

# Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

**Andreas Dobroschke**

**219**

**Flexible Automatisierungslösungen für  
die Fertigung wickeltechnischer  
Produkte**



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

Tag der Einreichung: 09. März 2011  
Tag der Promotion: 20. Juni 2011  
Dekan: Prof. Dr.-Ing. R. German  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke  
Prof. Dr.-Ing. I. Hahn  
Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISSN 1431-6226  
ISBN 978-3-87525-317-7

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 2011  
Herstellung: inprint GmbH, Erlangen  
Printed in Germany

### **Vorwort und Danksagung**

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, ehemaliger Leiter dieses Lehrstuhls am Depart-  
ment Maschinenbau, und seinem Nachfolger, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, danke  
ich herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die  
konstruktiven Anregungen sowie den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum und  
das in diesem Zusammenhang entgegengebrachte Vertrauen. Darüber hinaus möchte  
ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn, Inhaber der Professur für Elektrische  
Antriebe und Maschinen, für die wohlwollende Übernahme des Korreferats bedanken.  
Gedankt sei auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt als weiteres Mitglied des  
Prüfungskollegiums und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für die Übernahme des  
Prüfungsvorsitzes.

All meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich herzlich für die sehr gute Zusammenar-  
beit, die fachlichen Diskussionen sowie die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre.  
Hervorheben möchte dabei Herrn Dipl.-Ing. Tobias Schmuck, dem ich für die stets  
freundschaftliche Arbeit an den gemeinsamen Projekten danke. Darüber hinaus gilt  
mein Dank Herrn Dr.-Ing. Stefan Junker, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Brossog, Herrn Dipl.-  
Ing. Jan Tremel sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Wilhelm Weller für die zahlreichen fachli-  
chen Anregungen. Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Michael Purkott für die  
technische Unterstützung bedanken. Ferner möchte ich mich bei allen Studierenden  
bedanken, die mich im Rahmen Ihrer Tätigkeiten am Lehrstuhl unterstützt und so einen  
wichtigen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit geleistet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Mutter Maria Dobroschke. Ihr Rückhalt und ihre Unterstüt-  
zung waren und sind mir stets eine große Hilfe. Mein größter Dank gilt meiner Frau  
Kerstin für die verständnisvolle Geduld und Rücksicht sowie die Liebe, die sie mir  
während der Anfertigung dieser Arbeit entgegengebracht hat.

Erlangen, im Juli 2011

Andreas Dobroschke

# Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und aktuelle Entwicklungen im Bereich der Spulenfertigung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Aufbau und Kenngrößen von Spulen .....	5
2.1.1	Bestandteile wickeltechnischer Produkte .....	5
2.1.2	Elektrotechnische Kenngrößen von Spulen .....	9
2.2	Fertigungsverfahren für Wicklungen .....	13
2.2.1	Linearwickeln .....	14
2.2.2	Flyerwickeln .....	20
2.2.3	Ringkernwickeln .....	21
2.2.4	Nadelwickeln .....	22
2.2.5	Systemlösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte .....	23
<b>3</b>	<b>Entwurf eines prozessintegrierten Regelkreises für die Fertigung lagegenauer Wicklungen</b> .....	<b>27</b>
3.1	Einfluss des Wicklungsaufbaus auf die Eigenschaften von Spulen .....	27
3.2	Randbedingungen für die Fertigung lagegenauer Wicklungen .....	33
3.3	Auswirkungen der Maßabweichungen von Kupferlackdraht und Spulenkörper auf den Wickelprozess .....	38
3.4	Analyse bestehender Systemlösungen für Verlegeachsen .....	42
3.4.1	Ausführungsformen von Vorschubantrieben .....	43
3.4.2	Untersuchte Maschinen .....	44
3.4.3	Kennwerte für die Beurteilung von Verlegeachsen .....	44
3.4.4	Eingesetzte Messmittel .....	48
3.4.5	Messergebnisse .....	50
3.4.6	Technische Bewertung .....	55
3.5	Bisherige Lösungsansätze zur Fertigung lagegenauer Wicklungen .....	56
3.5.1	Patentsituation .....	56
3.5.2	Marktsituation .....	59
3.5.3	Fazit der Patent- und Marktbeurteilung .....	61
3.6	Konzept für einen Nachlaufwinkel-geregelten Wickelprozess .....	61

<b>4 Entwicklung alternativer Sensorlösungen für die Bestimmung des Nachlaufwinkels</b> .....	<b>65</b>
4.1 Nachlaufwinkelerfassung mittels Bildverarbeitung .....	66
4.1.1 Beleuchtungsarten für die Bildverarbeitung .....	66
4.1.2 Prototypische Realisierung der Nachlaufwinkelerfassung mittels Bildverarbeitung .....	67
4.1.3 Bewertung der Nachlaufwinkelerfassung mit Bildverarbeitung .....	68
4.2 Nachlaufwinkelmessung mit optischem Zeilensensor .....	69
4.2.1 Prototypische Realisierung der Zeilensensor-Nachlaufwinkelsensorik .....	70
4.2.2 Bewertung der Nachlaufwinkelerkennung mit Zeilensensor .....	72
4.3 Prozessüberwachung mit Laser-Profilscanner .....	73
4.3.1 Konzept für die Erfassung des Wicklungsaufbaus mit Laser-Profilscanner und Analyse der Messkette .....	74
4.3.2 Realisierung der Auswerte-Software .....	84
4.3.3 Automatische 3D-Visualisierung von Wicklungen .....	85
4.3.4 Bewertung der Nachlaufwinkelerkennung mit Laser-Profilscanner .....	86
4.4 Gegenüberstellung der entwickelten Sensorlösungen .....	91
<b>5 Realisierung einer sensorgeführten Wickelmaschine zur automatisierten Fertigung lagegenauer Spulen</b> .....	<b>93</b>
5.1 Aufbau einer Verlegeachse mit linearem Direktantrieb .....	93
5.1.1 Randbedingungen für die Auswahl des Linearmotors .....	94
5.1.2 Projektierung eines Linearantriebs für die prototypische Verlegeachse .....	99
5.1.3 Wegmess-System .....	102
5.1.4 Servoverstärker .....	103
5.1.5 Konstruktion und mechanischer Aufbau .....	104
5.1.6 Inbetriebnahme der Verlegeachse .....	105
5.1.7 Analyse und Beurteilung der Verlegeachse mit Direktantrieb .....	106
5.1.8 Beurteilung der Antriebslösung mit Linearmotor .....	110
5.2 Integration der Nachlaufwinkel-Sensorik in die Maschinenstruktur .....	111
5.3 Implementierung des Prozessregelkreises .....	114
5.3.1 Steuerungssystem für die Wickelmaschine .....	115
5.3.2 Softwaretechnische Realisierung der Prozesssteuerung und -regelung .....	116
5.4 Funktionsnachweis .....	122

<b>6 Entwicklung und Realisierung eines robotergestützten Wickelsystems</b> .....	<b>127</b>
6.1 Aktuelle Systemlösungen der Wickeltechnik vor dem Hintergrund technologischer und marktgetriebener Entwicklungen .....	127
6.2 Konzept für das robotergestützte Wickeln .....	130
6.3 Aufbau einer Versuchsanlage für das robotergestützte Wickeln .....	132
6.3.1 Auswahl einer Roboterkinematik für die Versuchsanlage .....	133
6.3.2 Komponenten der Versuchszelle .....	135
6.3.3 Prozessrelevante Kenngrößen des Versuchssystems .....	137
6.4 Funktionsnachweis anhand eines Anwendungsbeispiels .....	145
<b>7 Rechnergestützte Werkzeuge zur Programmerstellung für die Steuerung des Wickelroboters</b> .....	<b>149</b>
7.1 Roboter- und Maschinenprogrammierung in der Fertigung .....	149
7.2 Werkstattorientiertes Programmiersystem für den Wickelroboter .....	152
7.2.1 Aufbau des Programmiersystems .....	152
7.2.2 Steuerungsprogramm-Template für den Wickelroboter .....	153
7.3 CAD-Werkzeug zur automatisierten Modellierung von Wicklungen .....	155
7.3.1 Bestehende Werkzeuge zur Modellierung von Wicklungen .....	155
7.3.2 Konzept für die Wicklungsmodellierung in CATIA .....	156
7.3.3 Programmtechnische Umsetzung .....	158
7.4 Kinematische Simulation des Wickelroboters .....	160
7.4.1 Modellierung von Mechanismen in der Simulationsumgebung .....	160
7.4.2 Probleme der Modellierung parallelkinematischer Roboter .....	161
7.4.3 Konzept für die kinematische Simulation parallelkinematischer Roboter .....	162
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>167</b>
<b>9 Summary</b> .....	<b>171</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>173</b>



## 1 Einleitung

Zur Nutzung elektromagnetischer Effekte werden wickeltechnische Produkte unterschiedlichster Ausführung in einer Vielzahl elektrischer und elektronischer Geräte eingesetzt. Die größten Abnehmer wickeltechnischer Produkte sind die Bereiche Telekommunikation, Industrieelektronik, Unterhaltungselektronik und Automotive, wobei letzterer mit einem stetig steigenden Anteil den Hauptabnehmer darstellt [114][115]. So sind in einem modernen PKW durchschnittlich 9 kg Wickeldraht verarbeitet, was bei einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm einer Drahtlänge von rund 30 km entspricht [107]. Haupttreiber dieser Entwicklung sind die steigenden Komfortansprüche, die dazu führen, dass neben einem wachsenden Elektronikanteil insbesondere die Zahl an verbauten Elektromotoren zunimmt. Infolge der fortschreitenden Elektrifizierung von Funktionen des Komforts (elektrisch betätigte und geregelte Fensterheber, Lenksäulen- und Sitzverstellungssysteme, Schiebedächer, Heckklappen, Lüftungsdüsen etc.), zur Erhöhung der Sicherheit (z.B. elektrische Servo- und Aktiv-Lenksysteme, Park- und Hinterachsenbremsen, elektronische Antiblockier- und Antischleudersysteme, aktive Fahrwerke) und zur Reduzierung des Energieverbrauchs (z.B. elektrische Wasser- und Ölpumpen, Klimakompressoren, Ventilsteuerungen oder Schaltgetriebe) ist die Anzahl an verbauten Elektromotoren pro Fahrzeug auf bis zu 120 angestiegen (siehe Bild 1) [107].

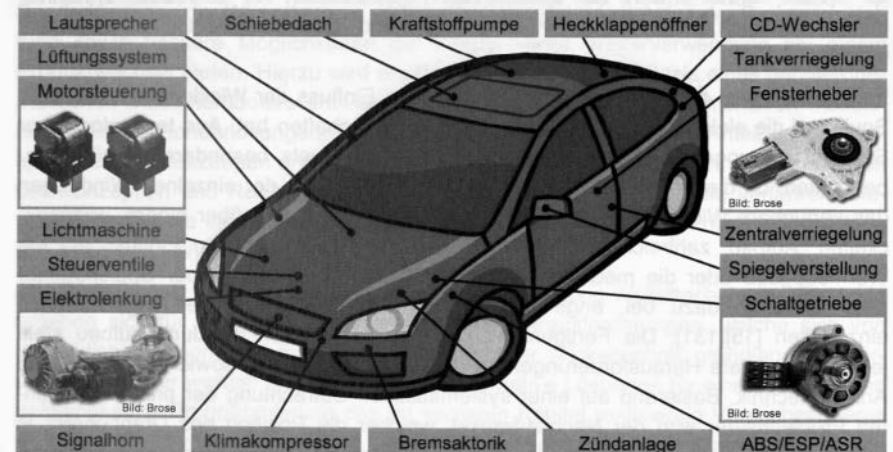


Bild 1: Wickeltechnische Produkte in automobilen Komponenten

Mit der Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs wird in Zukunft der Wertanteil wickeltechnischer Produkte im Automobil noch steigen, da neben dem elektromotorischen Hauptantrieb derzeit noch mechanisch dargestellte Funktionen durch elektrische Lösungen ersetzt werden müssen. Insgesamt wird sich daher der Fokus in der Automobilproduktion von spanenden Fertigungstechnologien zu Montagetechnologien, zu der die Wickeltechnologie zählt, verschieben [52].

Besondere Herausforderung für die Produktion wickeltechnischer Produkte am Standort Deutschland ist das Spannungsfeld aus immer kürzeren Innovationszyklen, einem steigenden Anteil an hochoptimierten kundenspezifischen Produkten, der Notwendigkeit automatisierter Fertigungsprozesse für eine wirtschaftliche Fertigung sowie die zu erfüllenden hohen Qualitätsanforderungen. Um in diesem Umfeld bestehen zu können und die Wettbewerbsfähigkeit auszubauen, sind insbesondere die Entwicklung und der Einsatz innovativer, flexibler und leistungsfähiger Fertigungsprozesse und –konzepte von entscheidender Bedeutung [134]. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte konzipiert, entwickelt sowie im Rahmen von prototypischen Versuchssystemen umgesetzt und in ihrer Leistungsfähigkeit bewertet. Die hierbei betrachteten Technologiefelder sind zum einen die Fertigung lagegenauer Wicklungen, die durch ihren hohen Füllfaktor technologische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionellen wildgewickelten Spulen bieten, und zum anderen der Einsatz von Industrierobotern in der Wickeltechnik für den Aufbau schlanker und gleichzeitig flexibler Prozessketten.

Als Grundlage der Arbeit werden in Kapitel 2 zunächst die elektrotechnischen Grundlagen sowie der grundsätzliche Aufbau wickeltechnischer Produkte beschrieben. Anschließend erfolgt eine Vorstellung der industriell eingesetzten Fertigungstechnologien für Spulen, wobei sowohl die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Verfahren erläutert als auch die jeweiligen Einsatzfelder anhand von Produktbeispielen dargestellt werden.

Im dritten Kapitel der Arbeit wird erörtert, welchen Einfluss der Wicklungsaufbau einer Spule auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften hat. Aus technologischer Sicht ist ein sogenannter „lagegenauer“ Spulenaufbau als besonders vorteilhaft zu betrachten, da dieser aufgrund der lückenfreien Anordnung der einzelnen Windungen das verfügbare Wickelvolumen optimal ausnutzt und so, gegenüber einem „wildgewickelten“ Aufbau, zahlreiche Vorteile bietet. Neben einem positiven Einfluss auf die Wärmeabgabe oder die mechanische Stabilität, trägt ein lagegenauer Spulenaufbau unter anderem dazu bei, enge Toleranzvorgaben der elektrischen Eigenschaften einzuhalten [15][131]. Die Fertigung von Spulen mit diesem Wicklungsaufbau stellt jedoch besondere Herausforderungen an die Prozessgestaltung sowie die eingesetzte Anlagentechnik. Basierend auf einer systematischen Betrachtung der prozessrelevanten Problemfelder wird der Nachlaufwinkel, welcher die Position des Drahtführers in Bezug auf den Wickelort beschreibt, als entscheidender Prozessparameter identifiziert. Im Weiteren erfolgt die Analyse und Bewertung des Standes der Technik auf dem Gebiet der Fertigung lagegenauer Wicklungen sowie die Darstellung der erkannten technologischen Defizite. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wird anschließend ein Konzept für einen prozessintegrierten Regelkreis zur automatisierten Fertigung lagegenauer Wicklungen entworfen, dessen Regelgröße der aktuelle Nachlaufwinkel darstellt. Die Ableitung der zur Umsetzung des Regelkreiskonzepts in ein Prototypensystem erforderlichen Schritte schließt das Kapitel ab.

Für den Aufbau eines geschlossenen Regelkreises zur Regelung des Nachlaufwinkels, muss dieser prozessbegleitend direkt oder indirekt gemessen werden. Mit der Konzeption, Entwicklung und Realisierung entsprechender Sensorsysteme befasst sich das vierte Kapitel. Neben der Beschreibung der Funktionsweise der Sensorsysteme werden die jeweils realisierte steuerungs- und softwaretechnische Anbindung sowie die maschinenbauliche Umsetzung dargelegt und eine technologische Bewertung der Systeme durchgeführt.

Im fünften Kapitel erfolgt die prototypische Umsetzung des Konzepts eines prozessintegrierten Regelkreises für die automatisierte Fertigung lagegenauer Wicklungen in eine sensorgeführte Wickelmaschine. Dies umfasst die Auslegung, Konstruktion und Realisierung einer hochgenauen Verlegeachse auf Basis eines elektrischen Linearantriebs, die Integration der einzelnen Maschinenkomponenten sowie der Nachlaufwinkel-sensorik in die Maschinenstruktur und die Entwicklung der erforderlichen Steuerungs- und Regelungssoftware. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des aufgebauten Prototyps anhand von Wickelversuchen bildet den Abschluss des Kapitels.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist es, im sechsten Kapitel aufzuzeigen, dass durch den Einsatz von Industrierobotern für die Fertigung wickeltechnischer Produkte die Realisierung innovativer Fertigungslösungen ermöglicht wird, die bei geringen Investitionskosten, verglichen mit den aktuellen maschinenbaulichen Sonderlösungen der Wickeltechnik, eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Prozessgestaltung sowie bessere Möglichkeiten der Wieder- oder Weiterverwendung bei einem Produktwechsel bieten. Hierzu wird ein Fertigungskonzept auf Basis eines parallelkinematischen Industrieroboters entwickelt, das gegenüber den kostenintensiven maschinenbaulichen Sonderlösungen der Wickeltechnik, mit einem hohen Anteil an produkt-spezifischen Werkzeugen und Vorrichtungen, zahlreiche Vorteile bietet. Ausgehend von der Konzeption und Realisierung eines Versuchssystems werden die verfahrensrelevanten Kennwerte ermittelt und anhand eines Fallbeispiels eine technische Beurteilung des realisierten Wickelsystems durchgeführt.

Aus dem Einsatz eines Industrieroboters für die Fertigung wickeltechnischer Produkte ergeben sich für die Programmerstellung neue Herausforderungen, welche sich von den üblichen Programmieraufgaben im Bereich der Wickeltechnik grundlegend unterscheiden. Daher werden im siebten Kapitel alternative Lösungen für eine effiziente und aufwandsarme Programmierung des im sechsten Kapitel realisierten Versuchssystems entwickelt. Zum einen ist dies ein werkstatorientiertes Programmierwerkzeug für die Erstellung von Steuerungsprogrammen zur Fertigung von Spulen mit einfachen Querschnittsformen, zum anderen eine durchgängige CAD-CAM-Kette, bei der die Programmerstellung auf Grundlage des automatisiert erstellten 3D-Modells der zu fertigen Wicklung erfolgt. Durch diese Programmierwerkzeuge können der Zeitbedarf für die Programmerstellung entscheidend reduziert, die Programmierung wesentlich vereinfacht, Maschinennutzungszeiten erhöht und Prozesszeiten optimiert werden.

Übergreifendes Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von flexiblen Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte, um damit einen Beitrag zur Beherr-

schung der stetig steigenden Qualitäts- und Kostenanforderungen zu leisten. Mit der Realisierung eines Wickelsystems zur automatisierten Fertigung lagegenauer Wicklungen soll der technologisch anspruchsvolle Fertigungsprozess für diesen Wicklungstyp prozesssicher automatisiert und so das derzeit bestehende Defizit an geeigneten Fertigungstechnologien ausgeglichen werden. Durch die Untersuchungen zum Einsatz von Industrierobotern für das Wickeln soll ein alternativer Fertigungsansatz aufgezeigt werden, der bei geringen Investitionskosten die flexibel automatisierte Herstellung komplexer Wickelprodukte ermöglicht.

