am Greiferpole benötigte magnetische Fluss muss durch die Verstärkung des Greifermagnetfelds aufgebracht werden. Während in der Grenzfläche eine möglichst große Flussdichte anzustreben ist, sollten die magnetischen Feldlinien möglichst breit gestreut auf den Läufer auftreffen, um den oben beschriebenen Verstärkungseffekt auf die Anziehungskraft zwischen Magnet und Läufer möglichst klein zu halten.

Von besonderer Bedeutung ist dabei die relative Permeabilität des zu handhabenden Bauteils. Verfügt dieses über ein hohes  $\mu_r$  werden die aus dem Greifer austretenden Feldlinien im hartmagnetischen Material gebündelt und treffen nahezu ungestreut auf das Blechpaket auf. Da in diesem Fall jede Erhöhung des Greiferfelds annähernd gleich große Veränderungen der Flussdichten an der Magneto-ober- und -unterseite hervorruft, wird die Differenz beider Flussdichten sehr gering. Somit ist eine gezielte Beeinflussung der Greifkraft technisch nicht mehr sinnvoll möglich. Da moderne permanentmagnetische Werkstoffe jedoch nur sehr kleine relative Permeabilitäten  $\mu_r$  aufweisen (vgl. Tabelle 1), entspricht die Streuung des Greiferfelds annähernd der eines Luftspalts, dessen Höhe gleich der Magnethöhe ist. Somit ist gewährleistet, dass eine Verstärkung der Flussdichte am Greiferpole lediglich zu einer unterproportionalen Erhöhung der relevanten Streuflussdichte führt. Dies gilt analog auch für die Höhe der damit einhergehenden Magnetkräfte.

Neben der Permeabilität des Magnetwerkstoffs wird die streuungsbedingte Flussdichtedifferenz zwischen Magnetober- und -unterseite durch die Magnetkörpergeometrie sowie die konstruktive Gestaltung des Magnetgreifers beeinflusst. Da sich mit zunehmendem Verhältnis von Magnethöhe zu -breite ein günstiges Streufeld des Greifers ergibt, eignen sich vor allem Körper mit annähernd quadratischem Querschnitt für dieses Prinzip. Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren sowie der Komplexität der sich gegenseitig beeinflussenden Magnetfelder von Greifer und Läufermagnet ist eine pauschal vereinfachte Abschätzung der zum Greifen erforderlichen magnetischen Flussdichte nicht mehr möglich. Die praktische Auslegung von Greifern mit einem magnetischen Wirkpol zur Handhabung von Läufermagneten erfordert daher den Einsatz von FEM-Werkzeugen, die eine effiziente und hinreichend genaue Bestimmung der magnetischen Felder und Kräfte ermöglichen. Neben der Absicherung einer ausreichenden Greifkraft ist im Rahmen der (elektro-)magnetischen Greiferauslegung weiterhin sicherzustellen, dass es beim Abstoßen des zu handhabenden Läufermagnets am Ablagepunkt nicht zu einer teilweisen Entmagnetisierung desselben kommt.

#### **4.4.4 Alternative Konstruktionsprinzipien für Magnetgreifer mit einem Wirkpol**

Die Erzeugung des magnetischen Felds zur Realisierung der Greifkraft ist sowohl mittels Elektromagneten als auch durch Permanentmagnete möglich [27]. Um Läufermagnete unterschiedlicher Polarität mit einem Greifer handhaben zu können, muss das Greifermagnetfeld umkehrbar sein. Die Invertierung des Felds ist bei elektromagnetisch betriebenen Greifern sehr einfach durch Umpolung des Erregerstroms möglich. Wird das Greiferfeld dagegen durch Permanentmagnete aufgebracht, so ist eine Aufhebung der Greifkraft ausschließlich durch mechanische Verfahren möglich.

#### **Elektromagnetische Greifer für Pick & Place-Operationen**

Um das zur Erzeugung der Greifkraft erforderliche Magnetfeld an einem einzigen Pol aufzubringen, müssen Elektromagnetgreifer zur Handhabung von Läufermagneten über eine Spule verfügen, in die zur Verstärkung des erzeugten Magnetfelds ein Weicheisenkern integriert ist. Stärke und Verlauf des Greifermagnetfelds werden dabei primär durch die Kerngeometrie, die Windungsanzahl der Spule sowie den elektrischen Strom, der die Spule durchfließt, bestimmt. Wie in Bild 40 dargestellt, liegt die Greiffläche hierbei an einer der beiden Stirnflächen der Spule.

Die wesentlichen Vorteile dieses Konstruktionsprinzips liegen im einfachen mechanischen Aufbau sowie in der sehr guten Regelbarkeit der Greifermagnetfeldstärke. Demgegenüber steht ein erheblicher Aufwand für die elektromagnetische Auslegung von Greifern dieser Bauart.

Grundsätzlich ist bei der Konstruktion von Greifern dieser Bauweise deren unvermeidbare Erwärmung zu beachten. Beim Einschalten eines Elektromagnets wird ein Teil der elektrischen Energie aufgrund des elektrischen Widerstands der Wicklung in Wärme umgewandelt, während die restliche Energie zur Stabilisierung des Magnetsystems mechanische und Magnetisierungsarbeit verrichtet. Nach Erreichen des elektromagneti-

schen Gleichgewichts wird dagegen die gesamte elektrische Leistung in Wärme umgewandelt, so dass die Aufrechterhaltung des Magnetfelds stets mit thermischen Verlusten einhergeht. Eine ausführliche Beschreibung der Erwärmungsberechnung von Gleichstrommagneten ist in [57] nachzulesen.

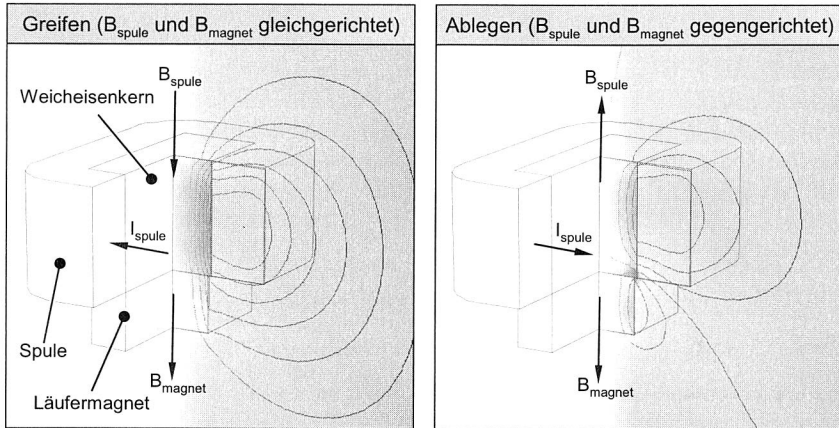


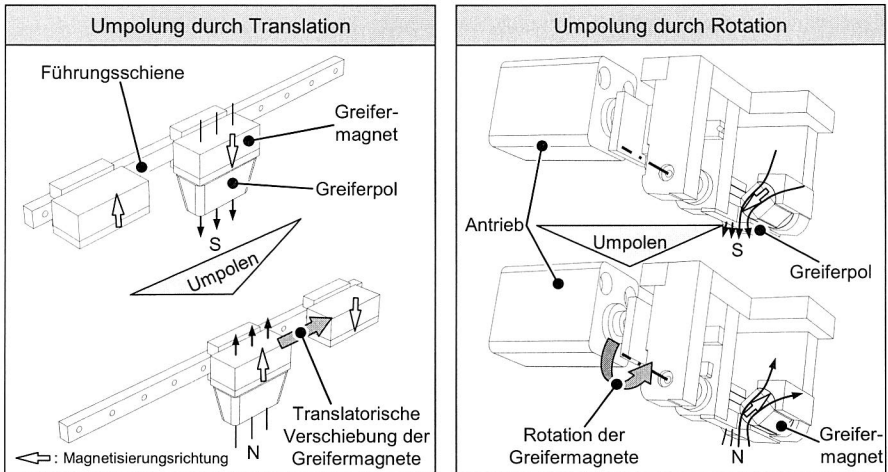
Bild 40: Prinzipieller Aufbau von Elektromagnetgreifern zum automatisierten Aufnehmen und Ablegen von Permanentmagneten

Um Schäden am Greifer und der Gefahr einer irreversiblen Entmagnetisierung des gehandhabten Magnetkörpers aufgrund thermischer Überlastung vorzubeugen, ist es vorteilhaft, wenn der Elektromagnet mit einem Weicheisenkern ausgeführt wird. Dabei wirken auch bei abgeschaltetem Erregerstrom ausreichend starke, vom gehandhabten Magnet ausgehende Kräfte, die zur Fixierung des Magnets gegenüber Gewicht- und Trägheitskräften ausreichen. Da der Elektromagnet somit nur beim Aufnehmen und Ablegen Arbeit verrichten muss, kann die Einschaltdauer signifikant verkürzt und die Wärmeentwicklung reduziert werden.

### Permanentmagnetische Greifer für Pick & Place-Operationen

Eine andere Möglichkeit zur Realisierung des Greifermagnetfelds liegt in der Verwendung von Permanentmagneten. Dafür sind ein oder mehrere Dauermagnete im Greifer so anzuordnen, dass das von ihnen ausgehende und durch weichmagnetische Bauteile gebündelte Feld in der Kontaktfläche zwischen Magnet und Greifer die benötigte Flussdichte ausbildet. Da Dauermagnete über eine feste Feldorientierung verfügen, muss zum Umpolen des Greiferfelds die Lage der Permanentmagnete im Greifer verändert werden. Vorzugsweise erfolgt die Umpolung des Greiferfelds durch Drehung der Greifermagnete um ihre Längsachse. Alternativ dazu kann die Invertierung des Greifermagnetfelds auch durch eine translatorische Bewegung erfolgen, indem ein zweiter Greifermagnet mit gegensätzlicher Feldorientierung an die Stelle des ersten geschoben

wird. Bild 41 zeigt alternative Gestaltungsmöglichkeiten für die konstruktive Ausführung derartiger Greifer. [53]



**Bild 41:** Alternative Gestaltungsmöglichkeiten für die Konstruktion einpoliger Magnetgreifer mit Permanentmagneten

Da bei Greifern mit Dauermagneten im Gegensatz zu Elektromagnetgreifern die Beeinflussung der Feldstärke nicht durch eine Veränderung der Speisespannung möglich ist, erfordert die magnetische Auslegung derartiger Greifer besondere Sorgfalt. So ist insbesondere darauf zu achten, dass es bei abstoßender Feldorientierung weder zu einer teilweisen Entmagnetisierung des abzulegenden Dauermagnets noch der Greifermagnete kommt. Dies kann durch die Integration eines Polschuhs aus Weicheisen gewährleistet werden. Dieser ermöglicht die Streuung der Feldlinien von Greifer- und Läufermagnetfeld, ohne dass das vom Greifer ausgehende Gegenfeld die Arbeitspunkte der gehandhabten Magnete in den entmagnetisierenden Bereich drängt. Bei zu massiver Ausbildung des Polschuhs überwiegt allerdings die Eigenanziehung des Läufermagnets an den Greifer, was in Montagefällen, in denen der zu handhabende Magnet nur geringfügig vom Läufer angezogen wird (vgl. Bild 28,  $F_{\text{rad}} 3$ ), dazu führen kann, dass das Lösen des Montageobjekts auch bei abstoßendem Greiferfeld nicht mehr möglich ist. Darüber hinaus ist durch konstruktive Maßnahmen dafür zu sorgen, dass das sich beim Umpolen der Greifermagnete verändernde Magnetfeld zu möglichst geringen magnetischen Wechselwirkungen mit bereits bestückten Läufermagneten führt. Das ist wichtig, um diese vor unbeabsichtigtem Anheben oder Verrutschen zu schützen.

Wegen der anzustrebenden engen Luftspalte und der starken Greifermagnete sind zur Veränderung der Lage der Greifermagnete bei der Invertierung des Greiferfelds sehr starke Kräfte bzw. Drehmomente notwendig. Aus diesem Grund erfordert der Aufbau kompakter Dauermagnetgreifer den Einsatz von Antrieben mit hoher Energiedichte oder

hoch untersetzter Getriebe, was zu einer hohen Komplexität im mechanischen Aufbau dieser Greifer führt. Zudem ist bei dieser Bauweise die nicht vorhandene Möglichkeit zur Regelung des Greifermagnetfelds zu beachten, so dass derartige Greifer nur bedingt für variierende Magnetgeometrien eingesetzt werden können.

Dieses Konstruktionsprinzip wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in einen Permanentmagnetgreifer zur automatisierten Bestückung von Fahrmotorläufern für elektrische Bahnen mit großen NdFeB-Quadern erfolgreich umgesetzt. Eine detaillierte Beschreibung dieses Systems erfolgt in Kapitel 6.1.

### **Handhabung mehrerer Dauermagnete in Zwangslage (Collect & Place)**

Im Gegensatz zu den beiden vorab beschriebenen Greiferkonzepten, bei denen jeder Läufermagnet einzeln aufgenommen und abgelegt werden muss, ermöglicht die Montage von Magneten in Zwangslage die Verarbeitung mehrerer Magnete innerhalb eines Greifzyklus. Dabei werden die zu montierenden Läufermagnete direkt aus einem Magazin heraus auf dem Läufer abgelegt und dort vereinzelt. Da die Magnete aufgrund ihrer Feldorientierung eine hervorragende Stapeleignung aufweisen, bietet sich die Befüllung des Magazins mit einem Magnetstapel an. Aufgrund der starken magnetischen Wechselwirkungen der einzelnen Magnete eines Stapels untereinander sind zur Aufbringung der Greifkraft bei diesem Konzept keine zusätzlichen Greifermagnete erforderlich. Stattdessen wird der abzulegende Magnetkörper durch das Feld des im Magazin verbleibenden Stapels stark angezogen, so dass eine ausreichende Fixierung gegenüber radialen Anzugskräften gewährleistet ist. Um zu vermeiden, dass der komplette Magnetstapel bei der Annäherung an den Läufer aus dem Magazin gezogen wird, ist eine zusätzliche Haltekraft notwendig. Diese kann entweder mechanisch durch Klemmung oder magnetisch durch den Einsatz von Weicheisenelementen aufgebracht werden. Die Aufnahme von Querkraften erfolgt bei diesem Prinzip formschlüssig über die Innenkontur des Magazins. Da dieses Verfahren im Gegensatz zu den beiden vorab beschriebenen Alternativen keine Möglichkeit zur gezielten Aufhebung der magnetischen Greifkraft bietet, erfolgt das Ablegen durch Abscheren des vordersten Magnets unmittelbar vom Stapel. Der Montagepunkt muss dafür stets an einer der beiden Druckplatten am Rand des Blechpakets oder an bereits vorher montierten Magneten derselben Reihe liegen.

Wie Bild 42 verdeutlicht, wird bei dem diesem Greifprinzip zugrunde liegenden Prozess zunächst der vorderste Magnet durch einen Vorschubantrieb zur Hälfte aus dem Magazin geschoben und der komplette Magnetstapel an den Läufer herangefahren. Anschließend erfolgt die Annäherung des Montageobjekts an die Rotoroberfläche, bis der Luftspalt zwischen dem abzulegenden Magnet und dem Läufer etwa zwei Dritteln der Magnethöhe entspricht. Die Aufnahme von Querkraften erfolgt bis zu diesem Punkt noch formschlüssig durch die Magazinwand. Zum Aufsetzen des Läufermagnets auf das Blechpaket wird der vorderste Magnet komplett aus dem Magazin herausgeschoben, so dass er nur noch durch die magnetische Anziehung  $F_{\text{mag}}$  des übrigen Stapels gehalten wird. Anschließend erfolgt das Anfahren des Ablagepunkts radial zur Rotor-

achse, wo ggfs. bis zur Aushärtung des Klebstoffs zu verweilen ist. Um den dort abzulegenden Magnet vom übrigen Stapel zu trennen, wird das komplette Magazin im Folgeschritt parallel zur Läuferachse in Richtung Druckplatte bzw. bereits montierter Reihenmagnete verschoben. Aufgrund des mechanischen Widerstands  $F_{\text{mech}}$  durch die angrenzenden Formelemente (Nachbarmagnet oder Druckplatte) wird der zu montierende Magnet vom übrigen Magnetstapel abgesichert. Dabei nimmt mit abnehmender Überdeckung die Kraft  $F_{\text{mag}}$ , mit der der vorderste Magnet am Stapel gehalten wird, ab und die resultierende Anziehungskraft an den Läufer gleichzeitig zu, so dass der Magnet am Ablagepunkt verbleibt. Der restliche Stapel muss anschließend parallel zur Läuferachse weiter bis über das Ende der zu bestückenden Oberfläche hinaus verschoben werden, bevor er wieder angehoben werden kann. Anderenfalls kann es bei vorzeitigem Wegfahren des Greifers zum unbeabsichtigten Anheben bereits montierter Magnete kommen oder der Stapel unkontrolliert aus dem Magazin herausgezogen werden.

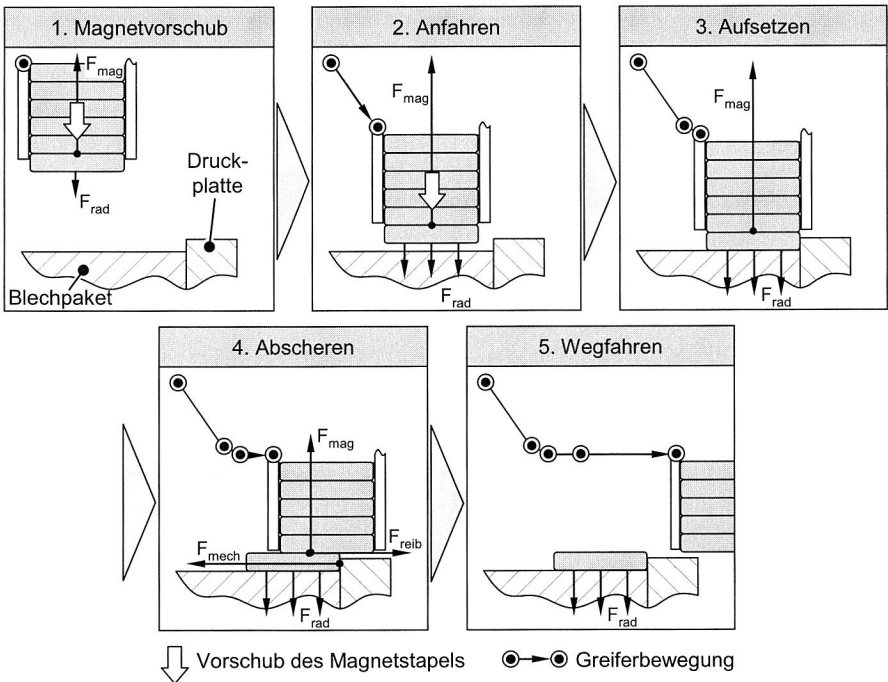


Bild 42: Prozessablauf beim Ablegen von Dauermagneten von einem magazinierten Magnetstapel auf die Läuferoberfläche

Im Gegensatz zur klassischen Pick & Place-Bestückung muss bei dieser Methode nicht jeder Magnet einzeln aufgenommen werden, was zu einer Reduktion von Greifvorgängen und damit einer höheren Produktivität führt. Da in einem Magazin stets nur die Bereitstellung von Magneten mit einer einheitlichen Felddausrichtung möglich ist, erfordert



die Bestückung von unterschiedlich magnetisierten Polen jeweils einen Magazinwechsel. Allerdings können das Abscheren der Einzelmagnete und das anschließende Abziehen des Magnetstapels über bereits abgelegte Läufermagnete abhängig von der Abriebfestigkeit der Magnetkörperbeschichtung zu Verschleiß führen. Da der Abrieb mit zunehmender Anzahl der pro Reihe zu bestückenden Magnetkörper stark zunimmt, eignet sich dieses Verfahren vorwiegend für kurze Läufer. Zudem erfordert der Einsatz dieses Konstruktionsprinzips bei hohen Magneten entweder die Verwendung sehr langer Magazine oder einen häufigen Magazinwechsel, so dass diese Art der Bestückung bevorzugt bei flachen Magneten einzusetzen ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Greifer dieser Bauart zur automatischen Bestückung von Servomotorläufern mit Magnetquadranten exemplarisch umgesetzt. Auf die konstruktive Gestaltung und die Ergebnisse der damit durchgeführten Bestückversuche wird in Kapitel 6.2 näher eingegangen.

### **Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Greiferkonzepte**

Die Auswahl des richtigen Greiferkonzepts ist grundlegend für die erfolgreiche Realisierung effizienter Bestückanlagen. Während die sichere Beherrschung des Montageprozesses obligatorisch ist, gilt es gleichzeitig den Konstruktionsaufwand gering zu halten und eine den Rahmenbedingungen in wirtschaftlicher Hinsicht gerechte Lösung auszuwählen. Tabelle 5 enthält eine Bewertung der beschriebenen Greiferkonzepte hinsichtlich der wichtigsten produktionsrelevanten Kriterien. Während elektromagnetische Greifer aufgrund ihrer hervorragenden Regelbarkeit eine sehr feine Einstellung des abstoßenden Magnetfelds zum Ablegen gestatten und damit die Gefahr einer Entmagnetisierung sehr gering ist, bieten Lösungen mit mechanisch umzupolenden Dauermagneten aufgrund ihrer hohen Energiedichten stärkere Greifkräfte bei kompakten Greiferabmessungen. Bei der Montage direkt aus einem Magazin heraus besteht dagegen prinzipbedingt bei SE-Magnetwerkstoffen keine Gefahr der Entmagnetisierung.

Bzgl. des Konstruktions- und Fertigungsaufwands ist diese Methode gleichzeitig die ressourcenschonendste und damit kostengünstigste Alternative. Während die elektromagnetische Auslegung umpolbarer Konzepte sehr anspruchsvoll ist und in der Regel den Einsatz von Experten und geeigneten Berechnungsprogrammen erfordert, beschränkt sich die Entwicklung von Magazingreifern vor allem auf deren mechanische Gestaltung.

Neben geringem Entwicklungsaufwand ist der effiziente Betrieb eine Grundvoraussetzung für eine hohe Wirtschaftlichkeit von Bestückanlagen, was die Realisierung robuster Greifer und hoher Bestückleistungen erfordert. Diesen Ansprüchen werden ebenfalls vor allem Lösungen gerecht, bei denen die Bestückung unmittelbar aus einem Magazin erfolgt. Dagegen stellen Pick & Place-Konzepte in der Regel flexiblere Ansätze dar, die sich auch zur Handhabung größerer Magnetkörper eignen.

	Pick & Place		Collect & Place
	Elektromagnet	Dauermagnet	Magnetstapel
Prozess			
Regelbarkeit	●	○	○
Ablegen durch Umpolung	●	◐	○
Greifkraft/Energiedichte	◐	●	◐
Entmagnetisierungsschutz	◐	◐	●
Oberflächenverschleiß	◐	◐	◐
Konstruktionsaufwand			
Elektromagnetische Auslegung	○	◐	●
Thermische Auslegung	○	●	●
Mechanischer Aufbau	●	◐	◐
Wirtschaftlichkeit			
Bestückleistung	◐	◐	●
Flexibilität	◐	◐	◐
Robustheit/Verfügbarkeit	◐	◐	◐
Energiebedarf	○	◐	●

Legende: ● sehr vorteilhaft ... ○ sehr unvorteilhaft

Tabelle 5: Gegenüberstellung und Bewertung der wesentlichen Kriterien alternativer Greiferkonzepte für die Permanentmagnetmontage

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die dargestellten Greiferkonzepte die Umsetzung effizienter Bestücklösungen unter verschiedensten Rahmenbedingungen ermöglichen. Die Auswahl einer geeigneten Bauform hängt von den Stückzahlen, dem Variantenreichtum und den magnetischen Eigenschaften der zu handhabenden Magnete ab.

4.5 Automatische Bereitstellung von Dauermagneten

Neben geeigneten Prozessen und Systemen zum Greifen und Ablegen erfordert die Realisierung automatischer Bestücklösungen auch die effiziente Bereitstellung der zu verarbeitenden Bauteile. In der klassischen Automatisierungstechnik geschieht dies entweder durch den Einsatz von Standardzuführgeräten oder durch die geordnete Bereitstellung der Objekte [39]. Auch wenn die heute verfügbaren Lösungen zur Teilebereitstellung technisch ausgereift und vielfach erprobt sind, müssen bei der Auslegung und Realisierung automatischer Zuführsysteme für Dauermagnete deren spezielle physikalische Eigenschaften berücksichtigt werden. Insbesondere die automatische Separation und Bereitstellung magnetisierter Dauermagnete erfordert die Entwicklung neuer Gerätekonzepte, die auch angesichts der starken Magnetkräfte eine störungsfreie Zuführung erlauben. Auf Basis der folgenden Überlegungen zur Gestaltung automatisierter Zuführgeräte für Dauermagnete wurde im Rahmen dieser Arbeit zudem der Prototyp

einer automatischen Zuführeinrichtung realisiert. Eine nähere Beschreibung der umgesetzten Lösung erfolgt in Kapitel 6.1.

#### 4.5.1 Alternative Prozessketten zur Magnetbereitstellung

Aufgabe der automatisierten Bereitstellung von Dauermagneten ist es, dem Handhabungsgerät den richtigen Magnet mit der richtigen Magnetfeldausrichtung zum richtigen Zeitpunkt an einer definierten Übergabeposition zur Verfügung zu stellen. Dieses Ziel kann grundsätzlich durch unterschiedliche Strategien erreicht werden, die sich vor allem hinsichtlich des Magnetisierungsgrads der Magnetkörper bei der Anlieferung und der anschließend benötigten Einzelprozesse unterscheiden. Während die automatische Bestückung direkt vom Magnetstapel den Bezug magnetisierter Magnete zwingend voraussetzt, kann die Anlieferung der Magnete für die Pick & Place-Bestückung sowohl magnetisiert als auch unmagnetisiert erfolgen.

##### Anlieferung unmagnetisierter Magnetkörper

Der wichtigste Vorteil, der für den Einkauf unmagnetisierter Magnetkörper von der Magnetfabrik spricht, ist das Fehlen jeglicher magnetischer Felder. Bzgl. der Bereitstellung hat dies den positiven Effekt, dass sich die Einzelmagnete analog zu üblichen Werkstücken problemlos handhaben lassen. Dies gestattet die Verwendung klassischer Transportbehälter, wobei sich vor allem die Anlieferung in Blistern oder Flachmagazinen sowie als Schüttgut bewährt hat. Während die Lage und Position der Magnete bei den beiden erstgenannten Methoden bereits bekannt ist, müssen die Einzelteile bei ungeordneter Bereitstellung zunächst aus dem Haufwerk heraus in einen definierten Zustand überführt werden. In der Praxis werden dazu üblicherweise Vibrations- oder Stufenförderer eingesetzt, die heute technologisch einen sehr hohen Reifegrad erreicht haben [23] [116].

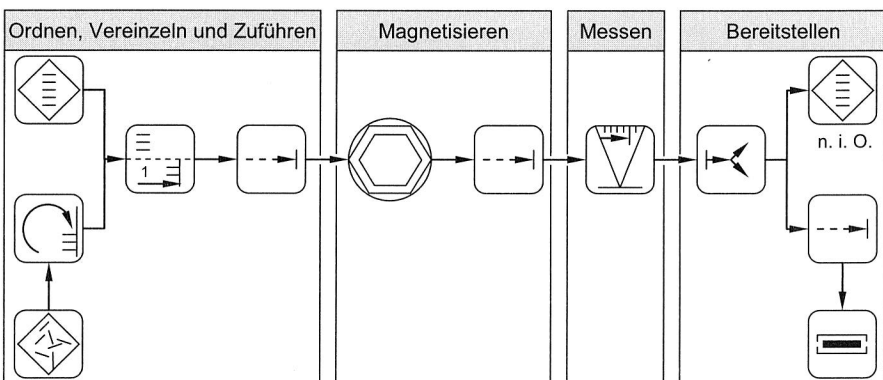


Bild 43: Prozesskette zur automatisierten Bereitstellung und Magnetisierung unmagnetisiert angelieferter Magnetkörper

Wie Bild 43 verdeutlicht, muss den Magnetkörpern vor der Montage auf dem Läufer das erforderliche Magnetfeld eingeprägt werden. Dies erfordert den Einsatz einer Magnetisierstation, die jedoch deutlich kleiner und effizienter auszuführen ist als solche zur Magnetisierung kompletter Läufer. Die Anpassung der magnetischen Polarität an die Montagereihenfolge erfolgt dabei einfach durch Umpolung des Spulenstroms der Magnetisieranlage. Der Transport der Einzelmagnete zur Magnetisierstation kann in Abhängigkeit von der benötigten Mengenleistung und der Variantenzahl sowohl durch Handhabungsgeräte als auch durch Transportbänder oder Vibrationsförderer geschehen. Bei der Gestaltung von Lösungen zur Entnahme der angeregten Magnete ist der Tatsache Rechnung zu tragen, dass es aufgrund der eingeprägten magnetischen Energie zu Wechselwirkungen mit der Peripherie und anderen, noch unmagnetischen Objekten kommen kann.

### Anlieferung magnetisierter Magnetkörper

Alternativ dazu kann die Anlieferung von Magnetkörpern auch im magnetisierten Zustand erfolgen. Da Magnetfabriken über leistungsfähige Magnetisieranlagen zur effizienten Anregung großer Magnetmengen verfügen, ergibt sich für den Verbraucher lediglich ein vernachlässigbarer finanzieller Mehraufwand. Angesichts des eingeprägten Magnetfelds ist bei dieser Methode ausschließlich eine geordnete Anlieferung der Magnete in Zwangslage möglich, da es bei Schüttgut ansonsten zu einer automatisch nicht mehr auflösbaren Verklumpung des Haufwerks käme. Aufgrund der Ausrichtung des Magnetfelds tendieren die Läufermagnete sehr stark zur Stapelbildung, weshalb die Anlieferung von Dauermagneten heute ausschließlich gestapelt erfolgt.

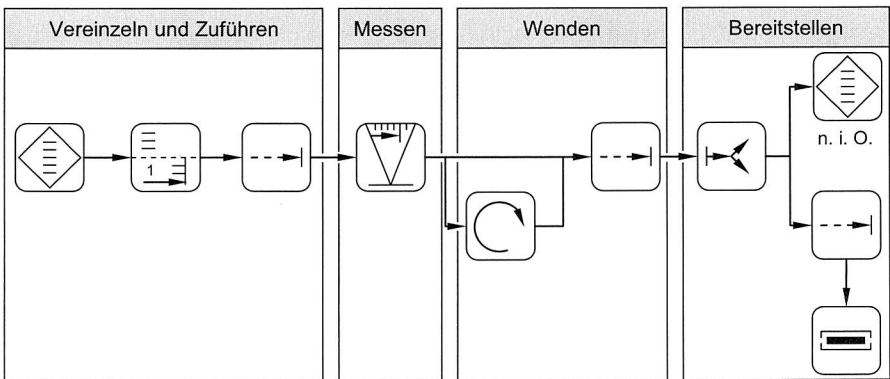


Bild 44: Prozesskette zur automatisierten Bereitstellung von Dauermagneten

Den ersten Schritt des in Bild 44 gezeigten Bereitstellungsprozesses stellt daher die Vereinzelung der Bauteile aus dem Stapel dar. Im Anschluss daran ist die Polarität des magnetischen Felds zu messen und mit der vom Montageprozess angeforderten zu vergleichen. Entspricht die Magnetisierungsrichtung des Magnets der für den nächsten

Montageschritt benötigten, kann das Bauteil für den Bestückprozess bereitgestellt werden. Anderenfalls ist es notwendig die Lage des Magnetkörpers zu verändern, um das Magnetfeld entsprechend den Anforderungen des Montageprozesses auszurichten. Da dies jedoch nur bei quaderförmigen Magnetgeometrien möglich ist, sind zur Bereitstellung asymmetrischer Körper für jede Magnetisierungsvariante eigene Vereinzelungsvorrichtungen notwendig.

### Gegenüberstellung und Bewertung beider Konzepte

Die Auswahl eines geeigneten Bereitstellungskonzepts ist stets an die Randbedingungen der jeweiligen Montageaufgabe anzupassen. Neben Stückzahl und Größe beeinflussen dabei auch die Magnetgeometrie und die Anzahl der Magnetvarianten die Lösungsfindung. Insbesondere bei der Verwendung brotlaib- oder schalenförmiger Magnetkörper ergibt sich durch die Magnetisierung unmittelbar vor der Montage eine signifikante Vereinfachung, da zusätzliche Varianten äußerlich gleicher Objekte, die sich ausschließlich durch ihre magnetische Polarität unterscheiden, entfallen. Die wesentlichen Vor- und Nachteile der genannten Konzepte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Anlieferung unmagnetisiert	Anlieferung magnetisiert
Vorteile:	Vorteile:
- keine Variantenbildung durch Polarität	- kostengünstige Anlagentechnologie
- bedarfsgerechte Magnetisierung	- Magnete liegen bereits geordnet vor
- feld- und damit kraftfreie Handhabung	- einfache Vereinzelung
Nachteile:	Nachteile:
- Magnetisieranlage notwendig (aber: günstiger als für Läufermagnetisierung)	- Verschmutzungsgefahr
- Aufladezeit der Kondensatorbatterie	- Polarität führt zu zusätzlichen Varianten
- Energiebedarf	- magnetische Felder und Kräfte erschweren die Handhabung des Magnetstapels

*Tabelle 6: Potenziale und Herausforderungen der automatischen Montage magnetisierter Dauermagnetkörper*

#### 4.5.2 Gerätekomponenten für die automatisierte Magnetzuführung

Vor dem Hintergrund der in Bild 43 und Bild 44 dargestellten Strukturen der zur Bereitstellung benötigten Funktionalitäten bietet sich eine modulare Gestaltung von Zuführeinrichtungen für Dauermagnete an. Da die automatisierte Vereinzelung, Zuführung und Bereitstellung eine wesentliche Teilaufgabe bei der Planung und dem Betrieb von Bestückzellen darstellt, wird im Folgenden eine kurze Übersicht über die wichtigsten Funktionsmodule gegeben werden.

## **Anforderungen an Komponenten**

Eine wichtige Teilaufgabe bei der Konstruktion von Zuführgeräten für Permanentmagnete ist die Auswahl geeigneter Komponenten und Konstruktionselemente. Besondere Bedeutung kommt dabei deren Verträglichkeit mit den starken Feldern der Dauermagnete zu. Vor allem Sensoren und Aktuatoren, die unmittelbar an der Ausführung des Bereitstellungsprozesses beteiligt sind, müssen auch unter dem Einfluss magnetischer Felder einwandfrei funktionieren. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass der Einsatz weichmagnetischer Bauteile aufgrund der sehr hohen Energiedichte moderner hartmagnetischer Materialien erhebliche Auswirkungen auf das Verhalten der Magnetkörper haben kann.

Aus diesem Grund sind Geräte zur automatisierten Bereitstellung von Dauermagneten vorzugsweise aus nichtmagnetischen Komponenten zu konstruieren. Als Antriebsmedium sollten nach Möglichkeit Druckluftantriebe zum Einsatz kommen, die in nichtmagnetischer Ausführung zur Verfügung stehen. Ist die Verwendung elektrischer Antriebstechnik nicht vermeidbar, so ist diese in ausreichender Entfernung zur Transportbahn der Magnete anzubringen. Da es sich bei den zur Automatisierung des Prozesses benötigten Sensorkomponenten um elektronische Baugruppen handelt, müssen auch diese sorgfältig ausgewählt werden. Insbesondere induktive Sensoren, sonst Standardkomponenten in der Montagetechnik, sind nicht einsetzbar. Dagegen führt der Einsatz optischer Sensoren auch in unmittelbarer Nähe zu den Magneten zu keinen Problemen.

## **Verpackung**

Die grundlegende Voraussetzung für die Gestaltung des weiteren Bereitstellungsprozesses stellt die Verpackung der Magnete dar. Da die Eigenschaften unmagnetisierter Magnetkörper mit denen von Produkten aus konventionellen Metallen vergleichbar sind, kann bei dieser Lieferform auf eine Reihe erprobter Verpackungskonzepte, wie bspw. Flachmagazine, Blister oder Schüttgutbehälter, zurückgegriffen werden, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll.

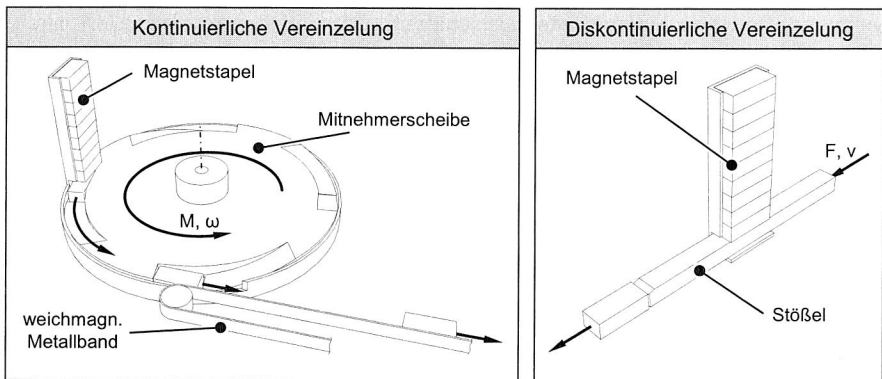
Im Gegensatz dazu werden bereits angeregte Dauermagnete heute nahezu ausschließlich in gestapelter Form geliefert. Durch die Nutzung des Stapeleffekts lassen sich hohe Packungsdichten und damit ein effizienter Transport erreichen. Die kompletten Stapel können dabei in tiefgezogenen Kunststoffverpackungen oder Pappschachteln bezogen werden. Um Beschädigungen des Oberflächenschutzes vorzubeugen ist es möglich, direkten Kontakt zweier aneinanderliegender Magnetkörper durch Einbringen von Kunststoffplättchen auszuschließen. Zur Vermeidung von zusätzlichem Handhabungsaufwand, z. B. für die Magazinierung der Magnete beim Verarbeiter, erweist es sich als günstig, wenn die Vereinzelung der Magnete direkt aus dem angelieferten Magazin möglich ist. Um eine ausreichende Zugänglichkeit für das Vereinzelungswerkzeug zu schaffen, muss die Verpackung über eine Aussparung verfügen, durch die der zu separierende Magnet aus dem Magazin geschoben werden kann. Dabei besteht keine Gefahr des unbeabsichtigten Herausfallens von Magneten während des Transports, da der

verschiebbare Einzelmagnet stets durch die Magnetkraft des übrigen, formschlüssig eingefassten Stapels gehalten wird. Die Magazin- und Verpackungsgestaltung ist dabei eng mit dem verwendeten Vereinzelungskonzept verbunden und an dieses anzupassen. Insbesondere bei komplexeren Magazinen kann daher der Einsatz von Pendelverpackungen sinnvoll sein, um die Verpackungskosten gering zu halten.