## 2 Grundlagen und aktuelle Entwicklungen im Bereich der Spulenfertigung

Die Konstruktion sowie die Fertigung der Wicklung beeinflussen entscheidend die elektrotechnischen Kennwerte eines wickeltechnischen Produkts. Im Gegensatz zu Kondensatoren oder Widerständen, stehen Spulen nur in einem sehr begrenzten Umfang als standardisierte Bauelemente zur Verfügung, weshalb sie in der überwiegenden Zahl der Fälle für den jeweiligen Anwendungsfall speziell dimensioniert werden [3][5]. Im Folgenden werden zunächst die elementaren Kenngrößen sowie der grundsätzliche Aufbau von Spulen mit den zugehörigen Komponenten beschrieben. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der alternativen Fertigungsverfahren der Wickeltechnik sowie der jeweils eingesetzten Wickelmaschinen und Automatisierungslösungen.

### 2.1 Aufbau und Kenngrößen von Spulen

In der Elektrotechnik können Spulen prinzipiell in zwei Gruppen eingeordnet werden. Zum einen Spulen, die als induktive, passive Bauelemente in elektronischen Schaltungen für die Signalverarbeitung oder -konditionierung (z.B. in LC-Schwingkreisen, Passfiltern oder Glättungsschaltungen) zum Einsatz kommen. Zum anderen Spulen, die zur Erzeugung oder Erfassung eines elektromagnetischen Feldes dienen, wie beispielsweise bei Transformatoren, Übertragern, Antennen oder in elektromechanischen Bauelementen wie Elektromotoren, Relais oder Mikrofonen. [13][137]

#### 2.1.1 Bestandteile wickeltechnischer Produkte

Aufgrund der vielfältigen Einsatzfelder für Spulen ist ein hoher Formenreichtum an wickeltechnischen Produkten entstanden. Deren Aufbau lässt sich jedoch immer auf eine gemeinsame Grundkonstruktion zurückführen. In Bild 2 sind der prinzipielle Aufbau eines wickeltechnischen Produkts sowie dessen Hauptbestandteile dargestellt.

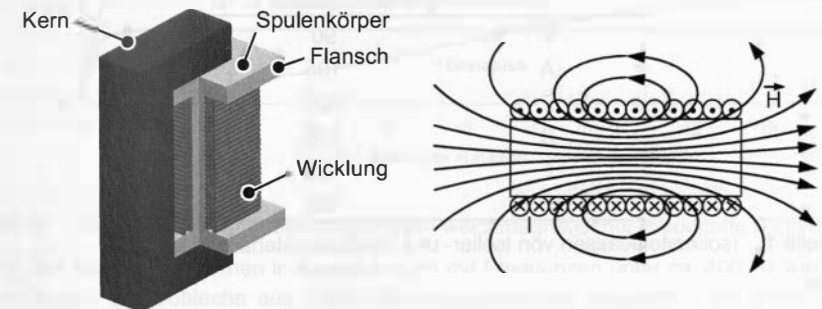


Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines wickeltechnischen Produkts (links); magnetische Feldlinien in einer Zylinderspule [72] (rechts)

Eine Spule besteht aus mindestens einer Leiterschleife aus einem elektrischen Leiter, beispielsweise Kupferlackdraht. Eine einzelne Schleife eines Leiters wird in der Wickeltechnik auch als Windung bezeichnet. Zur mechanischen Stabilisierung der Wicklung wird diese üblicherweise auf einen Spulenkörper gewickelt, der zur Verstärkung der elektromagnetischen Eigenschaften mit einem magnetisierbaren Kern versehen sein kann. [132][137]

### Spulenkörper

Zur mechanischen Stabilisierung, dem Schutz vor Beschädigung, der elektrischen Isolierung gegenüber dem Kern sowie aus fertigungstechnischen Gründen (Handhabung, Aufspannung, Orientierung etc.), werden die Wicklungen einer Spule auf Spulenkörper gewickelt [156]. Spulenkörper werden mit und ohne Kernloch in unterschiedlichsten Formen angeboten, wobei sich die konstruktive Auslegung in zunehmendem Maße am verfügbaren Einbauraum orientiert [137].

Werkstoffe für Spulenkörper sind neben Faserverbundwerkstoffen hauptsächlich thermoplastische Kunststoffe, wie Polyamid PA, Polybutylenterephthalat PBT, Polyethylenterephthalat PET oder Polyetheretherketon PEEK, die spritzgusstechnisch verarbeitet werden. Bestimmend für die Auswahl eines Spulenkörperwerkstoffs sind neben verarbeitungstechnischen Aspekten und Materialkosten insbesondere die Anforderungen die sich aus dem Einsatzzweck ergeben. Die entsprechenden Charakteristika können in elektrische (spez. Durchgangswiderstand, el. Durchschlagfestigkeit, Lichtbogenfestigkeit), mechanische (Bruchdehnung, Bruchspannung, Biege-/Zug-Modul, Biegefestigkeit etc.) und thermische Kennwerte und Eigenschaften (Wärmeformbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Beständigkeit gegen Temperaturwechselbeanspruchung, Wärmealterungsverhalten etc.) unterteilt werden, wobei insbesondere die erforderliche Isolierstoffklasse (siehe Tabelle 1) ausschlaggebend für die Materialauswahl ist. Die in der IEC 60034-1 [121] definierten Isolierstoffklassen geben die jeweilige höchstzulässige Dauertemperatur für einen Isolierstoff an (siehe Tabelle 1) [135].

Isolierstoffklasse	Höchstzulässige Dauertemperatur in °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Tabelle 1: Isolierstoffklassen von Isolier- und Vergussmaterialien [135]

### Kern

Wird eine Spule ohne magnetisch wirksamen Kern gefertigt, wird sie als Luftspule bezeichnet. Aufgrund des fehlenden Kerns kommt es bei dieser Bauform zu keiner

magnetischen Sättigung. Infolge dessen ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke  $H$  und der magnetischen Flussdichte  $B$  mit dem Resultat, dass Luftspulen eine nahezu konstante Induktivität aufweisen. Der Quotient aus magnetischer Flussdichte und magnetischer Feldstärke wird als magnetische Feldkonstante bezeichnet. Für sie gilt im Vakuum  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  [137]. Der kernlose Aufbau bewirkt aber auch, dass Luftspulen nur über eine vergleichsweise geringe Induktivität verfügen. Werden größere Induktivitäten benötigt, müssen Luftspulen mit hohen Windungszahlen gefertigt werden, einhergehend mit einem hohen ohmschen Widerstand. [137]

Bei Spulen mit einem magnetisch wirksamen Kern wird bereits bei kleinen Windungszahlen eine, im Vergleich zu Luftspulen, große Induktivität erreicht. Entscheidend für die Erhöhung der Induktivität ist die relative Permeabilitätszahl  $\mu_r$  des verwendeten Kernmaterials. Dieser Proportionalitätsfaktor gibt an, wie sich die Induktivität einer Spule mit Kern im Vergleich zu einer Spule ohne Kern erhöht [156]. Im Gegensatz zu Luftspulen, ergibt sich bei Spulen mit Kern ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Flussdichte und magnetischer Feldstärke. Dieser Zusammenhang wird in sogenannten Magnetisierungskurven erfasst (siehe Bild 3), die in der Literatur für verschiedene Kernmaterialien zur Verfügung stehen [8][16][72][98][155].

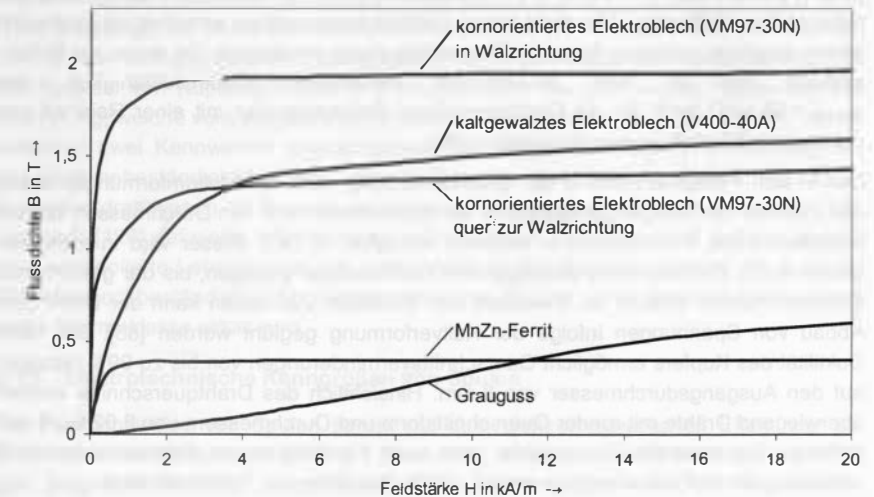


Bild 3: Beispiele für Magnetisierungskurven weichmagnetischer Werkstoffe [72][98]

Für den Aufbau von Kernen in Anwendungen mit Frequenzen unter ca. 400 Hz werden vorwiegend Elektrobleche aus Eisen-Silizium-Legierungen eingesetzt. Die meist kaltgewalzten Bleche haben einen Siliziumanteil von 2,5 bis 4% und werden auf der Oberfläche mit einer isolierenden Oxidschicht überzogen. Bei besonderen Anforderungen an die magnetischen Eigenschaften werden kornorientierte Bleche eingesetzt. Bei

diesen Blechen, die üblicherweise einen Siliziumanteil von 3% aufweisen, wird durch mehrere aufeinander folgende Walz- und Glühbehandlungen eine Textur erzeugt, bei der die Kristalle in Walzrichtung ausgerichtet sind. Vorteile sind bei entsprechender Magnetisierungsrichtung geringere Ummagnetisierungsverluste und eine höhere relative Permeabilität. Für Anwendungen mit Frequenzen größer ca. 400 Hz werden Ferrit- oder Pulverkerne eingesetzt. Erstere sind weichmagnetische Werkstoffe mit einer kristallinen Struktur, auf Basis von Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) mit Beimengungen von Oxiden aus Zink, Nickel, Mangan ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MnO}$ ) oder anderen Metallen. Pulverkerne besitzen eine Kompositstruktur, die aus elektrisch isolierten, magnetischen Metallpulverteilchen sowie härtbaren Kunststoffen zur Isolierung und Formstabilisierung besteht. Sie sind in verschiedenen Zusammensetzungen verfügbar und können entsprechend der magnetischen Anforderungen ausgewählt werden. Sowohl Ferrit- als auch Pulverkerne werden durch Pressen des pulverförmigen Ausgangsmaterials in einer metallischen Form hergestellt, woraus sich eine große Gestaltungsfreiheit bei der Kernkonstruktion ergibt. [38][72]

### Kupferlackdraht

Kupfer hat sich in der Elektrotechnik wegen seiner hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit von  $\kappa_{\text{Cu}} = 60 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$  als Leitermaterial durchgesetzt [7]. Im Vergleich der Metalle bietet lediglich Silber eine bessere Leitfähigkeit von ca. 5%, bei jedoch deutlich höheren Rohstoffkosten. Um diese hohen Leitfähigkeitswerte zu erreichen ist Kupfer mit einem möglichst geringen Anteil an Verunreinigungen erforderlich. So muss zur Sicherstellung der in den ISO-Normen verlangten Mindestleitfähigkeit von  $\kappa_{\text{Cu,min}} = 58 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$  für die Drahtherstellung Elektrolytkupfer mit einer Reinheit von mindestens 99,90 % verwendet werden. [90]

Den ersten Produktionsschritt der Drahtherstellung stellt der Kaltumformungsprozess des Ziehens dar. Ausgangsmaterial ist ein Kupferdraht mit 8 mm Durchmesser, der als standardisiertes Industrieprodukt weltweit verfügbar ist [90]. Dieser wird in mehreren Stufen durch Ziehsteine mit absteigendem Durchmesser gezogen, bis der gewünschte Enddurchmesser erreicht ist. Zwischen den einzelnen Ziehstufen kann der Draht zum Abbau von Spannungen infolge der Kaltverformung gegläht werden [85]. Die hohe Duktilität des Kupfers ermöglicht Querschnittsverminderungen von bis zu 99% bezogen auf den Ausgangsdurchmesser von 8 mm. Hinsichtlich des Drahtquerschnitts werden überwiegend Drähte mit runder Querschnittsform und Durchmessern von 0,02 bis 6 mm gefertigt. Für spezielle Einsatzfelder sind auch Flachdrähte mit Rechteckquerschnitt verfügbar, deren Preis allerdings um 60 – 70% über dem von Runddraht liegt.

Um Windungs- und Körperschlüsse zu verhindern erfolgt nach dem Ziehprozess die Isolierung des Kupferleiters. Neben umspinnenen oder mit thermoplastischen Kunststoffen, wie PE, PVC, PTFE oder PU, ummantelten Drähten, werden in der Spulenwickeltechnik vorwiegend mit Lack isolierte Leiter eingesetzt [90]. Als Isoliermaterialien werden für Kupferlackdrähte hauptsächlich Polyurethan, Polyester, Polyesterimid und Polyamidimid eingesetzt. Die Spannweite der verfügbaren Lackdrähte reicht von Wärmeklasse 120, für einfache Anwendungen wie Relais, Transformatoren oder

Kleinmotoren, bis Wärmeklasse 240, für anspruchsvolle Anwendungen in Bereichen wie Medizin, Kernkraft oder Luft- und Raumfahrt. Von besonderer Bedeutung für eine Automatisierung des Wickelprozesses ist die Verzinnbarkeit des Kupferlackdrahtes. Diese ist im Zinnbad im Allgemeinen bis Wärmeklasse 180 möglich, darüber kann nur mit vorheriger mechanischer Abisolierung verzinkt werden.

Der Aufbau der Lackisolation erfolgt in einem mehrstufigen Prozess. Im ersten Schritt wird der Draht durch ein Lackbad gezogen, sodass sich ein dünner Lackfilm auf der Drahtoberfläche ausbildet. Der noch feuchte Lack wird im zweiten Prozessschritt in einem Durchlauföfen bei 300 bis 600 °C eingebrannt, wodurch die Lösemittel aus dem Lack verdampfen. Anschließend wird der Draht wieder zum Anfang der Lackierstraße zurück geführt, um ihn erneut mit einer Lackschicht zu überziehen. Der Lackierprozess wird insgesamt zwischen sechs- und dreißigmal durchgeführt um eine homogene und fehlerstellenfreie Isolierschicht sicher zu stellen. Je nach Schichtdicke des aufgetragenen Lacks werden Drähte in Gruppen von Grad 1 bis Grad 3 eingeteilt. In der DIN EN 60317-0-1 [120] ist für die einzelnen Grad-Stufen die Mindestzunahme des Durchmessers durch die Isolierung in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers festgelegt. Bei einem Drahtdurchmesser von beispielsweise 0,5 mm beträgt diese für Grad 1 0,024 mm, Grad 2 0,045 mm und Grad 3 0,067 mm. [85]

Die technischen Lieferbedingungen für Kupferlackdraht sind in der DIN EN 60317-0-1ff [120] festgelegt. Sie beschreibt die Anforderungen an die mechanischen, thermischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften des Kupferleiters und der Isolierung. Für die Auswahl von Kupferlackdraht sind insbesondere die thermischen Kennwerte von Bedeutung, welche vom eingesetzten Isolierlack abhängen. In der Normung wird hierbei zwischen zwei Kennwerten unterschieden. Der Temperatur-Index (TI) entspricht der Dauerwärmebeständigkeit bzw. der zulässigen Warmlagerungstemperatur eines Kupferlackdrahttyps in °C für eine extrapolierte Lebensdauer von 20.000 Stunden [47]. Die nach [120] definierte Wärmeklasse entspricht der Temperatur bei welcher sowohl eine extrapolierte Lebensdauer von mindestens 20.000 Stunden erreicht, als auch die Wärmeschockbeständigkeit für Temperaturen von 20 bzw. 25°C oberhalb der zugeordneten Wärmeklasse erfüllt wird.

### 2.1.2 Elektrotechnische Kenngrößen von Spulen

Die Funktionsweise von Spulen beruht auf dem elektromagnetischen Effekt, der bei einem stromdurchflossenen Leiter zur Entstehung eines zum Leiter coaxialen ringförmigen Magnetfeldes führt. In zylinderförmigen Spulen heben sich die Magnetfelder zwischen den einzelnen Windungen gegenseitig auf, im Inneren der Spule entsteht ein homogenes Magnetfeld mit parallelen Feldlinien. Nachfolgend wird eine konzentrierte Übersicht der wichtigen Kenngrößen von Spulen gegeben. Für detaillierte Informationen sei auf [3], [5], [137] oder [138] verwiesen.

**Durchflutung**

Die Durchflutung  $\Theta$  ist die Summe aller Ströme, die durch eine Fläche mit einer orientierten Randkurve hindurch tritt. Sie kann für Spulen aus dem Produkt von Stromstärke und Windungszahl bestimmt werden [137]. Für die Durchflutung gilt:

$$\Theta = I \cdot N \quad (2.1)$$

mit Durchflutung	$\Theta$	in	A
Stromstärke	$I$	in	A
Windungszahl	$N$	in	-

Hieraus wird deutlich, dass dieselbe Durchflutung entweder mit vielen Windungen und kleiner Stromstärke oder mit wenigen Windungen und großer Stromstärke erzeugt werden kann.

**Magnetische Feldstärke**

Nach dem Durchflutungsgesetz gilt für die magnetische Feldstärke einer langgestreckten Zylinder-Luftspule mit der Länge  $l$  in Längsrichtung [137]:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Theta}{l} \quad (2.2)$$

mit magnetische Feldstärke	$H$	in	A/m
Spulenlänge	$l$	in	m

Das bedeutet, dass die magnetische Feldstärke einer Spule umso größer ist, je größer die Durchflutung und je kleiner die wirksame Spulenlänge ist.

**Magnetische Flussdichte**

Die magnetische Flussdichte eines Magnetfeldes ergibt sich aus der magnetischen Feldstärke und der Permeabilität des vom Feld durchsetzten Materials. Sie ist ein Maß für die Konzentration der Feldlinien und berechnet sich für Luftspulen zu [3]:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2.3)$$

mit magnetische Flussdichte	$B$	in	Vs/m <sup>2</sup> = T (Tesla)
magnetische Feldkonstante	$\mu_0$	=	4 $\pi$ 10 <sup>-7</sup> Vs/Am

Durch ferromagnetische Kerne wird die Flussführung gegenüber Luft verbessert. Es gilt dann [3]:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (2.4)$$

mit Permeabilitätszahl Kernmaterial	$\mu_r$	in	Vs/Am
--	---------	----	-------

Die Permeabilitätszahl von ferromagnetischen Stoffen hängt von der Feldstärke des magnetischen Feldes ab und kann aus werkstoffspezifischen Magnetisierungskennlinien, die für gebräuchliche Werkstoffe verfügbar sind, bestimmt werden (siehe auch Abschnitt 2.1.1). [150]

**Magnetischer Fluss**

Für den magnetischen Fluss eines homogenen Magnetfeldes das senkrecht durch ein Fläche  $A$  hindurch tritt gilt nach [3]:

$$\Phi = B \cdot A \quad (2.5)$$

mit magnetischer Fluss	$\Phi$	in	Vs = Wb (Weber)
------------------------	--------	----	-----------------

**Induktivität**

Die Induktivität einer Leiterschleife beschreibt das Verhältnis von magnetischem Fluss durch die Leiterschleife zu flussverursachendem Strom:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (2.6)$$

mit Induktivität	$L$	in	Wb/A = H (Henry)
------------------	-----	----	------------------

Maßgebend für die Induktivität von Luftspulen ist das mit den einzelnen Windungen der Wicklung verkettete Magnetfeld. Die näherungsweise Berechnung der Induktivität einer Spule mit lückenlosem Wicklungsaufbau kann nach [3] durch Umformen der Gleichung (2.6) unter Berücksichtigung des Verkettungsflusses erfolgen. Für eine einlagige, langgestreckte Zylinderspule ohne Kern deren Länge  $l$  sehr groß gegenüber dem Durchmesser der Wicklung ist, gilt:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N \cdot B \cdot A}{I} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I \cdot N \cdot A}{l \cdot I} = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{l} \quad (2.7)$$

mit Verkettungsfluss	$\Psi$	in	Wb
Spulenquerschnittsfläche	$A$	in	m <sup>2</sup>
Spulenlänge	$l$	in	m

Für einlagige kürzere Zylinderspulen mit  $l/D < 0,3$  gilt nach [3] die Näherungsgleichung:

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 A}{l + D/2,2} \quad (2.8)$$

Zur Steigerung der Induktivität bei gleicher Windungszahl werden Spulen mehrlagig ausgeführt. Das bedeutet, dass die Windungen nicht nebeneinander in einer Lage sondern auf mehrere Lagen aufgeteilt übereinander gewickelt werden. Für eine Luftspule mit einer Lagenanzahl  $W$  gilt [3]:



$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 A}{\frac{l}{W} + D / 2,2} \quad (2.9)$$

mit Lagenanzahl  $W$  in -

Für die Herstellung von Spulen stehen vorgefertigte Kerne aus weichmagnetischem Ferrit oder aus Elektroblech zur Verfügung. Deren mechanische und werkstoffabhängige Kennwerte werden im Induktivitätsfaktor  $A_L$  zusammengefasst. Maßgeblich für den  $A_L$ -Wert sind insbesondere die Permeabilität des Kernmaterials sowie der Querschnitt und die Länge des feldtragenden Bereichs. Die Induktivität einer Spule mit  $N$  Windungen wird bei bekanntem  $A_L$  nach folgender Gleichung berechnet [136]:

$$L = N^2 \cdot A_L \quad (2.10)$$

mit Induktivitätsfaktor  $A_L$  in H

**Kupferwiderstand**

In Abhängigkeit des Drahtdurchmessers gilt für den längenbezogenen Widerstand eines Kupfer-Rundleiters mit dem Durchmesser  $d_{Cu}$  unter Berücksichtigung des spezifischen Widerstandes von Kupfer:

$$R'_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{Cu}} = \frac{4 \cdot \rho_{Cu}}{\pi \cdot d_{Cu}^2} \quad (2.11)$$

mit längenbezogener Kupfer-Gleichstromwiderstand  $R'_{Cu}$  in  $\Omega/m$   
 spez. Widerstand von Kupfer  $\rho_{Cu} = 1,786 \cdot 10^{-8} \Omega mm^2/m$   
 Querschnittsfläche Kupferleiter  $A_{Cu}$  in  $mm^2$   
 Durchmesser Kupferleiter  $d_{Cu}$  in mm

Der Kupferwiderstand einer Spule, auch ohmscher Widerstand oder Gleichstromwiderstand genannt, wird bestimmt von der Länge des verwickelten Kupferlackdrahtes und dem längenbezogenen Widerstand:

$$R_{Cu} = R'_{Cu} \cdot l_{Cu} \quad (2.12)$$

mit Kupferwiderstand  $R_{Cu}$  in  $\Omega$   
 Leiterlänge  $l_{Cu}$  in m

**2.2 Fertigungsverfahren für Wicklungen**

Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt in der DIN 8580 in sechs Hauptgruppen [118]. Das „Wickeln mit Draht“ wird hier in die Gruppe „Fügen“ eingeordnet (siehe Bild 4) und in der DIN 8593 Teil 5 [119] als das „Fügen eines Innenteils mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil“ definiert. Für die Fügeoperation muss eine rotierende Relativbewegung zwischen Spulenkörper und Drahtführung erzeugt werden, die zusätzlich von einer Vorschubbewegung überlagert sein kann.



Bild 4: Das Fertigungsverfahren Wickeln in der DIN 8593 Teil 5 [119] als Untergruppe der DIN 8580 [118]

Das weite Anwendungsspektrum wickeltechnischer Produkte hat zu einer großen Bandbreite an Ausführungsformen und damit verbunden zu unterschiedlichsten Verfahrensprinzipien bei der Herstellung geführt. Allen Verfahren gemein ist die in Bild 5 dargestellte allgemeine Struktur des Wickelprozesses. Das auf einer Vorratsrolle bereitgestellte Wickelmaterial wird über Umlenk- und Führungselemente zur Drahtbremse geführt, die den Draht mit einer definierten Zugspannung beaufschlagt. Über Ausgleichselemente zur Kompensation von Schwankungen in der Drahtzugkraft oder von Drahtüberschuss wird der Draht über die Drahtführung zum Wickelkörper geführt und in einer fortlaufenden Biegebewegung abgelegt.

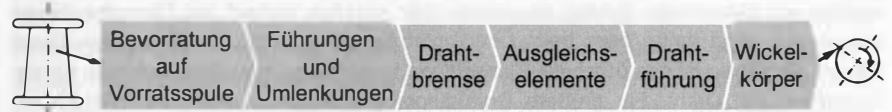


Bild 5: Allgemeine Struktur des Wickelprozess

Abgesehen von Sonderlösungen, erfolgt die Fertigung von Wicklungen mit den Verfahren Linearwickeln, Flyerwickeln, Ringkernwickeln und Nadelwickeln. Nachfolgend

werden diese alternativen Verfahren beschrieben und ihre jeweiligen Einsatzfelder detailliert aufgezeigt.

### 2.2.1 Linearwickeln

Mit dem Verfahren Linearwickeln werden vorwiegend kleine, rotationssymmetrische Spulen gefertigt. Wie in Bild 6 dargestellt, wird die zur Formung der Spule erforderliche kontinuierliche Biegeumformung des Drahtes dadurch erreicht, dass der Spulenkörper, an dem der Draht fixiert ist, von einer Wickelspindel um seine Rotationsachse gedreht wird. Die translatorische Verlegebewegung erfolgt durch einen Drahtführer, der von einer Verlegeachse parallel zur Wickelachse verfahren wird.

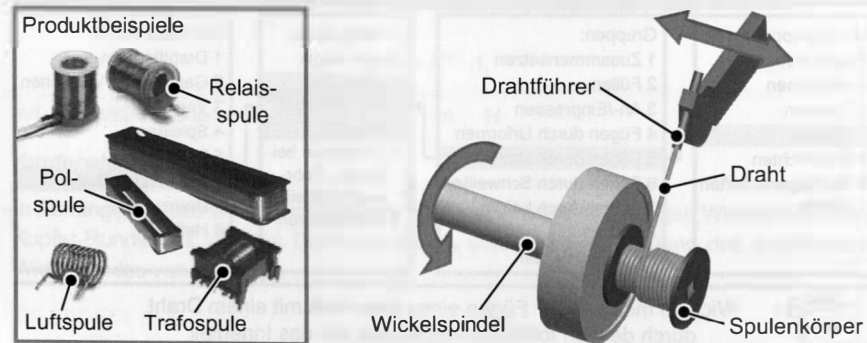


Bild 6: Schematische Darstellung des Linearwickelns

Die Verfahrensbewegung des Drahtführers erfolgt synchron zur Rotationsbewegung der Wickelspindel mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit. Diese wird entsprechend des Durchmessers des verarbeiteten Drahts sowie des gewünschten Wicklungsaufbaus eingestellt. Bei einer Lagenwicklung erfolgt, sobald eine Wicklungslage fertig gewickelt ist, eine Richtungsumkehr des Drahtführers und die nächste Lage wird über die darunter liegende gewickelt. Nachfolgend wird im Detail auf die wichtigen Funktionselemente eingegangen.

#### Drahtbereitstellung

Die Bereitstellung von Kupferlackdraht erfolgt auf Spulen die nach IEC 60264 [122] international genormt sind. Feinstdrähte mit einem Durchmesser kleiner 0,15 mm werden auf bikonischen Spulen angeboten. Der schräge Verlauf der Flansche dieser Spulenform sorgt dafür, dass beim Überkopfabzug nur geringe Kräfte auf den Draht wirken. Nachteilig ist das durch die Flanschform bedingte geringe Nutz-Volumen für die Aufnahme von Draht. Für größere Drahtdurchmesser werden alternativ zylindrische Spulen oder Langspulen verwendet. Diese bieten wegen der geraden Flansche ein deutlich höheres Nutz-Volumen, verursachen jedoch beim Abzug höhere Reibkräfte am Draht. Langspulen werden darüber hinaus in Kombination mit sogenannten „Behältern“ oder „Tonnen“ angeboten. Diese bestehen aus einem Boden auf dem die Langspule

steht und mittels einer Zentrierhilfe koaxial ausgerichtet wird und einem tonnenförmigen Deckel in dessen Oberseite eine Öffnung zum Drahtabzug eingearbeitet ist. Zur Erleichterung des Transports der bis zu 200 kg schweren Tonnen können in den Deckeln Ösen oder Tragebänder eingearbeitet sein. Die Verbindung von Deckel und Boden erfolgt mittels eines Spannrings der über einen Exzenterhebel geschlossen wird. [105]

#### Drahtbremsen

Für die Fertigung einer Wicklung muss der Draht mit einer definierten Drahtzugkraft unter Spannung gehalten werden. Die Einhaltung einer konstanten Drahtzugkraft ist eine wesentliche Voraussetzung für die Erfüllung der engen Qualitätsanforderungen an Spulen und sowohl aus technologischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen von entscheidender Bedeutung [63][64]. So beeinflussen zu geringe Drahtzugkräfte insbesondere den Wicklungsaufbau negativ. Fehlerbilder sind in erster Linie lockere Windungen, geringe Füllgrade sowie Störungen im Wickelbild. Folgen hiervon sind eine geringe mechanische Stabilität der Spule sowie eine Schwächung der elektromagnetischen Eigenschaften [28]. Die Auswirkungen von zu hohen Drahtzugkräften hängen davon ab, ob der Wickeldraht elastisch oder plastisch gedehnt wird. Im Bereich der elastischen Dehnung behält der Draht seine ursprünglichen Materialkennwerte unverändert bei. Wird infolge von zu hohen Drahtzugkräften der Bereich der elastischen Drahtdehnung überschritten, kommt es gemäß des Gesetzes der Volumenkonstanz zu einer bleibenden Querschnittsverminderung. Dies resultiert in Änderungen der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Drahtes und somit in Schwankungen der Spulenkennwerte. Ein Drahttriss infolge zu hoher Drahtzugkräfte verursacht darüber hinaus Ausschuss und Maschinenstillstandszeiten, die wiederum zu einer Verringerung der Produktivität führen. [29][153]

Die Erzeugung der Drahtzugkraft erfolgt bei handelsüblichen Drahtbremsen durch ein drehmomentbeaufschlagtes Bremsrad. Durch das mehrmalige Umschlingen des Bremsrades wird im Draht nach dem Prinzip der Seilreibung und dem Hebelgesetz eine Zugkraft erzeugt, die sich, bei schlupffreier Kraftübertragung, aus dem Durchmesser des Bremsrades und dem Bremsmoment ergibt. Durch das Bremsradprinzip wird eine schonende Einkopplung der Bremskraft in den Draht sichergestellt.

Hinsichtlich der Erzeugung des Bremsmomentes am Bremsrad können Drahtbremsen in mechanische oder elektrische Systeme eingeteilt werden [143]. Bei mechanischen Drahtzugstellern wird das Bremsmoment durch federbetätigte Reibelemente erzeugt, die auf das Bremsrad wirken (siehe Bild 7). Durch Verstellung der Federvorspannung über einen Hebelmechanismus kann das Bremsmoment an den zu verarbeitenden Drahtdurchmesser angepasst werden, wobei die Bremskrafterzeugung ungeregelt erfolgt. Mechanische Drahtbremsen werden für verschiedene Drahtdurchmesserbereiche angeboten, beginnend bei 0,01 – 0,04 mm bis zu 1,5 – 4,0 mm, was einem Kraftbereich von 14 mN bis 310 N entspricht. [79][110][111][112]



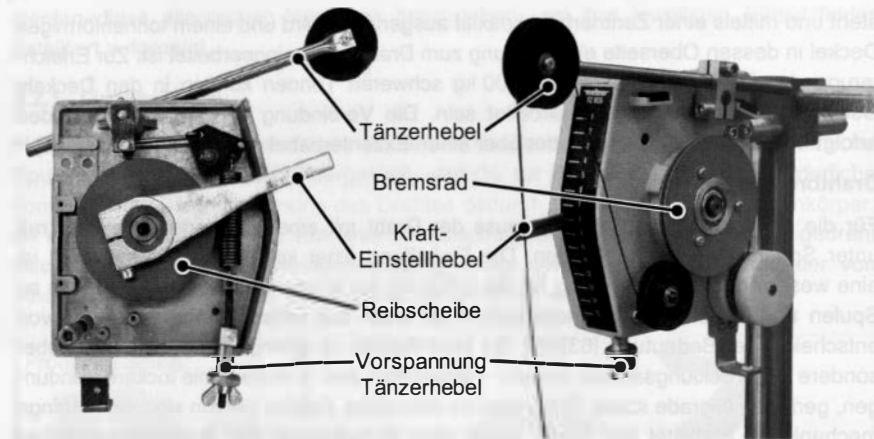


Bild 7: Aufbau einer mechanischen Drahtbremse

Bei elektrischen Drahtzugstellern kommen für die Erzeugung des Bremsmoments Magnetpulverbremser, elektromagnetisch betätigte Scheibenbremsen oder Elektromotoren zum Einsatz. Der Einsatz von elektronischen Aktoren ermöglicht es, die Drahtzugkraft, im Gegensatz zu mechanischen Drahtbremsen, entsprechend den aktuellen Prozessbedingungen durch die elektronische Vorgabe eines Sollwertes (analog oder digital) flexibel einstellen zu können. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, in Beschleunigungsphasen eine geringere Drahtzugkraft vorzugeben und nach Erreichen der Wickelsolldrehzahl auf den höheren Wickeldrahtzug umzuschalten. [17][24]

Eine wesentliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit elektrischer Drahtbremsen wird erreicht, wenn durch die Integration eines Drahtzugkraftsensors ein geschlossener Regelkreis aufgebaut wird. Hierdurch können prozessbedingte Schwankungen der Drahtzugkraft oder Abnutzungserscheinungen in der Bremsmechanik automatisch ausgeglichen und somit die Prozesssicherheit entscheidend gesteigert werden. Wie in Bild 8 gezeigt, wird zur Bestimmung der Drahtzugkraft der Draht über eine Messrolle geführt die am freien Ende eines Biegebalkens montiert ist. Die Verformung des Biegebalkens wird mit DMS-Messstreifen erfasst und nach der Umwandlung in einen proportionalen Spannungswert mittels einer Auswerteschaltung in die auf einem Mikrocontroller implementierte Bremsenregelung eingespeist. Nach einem Soll-Ist-Vergleich der Drahtzugkraft wird ein Stellsignal für den Hauptbremsmotor erzeugt, der ein entsprechendes Bremsmoment generiert. Geregelte elektronische Drahtbremsen sind insbesondere im Bereich der automatisierten Verarbeitung von Feindraht verbreitet, finden aber aufgrund der gestiegenen Qualitätsanforderungen zunehmend auch bei der Verarbeitung mittlerer und starker Drähte, wie beispielsweise in der Ankerwickelung, Einsatz. [24]

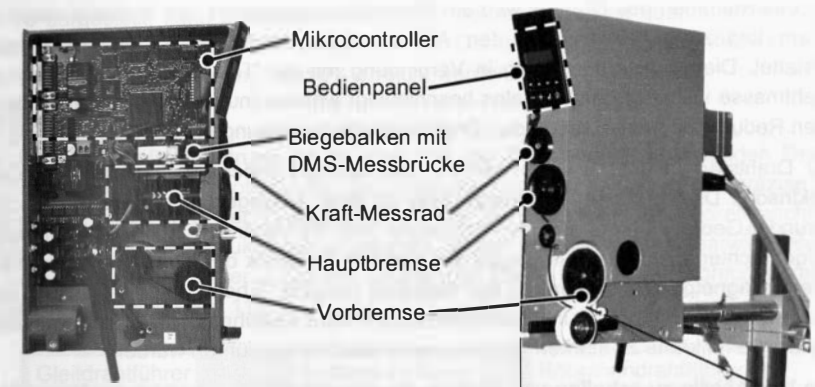


Bild 8: Aufbau eines elektronischen Drahtzugreglers

Einen besonderen Schwerpunkt der wickeltechnischen Forschung der vergangenen Jahre stellt die Drahtzugkraftregelung dar, die vor dem Hintergrund gestiegener Anforderungen an die Qualität von Wickelprodukten seit den 1990er Jahren an Bedeutung gewinnt. Wie Untersuchungen von Wenger [151] gezeigt haben, ist mit derzeit am Markt erhältlichen Systemen der Ausgleich von Drahtzugkraftschwankungen, wie sie beim Bewickeln von unrunder Spulenkörpergeometrien auftreten, nur sehr eingeschränkt möglich. Die Massenträgheit der eingesetzten Bremsräder und Umlenkrollen verhindert eine ausreichend schnelle Reaktion auf die Schwankungen, die durch die periodischen Abstandsänderungen zwischen Drahtbremse und Wickelort verursacht werden [33].

Aufbauend auf den in [153] beschriebenen Ansätzen zur Reduzierung von Drahtzugkraftschwankungen wird in [151] die Entwicklung eines Drahtzugreglers beschrieben, bei dem auf die Verwendung des sonst üblichen Bremsrads verzichtet wird und die Erzeugung der Drahtzugkraft stattdessen durch ein geregeltes Klemmen des Draht erfolgt [31] (siehe Bild 9).

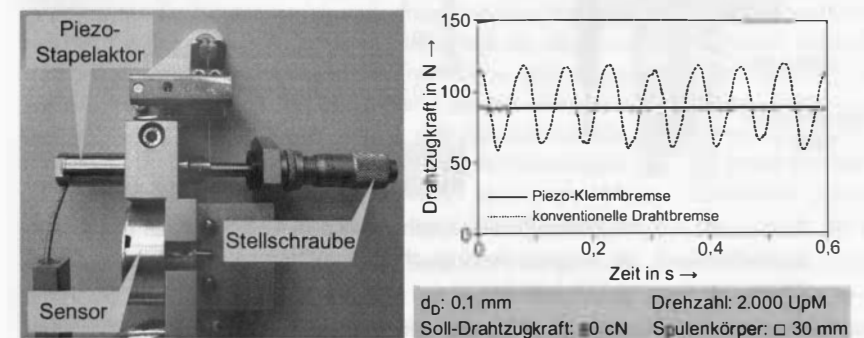


Bild 9: Prototyp der Piezo-Klemmbremse (links); Vergleich des Drahtzugkraftverlaufs einer konventionellen Bremse und der Piezo-Klemmbremse (rechts) [32][151]

Für das Klemmen des Drahtes wird ein Piezo-Aktor eingesetzt, der in Kombination mit einem kapazitiven Kraftsensor den Aufbau eines hochdynamischen Regelkreises gestattet. Die schnelle Regelung in Verbindung mit der Tatsache, dass lediglich die Drahtmasse während des Wickelns beschleunigt werden muss, führen zu einer deutlichen Reduzierung der auftretenden Drahtzugkraftschwankungen (siehe Bild 9). [24]

Für Drahtstärken über 0,4 mm werden üblicherweise mechanische oder gesteuerte elektrische Drahtbremsen eingesetzt. Hier ist eine Ausregelung der beim Bewickeln unrunder Geometrien auftretenden Störungen über die Veränderung des vom Bremsrad aufgebrauchten Drehmoments wegen der geringen Dynamik der eingesetzten Bremsaktoren (Magnetpulver, Hysterese) nur begrenzt möglich. Ebenso ist der Einsatz einer Bremse mit Klemmtechnik im Starkdrahtbereich nicht zielführend, da die erforderlichen hohen Klemmkraft zu starken Verformungen des Drahtes führen würden.