## Vereinzelung

Den ersten Schritt des Zuführprozesses stellt die Vereinzelung der Magnetkörper dar. Diese Teilaufgabe ist bei der Bereitstellung unmagnetisierter Magnete sehr einfach durch den Einsatz konventioneller Geräte durchführbar. Während die Vereinzelung ungeordnet angelieferter Magnetkörper vorzugsweise durch Vibrations- oder Stufenförderer geschieht, müssen die Einzelteile bei der Anlieferung in Blistern oder Flachmagazinen einzeln durch Handhabungsgeräte aufgenommen und an definierter Stelle abgelegt werden.

Die Vereinzelung magnetisierter, gestapelt angelieferter Magnete kann dagegen nicht durch Standardgeräte erfolgen. Im Gegensatz zum Abziehen eines einzelnen Magnets in Stapelrichtung, das sehr großen Kraftaufwand erfordert, sind zum Abscheren desselben senkrecht zur Stapelrichtung deutlich kleinere Kräfte notwendig. Abhängig von der Montageleistung können sowohl kontinuierliche (hohe Mengenleistung) als auch diskontinuierliche (geringe Mengenleistung) Zuführsysteme realisiert werden (Bild 45).



*Bild 45: Alternative Konzepte für kontinuierliche und diskontinuierliche Vereinzelungsprozesse stapelförmig angelieferter Magnete*

Ein kontinuierlicher Bereitstellungsprozess lässt sich durch den Einsatz einer rotierenden Mitnehmerscheibe realisieren, an deren Rand Aussparungen zur Aufnahme jeweils eines Magnets eingebracht sind. Durch Anordnung dieser vorzugsweise aus einem verschleißarmen Kunststoff angefertigten Platte unter dem Magnetstapel rutscht bei fortlaufender Rotation stets der unterste Magnet in eine Aussparung und wird durch die Drehbewegung vom übrigen Stapel abgetrennt. Um zu vermeiden, dass der gesamte

Stapel in die Kavität fällt und es beim Aufschlag zu Beschädigungen der spröden Magnetkörper kommt, sollte das Höhenprofil der Scheibe zwischen den Magnet Taschen sanft abfallen. Die Entnahme der Magnete aus der Vereinzelungsscheibe kann bspw. durch ein angetriebenes, magnetisches Metallband [39] oder eine Kette mit ferromagnetischen Trägerelementen, an denen die Magnete anhaften, erfolgen. Durch Synchronisation der Band- mit der Umfangsgeschwindigkeit der Scheibe wird der Magnet so aus der Aussparung herausgezogen und zur nächsten Station gefördert. Eine mögliche Ausführung dieses Konzepts ist in Bild 45 links abgebildet.

Ist eine geringere Bestückleistung ausreichend, kann die Separation eines Magnets aus dem Stapel, wie in Bild 45 rechts dargestellt, auch durch einen diskontinuierlichen Prozess realisiert werden. Hierbei wird der unterste Magnet durch einen unmagnetischen Stößel vom Magnetstapel abgeschert und bis zur nächsten Station weiter gefördert. Der Antrieb des Kolbens kann über einen Druckluftzylinder oder eine elektrische Vorschubachse erfolgen. Auch bei diesem Prinzip ist darauf zu achten, dass es beim Zurückfahren des Kolbens nicht zum Herabfallen des übrigen Stapels kommt, sondern dass dieser sanft und schadlos auf dem Boden des Magazins aufsetzt. Dies kann durch entsprechende konstruktive Gestaltung des Stößels, bspw. mit einem Federelement, gewährleistet werden.

Bei beiden Verfahren muss verhindert werden, dass ein einmal abgetrennter Magnet aufgrund von Streufeldern nicht an der Magazinaußenseite anhaftet. Dies erfolgt im einfachsten Fall durch die Montage einer Abdeckung über dem Transportweg, so dass eventuell auftretende Magnetkräfte formschlüssig aufgenommen werden. Weiterhin ist sicherzustellen, dass die zum Schutz der Magnetoberflächen eventuell eingesetzten Kunststoffplättchen ebenso zuverlässig aus dem Stapel entfernt werden wie die Magnetkörper. Dies kann entweder mechanisch mittels einer Schikane oder durch Wegblasen der Plättchen mit Druckluft erfolgen. Die Entsorgung leerer Verpackungen bzw. die Beschickung mit neuen Magazinen erfolgt abhängig von der Magazinkapazität und der Verarbeitungsgeschwindigkeit manuell oder durch ein Handhabungsgerät.

### **Magnetisierung**

Beim Bezug unmagnetisierter Magnetkörper vom Hersteller sind die hartmagnetischen Bauteile vor der Montage zu magnetisieren. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass im Gegensatz zur nachträglichen Magnetisierung kompletter Pole oder Läufer das magnetisierende Feld von zwei Seiten an den noch nicht bestückten Magnet angelegt werden kann. Die Verkettung beider Felder gestattet dabei eine deutlich effizientere Ausführung dieses Arbeitsschritts. Zudem sind die hierfür benötigten Magnetisierungsköpfe wesentlich einfacher aufgebaut, was wiederum gegenüber der Magnetisierung fertiger Läufer zu geringeren Investitionskosten führt.

Die Magnetisiereinrichtung wird vorzugsweise nahe am Bereitstellungsort in die Zuführeinrichtung integriert, um Probleme bei der Handhabung aufgrund magnetischer Wechselwirkungen mit peripheren Anlagenkomponenten möglichst auszuschließen. Da mit der Durchführung des Magnetisierungsprozesses starke Magnetfelder einhergehen, ist die



elektromagnetische Verträglichkeit solcher Module mit der übrigen Anlage, insbesondere mit elektronischen Steuerungen, Sensoren und elektrischen Antrieben, ein wichtiger Aspekt, der bei der Auslegung dieses Funktionselements zu berücksichtigen ist.

### **Modulverkettung und Transport angeregter Permanentmagnete**

Eine grundlegende Voraussetzung für die Verkettung der unterschiedlichen Funktionseinheiten von Zuführeinrichtungen für Dauermagnete liegt in der sicheren Beherrschung der von den zu transportierenden Objekten ausgehenden magnetischen Felder sowie den dadurch hervorgerufenen Magnetkräften. Auch wenn bei der Konstruktion derartiger Geräte nach Möglichkeit ausschließlich unmagnetische Werkstoffe einzusetzen sind, müssen die Magnete während des Transports von einem Modul zum nächsten fest fixiert werden. Dies kann sowohl durch die gezielte Ausnutzung magnetischer Haftkräfte als auch durch die Einschränkung ungewünschter Freiheitsgrade mittels Formschluss erfolgen.

Bei letzterem Konzept wird der Magnet auf einer von vier Seiten eingefassten Bahn bewegt, so dass eine Veränderung seiner Position ausschließlich in einer Richtung möglich ist. Der Antrieb des Magnets sollte dabei vorzugsweise ebenfalls formschlüssig, z. B. durch geeignet konturierte Ketten oder einen Vorschubkolben, erfolgen. Um eine sichere Führung des Magnets zu gewährleisten, darf die Kontur der Förderstrecke bei dieser Methode nur geringfügig vom Querschnitt der zu transportierenden Magnete abweichen. Eine weitere Anforderung an die Förderstrecke bezieht sich auf deren Material, das zur Vermeidung von Abrieb und damit eventuell den Klebeprozess negativ beeinflussenden Schmutzpartikeln gute Verschleißigenschaften aufweisen muss. Da somit für nahezu jede unterschiedliche Geometrie extra eine eigens angepasste Transportstrecke anzufertigen wäre, eignet sich dieses Verfahren nicht für die Zuführung vieler unterschiedlicher Magnetvarianten.

Eine andere Möglichkeit zur Modulverkettung liegt in der Nutzung der Magnetkraft. Aufgrund des vom zu transportierenden Objekt ausgehenden magnetischen Felds kommt es zum Anhaften des Magnets an einem Transportmedium, das aus einem weichmagnetischen Material besteht oder zumindest mit magnetischen Elementen ausgestattet ist. Beispielhaft seien an dieser Stelle flexible Metallbänder [39] oder Ketten mit entsprechenden Trägerelementen genannt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Unterseite des Magnets frei zugänglich ist, was die Integration eines Klebstoffauftrags in die Zuführeinrichtung begünstigt.

### **Kontrolle der Materialeigenschaften**

Die Qualität permanent erregter Maschinen wird maßgeblich von der Energiedichte und der korrekten Magnetfeldausrichtung der verwendeten Dauermagnete beeinflusst. Während dies bei der Handmontage eine manuelle Polaritätsprüfung mit erheblichem Mehraufwand und damit -kosten erfordert, kann diese potenzielle Störgröße bei der Magnetzuführung durch die automatische Messung der Magnetfeldorientierung systematisch ausgeschlossen werden. Um die Polarität eines Magnetkörpers zu bestimmen, wird

dieser während des Transports zum Bereitstellungspunkt an einer Hallsonde vorbei geführt. Diese Messung ist vor allem bei der Anlieferung magnetisierter Magnete eine wichtige Voraussetzung für die korrekte Bereitstellung eines Dauermagnets, um diesen gegebenenfalls vor der Aufnahme durch den Greifer zu wenden.

Zu messende Größe	Messmittel
Magnetische Feldstärke/Flussdichte	Hallsonde, Gaußmeter
Geometrie	Lichtschnittsensoren
Bruch	Wirbelstrom-/Lichtschnittsensoren
Anwesenheitskontrolle	Reed-Schalter

*Tabelle 7: Messaufgaben und -mittel zur Magnetprüfung [76]*

Ein wesentlicher Fortschritt, der durch die automatisierte Montage magnetisierter Permanentmagnete erreicht werden kann, ist die effiziente Prüfung der für die Elektromaschine relevanten magnetischen Eigenschaften aller verbauten Magnetkörper vor der Montage. Darüber hinaus ist es sinnvoll, weitere qualitätsrelevante Merkmale, wie bspw. die Magnetgeometrie oder Ausbrüche an den Kanten des Magnetkörpers, automatisch zu überprüfen. Abhängig von den zu messenden Größen und den benötigten Messverfahren (Tabelle 7) kann die Überwachung der Magnete dabei ohne Unterbrechung der Transportbewegung erfolgen, so dass keine Beeinträchtigung der Zuführleistung auftritt. Die kontinuierliche Messung und Überwachung gestatten es, fehlerhafte Magnete zu erkennen und vor der Verarbeitung auszusortieren. So kann mit geringem Aufwand ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Produktqualität geleistet werden.

## Wendemodul

Um die Magnete mit der richtigen Polarität auf den Läufer aufzubringen, müssen die Dauermagnete mit der richtigen Feldausrichtung bereitgestellt werden. Dies gilt insbesondere bei der Anlieferung magnetisierter Magnetkörper, da diesen nicht erst unmittelbar vor dem Verbauen die erforderliche Feldausrichtung eingeprägt werden kann. Da die Ausrichtung des Magnetfelds bei schalen- oder brotlaibförmigen Magneten stets an die Geometrie gebunden ist, können diese nur in einer bestimmten Polarität auf den Läufer aufgebracht werden. Im Gegensatz dazu ist die Montage von Magnetquadern aufgrund ihrer Symmetrie sowohl auf Läufer nord- als auch auf Südpolen möglich.

Der universelle Einsatz magnetisiert angelieferter Quader setzt daher den Einsatz einer Wendevorrichtung voraus. Aufgabe dieser Funktionseinheit ist es, den Magnet durch die Änderung seiner Lage so zu orientieren, dass sein Magnetfeld dem des zu bestückenden Pols entspricht. Die Entscheidung, ob ein Wenden des Magnets erforderlich ist, wird auf Basis der gemessenen Magnetfeldorientierung getroffen. Die Ausführung der Rotation erfolgt vorzugsweise durch einen drehbaren Kunststoffzylinder, der über eine der Magnetgeometrie entsprechende Aussparung verfügt. Die Drehachse muss dabei mit der Achse, die sich durch die lineare Verschiebung des Magnetmittelpunkts beim Transport ergibt, übereinstimmen. Nachdem der bereitzustellende Körper in die

Kavität gefördert wurde, wird zur Invertierung des Magnetfelds eine halbe Drehung vollzogen. Nach Abschluss der Rotation kann der Magnet den weiteren Bereitstellungsprozess durchlaufen. Ein wesentlicher Nachteil dieses Konzepts liegt in der erforderlichen Unterbrechung des Transportmediums durch den Wendezylinder. Aufgrund dessen kommt dieses Verfahren bevorzugt dann zum Einsatz, wenn auch der Vereinzelungsprozess diskontinuierlich arbeitet.

### **Klebstoffauftrag**

Bei aktuellen Lösungen wird der Klebstoff, mit dem die Magnete bis zum Aufbringen der Bandage fixiert werden, direkt auf die Oberfläche des Blechpakets aufgebracht. Die Führung der Klebstoffdüse kann dabei entweder durch den Roboter, der auch den Bestückprozess durchführt, oder durch ein separates Handhabungsgerät erfolgen. Soll die Applizierung des Klebers dagegen zeitparallel zum Montageprozess ablaufen, ist die Investition in ein zusätzliches Handhabungsgerät zur Ausführung des Klebstoffauftrags notwendig. Da bei der ersten Lösung nur eine sequentielle Abarbeitung der einzelnen Arbeitsschritte möglich ist, entspricht die Taktzeit der Summe der Einzelzeiten für Klebstoffauftrag und Bestückung, so dass sich insgesamt eine geringere Produktivität ergibt.

Angesichts der Defizite aktuell angewandter Verfahren besteht weiteres Potenzial zur Steigerung der Montageeffizienz bzw. zur Senkung von Investitionskosten. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren, bei denen der Kleber auf den Läufer aufgebracht wird, kann durch die Bereitstellung klebfertiger Magnetkörper eine signifikante Verkürzung der Taktzeit erreicht werden. Ermöglicht wird dies durch die Integration eines Klebstoffauftragmoduls in den Bereitstellungsprozess. Dessen Aufgabe ist es, auf die Unterseite der bereitzustellenden Magnete eine Kleberschicht aufzubringen, bevor diese vom Greifer zur Montage aufgenommen werden. Die Applizierung des Klebstoffs kann dabei durch Sprühen, Dispensen oder über eine Walze erfolgen. Besonders einfach gestaltet sich die Integration eines Klebeprozesses bei der Bereitstellung magnetisierter Magnetkörper, da diese den Einsatz von Transportkonzepten erlauben, bei denen die Magnetunterseite frei zugänglich ist.

### **Bereitstellung**

Den abschließenden Schritt des Zuführprozesses stellt die Bereitstellung der Magnete für den nachfolgenden Montageprozess dar. Um die Aufnahme der Objekte durch einen Magnetgreifer zu ermöglichen, muss in erster Linie eine ausreichende Zugänglichkeit an den Bereitstellungspunkt gewährleistet werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die Magnete in der horizontalen Ebene stets an einer fixen Relativposition vorliegen, um Toleranzen aufgrund von unpräzise bereitgestellten Einzelmagneten vorzubeugen. Dies kann in Anlehnung an konventionelle Positionierlösungen durch Anschläge realisiert werden, an die der Magnet durch die Transportbewegung oder Federelemente gedrückt wird.

Anspruchsvoller ist dagegen die Aufnahme der Gewichtskraft, insbesondere wenn die Magnete auf ihrer Unterseite bereits mit Klebstoff versehen sind. In diesem Fall ist ein

Ablegen der Magnetkörper auf einem ebenen Untergrund nicht mehr möglich, da dieser sehr schnell durch aushärtende Klebstoffreste verschmutzen würde. Zur Lösung dieser Problemstellung ist es notwendig, die Bereitstellung derart zu gestalten, dass die Klebschicht vom Zeitpunkt ihrer Applizierung bis zur Montage der Magnete auf dem Läufer unberührt bleibt. Um dies zu realisieren bietet es sich an, die Bauteile mittels weichmagnetischer Elemente zu fördern, an denen das bereitzustellende Objekt seitlich anhaftet. Dadurch ist einerseits gewährleistet, dass der Magnet nicht mehr auf die Klebschicht gesetzt werden muss, und andererseits eine gute Zugänglichkeit an die Magneto-oberseite gegeben. Da mit dieser Methode jedoch nur geringe vertikal wirkende Kräfte aufgenommen werden können, ist der Einsatz mechanischer Lagerelemente unvermeidbar. Diese sollten so ausgeführt sein, dass der Magnet nur auf einem kleinen Teil seiner Unterseite aufliegt, so dass auf der freiliegenden Fläche Klebstoff appliziert werden kann. Gleichzeitig ist bei der Werkstoffauswahl auf eine schlechte Klebeignung des Auflagermaterials in Kombination mit dem eingesetzten Klebstoff zu achten.

### **Gerätesteuerung**

Neben einer geeigneten mechanischen Auslegung ist die steuerungstechnische Vernetzung aller Funktionsmodule zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem eine übergeordnete, während der Entwicklung zu berücksichtigende Aufgabenstellung. Neben der Zustandserfassung durch Sensorabfrage und der Initiierung von Aktionen, wie bspw. des Wendeprozesses, umfasst dies auch die Steuerung des kompletten Zuführablaufs. Zudem muss eine informationstechnische Anbindung an die Steuerungen der angrenzenden Prozesse vorgesehen werden, um die Ver- und Entsorgung mit Magazinen sicherzustellen und eine koordinierte und bedarfsgerechte Bereitstellung von Magneten zu ermöglichen. Für die Realisierung effizienter Bestückanlagen ist der Einsatz einer autarken Steuerung für eine komplette Zuführeinrichtung vorteilhaft. Dies gestattet die Inbetriebnahme des Zuführprozesses, ohne dass dafür auf weitere Komponenten der Bestückanlage zugegriffen werden muss. Zur endgültigen Einbindung in die Montagezelle sind jedoch geeignete Schnittstellen vorzusehen und zu implementieren, über die die Kommunikation mit den anderen automatisierungstechnischen Teilkomponenten des Montagesystems, wie bspw. dem Bestückroboter, erfolgen kann.

## 5 Anlagenkonzepte für automatisierte Bestücklösungen

Über die beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich Prozess-, Greifer- und Zuführtechnik hinaus ergeben sich bei der automatisierten Bestückung von Permanentmagneten auch für das Produktionsumfeld neue Anforderungen und Möglichkeiten, die ebenfalls primär aus den bei der Montage präsenten Magnetfeldern resultieren. Dies beginnt bei der Bereitstellung geeigneter Peripheriegeräte, wie bspw. den bereits beschriebenen Zuführgeräten, und reicht bis zur Anwendung geeigneter Methoden für die Handhabung und den Transport magnetischer Läufer.

### 5.1 Läufertransport und -handhabung

Die Auswahl einer geeigneten Methode zur Läuferhandhabung hat großen Einfluss auf die Auslegung und Gestaltung von Bestückanlagen. Neben den unmittelbaren Auswirkungen des gewählten Handhabungskonzepts auf die Kinematik des Montagegeräts und den Bestückprozess wird dadurch auch der Aufwand für Materialfluss und Werkstückwechsel festgelegt. Grundsätzlich sind bei der Auswahl geeigneter Lösungsansätze zunächst die von vielen klassischen Montagelösungen bekannten Randbedingungen, wie bspw. Werkstückabmessungen, Stückzahlen oder Variantenreichtum, zu berücksichtigen. Zusätzlich ergeben sich jedoch aufgrund der spezifischen Produktstruktur permanent erregter Läufer und den physikalischen Eigenschaften der Dauermagnete eine Reihe weiterer Anforderungen. Diese umfassen insbesondere:

- die Erreichbarkeit der zu bestückenden Umfangsfläche durch das Handhabungsgerät
- eine feste, stabile und reproduzierbare Aufnahme und Positionierung des Rotors
- Schutz des bestückten Läufers vor Beschädigungen und Verschmutzungen
- elektromagnetische Verträglichkeit mit der Produktionsumgebung und den Anlagen
- einen effizienten Transport

Die Auswahl geeigneter Methoden zur Werkstückmanipulation hängt dabei stets sowohl von wirtschaftlichen als auch von technischen Faktoren ab. Um den vielfältigen Anforderungen industrieller Anwendungen nachzukommen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit unterschiedliche Konzepte für den Transport, die Pufferlagerung und die Handhabung von Läufern betrachtet.

#### 5.1.1 Läufertransport auf Basis von Werkstückträgern

Die Auswahl eines Transportkonzepts für die Weitergabe der Läufer von Arbeitsstation zu Arbeitsstation ist eine Kernaufgabe bei der Planung von Montagesystemen für die Läuferproduktion. Während die Festlegung des Automatisierungsgrads anwendungsspezifisch auf Basis zurückzulegender Distanzen, prognostizierter Stückzahlen und erwarteter Investitionskosten erfolgt, sind bei der Konzeption von Transport- und Monta-

gevorrichtungen die spezifischen technischen Randbedingungen der auszuführenden Fügeoperationen sowie die Bauteileigenschaften zu berücksichtigen. Dabei sind nach [64] Faktoren wie das Gewicht des Produkts, dessen Standfähigkeit, die Beschädigungsgefahr sowie eine reproduzierbare Erzeugnislage zu beachten. Die Masse der fertigen Läufer sollte bei manueller Handhabung 25 kg bei männlichem bzw. 9 kg bei weiblichem Montagepersonal<sup>8</sup> nicht überschreiten [90]. Zudem stellt die unzureichende Standfähigkeit der Rotoren ein grundlegendes Problem dar.

Aufgrund ihrer nahezu zylindrischen Außenkontur nehmen auf ebenen Flächen liegende Läufer einen labilen Zustand ein, d. h. sie beginnen bereits bei kleinsten Krafteinwirkungen wegzurollen. Das Ablegen der Läufer auf einer ebenen Transport- oder Arbeitsfläche ist somit nicht ohne geeignete Vorrichtungen möglich. Alternativ dazu besteht theoretisch die Möglichkeit den Läufer auf der Stirnfläche der Welle abzustellen. Aufgrund der axialen Vorzugsrichtung der Welle und der Lage des darauf angebrachten Blechpakets liegt der Schwerpunkt der Baugruppe dabei jedoch weit über der Auflagefläche, wodurch sich unter Produktionsbedingungen ebenfalls keine stabile Standfähigkeit realisieren lässt. Somit sind auch für die Handhabung stehender Läufer Haltevorrichtungen notwendig. Unabhängig von der Art der Läuferlagerung ist die genaue Kenntnis der translatorischen und rotatorischen Lage des Grundkörpers in Relation zum Handhabungsgerät eine elementare Voraussetzung für die Automatisierung des Bestückprozesses, die es bei der Gestaltung der Läuferlagerung (vgl. Kapitel 5.1.2) zu berücksichtigen gilt.

Grundsätzlich ist es aus Gründen der Prozesssicherheit und der Wirtschaftlichkeit von Vorteil, wenn der zu fertigende Rotor möglichst während aller Prozessschritte in einer Vorrichtung verbleibt und unnötige Handhabungsvorgänge vermieden werden. Für die Realisierung automatisierter Bestücklösungen bietet sich daher die Verwendung von Werkstückträgern für den Läufertransport an. Dabei wird durch eine Werkstückaufnahme auf dem Grundträger eine präzise und reproduzierbare Positionierung des Läufers an den Montagestationen gewährleistet. Gleichzeitig sind die empfindlichen Dauermagnete gut vor Beschädigungen und Verunreinigungen geschützt. Zudem ergeben sich durch die Grundfläche des Werkstückträgers ausreichend große Abstände zwischen den einzelnen Rotoren, so dass Probleme bei der Handhabung und der Zwischenpufferung wegen magnetischen Wechselwirkungen zwischen mehreren Läufern vermieden werden. Dies kann durch den Einsatz unmagnetischer Werkstoffe bei der Konstruktion von Werkstückträgern und Vorrichtungen weiter verbessert werden.

Der Einsatz von Werkstückträgern, der eine Grundvoraussetzung zur automatischen Verkettung der Bearbeitungsstationen ist, eignet sich auch für den manuellen Transport großer und schwerer Läufer. Dadurch kann neben einer sicheren und geschützten Lagerung sowie einer reproduzierbaren Positionierbarkeit der zu bestückenden Objekte

---

<sup>8</sup> Maximalwerte; real anzusetzende Werte abhängig von Ausführungshäufigkeit, Körperhaltung, Alter, Konstitution, etc., vgl. [90]

vor allem eine Reduzierung des Handhabungsaufwands für die Beschickung der Stationen erzielt werden.

Bei der manuellen Handhabung ohne Werkstückträger, bspw. beim händischen Beschießen eines Rundtaktautomaten mit integriertem Bestückprozess, besteht dagegen die Gefahr, dass das Montagepersonal den Rotor während des Aufnehmens oder Ablegens in eine Transportvorrichtung zu nahe an bereits abgelegten Läufern oder weichmagnetischen Maschinenkomponenten vorbei führt. Da für den Mitarbeiter keine Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung magnetischer Wechselwirkungen besteht, führen unbedacht ausgeführte Bewegungen schnell zu sehr starken Magnetkräften, die unkontrollierte Kollisionen des Rotors mit peripheren ferromagnetischen Anlagenkomponenten oder Bauteilen zur Folge haben können. Besonders kritisch ist dies beim Ablegen der magnetisierten Läufer, da hierbei sowohl vom gehandhabten als auch von bereits abgelegten Rotoren starke Magnetfelder ausgehen. Aufgrund der hohen Sprödigkeit moderner Dauermagnetwerkstoffe können daraus mechanische Beschädigungen der aufgeklebten Magnete und entsprechende Reparatur- bzw. Ausschusskosten resultieren. Deshalb sollte bei Zwischenpuffern oder Transportmagazinen für die manuelle Läuferhandhabung ein ausreichend großer Abstand zwischen den einzelnen Ablagepositionen vorgesehen werden, um die magnetischen Kräfte zwischen zwei benachbarten Läufern klein zu halten. Dabei ist zu bedenken, dass die magnetische Flussdichte und somit die Anziehungskraft mit abnehmender Distanz überproportional zunimmt [76].

Als Alternative zu entsprechend großzügig dimensionierten Puffer- und Transportmagazinen kann der Einsatz von Werkstückträgern auch beim manuellen Beschießen von Prozessstationen sinnvoll sein. So lassen sich bspw. bereits aus einfachen Rollenbahnen kostengünstig mechanisierte Transportstrecken aufbauen [120]. Da die Ausführung der Werkstückträger in diesem Fall nicht relevant für die Durchführung der Montageprozesse ist, lassen sich preiswerte Lösungen aus einer einfachen Grundplatte und zwei darauf montierten Lagerböcken aus Holz oder Kunststoff zur Unterstützung des Läufers an dessen Wellenenden anfertigen.

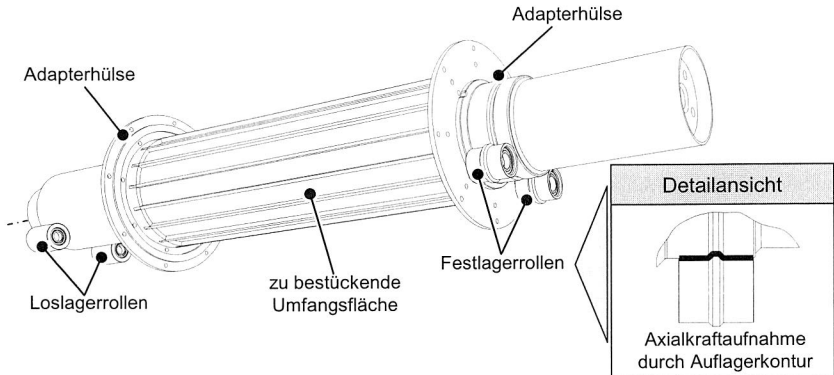
### **5.1.2 Alternativen zur Lagerung von Läufern während der Montage**

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Gestaltung von Vorrichtungen zur Werkstückaufnahme ist die Orientierung der Läuferachse während der Produktion. Dabei ist zwischen Konzepten mit vertikaler und horizontaler Orientierung der Läuferachse zu unterscheiden. Neben dem Einfluss auf die Komplexität und Auslegung von Werkstückträger und Montagevorrichtung bestimmt die Auswahl des Lagerungskonzepts zusätzlich die Anforderungen an die Kinematik des eingesetzten Handhabungsgeräts.

#### **Horizontale Läuferlagerung**

Maschinenbaulich und steuerungstechnisch anspruchsvoll zu realisieren ist das in Bild 46 gezeigte Prinzip der horizontalen Lagerung, bei dem die Läuferachse eben in einer Montagevorrichtung liegt. Da die Montage auf der Umfangsfläche des Grundkörpers durchgeführt wird, stützt sich die Rotorwelle auf beiden Seiten an Auflagern ab. Zusätz-

lich sind besonders bei kleineren, leichten Rotoren und der Bestückung mit schalen- oder brotlaibförmigen Magneten, die eine vergleichsweise große Polfläche bedecken, konstruktive Maßnahmen zur Verhinderung des Anhebens des Läufers aufgrund der magnetischen Prozesskräfte zu ergreifen. Da der Schwerpunkt des kompletten Läufers bei dieser Variante stets nur geringfügig höher liegt als die Auflagerpunkte, erlaubt diese Methode eine sichere Handhabung großer und schwerer Rotoren (Bild 46).



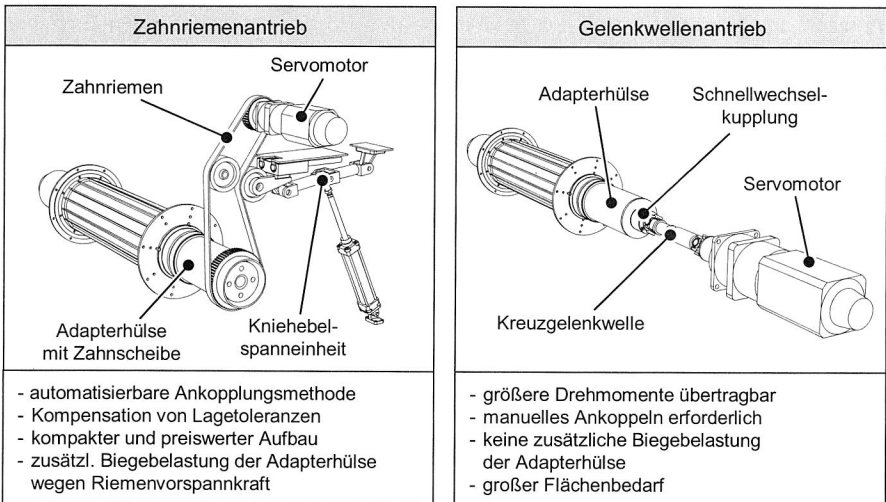
*Bild 46: Liegende Lagerung von großen Rotoren*

Durch die horizontale Ausrichtung der Läuferachse ist der obere Teil der zu bestückenden Mantelfläche sehr gut zugänglich, wohingegen eine Bestückung der unten liegenden Pole aufgrund der Montagevorrichtung und der Kinematik gebräuchlicher Handhabungsgeräte nicht möglich ist. Daher muss der Läufer drehbar gelagert werden, um die komplette Umfangsfläche des Grundkörpers erreichen zu können. Hierbei sind durch geeignete Auslegung des Montageprozesses Maßnahmen zu ergreifen, die das Herabfallen der bereits montierten Magnete während des Weitertaktens verhindern. Vorzugsweise erfolgt die Fixierung der Magnetkörper durch ein schnell härtendes Klebstoffsystem. Zur Realisierung der Rotationsbewegung innerhalb einer automatischen Bestückstation ist eine klassische Fest-Los-Lagerung erforderlich. Hierbei dient das Festlager in axialer Richtung gleichzeitig als Bezug zur Bestimmung der Ablagepunkte. Als Lagerelemente seitens der Montagevorrichtung kommen dabei abhängig vom Läufergewicht Walzen aus Kunststoff oder Stahl zum Einsatz, die gemeinsam mit der läuferseitigen, zylinderförmigen Kontaktfläche zu einer gut belastbaren Linienberührung führen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Kontakt nicht auf den Lagersitzen der Läuferwelle vorliegt, um diese vor mechanischen Beschädigungen zu schützen.

Die automatische Ausführung der eigentlichen Drehbewegung des Rotors verlangt zudem nach dem Einsatz eines Positionierantriebs, der mit dem Prozessablauf des bestückenden Handhabungsgeräts synchronisiert sein muss. Zwar ist es aus technischer Sicht möglich, jeden einzelnen Werkstückträger mit einem eigenen Positionierantrieb zu versehen, jedoch führt dies sehr schnell zu unverhältnismäßig hohen Anschaffungskosten für



eine große Anzahl benötigter Antriebe. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines stationären Stellantriebs, der während des Bestückvorgangs temporär an den Läufer gekoppelt wird, vorzuziehen. Grundlegende Bedeutung kommt dabei der Auswahl einer geeigneten Methode zur Ankopplung des Läufers an den Positionierantrieb zu. Neben der Möglichkeit, den Koppelvorgang automatisiert durchführen zu können, ist dabei vor allem eine schlupffreie Übertragung des Drehmoments vom Antrieb an den Läufer notwendig. Die Kupplung muss sehr steif ausgeführt sein, um Ungenauigkeiten beim Bestückprozess aufgrund elastischer Verformungen der Kupplungselemente auszuschließen. In Bild 47 sind beispielhafte Konzepte zur Ankopplung von liegend gelagerten Läufern sowie deren spezifische Eigenschaften zusammengefasst.



**Bild 47:** Alternative Konzepte zur Ankopplung großer Läuferwellen an den Positionierantrieb in automatischen Bestückstationen

Bei der Auslegung von Positionierantrieb und Kupplung sind neben der geforderten Dynamik auch prozessspezifische Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Insbesondere die während des Fügeprozesses auftretenden tangentialen Kraftkomponenten können zu Drehmomenten führen, die durch den Positionierantrieb zu kompensieren sind. Um einer Veränderung des Drehwinkels vorzubeugen, muss der Positionierantrieb deshalb ein entsprechend hohes Haltemoment aufweisen. Alternativ dazu ist der Einsatz einer separaten Bremsvorrichtung möglich, die unmittelbar auf den Rotor wirkt und diesen nach jedem Positioniervorgang fest fixiert. Darüber hinaus kann es bei einer ungünstigen Bestückreihenfolge zu statischen Unwuchten kommen, die ebenfalls zu einer ungewünschten Veränderung des Drehwinkels aufgrund elastischer Verformungen in den Übertragungselementen führen können. Eine Kompensation dieser Fehlerursache kann entweder durch die Anpassung der Bestückreihenfolge oder durch den Einsatz eines zusätzlichen Lagegebers, der direkt an die Läuferwelle gekoppelt ist, erfolgen.

Ein weiteres Problem, das sich aus dem Konzept der liegenden Läuferlagerung ergibt, ist die undefinierte rotative Lage des Blechpakets unmittelbar nach dem Ankoppeln. Um die Nulllage des Rotors zu ermitteln, ist daher vor dem Start jedes Montagezyklus die Durchführung einer Referenzfahrt notwendig. Als Referenzmarken eignen sich grundsätzlich alle Geometriemerkmale des Läufers, die eindeutige Rückschlüsse auf die relative Lage der Pole zulassen und deren Winkelversatz zum Koordinatensystem (Korrekturwinkel) des Blechpakets bekannt ist. Besonders günstig ist es dabei, den Steg der Poltrennung zwischen zwei benachbarten Polen als Referenzmarke heranzuziehen, da deren Relativposition zu den Polflächen fertigungsbedingt keinen nennenswerten Toleranzeinflüssen unterliegt. Die Auswertung des Bezugspunkts erfolgt dabei mittels eines Sensors, dessen Signal von der Steuerung der Bestückstation ausgewertet wird. Durch Addition des Korrekturwinkels zur Winkellage des Positionierantriebs beim Erreichen der Referenzmarke kann die aktuelle Läuferlage somit in das Koordinatensystem der Bestükanlage transformiert werden.

Ein wesentlicher Vorteil der horizontalen Läuferlagerung liegt darin, den Rotor selbst während des Bandagierens in der Montagevorrichtung im Werkstückträger zu belassen. Analog zu dem für das Bestücken notwendigen Positionierantrieb ist hierfür lediglich ein ausreichend starker Wickelantrieb an den Läufer anzukoppeln, dessen Drehmoment zur Erzeugung der geforderten Vorspannkraft ausreicht. Dadurch wird die Anzahl nicht wertschöpfender Handhabungstätigkeiten, wie die Entnahme des Läufers aus dem Werkstückträger und das Einlegen in die Bandagierstation, vermieden. Zudem gestaltet sich die Programmierung des Handhabungsgeräts einfach, da die Bestückbewegung für jede Magnetreihe eines Läufers dieselbe ist. Damit geht ein verringertes Risiko von Beschädigungen während der Ausführung dieser Schritte einher. Demgegenüber stellen die aufwändige Konstruktion des Werkstückträgers, die komplizierte mechanische Kopplung des Läufers an den Positionierantrieb sowie die komplexe steuerungstechnische Erkennung und Auswertung der Läuferlage die Nachteile dieser Methode dar.

### **Vertikale Läuferlagerung**

Mit deutlich weniger Realisierungsaufwand verbunden ist dagegen die stehende Läuferlagerung, bei der der Läufer während der Magnetmontage mit einem Wellenende aufrecht in einer Montagevorrichtung steht. Die zu bestückende Fläche entspricht in diesem Fall vereinfacht der Mantelfläche eines senkrecht stehenden Zylinders. Da die Hauptbestückbewegung zum Ablegen der Einzelmagnete stets radial zur Läuferachse erfolgt, ist eine gute Zugänglichkeit bei dieser Methode auch ohne einen separaten Positionierantrieb gegeben. Um auch gegenüber den während des Bestückprozesses radial und tangential zur Läuferachse angreifenden Magnetkräften eine hohe Standssicherheit zu gewährleisten, ist bei dieser Lösung in Abhängigkeit von der Läuferlänge ein ausreichend großer Werkstückträger notwendig. Allerdings erfordert die Bestückung langer, stehender Rotoren große Hubbewegungen des Handhabungsgeräts, die die Möglichkeiten heutiger Standardroboter überschreiten.

Da die einzelnen Magnetkörper bei diesem Konzept auf der senkrecht stehenden Mantelfläche abgelegt werden sollen, müssen sie unmittelbar nach Aufhebung der Greifkraft gegen Herabfallen gesichert werden. So ist es zwar grundsätzlich möglich, einen montierten Magnet solange an der Ablageposition zu fixieren, bis die Haltekraft des eingesetzten Klebstoffs ausreicht, um die Gewichts- und vor allem die Prozesskräfte aufzunehmen. Dies führt jedoch zu sehr langen Taktzeiten, so dass diese Methode wirtschaftlich unattraktiv ist (vgl. Kapitel 4.2.1). Stattdessen bietet es sich bei der Montage magnetisierter Magnete an, die ohnehin vorhandenen Anziehungskräfte zwischen Einzelmagnet und Blechpaket zur Fixierung heranzuziehen. Die Randbedingungen, die für die Nutzung dieses Effekts zu berücksichtigen sind, werden in Kapitel 7.1 ausführlich erläutert.

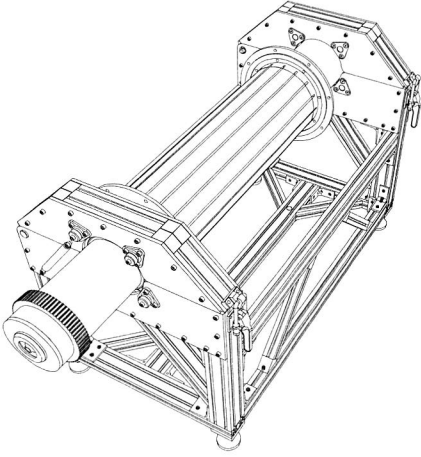
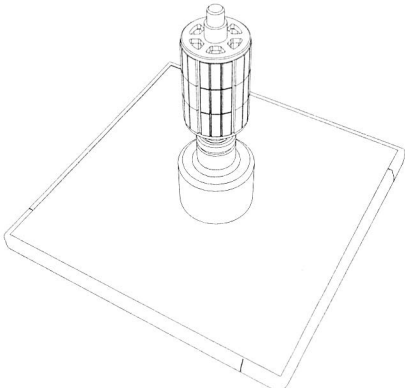
Abhängig von der Anzahl der zu bestückenden Läufervarianten ist die Montagevorrichtung zur Aufnahme unterschiedlicher Wellengeometrien entsprechend flexibel zu gestalten. Ein mögliches, mechanisch jedoch vergleichsweise aufwändiges Konstruktionsprinzip für die Gestaltung variantenflexibler Werkstückträger liegt in der Verwendung beweglicher Spannbacken [42]. Im Gegensatz dazu stellt die Aufnahme der Läuferwelle in einem Formnest eine sehr einfach zu realisierende Alternative dar. Angesichts der Zugehörigkeit eines Bohrungsdurchmessers zu der korrespondierenden Welle muss für jede aufzunehmende Läufervariante eigens eine passende Kontur in die Werkstückhalterung eingebracht werden, so dass diese Methode deutlich unflexibler als die erstgenannte ist.

Hinsichtlich der Programmierung des den Bestückvorgang ausführenden Handhabungsgeräts ist es von Vorteil, wenn die stehende Lagerung unterschiedlicher Läufervarianten koaxial erfolgt. In diesem Fall erfordert die programmiertechnische Einbindung neuer Läufergeometrien lediglich die Anpassung des Läuferdurchmessers und die vertikale Verschiebung des ersten Bestückpunkts in Relation zum Koordinatensystem des Roboters. Im Gegensatz dazu sind bei Lagerungskonzepten, bei denen die Achsen unterschiedlicher Läuferarten zwar parallel zueinander liegen aber nicht übereinstimmen, die sich durch den Achsversatz unterschiedlicher Varianten ergebende Verschiebung der Ablagepunkte bei der Programmierung des Handhabungsgeräts zu berücksichtigen.

Lösungen mit stehendem Läufer ermöglichen einen sehr einfachen Aufbau von Bestücksystemen und sind nur bei der Bestückung mit angeregten Magneten wirtschaftlich darstellbar. Aufwändige Koppellemente und Positionierantriebe sowie deren steuerungstechnische Einbindung in die Gesamtanlage können bei dieser Methode wegen des feststehenden Läufers entfallen. Zudem wird der Einsatz flexibler und kostengünstiger Standardroboter, die über genügend Freiheitsgrade zur Ausführung des Bestückprozesses verfügen, möglich (vgl. Kapitel 5.2). Da die Programmierung des Bestückablaufs bei dieser Art der Lagerung vorzugsweise in Form von Zylinderkoordinaten erfolgt, kommt der präzisen Bestimmung der Relativposition der Läuferachse im Roboterkoordinatensystem große Bedeutung zu. Die Tatsache, dass der bestückte Rotor zur Bandagierung entnommen werden muss und somit unnötiger Handhabungsaufwand anfällt, stellt das größte Defizit dieses Prinzips dar.

## Gegenüberstellung der Lagerungskonzepte

In die Auswahl eines geeigneten Lagerungskonzepts sind vor allem die geometrischen Abmessungen der Rotoren sowie das Stückzahl- und Variantenspektrum mit einzubeziehen. Darüber hinaus sind dabei aber auch die spezifischen Vor- und Nachteile beider Alternativen zu berücksichtigen, die ebenfalls erheblich zur Realisierung von Kostensenkungen beitragen können. Die wesentlichen Aspekte beider Lagerungskonzepte sind in Tabelle 8 nochmals gegenübergestellt. Die im Rahmen der Arbeit beispielhaft umgesetzten Lösungen beider Lagerungskonzepte werden in Kapitel 6 näher beschrieben.

Horizontale Läuferlagerung	Vertikale Läuferlagerung
	
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- geeignet für große und schwere Läufer</li> <li>- Verbleib des Läufers im Werkstückträger bis zum Abschluss der Bandagierung</li> <li>- einfache Programmierung</li> </ul> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- komplexer mechanischer Aufbau</li> <li>- hoher Antriebs- und Steuerungsaufwand</li> </ul>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung von Standardrobotern möglich</li> <li>- einfacher mechanischer Aufbau</li> <li>- geeignet für automatisierte Materialflusssysteme</li> </ul> <p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- beschränkt auf kurze Läufer</li> <li>- Verlaufen des Klebstoffs möglich</li> </ul>

**Tabelle 8:** Vor- und Nachteile alternativer Lagerungskonzepte mit liegend und stehend gelagerten Läufern

## 5.2 Kinematiken und Handhabungsgeräte für flexible Bestückstationen

Einen weiteren wichtigen Arbeitsschritt bei der Planung von automatisierten Bestückanlagen stellt die Auswahl geeigneter Handhabungsgeräte dar. Angesichts der zylindrischen Form der zu bestückenden Fläche muss die von Roboter und Lagerungskonzept abhängige Gesamtkinematik der Bestückanlage einen ausreichenden Zugang an den kompletten Läuferumfang gestatten. Darüber hinaus sind bei der Auswahl eines Bewegungsautomaten zur Durchführung des Fügeprozesses die spezifischen Anforderungen zu berücksichtigen, die sich aus der Präsenz der starken Magnetfelder ergeben.

### 5.2.1 Kinematische Ketten von Bestückanlagen

Bei der Auslegung von Bestückanlagen nimmt die Planung der kinematischen Kette eine wichtige Rolle ein. Die Anzahl der zur Durchführung des Bestückens erforderlichen Freiheitsgrade hängt in erster Linie von den Anforderungen an die Flexibilität des Montagesystems ab. Die Anpassungsfähigkeit der Kinematik wird dabei durch folgende geometrischen Merkmale der Läufer bestimmt:

- Spektrum zu bestückender Läuferdurchmesser
- kleinste und größte Höhe der zu bestückenden Umfangsfläche
- Maß- und Formvariationen der eingesetzten Magnetkörper
- axiale Relativposition der Ablageflächen in Bezug zum Werkstückträgerkoordinatensystem bei unterschiedlichen Läufern
- Bereitstellungspositionen verschiedener Magnetvarianten

Die Anforderung an die Beweglichkeit von Systemen zur Automatisierung des Bestückprozesses ergibt sich aus den durchzuführenden Einzelarbeitsschritten. Dies beginnt bei der Aufnahme eines Magnets vom Zuführgerät. Dabei ist der Greifer zunächst über dem zu greifenden Objekt zu platzieren und dann senkrecht auf dieses herabzubewegen. Analog dazu erfolgt nach dem Aufbau der Greifkraft das vertikale Anheben des Werkstücks von der Aufnahmeposition weg. Anschließend muss der Magnet in die Nähe des Ablagepunkts transportiert werden. Die Ausführung des eigentlichen Fügeprozesses erfordert abhängig von der Komplexität des Montagefalls bis zu drei Freiheitsgrade, die sich aus je einer radial, transversal und tangential zur Läuferachse gerichteten Bewegung zusammensetzen. Darüber hinaus ist zum Erreichen der kompletten zu bestückenden Umfangsfläche eine weitere Achse notwendig. Unabhängig vom gewählten Lagerungskonzept für den Läufer wird diese dazu benötigt, die rotatorische Lage des Bestückwerkzeugkoordinatensystems relativ zum Rotor zu verändern. Dies schließt sowohl die Ausrichtung des am Handhabungsgerät montierten Greifers radial zur Läuferachse bei stehendem Rotor als auch die Lageveränderung der zu bestückenden Baugruppe bei liegend gelagertem Läufer ein. Die beiden grundlegenden kinematischen Ketten für Anlagen zur Läuferbestückung sind in Bild 48 dargestellt.

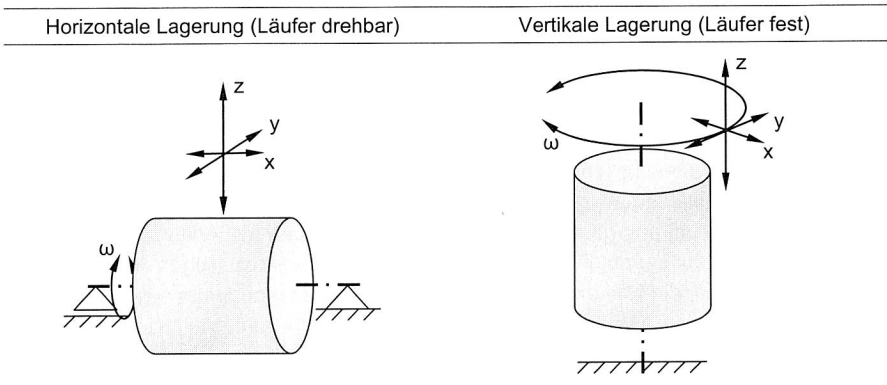


Bild 48: Alternative Kinematiken zur flexiblen Bestückung von Dauermagnetläufern

In Sonderfällen kann darüber hinaus der Einsatz von bis zu drei weiteren Achsen erforderlich sein, wenn die Ausrichtung der Magnetkörper bei der Aufnahme nicht dieselbe ist wie bei deren Ablage. Dies ist bspw. dann der Fall, wenn die Einzelmagnete liegend bereitgestellt werden und auf einem stehenden Läufer zu platzieren sind.

### 5.2.2 Dimensionierung von Handhabungsgeräten

Um gegenüber aktuellen Montagekonzepten eine aus technischer und wirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähige Alternative darzustellen, müssen die zur Bestückung eingesetzten Handhabungsgeräte zum einen die benötigte Beweglichkeit bieten und zum anderen eine hohe Bestückleistung ermöglichen. Abhängig von der Art der Läuferlagerung (vgl. Bild 48) sind durch das Handhabungsgerät mindestens drei (liegender Rotor) bzw. vier (stehender Rotor) Freiheitsgrade bereitzustellen.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Geräteauswahl ist die mechanische Steifigkeit der kinematischen Kette. Aufgrund der exponentiellen Zunahme der magnetischen Anziehungskräfte unmittelbar vor dem Aufsetzen des Magnets auf den Läufer kommt es über sehr kurze Verfahrswege zu einem starken Anstieg der resultierenden Prozesskraft, die zu einer elastischen Verformung des eingesetzten Handhabungsgeräts führen kann. Besonders kritisch ist dies in den Fällen, in denen der Hebel zwischen dem Kraftangriffspunkt und der Lagerstelle sehr groß ist, wie bspw. bei voll ausgefahrener z-Achse. Eine ausschließliche Berücksichtigung der vom Hersteller angegebenen Nenn- und Maximallasten ist daher für die Auswahl von Bestückgeräten nicht ausreichend. Vielmehr muss sichergestellt sein, dass die Kinematik über eine ausreichende Biege- und Torsionssteifigkeit verfügt und der Montageprozess durch die von den Magnetkräften herrührenden elastischen Verformungen nicht beeinträchtigt wird. Als besonders kritisch gilt dabei die Bestückung einer Magnetreihe zwischen zwei vorher montierten Reihen gleicher Magnetisierungsrichtung, da hier die Gefahr besonders groß ist, dass der zu montierende Magnet an einem der bereits abgelegten Magnete anhaftet.

## Handhabungsgeräte für liegend gelagerte Läufer

Für die Bestückung liegend gelagerter Läufer bietet sich die Verwendung von Geräten mit translatorischen Hauptachsen an. Diese Bauform verfügt über einen quaderförmigen Arbeitsraum, in dem sich alle zur automatischen Bestückung benötigten Systemkomponenten, wie bspw. die Teilebereitstellung oder ein Greiferwechselsystem, und der Rotor besonders günstig anordnen lassen. Der Verfahrensbereich der x-Achse ergibt sich, wie in Bild 49 links dargestellt, aus der maximal zu bestückenden Länge sowie dem zur Durchführung des Fügeprozesses benötigten Zusatzraum, z. B. für das Abscheren bei der Verarbeitung von Magneten der Länge  $l_M$  aus einem Stapel. Maßgeblich für die Dimensionierung der y-Achse sind dagegen der größtmögliche Läuferdurchmesser  $d_{max}$ , der Abstand des Bereitstellungspunkts vom Läufer (mind. zweifache Magnethöhe  $h_M$ ) sowie die Tiefe  $t_b$  der Magnetbereitstellungsfläche. Der benötigte z-Hub resultiert aus der Höhe des zur Durchführung der Fügeoperation benötigten Raums über der Läuferoberfläche (ca. 5-fache Magnethöhe) sowie den zu bestückenden Durchmessern  $d_{min}$  und  $d_{max}$ .

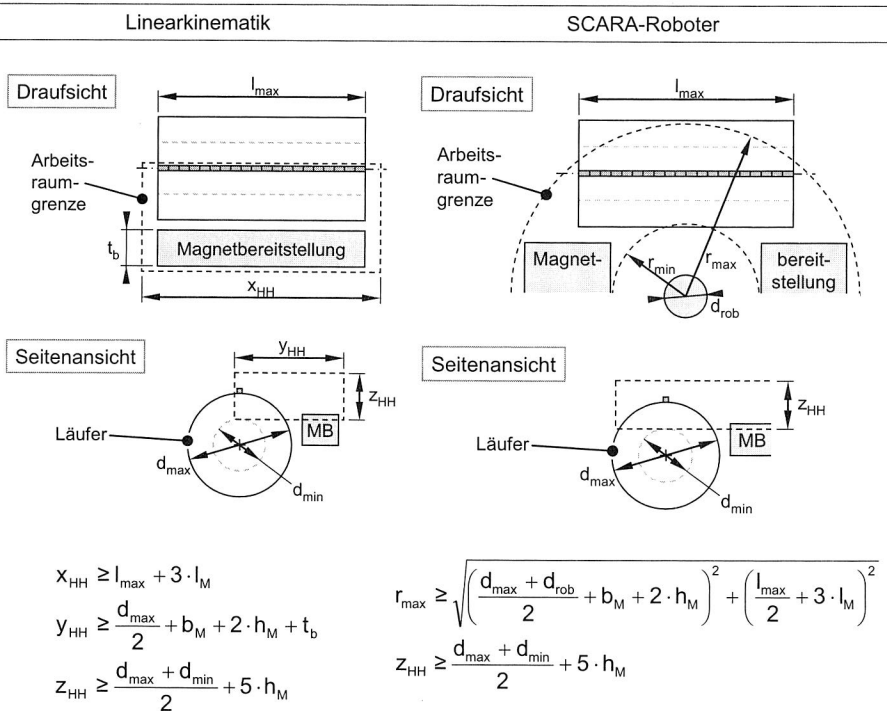


Bild 49: Arbeitsraumdimensionen zur Bestückung liegend gelagerter Läufer

Im Gegensatz dazu ist bei SCARA- oder Sechssachsrobotern nur ein kleiner Teil des Arbeitsraums zur Verrichtung der eigentlichen Montageaufgabe nutzbar. Wie in Bild 49 rechts am Beispiel eines SCARA-Roboters gezeigt, ist bei der Geräteauswahl die Armlänge abhängig vom Längenbereich der zu bestückenden Reihen sowie vom Läuferdurchmesser zu wählen. Die Bestimmung des erforderlichen z-Hubs erfolgt bei der SCARA-Bauform analog zu Linearsystemen. Die benötigten Peripheriegeräte, wie Zuführvorrichtungen oder Greiferwechselsysteme, können bei Standardrobotern mit vorwiegend rotatorischen Achsen seitlich neben dem Aufstellort im Arbeitsraum angeordnet werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass aus einer derartigen Konfiguration zwischen Magnetbereitstellung und Ablagepunkt lange Greifwege zurückzulegen sind, was zu einer Verschlechterung der Zykluszeiten führt.

Eine Sonderlösung stellt die Verwendung von Parallelkinematiken, wie bspw. von Tri- oder Hexapoden, dar. Geräte dieser Bauart verfügen über zylindrische Arbeitsräume und zeichnen sich durch hohe Beschleunigungen und schnelle Bewegungsgeschwindigkeiten aus. Da sich im Gegensatz zu seriellen Kinematiken in diesem Fall die Positionierfehler der einzelnen Achsen nicht addieren, ermöglichen sie zudem eine hochgenaue Ablage von Dauermagnetkörpern.

Die Eigenschaften von Handhabungsgeräten bzgl. der automatischen Läuferbestückung hängen stark von deren kinematischer Kette ab. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Robotertypen im Rahmen einer Simulationsstudie auf ihre Zweckmäßigkeit zur Bestückung liegend gelagerter Rotoren untersucht. In Tabelle 9 ist die Eignung der wichtigsten Industrieroboterbauarten für diese Montageaufgabe gegenübergestellt.

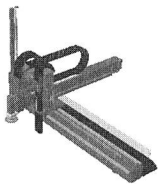
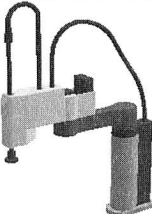

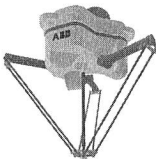
Bauform	Linearroboter	SCARA-Roboter	6-Achs-Roboter	Parallelroboter
				
Arbeitsraum	●	◐	◐	◐
Steifigkeit	◐	◐	◐	●
Zykluszeit	◐	◐	◐	●
Beweglichkeit	◐	◐	●	◐

Tabelle 9: Eignung der wichtigsten Roboterbauformen für die automatisierte Läuferbestückung

Grundsätzlich ist bei der Auswahl von Handhabungsgeräten zur Bestückung liegend gelagerter Läufer darauf zu achten, dass eine zusätzliche Positionierachse für die Läufermanipulation mit wenig Aufwand in die Steuerung integriert werden kann. Dabei ist es unerheblich, ob die Sollwertvorgabe von der Robotersteuerung über analoge ( $\pm 10$  V)



oder digitale Kommunikationsschnittstellen, wie bspw. SERCOS, Industrial Ethernet, PROFI- oder CAN-Bus, erfolgt.

### Handhabungsgeräte für feststehende Läufer

Der Aufwand für die Integration einer zusätzlichen Handhabungsachse entfällt bei der Bestückung stehender Läufer. Somit ist die Bestückung einfach und kostengünstig mit Standardrobotern ohne Zusatzachsen umsetzbar. Allerdings wirken die radialen Anziehungskräfte in diesem Fall in der x-y-Ebene des Roboters, was zu höheren Anforderungen an dessen Steifigkeit führt. Um den in Bild 48 dargestellten Bewegungsablauf umzusetzen, muss das eingesetzte Handhabungsgerät über mindestens vier Freiheitsgrade verfügen. Somit eignen sich Portalroboter mit einer rotatorischen Handachse sowie SCARA-Geräte besonders für dieses Montagekonzept. Die zur Arbeitsraumdimensionierung erforderlichen Zusammenhänge für Montagegeräte zur Bestückung stehender Läufer sind in Bild 50 zusammengefasst.

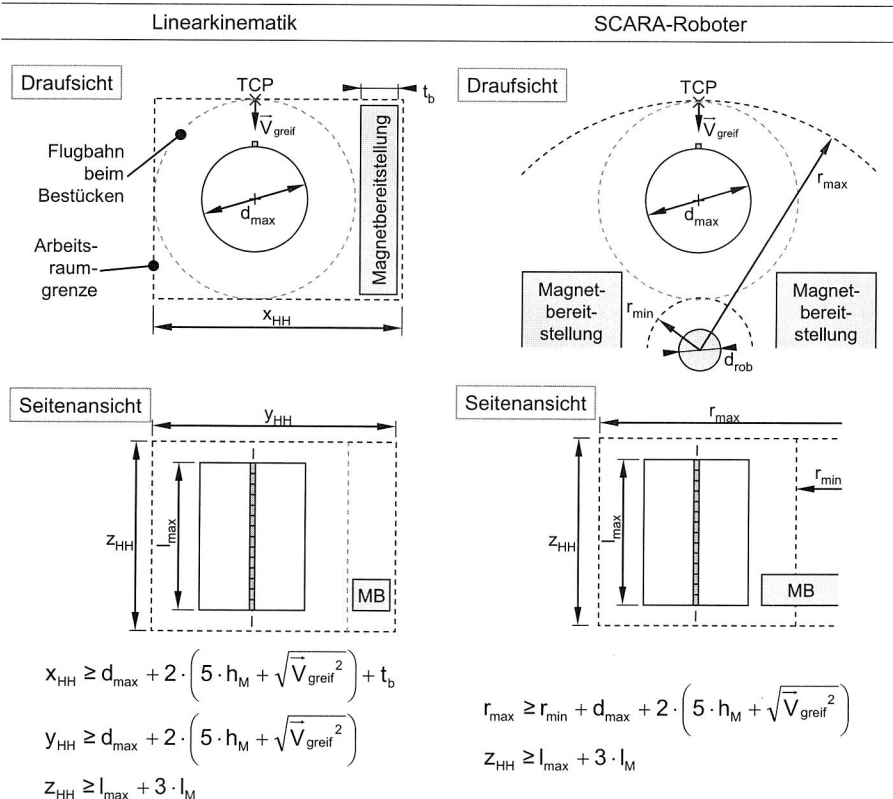


Bild 50: Dimensionierung von Handhabungsgeräten zur Bestückung stehender Läufer

Bei der Dimensionierung des Arbeitsraums ist vor allem die Länge der zu bestückenden Läufer zu berücksichtigen. Da die meisten Standardgeräte beider Bauarten nur über einen z-Hub von maximal 400 mm verfügen, ist eine Bestückung stehend gelagerter Läufer mit einer zu bestückenden Länge von mehr als 350 mm nur noch mit Sonderkonstruktionen möglich. Zudem treten bei derart großen Hübten vor allem bei SCARA-Geräten durch die Magnetkräfte starke Verformungen der Hubachse auf. Somit ist dieses Maß als technisch sinnvolle Obergrenze für das Prinzip der stehenden Läuferlagerung anzusehen. Die Auswahl der benötigten Armlänge  $r_{\max}$  bzw. Grundfläche hängt dabei - neben dem Durchmesser des Läufers - von der Länge des Verschiebungsvektors  $V_{\text{greif}}$  in der x-y-Ebene ab. Dieser Korrekturwert beschreibt den Versatz, der sich aufgrund der konstruktiven Ausführung des Greifers zwischen dem Tool-Center-Point (TCP) des Roboters und der eigentlichen Greiffläche ergibt. Weiterhin ist auch bei diesem Konzept ein ausreichender Abstand zwischen Läuferoberfläche und Greifer vorzusehen, der mindestens der fünffachen Magnethöhe entsprechen sollte. Da der Greifer während des Bestückprozesses auf einer zur Rotorachse konzentrischen Bahn bewegt wird, gehen diese beiden Werte doppelt in die Berechnung der Armlänge ein.

## **6 Beispielhafte Umsetzung automatisierter Bestückanlagen**

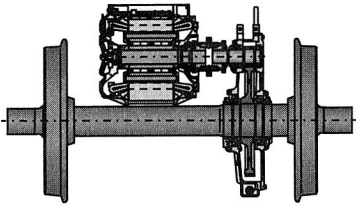
Angesichts des breiten Spektrums der Produktpalette permanent erregter Motoren ist eine pauschale Auswahl einer einzelnen, grundsätzlich zu favorisierenden Lösung nicht möglich. Die Planung und Realisierung leistungsfähiger Bestücksysteme erfordert vielmehr eine differenzierte Betrachtung potenzieller Anlagenkonzepte, bei der unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und technischer Rahmenbedingungen geeignete Teilkomponenten zu einem effizienten Gesamtsystem zusammengesetzt werden müssen. Um die industrielle Anwendbarkeit der beschriebenen Lösungsvorschläge nachzuweisen, wurden im Rahmen der Arbeit zwei automatisierte Montagezellen für unterschiedliche Produkte erarbeitet und prototypisch umgesetzt. Dabei handelt es sich zum einen um eine Anlage zur Bestückung großer, permanent erregter Fahrmotorläufer für Traktionsantriebe und zum anderen um eine Roboterstation zur Montage von Permanentmagneten auf kompakte Servomotorläufer.

### **6.1 Montagezelle für große Fahrmotorläufer**

Wie bereits eingangs beschrieben, stellt die Entwicklung permanent erregter Traktionsantriebe derzeit einen richtungsweisenden Trend im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik dar. Aufgrund des neuen Konstruktionsprinzips, das diesen innovativen Produkten zugrunde liegt, ergeben sich im Vergleich zu den konventionellen Asynchronmotoren neue Arbeitsinhalte für die Produktion dieser Maschinen. Dies gilt insbesondere für die zur Herstellung der Rotoren durchzuführenden Arbeitsschritte. Während sich einerseits eine Vereinfachung der Produktstruktur durch den Wegfall von Läuferwicklungen ergibt, stellt die Verarbeitung von Permanentmagneten neue Herausforderungen für Planer und Montagepersonal dar.

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Traktionsmaschinenläufern handelt es sich um große zylinderförmige Bauteile. Um die geforderte Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten zu erreichen, erfolgt die Aufnahme der auf die Magnete wirkenden Betriebskräfte durch eine Kunstfaserbandage. Neben den hohen Massen von bis zu 1.100 kg sind die Abmaße der unterschiedlichen Läufervarianten bei der Planung einer automatischen Bestückanlage zu berücksichtigen. Die mit 1.000 bis 2.500 Einzelmagneten zu bestückenden polygonalen Umfangsflächen haben variantenabhängig eine Höhe von bis zu 820 mm und einen Durchmesser zwischen 250 mm und 600 mm. Handelt es sich um einen Motor mit achsreitendem Läufer (Läuferwelle ist gleichzeitig Fahrzeugachse), muss die Radachse vor der Magnetbestückung bereits aufgeschruppft sein, da ansonsten die zum Fügen notwendige thermische Belastung zur Zerstörung der Klebverbindungen Magnet-Läufer und der Kunststoffmatrix der Bandage sowie zur Entmagnetisierung der Magnete führen kann. Bei Läufern für Hohlwellenantriebe (Bild 51 rechts) handelt es sich dagegen vereinfacht um ein Rohr, bei dem ein Großteil der Umfangsfläche mit Dauermagneten zu versehen ist.

**Stand der Technik:**  
Asynchronmotor mit Getriebe



Wirkungsgrad	88 %
Masse	100 %
Geräusch	105 dB (A)

**Innovation:**  
PM-Motor als Direktantrieb

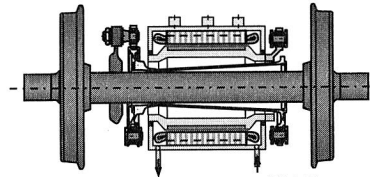


Bild: Siemens

Wirkungsgrad	94 %
Masse	70 %
Geräusch	90 dB (A)

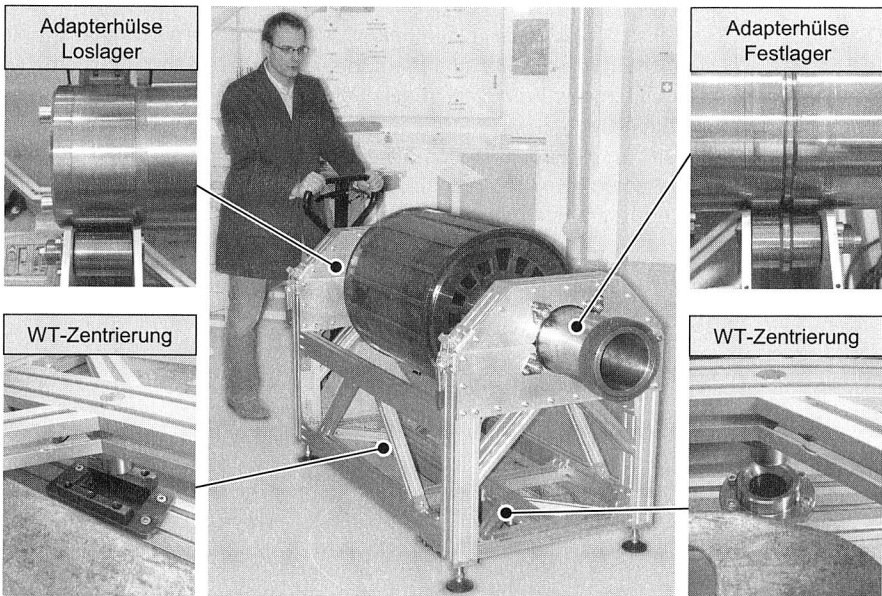
*Bild 51: Gegenüberstellung eines konventionellen Asynchrongetriebemotors mit einem permanent erregten Hohlwellendirektantrieb nach [49] und [58]*

Der prognostizierte Bedarf an Maschinen dieses Typs liegt bei über 2.000 Stück pro Jahr, wobei die verschiedenen Varianten Nachfrageschwankungen unterliegen können. Dies führt zu einer jährlich zu bestückenden Magnetmenge von mehr als vier Millionen Stück, deren manuelle Bestückung angesichts der damit verbundenen Arbeitskosten an Hochlohnstandorten nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Die Bestückung mit unmagnetisierten Magnetkörpern erfordert dagegen die Beschaffung einer Impulsmagnetisierungsanlage mit variantenspezifischen Magnetisierköpfen, was zu immensen Investitionskosten führt und somit ebenfalls keine ökonomische Lösung ist (vgl. Kapitel 8).

### Transport-/Lagerungskonzept und Zellenlayout

Angesichts der großen Dimensionen und Massen müssen die Läufer liegend transportiert und bearbeitet werden. In der industriellen Praxis erfolgt die Handhabung von derart schweren und großen Werkstücken bei den genannten Stückzahlen in der Regel hängend an Handkränen oder Manipulatoren, die von den Mitarbeitern bedient werden. Zwar bietet dieses Verfahren ein hohes Maß an Flexibilität, jedoch lassen sich die Objekte nur vergleichsweise langsam bewegen. Zudem ist der Bewegungsradius, innerhalb dessen ein Aufnehmen und Ablegen möglich ist, durch den Aktionsbereich des Krans baulich vorgegeben und somit begrenzt. Dabei setzt sich ein einziger Handhabungsprozess, wie bspw. das Einlegen oder Entnehmen eines Läufers in die Bestückstation, aus einer Vielzahl einzelner Arbeitsschritte zusammen, so dass diese Methode insgesamt als aufwändig und ineffizient zu bewerten ist. Des Weiteren ist es nach der Entnahme eines Bauteils aus der Bestückstation zunächst erforderlich, dieses entweder an einem Pufferlagerplatz oder gleich in der nächsten Bearbeitungsstation abzulegen, bevor der Bestückautomat erneut beschickt werden kann. Dies führt zu langen Stillstandszeiten des Bestückroboters und somit zu einer geringen Auslastung.

Diese Nachteile können durch ein Lager- und Transportkonzept vermieden werden, das gleichzeitig zum Transport unterschiedlicher Läufervarianten sowie zu deren Manipulation in der Bestückzelle und den weiteren Montagestationen dient. Die Integration der Funktionen Positionieren und Befördern in einer Vorrichtung gestattet es, die Werkstückwechselzeiten gegenüber der kranunterstützten Handhabung um etwa 50 % zu verringern. Gleichzeitig schützt die in Bild 52 dargestellte Vorrichtung die empfindlichen Magnete vor Beschädigungen durch Unachtsamkeiten beim Transport. Ein weiterer Vorteil ergibt sich für die Lagerung der Rotoren zwischen zwei Prozessen, da bei dieser Methode keine ortsfesten Lagereinrichtungen notwendig sind. [55]



**Bild 52:** Flexible Transport- und Montagevorrichtung zur effizienten Handhabung großer Fahrmotorläufer mittels Hubwagen

Um unnötigen Handhabungsaufwand zu vermeiden, ist der Werkstückträger so konstruiert, dass der Transport mit einem Hubwagen erfolgen kann. Zur Aufnahme der Rotoren sind in den Grundaufbau zwei Lagerstellen mit je vier Walzen integriert, auf denen die zu bestückenden Bauteile abgelegt werden und drehbar gelagert sind. Da die Anordnung der Walzen auf dem Werkstückträger geometrisch fest definiert ist, erfolgt die Anpassung der Werkstücke an die Lagergeometrie durch universelle Adapterelemente, die vor dem Einlegen am Läufer befestigt werden. Diese Komponenten sind je einmal als Fest- und Loslager ausgeführt und weisen an den Auflagerflächen standardisierte Anschlussmaße auf. Festlagerseitig erfolgt die Aufnahme eventuell beim Drehen auftretender Transversal- oder Axialkräfte durch eine geeignete Konturierung von Lagerwalze und Adapterhülse (Bild 52 rechts oben), so dass eine translatorische Verschiebung des

Läufers während der Durchführung von Arbeitsschritten ausgeschlossen ist. Gleichzeitig ist die festlagerseitige Adapterhülse als Kupplungselement ausgeführt, an dem der stationsseitige Positionierantrieb angekoppelt wird. Der Ausgleich der Längendifferenz unterschiedlicher Varianten erfolgt durch das Adapterelement am Loslager (Bild 52 links oben), das über die komplette Länge über den entsprechenden Anschlussdurchmesser verfügt und somit axial verschiebbar ist. Um eine reproduzierbare Positionierung des Werkstückträgers in Bezug zum Roboter zu gewährleisten, sind an der Unterseite des Grundgestells zwei Zentrierbolzen angebracht, die beim Absenken des Hubwagens in Kombination mit den stationsseitig eingebrachten Zentrierbuchsen die Feinpositionierung des Werkstückträgers vornehmen (Bild 52 rechts und links unten). [55]

Die Basis der Bestückstation bildet eine u-förmige Werkstückträgeraufnahme. Sie ist fest mit dem Hallenboden verschraubt und dient zur lagegenauen, reproduzierbaren Positionierung und Fixierung der Werkstückträger. Der am Kopfende des Grundgestells montierte Rahmen trägt neben einem PM-Servomotor zur Läufermanipulation auch eine Kniehebelspanneinheit zur Ankopplung des Läufers an den Antrieb (Bild 53). Die Übertragung der Positionierbewegung erfolgt durch einen Zahnriemen, der über eine zur präzisen Bewegungsausführung ausreichend hohe Steifigkeit verfügt. [28] [51]

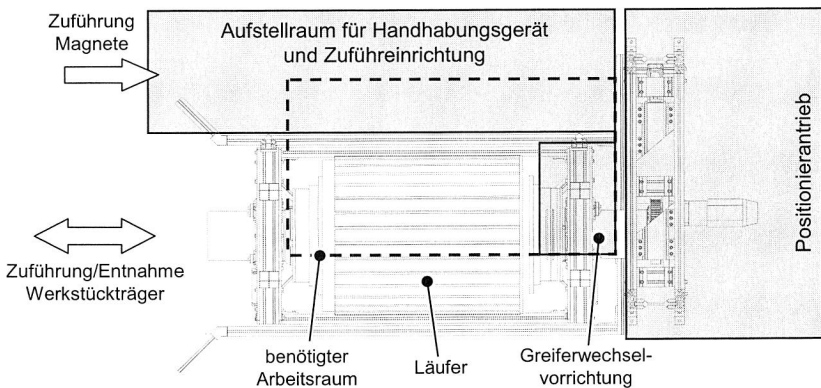


Bild 53: Layout der realisierten Roboterzelle für die automatisierte Läuferbestückung

Das Ankuppeln des in der Transportvorrichtung befindlichen Rotors an den Positionierantrieb erfolgt beim Einfahren des Werkstückträgers in die Montagestation, wobei die Zahnscheibe der Festlageradapterhülse in den als Schlaufe herabhängenden Zahnriemen eingeführt wird. Beim anschließenden Absenken des Hubwagens legt sich das flexible Übertragungselement um die Scheibe und kann anschließend mit der Kniehebelspanneinheit gespannt werden. Zudem ist ein pneumatisch betätigter Bremsklotz unter der Rotorachse in das Gestell integriert, mit dem der Läufer während des Bestückens gegen Drehmomente gesichert werden kann, die aus den während des Fügeprozesses auftretenden Tangentialkräften resultieren.

Darüber hinaus kann der Werkstückträger auch für das Bandagieren der fertig montierten Läufer eingesetzt werden. Zu diesem Zweck ist an der festlagerseitigen Adapterhülse eine Möglichkeit zur Ankopplung einer Kreuzgelenkwelle vorgesehen, mit der die zum Erreichen der benötigten Bandagenvorspannkraft erforderlichen hohen Bandagierdrehmomente auf den Läufer übertragen werden können. Dieses Konzept erlaubt es, den Rotor bis zum Aufbringen der Bandage im Werkstückträger zu belassen und so wirkungsvoll vor Beschädigungen der empfindlichen Oberfläche der Dauermagnetanordnung zu schützen.

Die Integration eines Handhabungsgeräts zur Durchführung des Fügeprozesses ist an einer der Seiten des Grundgestells vorgesehen. Bei der Auswahl eines geeigneten Bewegungsautomaten sind neben den großen Läuferdimensionen vor allem die Prozesskräfte zu berücksichtigen. Da letztere stark von der Greiferauslegung beeinflusst werden, erfolgt die Auswahl eines Bestückroboters erst nach der magnetischen Auslegung des Greifers.