Um hier Abhilfe zu schaffen und auch im Starkdrahtbereich eine leistungsfähige Möglichkeit zur Kompensation von Drahtzugkraftschwankungen zu bieten, basiert der in [27] beschriebene Lösungsansatz auf dem Einsatz einer magnetorheologischen Bremse. Diese besteht aus einer mit magnetorheologischer Flüssigkeit gefüllten Kammer, die eine drehbar gelagerte Bremscheibe umschließt. Magnetorheologische Flüssigkeiten bestehen aus einer Trägerflüssigkeit, je nach Anwendungsfall Öl oder Wasser, der ferromagnetische Partikel mit einer Größe zwischen 3 bis 10  $\mu\text{m}$  und einem Volumenanteil von 20 bis 40% beigemischt sind [160]. Durch das Anlegen eines magnetischen Feldes richten sich die Magnetpartikel in der Flüssigkeit aus und die Viskosität der Flüssigkeit steigt. In der magnetorheologischen Bremse vergrößert sich mit der Erhöhung der Viskosität die Reibung am Bremsrad, was zu einem Anstieg des Drehmoments in der Bremswelle führt.

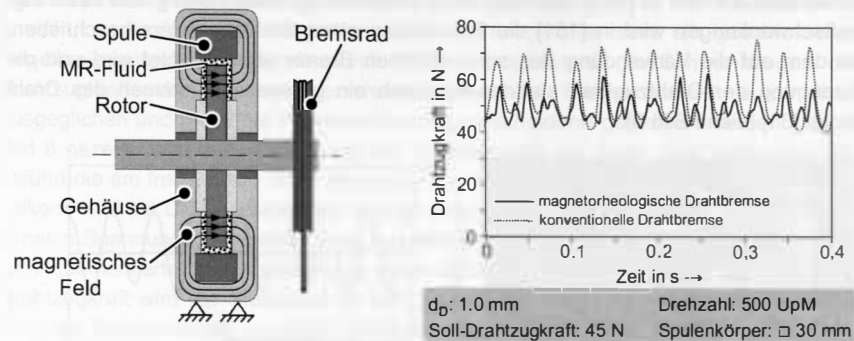


Bild 10: Aufbau der magnetorheologischen Drahtbremse (links); Vergleich des Drahtzugkraftverlaufs der magnetorheologischen Drahtbremse mit einer konventionellen Drahtbremse [27] (rechts)

Wickelversuche haben gezeigt, dass durch den Einsatz der magnetorheologischen Bremse auch bei Drahtdurchmessern über 0,4 mm eine Reduzierung der Drahtzugkraftschwankungen im Vergleich zu konventionellen Drahtbremsen möglich ist. Wie in

Bild 10 dargestellt, kann beispielsweise bei der Bewicklung eines quadratischen Spulenkörpers (Seitenlänge 30 mm) mit einem 1 mm Draht bei einer Drehzahl von 500 UpM eine signifikante Verringerung um 50% erreicht werden. [27]

### Drahtführung

Die Aufgabe der Drahtführung ist es, den von der Drahtbremse kommenden Draht umzulenken und auf dem rotierenden Spulenkörper möglichst schonend und präzise zu platzieren. Hierbei wird der Drahtführer von der Verlegeachse der Wickelmaschine geführt. Von Spezialkonstruktionen abgesehen, lassen sich die in der Linearwickeltechnik eingesetzten Drahtführer in die drei Grundtypen Gleit-, Rollen- und Röhrendrahtführer einteilen (siehe Bild 11).

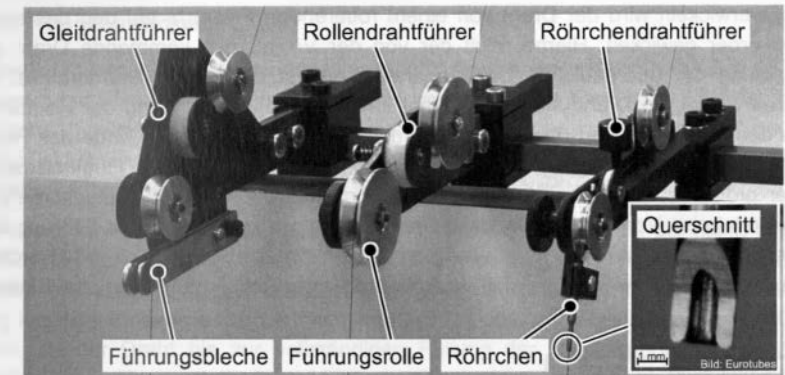


Bild 11: Übersicht alternativer Drahtführersysteme

Bei **Röhrendrahtführern** erfolgt die Positionierung des Drahtes durch ein Röhren, dessen Innendurchmesser entsprechend dem Durchmesser des zu verwickelnden Drahtes ausgeführt ist. Dies erlaubt eine exakte Positionierung des Drahtes im Raum, wodurch eine Automatisierung von komplexen Prozessschritten, wie das Terminieren des Drahtes am Spulenanfang und -ende oder das Parkieren des Drahtes (vorübergehendes Festlegen des Drahtes an einem mit der Maschine verbundenen Haltestift), ermöglicht wird. Um den bei der Verarbeitung des Wickeldrahtes auftretenden Verschleiß am Drahtführer zu minimieren, werden diese aus hochfesten Stählen, wie beispielsweise EN31 Kugellagerstahl, gefertigt und induktiv bis zu einer Oberflächenhärte von 69 HRC gehärtet. Bei besonderen Anforderungen hinsichtlich der Haltbarkeit oder der Geometrie werden Drahtführer sintertechnisch aus Hartmetall gefertigt. Hierdurch sind Oberflächenhärten von bis zu 80 HRC erreichbar.

**Rollendrahtführer** ermöglichen eine besonders schonende Verarbeitung des Wickelmaterials und werden üblicherweise für die Verarbeitung von Drähten mit einem Durchmesser über 0,4 mm eingesetzt. Die Führung des Drahtes wird durch zwei kugelgelagerte Rollen realisiert, die an ihrer Umfangsfläche V-förmig genutet sind. Die mechanische Belastung des durch die Nuten geführten Wickelmaterials ist durch die

reibungsarme sowie sanfte Führung und Umlenkung deutlich geringer als bei Röhrendrahtführern. Da mit Rollendrahtführern eine Positionierung des Drahtes im Raum nicht möglich ist, beschränkt sich das Einsatzfeld auf handbediente Wickelarbeiten, an denen die Fixierung der Drahtenden manuell vom Bedienpersonal durchgeführt wird.

**Gleitdrahtführer** sind ebenfalls nur für den Einsatz an manuell bedienten Wickelmaschinen geeignet. Hier erfolgt die Positionierung des Drahtes durch zwei Führungsbleche zwischen denen der Draht hindurch läuft. Durch die gute Zugänglichkeit ist das Einfädeln des Drahtes im Vergleich zu Röhrendrahtführern deutlich einfacher. Hierdurch können die Stillstandszeiten bei Drahttrass wesentlich reduzieren werden.

### 2.2.2 Flyerwickeln

Beim Flyerwickeln wird der Draht von einem rotierenden Flyerarm auf den ortsfesten Spulenkörper gewickelt. Hierbei läuft der von der Vorratsrolle kommende Draht zur Einkopplung der erforderlichen Drahtzugkraft zunächst durch eine Drahtbremse. Im Weiteren erfolgt die Drahtführung zunächst in einer Hohlwelle entlang der Rotationsachse des Flyerarms, und über mehrere Umlenkelemente bis an das Ende des Flyerarms. Die Länge des Flyerarmes muss so gewählt werden, dass der Flugkreisdurchmesser größer ist als die maximale Ausdehnung des bewickelnden Spulenkörpers in der Wickelebene. Vom letzten Umlenkelement, das gleichzeitig die axiale Führung des Drahtes übernimmt, wird der Draht auf den Spulenkörper abgelegt. Für die Drahtführung kommt je nach Anwendungsfall ein Röhren- oder Rollendrahtführer zum Einsatz. [125]

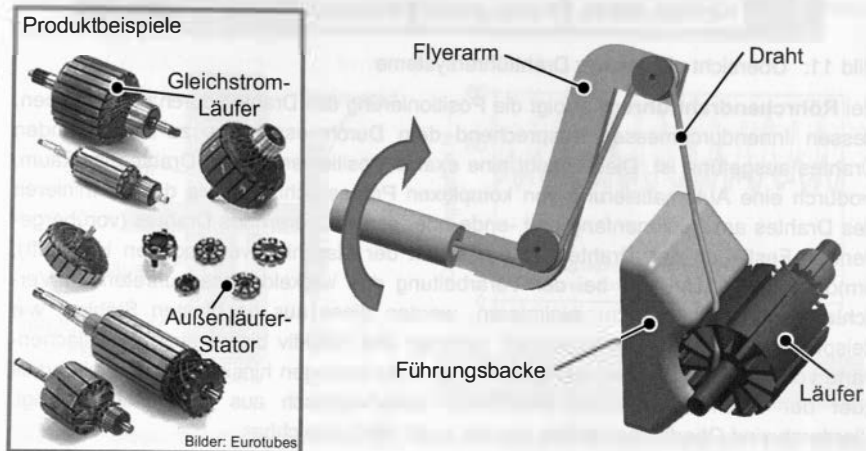


Bild 12: Im Flyerverfahren bewickelte Produkte (links); Verfahrensprinzip des Flyerverfahrens (rechts)

Eingesetzt wird das Flyerwickelverfahren bei der Bewicklung von nicht rotations-symmetrischen Wickelkörpern, wie Motorläufern, bzw. bei Spulenkörpern mit hohem

Gewicht, beispielsweise Transformatoren. Diese würden beim Linearwickeln zu einem hohen Beschleunigungsmomente und zum anderen starke Unwuchten verursachen. Mit einem gewichtsoptimierten und ausgewuchteten Flyer können im Vergleich hierzu oft höhere Wickeldrehzahlen erreicht werden, wodurch eine deutlich effizientere Fertigung möglich wird. Ein wesentlicher Nachteil des Flyerwickelns besteht darin, dass der Draht während der Verarbeitung ständig um seine Längsachse verdreht wird [62]. Dies und die im Vergleich zum Rotationswickeln schlechtere Drahtführung bewirken außerdem, dass mit dem Flyerwickeln keine exakte Drahtpositionierung möglich ist [142]. Weiterer Nachteil des Flyerwickelns ist es, dass zur Formung der Wicklung beziehungsweise zur Führung des Drahtes Führungsbacken notwendig sind, die speziell für jeden Wicklungstyp mit hohem Zeitaufwand angefertigt werden müssen.

### 2.2.3 Ringkernwickeln

Wickeltechnische Produkte mit geschlossenem, ringförmigem Kern (siehe Bild 13 links) haben gegenüber Kernformen mit Luftspalt im Kernaufbau spezifische Vorteile, insbesondere bezüglich Wirkungsgrad, Leistungsdichte und magnetischer Flussdichte [48][57][137]. Die Fertigung dieser Induktivitäten, die auch unter der Bezeichnung Toroidspulen bekannt sind, kann nach [67] auf drei Arten erfolgen:

Bei der manuellen Bewicklung des Ringkerns wird der Draht direkt per Hand oder mit einem Hilfswerkzeug, wie einer Nadel oder einem Magazin vergleichbar mit einem Schiffchen beim Weben, geführt. Besonders geeignet ist das Verfahren für die Bewicklung kleinster Ringkerne auch mit feinsten Drähten oder zur Erzielung höchster Füllfaktoren, da der Draht bis zur vollständigen Füllung der Ringkernbohrung verarbeitet werden kann. Die manuelle Bewicklung von Ringkernen ist wegen der hohen Prozesszeiten für größere Stückzahlen heute nur in Niedriglohnländern von Bedeutung [68].

Beim Hakenwickeln erfolgt die Drahtführung durch die Ringkernbohrung mittels eines oszillierenden Hakens der den Draht durch den in einer Dreipunkt Rollenauflage drehbar gespannten Ringkern zieht. Hierzu wird nach dem Festlegen des Drahtes am Spulenkörper das freie Drahtende in den ausgefahrenen Haken eingelegt. Durch Betätigen eines Fußschalters wird der Haken durch einen Pneumatikzylinder eingefahren und so der Draht durch die Ringkernbohrung gezogen. Auf der Unterseite der Aufspannung wird der Draht anschließend vom Maschinenbediener aus dem Haken gezogen, um den Ringkern geführt und in den wieder in den oberen Umkehrpunkt gefahrenen Haken eingelegt. Eingesetzt wird das Hakenwickeln insbesondere bei der Verarbeitung großer Drahtdurchmesser und wegen der geringen Prozessgeschwindigkeit bei kleinen Windungszahlen.

Die gebräuchlichste Methode für das Wickeln von Ringkernspulen ist die mittels eines rotierenden Drahtspeichermagazins, das für das Einfädeln des Ringkerns in das Magazin teilbar ausgeführt ist. Die Bewicklung des Ringkerns wird in zwei Phasen unterteilt. In der Vorbereitungsphase wird der Ringkern bei geöffnetem Magazin in eine Dreipunkt-Rollenauflage eingespannt (siehe Bild 13). Diese dient zum einen der Positionierung des Ringkerns relativ zum Drahtspeicher-Magazin als auch zur Erzeugung der

rotativen Vorschubbewegung des Ringkerns. Nach dem Schließen wird der Wickeldraht am Grund des U-förmigen Magazins fixiert und durch Rotation die erforderliche Drahtmenge von der Vorratsspule in das Magazin eingezogen. Nach vollständiger Befüllung wird der Draht zwischen Vorratsrolle und Magazin getrennt und das freie Drahtende am Ringkern fixiert. In der anschließenden Wickelphase wird der Draht wieder aus dem rotierenden Magazin herausgezogen und auf dem Ringkern abgelegt, wobei der Abstand zwischen den einzelnen Windungen von der Vorschubgeschwindigkeit der Dreipunkt-Rollenaufgabe bestimmt wird.

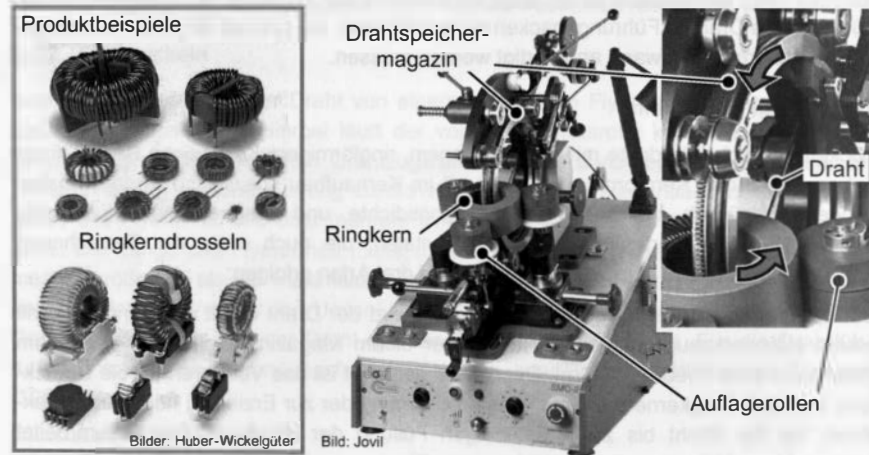


Bild 13: Produktbeispiele für das Ringkernwickeln (links); Verfahrensprinzip des Ringkernwickelns (rechts)

Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Methoden hohen Wickelgeschwindigkeit hat sich das Wickeln mit Magazin in der Ringkernspulenfertigung durchgesetzt. Bis auf wenige Handgriffe zu Beschickung und Festlegung von Leiterenden, verläuft der Prozess ohne manuelle Eingriffe. Grenzen ergeben sich bei sehr kleinen Kernbohrungen und Drähten sowie bei sehr geringen Windungszahlen, da hier die nicht wertschöpfenden Prozessschritte gegenüber dem eigentlichen Wickelprozess überwiegen. [53]

#### 2.2.4 Nadelwickeln

Die Bewicklung von Statorn oder Rotoren von Elektromotoren ist bei Einsatz herkömmlicher Verfahren mit einem hohen Aufwand an manueller Arbeit und produktspezifischen Werkzeugen verbunden. So müssen für das Einbringen der Wicklungen in Statorn komplexe Einziehwerkzeuge gefertigt werden. Daneben macht das Schalten der einzelnen Statorwicklungen oftmals zusätzliche manuelle Fertigungsschritte erforderlich. Daher erfolgt in jüngster Zeit die Bewicklung von Stator- oder Rotorblechpaketen zunehmend nach dem Nadelwickelverfahren.

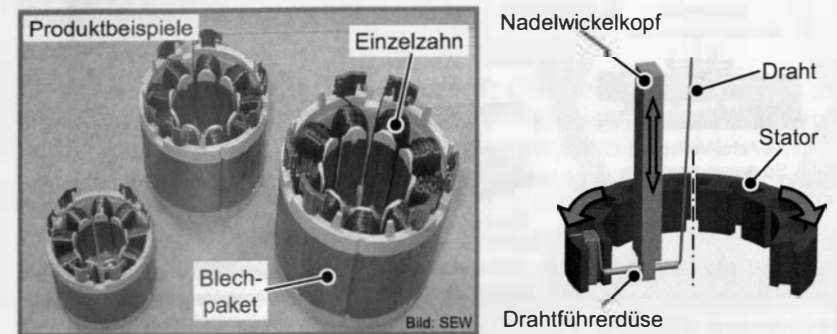


Bild 14: Mit dem Nadelwickelverfahren direkt bewickelte Statorn (links); Verfahrensprinzip des Nadelwickelns (rechts)

Beim Nadelwickeln erfolgt die Drahtverlegung durch einen Nadelwickelkopf an dessen Ende sich eine Drahtführerdüse befindet. Aus dieser wird, wie in Bild 14 dargestellt, der Draht im 90°-Winkel abgezogen. Zur Bewicklung wird die Nadel in einer oszillierenden Bewegung um die zu bewickelnde Nut bewegt. Hierzu durchfährt die Nadel in einer ersten Hubbewegung die Nut bis sie auf der gegenüberliegenden Seite wieder aus der Nut austritt. Anschließend wird das in einer drehbaren Aufspannung fixierte Blechpaket entsprechend der Breite eines Einzelzahnes oder der gewünschten Sehnung gedreht und die Nadel in einer Reversierbewegung wieder auf die Startseite zurückgeführt. Nach dem Zurückschwenken des Blechpakets in die Ausgangsposition ist eine Windung fertig gewickelt. Dieser Bewegungsablauf wird bis zum Erreichen der gewünschten Windungszahl wiederholt. Für die Fertigung von gesehten Wicklungen mit dem Nadelwickelverfahren sind an den Stirnseiten des Stators sogenannte Deckscheiben mit Drahtführungselementen erforderlich. Um diese wird der Draht während der Rotationsbewegung des Stators gelegt und so ein Abgleiten verhindert. Neben einer dauerhaften Fixierung des Drahts wird durch die Deckscheiben der stirnseitige Zugang zu den Statornuten für die Drahtführerdüse freigehalten und so das Wickeln der nachfolgenden Spulen ermöglicht.

#### 2.2.5 Systemlösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

Die Charakterisierung von Wickelmaschinen kann neben der Unterteilung nach dem Wickelverfahren auch nach dem realisierten Automatisierungsgrad erfolgen. Infolge des hohen Variantenreichtums sowie den unterschiedlichen Stückzahlenanforderungen werden auf dem Markt verschiedene Maschinenkonzepte angeboten, die in drei Gruppen eingeordnet werden können. Stellvertretend für die verschiedenen Wickelverfahren, erfolgt dies nachfolgend am Beispiel von Maschinen für das Linearwickeln [19].



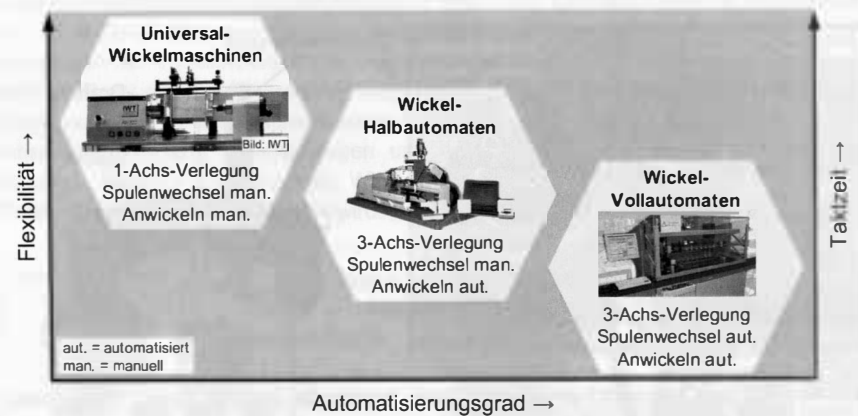


Bild 15: Einteilung der Automatisierungsgrade von Wickelmaschinen hinsichtlich Flexibilität und Taktzeit

Für die Fertigung kleiner Losgrößen und Stückzahlen werden manuell beschickte **Universal-Wickelmaschinen** eingesetzt. Die Maschine besteht hierbei aus der Wickelspindel sowie der Verlegeachse für die Positionierung des Drahtführers. Außer dem eigentlichen Wickelprozess müssen alle weiteren Prozessschritte vom Maschinenpersonal ausgeführt werden. Hierzu zählen unter anderem das Aufspannen des leeren Spulenkörpers, das Anwickeln des Drahtes an den Anschlusspins zu Beginn und am Ende des Wickelprozess, das Verlegen des Drahtes in die und aus der Wickelkammer, der Start des Wickelprozesses sowie die Entnahme der fertigen Spule. Oftmals erfolgt auch die Prozessüberwachung, beispielsweise auf Drahtbruch, durch das Maschinenpersonal.

Die zweite Maschinengruppe bilden die so genannten **Wickel-Halbautomaten**, welche für die Herstellung von Mittelserien-Produkten eingesetzt werden. Bei diesem Maschinentyp ist zur Steigerung des Automatisierungsgrads die Drahtverlegung als kartesisches Achssystem aus drei Linearachsen aufgebaut, wodurch eine Drahtführung in allen drei Raumachsen ermöglicht wird. Neben Anwickelvorgängen können hierdurch die Verlegeoperationen am Spulenkörper automatisch erfolgen [12]. Durch die Integration von Draht-Halte-, sog. Parkierstifte, und Draht-Schneide-Einrichtungen ist eine vollständige Automatisierung, mit Ausnahme der Bauteilbeschickung, möglich.

Den höchsten Automatisierungsgrad stellen die **Wickel-Vollautomaten** dar, die für die Fertigung großer Losgrößen und Stückzahlen eingesetzt werden (siehe Bild 15). Neben der Automatisierung des Werkstückhandlings durch produktspezifische Spulenträger sowie Be- und Entladeachsen werden Wickelvollautomaten durch Transfersysteme an vor- und nachgelagerte Prozessmodule (Pins Einschließen, Löten, Prüfen etc.) angekopelt. Zur Steigerung der Ausbringungsleistung werden Wickelvollautomaten oftmals als Mehrspindelautomaten mit bis zu 16 parallelen Wickelspindeln ausgeführt. Die vom

Bedienpersonal auszuführenden Tätigkeiten beschränken sich, abgesehen von der Störungsbehebung, lediglich auf die Sicherstellung der Draht- und Spulenkörperversorgung.

Die Erstellung der Wickelprogramme erfolgt bei aktuell erhältlichen Maschinen zumeist in Form von vordefinierten Programmbausteinen die entsprechend dem zu fertigenden Produkt zusammengefügt und parametrieren werden. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad steigen auch die Anforderungen an die Maschinenprogrammierung und damit die Maschinenstillstandszeiten bei Einführung eines neuen Produkts. Bei Tischwickelmaschinen beschränken sich die erforderlichen Parameter im Allgemeinen auf linken und rechten Wendepunkt, Windungszahl, Wickeldrehzahl und Vorschub. Bei Halbautomaten gestaltet sich die Programmerstellung hingegen deutlich komplexer, da für die Verlegebewegungen sowie die Anwickelvorgänge die Ermittlung der Koordinaten für das dreiaxiale Verlegesystem erforderlich ist. Dies erfolgt üblicherweise im Teach-In-Verfahren, bei dem die einzelnen Drahtführerpositionen schrittweise mit einem Bedienpanel angefahren und in das Programm übernommen werden [22]. Bei Wickelvollautomaten erhöht sich der Aufwand noch um die Verfahrbewegungen der Handlingsachsen, welche wie die Drahtverlegung, aus bis zu drei NC-Achsen bestehen kann. [151][153]

Die Beschreibung des Anteils des in den Wickelraum eingebrachten Kupfers erfolgt mit dem Kupfer-Füllfaktor  $k_{Cu}$ . Dieser ist nach [153] definiert als:

$$k_{Cu} = \frac{A_{Cu} \cdot N}{BK \cdot HK} = \frac{\frac{1}{4} \pi \cdot d_{Cu}^2 \cdot N}{BK \cdot HK} \quad (3.2)$$

mit Kupfer-Füllfaktor  $k_{Cu}$  in %

Das Verhältnis von Querschnittsfläche des Kupferleiters zur Querschnittsfläche der Isolation wird vom Durchmesser des Kupferleiters bestimmt. Je größer der Leiterdurchmesser ist, desto geringer ist der Anteil der Isolationsschicht am Gesamtquerschnitt, wie in Bild 16 anhand von drei Beispieldrähten dargestellt ist [120]. Hieraus folgt, dass der theoretisch maximal erreichbare Kupfer-Füllfaktor mit steigendem Drahtdurchmesser zunimmt.

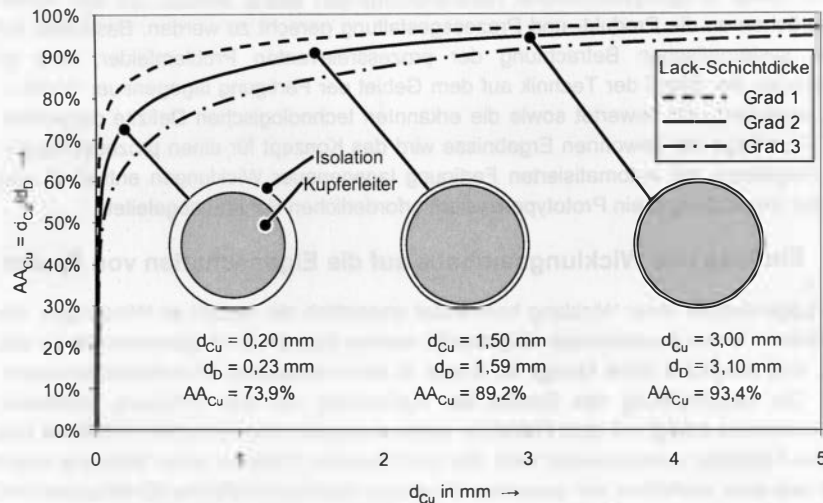


Bild 16: Anteil der Leiterquerschnittsfläche am Gesamtquerschnitt in Abhängigkeit des Leiterdurchmessers und der Schichtdicke des Isolationslacks

Der Füllfaktor einer Spule wird vom Aufbau der Wicklung bestimmt. Bei sogenannten „Wildwicklungen“ liegen die einzelnen Windungen ungleichmäßig neben und übereinander, wodurch es zu Überkreuzungen und Hohlräumen im Wicklungsaufbau kommen kann. Der erreichbare mechanische Füllfaktor liegt in einem Bereich von 65 bis 75% [153]. Bei „lagegenauen“ Wicklungen bilden die Windungen einen lückenfreien Aufbau, vergleichbar mit der Struktur von Honigwaben. Voraussetzung hierfür ist, dass die einzelnen Windungen nebeneinander, weitestgehend parallel zu den Flanschen des Spulenkörpers verlaufen und sich die Windungen einer Lage in die Rillen zwischen den Drähten der vorherigen Lage einfügen. Die Windungen einer Lage verlaufen auf einer zur Mittelachse des Spulenkörpers koaxialen Zylinderfläche. Aus den geometrischen

Verhältnissen ergibt sich für lagegenaue Wicklungen ein mechanischer Füllfaktor von 90,7%. In Bild 17 sind zusammenfassend die Gleichungen zur Bestimmung des mechanischen Füllfaktors der beiden Wicklungsarten dargestellt. Unter Berücksichtigung des in Bild 16 dargestellten Zusammenhangs, reduzieren sich die angegebenen Werte entsprechend des Drahtdurchmesser und des Isolations-Grades.

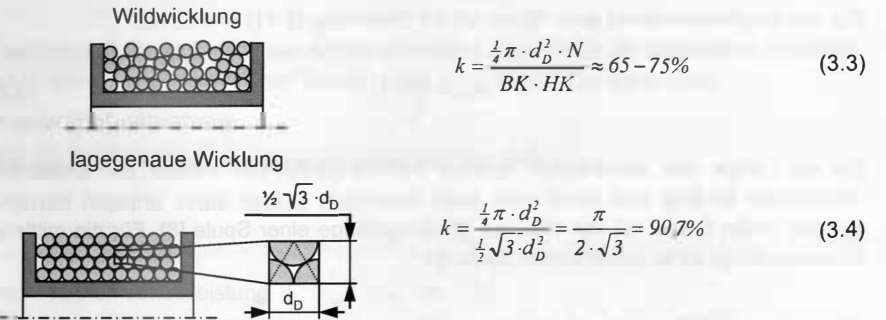


Bild 17: Abhängigkeit des Füllfaktors vom Wickellagenaufbau [153]

Infolge des ungeordneten Wicklungsaufbaus bei wildgewickelten Spulen werden im Allgemeinen nur geringe Füllfaktoren erreicht, wobei die Streuung des Füllfaktors und damit des Spulenwiderstandes relativ groß ist. Daneben können durch Freiräume im Wicklungsaufbau einzelne Windungen in weiter unten liegende Lagen abrutschen, wodurch die Gefahr von Spannungsdurchschlägen wegen der höheren Potenzialdifferenz steigt [15][30][34]. Durch den geordneten Aufbau lagegenauer Wicklungen können hingegen deutlich höhere Qualitätsanforderungen eingehalten werden. Infolge des hohen Füllfaktors wird eine optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Wickelraumes erreicht. Des Weiteren sind durch den exakten Wicklungsaufbau gleichbleibende elektrische und elektromagnetische Eigenschaften sichergestellt, da die Länge des verwickelten Drahtes in engen Grenzen gehalten werden kann. Darüber hinaus wird durch den kompakten Aufbau eine höhere mechanische Stabilität erreicht und die Wärmeleitung durch einen geringeren Anteil an Freiräumen positiv beeinflusst. [131]

Wicklungsart	Wildwicklung	lagegenaue Wicklung
Querschnitt		
mech. Füllfaktor	0,65 – 0,75	~ 0,91
el. Eigenschaften	schwankend	konstant
Wärmeleitung	schlecht	gut
mech. Stabilität	gering	hoch

Tabelle 2: Qualitativer Vergleich alternativer Wicklungsformen [15]

Neben qualitativen Vorteilen bietet der höhere Füllfaktor bei lagegenauen Wicklungen auch quantitative Vorteile. Dies wird nachfolgend anhand einer Betrachtung der Kennwerte Kupferwiderstand, Kupfer-Verlustleistung, Wicklungsvolumen und Kupfer-Kosten einer Spule in Abhängigkeit des Kupfer-Füllfaktors dargelegt.

**Kupferwiderstand**

Für den Kupferwiderstand einer Spule gilt mit Gleichung (2.11) und (2.12):

$$R_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{Cu}} \cdot l_{Cu} \tag{3.5}$$

Da die Länge des verwickelten Drahtes vom tatsächlichen Verlauf der einzelnen Windungen abhängt und somit nicht exakt berechnet werden kann, erfolgen Berechnungen in der Praxis mit der mittleren Windungslänge einer Spule [8]. Für die mittlere Windungslänge einer zylindrischen Spule gilt:

$$l_m = \pi \cdot \left( d_{Spk} + \left( 2 \cdot \frac{h_W}{2} \right) \right) = \pi \cdot (d_{Spk} + h_W) \\ = \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_W}{BK} \right) \tag{3.6}$$

mit	mittlere Windungslänge	$l_m$	in	mm
	Durchmesser- Spulenkörper	$d_{Spk}$	in	mm
	Wicklungshöhe	$h_W$	in	mm
	Wicklungsquerschnitt	$A_W$	in	mm <sup>2</sup>

Für die weitere Betrachtung soll gelten, dass der Füllfaktor bezogen auf die Fläche aus Wicklungshöhe  $h_W$  und Kammerbreite  $BK$  bestimmt wird, wie in [44] definiert. Unter dieser Voraussetzung, ergibt sich durch Umstellen von Gleichung (3.2) nach dem Wicklungsquerschnitt für die mittlerer Windungslänge:

$$l_m = \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{\frac{A_{Cu} \cdot N}{k_{Cu}} \text{ aus Gl. (3.2)}}{BK} \right) = \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{Cu} \cdot N}{BK \cdot k_{Cu}} \right) = \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{WCu}}{BK \cdot k_{Cu}} \right) \tag{3.7}$$

mit	Kupferquerschnitt der Wicklung	$A_{WCu}$	in	mm <sup>2</sup>
-----	-----------------------------------	-----------	----	-----------------

Somit lässt sich der Kupferwiderstand einer zylindrischen Spule in Abhängigkeit des Kupfer-Füllfaktors beschreiben mit:

$$R_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{Cu}} \cdot N \cdot \underbrace{\pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{WCu}}{BK \cdot k_{Cu}} \right)}_{= N \cdot l_m = l_{Cu}} \tag{3.8}$$

Gleichung (3.8) zeigt, dass der Kupferwiderstand einer Spule mit steigendem Füllfaktor sinkt, wobei die geometrischen Spulenmaße den Einflussgrad bestimmen.

**Kupfer-Verlustleistung**

Für die Kupfer-Verlustleistung einer Spule gilt nach [44]:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R_{Cu} \tag{3.9}$$

mit Kupfer-Verlustleistung  $P_{Cu}$  in W

Mit der in Gleichung (3.8) dargestellten Abhängigkeit des Kupferwiderstandes vom Füllfaktor kann auch die Kupfer-Verlustleistung einer zylindrischen Spule in dessen Abhängigkeit dargestellt werden. Es gilt:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot \frac{\rho_{Cu}}{A_{Cu}} \cdot N \cdot \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{WCu}}{BK \cdot k_{Cu}} \right) \tag{3.10}$$

Hieraus wird deutlich, dass die Kupfer-Verlustleistung einer Spule, eine konstante Stromstärke vorausgesetzt, mit steigendem Füllfaktor sinkt.

**Wicklungsvolumen**

Das Volumen einer Wicklung ergibt sich aus dem Volumen des verwickelten Drahtes und den Hohlräumen in der Wicklung. Für eine Zylinderspule gilt:

$$V_W = V_{ges} - V_{Spk} = \left( \frac{1}{4} \pi \cdot (d_{Spk} + 2h_W)^2 \cdot BK \right) - \left( \frac{1}{4} \pi \cdot d_{Spk}^2 \cdot BK \right) \\ = \frac{1}{4} \pi \cdot BK \cdot \left( (d_{Spk} + 2h_W)^2 - d_{Spk}^2 \right) \\ = \frac{1}{4} \pi \cdot BK \cdot (d_{Spk}^2 + 4d_{Spk}h_W + 4h_W^2 - d_{Spk}^2) \\ = \frac{1}{4} \pi \cdot BK \cdot (4d_{Spk}h_W + 4h_W^2) \\ = \pi \cdot BK \cdot (d_{Spk}h_W + h_W^2) \tag{3.11}$$

mit	Volumen Wicklung	$V_W$	in	mm <sup>3</sup>
mit	Gesamtvolumen	$V_{ges}$	in	mm <sup>3</sup>
mit	Volumen Spulenkörper	$V_{Spk}$	in	mm <sup>3</sup>

Mit Gleichung (3.2) und unter der Randbedingung  $h_W = HK$  beläuft sich das Volumen einer zylindrischen Wicklung in Abhängigkeit des Füllfaktors zu:

$$\begin{aligned} V_W &= \pi \cdot BK \cdot \left( d_{Spk} \cdot \frac{A_{Cu} \cdot N}{BK \cdot k_{Cu}} + \left( \frac{A_{Cu} \cdot N}{BK \cdot k_{Cu}} \right)^2 \right) \\ &= \pi \cdot BK \cdot \left( d_{Spk} \cdot \frac{A_{Cu} \cdot N}{BK \cdot k_{Cu}} + \frac{A_{Cu}^2 \cdot N^2}{BK^2 \cdot k_{Cu}^2} \right) \\ &= \pi \cdot \left( \frac{d_{Spk} \cdot A_{Cu} \cdot N}{k_{Cu}} + \frac{A_{Cu}^2 \cdot N^2}{BK \cdot k_{Cu}^2} \right) \\ &= \pi \cdot \left( \frac{d_{Spk} \cdot A_{WCu}}{k_{Cu}} + \frac{A_{WCu}^2}{BK \cdot k_{Cu}^2} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Somit sinkt das Volumen einer Wicklung, bei sonst gleichen Randbedingungen, mit dem Füllfaktor, wobei dieser quadratisch in die Berechnung eingeht.

#### Kupfer-Kosten

Um die Kosten für das in einer Spule verwickelte Kupfer zu bestimmen, muss zunächst die Masse des in der Spule verwickelten Kupfers berechnet werden [152]. Für diese gilt:

$$\begin{aligned} m_{Cu} &= \rho_{mCu} \cdot V_{Cu} = \rho_{mCu} \cdot \frac{N \cdot A_{Cu} \cdot l_m}{V_{Cu}} \\ &= \rho_{mCu} \cdot N \cdot A_{Cu} \cdot \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{WCu}}{BK \cdot k_{Cu}} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

mit Masse Kupfer  $m_{Cu}$  in kg  
Dichte Kupfer  $\rho_{mCu} = 8,9 \text{ kg}$   
Volumen Kupfer  $V_{Cu}$  in  $\text{mm}^3$

Für die Kosten des in einer Spule verwickelten Kupfers gilt somit [152]:

$$K_{O_{Cu}} = Pr_{Cu} \cdot m_{Cu} = Pr_{Cu} \cdot \rho_{mCu} \cdot N \cdot A_{Cu} \cdot \pi \cdot \left( d_{Spk} + \frac{A_{WCu}}{BK \cdot k_{Cu}} \right) \quad (3.14)$$

mit Kosten Kupfer  $K_{O_{Cu}}$  in €  
Preis Kupferlackdraht  $Pr_{Cu}$  in €/kg

Hieraus folgt, dass durch eine Verbesserung des Füllfaktors auch die Kupfer-Kosten einer Spule positiv beeinflusst werden.