### Greiferauslegung und -konstruktion

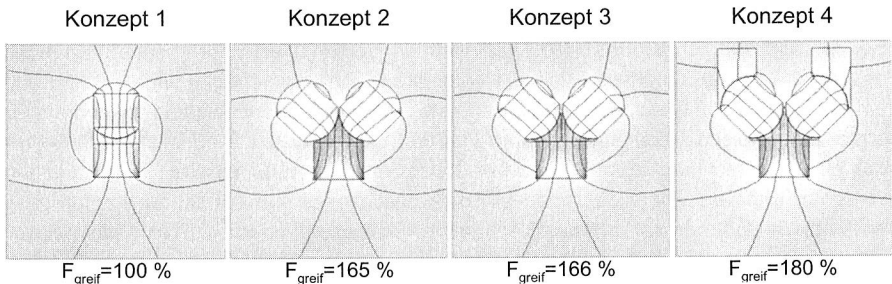
Bei den für die durchgeführten Montageversuche verwendeten Dauermagneten handelt es sich um NdFeB-Quader mit einer Kantenlänge von 30 mm x 15 mm x 10 mm und einem Gewicht von etwa 35 g. Sie weisen eine typische Remanenzflussdichte von 1,1 T sowie eine typische Koerzitivfeldstärke von  $850 \text{ kA m}^{-1}$  auf und sind mit einer Elektrotauchlackbeschichtung zum Schutz vor Korrosion und mechanischer Beschädigung versehen. Die von einem einzelnen Magnetkörper dieses Typs radial zur Läuferachse wirkende Anziehungskraft auf das Blechpaket wurde experimentell zu 104 N bestimmt.

Angesichts ihrer Größe und der starken Anziehungskräfte der Magnete erfordert der Aufbau eines ausreichend starken Magnetfelds beim Einsatz des elektromagnetischen Greifprinzips einen sehr hohen Erregerstrom (vgl. Kapitel 4.3.2). Da dies neben einem hohen Energieverbrauch auch zu einer erheblichen Erwärmung des Greifers führen würde, ist dieses Greiferprinzip für den vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet. Gegen das direkte Abstapeln der Magnete aus einem gehandhabten Magazin heraus spricht die beträchtliche axiale Ausdehnung der Pole, die zum häufigen Überfahren der zu Beginn einer Reihe gesetzten Magnetkörper und entsprechend großem Verschleiß der Schutzschicht führen würde. Somit ist die Pick & Place-Bestückung mit einem Permanentmagnetgreifer die am besten geeignete Methode für diesen Anwendungsfall.

Der Konstruktion des Greifers ging eine Voruntersuchung voraus, in deren Rahmen unterschiedliche Anordnungen von Greifermagneten untersucht wurden. Eine grundlegende Forderung war dabei die Realisierung eines kompakten Greifers, die durch drehbare Greifermagnete mit einer zur Läuferachse parallelen Rotationsachse erfüllt wurde.

Für die vorliegende Aufgabenstellung wurden mit dem FEM-Berechnungsprogramm Finite Element Method for Magnetism FEMM [75] unterschiedliche Anordnungen von Greifer- und Läufermagneten analysiert. Ziel der Untersuchung war es, das Arrangement zu identifizieren, bei dem die größtmögliche Haftkraft in der Kontaktfläche zwi-

schen Greifer und Läufermagnet vorliegt. Das einfachste der in Bild 54 auszugsweise dargestellten Konzepte basiert auf einem einzelnen drehbaren Greifermagneten, dessen Magnetfeld über einen Polschuh aus Weicheisen in den zu handhabenden Körper geführt wird. Um den für einen verlustarmen Feldverlauf notwendigen engen Luftspalt zwischen Greifermagnet und Polschuh zu realisieren, sind die beiden Pole des quaderförmigen Greifermagnets mit Halbschalen aus Weicheisen versehen. Eine signifikante Steigerung der Greifkraft lässt sich durch die Integration eines zweiten Greifermagnets erzielen, wobei der Fluss beider Magnete im Polschuh gebündelt und konzentriert aus der Greiffläche aus- und in den zu handhabenden Magnet eintritt (Konzept 2). Dies führt zu einer deutlichen Steigerung der magnetischen Haftkraft. Neben der Stellung der Greifermagnete beeinflusst vor allem die Gestaltung der Polschuhe die nutzbare Magnetkraft, wobei sich eine 90°-Anordnung der Greifermagnete zueinander als besonders günstig erwies. Während das Einbringen eines Luftspalts in den Polschuh kaum Einfluss auf die Haftkraft hat (Konzept 3), kann diese durch Integration zusätzlicher Weichenelemente über den Greifermagneten nochmals gesteigert werden (Konzept 4).



**Bild 54:** Auszug der untersuchten Greiferbauweisen zur Maximierung der Haltekraft

Der alleinigen Betrachtung des Greifers folgte eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens im Montageumfeld, die für eine vereinfachte Abschätzung ebenfalls zweidimensional gerechnet wurde. Ziel war es zu klären, inwiefern sich die zusätzlichen Magnetfelder des Greifers auf die umliegenden Einzelmagnete auswirken, z. B. ob eine Bewegung vorher abgelegter Bauteile zu erwarten ist oder nicht. Bei mechanisch angetriebenen Dauermagnetgreifern besonders kritisch ist demnach der Zeitpunkt der Magnetfeldinvertierung, da es während dieses Vorgangs zu einer starken Annäherung der Greifermagnetpole und den Polen der Läufermagnete kommt, bei der starke Kräfte auftreten können.

Angesichts der viel versprechenden Ergebnisse dieser Untersuchung erfolgte die konstruktive Umsetzung des in Bild 54 gezeigten Konzepts 4 und der Aufbau eines prototypischen Greifers mit zwei drehbar gelagerten Permanentmagneten zur Aufbringung der Greifkraft. Die Lagerung der Greifermagnete erfolgt dabei durch zwei jeweils an beiden Stirnseiten angebrachte Fassungen mit Lagersitzen, die zur Vermeidung von magnetischen Kurzschlüssen aus unmagnetischem Edelstahl gefertigt sind. Der Einsatz quaderförmiger Greifermagnete begünstigt dabei die Übertragung der großen Drehmomen-



te zur Invertierung des Greiferfelds, da diese formschlüssig eingefasst sind. Dies sorgt gleichzeitig für eine gute Zentrierung der Greifermagnete in den Fassungen und ermöglicht so eine versatzfreie axiale Montage dieser Komponenten. Um den Verlust der Magnetkraft gering zu halten, ist zur Minimierung des magnetischen Widerstands auf den Polen der Greifermagnete jeweils eine Halbschale aus ferromagnetischem Material angebracht. Dies führt in Greif- und Lösestellung zu sehr kleinen Luftspalten zwischen Greifermagneten und Polschuhen, so dass der magnetische Fluss nahezu verlustfrei übertragen werden kann. Die Magnetfelder beider Haltemagnete werden im unteren Flusssammler gebündelt und bilden in der Greiffläche jeweils einen sehr starken Nord- bzw. Südpol (Bild 55).

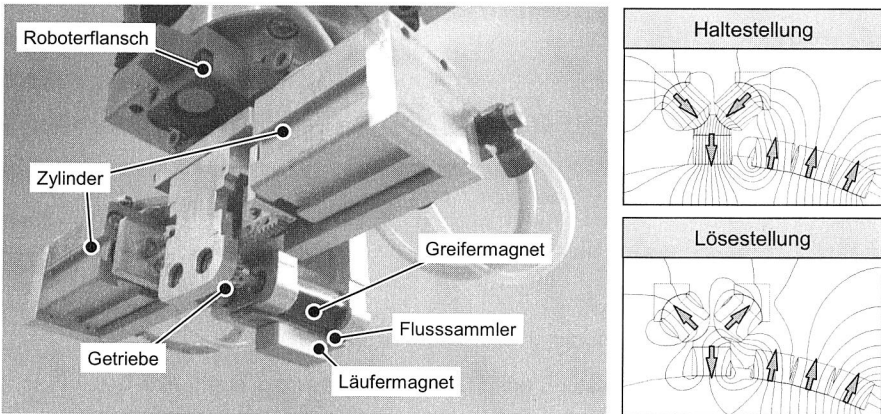


Bild 55: Permanentmagnetgreifer mit drehbar gelagerten Greifermagneten für die Handhabung von Magnetquadern [24]

Das Umpolen des Greiferfelds erfolgt durch Rotation beider Greifermagnete um jeweils  $180^\circ$ , wobei beide Achsen entgegengesetzte Drehrichtungen aufweisen. Dadurch werden beim Umpolen die magnetischen Querkkräfte durch den Greifer, die zu einer Bewegung des zu handhabenden Magnets führen können, minimiert. Aufgrund des starken magnetischen Flusses, der sowohl in Greif- als auch in Ablagestellung durch die Greifermagnete zwischen den oberen Weicheisenelementen und dem unteren Polschuh erzeugt wird, sind beim Umpolen des Greiferfelds sehr hohe magnetische Drehmomente zu überwinden. Der hierfür benötigte Antrieb ist bei dem aufgebauten Versuchsmuster durch zwei Pneumatikzylinder realisiert, deren Hub durch ein Zahnstangengetriebe in die erforderliche Rotationsbewegung umgesetzt wird.

Mit Hilfe des realisierten Greifers ist es möglich, angeregte Läufermagnete über eine Kontaktfläche von lediglich  $4,5 \text{ cm}^2$  mit einer Haftkraft von mehr als  $130 \text{ N}$  zu halten. Aufgrund der magnetischen Anziehung, die der zu fügende Magnet bei der Annäherung an den Läufer erfährt, sinkt die Haltekraft bis zum Ablagepunkt abhängig von der Konfiguration bereits abgelegter Magnete auf etwa  $30 \text{ N}$ . Die verbleibende Restanziehungs-

Kraft zwischen Magnet und Greifer führt zur Ausbildung ausreichend starker Reibkräfte, mit denen die von den angrenzenden Magneten hervorgerufenen Querkräfte aufgenommen werden können. Gleichzeitig führt das Greifermagnetfeld zu einer Steigerung der insgesamt auf den Greifer wirkenden Radialkraftkomponente, die Spitzenwerte von 300 N erreicht (Bild 56).

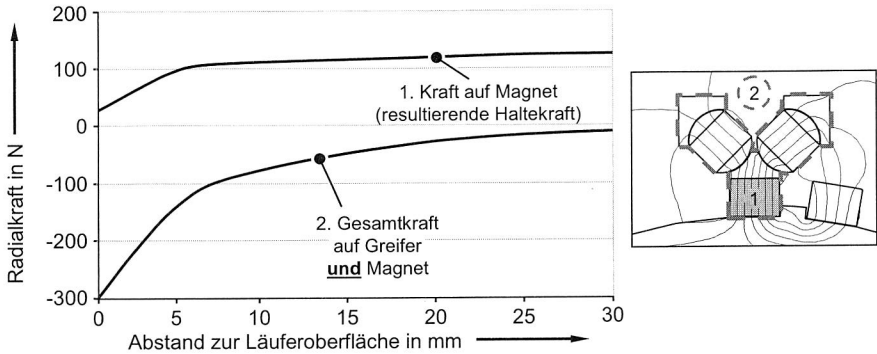


Bild 56: Vergleich des Verlaufs von Greifkraft (1., grau hinterlegt) und auf den gesamten Greifer inkl. Magnet (2., dkl.-graue Umrandung) wirkender Prozesskraft

### Vorrichtung zur automatischen Magnetzuführung

Die Bereitstellung der zu bestückenden Dauermagnete erfolgt durch eine automatische Zuführeinrichtung, die seitlich neben der Werkstückträgeraufnahme im Arbeitsraum des Roboters angeordnet ist. Der Funktionsumfang des in Bild 57 dargestellten Geräts erstreckt sich von der Magnetvereinzelung über die Ermittlung und gegebenenfalls Invertierung der magnetischen Polung bis hin zur lagerichtigen Disposition der Bauteile für den Montageprozess.

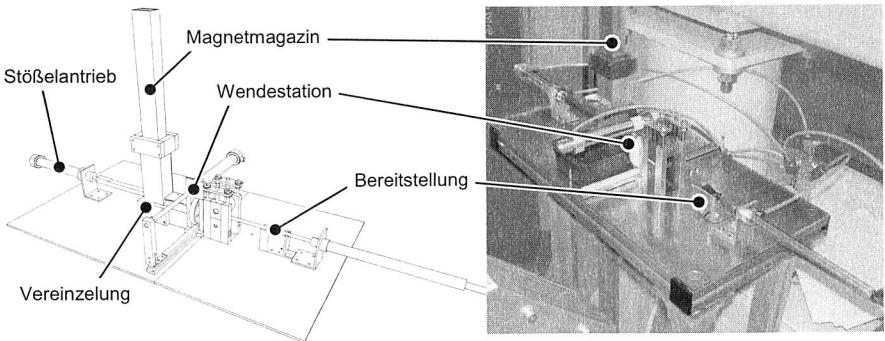


Bild 57: Entwurf und Umsetzung der Vorrichtung zur automatisierten Vereinzelung und Bereitstellung von Dauermagneten

Die Bereitstellung der Magnete erfolgt mittels eines Rechteckrohrs, das zur Aufnahme der gestapelten Magnetkörper dient. Nach Einlegen dieses Magazins in die Vorrichtung wird über einen Reedschalter, der unter dem Stapel angeordnet ist, der Vereinzelungs- und Bereitstellungsprozess initiiert. Da der Sensor von jeglichen Magnetfeldern unabhängig von deren Polarität aktiviert wird, dient er gleichzeitig zur Überwachung des Magazinfüllstands. Die Vereinzelung der Magnete aus dem Stapel erfolgt durch einen druckluftgetriebenen Stößel, mit dem der unterste Magnetkörper inklusive dem Kunststoffabstandsplättchen aus dem Magazin geschoben wird. Die Separation von Bauteilen und Trennplättchen erfolgt durch eine dem Vereinzelungsprozess nachgelagerte Schikane. Durch die Hubbewegung des Stößels wird der bereitzustellende Magnet in das Wendemodul eingebracht, wo zunächst die Polarität des Bauteils mit Hilfe einer Hallsonde ermittelt wird. Anschließend wird der Magnet gemäß der vom Handhabungsgerät angeforderten Magnetisierungsrichtung ausgerichtet. Nach Abschluss der Orientierung erfolgt die Entnahme des Magnetkörpers durch einen von einem zweiten Druckluftzylinder angetriebenen Weicheisenblock. An diesem haften die Bauteile an, so dass sie aus dem Wendemodul herausgezogen werden können. Das Lösen der Magnete vom Weicheisenkörper des Antriebs erfolgt ebenfalls durch eine Schikane, mit deren Hilfe der Magnet vom Halteelement abgestreift wird. Die Anwesenheit eines Magnets an der Bereitstellungsposition wird mit einem weiteren Reedschalter detektiert, nach dessen Auslösen der Abholvorgang zur Montage des bereitgestellten Magnetkörpers startet. Die Ver- und Entsorgung der Zuführeinrichtung mit Magnetmagazinen erfolgt durch einen SCARA-Roboter mit 800 mm Armlänge, der ergänzend zum primären Handhabungsgerät in die Montagezelle integriert wurde.

## Handhabungsgerät

Die sichere Beherrschung der hohen Greifkräfte und die Gewährleistung einer präzisen Magnetpositionierung erfordern den Einsatz eines robusten Montageroboters mit hoher Traglast und Steifigkeit. Darüber hinaus führen die großen Abmessungen von Fahrmotorläufern zwangsläufig zu großen Distanzen zwischen dem Punkt, an dem die Einzelmagnete bereitgestellt werden, und der Ablageposition. Um trotz der großen Verfahrswege kurze Zykluszeiten zu erreichen, sind deshalb hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten notwendig.

Aus diesem Grund erfolgt die Ausführung der Bestückbewegung durch einen massiven Linearroboter mit drei translatorischen Freiheitsgraden. Da die zu bestückenden Bauteile bereits in der richtigen Lage bereitgestellt werden, wird für die vorliegende Anwendung keine vierte rotatorische Achse am Greiferflansch benötigt. Der Arbeitsraum, in dem neben dem Bestücken auch die Magnetbereitstellung und der Greiferwechsel erfolgen müssen, misst 1.400 mm x 820 mm x 380 mm. Die in den beiden horizontalen Achsen eingesetzten Lineardirektantriebe ermöglichen dabei Beschleunigungen von bis zu  $12 \text{ ms}^{-2}$  und Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu  $3 \text{ ms}^{-1}$ , was wesentlich zur Realisierung kurzer Zykluszeiten beiträgt. Da der Einsatz linearer Direktantriebe bei vertikalen Achsen aufgrund fehlender Selbsthemmung erheblichen konstruktiven und steue-

rungstechnischen Aufwand erfordert, ist die z-Achse als mechanische Vorschubachse mit einem konventionellen Kugelgewindetrieb ausgeführt.

Um die berechneten Prozesskräfte sicher aufzunehmen und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit der Roboterkinematik zu gewährleisten ist das Handhabungsgerät auf eine Traglast von bis zu 500 N ausgelegt. Die berechnete Verschiebung des Werkzeugflanschs, die sich bei dieser Belastung über das Grundgestell und den Ausleger ergibt, beträgt dabei weniger als 0,2 mm. Somit ist auch angesichts der starken magnetischen Prozesskräfte eine ausreichende mechanische Steifigkeit sichergestellt.

## Steuerungstechnische Integration der Anlagenkomponenten

Kern der Steuerungsstruktur der beschriebenen Anlage ist eine Robotersteuerung vom Typ rho 4.1 der Firma Bosch [99], mit der die Bewegungen des zur Beschickung der Zuführvorrichtung eingesetzten SCARA-Roboters gesteuert werden. Darüber hinaus erfolgt auch die Ansteuerung aller Zusatzachsen der Montagezelle, d. h. die des Bestückroboters sowie die der Servoachse zur rotatorischen Läuferpositionierung, durch diese Steuerungseinheit. Die insgesamt vier zusätzlichen Achsregler wurden über einen SERCOS-Ring [101] in die Steuerungsstruktur der rho 4.1 eingebunden. Zur softwaretechnischen Implementierung der Zusatzachsen wurden zusätzlich zur ursprünglichen SCARA-Kinematik sowohl die drei Bestückroboterachsen als auch die Positionierachse als zweite und dritte Kinematik in die Steuerungslogik implementiert. Diese Konfiguration erlaubt es, Bewegungen unterschiedlicher Kinematiken unabhängig voneinander auszuführen, so dass die Beschickung der Zuführeinrichtung, die Durchführung der Bestückaufgabe und die Läuferpositionierung zeitgleich durchgeführt werden können. Bild 58 zeigt die realisierte Steuerungsstruktur im Überblick.

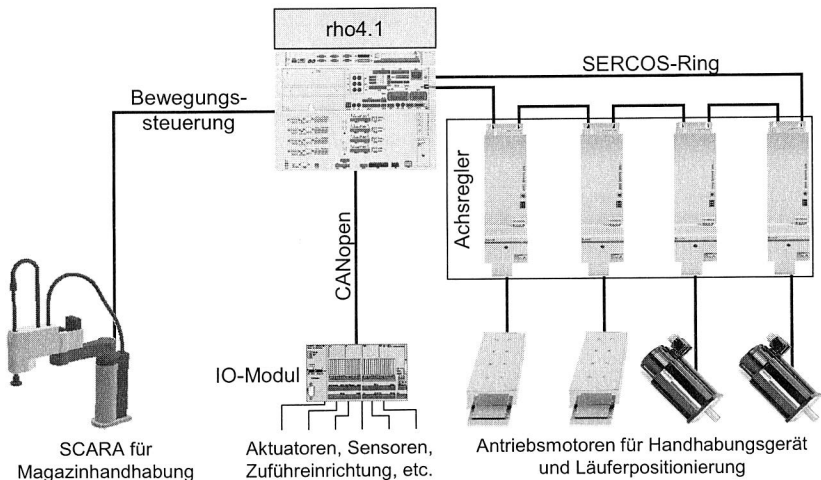


Bild 58: Steuerungsstruktur der realisierten Montagezelle

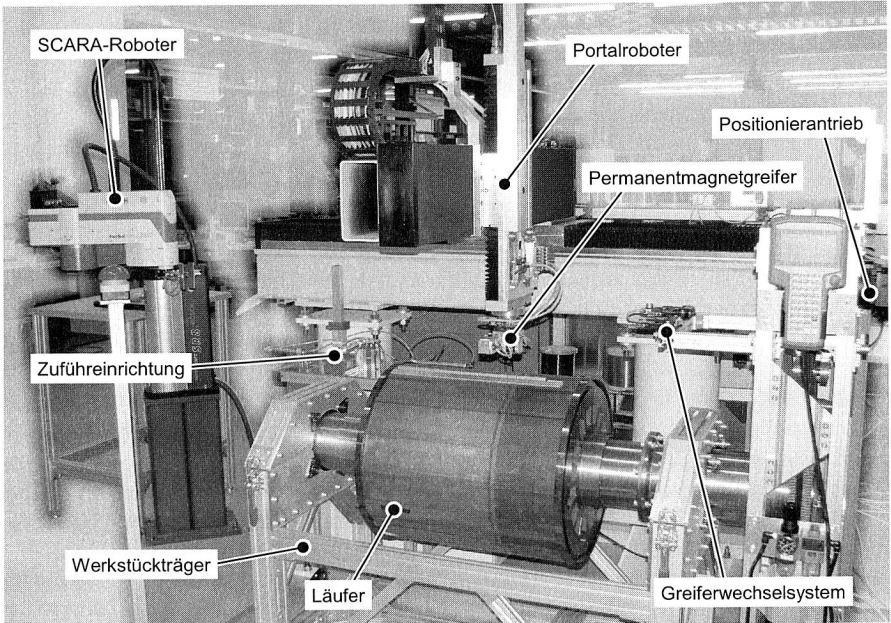
Um die Erstellung der Roboterprogramme nicht unnötig zu erschweren, wird die Zuführeinrichtung durch eine separate Ablaufsteuerung gesteuert. Die Auswertung der Sensoren bzw. die Initiierung von Aktionen erfolgt dabei über einen Mikrocontroller, auf dem das Ablaufprogramm für die Magnetzuführung ausgeführt wird. Die Koordination des Bereitstellungsprozesses mit dem Montageprozess geschieht dabei über digitale Ein- und Ausgänge, die aus dem auf der rho 4.1-Steuerung laufenden Hauptprogramm ausgelesen und gesetzt werden können. Somit vereinfacht sich die steuerungstechnische Einbindung des Bereitstellungsprozesses in das Roboterprogramm der rho 4.1 auf das Setzen eines digitalen Ausgangs zur Anforderung eines Magnets mit definierter Polarität sowie das Auslesen eines digitalen Eingangs, der die Verfügbarkeit des angeforderten Magnetkörpers am Bereitstellungspunkt signalisiert. Mit Hilfe eines weiteren binären Eingangs an der Robotersteuerung wird das Ersetzen eines leeren Magnetmagazins mit einem befüllten durch den SCARA-Roboter gestartet.

### **Ergebnisse der durchgeführten Montagetests**

Nach dem Einfahren des Werkstückträgers und dem Start des Bearbeitungsprogramms wird zunächst der Zahnriemen zur Läuferhandhabung automatisch um die Zahnscheibe der festlagerseitigen Adapterhülse gelegt. Zur Ermittlung der Lage des Läuferkoordinatensystems im Arbeitsraum kommt ein mit einem induktiven Sensor und einem Lichttaster ausgestattetes Sensorwerkzeug zum Einsatz, das vom Bestückroboter über ein Greiferwechselsystem aufgenommen und über der Läuferachse positioniert wird. Anschließend wird der Läufer durch den Positionierantrieb so lange gedreht, bis die Kante einer Poltrennung von einem Sensor detektiert wird. Dabei zeigte sich, dass mit dem induktiven Sensor eine sehr zuverlässige Erfassung von Poltrennungen möglich ist. Im Gegensatz dazu hängt das Messergebnis des Lichttasters stark von der teilweise lokal variierenden Reflexion der Blechpaketoberfläche ab, so dass hier keine absolute Erkennungssicherheit gewährleistet werden kann. Sobald die Robotersteuerung das Erreichen des Bezugspunkts am Läufer feststellt, stoppt der Positionierantrieb die Drehbewegung des Rotors. Anschließend wird die rotative Lage des Läufers um den in der Steuerung hinterlegten Korrekturwert gedreht, so dass die zu bestückende Polygonfläche eben im Raum ausgerichtet ist. Den Abschluss des Einrichtungsvorgangs stellt das Ablegen des Sensorwerkzeugs durch den Roboter sowie das Anlegen der Bremskraft an den Rotor dar.

Der eigentliche Bestückprozess beginnt mit der automatischen Aufnahme des Greifers und der Anforderung zur Bereitstellung eines Magnets mit der im Programm festgelegten Polarität. Nach Abschluss des Vereinzelungs- und Zuführprozesses wird das Greifermagnetfeld während des Anfahrens an den Bereitstellungspunkt derart gepolt, dass zwischen Greifer und bereitgestelltem Magnetkörper eine abstoßende Magnetkraft vorliegt. Zur Aufnahme des Magnets wird das Greiferfeld dem des zu handhabenden Bauteils gleichgerichtet und so die erforderliche Greifkraft aufgebaut. Anschließend erfolgt das Anfahren des Montagepunkts auf dem Läufer. Dabei wird der Greifer bei jedem Montagezyklus tangential und transversal über den eigentlichen Ablagepunkt hinaus-

bewegt, so dass der Magnet in jedem Fall an die angrenzenden Formelemente, wie bspw. andere Magnetkörper einer Reihe, die Poltrennung oder die Druckplatte, gedrückt wird. Somit wird eine absolut lückenfreie Aneinanderreihung der magnetischen Bauteile sichergestellt. Zum Lösen des Magnets vom Greifer wird der Greifermagnet erneut umgepolt, so dass das Montageobjekt durch die magnetische Abstoßung auf die Läuferoberfläche gedrückt wird.



*Bild 59: Gesamtansicht der umgesetzten Montagezelle zur Fahrmotorläuferbestückung*

Im Rahmen der durchgeführten Montageversuche zeigte sich, dass eine automatisierte Bestückung der Magnetquader auf den Reihen am Polrand auch ohne Klebstoff problemlos möglich ist. Auch wenn die Ablage der mittleren Magnetreihe grundsätzlich ebenfalls ohne Klebstoff durchgeführt werden kann, kommt es hierbei vereinzelt zu ungewünschten Verschiebungen der seitlichen Magnetkörper. Diese rühren von den Streufeldern des Greifers her, die bei der Annäherung an den Ablagepunkt zu einer Verringerung der Haftkraft und somit zu einer verminderten Reibkraft führen. Diese ungewünschten Bewegungen der Magnetkörper können jedoch durch die Verwendung eines Klebstoffs ausgeschlossen werden. Die während den Bestückversuchen mit der in Bild 59 dargestellten Montagezelle ermittelte durchschnittliche Taktzeit zur Ablage eines Magnets beläuft sich auf etwa 4 s, so dass das beschriebene System eine deutliche Verbesserung gegenüber der heute weit verbreiteten Handbestückung magnetisierter Bauteile darstellt.

## 6.2 Montagestation für Servomotorläufer

Im Bereich der Servomotorentechnik werden permanent erregte Antriebsmaschinen bereits seit mehr als 20 Jahren eingesetzt. Aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten werden Servomotoren in deutlich größeren Stückzahlen produziert als die bereits beschriebenen Traktionsantriebe. Dementsprechend liegt die maßgebliche Herausforderung bei der Herstellung von Läufern für diese Produkte weniger in deren geometrischen Dimensionen als vielmehr in der effizienten Gestaltung von Arbeitsabläufen und Montagesystemen.

Das für die im Folgenden beschriebene Montagestation zugrunde liegende Produkt ist ein sechspoliger Servomotorläufer mit einer Achslänge von 250 mm und einem Gesamtgewicht von 3,8 kg. Die Umfangsfläche des Blechpakets, die mit über 140 einzelnen NdFeB-Magnetquaden zu bestücken ist, hat eine Höhe von 160 mm und einen polygonalen Querschnitt, dessen Innenkreisdurchmesser 60 mm beträgt. Die insgesamt sechs Magnetpole des Läufers verfügen über jeweils sechs Magnetreihen. Auch bei diesem Läufertyp ist eine zusätzliche Fixierung der Magnetkörper durch eine Kunststoffbandage vorgesehen.

### Transportlösung und Zellenlayout

Angesichts der hohen Stückzahlen, in denen permanent erregte Servomotoren von vielen Unternehmen produziert werden, ist die Einbindung des Bestückprozesses in eine vollautomatisierte Produktionslinie vorzusehen. Die Verkettung der Montagestation mit vor- und nachgelagerten Arbeitsschritten erfordert dabei den Einsatz eines automatischen Transfersystems. In der dargestellten Lösung ist dies durch ein Doppelgurtbandsystem vom Typ Bosch WT2 mit standardisierten Werkstückträgern realisiert.

Aufgrund ihrer kleinen Abmessungen bietet sich in diesem Fall die stehende Lagerung der Läufer an. Hierfür ist auf dem Grundträger eine Werkstückaufnahme angebracht, in welche die eisenfertigen Rotoren gestellt werden können. Um magnetkraftbedingtem Anheben oder Drehen während der Bearbeitung vorzubeugen, ist eine schnelle und einfache Arretierung der Läufer über die in die Welle eingearbeiteten Passfedernuten möglich. Darüber hinaus ist auf dem Werkstückträger eine Vorrichtung zur Aufnahme von Magnetstapelmagazinen vorgesehen, in denen die Bereitstellung der zu bestückenden Dauermagnete erfolgt. Neben dem Werkstückträgertransfer bilden der Montageroboter sowie die Spannstation zur reproduzierbaren Positionierung und Fixierung des Werkstückträgers die wesentlichen Komponenten der Montagestation.

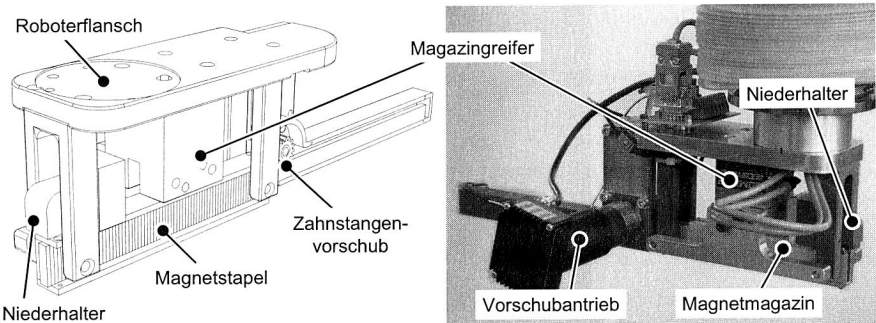
### Greiferauslegung und -konstruktion

Bei den auf das Blechpaket des Rotors zu bestückenden Bauteilen handelt es sich um magnetisierte NdFeB-Quader mit einer Kantenlänge von 20 mm x 4 mm x 2 mm, die ohne eine spezielle Korrosionsschutzschicht verarbeitet werden. Aufgrund der kompakten Abmessungen von Läufer und Magnetkörpern wurde für diese Aufgabenstellung ein



Greifer entwickelt, der die direkte Montage der Einzelmagnete aus einem Stapelmagazin heraus ermöglicht.

Kernelement des in Bild 60 abgebildeten Greifers ist das Magnetmagazin, in dem die einzelnen Bauteile gestapelt mit einer einheitlichen Feldausrichtung vorliegen. Das Magazin ist an beiden Enden offen, so dass abhängig von der Orientierung in der es aufgenommen wird, sowohl Läufer nord- als auch -südpole bestückt werden können. Um einem Verrutschen des Magnetstapels während des Transports vorzubeugen, ist die Oberseite des rechteckigen Magazins aus einem weichmagnetischen Werkstoff gefertigt, an dem die Magnete anhaften.



*Bild 60: Magazingreifer mit integrierter Vereinzelungs- und Montagefunktion zur Bestückung von Dauermagneten in Zwangslage*

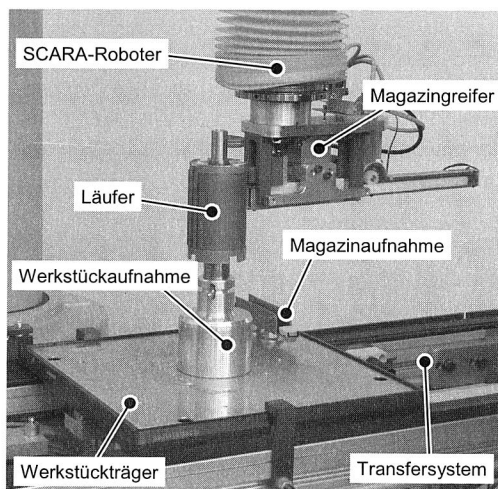
Die Aufnahme des Magazins erfolgt durch einen konventionellen Parallelbackengreifer, der unter der Grundplatte des Greifers angebracht ist. Um den zugrunde liegenden und in Bild 42 verdeutlichten Prozessablauf zu realisieren, ist an der Rückseite des Greifsystems ein Zahnstangenantrieb montiert, der von einem EC-Servomotor angetrieben wird. Die Ansteuerung dieses Positionierantriebs durch den Roboter erfolgt über dessen serielle Schnittstelle. Darüber hinaus ist oberhalb des Magazins ein federnd gelagerter Niederhalter aus verschleißfestem Kunststoff angeordnet, durch den ab dem zweiten Magnet einer Reihe ein Abheben der vorher abgelegten Magnetkörper bei der Annäherung des Magnetstapels bzw. des weichmagnetischen Magazindeckels verhindert wird.

## Handhabungsgerät

Die Handhabung des Greifersystems erfolgt durch einen Standard-SCARA-Roboter mit vier Freiheitsgraden, einer Armlänge von 800 mm und einem z-Hub von 295 mm. Im Gegensatz zur vorab beschriebenen Lösung, bei der die betragsmäßig größte Prozesskraft in Richtung der z-Achse des Portalroboters wirkt, wird der Roboterarm bei der Bestückung stehender Läufer vorwiegend in der x-y-Ebene beansprucht. Somit ist die Traglast bei dieser Konfiguration weitaus weniger kritisch als eine hohe horizontale Steifigkeit der mechanischen Struktur sowie der Achsantriebe. Das verwendete Handha-



bungsgerät verfügt in der x-y-Ebene über eine zulässige Maximalbelastung von 1.250 N, die deutlich über den berechneten Prozessspitzenkräften von 45 N liegt. [79]



*Bild 61: Komponenten der Roboterzelle zur automatischen Bestückung stehender Läufer und deren Anordnung in der Montagestation*

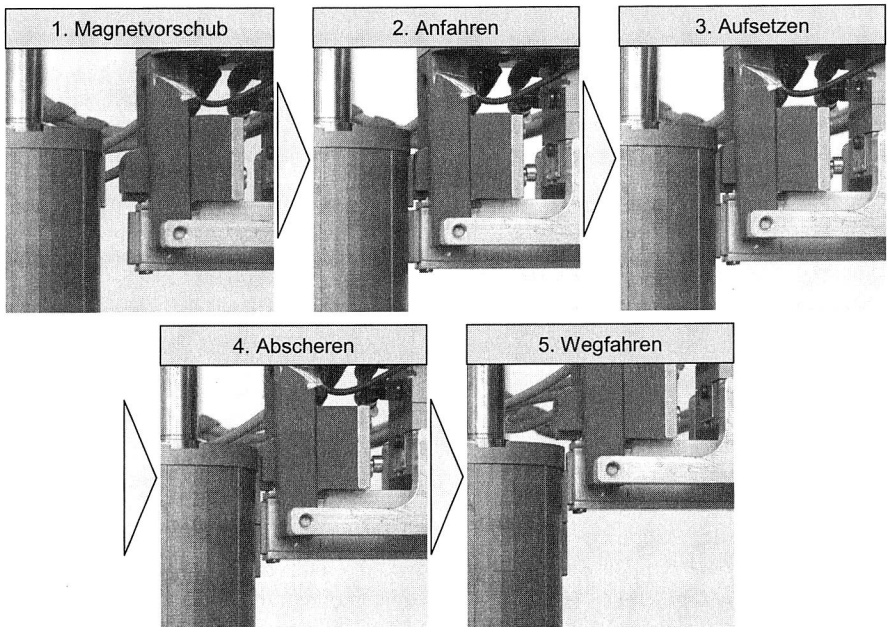
Wie in Bild 61 gezeigt, ist der Bestückroboter neben dem Doppelgurtband zur Beförderung der Werkstückträger angeordnet. Die Bereitstellung der mit Magneten befüllten Magazine erfolgt auf demselben Werkstückträger, auf dem auch der Läufer bereitgestellt wird. Aufgrund ihrer Symmetrie können die Magazine von beiden Seiten durch den Greifer aufgenommen werden, so dass die Polarität der Einzelmagnete von der Greiferorientierung bei der Magnetaufnahme abhängt. Auf die Bestimmung der Magnetfeldausrichtung kann in diesem Fall verzichtet werden, da die relative Ausrichtung der Magnetfelder zueinander durch den im Bestückprogramm hinterlegten Ablauf festgelegt ist.

### **Ergebnisse der durchgeführten Montagetests**

Im Gegensatz zur oben beschriebenen Fahrmotorläuferbestückung gestaltet sich der Ablauf bei dieser Bestückmethode deutlich einfacher. Nach dem Spannen des Werkstückträgers und der Aufnahme des Magnetmagazins kann unmittelbar mit der Bestückung begonnen werden. Da die Lage des Läuferkoordinatensystems durch die form-schlüssige Läuferwellenaufnahme stets bekannt ist, kann zudem auf die Identifizierung der Rotorlage verzichtet werden.

Zur Durchführung des Montageprozesses wird zunächst der vorderste Magnet zur Hälfte aus dem Magazin geschoben und unterhalb des Ablagepunkts so nahe an die Läuferoberfläche herangeführt, dass ein Luftspalt von weniger als der einfachen Magnethöhe verbleibt. Im Anschluss daran wird der Magnet parallel zur Läuferachse nach oben

bewegt und kurz vor Erreichen seiner Ablageposition auf die Läuferoberfläche aufgesetzt, indem ihn der Vorschubantrieb vollends aus dem Magazin heraus schiebt. Da die Reibkraft zwischen dem abzulegenden Magneten und dem Magnetstapel im Magazin stärker ist als die magnetische Haftung an der Rotoroberfläche, wird der Läufermagnet bei der weiteren achsparallelen Bewegung des Greifers über das Blechpaket in die endgültige Ablageposition geschoben. Während der Magnetstapel im Magazin durch den Roboter über diesen Punkt hinaus verschoben wird, kommt es zum Abscheren des zu montierenden Magnetkörpers vom im Magazin verbleibenden Stapel. Den Ablauf des Fügeprozesses verdeutlicht Bild 62.