Die dargelegten Zusammenhänge werden im Weiteren anhand eines Beispiels und mit Hilfe einer Vergleichsrechnung verdeutlicht. Hierbei wird eine wildgewickelte Spule (Spule 1) mit einer lagegenau gewickelten Spule (Spule 2) unter Berücksichtigung der in Tabelle 3 zusammengefassten Randbedingungen verglichen.

Randbedingung	Wert
$N$	= 3000
$I$	= 0,2 A
$A_{Cu}$	= 0,0314 $\text{mm}^2$ (für $d_{Cu} = 0,2 \text{ mm}$ )
$d_{Spk}$	= 10 mm
$BK$	= 20 mm
$Pr_{Cu}$	= 19,5 €/kg (für $d_{Cu} = 0,2 \text{ mm}$ , Grad1) [87][96]

Tabelle 3: Randbedingungen für die Vergleichsrechnung „Wicklungsaufbau“

Mit den Gleichungen (3.8), (3.10), (3.12) und (3.14) ergibt sich unter den in Tabelle 3 angegebenen Randbedingungen für die betrachteten Spulen:

Spule	Spule 1	Spule 2	
Wicklungsaufbau	Wildwicklung	lagegenaue Wicklung	
Kupfer-Füllfaktor $k_{Cu}$	52%*	75%**	Ratiopotential
Kupferwiderstand	102 $\Omega$	87 $\Omega$	14,6%
Kupfer-Verlustleistung	4,08 W	3,49 W	14,6%
Wicklungsvolumen	10.840 $\text{mm}^2$	6.421 $\text{mm}^2$	40,8%
Kupfer-Kosten	0,98 €	0,84 €	14,6%

\* (nach [8] bei  $d_{Cu} = 0,2 \text{ mm}$ )

\*\* 91% · 83%

siehe Gl. (3.4) ↑ ↑  $A_{Cu}$  nach [120] für Grad1

Tabelle 4: Ergebnisse der Vergleichsrechnung „Wicklungsaufbau“

Das dargestellte Beispiel zeigt deutlich die Vorzüge einer lagegenauen Wicklung gegenüber einer Wildwicklung. Neben etwa 15% geringeren Werten bei Kupferwiderstand, Verlustleistung und Kupferkosten, kann mit einem lagegenauen Wicklungsaufbau insbesondere das Wicklungsvolumen reduziert werden, was vor dem Hintergrund des Trends zur Miniaturisierung von besonderer Bedeutung ist. Im vorliegenden Beispiel ist mit einer lagegenauen Wicklung ein um etwa 41% geringeres Volumen realisierbar.

### 3.2 Randbedingungen für die Fertigung lagegenauer Wicklungen

Die Fertigung lagegenauer Wicklungen stellt hohe Ansprüche an die Produkt- und Prozessgestaltung. Insbesondere die Fertigung der ersten Wicklungslage ist von entscheidender Bedeutung, da die Rillen, die sich zwischen den einzelnen Windungen ausbilden, als Führung für die jeweilige nachfolgende Lage dienen. Um einen Spreiz zwischen den Windungen der ersten Lage zu vermeiden, darf sich der Drahtführer in Wickelrichtung nicht vor dem Wickelort (Punkt an dem der unverarbeitete Draht auf den Spulenkörper aufläuft) befinden. Vielmehr ist es für einen lückenfreien Wicklungsaufbau erforderlich, dass der Drahtführer hinter dem Wickelort hereilt. [131]. Zur Quantifizierung dieses Sachverhalts wird der Nachlaufwinkel definiert. Dieser entspricht, wie in Bild 18



dargestellt, dem Winkel zwischen der Strecke  $\overline{AB}$ , die den Abstand des Drahtführers zur Wickelachse beschreibt, und der Strecke  $\overline{AC}$ , die der Strecke zwischen Drahtführer und Wickelort entspricht. Hierbei soll der Nachlaufwinkel als „positiv“ bezeichnet werden, wenn der Drahtführer dem Wickelort naheilt, „negativ“, wenn der Drahtführer dem Wickelort vorausleilt.

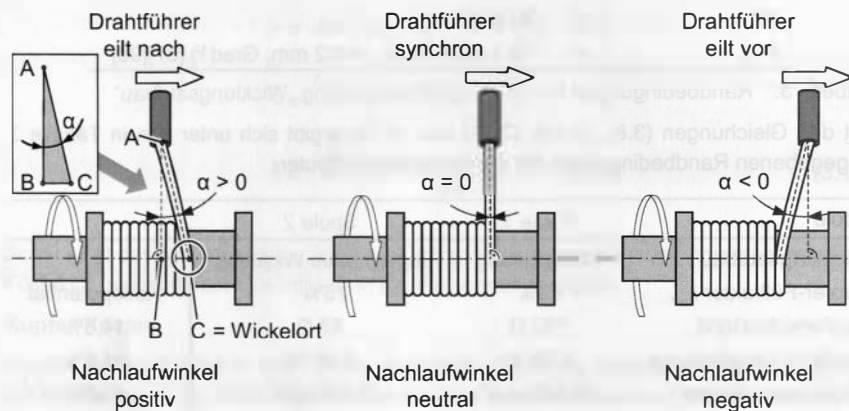


Bild 18: Definition des Nachlaufwinkels

Der Nachlaufwinkel hat entscheidenden Einfluss auf den Aufbau einer Wicklung. Für einen kompakten Wicklungsaufbau mit eng aneinander liegenden Windungen ist ein um wenige Grad nachlaufender Drahtführer vorteilhaft. Durch den positiven Nachlaufwinkel werden die Windungen gegeneinander verspannt und die Entstehung von Lücken zwischen den Windungen verhindert. Bei Überschreiten des maximalen positiven Nachlaufwinkels, läuft der Draht auf die bereits gewickelten Windungen auf und ein lagegenauer Wicklungsaufbau ist nicht mehr möglich. Eilt der Drahtführer dem Wickelort hingegen zu weit vor (Überschreiten des maximal negativen Nachlaufwinkels), ergibt sich ein gespreizter Wicklungsaufbau.

Somit wird deutlich, dass, um einen lagegenauen Wicklungsaufbau zu erreichen, der Nachlaufwinkel während des gesamten Prozessverlaufes innerhalb eines Bereiches zwischen  $0^\circ$ , Drahtführer steht senkrecht über Wickelort, und dem maximalen positiven Nachlaufwinkel gehalten werden muss. Haupteinflussparameter für die Bestimmung des Nachlaufwinkels sind der Drahtdurchmesser und der Spulenkörperdurchmesser [58]. Mit dem Ziel diesen Zusammenhang zu quantifizieren, werden nachfolgend, in Ergänzung zu den in [153] aufgeführten Ergebnissen (mit x in den Diagrammen in Bild 19 gekennzeichnet), systematische Untersuchungen mit ausgewählten Draht- und Spulenkörperdurchmessern durchgeführt. Auf Grundlage der gewonnenen Messergebnisse erfolgt anschließend die Ableitung eines mathematischen Modells zur Berechnung des maximalen positiven Nachlaufwinkels in Abhängigkeit des Draht- und des Spulenkörperdurchmessers.

In den Messungen werden Versuchsspulenkörper bei stehendem Drahtführer solange bewickelt, bis sich der Draht vom Spulenkörperumfang abhebt und auf die bereits gewickelten Lagen ablegt. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Messergebnisse, erfolgt die Verarbeitung der Drähte mit der jeweils zulässigen Drahtzugkraft  $F_{DSoll, d_D}^1$  [113]. In Bild 19 sind die Ergebnisse der durchgeführten Messungen dargestellt.

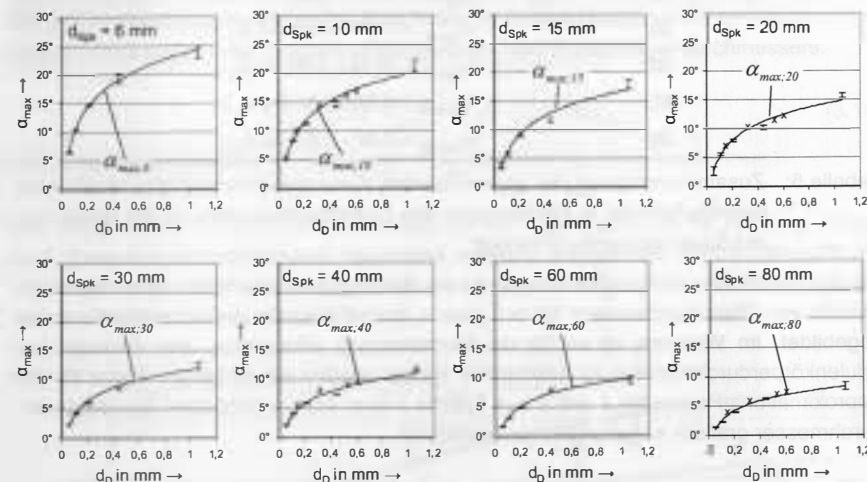


Bild 19: Maximaler Nachlaufwinkel in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers für ausgewählte Spulenkörperdurchmesser

Ziel des ersten Schritts der Modellbildung ist es, den Verlauf der Messergebnisse für jeden betrachteten Spulenkörperdurchmesser einzeln durch eine Kurvenfunktion zu beschreiben. Hierzu werden mit Hilfe des Analyseprogramms Diadem die Daten mit einer In-Funktion der Form

$$\alpha_{max, d_{Spk}} = A + B \cdot \ln(d_D) \tag{3.15}$$

mit maximaler positiver Nachlaufwinkel für Spulenkörperdurchmesser  $d_{Spk}$  in mm  
 Approximations-Parameter  $A, B$  in  $^\circ$

approximiert [11]. Die In-Funktion wird für die Approximation ausgewählt, da mit dieser, im Vergleich zu anderen Funktionstypen (bsp. Wurzelfunktion), im vorliegenden Auswertefall die besten Übereinstimmungen erzielt werden können. Für die einzelnen Approximationskurven ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengefassten Gleichungen.

<sup>1</sup>  $F_{DSoll, 0,055 \text{ mm}} = 0,3 \text{ N}$ ;  $F_{DSoll, 0,1 \text{ mm}} = 0,8 \text{ N}$ ;  $F_{DSoll, 0,21 \text{ mm}} = 3,0 \text{ N}$ ;  $F_{DSoll, 0,4 \text{ mm}} = 8,5 \text{ N}$ ;  $F_{DSoll, 1,05 \text{ mm}} = 49,1 \text{ N}$  (siehe [113])

$d_{Spk}$ in mm	Kurvengleichung für $\alpha_{max;d_{Spk}}$
6	$\alpha_{max,6} = 23,98 + 5,97 \cdot \ln(d_D)$
10	$\alpha_{max,10} = 19,88 + 5,20 \cdot \ln(d_D)$
15	$\alpha_{max,15} = 16,66 + 4,65 \cdot \ln(d_D)$
20	$\alpha_{max,20} = 14,57 + 4,12 \cdot \ln(d_D)$
30	$\alpha_{max,30} = 11,89 + 3,41 \cdot \ln(d_D)$
40	$\alpha_{max,40} = 10,72 + 2,99 \cdot \ln(d_D)$
60	$\alpha_{max,60} = 9,71 + 2,84 \cdot \ln(d_D)$
80	$\alpha_{max,80} = 7,98 + 2,47 \cdot \ln(d_D)$

Tabelle 5: Zusammenstellung der approximierten Kurvengleichungen des maximalen Nachlaufwinkels in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers für die betrachteten Spulenkörperdurchmesser

Mit den ermittelten Kurvengleichungen ist die Abhängigkeit des maximalen Nachlaufwinkels vom Drahtdurchmesser für den jeweils betrachteten Spulenkörperdurchmesser abgebildet. Im Weiteren ist es für die Modellbildung erforderlich, den Einfluss des Spulenkörperdurchmessers zu bestimmen. Hierzu werden die einzelnen Werte für die Approximations-Parameter  $A$  und  $B$  aus Tabelle 5 über dem zugehörigen Spulenkörperdurchmesser grafisch aufgetragen (siehe Bild 20).

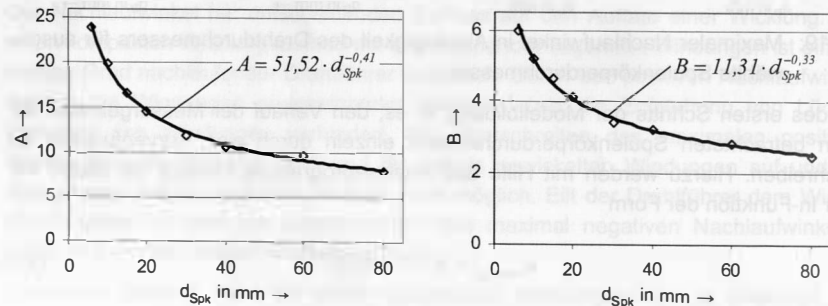


Bild 20: Verlauf der Approximations-Parameter  $A$  und  $B$  in Abhängigkeit des Spulenkörperdurchmessers

Zur Beschreibung der Kurvenverläufe erfolgt die Annäherung der Parameter  $A$  und  $B$  in Diadem jeweils mit einer Potenzfunktion der Form [11]:

$$C = D \cdot d_{Spk}^E \quad (3.16)$$

mit Approximations-Parameter  $C$  in -  
 Approximations-Konstante  $D$  in -  
 Approximations-Exponent  $E$  in -

Hieraus ergeben sich für  $A$  und  $B$  die Gleichungen:

$$A = 51,52 \cdot d_{Spk}^{-0,41} \quad B = 11,31 \cdot d_{Spk}^{-0,33} \quad (3.17), (3.18)$$

mit Approximations-Parameter  $A, B$  in -

Nach Einsetzen der Gleichungen (3.3) und (3.4) in die Gleichung (3.1) ergibt sich somit für das mathematische Modell zur Beschreibung des maximalen positiven Nachlaufwinkels in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers und des Spulenkörperdurchmessers:

$$\alpha_{max} = 51,52 \cdot d_{Spk}^{-0,41} + 11,31 \cdot d_{Spk}^{-0,33} \cdot \ln(d_D) \quad (3.19)$$

mit maximaler positiver Nachlaufwinkel  $\alpha_{max}$  in °

Mit dieser Gleichung kann der Grenzwert für den Nachlaufwinkel für beliebige Draht- und Spulenkörperdurchmesser berechnet werden. Beispielhaft sind in Bild 21 die Verläufe von  $\alpha_{max}$  für Spulenkörperdurchmesser von 6 mm bis 100 mm und Drahtstärken von 0,1 mm bis 1,5 mm dargestellt.

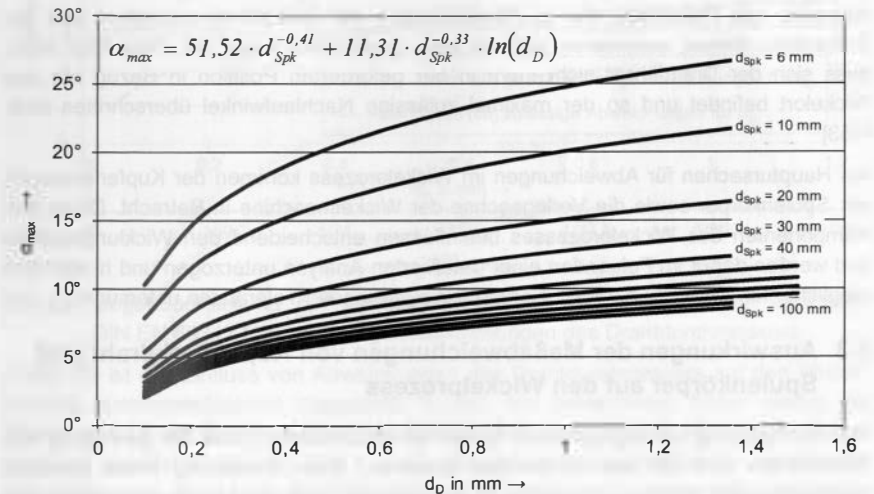


Bild 21: Maximaler positiver Nachlaufwinkel in Abhängigkeit des Draht- und Spulenkörperdurchmessers

Um einen störungsfreien Wicklungsaufbau sicherzustellen, kann im Wickelprozess nicht der maximale positive Nachlaufwinkel zur Prozessführung verwendet werden. Ein Überschreiten würde unmittelbar zu einem Auflaufen der Windung auf die bereits gewickelte Spule führen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass es nach [58] auch unterhalb des maximalen positiven Nachlaufwinkels zu einem gespreizten Wicklungsaufbau kommen kann. Die Ursache besteht darin, dass sich bei zu groß gewähltem Nachlaufwinkel der abgleitende Draht infolge zu starker Überkreuzung mit der letzten

Wicklung, nicht lückenfrei sondern mit Versatz auf dem Spulenkörper ablegt. Um diesen Effekt zu vermeiden und den Einfluss von Abweichungen des Draht- und Spulenkörperdurchmessers auf den maximal zulässigen Nachlaufwinkel zu reduzieren, ist es erforderlich, den mit Gleichung (3.2) berechneten Grenzwert mit einem Sicherheitsfaktor  $S_\alpha$  zu beaufschlagen. Bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchen konnten mit einem Sicherheitsfaktor von 0,4 durchweg gute Wickelerggebnisse erzielt werden, weshalb im Folgenden gelten soll:

$$\alpha_{Soll} = S_\alpha \cdot \alpha_{max} = 0,4 \cdot \alpha_{max} \quad (3.20)$$

mit Soll-Nachlaufwinkel	$\alpha_{Soll}$	in $^\circ$
Nachlaufwinkel-Sicherheitsfaktor	$S_\alpha$	in -

Neben der Einhaltung des zulässigen Nachlaufwinkels ist sicherzustellen, dass der Drahtführer synchron mit dem Draht die Verlegerichtung umkehrt, sobald dieser am Flansch angelangt ist und in die nachfolgende nächste Lage aufsteigt. Darüber hinaus ist ein Überschwingen des Drahtführers an den Flanschen zu vermeiden, da sonst der Draht am Flansch anschlägt und sich Lücken im Wicklungsaufbau ergeben. Toleranzen innerhalb des Prozesses, die zu Abweichungen der Drahtführer-Istposition von der Sollposition führen, summieren sich mit jeder gewickelten Lage auf. Dies führt dazu, dass sich der Drahtführer nicht mehr in der geforderten Position in Bezug auf den Wickelort befindet und so der maximal zulässige Nachlaufwinkel überschritten wird. [153]

Als Hauptursachen für Abweichungen im Wickelprozess kommen der Kupferlackdraht, der Spulenkörper sowie die Verlegeachse der Wickelmaschine in Betracht. Diese drei Komponenten des Wickelprozesses beeinflussen entscheidend den Wicklungsaufbau und werden daher im Folgenden einer detaillierten Analyse unterzogen und hinsichtlich möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der auftretenden Toleranzen untersucht.

### 3.3 Auswirkungen der Maßabweichungen von Kupferlackdraht und Spulenkörper auf den Wickelprozess

Für die Fertigung von lagegenauen Spulen ist entscheidend, dass die Bewegung des Drahtführers und die des Wickelortes synchron, unter Einhaltung eines positiven Nachlaufwinkels erfolgen. Hierzu ist es erforderlich, dass die Maßabweichungen des Drahtes und die des Spulenkörpers innerhalb enger Grenzen liegen. Für die zulässige Abweichung des Drahtdurchmessers gilt nach [99]:

$$\Delta d_D = \pm 0,2 \cdot \frac{d_D}{N_L} = \pm 0,2 \cdot \frac{d_D^2}{BK} \quad (3.21)$$

mit zulässige Abweichung des Drahtdurchmessers	$\Delta d_D$	in mm
Windungen je Lage	$N_L$	in -

Wenngleich für den blanken Kupferdraht fertigungstechnisch enge Toleranzgrenzen von unter 1% des Nenndurchmessers eingehalten werden können, sind bei der den Außendurchmesser bestimmenden Lackschicht, deutlich größere Abweichungen zulässig. Für die nach DIN EN 60317-0-7 [120] genormten Lackdrähte, sind je nach Durchmesser innerhalb einer Vorratsrolle Abweichungen von bis zu 4% erlaubt. Wie Bild 22 beispielsweise für einen Spulenkörper mit einer Kammerbreite von 30 mm deutlich zeigt, sind die nach [99] zulässigen Abweichungen wesentlich enger, als die der am Markt erhältlichen Kupferlackdrähte.

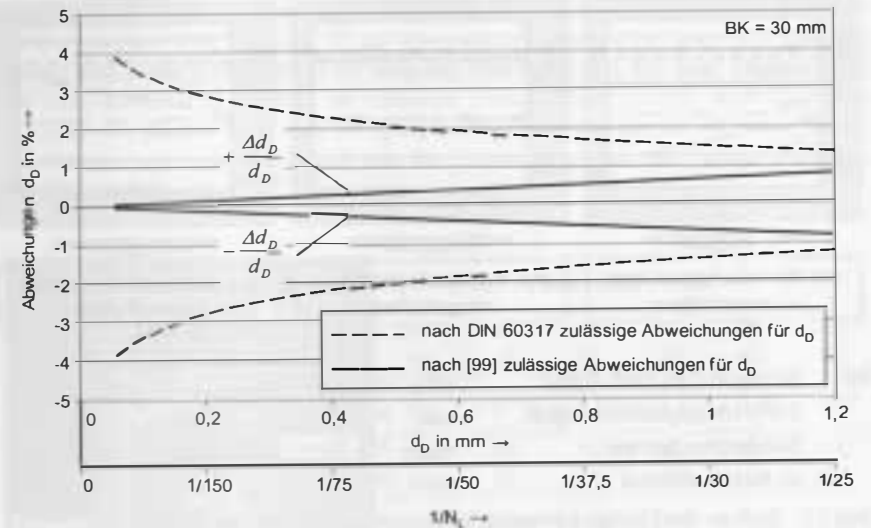
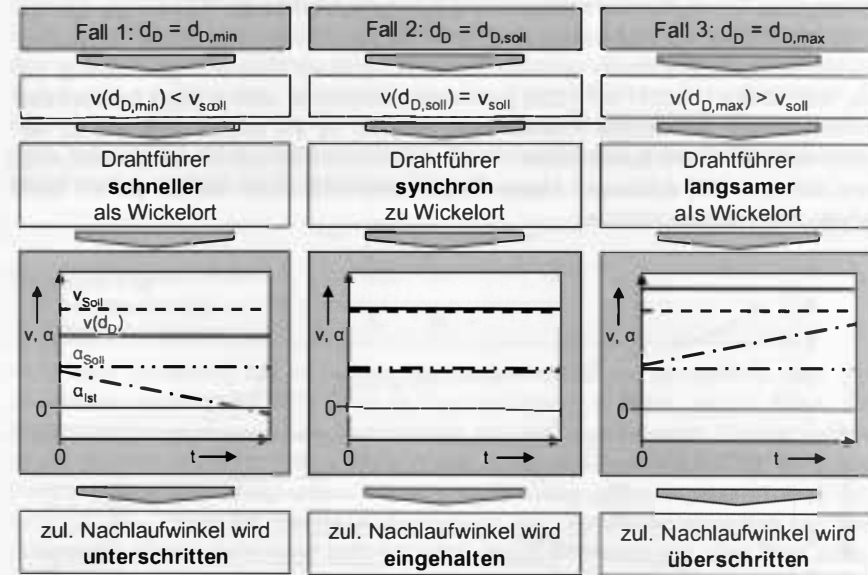


Bild 22: Gegenüberstellung der für das lagegenaue Wickeln nach [99] und nach DIN EN 60317 [120] zulässigen Abweichungen des Drahtdurchmessers

In Bild 23 ist der Einfluss von Abweichungen des Drahtdurchmessers auf den Wickelprozess zusammenfassend dargestellt. In den drei betrachteten Fällen startet der Wickelprozess mit einem, zur Sicherstellung eines lagegenauen Wicklungsaufbaus, positiven Nachlaufwinkel. Im Fall 1 entspricht der Ist-Drahtdurchmesser der unteren Toleranzgrenze. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Wickelortes geringer ist als die des Drahtführers, wodurch der Nachlaufwinkel kontinuierlich abnimmt und schließlich die zulässige Untergrenze des Nachlaufwinkels von  $0^\circ$  überschritten wird. In Folge ergibt sich ein gespreizter Wicklungsaufbau mit Lücken zwischen den einzelnen Windungen. Im Fall 2 entspricht der Ist-Drahtdurchmesser dem programmierten Vorschub des Drahtführers, so dass der anfängliche Nachlaufwinkel im Prozessverlauf konstant bleibt. Im Fall 3 liegt der Drahtdurchmesser an der oberen Toleranzgrenze. Hierdurch eilt der Wickelort dem Drahtführer voraus und der Nachlaufwinkel vergrößert sich so lange, bis die aktuelle Windung auf die bereits gewickelten aufläuft und sich in Folge ein wilder Wicklungsaufbau ergibt.



mit Wickelort-Geschwindigkeit  $v(d_D)$  in m/s  
 Soll-Verlegegeschwindigkeit  $v_{soll}$  in m/s  
 Soll-Nachlaufwinkel  $\alpha_{soll}$  in °  
 Ist-Nachlaufwinkel  $\alpha_{ist}$  in °

Bild 23: Einfluss der Drahtdurchmessertoleranzen auf den Nachlaufwinkel

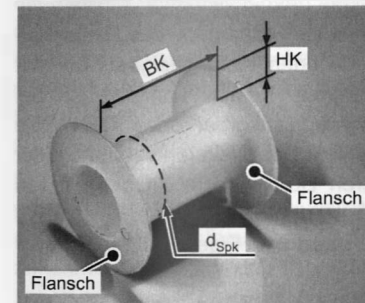
Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Drahtdurchmesserschwan- kungen besteht in einem dem Wickelprozess vorausgehenden Kalibrierprozess, bei dem der Draht durch einen Ziehstein gezogen wird. Der Kalibrier-Durchmesser des hierfür erforderlichen Ziehsteins muss gleich dem kleinsten auftretendem Drahtdurchmesser sein. Nachteil des Kalibrierprozess ist es, dass der überschüssige Lack in den leitenden Querschnitt des Drahtes eingedrückt wird, wodurch es zu stochastisch verteilten Reduzierungen des Drahtquerschnitts kommt, welche wiederum signifikante Schwankungen im Drahtwiderstand verursachen. Darüber hinaus führt das Eindrücken des Lacks zu lokalen plastischen Verformungen des Kupferleiters die eine Verhärtung des Drahts bewirken. Diese erschwert die Verarbeitung des Drahts und kann die Lebensdauer einer Spule reduzieren, da die Verhärtung des kalibrierten Drahts unter wechselnder Kraftbelastung im Betrieb, beispielsweise durch Schwingungen oder thermische Ausdehnungseffekte, schneller zunimmt als bei einem nicht kalibrierten Draht. Dies führt dazu, dass sich die Zeitdauer bis zum Eintreten des Versagens in Folge eines Dauerbruchs gegenüber unkalibriertem Draht reduziert. [99]

Wie der Draht, muss auch die Breite der Wickelkammer des Spulenkörpers engen Toleranzanforderungen genügen. Die Maßabweichung darf nach [99] maximal

$$\Delta BK = 0,2 \cdot d_D \quad (3.22)$$

mit zulässige Abweichung der  $\Delta BK$  in mm  
 Kammerbreite

betragen. Die Einhaltung dieses engen Toleranzfensters stellt eine große Herausfor- derung dar, da die spritzgusstechnisch hergestellten Spulenkörper, insbesondere wenn diese in Mehrfachwerkzeugen gefertigt wurden, eine deutliche Streuung der Kammer- breite aufweisen [15][103]. Die für spritzgegossene Spulenkörper geltenden Maßtole- ranzen sind in der DIN 16901 [116] festgelegt (siehe Bild 24). Bei einer Kammerbreite von beispielsweise 30 mm liegt die zulässige Toleranz bei  $\pm 0,2$  mm. Nach Gleichung (3.22) ist mit diesem Wert eine Fertigung lagegenauer Wicklungen mit einem Draht- durchmesser von unter einem Millimeter bei Einsatz konventioneller Fertigungsproze- se nicht möglich.



		Nennmaß in mm				
über	10	15	22	30	40	
bis	15	22	30	40	53	
$\Delta_{zul}$	$\pm 0,13$	$\pm 0,15$	$\pm 0,17$	$\pm 0,20$	$\pm 0,24$	
über	53	70	90	120	160	
bis	70	90	120	160	200	
$\Delta_{zul}$	$\pm 0,28$	$\pm 0,34$	$\pm 0,41$	$\pm 0,50$	$\pm 0,60$	

Bild 24: Maßtoleranzen für Kunststoff-Formteile nach DIN 16901 [116]

Neben der Kammerbreite ist auch der Durchmesser des Spulenkörpers mit Abweichun- gen behaftet. Hier gelten ebenfalls die in Bild 24 aufgeführten Toleranzbereiche. Auf den Verlauf der Positionierung von Drahtführer zu Wickelort und somit auf den Ist- Nachlaufwinkel haben diese Abweichungen aber keinen direkten Einfluss, da sie sich, im Gegensatz zur Kammerbreite, nicht auf die Umkehrpunkte an den Flanschen aus- wirken. Sie wirken sich jedoch gemäß Gleichung (3.19) auf den maximalen Nachlauf- winkel aus und werden deshalb durch den Sicherheitsfaktor bei der Bestimmung des zulässigen Nachlaufwinkels berücksichtigt.

Die Folgen der sich überlagernden Problemfelder Drahtdurchmesser- und Kammerbrei- tenabweichungen verstärken sich mit der Anzahl der gewickelten Windungen und Lagen, da sich die Abweichungen des Drahtdurchmessers mit der Windungszahl multiplizieren. Dies führt dazu, dass entsprechend mehr ( $d_{D,ist} > d_{D,soll}$ ) oder weniger ( $d_{D,ist} < d_{D,soll}$ ) Wickelraum von den aufgetragenen Windungen verbraucht wird. Das

bedeutet, dass die programmierte Vorschubgeschwindigkeit des Drahtführers nicht mit der des Wickelorts übereinstimmt. Dadurch treten bei Drähten mit einem kleineren Ist-Durchmesser Überkreuzungen und Drahtanhäufungen auf. Größere Ist-Durchmesser verursachen einen gespreizten Wicklungsaufbau der dazu führt, dass einzelne Windungen der nachfolgenden Lagen in die darunter liegenden Lagen abrutschen, wodurch die Hochspannungsfestigkeit der Spule negativ beeinflusst wird. [131]

Für die Fertigung lagegenauer Wicklungen ist eine lückenfreie Positionierung der Windungen der ersten Lage entscheidend, da die Rillen zwischen den Windungen als Führung für die nachfolgenden Lagen dienen. Eine exakte Positionierung kann durch Rillen im Spulenkörpergrund erreicht werden, die einen parallelen Verlauf der Windungen zu den Flanschen sicherstellen. Darüber hinaus können durch die Rillen im Spulenkörpergrund Abweichungen des Drahtdurchmessers ausgeglichen werden. Hierzu wird der Abstand zwischen den Rillen entsprechend der oberen Toleranzgrenze des Drahtdurchmessers ausgeführt, so dass sich die Wicklung, unabhängig vom Drahtdurchmesser, mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit aufbaut. Somit kann die Vorschubgeschwindigkeit der Verlegeachse entsprechend dem Rillenabstand des Spulenkörpers programmiert und ein definierter Nachlaufwinkel eingehalten werden.

Für die flexible Fertigung wickeltechnischer Produkte ist die Präparation des Spulenkörpers mit Rillen insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen nicht geeignet. Die mit produktspezifischen Spritzgusswerkzeugen verbundenen Kosten können nur bei Großserienprodukten gerechtfertigt werden, weshalb Spulenkörper ohne Rillen den Standard in der Klein- und Mittelserienfertigung darstellen. Des Weiteren verursacht der feste Rillenabstand in Verbindung mit Drähten deren Durchmesser an der unteren Toleranzgrenze liegen Hohlräume im Wicklungsaufbau, die zu Nachteilen hinsichtlich Wärmeleitung, mechanischer Stabilität und elektromagnetischen Eigenschaften führen.

### 3.4 Analyse bestehender Systemlösungen für Verlegeachsen

Die dynamischen Eigenschaften und die Positionierpräzision der Verlegeachse einer Linearwickelmaschine sind für die Fertigung lagegenauer Wicklungen von besonderer Bedeutung, da diese entscheidend die Qualität der gewickelten Spule beeinflussen. Fehler in der Positionierung an den Flanschen oder Schwankungen in der Vorschubgeschwindigkeit können eine unsaubere Drahtverlegung verursachen und so einen exakten Lagenaufbau verhindern. Charakteristische Kenngrößen sind hierbei die Positionierunsicherheit  $A$  (mit welcher Unsicherheit wird eine beliebige Achsposition angefahren), die Wiederholpräzision  $R$  (mit welcher Abweichung kann eine Achsposition wiederholt angefahren werden) und die Umkehrspanne  $B$  (entspricht dem Reversierspiel einer Achse).

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes durchgeführt. In Zusammenarbeit mit einem Wickelmaschinenhersteller wurden dabei als Anforderungen an Verlegeachsen für die Fertigung lagegenauer Wicklungen, in Anlehnung an die für Kupferlack-Feindrähte zulässigen Abweichungen nach [120], folgende Zielgrößen festgelegt:

- > Positionierunsicherheit  $A < 25 \mu\text{m}$
- > Wiederholpräzision  $R < 5 \mu\text{m}$
- > Umkehrspanne  $B < 5 \mu\text{m}$

Nachfolgend werden aufbauend auf einer Beschreibung der gängigen Bauformen für Vorschubachsen die relevanten Parameter zu deren Charakterisierung sowie die erforderlichen Messmittel zu Bestimmung erläutert. Anschließend erfolgen die Untersuchung der Verlegeachsen von zwei dem Stand der Technik entsprechenden Wickelmaschinen hinsichtlich der Einhaltung der festgelegten Grenzwerte und eine Bewertung der gewonnenen Messergebnisse<sup>2</sup>.

#### 3.4.1 Ausführungsformen von Vorschubantrieben

Für die Erzeugung einer Linearbewegung mit einem elektrischen Antrieb stehen zwei Prinzipien zur Verfügung. Zum einen der direkte elektrische Linearantrieb und zum anderen die Kombination aus rotativem Motor und Übertragungsgetriebe zur Wandlung der Rotations- in eine Linearbewegung [145]. Konstruktionsbedingt weisen diese alternativen Antriebslösungen spezifische Vor- und Nachteile auf. So bietet der direkte elektrische Linearantrieb aufgrund der geringen bewegten Masse im Allgemeinen besonders gute dynamische Eigenschaften, wie hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei gleichzeitig guter mechanischer Steifigkeit und Regelgüte. Nachteilig ist jedoch, dass die verfügbaren Vorschubkräfte direkt von der Baugröße abhängen. Da der Einsatz eines Getriebes zur Steigerung der Vorschubkraft bei Linearmotoren nicht möglich ist, sind die realisierbaren Kräfte im Vergleich zu rotativen Antrieben deutlich geringer. Daneben werden oftmals die hohen Systemkosten als Argument gegen Antriebssysteme auf Basis von elektrischen Linearantrieben angeführt. Mit zunehmender Verbreitung kann aber von sinkenden Systemkosten und somit von einer zunehmenden Verbreitung ausgegangen werden. [9][56][141][159]

Vorschubantriebe auf Basis rotativer Elektromotoren können bezüglich der Erzeugung der Linearbewegung, abgesehen von zahlreichen Sonderlösungen, in drei Hauptgruppen eingeteilt werden. Die am häufigsten eingesetzte Form basiert auf Gewindespindel-Mutter-Antrieben, bei denen die Drehbewegung des Vorschubmotors entweder direkt oder über ein vorgeschaltetes Getriebe auf eine Gewindespindel übertragen wird. Durch das Gewinde auf der Umfangsfläche der Spindel wird deren Rotationsbewegung in eine Translationsbewegung der aufgesetzten Mutter gewandelt. Hinsichtlich der Spindelart wird zwischen Kugel-Umlauf-, Trapez-, Rollen oder Wälzringspindeln unterschieden. Vorteile des Kugelgewindetriebs sind eine hohe Positionierpräzision sowie die vergleichsweise hohen realisierbaren Vorschübe. Nachteilig ist das konstruktionsbedingte Umkehrspiel bei einem Richtungswechsel welches durch den Verschleiß der Mutter und der Spindel noch verstärkt wird. Darüber hinaus neigen Kugelgewindetriebe bei pendelnden Bewegungen zum Aufschwingen und Vibrieren. [10][42][145]

<sup>2</sup> Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Frau Dipl.-Ing. Lolana Maricic unterstützt.



Systeme mit Ritzel-Zahnstange erlauben die kostengünstige und robuste Realisierung großer Verfahrswege, da durch das Aneinanderfügen von Zahnstangensegmenten beliebig lange Verfahrswege realisiert werden können [145]. Allerdings bieten Ritzel-Zahnstange-Antriebe nur eine geringe Wiederholpräzision, weisen ein hohes Umkehrspiel auf und bedingen zur Verschleißminimierung ein konsequentes Befetten der Zahnstange. Zur Verringerung des Spiels können zwei gegeneinander verspannte parallele Ritzel eingesetzt werden, wodurch allerdings wiederum Verschleiß und Systemkosten steigen [145].

Die letzte Gruppe bilden die Vorschubantriebe auf Basis von Zahnriemen. Je nach Anforderung kommen Riemen aus Gummi (Neopren) oder Kunststoff (Polyurethan), in die Stahldrähte eingearbeitet sind, zum Einsatz. Durch den Formschluss zwischen Zahnriemen und Antriebsritzel wird eine schlupffreie Kraftübertragung sichergestellt. Vorteile sind die bei geringen Systemkosten realisierbaren großen Verfahrswege sowie das geringe Spiel. Einer exakten Positionierung stehen aber die Dehnung und der Verschleiß des Riemens im Betrieb entgegen. [70][127]

### 3.4.2 Untersuchte Maschinen

Vorschubantriebe auf Basis eines Kugelgewindetriebs stellen derzeit den Stand der Technik im Bereich der Wickelmaschinen dar. Um zu ermitteln, ob Verlegeachsen marktüblicher Wickelmaschinen den Anforderungen der Fertigung lagegenauer Wicklungen entsprechen, werden im Folgenden die Verlegeachsen zweier aktuell am Markt erhältlichen Wickelmaschinen analysiert.