**Bild 62:** Prozessablauf beim direkten Bestücken stehender Läufer aus einem Magnetmagazin

Wegen der unter Montagegesichtspunkten ungünstigen Polgeometrie mit insgesamt sechs Magnetreihen pro Pol war bei dieser Anwendung eine klebstofffreie Versuchsdurchführung nicht immer möglich. Um dennoch einen Funktionsnachweis des entwickelten Bestückprinzips zu erbringen, wurden zunächst Versuche mit jeweils einer Leerreihe zwischen den bestückten Magnetreihen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2). Nachdem sich die Anwendung der entwickelten Komponenten zur spaltfreien Aneinanderreihung von Einzelmagneten im Rahmen der Montagetests auch ohne den Einsatz von Klebstoff als problemlos erwies, wurde in einem zweiten Schritt das Verhalten des Bestücksystems bei der Bestückung der verbliebenen Leerreihen untersucht. Angesichts der elektromagnetischen Läufergestaltung war es hierzu notwendig, die im Rahmen der ersten

Versuchsreihen bestückten Einzelmagnete mit einem Klebstoff gegen magnetkraftbedingtes Verrutschen zu sichern. Die Ablage der Magnete in die Lücken wurde dagegen ebenfalls ohne Klebstoff durchgeführt, um eine Demontage der abgelegten Magnete zwischen zwei Versuchsreihen zu ermöglichen. Auch bei diesen Testreihen zeigte sich, dass die vorgestellte Bestücklösung für die automatisierte Bestückung stehend gelagerter Läufer geeignet ist.

Allerdings war bei der Bestückung von Reihen, die zwischen zwei bereits bestückten Reihen lagen, aufgrund der geringeren magnetischen Haftkraft bei wenigen Versuchsmagneten ein transversales Verrutschen der abgelegten Magnetkörper zu beobachten. Dies ist jedoch als unkritisch zu beurteilen, da der verrutschte Magnet beim folgenden Zyklus erneut in seine Zielposition geschoben wird, wo er durch die transversale Abstoßung des neu eingebrachten Magnets dauerhaft verbleibt. Des Weiteren war zu beobachten, dass die magnetische Radialkraft bei etwa 5 % der montierten Testmagnete einen negativen Betrag aufwies, wodurch diese regelrecht vom Läufer weggeschossen wurden. Beeinflusst wird dieser Effekt vor allem durch geringfügige Schwankungen der relativen Luftspaltbreite zu den benachbarten Magnetreihen, die sich unmittelbar auf die Radialkraft auswirkt (vgl. Kapitel 7.1.4). Als weitere wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz dieses Verfahrens wurde die Magnetqualität identifiziert. Insbesondere dürfen die zu bestückenden Magnetkörper keine Verformungen aufweisen, da dies lediglich zu einem punktuellen Auflegen des Magnets auf dem Blechpaket und damit zu einer deutlichen Minderung der Radialkräfte aufgrund des resultierenden Luftspalts führt.

Angesichts dieser potenziellen Störeinflüsse ist eine klebstofffreie Bestückung der vorliegenden Läufer nicht möglich. Daher wurden in weiteren Versuchen die Auswirkungen von Klebstoffen auf den Bestückprozess untersucht. Hierbei kamen sowohl ein dünnflüssiger Sekundenkleber als auch ein 2-Komponenten-System auf Epoxidharzbasis zum Einsatz. Während bei dem niedrigviskosen Schnellkleber sofort nach dem Absetzen eine ausreichende Festigkeit vorlag, kam es bei dem verwendeten 2-K-System zum Verrutschen des abgelegten Magnets. Die Ursache hierfür liegt neben der schnelleren Aushärtezeit vor allem in der geringeren Viskosität des Sekundenklebers, die zu sehr dünnen Klebschichtdicken und damit lediglich zu einer geringen Minderung der Radialkraft führt. Im Gegensatz dazu bildet der 2-K-Klebstoff aufgrund seiner zähflüssigen Konsistenz während des Fügeprozesses einen größeren Spalt zwischen Magnet und Blechpaket aus, der zu einer Verringerung der radialen Anziehungskraft führt. Gleichzeitig kommt es zu einer signifikanten Verringerung des Reibwerts  $\mu_{\text{reib}}$  in der Kontaktzone, so dass eine schnelle Fixierung des Magnets nicht möglich ist.

Insgesamt konnte mit dem aufgebauten System die Leistungsfähigkeit dieser Bestückmethode nachgewiesen werden. Anhand der durchgeführten Versuche wurde eine durchschnittliche Zykluszeit von 1,75 s pro Magnet ermittelt. Angesichts der Tatsache, dass bei diesem Verfahren keine nachträgliche Magnetisierung der Läufer mehr erforderlich ist, handelt es sich dabei um eine effiziente Alternative zu den derzeit industriell eingesetzten Montagekonzepten.



## 7 Optimierung des Bestückprozesses

Mit der Analyse des Fügeprozesses und der Entwicklung von Gerätetechnologien zur Handhabung und Bereitstellung von Permanentmagneten wurden im bisherigen Verlauf der Arbeit wichtige Grundlagen für die Automatisierung des Bestückprozesses erarbeitet. Über die bisher ausgeführten Rationalisierungspotenziale hinaus bietet die Verarbeitung angeregter Dauermagnetkörper jedoch noch weitergehende Optimierungsmöglichkeiten. Neben Methoden zur effizienten rechnergestützten Programmierung von Bestückanlagen liegt vor allem in der geschickten Nutzung der bisher vorwiegend als Störgröße betrachteten Magnetkräfte umfangreiches Potenzial zur nachhaltigen Reduzierung der Zykluszeiten. Dies kann durch die montagegerechte Konstruktion von Dauermagnetkörpern und Läufern ausgeschöpft werden.

### 7.1 Montagegerechte Gestaltung von Dauermagnetkörpern

Die offensichtlich größten Probleme, die es bei der wirtschaftlichen Bestückung magnetisierter Dauermagnete zu lösen gilt, liegen zum einen in der sicheren Beherrschung der starken Magnetkräfte während des Fügeprozesses und zum anderen in der schnellen Fixierung der Magnetkörper am Ablagepunkt. Das hat zur Folge, dass nach wie vor ein großes Wissensdefizit hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten festzustellen ist, die die Montage angeregter Magnetkörper bietet.

So ist die Realisierung kurzer Fixierzeiten nach dem Erreichen der Ablageposition eine elementare Voraussetzung für die wirtschaftliche Automatisierung des Bestückprozesses. Nur wenn ausreichend hohe Bestückleistungen erreicht werden können, rechnet sich die Anschaffung automatisierter Bestückanlagen. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, wirken beim Ablegen von Dauermagneten auf einen weichmagnetischen Grundkörper sowohl parallel als auch senkrecht zur Füge-richtung starke anziehende und abstoßende Magnetkräfte. Um der Forderung nach kürzesten Haltezeiten nachzukommen oder diese nicht wertschöpfende Aufgabe komplett zu eliminieren, müssen die abgelegten Magnetkörper binnen kürzester Zeit gegen magnetkraftbedingtes Verrutschen gesichert werden. Dies kann durch die Kombination eines Klebstoffs, dessen Schubfestigkeit als Funktion der Zeit zunimmt, mit der zwischen Magnet und Blechpaket vorliegenden Reibkraft erfolgen. Da die Ausbildung von Adhäsions- und Kohäsionskräften stets eine vom verwendeten Klebstoffsystem abhängige Aushärtezeit erfordert, sind Haltezeiten bei der klebstoffbasierten Aufnahme von Querkräften unvermeidbar (vgl. Kapitel 4.2).

Dagegen ermöglicht die Nutzung der zwischen Einzelmagnet und weichmagnetischem Grundkörper vorliegenden Reibkraft eine haltezeitfreie Bestückung. Die Höhe der Reibkraft und damit die Höhe der aufnehmbaren Querkräfte wird maßgeblich durch die Normalkraft  $F_{\text{rad}}$  und den in der Kontaktfläche vorliegenden Reibwert  $\mu_{\text{reib}}$  beeinflusst. Dabei hängt  $\mu_{\text{reib}}$  vor allem von der Werkstoffpaarung und dem Bearbeitungsverfahren bei der Herstellung des Blechpakets ab. Der Einsatz eines Klebstoffs zur dauerhaften Befestigung der Einzelmagnete führt bis zu seiner Aushärtung wegen seines viskosen Verhaltens zu einer Herabsetzung des Reibfaktors, die bei der experimentellen Be-

stimmung von  $\mu_{\text{reib}}$  zu berücksichtigen ist. Aufgrund dieser vielfältigen Einflussfaktoren ist der zutreffende Reibwert stark von der spezifischen Anwendung abhängig, so dass diesbezüglich keine grundsätzlichen Aussagen möglich sind.

Die Höhe aller magnetischen Kräfte, also sowohl die der reibkraftbestimmenden radialen als auch die der tangentialen und transversalen Kraftkomponenten, hängt dabei unmittelbar vom Montagefall und von der Magnetkörpergeometrie ab. Die Ermittlung der Randbedingungen, unter denen eine halbezeitfreie Montage von Dauermagneten überhaupt möglich ist, erfordert daher eine ganzheitliche Betrachtung der Magnetkräfte in Abhängigkeit von der Einbausituation und den Magnetproportionen. Da sich der Lösungsraum angesichts der in Kapitel 4.2 diskutierten Bestückreihenfolgen auf insgesamt vier grundlegende Alternativen einschränken lässt, liegt der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen auf der Beurteilung der jeweils auf einen Einzelmagnet wirkenden resultierenden Magnetkräfte in Abhängigkeit von seinen Proportionen.

### 7.1.1 Aktuelle Vorgehensweise bei der Magnetauslegung

Die wesentliche Aufgabe von Dauermagnetkörpern für elektrische Maschinen liegt in der Ausbildung eines Erregerfelds, das die zum Betrieb von Motoren und Generatoren erforderliche Luftspaltinduktion in der benötigten Stärke erzeugt. Die Abmessungen von Permanentmagneten ergeben sich nach [128] durch die Auswahl des Arbeitspunkts im Betrieb bei maximal wirksamer magnetischer Energiedichte, was gleichzeitig zu einer nahezu optimalen Magnetquerschnittsfläche für höchste Luftspaltinduktionen führt. Die dabei zu berücksichtigenden Maße sind die Höhe des Magnets  $h_M$  sowie die Querschnittsfläche des Magnets  $A_M$ . Während die Fläche  $A_M$  in der Praxis zur Bedeckung großer Pole aus einer Vielzahl kleiner Einzelmagnete realisiert wird, entspricht die Dicke eines Magnetpols in den meisten Fällen dem Maß  $h_M$ . Somit stellt die Höhe die maßgebliche Zielgröße bei der Auslegung und Konstruktion von Dauermagnetkörpern dar. Das dafür erforderliche Maß  $h_M$  kann für eine Luftspaltweite  $\delta$  nach [30] mit der Formel

$$h_M = \frac{\mu_p}{\frac{B_r}{B_D} - 1} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma} \cdot \delta \quad (7.1)$$

berechnet werden, wobei  $\mu_p$  die Permeabilität,  $B_r$  die Remanenzflussdichte und  $B_D$  die Flussdichte im Arbeitspunkt des Permanentmagnets,  $k_s$  der Sättigungsfaktor und  $\sigma$  die Streuziffer ist. Um darüber hinaus sicherzustellen, dass es beim Betrieb der Maschine aufgrund der Ankerrückwirkung nicht zur irreversiblen Teilentmagnetisierung an den Kanten des Dauermagnets kommt, muss die gewählte Höhe  $h_M$  weiterhin der Forderung

$$h_M \geq \sqrt{2} \cdot \frac{N_1 \cdot I_{1\text{max}}}{p \cdot H_C} \quad (7.2)$$

genügen [30]. Dabei entspricht  $N_1$  und  $I_{1\text{max}}$  der Windungsanzahl bzw. dem maximalen Strom im Anker,  $p$  der Polpaarzahl und  $H_C$  der Koerzitivfeldstärke des Dauermagnets.

Neben der elektromagnetischen Auslegung ergeben sich aus der Forderung nach einer wirtschaftlichen Fertigung der einzelnen Magnetkörper weitere Gesichtspunkte, die bei der Konstruktion von Dauermagneten zu berücksichtigen sind. Neben herstellerspezifischen Einschränkungen, wie bspw. der zulässigen Querschnittsfläche oder Maximalabmessungen, beeinflussen vor allem die Proportionen der Magnete den Fertigungsaufwand und damit die Herstellungskosten maßgeblich. Die wichtigsten Abmessungen, die bei es der wirtschaftlichen Gestaltung der gebräuchlichsten Magnetformen zu berücksichtigen gilt, sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

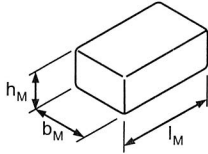
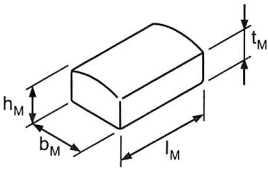
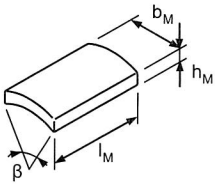
Form	Skizze	Wirtschaftliche Abmessungen
Quader		$h_M \geq 0,15 \cdot \sqrt{b_M \cdot l_M}$ $\frac{l_M}{b_M} \leq 5$
Brotlaib		$t_M \geq 0,6 \cdot h_M$ $0,5 \leq \frac{l_M}{b_M} \leq 5$
Schale		$\beta \leq 80^\circ$ $0,5 \leq \frac{l_M}{b_M} \leq 3$

Tabelle 10: Wirtschaftliche Gestaltung gebräuchlicher Magnetkörpergeometrien nach [100]

Den Konstrukteuren permanent erregter Maschinen stehen heute somit Richtlinien sowohl zur optimalen elektromagnetischen als auch zur fertigungsgerechten Gestaltung von Dauermagnetkörpern zur Verfügung. Ein erhebliches Defizit besteht dagegen in der montagegerechten Gestaltung von Magneten. Angesichts des großen produktionstechnischen Aufwands, der bei der Bestückung permanent erregter Läufer anfällt, bietet die montagegerechte Magnetgestaltung erhebliches Potenzial zur Reduktion von Montagezeiten und -kosten. Ziel der folgenden Ausführungen ist daher die Entwicklung einer Konstruktionsrichtlinie zur montagegerechten Magnetgestaltung. In diesem Zusammenhang wird nicht ausdrücklich auf klassische Merkmale der montagegerechten Produkt-

gestaltung eingegangen, da diese bspw. in [22] oder [69] ausführlich beschrieben werden.

### 7.1.2 Anforderungen an montagegerechte Magnetkörper

Um die Montageeignung eines Magnets beurteilen zu können, sind zunächst die zu erfüllenden Randbedingungen festzulegen. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff „montagegerecht“ im Zusammenhang mit der Magnetgestaltung daher wie folgt definiert:

*„Ein Magnetkörper gilt dann als montagegerecht, wenn die durch seine magnetische Anziehungskraft an einen weichmagnetischen Grundkörper resultierende Reibkraft größer ist als die im ungünstigsten Bestückfall auf ihn wirkende Querkraft, so dass er auch ohne den Einsatz von Hilfsmitteln oder -stoffen unmittelbar nach dem Ablegen an seinem Ablagepunkt verbleibt.“*

Um in diesem Sinne als montagegerecht zu gelten, muss demnach unmittelbar nach Aufhebung der Greifkraft die Bedingung

$$F_{\text{rad}} \cdot \mu_{\text{reib}} \geq \sqrt{F_{\text{tan}}^2 + F_{\text{transv}}^2} \quad (7.3)$$

erfüllt sein. Angesichts der starken Abhängigkeit des Reibwerts  $\mu_{\text{reib}}$  von der konstruktions-, werkstoff- und fertigungstechnischen Ausführung der Fügepartner ist es für das weitere Vorgehen sinnvoll,  $\mu_{\text{reib}}$  als Funktion der Magnetkräfte auszudrücken. Somit ergibt sich durch Umstellen der Formel 7.3 der für einen sicheren Halt des betrachteten Magnets zumindest benötigte Reibwert zu

$$\mu_{\text{reib,min}} = \frac{\sqrt{F_{\text{tan}}^2 + F_{\text{transv}}^2}}{F_{\text{rad}}} \quad (7.4)$$

$\mu_{\text{reib,min}}$  kann mathematisch durch das Verhältnis von Querkraft und Radialkraft beschrieben werden. Da dieses Verhältnis weder von der Magnetisierung noch von den absoluten Dimensionen, sondern ausschließlich von den Proportionen des Magnetkörpers und der Bestücksituation abhängt, eignet sich diese Größe hervorragend zur Beschreibung der Montageeignung einer Magnetkonstruktion. Die praktische Anwendung dieses Verfahrens erfordert daher neben dem Kräfteverhältnis  $\mu_{\text{reib,min}}$  die genaue Kenntnis des jeweils vorliegenden Reibwerts  $\mu_{\text{reib,real}}$ . In der Praxis ist dieser aus den oben genannten Gründen anwendungsspezifisch für jede Werkstoffpaarung experimentell zu ermitteln. Ist die Bedingung

$$\mu_{\text{reib,real}} \geq \mu_{\text{reib,min}} \quad (7.5)$$

erfüllt, reicht die Reibkraft aus, um den betrachteten Magnet ohne weitere Maßnahmen gegen magnetkraftbedingtes Verrutschen zu sichern.

Das Kräfteverhältnis  $\mu_{\text{reib,min}}$  hängt sowohl von der Magnetgeometrie als auch von der jeweiligen Montagesituation ab. Somit ist es nicht ausreichend, die Magnetkräfte für



eine einzelne Einbausituation zu untersuchen. Vielmehr ist eine Analyse aller potenziellen Magnetproportionen für jeden kritischen Fall notwendig. Dies führt zu einer hohen Anzahl möglicher Lösungen, die sich nur mittels automatisierter numerischer Berechnungsverfahren effizient bestimmen lassen. Um grundlegende Erkenntnisse über den Einfluss der Magnetkörpergestaltung auf  $\mu_{\text{reib,min}}$  bei verschiedenen Magnetanordnungen zu gewinnen, wurde dieser Aspekt im Rahmen einer FEM-Studie systematisch untersucht.

### 7.1.3 Versuchsplanung, Modellierung und FEM-Simulation

Da sich das Läufermagnetfeld und damit die auf die Magnetkörper wirkenden Kräfte mit jedem neu abgelegten Magnet ändern, sind jeweils die Anordnungen zu untersuchen, bei denen die größten Kräfte auftreten. Daher wurden im Rahmen der Arbeit die vier grundlegenden Montagefälle untersucht, mit denen Aussagen über die technisch sinnvollen Ausprägungsformen des Fügeprozesses möglich sind. Daneben hat das Verhältnis der Magnetkörpermaße ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Kräfte und somit auf die Montageeignung. Um den Lösungsraum angesichts der Vielzahl geometrischer Formen von Magnetkörpern auf ein beherrschbares Maß einzuschränken, erfolgte die Untersuchung der elementaren Zusammenhänge von Kräften und Geometrie auf Basis quaderförmiger Magnete. Da die Proportionen von Quadern durch das Verhältnis der Kantenlängen Breite  $b_M$ , Höhe  $h_M$  und Länge  $l_M$  zueinander beschrieben werden, stellen diese Dimensionen die im Versuch zu variierenden Parameter dar. Während die Magnetbreite  $b_M$  in der durchgeführten Untersuchung stets auf eins normiert wird, werden  $h_M$  und  $l_M$  während der Versuche systematisch variiert.

Dimension	Variationsbereich	Schrittweite
Magnetbreite $b_M$	1	-
Magnethöhe $h_M$	0,1 bis $1 \cdot b_M$	$0,1 \cdot b_M$
Magnetlänge $l_M$	1 bis $10 \cdot b_M$	$1 \cdot b_M$

*Tabelle 11: Versuchsraum der Simulationsstudie zur Bestimmung des Einflusses der Magnetproportionen auf das Kräfteverhältnis  $F_{\text{quer}}/F_{\text{rad}}$*

Durch die Variation dieser Parameter innerhalb der in Tabelle 11 dargestellten Grenzen ergeben sich für jeden untersuchten Bestückfall 100 unterschiedliche Kombinationen von  $h_M$  und  $l_M$ . Zur Erstellung der insgesamt 400 benötigten Simulationsmodelle wurde im FEM-Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics 3.2b [85] für jeden Montagefall ein parametrisiertes Urmodell modelliert. Die systematische Variation der genannten Parameter erfolgte dabei mit Hilfe der Skriptfunktion des Programms MATLAB 7.2 [3], wodurch die automatische Berechnung großer Mengen unterschiedlicher Simulationsmodelle möglich ist.

Um eine Auswertung der Kräfteverhältnisse im Rahmen der FEM-Analyse zu ermöglichen, erfordert die Modellierung der Simulationsmodelle eine Vereinfachung der zu untersuchenden Magnetanordnungen. So wurden alle Modelle, bei denen eine Symmetrie bzgl. der Magnetlänge und -höhe vorliegt, als Halbmodelle modelliert. Die dadurch er-

zielte Verringerung der Modellkomplexität führt zu einer signifikanten Verkürzung der Rechenzeit, ohne dass dies eine Beeinträchtigung der Berechnungsergebnisse zur Folge hat. Die Fläche, die bei der realen Anordnung der Symmetrieebene entspricht, ist im Modell als magnetisch isolierend abstrahiert, so dass ein wirklichkeitsgetreuer Feldverlauf vorliegt.

Die größten abstoßenden Magnetkräfte treten bei der spaltfreien Anordnung von Dauermagneten mit gleicher Magnetisierungsrichtung auf, so dass dieser kritische Fall den Gegenstand aller durchgeführten Untersuchungen darstellt. Weil die Berechnung von Magnetkräften in COMSOL nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebung (vgl. Kapitel 2.1.3) erfolgt, muss der zu untersuchende Magnet im Raum verschiebbar sein. Daher ist es notwendig, zwischen allen Kontaktflächen zweier Magnete einen Luftspalt zu modellieren und so die virtuelle Verschiebbarkeit des untersuchten Magnets zu gewährleisten. Um die Auswirkungen dieser notwendigen Abweichung des Simulationsmodells von der realen Situation gering zu halten, ist ein möglichst kleiner Abstand zwischen den betrachteten Magnetkörpern anzustreben. Derart enge Geometrien führen jedoch bei der Vernetzung des Modells zu einer sehr großen Anzahl finiter Elemente und damit zu einer hohen Komplexität des gesamten Berechnungsmodells, so dass eine Kompromisslösung zwischen Berechnungsgenauigkeit und -aufwand notwendig ist. Die der FEM-Studie zugrunde liegenden Modelle wurden daher mit Luftspalten zwischen 1 % und 1,8 % der Magnetbreite versehen, was für eine näherungsweise Berechnung der Kräfteverhältnisse hinreichend genau ist.

### **7.1.4 Bewertung der Magnetgeometrie in Abhängigkeit vom Bestückfall**

Erwartungsgemäß ergeben sich bei der Auswertung der unterschiedlichen Montagefälle starke Abhängigkeiten des Kräfteverhältnisses  $F_{\text{quer}}$  zu  $F_{\text{rad}}$  von der Magnetgeometrie. Während sich bei einem Teil der analysierten Anordnungen Haltezeiten durch eine geschickte Festlegung der Magnetkörperdimensionen eliminieren lassen, zeigt sich bei anderen, dass eine klebstofffreie Fixierung aufgrund der resultierenden Magnetkräfte nicht möglich ist. Die Ergebnisse der untersuchten Bestückfälle sind im Folgenden zusammengefasst.

#### **Einzelne Magnetreihe**

Der einfachste Montagefall ist die Anordnung mehrerer Dauermagnete zu einer Reihe. Da diese Situation grundsätzlich bei Läufern mit reihenförmig angeordneten Magnetkörpern auftritt, stellt sie gleichzeitig auch das wichtigste Szenario dar. Wie Bild 63 zeigt, ist das Verhältnis von Quer- zu Normalkraft in diesem Fall vor allem bei kurzen Quadern stark von der Magnethöhe abhängig. Mit zunehmender Magnetlänge  $l_M$  verliert dieser Effekt jedoch an Bedeutung, da die Normalkraft gegenüber der in Richtung Stirnseite wirkenden Querkraft überproportional ansteigt.

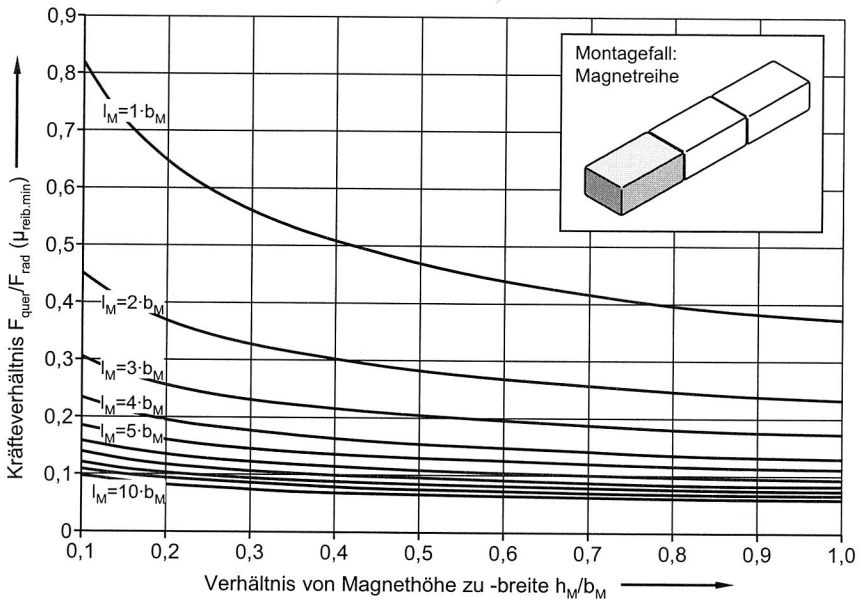


Bild 63: Kräfteverhältnis  $F_{\text{quer}}/F_{\text{rad}}$  bei Ablage einer Magnetreihe in Abhängigkeit von der Magnetbreite, -höhe und -länge

### Mittlere Reihe

Vor allem bei Läufern mit mehreren Magnetreihen pro Pol ist es gemäß der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Planungssystematik früher oder später notwendig, Magnete in den Raum zwischen zwei bereits montierte Magnetreihen einzufügen. Hierbei sind abhängig davon, ob die Bestückung ring- oder reihenweise erfolgt, unterschiedliche Szenarien zu berücksichtigen.

Wie in Bild 64 und Bild 65 gezeigt ist das kritische Kräfteverhältnis  $F_{\text{quer}}/F_{\text{rad}}$  bei der Bestückung von Magnetreihen, die zwischen zwei bereits vorher abgelegten Reihen gleicher Magnetisierungsrichtung anzuordnen sind, deutlich größer als bei der Montage einzelner, freiliegender Magnetreihen. Der Grund hierfür liegt in der reduzierten radialen Anziehungskraft, die aus der Durchdringung des weichmagnetischen Grundkörpers mit den Magnetfeldern der am Rand abgelegten Reihen resultiert. Insgesamt erweist sich die reihenweise Bestückung gegenüber der ringweisen jedoch als vorteilhaft, da besonders bei Magnethöhen von mehr als der 0,7-fachen Breite kleinere Reibwerte  $\mu_{\text{reib,min}}$  zur klebstofffreien Fixierung ausreichen.

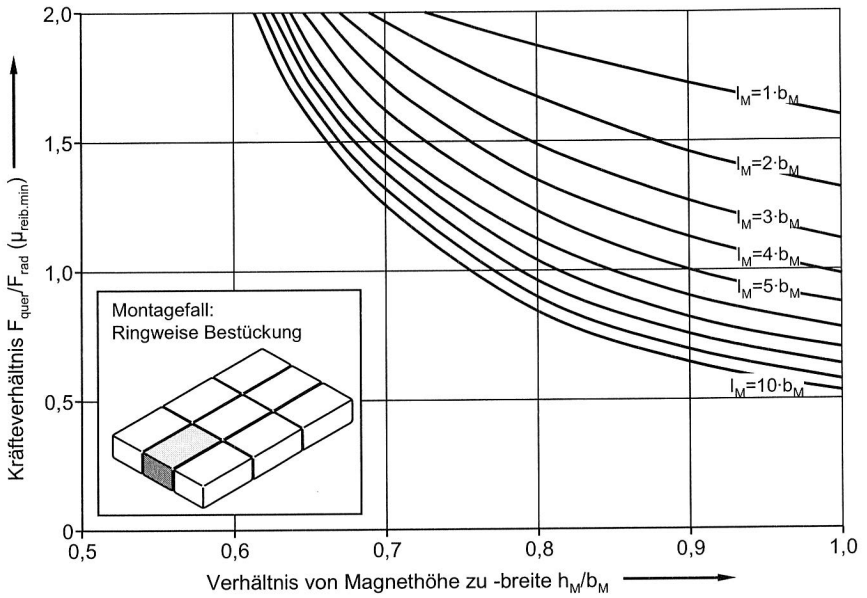


Bild 64: Kritisches Kräfteverhältnis bei ringweiser Bestückung

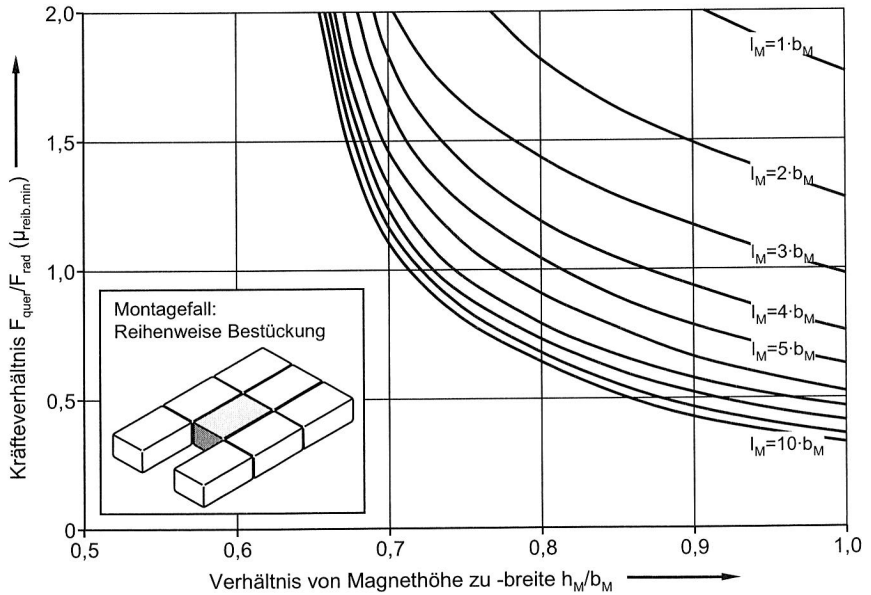


Bild 65: Kritisches Kräfteverhältnis bei reihenweiser Bestückung

In der Praxis erfolgt die Aneinanderreihung von Dauermagnetquadraten in der Regel nur in axialer Richtung absolut spaltfrei. Auf den Umfang bezogen ergeben sich dagegen wegen des polygonalen Blechpaketquerschnitts bei Polen, die mit mehr als einer Magnetreihe bestückt sind, Luftspalte zwischen den Seitenflächen benachbarter Magnetreihen. Daraus resultiert eine deutliche Verminderung der tangentialen Kräfte und damit der Gesamtquerkraft. Gleichzeitig führen die Luftspalte zu einer Anhebung der radialen Anzugskraft, so dass das tatsächliche Kraftverhältnis  $F_{\text{quer}}/F_{\text{rad}}$  und damit auch der benötigte minimale Reibwert  $\mu_{\text{reib.min}}$  kleiner ist als simuliert.

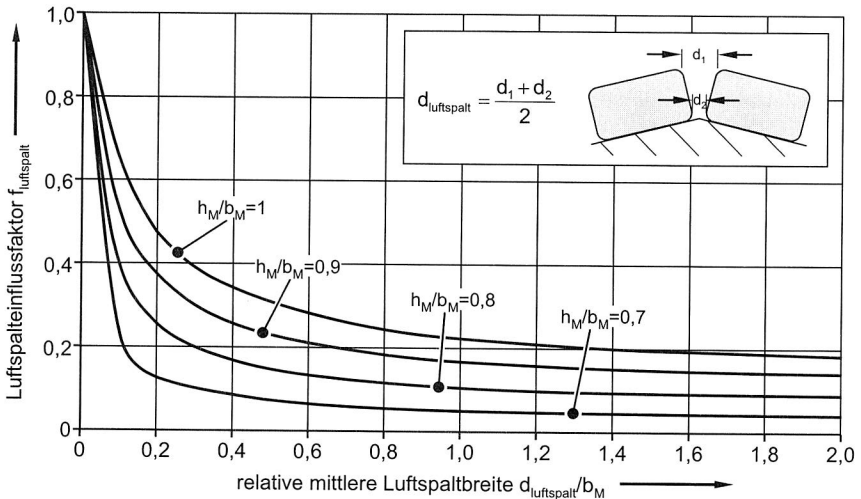


Bild 66: Kompensation des Unterschieds zwischen idealer, spaltfreier Magnetanordnung im Simulationsmodell und luftspaltbehaftetem Querschnitt am realen Läufer durch den Korrekturfaktor  $f_{\text{luftspalt}}$

Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wird der Luftspalteinflussfaktor  $f_{\text{luftspalt}}$  eingeführt. Dieser, ebenfalls per Simulation ermittelte Faktor berücksichtigt die Abweichung des realen Kraftverhältnisses von den Werten aus der Simulation, die sich bei unterschiedlichen Abständen zweier Magnetreihen für Magnetquerschnitte mit einem Höhen- zu Breitenverhältnis von mindestens 0,7 ergibt. Durch Multiplikation des aus dem zutreffenden Diagramm zu entnehmenden Werts  $\mu_{\text{reib.min}}$  mit diesem Korrekturwert ist eine Abschätzung des real benötigten Reibwerts  $\mu_{\text{reib.min,korr}}$  möglich.

$$\mu_{\text{reib.min,korr}} = f_{\text{luftspalt}} \cdot \mu_{\text{reib.min}} \quad (7.6)$$

Die Höhe des Luftspalteinflussfaktors ist dafür aus Bild 66 abzulesen. Da der mit diesem Verfahren bestimmte korrigierte Wert stets kleiner ist als der in der Simulation ermittelte Basiswert  $\mu_{\text{reib.min}}$ , ist eine halbezeitfreie Montage der mittleren Magnetreihe in vielen Fällen möglich.

## Randmagnet

Deutlich höhere Querkkräfte als bei den beschriebenen temporär symmetrischen Magnetsystemen wirken bei der Montage eines einzelnen Magnets an den Rand einer bereits bestehenden Anordnung. Zwar ist auch in diesem Fall die Verwendung flacher Bauteile ungünstiger als die hoher, jedoch nehmen die Querkkräfte wegen des großen Einflusses tangentialer Komponenten mit zunehmender Länge stärker zu als die Normalkraft. Somit wäre der Einsatz würfelförmiger Magnetkörper im Gegensatz zu den vorab beschriebenen Beispielen in diesem speziellen Montagefall grundsätzlich allen anderen Geometrien vorzuziehen. Aufgrund des hohen Reibwerts  $\mu_{\text{reib.min}}$  von mindestens 1,34, der zwischen den Fügepartnern zur haltezeitfreien Fixierung notwendig ist, ist die Bestückung einer derartigen Anordnung in der Praxis nicht ohne die Verwendung eines Klebstoffs und den damit einhergehenden Haltezeiten möglich (Bild 67).

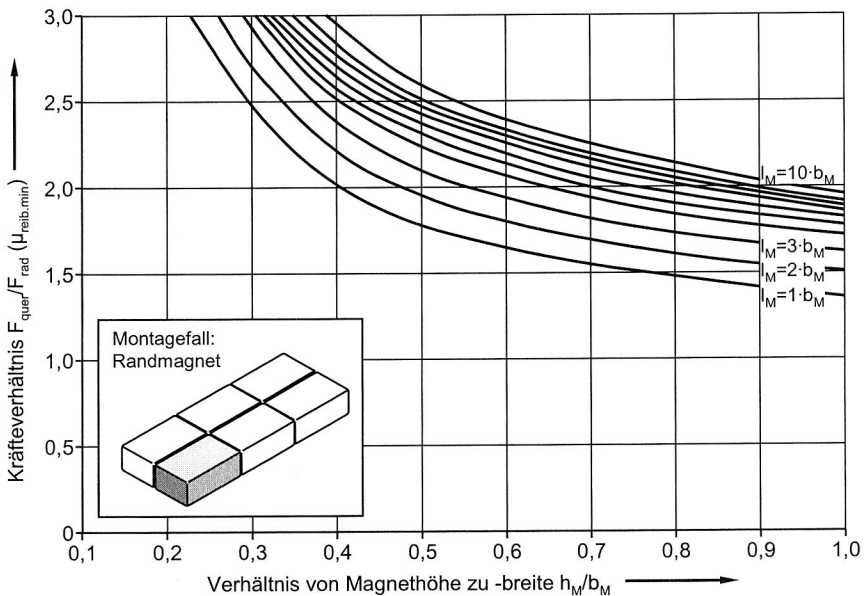
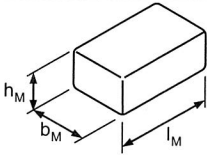


Bild 67: Kräfteverhältnis  $\mu_{\text{reib.min}}$  beim Ablegen eines Randmagnets

Während eine derartige Magnetkonfiguration bei Polen mit einer ungeraden Anzahl von Magnetreihen durch einen geeigneten Bestückablauf vermieden werden kann, ist sie bei Polen mit einer geraden Reihenzahl unvermeidlich (vgl. Kapitel 4.2). Daher ist eine haltezeitfreie und somit schnelle und wirtschaftliche Montage von Dauermagneten auf Läuferpolen mit zwei, vier, sechs, etc. aus einzelnen Magneten zusammengesetzten Reihen nicht möglich. Dies unterstreicht das große Potenzial der montagegerechten Gestaltung von Magneten und Läufern.

### 7.1.5 Konstruktionsempfehlung für die Magnetgestaltung

Wie die Ergebnisse der Simulationsstudie zur montagegerechten Gestaltung von Dauermagnetkörpern am Beispiel von Magnetquadern verdeutlichen, haben vor allem die Magnetlänge  $l_M$  sowie das Verhältnis von Magnethöhe  $h_M$  zu Magnetbreite  $b_M$  großen Einfluss auf den Reibwert  $\mu_{\text{reib,min}}$ . Die Forderung nach minimalen Haltezeiten erfüllen daher vor allem lange und hohe Magnetkörper. Zusammen mit den in Tabelle 10 beschriebenen Randbedingungen für eine wirtschaftliche Fertigung ergibt sich somit für die fertigungs- und montagegerechte Gestaltung von Magnetquadern die in Tabelle 12 zusammengefasste Richtlinie.

Skizze	Montagegerechte Dimensionen
	$h_M$ gemäß Formel 6.1 und 6.2 $b_M \geq 1,25 \cdot h_M$ $l_M \geq 5 \cdot b_M$

*Tabelle 12: Fertigungs- und montagegerechte Gestaltung von Läufermagneten am Beispiel eines Quaders*

Wenngleich auch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht, kann diese Gestaltungsempfehlung auch auf brotlaibförmige Magnetkörper übertragen werden. Aufgrund der Abnahme des Höhenmaßes  $h_M$  von der Mitte zu den Rändern ist sogar eine geringfügig bessere Haftung zu erwarten als bei Magnetquadern.

Schwieriger gestaltet sich die Vereinigung von fertigungs- und montagegerechten Gestaltungsaspekten dagegen bei Schalenmagneten, da hier gemäß [100] die Länge höchstens der dreifachen Magnetbreite entsprechen sollte. Zudem handelt es sich bei Schalenmagneten vorwiegend um flachere Geometrien, die, wie oben beschrieben, höhere Reibwerte zur haltezeitfreien Bestückung erfordern. Da Pole mit Schalenmagneten jedoch vorwiegend aus einer einzigen Magnetreihe bestehen, liegt der in Bild 63 dargestellte und generell günstig zu bewertende Bestückfall vor.

Da die Gestaltung von Magnetkörpern unmittelbare Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit permanent erregter Maschinen hat, sind die oben genannten Aspekte unbedingt schon während deren elektromagnetischer Auslegung zu berücksichtigen. Die montagegerechte Magnetdimensionierung muss daher vor allem bei in Serie gefertigten Maschinen systematisch in den Konstruktionsprozess eingebunden werden.

## 7.2 Montagegerechte Läuferkonstruktion

Neben der montagegerechten Gestaltung der Dauermagnete können auch Maßnahmen hinsichtlich der Läuferkonstruktion zur Vereinfachung des Montageprozesses beitragen. Dies gilt besonders für die Festlegung der Anzahl von Magnetreihen pro Pol. Wie bereits ausführlich erläutert, lassen sich die Prozesskräfte bei einer ungeraden Anzahl

nebeneinander auf einer Polfläche angeordneter Magnetreihen deutlich leichter beherrschen als dies bei geradzahliger Auslegung möglich ist.

Daneben beeinflusst auch die Rauigkeit des Blechpakets die Ausbildung von Haftkräften und damit die Höhe des Verhältnisses von Quer- zu Normalkräften. Der Grund hierfür liegt in der Oberflächenstruktur, die bei geblechten Läufern aufgrund von Fertigungstoleranzen, wie bspw. Graten oder Maßungenaugigkeiten, mikroskopisch betrachtet sehr uneben ist. Die Magnete liegen daher nur punktuell auf dem Blechpaket auf, woraus ein parasitärer Luftspalt in der Kontaktzone resultiert. Dieser Zusammenhang wurde im Rahmen der Arbeit experimentell nachgewiesen.

Hierfür wurden mit Hilfe einer Zugprüfmaschine die Haftkräfte von NdFeB-Quadern auf einem massiven Weicheisenblock mit unterschiedlichen Oberflächengüten gemessen. Wie in Bild 68 dargestellt, kommt es mit zunehmender Rauigkeit zu einer starken Abnahme der durchschnittlichen magnetischen Anziehungskraft. Angesichts der anhand unterschiedlicher exemplarischer Läufer gemessenen Blechpaketrauigkeiten von 60 bis 85  $\mu\text{m}$  kann dieser Sachverhalt ebenfalls das kritische Kräfteverhältnis  $\mu_{\text{reib,min}}$  beeinflussen.

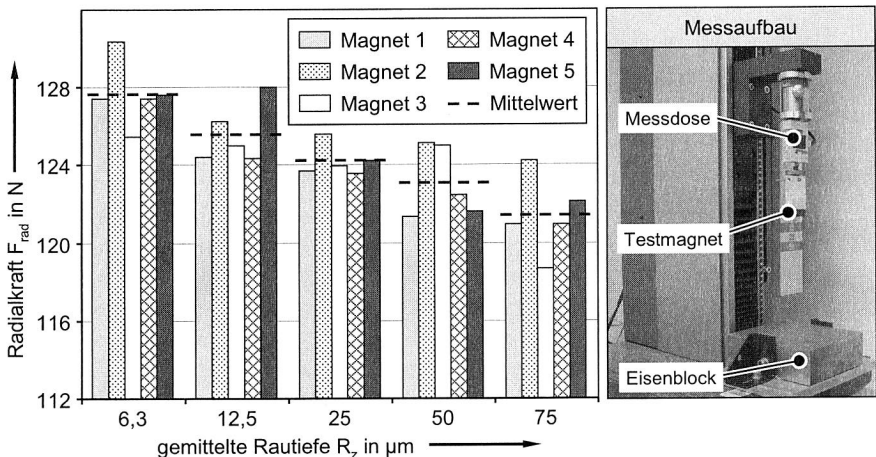


Bild 68: Einfluss der Oberflächenrauigkeit des Blechpakets auf die magnetische Haftkraft und verwendeter Versuchsaufbau

Um eine optimale Haftung der Magnete auf der Läuferoberfläche zu gewährleisten, ist deshalb eine möglichst ebene Oberflächenstruktur des Blechpakets anzustreben. Dies kann einerseits durch die Optimierung der Fertigungsverfahren zur Herstellung des eisenfertigen Läufers oder durch eine Nachbearbeitung der zu bestückenden Flächen erfolgen. Des Weiteren ist vor diesem Hintergrund darauf zu achten, dass eventuelle Schweißnähte zur mechanischen Fixierung und elektrischen Kontaktierung der Bleche untereinander nicht auf den zu bestückenden Polflächen, sondern vorzugsweise auf



den Poltrennungen aufgebracht werden. Darüber hinaus gelten auch für die Gestaltung von Läufern die üblichen Richtlinien zur montagegerechten Bauteilkonstruktion.

### 7.3 Effiziente Programmierung von Bestückanlagen

Ein weiterer Aspekt, den es bei der Realisierung flexibler Bestückanlagen zu berücksichtigen gilt, ist der Aufwand zur Programmierung des Handhabungsgeräts. Abhängig von der Läuferkomplexität (Polzahl, Reihen pro Pol, Magnete pro Reihe, etc.) und der Variantenzahl ist die manuelle Erstellung und Anpassung der Ablauf- und Bewegungsprogramme vor allem bei hohem Variantenreichtum eine sehr zeitintensive Aufgabe. So verringert die On-Line-Programmierung von Bestückrobotern im Teach-In-Verfahren die Verfügbarkeit der Produktionsanlage, wodurch die Anlage während der Programmierung nicht für den produktiven Einsatz zur Verfügung steht und kostenintensive Stillstandszeiten anfallen. Auch wenn diese mittels Off-Line-Programmierverfahren [40] größtenteils eliminiert werden können, ist der Einsatz von Fachpersonal zur Programmierung bei den bisherigen Programmiermethoden nach wie vor unvermeidbar. Aktuelle Forschungsansätze zielen dagegen darauf ab, die zur Durchführung von Montageprozessen benötigten Bewegungsabläufe unmittelbar aus dem CAD-Modell des betreffenden Produkts abzuleiten [115]. Allerdings erfordert auch diese, von qualifiziertem Personal umzusetzende und zu bedienende Methode erheblichen Implementierungsaufwand zur Erstellung und Anpassung einer entsprechenden Schnittstelle im CAD-System.

Dennoch bietet der Einsatz rechnergestützter Methoden in diesem speziellen Anwendungsfall die Chance, die Defizite bestehender Programmierkonzepte zu umgehen. Ermöglicht wird dies durch die geometrischen Abhängigkeiten, die zwischen den einzelnen Formelementen von Läufern vorliegen. Sie stellen die Basis für den Einsatz parametrisierbarer Roboterprogramme dar und gestatten eine flexible Berechnung der vom Handhabungsgerät anzufahrenden Punkte.

#### 7.3.1 Geometrische Grundlagen

Aufgrund der annähernd zylindrischen Form von Läufern eignen sich insbesondere Zylinderkoordinaten zu deren geometrischen Beschreibung. Die Angabe einer Position erfordert in diesem Koordinatensystem einerseits Polarkoordinaten, die den Abstand  $r$  und den Winkel  $\varphi$  des Punkts bezogen auf den Ursprung angeben sowie eine Applikate  $z_{\text{pol}}$ , die die Höhe des Punkts über der Bezugsebene des Koordinatensystems repräsentiert [9].

Übertragen auf die vorliegende Problemstellung entspricht  $r$  dem halben Abstand zweier gegenüberliegender Ablageflächen. Bei Läufern mit polygonalem Querschnitt ist dies der Inkreisradius des Vielecks. Der Wert  $r$  ist für alle Magnete eines Läufers gleich. Bild 69 verdeutlicht diese geometrischen Zusammenhänge von PM-Läufern.

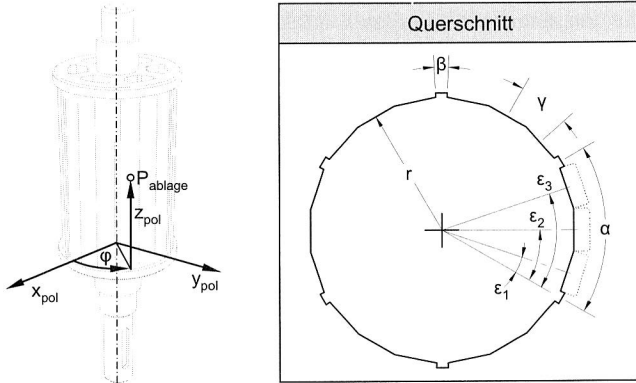


Bild 69: Geometrische Abhängigkeiten bei der Bestimmung von Ablagepunktkoordinaten in Zylinderkoordinaten

Im Gegensatz dazu hängen  $\varphi$  und  $z$  von der Position des Magnets auf der Läuferoberfläche ab. Die Bestimmung des Bestückwinkels  $\varphi$  erfolgt über die Geometrie des Läuferquerschnitts, der abstrakt betrachtet aus  $2 \cdot p$  Kreissektoren, die die  $n_{\text{pol}}$  Einzelpole des Rotors repräsentieren, besteht. Der Mittelpunktswinkel  $\alpha$  eines Polsektors ergibt sich aus der Polpaarzahl  $p$  des Läufers.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot p} \quad (7.7)$$

Die Außenkontur eines Polsegments setzt sich aus der Poltrennung sowie den Bereichen zur Ablage der Magnetkörper zusammen. Der Ablagepunkt liegt stets auf der parallel zur Läuferachse verlaufenden Mittellinie einer Ablagefläche, so dass sich der Winkelversatz  $\gamma$  zwischen zwei benachbarten Magneten abhängig vom Poltrennungswinkel  $\beta$  sowie der gesamten Reihenzahl  $n_{\text{reihe.gesamt}}$  pro Pol zu

$$\gamma = \frac{\alpha - \beta}{n_{\text{reihe.gesamt}}} \quad (7.8)$$

bestimmt. Auf Basis dieser beiden Gleichungen kann der Ablagewinkel  $\epsilon_n$  der  $n_{\text{reihe}}$ -ten Magnetreihe eines Pols relativ zur Mittellinie der Poltrennung durch den Zusammenhang

$$\epsilon_n = \frac{\beta}{2} + n_{\text{reihe}} \cdot \gamma \quad (7.9)$$

berechnet werden. Die  $\varphi$ -Koordinate eines Magnets, der in der  $n_{\text{reihe}}$ -ten Reihe des  $n_{\text{pol}}$ -ten Pols abgelegt werden soll, ergibt sich somit zu:

$$\varphi = (n_{\text{pol}} - 1) \cdot \alpha + \epsilon_n \quad (7.10)$$

Analog dazu kann die  $z_{\text{pol}}$ -Koordinate des  $n_{\text{spalte}}$ -ten Magnets einer Reihe bestimmt werden. Sie ergibt sich ausgehend von der dem zu bestückenden Bereich zugewandten

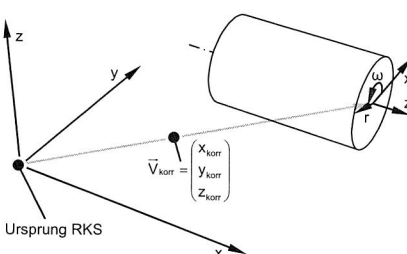
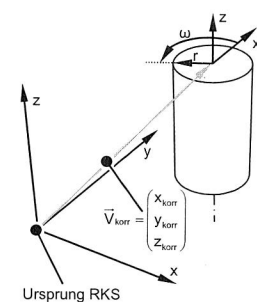
Stirnfläche der Druckplatte aus der Position des Magnets innerhalb einer Reihe sowie der Magnetlänge  $l_M$ .

$$z_{\text{pol}} = (n_{\text{spalte}} - 1) \cdot l_M \quad (7.11)$$

Die Positionen der Ablagepunkte können somit für alle Magnete eines Läufers in Zylinderkoordinaten ermittelt werden. Da die Punktdefinition bei NC- und Robotersteuerungen standardmäßig in kartesischen Koordinaten erfolgt, ist eine Transformation der polaren  $(r, \varphi, z)$  in orthogonale Koordinaten  $(x, y, z)$  notwendig. Dabei berechnen sich  $x$ ,  $y$  und  $z$  nach [9] zu:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\varphi \\ y &= r \cdot \sin\varphi \\ z &= z_{\text{pol}} \end{aligned} \quad (7.12)$$

Die vierte, gemäß Kapitel 5.2.1, zur Bestückung erforderliche Koordinate  $\omega$  entspricht dabei der  $\varphi$ -Koordinate der einzelnen Ablagepositionen zzgl. des während der Referenzierung ermittelten Korrekturwinkels  $\omega_{\text{korr}}$ , der die rotative Lageabweichung von Roboter- und Läuferbezugssystem beschreibt.

Liegende Lagerung	Stehende Lagerung
 $\vec{V}_{\text{korr}} = \begin{pmatrix} x_{\text{korr}} \\ y_{\text{korr}} \\ z_{\text{korr}} \end{pmatrix}$ $\begin{aligned} x_{\text{ablage}} &= x_{\text{korr}} - z_{\text{pol}} \\ y_{\text{ablage}} &= y_{\text{korr}} \\ z_{\text{ablage}} &= r + z_{\text{korr}} \\ \omega_{\text{ablage}} &= \varphi + \omega_{\text{korr}} \end{aligned}$	 $\vec{V}_{\text{korr}} = \begin{pmatrix} x_{\text{korr}} \\ y_{\text{korr}} \\ z_{\text{korr}} \end{pmatrix}$ $\begin{aligned} x_{\text{ablage}} &= r \cdot \cos(\varphi + \omega_{\text{korr}}) + x_{\text{korr}} \\ y_{\text{ablage}} &= r \cdot \sin(\varphi + \omega_{\text{korr}}) + y_{\text{korr}} \\ z_{\text{ablage}} &= z_{\text{korr}} - z_{\text{pol}} \\ \omega_{\text{ablage}} &= \varphi + \omega_{\text{korr}} \end{aligned}$

**Bild 70:** Transformation der Koordinaten des Ablagepunkts  $P_{\text{ablage}}$  in das Bezugssystem des Handhabungsgeräts für liegend und stehend bestückte Läufer

Die Lage dieses auf den Läufer bezogenen Koordinatensystems im Arbeitsraum des Roboters hängt sowohl von der Anordnung des Handhabungsgeräts  $(x, y, z)$  als auch vom gewählten Lagerungskonzept  $(\varphi)$  ab. Beim Vergleich der beiden in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Kinematiken wird deutlich, dass bei liegend gelagertem Läufer die Variation von  $\varphi$  durch die Rotation der vom Handhabungsgerät losgelösten Positionierachse

erfolgt. Im Gegensatz dazu geschieht dies beim stehenden Läufer durch die Bewegung des Handhabungsgeräts selbst. Der Wert  $\omega_{\text{kor}}_{\text{r}}$  repräsentiert dabei den Winkel, um den der Läufer bereits während der Referenzfahrt gedreht wird. Gleiches gilt auch für die Transformation des Läuferkoordinatensystems in das des Roboters durch einen Korrekturvektor  $V_{\text{kor}}_{\text{r}}$ . Die sich dadurch ergebenden Koordinatensysteme für die Implementierung des Bewegungsprogramms zeigt Bild 70.

Zusätzlich sind bei der Programmierung des Handhabungsgeräts die Relativposition des Läuferkoordinatensystems im Arbeitsraum des Roboters sowie eventuelle Verschiebungen des Greifpunkts durch die Greiferkonstruktion zu berücksichtigen. Letztere kann jedoch einfach durch die Erstellung eines Werkzeugkoordinatensystems kompensiert werden, was ein Standardfeature moderner Robotersteuerungen darstellt.

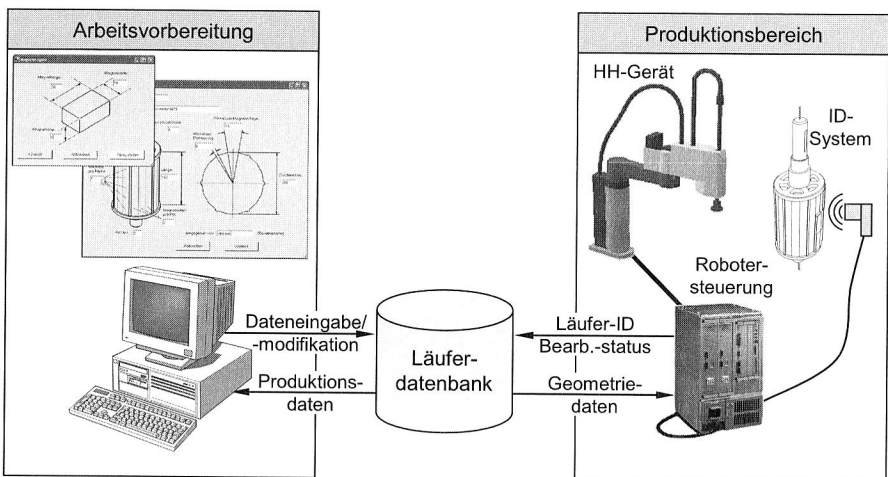
### **7.3.2 Steuerungskonzept zur variantenflexiblen Roboterprogrammierung**

Mit Hilfe dieser Gleichungen können die für den Bestückvorgang benötigten Punkte auf Basis weniger Größen, und zwar dem Läuferdurchmesser, der Magnetlänge sowie der Polpaarzahl, dem Poltrennungswinkel, der Reihenzahl pro Pol und der Anzahl von Magneten pro Reihe, bestimmt werden. Da sich anhand dieser Variablen beliebige Läufer beschreiben lassen, ist die Bestückung unterschiedlicher Rotorvarianten mit Hilfe eines parametrisierbaren Roboterprogramms, das die Verfahrensbewegungen zur Laufzeit gemäß den Geometriedaten berechnet, möglich. Die variantenspezifischen Parameter können dabei grundsätzlich entweder manuell eingegeben oder informationstechnisch zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere für die variantenreiche Serienproduktion bietet die rechnergestützte Bereitstellung der Produktdaten Vorteile, da in diesem Fall eine einmalige Eingabe und Speicherung der geometrischen Merkmale ausreicht.

Neben der Implementierung des Bewegungsprogramms auf der Robotersteuerung ist deshalb eine geeignete Speicherung der Geometriedaten notwendig. Dies kann entweder in Produktdatenmanagementsystemen [29] oder proprietären Softwarelösungen erfolgen. Angesichts der geringen Anzahl und Komplexität der zu hinterlegenden Daten bietet sich das manuelle Einpflegen der Geometriedaten an, wofür eine geeignete Bedienoberfläche zur Verfügung zu stellen ist. Damit eine Abfrage überhaupt erst möglich ist, muss zudem die zu bestückende Läufervariante ermittelt werden. Dies erfolgt vorzugsweise durch den Einsatz eines am Werkstückträger angebrachten Informationsspeichers, wie einem RFID-basierten Identifikationssystem oder Barcodes, auf dem relevante Läuferdaten gespeichert sind.

Alternativ zur zentralen Speicherung der Geometriedaten ist es zudem möglich, diese dezentral direkt auf dem Werkstückträger zu speichern. In diesem Fall kann die Datenbankabfrage entfallen, da die zur Ausführung des Montageprozesses erforderlichen Daten unmittelbar von der Robotersteuerung aus dem Informationsspeicher, bspw. einem beschreibbaren RFID-Transponder, eingelesen werden können. Allerdings müssen diese Daten dafür zu einem früheren Zeitpunkt, bspw. bei der Kommissionierung des eisenfertigen Rotors, auf den Werkstückträger bzw. das Informationssystem übertragen werden.

Nachdem die zur Ausführung des Roboterprogramms benötigten Parameter an die Robotersteuerung übertragen wurden, kann mit dem eigentlichen Bestückprozess begonnen werden. Hierfür ist zunächst die rotative Lage des Läufers im Arbeitsraum des Roboters zu ermitteln. Die Erfassung der Nullpunktverschiebung erfolgt dabei mittels eines Sensors, der sich relativ zum Läuferkoordinatensystem auf einer Kreisbahn um den Rotor bewegt. Abhängig davon, ob ein liegendes oder stehendes Lagerungskonzept zum Einsatz kommt, geschieht dies durch Rotation des Läufers mit Hilfe des Positionierantriebs oder durch Ausführen einer konzentrischen Bahnbewegung um die Läuferachse. Wird das spezifizierte Geometriemerkmal durch den Sensor identifiziert, kann die Transformation des Läuferkoordinatensystems in das des Handhabungsgeräts erfolgen und der Bestückprozess beginnen (Bild 71).



**Bild 71:** Informationsfluss zwischen Dateneingabe, Läuferdatenbank und Robotersteuerung beim Einsatz parametrisierbarer Bestückprogramme

Gegenüber konventionellen Programmiermethoden ergibt sich eine erhebliche Verringerung des Aufwands für die Erstellung und Anpassung der Roboterprogramme. Einzige die Ermittlung des Korrekturvektors  $V_{\text{kor}}$  muss dabei noch an der realen Anlage erfolgen. Somit kann der Einsatz parametrisierbarer Roboterprogramme maßgeblich zur Erhöhung der Flexibilität, zur Verringerung von Anlaufzeiten und zur Kostensenkung beitragen.



## **8      Wirtschaftliches Potenzial der entwickelten Montagetechnologien**

Insbesondere für Unternehmen mit Produktionsstandorten in Hochlohnregionen ist die wirtschaftliche Herstellung überwiegend manuell gefertigter Güter schwierig [112]. Grund hierfür ist die wachsende Konkurrenz durch Wettbewerber, die an Niedriglohnstandorten auch arbeitsintensive Tätigkeiten bei niedrigem Automatisierungsgrad äußerst kosteneffizient durchführen können. Gleichzeitig steigt die Qualität vieler kostengünstig im Ausland produzierter Güter kontinuierlich an, so dass auch diesbezüglich langfristig eine Angleichung stattfinden wird und bestehende Wettbewerbsvorteile verschwinden werden. Da hohe Qualität und geringe Kosten elementare Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen sind, werden vor allem Produzenten an Hochlohnstandorten dazu gezwungen, ihre Wettbewerbsfähigkeit durch kontinuierliche Kostensenkungen langfristig zu sichern und auszubauen. Dies kann neben der Verlagerung von Arbeitsinhalten an Niedriglohnstandorte auch durch die Rationalisierung der Produktionsprozesse an bestehenden Produktionsstätten erfolgen. [59] [73]

Die Herstellung permanent erregter Läufer für elektrische Maschinen ist ein typisches Beispiel für diese Problemstellung. Wie in Kapitel 2.4 erläutert, betreibt eine Vielzahl der befragten Unternehmen mit Stammsitz an einem teuren Standort bereits heute Produktionsstätten in Niedriglohnländern. Die technische Umsetzbarkeit von Systemen und Anlagen zur automatischen Ausführung der Läuferbestückung mit angeregten Läufermagneten ist somit lediglich die Grundvoraussetzung für den industriellen Einsatz dieses Produktionsverfahrens. Einen wesentlichen Aspekt für die erfolgreiche Anwendung der beschriebenen Prozesse und Technologien stellt jedoch deren finanzieller Nutzen dar. Konkret heißt das, dass die Produktionskosten automatisierter Lösungen unter dem an Niedriglohnstandorten anfallenden finanziellen Aufwand liegen müssen.

Hierfür wird im Folgenden zunächst ein Rechenmodell vorgestellt, das eine schnelle und einfache Abschätzung der Kosten alternativer Bestücklösungen ermöglicht. Darauf aufbauend wird das wirtschaftliche Potenzial der entwickelten Montagetechnologien aufgezeigt, das im Rahmen dieser Arbeit mit den heute praktizierten Produktionsmethoden am Beispiel permanent erregter Fahrmotorläufer verglichen wurde.

### **8.1    Rechenmodell zur monetären Beurteilung alternativer Bestücklösungen**

Wirtschaftlichkeitsrechnungen dienen der Vorbereitung von Investitionsentscheidungen mit Hilfe rationaler Überlegungen und systematischer Berechnungen. Auch wenn monetär nicht bewertbare Faktoren, wie bspw. Risiken am Beschaffungs-, Absatz- oder Kapitalmarkt sowie technologische Entwicklungen, vor allem in Hinblick auf die zunehmende Dynamik der globalen Märkte verstärkt an Bedeutung gewinnen, ist die Maximierung der Wirtschaftlichkeit nach wie vor fundamental für das Treffen von Investitionsentscheidungen.

Finanzmathematisch können Investitionen durch eine Reihe von Auszahlungen (z. B. Ausgaben für Werkstoffe, Betriebsmittel, Löhne, etc.) und die durch sie erwirtschafteten Einzahlungen (z. B. durch den Verkauf von Gütern) beschrieben werden. Liegt die Höhe der Einnahmen, die sich durch die betrachtete Maßnahme ergeben, dauerhaft über den Ausgaben, so gilt eine Investition als vorteilhaft. Aus den Finanzwissenschaften sind eine Vielzahl von Verfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen bekannt, die sich in statische (z. B. Kosten- bzw. Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung, Amortisationsrechnung) und dynamische Verfahren (z. B. Kapitalwertmethode, Annuitätenmethode, interne Zinsfußmethode, Kostensimulation) einteilen lassen [118] [131]. Während bei statischen Berechnungen über den gesamten Betrachtungszeitraum von konstanten Aus- und Einzahlungen ausgegangen wird, werden bei dynamischen Methoden Veränderungen bei Ein- und Auszahlungen, die sich bspw. durch Zins- und Zinseszinsseffekte ergeben, ebenfalls berücksichtigt. [129]

Eine derart detaillierte Betrachtung ist zur Darstellung der wirtschaftlichen Potenziale, die sich aus den in dieser Arbeit vorgestellten Bestücktechnologien ergeben, nicht sinnvoll. Vielmehr ist eine Gegenüberstellung der Kostenstruktur konventioneller manueller und automatischer Bestückmethoden mit den vorgestellten Verfahren zur automatisierten Bestückung angeregter Dauermagnete zielführend. Unter der Annahme, dass der mit den produzierten Läufern erzielbare Erlös unabhängig vom Herstellungsverfahren stets gleich ist, erfolgt die wirtschaftliche Bewertung der Arbeitsergebnisse anhand einer Kostenvergleichsrechnung.

### 8.1.1 Fixkosten

Kosten, die unabhängig vom Nutzungsgrad einer Anlage in einer konstanten Höhe anfallen, werden unter dem Begriff „Fixkosten“ zusammengefasst. Bei der Läuferbestückung ist der Betrag der fixen Kosten vor allem vom ausgewählten Montagekonzept abhängig. Im Folgenden werden die wesentlichen unter diesen Punkt fallenden Ausgaben kurz vorgestellt.

#### Abschreibungskosten $C_{\text{fix,abschreibung}}$

Alle Kosten, die bei der Beschaffung einer neuen Anlage anfallen, werden unter dem Begriff Investitionskosten zusammengefasst. Sie umfassen neben dem reinen Kaufpreis auch den finanziellen Aufwand für Installation und Inbetriebnahme der Anlage sowie den eventuell anfallenden Such- und Rechercheaufwand, Vermittlungskosten oder Transportkosten. [72]

$$C_{\text{fix,abschreibung}} = \frac{\sum C_{\text{invest}}}{t_{\text{nutzung}}} \quad (8.1)$$

Für die gegenüberstellende Bewertung alternativer Konzepte zur Magnetbestückung sind dabei insbesondere die Anschaffungskosten  $C_{\text{invest}}$  für Geräte zur Läuferhandhabung, Werkstückträger, Bestückroboter oder -arbeitsplätze und Magnetisieranlagen zu berücksichtigen. Da Investitionen in der Regel über einen längeren Zeitraum genutzt



werden, geht die jährliche Wertminderung der beschafften Anlagen, die sog. Abschreibungskosten, in die Kostenvergleichsrechnung ein. Für eine Abschätzung der Produktionskosten wie im vorliegenden Fall wird von einer linearen Abschreibung der Anschaffungskosten ausgegangen. Der jährlich anzusetzende Betrag ergibt sich aus dem Quotienten von Anschaffungskosten und der Einsatzdauer  $t_{\text{Nutzung}}$  in Jahren. Da die Abschreibungskosten von den eingesetzten Montagetechnologien abhängen, werden sie für die vorliegende Untersuchung an allen Standorten als gleichwertig angenommen.

### Kalkulatorische Zinsen $C_{\text{fix.zins}}$

Mit den finanziellen Mitteln, die zur Anschaffung einer Investition benötigt werden, können Unternehmen keine Zinserträge auf dem Kapitalmarkt mehr erzielen. Die entgangenen Einnahmen werden daher im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsrechnung als kalkulatorische Zinsen berücksichtigt. Unter der Voraussetzung einer linearen Abschreibung berechnen sich die Zinskosten bei dem Zinssatz  $f_{\text{zins}}$  nach [72] vereinfacht zu

$$C_{\text{fix.zins}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\text{zins}} \cdot \sum C_{\text{invest}} \quad (8.2)$$

### Instandhaltungskosten $C_{\text{fix.instandhaltung}}$

Während des Betriebs von Produktionsanlagen fallen Kosten für deren Wartung an, wie bspw. Inspektionen, den Austausch von Verschleißteilen oder Betriebsstoffen und Reparatur. Da Aussagen über Instandhaltungskosten zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung angesichts unzureichender Kenntnisse des Systemverhaltens bzw. der Verfügbarkeit mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, wird in [72] eine Abschätzung der zu erwartenden Aufwendungen in Bezug auf die Investitionskosten vorgeschlagen. Der Betrag der jährlich anzusetzenden Instandhaltungskosten ergibt sich dabei in Abhängigkeit vom Nutzungs- und Technisierungsgrad gemäß Tabelle 13.

Auslastung	$f_{\text{instand}}$ in Abhängigkeit des Technisierungsgrads
1-Schichtbetrieb	3 % - 5 % der Investitionssumme
2-Schichtbetrieb	6 % - 10 % der Investitionssumme

Tabelle 13: *Prozentualer Anteil der jährlichen Instandhaltungskosten in Abhängigkeit vom Technisierungsgrad einer Produktionsanlage nach [72]*

Die jährlich anfallenden Instandhaltungskosten berechnen sich somit zu

$$C_{\text{fix.instand}} = f_{\text{instandhaltung}} \cdot \sum C_{\text{invest}} \quad (8.3)$$

#### 8.1.2 Variable Kosten

Bei variablen Kosten handelt es sich um Ausgaben, deren Höhe unmittelbar von der Auslastung eines Produktionssystems beeinflusst wird. Im Gegensatz zu fixen Kosten ist bei ihnen eine direkte Umlegung auf die hergestellten Produkte möglich. Neben Beschaffungskosten sind dies vor allem Transport-, Logistik- und Zollkosten, woraus eine

starke Abhängigkeit vom betrachteten Standort resultiert. Da für die folgenden Ausführungen vereinfacht angenommen wird, dass die Mitarbeiter in der Zeit, in der sie keine Montage-, Transport- oder sonstigen Tätigkeiten an den Läuferrichtungen verrichten, andere Aufgaben übernehmen können, erfolgt die Kalkulation der Arbeitskosten ebenfalls anteilig.

### • Lohnkosten $C_{\text{var.lohn}}$

Die Ausgaben für das Montagepersonal sind insbesondere bei der manuellen Bestückung von Läuferrichtungen für die Höhe der Produktionskosten entscheidend. Neben den Anforderungen an die Qualifikation der Mitarbeiter hängt das Lohnkostenniveau maßgeblich von den jeweiligen Arbeitsmärkten ab. Aufgrund der deutlichen regionalen Unterschiede bezüglich der Personalausgaben sehen viele Firmen in der Verlagerung arbeitsintensiver Montagetätigkeiten an Niedriglohnstandorte erhebliches Potenzial zur Kostenreduktion. Die in der Kostenvergleichsrechnung anzusetzenden Lohnkosten ergeben sich aus dem Produkt der zur Wertschöpfung benötigten Arbeitszeit  $t_{\text{herstellung}}$  in Stunden sowie dem pro Zeiteinheit zu bezahlenden Stundensatz  $f_{\text{var.lohn}}$ .

$$C_{\text{var.lohn}} = f_{\text{var.lohn}} \cdot t_{\text{herstellung}} \quad (8.4)$$

Die jährliche Arbeitszeit lässt sich aus der Personalintensität des Montagekonzepts herleiten. Die Basis hierfür stellt die jährliche Gesamtfertigungszeit dar, die sich aus der jährlich zu bestückenden Magnetmenge  $n_{\text{Magnet/a}}$ , den Taktzeiten für die Magnetbestückung  $t_{\text{Zyklus}}$ , der Anzahl der jährlich zu bestückenden Läufer  $n_{\text{Läufer/a}}$  sowie der Häufigkeit  $n_{\text{WT-Wechsel}}$  pro Läufer und den Werkstückwechselzeiten  $t_{\text{WT-Wechsel}}$  ergibt.

$$t_{\text{Herstellung}} = n_{\text{Magnet/a}} \cdot t_{\text{Zyklus}} + n_{\text{WT-Wechsel}} \cdot n_{\text{Läufer/a}} \cdot t_{\text{WT-Wechsel}} \quad (8.5)$$

Die Höhe des zur Berechnung der Lohnkosten notwendigen Stundensatzes  $f_{\text{var.lohn}}$  hängt sehr stark vom gewählten Montagestandort ab und ist entsprechend dem regionalen Lohnniveau einzusetzen.

### Beschaffungskosten $C_{\text{var.beschaffung}}$

Ähnlich wie bei den Lohnkosten können auch bei den Beschaffungskosten regionale Unterschiede auftreten. Da diese aufgrund von Konsumzyklen und den vielfältigen Interdependenzen internationaler Märkte starken dynamischen Schwankungen unterliegen, wird für die folgende Betrachtung davon ausgegangen, dass die Einkaufskosten für alle Bauteile an allen untersuchten Standorten gleich sind. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit alternativer Bestückerlösungen ist in der Praxis zudem die Kostendifferenz beim Einkaufspreis  $C_{\text{magnet.mag.}}$  magnetisierter bzw.  $C_{\text{magnet.unmag.}}$  unmagnetisierter Magnete und die jährlich davon verbrauchte Menge  $n_{\text{magnete/a}}$  von Bedeutung. Da der Preisunterschied zwischen magnetisierten und unmagnetisierten Körpern vernachlässigbar klein ist, wird für die folgende Berechnung von einem einheitlichen Wert  $C_{\text{magnet}}$  ausgegangen. Darüber hinaus sind in der Praxis zudem die Materialkosten für die eisenfertigen Läufer, die primär vom weltweiten Stahlpreis abhängen, für die Ermittlung

von Transportzins und Zollkosten relevant. Diese werden jedoch im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, da sie die Bestückkosten nicht unmittelbar beeinflussen.

$$C_{\text{var.beschaffung}} = (C_{\text{magnet.mag.}} + C_{\text{magnet.unmag.}}) \cdot n_{\text{magnete/a}} \quad (8.6)$$

### Nacharbeitskosten $C_{\text{var.nacharbeit}}$

Die Robustheit der Produktionsprozesse zur Läuferbestückung hängt unmittelbar vom gewählten Montagekonzept ab. Da automatisierte Lösungen in der Regel eine höhere Prozesssicherheit bieten als die manuelle Ausführung von Arbeitsschritten, geht mit der automatischen Durchführung von Montagetätigkeiten ein geringerer Nacharbeitsaufwand einher. Dabei wirken sich insbesondere die schonendere Behandlung der empfindlichen Magnete und die geringere Gefahr falsch polarisierter Magnete positiv aus. Als kritisch anzusehen ist dagegen die manuelle Bestückung von Läufern mit angeregten Dauermagnetkörpern, bei der die falsche Feldausrichtung mangels visueller Kontrollmöglichkeiten die Hauptfehlerquelle darstellt. Die Höhe der Nacharbeitskosten ergibt sich aus dem Produkt der Lohnkosten mit den Nacharbeitsfaktoren, die abhängig vom Qualifizierungsniveau ( $f_{\text{var.nacharbeit.standort}}$ ) sowie dem Automatisierungsgrad und der Komplexität der Montageaufgabe ( $f_{\text{var.nacharbeit.prozess}}$ ) festzulegen sind.

$$C_{\text{var.nacharbeit}} = f_{\text{var.nacharbeit.standort}} \cdot f_{\text{var.nacharbeit.prozess}} \cdot C_{\text{var.lohn}} \quad (8.7)$$

### Transportkosten $C_{\text{var.transport}}$

Vor dem Hintergrund globaler Produktionsstätten spielt der Transport von Baugruppen und Erzeugnissen eine zunehmend wichtigere Rolle. Dies gilt besonders dann, wenn sich der Produktionsstandort nicht in unmittelbarer Nähe zum Absatzmarkt befindet und die Produkte vor dem Verkauf zunächst über lange Entfernungen zum Kunden befördert werden müssen [73]. Angesichts der großen Differenzen, die sich hinsichtlich der Transportkosten bei unterschiedlichen Montagestandorten ergeben, ist deren Berücksichtigung in der Kostenvergleichsrechnung unerlässlich.

Abhängig von der Art des Verkehrsmittels ergeben sich unterschiedliche Kostensätze für den Land- und Seetransport, die bei der Berechnung der Transportkostenhöhe zu berücksichtigen sind. Im Fall des Seetransports ist zudem zu beachten, dass in der Regel zwei Strecken per Lkw zurückzulegen sind, und zwar vom Produktionsstandort zum Verladehafen und vom Zielhafen zum Kunden. Die Kosten für einen einzelnen Transport ergeben sich daher aus dem Produkt des Transportkostensatzes  $f_{\text{lkW}}$ ,  $f_{\text{schiene}}$  bzw.  $f_{\text{see}}$  und den zurückzulegenden Entfernungen  $d_{\text{lkW}}$ ,  $d_{\text{schiene}}$  bzw.  $d_{\text{see}}$ . Durch Multiplikation der Einzeltransportkosten mit den jährlich beförderten Ladungseinheiten  $L_a$  können die insgesamt anfallenden Transportkosten abgeschätzt werden. Eine Ladungseinheit entspricht dabei der Anzahl fertiger Produkte, die maximal mit einer Transporteinheit befördert werden können. Angesichts der universellen Einsetzbarkeit entspricht im vorliegenden Fall eine Ladungseinheit einem standardisierten 40' ISO-Container.

$$C_{\text{var.transport}} = \left( \sum f_{\text{lkW}} \cdot d_{\text{lkW}} + \sum f_{\text{schiene}} \cdot d_{\text{schiene}} + \sum f_{\text{see}} \cdot d_{\text{see}} \right) \cdot L_a \quad (8.8)$$

### Kapitalkosten für Transport $C_{\text{var. transportzins}}$

Neben den reinen Ausgaben für die Verfrachtung fallen insbesondere bei hochwertigen Produkten und weiten Entfernungen, deren Bewältigung erhebliche Zeit beansprucht, hohe Kapitalkosten an. Deren Ursache liegt ähnlich wie bei den kalkulatorischen Zinsen darin, dass das in den Gütern gebundene Kapital (Beschaffungskosten, Herstellkosten) nicht für das Erzielen von Erträgen auf den Finanzmärkten zur Verfügung steht. Zudem sind transportbedingte Kapitalkosten auch dann zu berücksichtigen, wenn zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit oder zur Komplettierung einer Ladungseinheit Pufferlager erforderlich sind. Die Höhe der Transportzinsen ergibt sich aus der Anzahl der jährlich transportierten bzw. gepufferten Ladungen  $L_a$  bzw.  $L_p$ , der durchschnittlichen Transport- und Pufferdauer  $t_t$  bzw.  $t_p$  pro Einheit in Tagen, dem Warenwert einer Ladung  $C_{\text{ladung}}$  sowie dem Zinssatz  $f_{\text{zins}}$ .

$$C_{\text{var. transportzins}} = \left( \frac{t_t}{365} \cdot L_a + \frac{t_p}{365} \cdot L_p \right) \cdot f_{\text{zins}} \cdot C_{\text{ladung}} \quad (8.9)$$

Die Berechnung des Warenwerts einer Ladung basiert dabei auf der Summe der zu einer Ladung zusammengefassten Produkte und ihres jeweiligen Werts. Dabei müssen neben den reinen Beschaffungs- und Materialkosten  $C_{\text{var. beschaffung}}$  auch die bis zu diesem Zeitpunkt aufgebrauchten Herstellungskosten einbezogen werden. Für die vorliegende Fragestellung sind letztere auf die Montagekosten beschränkt, so dass sich der Transportwert einer aus  $n_l$  Einzelprodukten bestehenden Ladung bei einer jährlich produzierten Menge von  $n_a$  Läufern wie folgt berechnen lässt:

$$C_{\text{ladung}} = \left( C_{\text{fix. abschreibung}} + C_{\text{var. lohn}} + C_{\text{var. beschaffung}} + C_{\text{var. nacharbeit}} \right) \cdot \frac{n_l}{n_a} \quad (8.10)$$

### Einfuhrzoll $C_{\text{var. zoll}}$

Neben den Frachtkosten fallen beim Transport von Gütern über regionale Grenzen hinweg abhängig vom Aus- und Einfuhrland zusätzlich Zölle an, die ebenfalls bei der Auswahl des Produktionsstandorts zu berücksichtigen sind. Die Höhe der Abgaben ist dabei abhängig vom Warenwert  $C_{\text{ladung}}$  der jährlich zu verzollenden  $L_a$  Ladungen, den bis zur Einfuhr pro Ladung angefallenen Transportkosten  $C_{\text{transport. einfuhr}}$  sowie dem Zollsatz  $f_{\text{zoll}}$ . [95]

$$C_{\text{var. zoll}} = f_{\text{zoll}} \cdot L_a \cdot (C_{\text{ladung}} + C_{\text{transport. einfuhr}}) \quad (8.11)$$

### Sonstige variable Kosten

Darüber hinaus fallen bei der Anschaffung und dem Betrieb von Produktionseinrichtungen weitere variable Kosten, bspw. für Energie, Arbeits- und Umweltschutz oder die Koordination, an. Diese Kosten sind aber stark abhängig vom unternehmensspezifischen Betrachtungsumfeld und fließen daher nicht in die folgende Kostenrechnung ein.

## 8.2 Kostenvergleichsrechnung am Beispiel permanent erregter Fahrmotorläufer

Um das wirtschaftliche Potenzial der in dieser Arbeit entwickelten Montageverfahren herauszuarbeiten, wurden am Beispiel permanent erregter Großmaschinenläufer die Kosten alternativer Montagekonzepte an unterschiedlichen Standorten untersucht. Während die Fixkosten in erster Linie vom Automatisierungsgrad abhängen, werden die produktbezogenen Kosten sehr stark vom Produktionsstandort beeinflusst.

Randbedingung	Variable	Wert
Nutzungsdauer	$t_{\text{nutzung}}$	10 a
Zinssatz	$f_{\text{zins}}$	7 %
Einkaufspreis für Magnete	$C_{\text{magnet}}$	3,80 GE/Stck.
Transportkostensatz See (anteilig)	$f_{\text{see}}$	1.500 GE/ $L_a$
Ladungseinheiten pro Jahr	$L_a$ in $a^{-1}$	70
Transportkostensatz Land	$f_{\text{lkW}}$ in GE/km	0,8
Läufer pro Ladungseinheit	$n_l$	32
Werkstückträgerwechselzeit	$t_{\text{WT-Wechsel}}$	120 s
Jährlich verarbeitete Magnetmenge	$n_{\text{Magnet}/a}$	1.600.000 Stck./a
Jährlich gefertigte Läufer (Planungsgrundlage)	$n_{\text{Läufer}/a}$	2.200 Stck./a

*Tabelle 14: Randbedingungen der exemplarischen Kostenvergleichsrechnung*

Der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse liegt eine geplante jährliche Stückzahl von etwa 2.200 Läufern pro Jahr zugrunde (Szenario 1). In der Praxis kann es jedoch abhängig vom Erfolg des Produkts auf dem Markt sowie der allgemeinen konjunkturellen Entwicklung zu teils erheblichen Abweichungen von den prognostizierten Absatzzahlen kommen. Daher ist neben der monetären Bewertung alternativer Montagekonzepte und -standorte auch eine Abschätzung des Investitionsrisikos notwendig, was im Folgenden durch eine Sensitivitätsanalyse erfolgt. Zu diesem Zweck werden zwei weitere Szenarien untersucht, bei denen sich langfristig fundamentale Abweichungen von der Planungsgrundlage ergeben. Hierfür werden alternative Szenarien mit jährlichen Läuferstückzahlen von 3.000 Stck./a (Szenario 2) und 1.500 Stck./a (Szenario 3) angenommen.

Aus Gründen der Vereinfachung erfolgt zunächst eine getrennte Betrachtung technologie- und standortbezogener Kosten, die anschließend zu einer ganzheitlichen Beurteilung der bestehenden Lösungsalternativen zusammengeführt werden. Da der Bedarf an produktionsrelevanten Ressourcen entscheidend von der Produktivität der verglichenen Alternativen abhängt, werden den weiteren Ausführungen die in Tabelle 14 angeführten Randbedingungen zugrunde gelegt.

### 8.2.1 Technologieabhängige Kosten unterschiedlicher Montagekonzepte

Unabhängig vom gewählten Montagekonzept fallen bei der Läuferfertigung Kosten für Betriebsmittel zur Läuferhandhabung an. Die vorliegende Berechnung beruht auf der Annahme, dass das in Kapitel 6.1 vorgestellte, werkstückträgerbasierte Transportkonzept bei allen betrachteten Montagealternativen zum Einsatz kommt. Die automatisierungs- und magnetisierungsgradunabhängigen Investitionskosten umfassen vor allem die Betriebsmittel, die zur Handhabung der Läufer erforderlich sind. Sie beinhalten zumindest einen Kran zum Einlegen bzw. Entnehmen der Rotoren in bzw. aus den Montagevorrichtungen, Werkstückträger und Magnetisieranlage, die Montagevorrichtungen bzw. Werkstückträger selbst sowie einen Hubwagen für den flurgebundenen Läufertransport außerhalb der Reichweite des Krans. Sie belaufen sich somit auf die in Tabelle 15 angeführten Werte.

Betriebsmittel	Investitionskosten in GE
Kran	25.000
Hubwagen	2.000
Werkstückträger (mind. 5 Stck.)	25.000
<b><u>Summe</u></b>	<b><u>52.000</u></b>

*Tabelle 15: Anschaffungskosten von Betriebsmitteln zur innerbetrieblichen Logistik in Geldeinheiten (GE)*

Die Höhe der weiteren, konzeptspezifischen Investitionskosten hängt maßgeblich vom Automatisierungsgrad des Bestückprozesses sowie vom Erregungszustand der Magnete bei der Montage ab. Angesichts der Freiheitsgrade hinsichtlich Automatisierung und Magnetisierung stehen insgesamt vier Montagekonzepte zur Auswahl, deren Kosten im Folgenden gegenübergestellt werden.

#### Montagekonzept 1 – Manuelle Montage nicht magnetisierter Magnete

Für die manuelle Montage eines einzelnen, unmagnetisierten Magnets inklusive Klebstoffauftrag wurde per Videoanalyse eine Zykluszeit  $t_{\text{Zyklus}}$  von 2,3 Sekunden ermittelt, was angesichts der zu montierenden Magnetmenge  $n_{\text{Magnet/a}}$  zu einer Bestückdauer von insgesamt 1.022 Arbeitsstunden, zzgl. 530 Stunden für das Einlegen und Entnehmen der Läufer in bzw. aus den Werkstückträgern sowie die Handhabung der Werkstückträger selbst, pro Jahr führt. Der damit einhergehende Arbeitsaufwand kann durch einen Mitarbeiter binnen einer Schicht erbracht werden, so dass ein manueller Arbeitsplatz (10.000 GE inkl. Peripheriekomponenten, wie bspw. Klebstoffauftrag) ausreicht. Die zum Aufmagnetisieren der Läufer benötigte Zeit liegt inklusive Beschickung bei etwa 610 Stunden per anno, so dass der Einsatz einer automatischen Magnetisierstation (290.000 GE inkl. Magnetisierköpfen) ausreicht. Insgesamt ergeben sich daher für diese Variante Investitionskosten in Höhe von 352.000 Geldeinheiten (Tabelle 16).

Betriebsmittel	Menge	Investitionskosten in GE
Montagearbeitsplatz	1	10.000
Magnetisieranlage inkl. -köpfe	1	290.000
Innerbetriebliche Logistik	1	52.000
<b>Summe</b>		<b>352.000</b>

*Tabelle 16: Investitionskosten für die manuelle Bestückung von Läufern mit unmagnetisierten Magneten*

Da es sich bei den Montagestationen um einfache Vorrichtungen handelt, werden die jährlichen Instandhaltungskosten mit 3 % der Investitionssumme berücksichtigt. Der Nacharbeitsfaktor ist als gering anzusetzen, da es sich wegen der Kraftfreiheit bei der Montage um eine sehr einfache Tätigkeit handelt, deren größte Fehlerquelle im manuellen Klebstoffauftrag liegt (Tabelle 17).

Randbedingung	Einheit	Wert
Manueller Arbeitsaufwand	h/a	1.552
Prozessspezifischer Nacharbeitsfaktor	-	0,01
Instandhaltungskostensatz	-	0,03

*Tabelle 17: Randbedingungen für die manuelle Bestückung von Läufern mit unmagnetisierten Magneten*

Hinsichtlich der Szenarien zur Risikoabschätzung ergibt sich dementsprechend ein höherer bzw. niedrigerer manueller Arbeitsaufwand von 2.070 bzw. 1.035 Arbeitsstunden pro Jahr. Um den zusätzlichen Arbeitsaufwand, der bei Szenario 2 anfällt, zu bewältigen, kann die Kapazität entweder kurzfristig durch Einführung einer zweiten Schicht oder langfristig durch Duplikation des Montagearbeitsplatzes erweitert werden. Angesichts des vorliegenden Betrachtungshorizonts von zehn Jahren sowie der vergleichsweise geringen Investitionskosten wird der weiteren Analyse daher die Anschaffung in einen zweiten Arbeitsplatz zugrunde gelegt, falls die Produktion an einem Hochlohnstandort durchgeführt wird. Bei der Montage an einem Niedriglohnstandort wird dagegen von der Einführung einer zweiten Schicht ausgegangen, da die Amortisationsdauer für zusätzliche Arbeitsplätze aufgrund der vergleichsweise niedrigen Arbeitskosten zunimmt. Das geringere Volumen aus Szenario 3 kann dagegen ebenfalls im Einschichtbetrieb produziert werden, so dass gegenüber der Planungsgrundlage lediglich die Arbeitszeit variiert. Auch bzgl. der Magnetisieranlage ergeben sich keine Änderungen, da sie in keinem der betrachteten Szenarien einen Engpass darstellt.

## Montagekonzept 2 – Manuelle Montage magnetisierter Magnete

Auch wenn bei der Montage magnetisierter Magnete davon ausgegangen wird, dass die verarbeiteten Magnetkörper eine montagegerechte Geometrie (vgl. Kapitel 7.1) aufweisen, lassen sich bei der manuellen Bestückung aufgrund der Komplexität des Fügeprozesses keine wesentlichen Zykluszeitverkürzungen erzielen. Der Grund hierfür liegt in

der mangelnden Fähigkeit des Menschen, derart starke Magnete in der für kürzeste Taktzeiten vorausgesetzten optimalen Bestückreihenfolge auf dem Blechpaket abzulegen. Stattdessen kann in diesem Fall stets nur die Montage von Randmagneten erfolgen, was gemäß den Ergebnissen aus der durchgeführten Simulationsstudie eine Aufnahme der Magnetkräfte durch einen Klebstoff erfordert (vgl. Kapitel 7.1). Da die Magnetkörper in diesem Fall zum Zeitpunkt der Montage bereits über ein eigenes Magnetfeld verfügen, fallen keine Kosten für eine Magnetisieranlage an (Tabelle 18).

Betriebsmittel	Menge	Investitionskosten in GE
Montagearbeitsplatz	4	40.000
Innerbetriebliche Logistik	1	52.000
<b><u>Summe</u></b>		<b><u>92.000</u></b>

*Tabelle 18: Investitionen für die manuelle Bestückung mit magnetisierten Magneten*

Angesichts der aufwändigen Handhabung wird für Vereinzelung, Klebstoffauftrag, Montage und Fixierung magnetisierter Dauermagnete insgesamt eine Taktzeit von etwa 15 Sekunden veranschlagt. Der prozessspezifische Nacharbeitsfaktor beträgt aufgrund der starken, die Montage erschwerenden Magnetfelder bei der Ausführung des Prozesses durch erfahrenes Personal etwa 0,08. Die jährliche Arbeitszeit beträgt damit inkl. Läuferhandhabung mehr als 7.200 Arbeitsstunden, was abhängig vom Standort den Einsatz von vier Montageplätzen im Ein- oder Zweischichtbetrieb erfordert. Da es sich bei diesen Montagestationen um die gleichen Vorrichtungen wie beim ersten Konzept handelt, betragen die jährlichen Instandhaltungskosten ebenfalls 3 % (Tabelle 19).

Randbedingung	Einheit	Wert
Manueller Arbeitsaufwand	h/a	7.200
Prozessspezifischer Nacharbeitsfaktor	-	0,08
Instandhaltungskostensatz	-	0,03

*Tabelle 19: Randbedingungen für die manuelle Bestückung von Läufern mit magnetisierten Magneten*

Auch bei diesem Montagekonzept ist zur langfristigen Kapazitätserweiterung auf die in Szenario 2 angenommene Stückzahl von 3.000 Läufern pro Jahr bei der Betrachtung eines Hochlohnstandorts die Beschaffung eines weiteren Montageplatzes - ausreichenden Platz vorausgesetzt - der Einführung einer dauerhaften zweiten Arbeitsschicht vorzuziehen. Allerdings ist auch hier davon auszugehen, dass bei niedrigen Arbeitskosten eine Erhöhung der Kapazität durch eine Ausweitung der Arbeitszeiten günstiger ist. Entwickelt sich die Stückzahl geringer als prognostiziert, sinkt der jährliche Arbeitsaufwand.



### Montagekonzept 3 – Automatisierte Montage nicht magnetisierter Magnete

Die Bestückleistung automatisierter Systeme zur Bestückung von Rotoren mit unmagnetisierten Magneten wird maßgeblich vom eingesetzten Handhabungsgerät beeinflusst. Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben eignen sich insbesondere Roboter mit einer Parallelkinematik zur Durchführung dieser Montageaufgabe, da sie hohe Beschleunigungen und Verfahrgeschwindigkeiten mit einer ausreichenden Traglast vereinen. Für die Kostenvergleichsrechnung wird daher vom Einsatz eines Tripodroboters ausgegangen, mit dem bei Anschaffungskosten von 42.000 GE alle 1,1 Sekunden ein neuer Magnet bestückt werden kann. Die sich somit ergebende jährliche Bestückdauer von etwa 490 Stunden kann innerhalb einer Schicht aufgebracht werden, so dass unter Berücksichtigung von werkstückwechselbedingten Stillstandszeiten in Höhe von 135 Stunden eine Bestückstation ausreichend ist. Der auch bei dieser Systemvariante notwendige Arbeitsschritt des Aufmagnetisierens ist ebenfalls mit einem einzelnen Impulsmagnetisierer (290.000 GE) durchführbar. Da bei der Bestückung großer Läufer nur eine liegende Lagerung möglich ist, muss die Montagestation zusätzlich über einen Positionierantrieb verfügen (siehe Kapitel 6.1). Die sich hieraus ergebenden Kosten belaufen sich auf 16.400 GE. Zudem fallen für Peripheriegeräte Kosten in Höhe von 15.000 GE an (Tabelle 20).

Betriebsmittel	Menge	Investitionskosten in GE
Bestückroboter	1	42.000
Magnetisieranlage inkl. -köpfe	1	290.000
Montagestation	1	16.400
Peripheriegeräte	1	15.000
Innerbetriebliche Logistik	1	52.000
<b>Summe</b>		<b>415.400</b>

Tabelle 20: Investitionen für die automatische Verarbeitung unmagnetisierter Magnete

Der manuelle Arbeitsanteil beschränkt sich bei dieser Methode auf die Läuferhandhabung und die Beschickung der Bestückstation, was einer jährlichen Gesamtdauer von 530 Stunden entspricht. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads ist mit einem sehr geringen Nacharbeitsfaktor zu rechnen. Der Instandhaltungssatz liegt dagegen wegen der umfassenden Mechanisierung höher als bei den manuellen Lösungen (Tabelle 21).

Randbedingung	Einheit	Wert
Manueller Arbeitsaufwand	h/a	530
Prozessspezifischer Nacharbeitsfaktor	-	0,005
Instandhaltungskostensatz	-	0,05

Tabelle 21: Annahmen für die automatische, unmagnetisierte Läuferbestückung

Angesichts der hohen Bestückleistung des Roboters liegt bei diesem Montagekonzept ein erheblicher Kapazitätspuffer bzgl. Stückzahlsteigerungen vor. Die bei der Sensitivi-

tätsanalyse zu berücksichtigenden Abweichungen betreffen daher unabhängig vom Produktionsstandort nur die manuellen Arbeitszeiten, die bei 350 (Szenario 2) bzw. 700 Arbeitsstunden pro Jahr (Szenario 3) liegen.

#### Montagekonzept 4 – Automatisierte Montage magnetisierter Magnete

Im Gegensatz zur manuellen Bestückung angeregter Dauermagnete gestattet die Automatisierung dieses Montagekonzepts bei der Verarbeitung automatisierungsgerecht gestalteter Magnetkörper die Umsetzung günstiger Bestückreihenfolgen. Daher wird in diesem Fall von einem Entfall von Haltezeiten ausgegangen, so dass bei der folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnung gemäß der in Kapitel 6.1 beschriebenen Montageversuche eine Zykluszeit von 4 Sekunden veranschlagt wird. Die daraus resultierende jährliche Bestückdauer beträgt 1.780 Stunden, so dass inklusive der jährlichen Werkstückwechselzeit von 135 Stunden standortabhängig eventuell eine zweite Schicht mit einzukalkulieren ist. Da die Beherrschung der bei diesem Konzept auftretenden Magnetkräfte zu höheren Anforderungen an das Handhabungsgerät führt, sind für einen geeigneten Bestückroboter Kosten in Höhe von 72.000 GE anzusetzen. Die in Tabelle 22 zusammengefassten Ausgaben für Montagestation und Peripheriegeräte belaufen sich auf 16.400 bzw. 15.000 GE.

Betriebsmittel	Menge	Investitionskosten in GE
Bestückroboter	1	72.000
Montagestation	1	16.400
Peripheriegeräte	1	15.000
Innerbetriebliche Logistik	1	52.000
<b><u>Summe</u></b>		<b><u>155.400</u></b>

*Tabelle 22: Investitionskosten für die automatische Bestückung von Läufern mit magnetisierten Magnetkörpern*

Für die Läuferhandhabung sowie die Beschickung der Bestückstation ergibt sich bei dieser Methode eine jährliche Arbeitszeit von lediglich 390 Stunden, da im Gegensatz zur Bestückung mit unmagnetisierten Körpern der Handhabungsschritt zur Beschickung der Magnetisierstation entfällt. Zudem führt die automatische Bestückung angeregter Magnete im Gegensatz zur manuellen zu einer höheren Prozesssicherheit, was sich in einem geringeren prozessspezifischen Nacharbeitsfaktor von 0,03 niederschlägt. Allerdings ist ein vergleichsweise hoher Instandhaltungskostensatz einzukalkulieren, da sowohl Bestückroboter als auch Peripheriegeräte erheblichen Belastungen aufgrund starker Magnetfelder und -kräfte ausgesetzt sind (Tabelle 23).

Eine Erhöhung der Produktionskapazität erfordert bei diesem Montagekonzept zusätzliche Maschinenlaufzeiten der Bestückstation. Da der Fixkostenanteil gegenüber den Personalkosten in diesem Fall vergleichsweise hoch ist und für die Duplizierung der Bestückstation erhebliche Investitionskosten anfallen würden, erfolgt die Steigerung des

Produktionsvolumens für das Szenario 2 durch Einführung einer zweiten Schicht. Der Eintritt von Szenario 3 führt dagegen zu einer Minderung der Anlagenauslastung.

Randbedingung	Einheit	Wert
Manueller Arbeitsaufwand	h/a	390
Prozessspezifischer Nacharbeitsfaktor	-	0,03
Instandhaltungskostensatz	-	0,09

*Tabelle 23: Randbedingungen für die automatisierte Bestückung von Läufern mit magnetisierten Magneten*

### 8.2.2 Bestückkosten an unterschiedlichen Produktionsstandorten

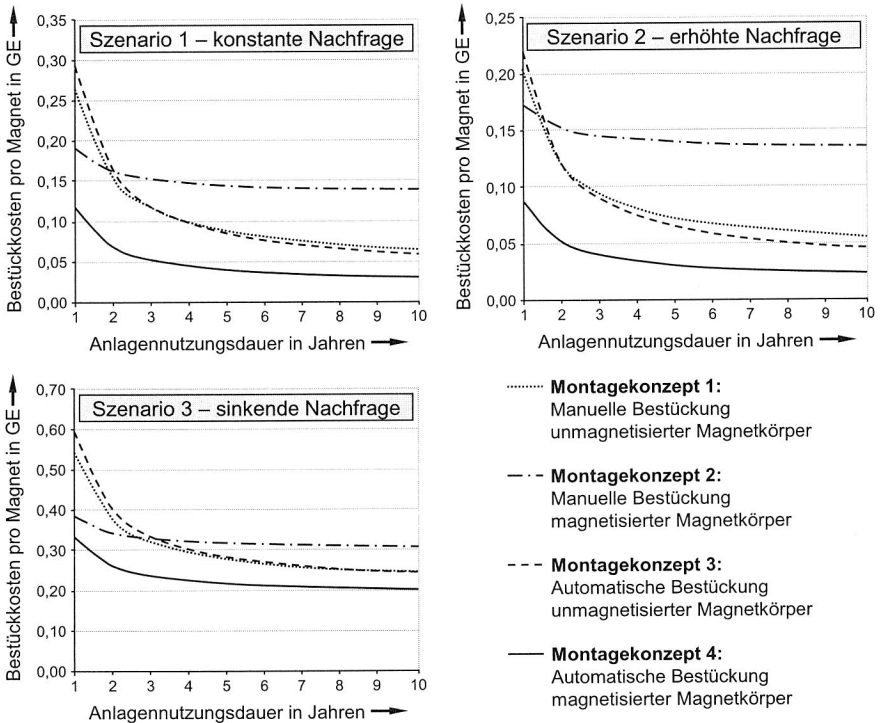
Im Gegensatz zu den fixen Kosten, die maßgeblich durch die eingesetzte Montagetechnologie bestimmt werden und deren Höhe weltweit nur geringen Schwankungen unterliegt, ist der Betrag der produktbezogenen Kosten stark standortabhängig. Dies trifft insbesondere auf die regional stark unterschiedlichen Arbeits- und Materialbeschaffungskosten sowie die Transport- und Zollkosten zu. Den folgenden Ausführungen liegt dabei die Annahme zugrunde, dass die Endmontage der Schienenfahrzeuge, die von den betrachteten Motoren angetrieben werden, stets im Stammwerk an einem Hochlohnstandort erfolgt. Gleichzeitig beeinflussen die standortspezifischen Arbeitsbedingungen, wie bspw. Arbeitszeiten oder Qualifizierungsniveau, wiederum die Auswahl eines für den Standort geeigneten Montagekonzepts.

Angesichts des hohen Stellenwerts, den Unternehmen dem Standortfaktor Arbeitskosten beimessen [1], ist im Bereich des produzierenden Gewerbes seit einigen Jahren ein anhaltender Trend zur Verlagerung von Wertschöpfungsschritten in Länder mit niedrigen Arbeitskosten zu verzeichnen. Dies betrifft insbesondere die Montage von Produkten und Baugruppen, da hier die Personalkosten aufgrund des hohen Anteils manueller Tätigkeiten in vielen Fällen den größten Kostenfaktor darstellen. Von besonderer Bedeutung für in Deutschland ansässige Firmen sind dabei Standorte in osteuropäischen und -asiatischen Ländern, an denen angesichts des hohen Lohnniveaus vieler Industrienationen eine deutlich günstigere Durchführung personalintensiver Arbeitsschritte möglich ist. Dabei bieten nach [77] insbesondere Produktionsstandorte in China oder Polen aus Sicht deutscher Unternehmen günstige Voraussetzungen für die Verlagerung von Wertschöpfungsschritten. Im Folgenden werden daher die Kosten, die bei der Bestückung von Läufern mit Dauermagneten mit unterschiedlichen Montagekonzepten anfallen, am Beispiel von Produktionsstandorten in Deutschland, Polen und China rechnerisch abgeschätzt.

#### Deutschland – Montage an einem klassischen Industriestandort

Der Technologiestandort Deutschland nimmt in den Branchen Elektro-, Energie- und Automatisierungstechnik weltweit eine führende Position ein [104]. Neben der Entwicklung innovativer Produkte erfolgt auch deren Herstellung bei vielen deutschen Unter-

nehmen nach wie vor in Deutschland. Aufgrund der hohen Arbeitskosten, die für das produzierende Gewerbe im dritten Quartal 2006 im Durchschnitt bei 28,18 Euro pro geleisteter Arbeitsstunde lagen [78], werden an Hochlohnstandorten zur Senkung der Arbeitskosten verstärkt automatisierte Montagelösungen eingesetzt. Aufgrund des hohen Qualifizierungsniveaus in Deutschland wird der standortspezifische Nacharbeitsfaktor auf diesen Standort normiert, so dass hier keine Verschlechterung der Produktivität zu berücksichtigen ist.



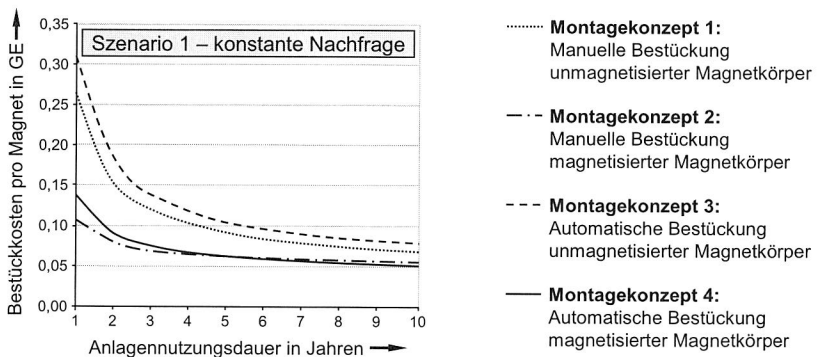
*Bild 72: Prozesskosten zur Bestückung eines Magnetkörpers mit unterschiedlichen Montagekonzepten am Standort Deutschland bei variierender Nachfrage in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer*

Wie in Bild 72 dargestellt, weisen daher bei der Läuferbestückung die automatisierten Montagekonzepte geringere Kosten als die betrachteten manuellen Verfahren auf. Während sich die Investitionskosten für einen Bestückroboter bei der Verarbeitung unmagnetisierter Magnetkörper gegenüber der manuellen Montage erst nach drei Jahren rechnen, erfordert die automatische Bestückung angeregter Dauermagnete von Anfang an und auf lange Sicht mit Abstand den geringsten finanziellen Aufwand. Der Entfall der Magnetisieranlage wirkt sich dabei gleich in doppelter Hinsicht vorteilhaft auf die Wirt-

schaftlichkeit aus, da zum einen die Investitionskosten sinken und zum anderen ein deutlich reduzierter Aufwand für die Läuferhandhabung anfällt. Die langfristig mit Abstand unwirtschaftlichste Alternative ist die manuelle Bestückung angeregter Magnetkörper, die trotz der sehr niedrigen Investitionskosten aufgrund des umfassenden Arbeitsaufwands bei dem in Deutschland vorherrschenden hohen Lohnniveau zu beträchtlichen Gesamtkosten führt und somit für die Serienproduktion nicht geeignet ist.

### Polen – Montage in einem osteuropäischen EU-Beitrittsland

Deutlich günstiger ist dagegen die manuelle Bestückung von Läufern in Polen, wo die Arbeitsstunde im Jahr 2005 nach [119] im Durchschnitt 3,80 Euro kostete. Da nach [1] die Anhebung der Produktivität und Qualität auf das Niveau in Hochlohnländern zusätzlichen Aufwand erfordert, wird ein standortspezifischer Nacharbeitsfaktor von 2 % einkalkuliert. Darüber hinaus erfordert die Läuferbestückung am Standort Polen die Verfrachtung der Erzeugnisse zur Endmontage ins Stammwerk nach Deutschland, was zu direkten und indirekten Transportkosten führt.



*Bild 73: Prozesskosten zur Bestückung eines Magnetkörpers (inkl. Transportkosten) mit unterschiedlichen Montagekonzepten am Niedriglohnstandort Polen bei prognostizierter Nachfrage in Abhängigkeit von der Anlagennutzungsdauer*

Im Gegensatz zur Produktion in Deutschland sind an osteuropäischen Niedriglohnstandorten die Investitions- und nicht die Arbeitskosten die wesentlichen Kostentreiber. Während sich die automatisierte Bestückung der Läufer mit unmagnetischem Magnetmaterial am Hochlohnstandort Deutschland gegenüber den manuellen Lösungen noch als wettbewerbsfähig erweist, ist dieses Verfahren aufgrund des aktuell noch niedrigen Lohnniveaus in den EU-Beitrittsländern die teuerste aller Varianten. Auch wenn die manuelle Bestückung magnetisierter Bauteile bei kürzeren Betrachtungszeiträumen geringfügig günstiger ist, stellt auch am Beispiel dieses osteuropäischen Standorts die in dieser Arbeit vorgeschlagene Lösung zur automatisierten Bestückung angeregter Magnete langfristig das effizienteste Produktionskonzept dar. Angesichts eines Transportkostenanteils von 0,029 GE pro Magnet liegen die reinen Bestückkosten

an diesem Standort zwar unter denen des betrachteten Hochlohnstandorts, insgesamt ergeben sich jedoch aufgrund des Logistikaufwands höhere Bestückkosten als in Deutschland (Bild 73 und Bild 74).

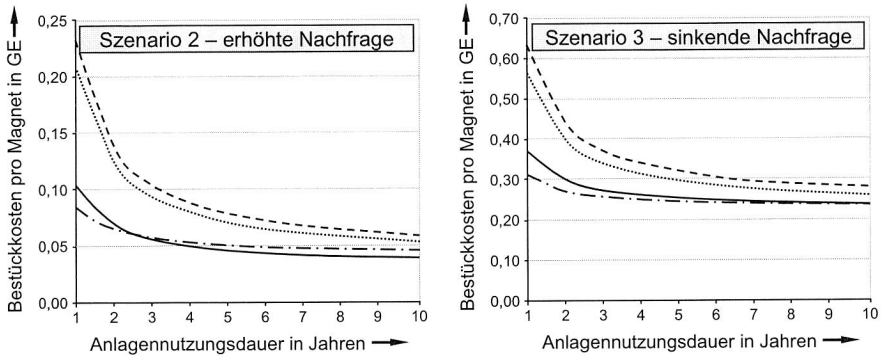


Bild 74: Kostenverlauf bei über- und unterdurchschnittlicher Nachfrageentwicklung bei der Bestückung von Läufern in Polen

### China – Montage an einem ostasiatischen Niedriglohnstandort

Noch billigere Arbeitskräfte als in Osteuropa sind in China verfügbar, wo die Arbeitskosten etwa bei 0,70 Euro pro Stunde liegen [121]. Aufgrund starker regionaler Unterschiede hinsichtlich des Qualifizierungsniveaus wird mit einem standortspezifischen Nacharbeitsfaktor von 4 % gerechnet. Der Transport der fertigen Läufer zum Endmontagewerk am Standort Deutschland erfordert zusätzlich einen zeit- und kostenintensiven Seetransport, was zu hohen Transport- und Kapitalkosten führt. Zudem ist bei der Einfuhr von Komponenten für elektrische Maschinen aus Drittländern in die Europäische Union ein Importzoll in Höhe von 2,7 % zu entrichten [102], der bei der Standortauswahl ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Beim Blick auf die in Bild 75 dargestellten jährlichen Gesamtkosten wird deutlich, dass die Bestückung von Läufern in China unter der Annahme, dass die Endmontage der Motoren in Deutschland erfolgt, wirtschaftlich nicht effizient ist. Hierfür verantwortlich sind in erster Linie die immensen transportbedingten Kosten, die aus dem zeitraubenden Seetransport resultieren, und die hohen Beschaffungskosten für die Magnete, die zu hohen Kapitalbindungskosten während des Transports führen. Zudem erhöhen die Zollabgaben, bei denen neben der verrichteten Wertschöpfung auch die Beschaffungskosten für Läufer und Magnete zu berücksichtigen sind, die Kosten dieses Standorts erheblich. Bereinigt um Transport- und Zollkosten zeigt sich jedoch der starke Einfluss der Investitionskosten auf die Wirtschaftlichkeit der Bestückkonzepte bei extrem niedrigen Arbeitskosten. So bietet die äußerst personalintensive Montage angeregter Magnetkörper im Fall Chinas die günstigsten Herstellungskosten, die noch deutlich unter denen automatisierter Lösungen an diesem Standort liegen. Aus Kostensicht vollkom-

men irrelevant sind an Niedrigstlohnstandorten dagegen die Verfahren, bei denen zusätzlich Investitionskosten für die nachträgliche Magnetisierung der Läufer anfallen.

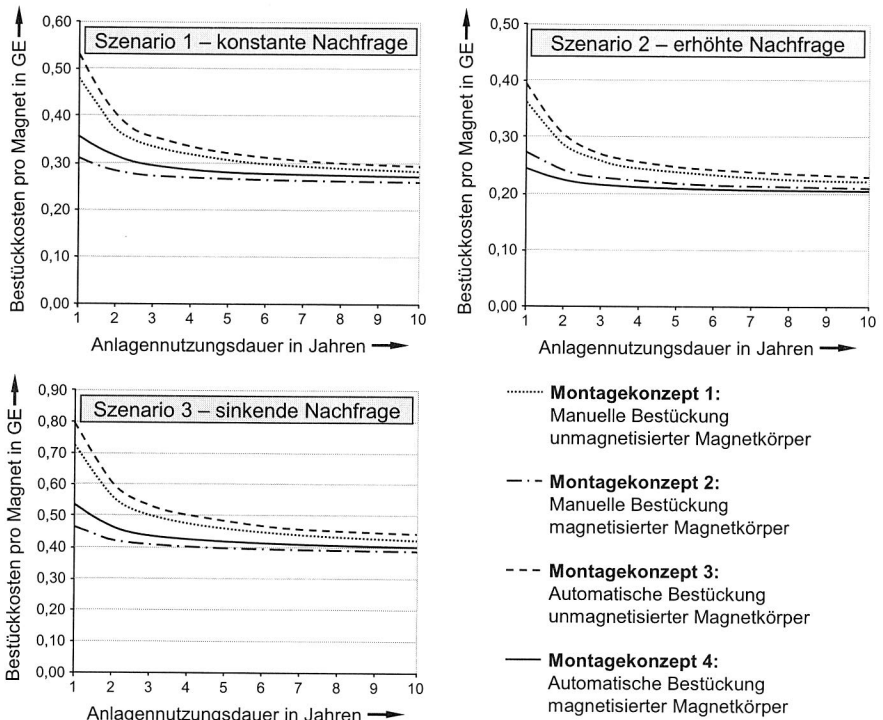


Bild 75: Prozesskosten zur Bestückung eines Magnetkörpers (inkl. Transportkosten) mit unterschiedlichen Montagekonzepten am Niedriglohnstandort China bei variierender Nachfrage in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer

### 8.2.3 Wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Technologien

Auch wenn der vorausgegangene Vergleich der Kosten alternativer Bestückkonzepte an unterschiedlichen Standorten angesichts der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen keine absolute Quantifizierung zulässt, kann aus den Ergebnissen eine Reihe grundlegender Aussagen über das wirtschaftliche Potenzial der automatisierten Montage angeregter Magnete getroffen werden. Dabei sind vor allem die geringeren Investitionskosten gegenüber der Bestückung unmagnetisierter Magnetkörper durch den Wegfall kostenintensiver Magnetisieranlagen von Bedeutung, was zu einem deutlich niedrigeren Investitionsrisiko führt. Gleichzeitig gestattet die automatisierte Montage angeregter Magnetkörper mit den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren eine deutlich schnellere und effizientere Bestückung als die sehr aufwändige manuelle Durchführung

dieses Arbeitsschritts. Bekräftigt wird die Wettbewerbsfähigkeit der entwickelten Produktionsmethode bei Betrachtung der um transportbedingte Aufwendungen bereinigten Gesamtkosten. Demnach ist die Automatisierung des Bestückprozesses bei der Verarbeitung angeregter Magnete selbst an Niedriglohnstandorten auf lange Sicht kostengünstiger als die Handmontage. Erst bei extrem geringen Entgeltsätzen, wie sie bspw. in China anzutreffen sind, sind die jährlichen Personalausgaben bei manueller Bestückung günstiger als die Investitionen in automatisierte Betriebsmittel.

Aufgrund der grundlegenden Vorteile, die sich aus der automatisierten Durchführung des Bestückprozesses ergeben, kann dieser Wertschöpfungsprozess mit den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Technologien und Prozesse auch an Hochlohnstandorten kosteneffizient durchgeführt werden. Da in der Praxis jedoch eine singuläre Betrachtung des Herstellungsschritts Bestücken nicht ausreicht, sondern vielmehr die gesamte Prozesskette, vom Einkauf von Halbzeugen und Einzelteilen über die Einzelteilfertigung bis hin zur Montage der Rotoren in den Stator und den Einbau der elektrischen Maschine in das endgültige Produkt, zu berücksichtigen ist, müssen alle relevanten Kostenfaktoren in die Standortauswahl einfließen. Neben den Arbeits-, Investitions- und Beschaffungskosten umfasst dies vor allem nicht unmittelbar von der Produktion abhängige Kosten, wie bspw. Subventionen, länderspezifische Steuersätze oder Koordinations- und Managementkosten. Darüber hinaus sind auch monetär nur schwer erfassbare Faktoren, wie bspw. Rechtsstabilität, Verfügbarkeit von geeignetem Personal, Subventionen, die prognostizierte Entwicklung des Lohnniveaus, Einkaufskostenvorteile oder die Nähe zu Kunden, bei der Standortwahl zu berücksichtigen.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Angesichts der vielfältigen Vorteile von Elektromaschinen mit permanenter Läufererregung ist auch in Zukunft von einer steigenden Nachfrage nach derartigen Geräten auszugehen. Eine wesentliche Komponente von Maschinen dieses Konstruktionsprinzips sind deren Läufer, die zur Erzeugung des Erregerfelds über Dauermagneten verfügen. Die wichtigste Bauweise stellen dabei Rotoren mit oberflächenmontierten Magnetkörpern dar, bei denen die Magnete auf der Umfangsfläche des Blechpakets angebracht sind. Durch die Entwicklung leistungsfähiger und ressourcenschonender Energiewandler für die Automatisierungstechnik, Kraftfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Schiffe und zur Stromerzeugung auf Basis dieser Technologie ist mittelfristig mit einem erheblichen Bedarf zusätzlicher Produktionskapazitäten für diese Maschinen zu rechnen.

Wie eine Analyse der zur Läuferherstellung erforderlichen Arbeitsschritte zeigte, weisen vor allem die heute bekannten Verfahren zur Montage des Magnetmaterials auf der Läuferoberfläche erhebliche Defizite hinsichtlich ihrer Produktivität auf. Gemäß einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Befragung von 39 Herstellern permanent erregter Maschinen erfolgt die industrielle Bestückung von Rotoren auch an Hochlohnstandorten überwiegend in lohnintensiven manuellen Verfahren. Bei den wenigen eingesetzten automatisierten Bestücklösungen werden die Einzelmagnete ausschließlich im unmagnetisierten Zustand aufgeklebt und das Magnetfeld anschließend in einem separaten und mit hohen Investitionskosten verbundenen Arbeitsschritt eingepreßt.

Ziel der vorliegenden Dissertation war daher die Entwicklung von Technologien und Anlagenkomponenten zur automatisierten Handhabung und Montage von magnetisierten Dauermagneten. Hierfür wurden zunächst die während des Fügeprozesses auftretenden Magnetkräfte und deren Abhängigkeit von der Reihenfolge, in der die Magnetkörper auf der Läuferoberfläche abgelegt werden, untersucht. Basierend darauf wurden Kriterien zur Konzeption von Bestücksequenzen herausgearbeitet, bei denen die geringsten Prozesskräfte zu erwarten sind.

Angesichts der unzureichenden Eignung klassischer Greifertechnologien wurden weiterhin neuartige Greifertechnologien entwickelt, die den speziellen Anforderungen bei der automatisierten Handhabung und Montage von Dauermagneten zu flächigen Magnetanordnungen genügen. Hierfür wurden sowohl Greiferkonzepte zur Realisierung von Pick & Place-Prozessen als auch zur Bestückung von Dauermagneten in Zwangslage entwickelt. Die dargestellten Lösungen gestatten das sichere Heranführen der Magnetkörper an die Montageposition, wobei die Greifkraft ausschließlich über die Oberseite in das Montageobjekt eingebracht und so eine sehr gute Zugänglichkeit an den Ablagepunkt gewährleistet wird.

Ergänzend dazu wurden Anlagenkonzepte für die automatisierte Zuführung von Dauermagneten untersucht. Auch hier zeigte sich, dass der Einsatz konventioneller Vereinzelungs- und Bereitstellungsmethoden aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Magnetkörper nicht möglich ist. Deshalb wurden alternative Lösungen zur Konstruktion von Zuführgeräten für Dauermagnete konzipiert und beschrieben.

Durch die Verarbeitung magnetischer Bauteile ergeben sich zudem umfassende Möglichkeiten zur Vereinfachung der Läuferhandhabung. Während die Einzelmagnete bei bisherigen Montagekonzepten stets auf eine horizontale Fläche abgelegt und mit Klebstoff gegen Herabfallen gesichert werden müssen, ist bei der Verarbeitung magnetisierter Körper wegen der magnetischen Haftkräfte auch eine Bestückung senkrechter Flächen möglich. Somit können mit den entwickelten Verfahren, abhängig von der Baugröße, auch stehend gelagerte Rotoren mit Magneten versehen werden, was den Verzicht auf maschinenbaulich und steuerungstechnisch aufwändige Komponenten zur Läufermanipulation gestattet. Gleichzeitig besteht dadurch die Möglichkeit, alle zur Bestückung notwendigen Bewegungen durch einen Standardroboter ausführen zu lassen, wodurch gegenüber heutigen Lösungen signifikante Senkungen der Planungs-, Investitions- und Realisierungskosten möglich sind.

Um die Tauglichkeit der entwickelten Technologien und Anlagenkonzepte nachzuweisen, wurden zwei Roboterzellen zur automatisierten Montage angeregter Magnetquader auf Rotoren realisiert. Während für große Fahrmotorläufer eine exemplarische Lösung zur Bestückung liegend gelagerter Läufer im Pick & Place-Verfahren umgesetzt wurde, erfolgte die Überprüfung des Konzepts für stehende Rotoren mit einem Magazingreifer am Beispiel von Servomotorläufern. Wie praktische Montageversuche zeigten, erlauben beide Systeme eine effiziente und lückenlose Anordnung von Dauermagneten auf den Blechpaketen.

Ferner wurde festgestellt, dass die magnetische Anziehung zwischen Blechpaket und den zu platzierenden Einzelmagneten nur zum Teil ausreicht, um die hartmagnetischen Körper hinreichend gegen magnetkraftbedingtes Verrutschen auf der Läuferoberfläche zu sichern. Das in diesem Zusammenhang kritische Verhältnis von Reibkraft und magnetischen Querkraften hängt maßgeblich von der Magnetkonfiguration auf dem Läufer sowie der Geometrie der verwendeten Magnetkörper ab. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Magnetkörpergeometrie auf die Haft- und Querkraften in unterschiedlichen Magnetanordnungen systematisch untersucht. Die Berücksichtigung der dabei gewonnenen Erkenntnisse während des Konstruktionsprozesses kann daher einen wichtigen Beitrag zur montagegerechten Gestaltung von flächigen Dauermagnetanordnungen leisten. Daraus ergeben sich Potenziale für Produktivitätssteigerungen, die neben den beschriebenen Läufern auch auf andere Produkte mit flächigen Dauermagnetanordnungen, wie bspw. Magnetresonanztomographen, Magnetlagern und -kupplungen, Linearmotoren, etc., übertragen werden können.

Den Abschluss der Arbeit stellt die Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials der vorgestellten Lösungen dar. Dabei konnte am Beispiel von Fahrmotorläufern gezeigt werden, dass durch die automatisierte Verarbeitung angeregter, montagegerecht gestalteter Dauermagnete die Prozesskosten gegenüber bisherigen Montagekonzepten um etwa 50 % gesenkt werden können. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Produktionsmethoden auch vor dem Hintergrund der zunehmenden Globalisierung eine äußerst wettbewerbsfähige Produktion von PM-Läufern am Hochlohnstandort Deutschland möglich ist.

## Summary

The manifold advantages of electric machines with permanent rotor excitation will lead to increased demands for such devices in the future. Major components of machines designed according to this principle are their rotors, which are equipped with permanent magnets in order to realize the electromagnetic excitation. Today, solutions with surface mounted permanent magnets represent the most important construction method. Since this technology is the basis for the development of high-performance and resource-saving energy converters for automation technology, vehicles, trains and ships as well as for electric power generation, additional production capacities have to be considered in the future.

As an analysis of the processes for rotor manufacturing showed, today's available methods for the assembly of the permanent magnetic material onto the rotor's surface offer deficits regarding their productivity. According to a survey conducted among 39 manufacturers of permanent magnet machines, the assembly of magnetized and non-magnetized parts is predominantly carried out by hand even at high-wage production sites. In contrast, automated solutions are exclusively available for non-magnetized magnets, affording an additional and expensive magnetization process.

The aim of this dissertation was therefore the development of technologies and system components for the automated handling and assembly of magnetized permanent magnets. For this purpose, the process forces which appear during the joining process and their dependency on the assembly sequence were investigated in the first instance. Thereupon, criteria for the planning and design of assembly sequences which lead to low magnetic process forces were established.

Due to the insufficiencies of available gripping principles regarding the handling of strong permanent magnets, a novel gripping technology which meets the specific requirements for manufacturing planar magnet arrangements was developed. Therefore different gripper concepts for pick & place and collect & place processes were designed. The presented solutions permit the execution of reliable assembly processes by providing strong holding forces as well as an excellent accessibility to the point of assembly.

Additionally, concepts for the design of peripheral systems, such as feeding devices, were investigated. Due to the specific physical properties of permanent magnets, conventional methods for separation and disposition of parts are not eligible for the underlying assembly task. Alternative construction methods for automated feeding devices for permanent magnets were therefore designed and described precisely.

The automated processing of magnetized parts also offers extensive possibilities to simplify the handling of the rotors. While placing the non-magnetized magnets onto a horizontal surface and fixing them there against falling down with an adhesive is mandatory when using present assembly concepts, the magnetic forces of the magnets can also be used for fixation in the developed solution. This allows the completion of vertically oriented rotors, resulting in a much more simple design of both, work piece carriers

and controls. In addition, all necessary assembly movements can be performed by a standard robot, leading to significant decreases of planning-, investment- and realization-costs.

In order to demonstrate the capability of the developed technologies and system concepts, two robot cells for the automated assembly of magnetized cubic parts onto rotors were realized. On the one hand, a pick & place-solution was applied to the manufacture of horizontally pivot-mounted large rotors for traction motors. On the other hand, a magazine-gripper was used for attaching magnets onto a rotor of a servo motor which is provided vertically. As the conducted assembly tests showed, both systems allow an efficient and gap free arrangement of permanent magnets on the lamination stacks of the rotors.

In this context, the ratio of the magnetic attraction appearing between the magnet and the lamination stack and the shear forces being effective between neighboring magnets was identified as a critical process parameter. Since both force components are significantly depending on the proportions of the permanent magnets and the assembly sequence, the investigation of this effect was another major aspect of this dissertation. Therefore, the bearing of the geometry of permanent magnets on the attracting and shear forces was systematically examined for different assembly situations within a simulation study. If considered consequently during the design phase of newly developed permanent excited machines, the results of this examination would significantly contribute to an assembly friendly design of permanent magnets. This leads to further potentials for productivity increases for additional products, which besides the described rotors also include amongst others nuclear magnetic resonance devices, magnetic bearings and couplings as well as linear motors.

The work closes with an estimation of the economic potential which emerges from the presented solutions. As an exemplary cost calculation for large traction rotors showed, the automated assembly of magnetized magnets which are designed for assembly can lead to a decrease of process costs up to 50 % compared to conventional methods. Additionally, the developed production technologies can contribute to increase the competitiveness of high-wage production sites such as Germany within global markets.

## Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E.; Kluge, J.; Näher, U.: *Handbuch Globale Produktion*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2006
- [2] Adelski, H.-J.: *Dauermagnetenerregter Läufer für eine elektrische Maschine*. Offenlegungsschrift EP 0043981 A1, Siemens AG 1982
- [3] Angermann, A.; Beuschel, M.; Rau, M.; Wohlfarth, U.: *Matlab - Simulink - Stateflow*. 3. überarbeitete Auflage, Oldenbourg Verlag, München Wien 2004
- [4] Barthos, F. J.: *IPM designs improve brushless servos*. Online im Internet: URL: <http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA6263668.html> [Stand: 01.10.2005]
- [5] Bäumer, T.: *Verarbeitungs- und Anlagentechnik für die Herstellung langfaser-verstärkter Faserverbundbauteile im Wickel- und Legeverfahren*. Diss. RWTH Aachen 1992
- [6] Binder, A.; Schneider, T.; Klohr, M.: *Fixation of buried and surface mounted magnets in high-speed permanent magnet synchronous motors*. Online im Internet: URL: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10182/32508/01518863.pdf?arnumber=1518863> [Stand: 01.12.2005]
- [7] Binder, A.; Wick, A.; Gold, P.: *Elektrisch-mechanische Antriebssysteme - Innovationen - Trends - Mechatronik*. Online im Internet: URL: <http://www.vde.com/VDE/Fachgesellschaften/ETG/Arbeitsgebiete/Elektrische+Maschinen/2005-Oeffentlich/el-mech-antriebssysteme-bericht.htm?SmartNavigation=16ca3372-13b1-4f82-bf0b-af35d210494a> [Stand: 24.02.2005]
- [8] Binder, A.; Wick, A.; Pollmeier, S.: *Vernetzte Antriebe – aktueller Stand und Trends*. In: etz – Elektrotechnik + Automation, Heft 7-8/2003, VDE Verlag, S. 84-93, Offenbach 2003
- [9] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 1999
- [10] Brosch, P. F.: *Mechatronische Antriebssysteme*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg a. Lech 2000
- [11] Brosch, P. F.: *Moderne Stromrichterantriebe*. 2. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg 1992
- [12] Dickmann, K.: *Untersuchungen über den Einsatz von Hochleistungslasern zum Trennen von Elektroblechen*. Diss. Universität Hannover 1989
- [13] DIN 82: *Rändel*. In: Einführung in die DIN-Normen. Stand 1973
- [14] DIN EN 10106: *Kaltgewalztes nichtkornorientiertes Elektroblech und -band im schlussgeglühten Zustand*. Stand 1996

- [15] DIN EN 10107: *Kornorientiertes Elektroblech und -band im schlussgeglühten Zustand*. Stand 1996
- [16] DIN EN 10126: *Kaltgewalztes Blech und -band aus unlegierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand*. Stand 1996
- [17] DIN EN 10165: *Kaltgewalztes Elektroblech und -band aus legierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand*. Stand 1996
- [18] DIN EN 60404-8-1: *Dauermagnetwerkstoffe*. Stand 2001
- [19] Drummer, D.: *Verarbeitung und Eigenschaften kunststoffgebundener Dauermagnete*. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg 2004
- [20] Ehrenstein, G. W.: *Faserverbundkunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [21] Endo, T.: *Fastech 360 prototypes probe ULTRA high speed territory*. In: Railway Gazette International, Heft 11/2005, S. 693-697, Railway Gazette International, Sutton 2005
- [22] Eversheim, W.; Schuh, G.: *Betriebshütte - Produktion und Management, Teil 1*. 7. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin 1996
- [23] Feldmann, K.: *Assembly Process*. In Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of Industrial Engineering. 3. Auflage, John Wiley & Sons Inc., S. 401-446, New York 2001
- [24] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Advanced Processes and Systems for the Automated Assembly of Magnetic Components for Electrical Machines*. In: Proceedings of the 1st CIRP-International Seminar on Assembly Systems, S. 83-88, Stuttgart 2006
- [25] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Alternative Assembly Concepts for Drive Systems and Components*. In: Mechanical Engineering in Bavaria, S. 8-14, fb-werbeservice, München 2005
- [26] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Alternative Montagekonzepte für antriebstechnische Produkte*. In: Maschinenbau in Bayern, S. 8-14, fb-werbeservice, München 2005
- [27] Feldmann, K.; Junker, S.: *Rationelle Läuferproduktion durch automatische Magnetmontage*. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 3/2007, S. 139-144, Hanser Verlag, München 2007
- [28] Feldmann, K.; Kunze, A.; Junker, S.: *Montageautomatisierung durch innovative Produkte und Prozesse*. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 3/2005, S. 94-98, Hanser Verlag, München 2005
- [29] Feldmann, K.; Meerkamm, H.; Rückel, V.; Koch, A.: *Prozessdatenmanagement - der Schlüssel zum Erfolg*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 10/2005, S. 582-586, Hanser Verlag, München 2004

- [30] Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*. 13. aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2006
- [31] Gieras, J. F.; Wing, M.: *Permanent Magnet Motor Technology*. 2. überarbeitete Auflage, Verlag Marcel Dekker, New York 2002
- [32] Giersch, H.-U.; Harthus, H.; Vogelsang, N.: *Elektrische Maschinen – Prüfen, Normung, Leistungselektronik*. 5. korrigierte Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2003
- [33] Gißler, J.: *Elektrische Direktantriebe*. Parker Hannifin GmbH, Offenburg 2004
- [34] Grabner, C.: *Rotor mit Permanentmagneten sowie elektrische Maschine mit einem derartigen Rotor*. Offenlegungsschrift DE 102005019370 A1, Siemens AG 2006
- [35] Griffith, D. J.: *Introduction to electrodynamics*. 2. Auflage, Prentice-Hall, New Jersey 1989
- [36] Heidrich, M.: *Magnet retainer and method for fixing a magnet on a support element*. Offenlegungsschrift WO 0163726 A3, Robert Bosch GmbH 2001
- [37] Heikkilä, T.: *Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications – analysis and design*. Diss. Lappeenranta University of Technology 2002
- [38] Henke, H.: *Elektromagnetische Felder – Theorie und Anwendung*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 2004
- [39] Hesse, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München 2006
- [40] Hesse, S.: *Industrieroboterpraxis - Automatisierte Handhabung und der Fertigung*. Vieweg Verlag, Wiesbaden 1998
- [41] Hesse, S.; Monkman, G. J.; Steinmann, J.; Schunk, H.: *Robotergreifer*. Carl Hanser Verlag, München 2004
- [42] Horz, T.; Junker, S.; Schmauch, E.; Slama, S.: *Konzeption und Betrieb agiler, hybrider Montagesysteme*. In: Feldmann et. al.: *Montage strategisch ausrichten. Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*, Springer Verlag, Berlin 2004
- [43] Hosoya, A.: *Permanent magnet pole arrangement of rotor*. Patentschrift US 6376956 B1, Denso Corporation 2002
- [44] Humphrey, D. W.: *Nachfrage nach Servoantrieben bleibt konstant*. In: *Automatisierungs-Atlas 2005/06*, S. 272-273, Technik-Dokumentations-Verlag GmbH, Marburg 2005
- [45] Huth, G.; Urschel, S.: *Geregelte Antriebe bieten großes Einsparpotenzial - Drehzahlgeregelte Pumpenantriebe in permanenterregter AC-Technik*. In: an-

- triebstechnik, Heft 6/2006, S. 56-61, Verlag für Technik & Wirtschaft, Mainz 2006
- [46] Iwami, T.; Kajita, N.; Uozumi, H.: *Polarizing device for a permanent magnet rotor*. Patentschrift US 6744341 B2, Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha 2004
  - [47] Jäger, H.; Peschina, J.; Braun, B.: *Verfahren und Vorrichtung zum Anbringen eines Permanentmagneten*. Offenlegungsschrift DE 102004039807 A1, Felso-mat GmbH & Co. KG 2006
  - [48] Jöckel, A.: *Getriebelose Drehstromantriebe für Schienenfahrzeuge*. In: eb – Elektrische Bahnen, Heft 3/2003, S. 113-119, Oldenbourg Industrieverlag, München 2003
  - [49] Jöckel, A.; Löwenstein, L.; Teichmann, M.: *Syntegra® - Innovatives Trieb-fahrwerk mit Direktantrieben*. In: ZEVrail Glasers Annalen, Heft 9/2006, S. 368 - 379, Georg Siemens Verlag 2006
  - [50] Junker, S.: *Automatisierte Bestückung von Dauermagneten - Potenziale bei der Montage von Läufern für E-Motoren*. In: Tagungsband zum Seminar „Alternative Montagekonzepte für die flexible Montage - Strategien und Technologien“, 25. Motek, Schall Kongress GmbH, Frickenhausen 2006
  - [51] Junker, S.: *Entwicklung leistungsfähiger Montagesysteme für innovative Pro-dukte*. In: Tagungsunterlagen zum Fachsymposium Mechatronik, Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik, Augsburg 2004
  - [52] Junker, S.: *Flexible Magnetmontage: Alternative Lösungsansätze für Handha-bung und Bestückung*. In: Tagungsband zum VDI-Seminar „Auslegung und Be-trieb flexibler Montagesysteme“, Fürth 2006
  - [53] Junker, S.: *Greifer für Permanentmagnete*. Gebrauchsmusterschrift DE 202005017182 U1, 2006
  - [54] Junker, S.: *Herausforderung Läufermontage - Flexibilität durch angepasste Au-tomatisierung und Mitarbeitereinsatz*. In: Tagungsband zum Fachseminar „Fle-xible Montagekonzepte für die Produktion von Morgen“, 24. Motek, Schall Kon-gress GmbH, Frickenhausen 2005
  - [55] Junker, S.: *Innovative Antriebskonzepte für Schienenfahrzeuge - Flexible Robo-termontage für die Läuferfertigung*. In: Mechatronik, IHK Nürnberg für Mittel-franken 2004
  - [56] Jurisch, F.: *Scharfe Polübergänge bei hoher Polbedeckung in permanenterreg-ten Maschinen magnetisieren*. In: Tagungsband Elektrisch-mechanische An-triebssysteme. VDE Verlag 2004
  - [57] Kallenbach, E.; Eick, R.; Quendt, P.: *Elektromagnete*. 2. überarbeitete und er-gänzte Auflage, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 2003



- [58] Kaufhold, M.; Jöckel, A.: *Permanentmagneterregte Großmaschinen: Potentiale in der Oberklasse*. In: Jahrbuch Elektrotechnik 2004, Band 23, S. 173-184, VDE Verlag, Berlin 2003
- [59] Kinkel, S.: *Erfolgsfaktor Standortplanung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004
- [60] Kiselev V. V.; Kharlan, G. D.; Chokheli, M. A.; Yakovenko, V. A.: *Process for assembly of the rotor of a thyatron motor with high-coercivity magnets*. In: Soviet Electrical Engineering, Band 61, Heft 8/1990, S. 42-44, Faraday Press, New York 1990
- [61] Knauff, A.; Sopp, H.: *Permanent magnet structure for use in electric machinery*. Offenlegungsschrift US 20040169575 A1, Siemens AG 2004
- [62] Klockow, T.; Hörl, F.; Kunz, M.: *Permanenterregte Traktionsmotoren*. In: eb – Elektrische Bahnen, Heft 3/2003, S. 107-111, Oldenbourg Industrieverlag, München 2003
- [63] König, T.: *Magnet return path and permanent-magnet fixing of a rotor*. Offenlegungsschrift WO 03088449 A1, Robert Bosch GmbH 2003
- [64] Konold, P.; Reger, H.: *Angewandte Montagetechnik*. 2. überarbeitete Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2003
- [65] Kories, R.; Schmidt-Walter, H.: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. 7. erweiterte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 2006
- [66] Kratz, G.; Strasser, H.: *Antriebskonzepte für zukünftige elektrische Triebfahrzeuge*. In: eb – Elektrische Bahnen, Heft 11/1998, S. 333-337, Oldenbourg Industrieverlag, München 1998
- [67] Kühne, H.-J.: *Einfluss des Schneidvorganges auf die Maßhaltigkeit und den Spannungszustand von Elektroblechen*. Diss. Universität Hannover 1990
- [68] Kuroda, K.; Miyazaki, H.: *Magnetizer for rotor magnet material*. Offenlegungsschrift JP 9168259 A, Toyota Motor Corporation 1997
- [69] Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H.: *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen*. 3. aktualisierte Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2006
- [70] Lacote, F.: *Traction advances offer lower costs and higher capacity*. In: Railway Gazette International, Heft 4/2003, S. 206, Railway Gazette International, Sutton 2003
- [71] Linse, H.; Fischer, R.: *Elektrotechnik für Maschinenbauer – Grundlagen und Anwendungen*. 10. korrigierte Auflage, Verlag Teubner, Stuttgart 2000
- [72] Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: *Manuelle Montage wirtschaftlich gestalten*. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1998
- [73] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006

- [74] Malmberg, J.: *Permanent magnet element and electric machine*. Offenlegungsschrift WO 02103882 A1, ABB Oy 2002
- [75] Meeker, D.: *Finite Element Method Magnetics*. Online im Internet: URL: <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage> [Stand: 01.03.2007]
- [76] Michalowsky, L.; Schneider, J.: *Magnettechnik – Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*. 3. Auflage, Vulkan Verlag, Essen 2006
- [77] Müller, A.; Englisch, P.; Teigland, J. L.: *Mittelstandsbarometer 2005. Der deutsche Mittelstand - Stimmungen, Themen, Perspektiven*. Ernst & Young AG, Stuttgart 2005
- [78] N. N.: 3. Quartal: Arbeitgeber zahlen für eine Arbeitsstunde 0,5 % mehr. Pressemitteilung, Statistisches Bundesamt Deutschland, Online im Internet: URL: <http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2006/p5090043.htm> [Stand: 07.12.2007]
- [79] N. N.: *AdeptOne-MV/AdeptThree-MV Roboter Betriebsanleitung*. Adept Technology Inc. 1996
- [80] N. N.: *Aktuelle Trends in der elektrischen Energietechnik*. VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Online im Internet: URL: <http://www.vde.com/VDE/Fachgesellschaften/ETG/Arbeitsgebiete/Elektrische+Maschinen/2005-Oeffentlich/Trends.htm?SmartNavigation=34dd3653-05b4-491a-b8ad-5d3dd7fad2c1> [Stand: 14.02.2005]
- [81] N. N.: *ALSTOM celebrates 25 years of the TGV and develops the latest generation of very high speed trains*. Pressemitteilung der Firma Alstom, Oktober 2006
- [82] N. N.: *Anwendungen*. L-3 Communications Magnet-Motor GmbH, Online im Internet: URL: <http://www.magnetmotor.de> [Stand: 03.01.2007]
- [83] N. N.: *Aufmagnetisierungsvorrichtung für elektrische Maschinen mit Dauermagnetläufer*. Patentschrift DE 4417603 C2, Baumüller Nürnberg GmbH 1999
- [84] N. N.: *Betriebsanleitung 3-Komponenten-Kraftmesselement Typ 9374B, 9348B*. Kistler Instruments AG, Winterthur 2004
- [85] N. N.: *COMSOL - Multiphysics Modelling*. Online im Internet: URL: <http://www.comsol.de> [Stand: 16.02.2007]
- [86] N. N.: *Die Kraft des Ganzen*. Magnetfabrik Schramberg GmbH & Co. KG, Firmenschrift, Online im Internet: URL: <http://www.magnete.de/download/image-de.pdf> [Stand: 23.03.2007]
- [87] N. N.: *Digitale Königswelle*. In: iee, 44. Jahrgang, 10/1999, Hüthig GmbH 1999
- [88] N. N.: *Elektrische Antriebe - Marktentwicklung 2006*. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Online im Internet: URL: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse/2006/Pr\\_2006-101\\_Antriebe\\_2005.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse/2006/Pr_2006-101_Antriebe_2005.pdf) [Stand: Oktober 2006]

- [89] N. N.: *Elektroblechschneidanlagen*. Müller Weingarten AG, Online im Internet: URL: <http://www.mueller-weingarten.de> [Stand: 02.11.2006]
- [90] N. N.: *Ermittlung zulässiger Körperkräfte*. In: REFA III - Arbeitsplatzgestaltung, REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. v., Darmstadt 1994
- [91] N. N.: *Fertigungsverfahren für endlosfaserverstärkte Bauteile*. Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, Online im Internet: URL: <http://www.ikv-aachen.de/abt.fvk/fertig.html> [Stand: 05.11.2006]
- [92] N. N.: *Hybrid Synergy Drive*. Toyota Motor Corporation, Online im Internet: URL: [http://www.hybridsynergydrive.com/pdf/de/186/HYBRID\\_SYNERGY\\_DRIVE.pdf](http://www.hybridsynergydrive.com/pdf/de/186/HYBRID_SYNERGY_DRIVE.pdf) [Stand: 2006]
- [93] N. N.: *KMU Definition*. Europäische Kommission, Online im Internet: URL: [http://ec.europa.eu/enterprise/enterprise\\_policy/sme\\_definition/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/enterprise_policy/sme_definition/index_de.htm) [Stand 09.03.2006]
- [94] N. N.: *Kompass*. Wikipedia die freie Enzyklopädie, Online im Internet: URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kompass> [Stand: 20.03.2007]
- [95] N. N.: *Merkblatt Zollwert (2002) - Vordruck 0466*. Online im Internet: [http://www.zoll.de/e0\\_downloads/c0\\_merkblaetter/index.html](http://www.zoll.de/e0_downloads/c0_merkblaetter/index.html) [Stand: 2002]
- [96] N. N.: *Magnetizing technique*. Magnet-Physik Dr. Steingroeve GmbH, Online im Internet: <http://www.magnet-physik.de/mt.html> [Stand: 30.10.2006]
- [97] N. N.: *Magnetsysteme*. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Firmenschrift, Hanau 2004
- [98] N. N.: *Products – Magnetizers*. Metis Instruments & Equipment NV, Online im Internet: URL: <http://www.metis.be/en/products/magnetizers.php> [Stand: 30.10.2006]
- [99] N. N.: *rho 4.1 Systembeschreibung*. Bosch Rexroth AG, Erbach 2002
- [100] N. N.: *Selten-Erd-Dauermagnete VACODYM VACOMAX*. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Firmenschrift, Hanau 2002
- [101] N. N.: *SERCOS interface*. SERCOS International e. V., Online im Internet: URL: [http://www.sercos.de/english/tech\\_einfue.htm](http://www.sercos.de/english/tech_einfue.htm) [Stand: 06.03.2007]
- [102] N. N.: *Steuern und Zollunion - Zollsätze*. Die Europäische Kommission, Online im Internet: URL: [http://ec.europa.eu/taxation\\_customs/dds/de/tarhome.htm](http://ec.europa.eu/taxation_customs/dds/de/tarhome.htm) [Stand: 08.02.2007]
- [103] N. N.: *Toyota Hybrid System THS II*. Toyota Motor Corporation, Online im Internet: URL: [http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/th2/SpecialReports\\_12.pdf](http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/th2/SpecialReports_12.pdf) [Stand: Mai 2003]
- [104] N. N.: *VDE-Innovationsmonitor 2006: Deutschland verteidigt Top-Position*. Online im Internet: URL: <http://www.vde.com/Allgemein/Informationen/Presse>

- echo/Presseecho+Archiv/2006-Oeffentlich/ew.2006.05.22.htm [Stand: 08.02.2007]
- [105] N. N.: *Verkleben von Rotormagneten*. Firmenschrift Aumann GmbH, Espelkamp 2006
  - [106] Nobuhiro, S.; Yuji, N.: *Rotor of rotating magnet motor and its manufacture*. Offenlegungsschrift JP 10336929 A, Mitsubishi Electric Corp. 1997
  - [107] Offringa, L. J. J.; Thoolen, F. J. M.: *Method for fabricating a permanent magnet rotor, and rotor obtained by said method*. Offenlegungsschrift EP 0996212 A1, Technische Universiteit Eindhoven 2000
  - [108] Ostovic, V.; Runck, W.; Soyk, K.-H.: *Einfahren eines Läufers mit Permanentmagneten in den Ständer einer elektrischen Maschine*. Offenlegungsschrift DE 19546689 A1, ABB Patent GmbH 1997
  - [109] Paul, M.; Hofmann, W.: *Permanentmagnetanordnung, vorzugsweise für Rotoren permanenterregter Synchronmotoren*. Offenlegungsschrift DE 19942000 A1, 2001
  - [110] Ras, C. A.; Hatch, G.; Schilling, M.: *Method for constructing permanent magnet assemblies*. Offenlegungsschrift US 20050086793 A1, 2005
  - [111] Regber, H.; Zimmermann, K.: *Change Management in der Produktion*. Verlag moderne industrie AG & Co. KG, Landsberg/Lech 2001
  - [112] Reinhart, G.: *Wirtschaftliche Montage - Herausforderung für den Mittelstand*. In: wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 93, Heft 9/2003, S. 570
  - [113] Reinhart, G.: *Mechatronik als Innovationsmotor im Maschinen und Anlagenbau*. Online im Internet: [http://www.ifm2005.net/download/050620\\_Downloads/Reinhart\\_Mechatronik\\_Innovationsmotor.pdf](http://www.ifm2005.net/download/050620_Downloads/Reinhart_Mechatronik_Innovationsmotor.pdf) [Stand 24.07.2005]
  - [114] Rodewald, W.; Jurisch, F.; Reppel, G. W.: *Schmetterlinge senken Herstellkosten - Selten-Erd-Magnete treiben die Motorentwicklung voran*. In: antriebstechnik, Heft 5/2005, S. 46-53, Verlag für Technik & Wirtschaft, Mainz 2005
  - [115] Rückel, V.: *Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung für kooperierende Industrieroboter*. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg 2006
  - [116] Schraft, R. D.; Neugebauer, J.-G.; Schmid, S.: *Automation and Robotics*. In Salvendy, G. (Hrsg.): *Handbook of Industrial Engineering*. 3. Auflage, John Wiley & Sons, S. 355-3400, New York 2001
  - [117] Savolainen, A.: *Die Antriebe für eine bessere Zukunft*. In: ABB Technik, Heft 4/2004, S. 34-38, ABB Firmenmagazin 2004
  - [118] Schierenbeck, H.: *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. 14. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München Wien 1999

- 
- [119] Schröder, C.: *Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich*. In: IW Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, Heft 3/2006, Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Köln 2006
- [120] Slama, S.: *Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz*. Diss. Universität Erlangen Nürnberg 2004
- [121] Stelzer, J.: *70 Cent - Wer bietet weniger?* In: Die Zeit, Nr. 18 vom 28.04.2005, Hamburg 2005
- [122] Stephan, J.: *Beitrag zum Greifen von Textilien*. Diss. Technische Universität Berlin 2001
- [123] Stephens, C. M.: *System and method for magnetization of permanent magnet rotors in electrical machines*. Offenlegungsschrift EP 1708341 A2, General Electric Company 2006
- [124] Summerauer, I. J. K.: *Mit kombinierten Prozessen zu neuen Ufern beim Stanzen*. In: Blech InForm, Heft 05/2005, S. 62-65, Carl Hanser Verlag, München 2005
- [125] Suzuki, A.; Nagai, K.; Kondo, H.: *Assembling device for permanent magnet field motor*. Offenlegungsschrift JP 2001251817 A, Moric Co. Ltd. 2001
- [126] Takagi, R.: *Permanent magnet rotor and its manufacturing method*. Offenlegungsschrift JP 2005176572 A, Yaskawa Electric Corporation 2005
- [127] Vernikov, A.; Taranov, S.; Mazmanian, R.: *Industrial sorting system for high energy permanent magnets*. In: Tagungsband zur Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1999, EMCWA 1999
- [128] Vogt, K.: *Berechnung elektrischer Maschinen*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1996
- [129] Warnecke, H.-J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.: *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. 3. überarbeitete Auflage, Fachbuchverlag Leipzig 1996
- [130] Wenger, U.: *Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze*. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg 2004
- [131] Wunderlich, J.: *Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme*. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg 2002
- [132] Wuppermann, C.-D.: *Merkblatt 401 – Elektroband und -blech*. Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf 2005
- [133] Zondervan, J.: *Materials for permanent magnets*. In: Elektronika, Band 37, Heft 7/1982, S. 41-43, Sowjetunion 1982



# Lebenslauf

Stefan Johannes Junker

geboren am 23. September 1975 in Nürnberg

ledig

- |               |   |
|---------------|---|
| 09/82 – 08/86 | Grundschule in Oberasbach   |
| 09/86 – 06/95 | Dietrich Bonhoeffer Gymnasium in Oberasbach<br>Abschluss: Abitur  |
| 08/95 – 08/96 | Zivildienst bei der Johanniter Unfallhilfe in Fürth   |
| 10/96 – 04/02 | Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung Fertigungstechnik, an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg<br>Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)  |
| seit 05/02    | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg<br>Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann |
| seit 12/03    | Oberingenieur der Forschungsgruppe Handhabung und Montagetechnik am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik   |





# Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://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 CO<sub>2</sub>-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  
**CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Ehmman  
**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 Schaltsträger (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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Meßner  
**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 Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-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 Demontagetechnologien 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 CO<sub>2</sub>-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

**Oberflächenausbildung 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, 92 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, 50 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. 2001.  
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 Eßer

**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 Negendanck

**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  
Maßhaltigkeit 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**

**Montagestrukturen 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**

**Laserstrahlintern 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 Prechtl  
**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 978-3-87526-259-0