**Wickelmaschine 1** ist eine Universal-Wickelmaschine deren Verlegeeinheit durch einen Servomotor mit Mutter-Gewindetrieb angetrieben wird. Der Mutter-Gewindetrieb hat einen Hub von 450 mm. Der Spindeldurchmesser beträgt 16 mm und die Spindelsteigung 5 mm. Der eingesetzte Servomotor hat eine Leistung von 100 W, die Positionserfassung erfolgt mittels eines Inkrementalencoders mit einer Auflösung von 512 Schritten/Umdrehung.

**Wickelmaschine 2** ist ein Wickel-Halbautomat, dessen Verlegeeinheit als Drei-Achsen-System aufgebaut ist. Hierdurch kann der Drahtführer frei im Raum positioniert werden und so Prozessschritte, wie das Anwickeln des Drahts an den Kontaktpins der Spule, automatisiert ausführen. Die Untersuchungen werden an der zur Wickelspindel parallelen Verlegeachse durchgeführt. Die Spindel des verbauten Mutter-Gewindetriebs hat einen Durchmesser von 11 mm, eine Steigung von 5 mm und einen Hub von 500 mm. Der Antrieb erfolgt durch einen Servomotor mit einer Leistung von 130 W, die Positionserfassung erfolgt mittels Resolver.

### 3.4.3 Kennwerte für die Beurteilung von Verlegeachsen

#### Positionierunsicherheit

Die Positionierunsicherheit der am Produktionsprozess beteiligten Achsen beeinflusst die Fertigungsgenauigkeit in entscheidendem Maße. Dies gilt insbesondere für die

Fertigung lagegenauer Wicklungen, bei der eine exakte Drahtführung sowie Positionierung an den Flanschen entscheidende Voraussetzungen für einen störungsfreien Wicklungsaufbau sind. Die Positionierunsicherheit gibt an, mit welcher Unsicherheit eine beliebig vorgewählte Position im Arbeitsbereich einer Vorschubachse erreicht werden kann. Die Verfahren für die Prüfung und Bestimmung der Positionierunsicherheit von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinenachsen sind in der Norm ISO 230-2 [124] definiert.

Für die Bestimmung der Positionierunsicherheit werden mehrere Zielpositionen, nach ISO 230-2 [124] mindestens fünf pro Meter Verfahrsweg ( $m \geq 5$ ), jeweils mehrfach ( $n \geq 5$ ) aus beiden Verfahrrichtungen ( $\uparrow$  bedeutet positive Richtung,  $\downarrow$  negative) angefahren. Mit Hilfe eines geeigneten Messgeräts werden die Ist-Positionen  $P_i$  ( $i = 1$  bis  $m$ ) erfasst und mit den Soll-Positionen  $P_{ij}$  ( $i = 1$  bis  $m$ ;  $j = 1$  bis  $n$ ) verglichen. Aus den ermittelten Abweichungen werden die Spannweite der gemittelten Positionsabweichung  $M$ , die systematische Positionsabweichung  $E$  und die Positionierunsicherheit  $A$  nach den in [124] angegebenen Gleichungen ermittelt.

In der Wickeltechnik beeinflusst die Umkehrspanne einer Achse, auch Reversierspiel genannt, die Drahtführerpositionierung bei der Richtungsumkehr an den Flanschen des Spulenkörpers. Die betrachtete Achsbewegung setzt sich hier aus einer Anfahrbewegung, einem Stoppen der Achse sowie einer Rückstellbewegung entgegen der ursprünglichen Anfahrtsrichtung zusammen. Während der Anfahrbewegung liegt das Innengewinde der Mutter mit der einen Seite an der Spindel spielfrei an. Wird nach dem Stoppen der Anfahrbewegung die Spindel in entgegen gesetzter Richtung gedreht, bewegt sich der Schlitten zunächst nicht, solange bis die andere Seite des Gewindes der Mutter wieder an der Spindel anliegt. Dieses Reversierspiel ist auch unter dem Begriff „toter Gang“ oder „Umkehrspanne“ bekannt.

Nach [124] ist die Umkehrspanne  $B_i$  an einer Position die Differenz zwischen den gemittelten einseitigen Positionsabweichungen aus beiden Annäherungsrichtungen an einer Position  $P_i$ . Die Umkehrspanne  $B$  einer Achse ist der größte Absolutwert der Umkehrspannen  $B_i$  an allen Zielpositionen entlang der Achse. Der arithmetische Mittelwert der Umkehrspannen  $B_i$  an allen Zielpositionen entlang der Achse wird als gemittelte Umkehrspanne  $\bar{B}$  einer Achse bezeichnet.

Die Wiederholpräzision wird nach DIN 55350-13 definiert als „die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung voneinander unabhängiger Ermittlungsergebnisse bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Ermittlungsverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen.“ [117] Die Wiederholpräzision ist somit eine aus Wiederholungsmessungen, also dem Anfahren desselben Messpunktes unter konstanten Bedingungen, berechnete Standardabweichung. Die einseitige Wiederholpräzision  $R_i \uparrow$  oder  $R_i \downarrow$  der Positionierung an einer Position ist der Bereich der vierfachen Standardabweichung der einseitigen Positionsabweichungen an einer Position  $P_i$ . Die einseitige Wiederholpräzision der Positionierung  $R \uparrow$  oder  $R \downarrow$  und zweiseitige Wiederholpräzision der Positionierung  $R$  einer Achse ist der jeweilige Maximalwert der Wiederholpräzision an den einzelnen Zielpositionen [124]. Durch Auftragen der für mehrere

Messpositionen ermittelten Kenngrößen über den Verfahrenweg ergibt sich ein Abweichungsband als Ergebnis. In Bild 25 ist zusammenfassend eine Übersicht der erhaltenen Kenngrößen zur Beurteilung der Positionierunsicherheit beispielhaft dargestellt [124].

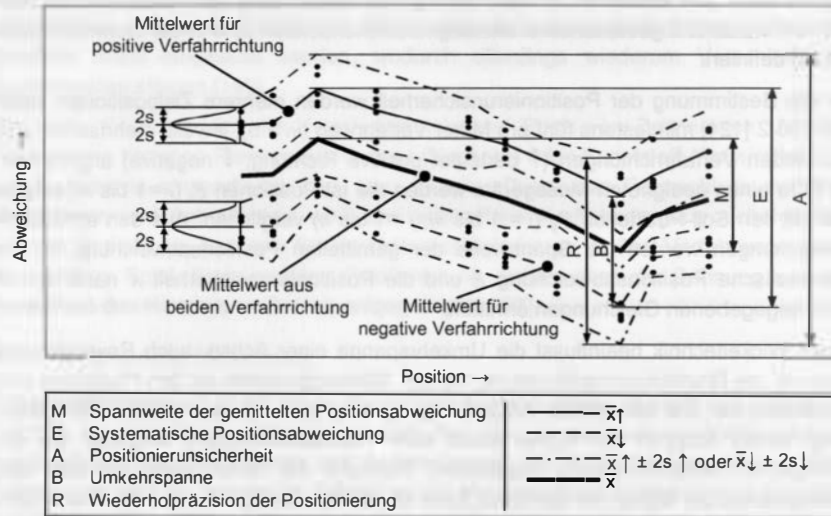


Bild 25: Grafische Darstellung der Kenngrößen der Positionierunsicherheit nach [124]

### Dynamische Eigenschaften

Neben den Positioneigenschaften sind die dynamischen Kenngrößen einer Verlegeachse für die Fertigung lagegenauer Wicklungen von Bedeutung. Hierbei sind sowohl konstante Verfahrensgeschwindigkeiten als auch ein gutes Beschleunigungsverhalten bei Richtungswechsel an den Spulenkörperflanschen beziehungsweise für Korrekturbewegungen nötig. Insbesondere nach der Richtungsumkehr an den Flanschen ist es erforderlich, dass die Verlegeachse in einer möglichst geringen Ausregelzeit die geforderte Soll-Geschwindigkeit erreichen. Darüber hinaus muss der programmierte Umkehrpunkt, unabhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit, mit möglichst geringer Abweichung angefahren werden.

Bei Verfahrensbewegungen kann grundsätzlich zwischen einem trapezförmigen und einem dreieckförmigen Geschwindigkeitsverlauf unterschieden werden [101]. Der für Verlegebewegungen beim Wickeln relevante trapezförmige Verlauf setzt sich zusammen aus einer Beschleunigungsphase ( $t_a$ ), einer Phase konstanter Geschwindigkeit ( $t_c$ ) und der Verzögerungsphase ( $t_d$ ) und entspricht einer Hubbewegung des Drahtführers zwischen den Flanschen des Spulenkörpers. In Bild 26 ist dieser prinzipielle Verlauf graphisch dargestellt.

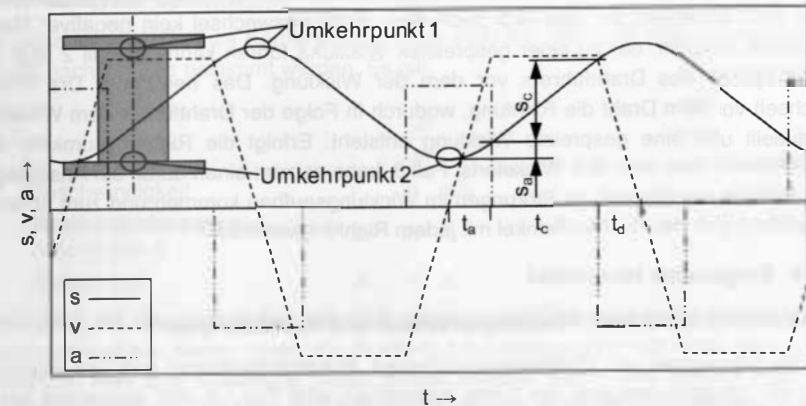


Bild 26: Prinzipieller Verlauf von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Drahtführers beim Wickeln zwischen Flanschen

Für die maximale Geschwindigkeit des trapezförmigen Geschwindigkeitsverlaufs gilt:

$$v_{max} = \frac{s_c}{t_c} \quad (3.23)$$

mit max. Geschwindigkeit  $v_{max}$  in m/s  
 bei konstanter Geschwindigkeit zurückgelegte Strecke  $s_c$  in m  
 Zeitraum der mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegten Distanz  $t_c$  in s

Der beim Wickeln vorliegende rechteckige Verlauf der Beschleunigung ist gekennzeichnet durch einen sprungartigen Anstieg an den Umkehrpunkten des Spulenkörpers. Je höher hier die erreichbare Beschleunigung ist, desto schneller kann die Sollgeschwindigkeit des Drahtführers erreicht werden und umso geringer ist der Einfluss auf den Nachlaufwinkel. Für die Beschleunigung an den Umkehrpunkten gilt näherungsweise:

$$a = 2 \frac{s_a}{t_a^2} \quad (3.24)$$

mit Beschleunigung  $a$  in m/s<sup>2</sup>  
 Strecke ab Umkehrpunkt bis erreichen der max. Geschw.  $s_a$  in m  
 Zeit ab Umkehrpunkt bis erreichen der max. Geschw.  $t_a$  in s

Weiteren Einfluss auf den Wicklungsaufbau hat das Verhalten des Drahtführers beim Richtungswechsel an den Spulenkörperflanschen. Prinzipiell können hierbei drei Fälle unterschieden werden. Fall 1 stellt mit dem synchronen Erreichen des Umkehrpunktes

durch Draht und Drahtführer den Idealfall dar. Hierbei steht der Drahtführer senkrecht über dem Wickelort, so dass sich nach dem Richtungswechsel kein negativer Nachlaufwinkel einstellt, der zu einer gespreizten Wicklung führen kann. Im Fall 2 liegt der Umkehrpunkt des Drahtführers vor dem der Wicklung. Das heißt, der Drahtführer wechselt vor dem Draht die Richtung, wodurch in Folge der Drahtführer dem Wickelort vorausseilt und eine gespreizte Wicklung entsteht. Erfolgt die Richtungsumkehr des Drahtführers nach dem des Wickelorts, Fall 3, kann es zum einen durch ein Anschlagen des Drahtes am Flansch zu Störungen im Wicklungsaufbau kommen und zum anderen vergrößert sich der Nachlaufwinkel mit jedem Richtungswechsel.

#### 3.4.4 Eingesetzte Messmittel

##### Positionierungsunsicherheit, Wiederholpräzision und Reversierspiel

Für die Messungen von Positionierungsunsicherheit, Wiederholpräzision und Reversierspiel wird ein Längenmessgerät der Firma Heidenhain vom Typ LS 487 verwendet (siehe [91]). Dieses beruht auf einem inkrementalen Messverfahren bei dem die als Maßverkörperung auf einem Glasmaßstab aufgebrachte regelmäßige Gitterstruktur photoelektrisch abgetastet wird. Die Bestimmung einer relativen Position erfolgt durch Summation der einzelnen überfahrenen Inkremente (Messschritte) in Bezug auf einen beliebig gesetzten Referenzpunkt.

Für eine exakte Vermessung der Verlegeachsen ist die Genauigkeit des eingesetzten Messmittels entscheidend. Bei Längenmessgeräten wird diese in Form einer Genauigkeitsklasse angegeben, die wie folgt definiert ist [91]:

*„Die Extremwerte  $\pm F$  der Messkurven für jeden beliebigen, max. 1 m langen Messweg liegen innerhalb der Genauigkeitsklasse  $\pm a$ .“*

Das verwendete Längenmessgerät erfüllt die Anforderungen der Genauigkeitsklasse  $\pm 5 \mu\text{m}$ , was allerdings nicht bedeutet, dass die Positionsabweichungen innerhalb der Messlänge maximal  $\pm 5 \mu\text{m}$  beträgt. Tatsächlich liegt die maximale Positionsabweichung laut Abnahmeprotokoll [70] innerhalb der Messkurve von 310 mm bei lediglich  $\pm 1,67 \mu\text{m}$ .

Für die Messungen wird das feststehende Gehäuse des Längenmessgeräts mit einer Montageschiene jeweils am Gehäuse der Verlegeachsen montiert. Um eine exakt parallele Ausrichtung mit dem Verlegeschlitten zu erreichen, kann die Position der Montageschiene über Langlöcher justiert werden. Der Messschlitten des Längenmessgeräts ist über einen Winkel mit dem Verlegeschlitten verbunden. Die Anzeige der Messdaten erfolgt mit der numerische Positionsanzeige ND 780 von Heidenhain, welche die gemessenen Positionen in Klartext ausgibt und über eine RS232-Schnittstelle an einen Datenerfassungsrechner überträgt.

#### Bestimmung der dynamischen Eigenschaften

Die Geschwindigkeit eines Körpers kann durch einfache Ableitung des zurückgelegten Weges nach der Zeit bestimmt werden. Es gilt:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (3.25)$$

mit Geschwindigkeit	$v$	in m/s
Streckenänderung im Zeitintervall $dt$	$ds$	in m
Zeitintervall	$dt$	in s

Somit kann die Geschwindigkeit aus dem gemessenen Verfahrprofil der Verlegeachse berechnet werden. Hierzu muss die Position der Verlegeachse mit einer konstanten Abtastrate, dem  $dt$  in Gleichung (3.25), erfasst werden. Durch eine weitere Ableitung des Weges nach der Zeit kann aus dem zurückgelegten Weg die Beschleunigung nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (3.26)$$

mit Geschwindigkeitsänderung	$dv$	in m/s
------------------------------	------	--------

Für die hochdynamische Erfassung von Positionen sind Abstandssensoren auf Basis des Laser-Triangulationsprinzips besonders geeignet. Sie zeichnen sich durch hohe Abtastraten bei gleichzeitig guter Auflösung aus. Weiterer Vorteil ist die berührungslose Messwerterfassung, durch die eine Beeinflussung des untersuchten Prozesses ausgeschlossen wird. Bei Triangulationssensoren wird eine fokussierte Lichtquelle, eine Leuchtdiode (LED) oder ein Halbleiterlaser, auf das Messobjekt gerichtet und an der Messobjektoberfläche diffus streuend reflektiert. Die Empfangsoptik, die unter einem vorgegebenen Winkel zur Senderoptik steht, projiziert das reflektierte Licht auf einen positionsempfindlichen Lagedetektor (PSD = Position Sensitive Device) oder eine CCD-Zeilenkamera (CCD = Charge Coupled Device), die ein von der Lage des Lichtfleckes abhängiges Signal liefert. Wird der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt verändert, verschiebt sich die Abbildungsposition auf dem Lagedetektor, somit kann durch fortlaufende Entfernungsmessung der Weg detektiert werden. [147]

Für die Erfassung der Drahtführerbewegung am Wendepunkt wird ein Laser-Triangulationssensor der Firma Micro-Epsilon mit einem Messbereich von 2 mm, einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  und einer Messrate von 10 kHz verwendet. Die messtechnische Bestimmung des dynamischen Verhaltens im Wickelprozesses erfolgt mit einem Laser-Triangulationssensor der Firma Keyence, der einen Messbereich von 30 mm bei einer Messgenauigkeit von  $\pm 30 \mu\text{m}$  und einer Messrate von 5 kHz bietet.

Für die Aufbereitung, Speicherung und Auswertung der Messdaten wird das Programm DASYLab der Firma National Instruments verwendet. Dieses verfügt über eine umfangreiche Bibliothek an vordefinierten Programmblöcken, aus denen Messprogramme per



Drag&Drop in Form von Schaltbildern zusammengestellt werden. Wie in [54] beschrieben, ist für die messtechnische Bestimmung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus Positionsdaten eine Vorfilterung erforderlich, um ein zu starkes Rauschen zu vermeiden. Hierfür werden die Eingangsdaten durch die Bildung des gleitenden Durchschnitts über 20 Werte vorgeglättet. Zur Gewinnung der Geschwindigkeitswerte wird nach Bildung der ersten Ableitung über einen Tiefpassfilter Rauschen ausgefiltert. Für diesen kann in den durchgeführten Messungen eine Tiefpass-Grenzfrequenz von  $t_G = 25$  Hz als geeignet ermittelt werden. Über eine weitere Ableitung und eine erneute Filterung mittels Tiefpass erfolgt die Bestimmung der Beschleunigungswerte.

### 3.4.5 Messergebnisse

In den Messungen zur Ermittlung der Positionierunsicherheit wird an beiden Maschinen jeweils ein Verfahrensweg von 300 mm betrachtet. Die Messungen umfassen jeweils zehn Sollpositionen, die aus beiden Verfahrrichtungen jeweils fünfmal angefahren werden. Im Weiteren erfolgt die Darstellung sowie die Beurteilung der ermittelten Ergebnisse.

#### Wickelmaschine 1

Die Ergebnisse der Untersuchungen an der Wickelmaschine 1 sind in Bild 27 grafisch aufbereitet. Innerhalb des betrachteten Verfahrenswegs weist die Verlegeachse für die Spannweite der gemittelten Positionsabweichung  $M$  einen Wert von  $63 \mu\text{m}$ , für die systematische Positionsabweichung  $E$  einen Wert von  $72 \mu\text{m}$  und für die Positionierunsicherheit  $A$  einen Wert von  $80 \mu\text{m}$  auf. Die Wiederholpräzision der Positionierung  $R$  liegt bei  $24 \mu\text{m}$  und die Umkehrspanne  $B$  bei  $14 \mu\text{m}$ .

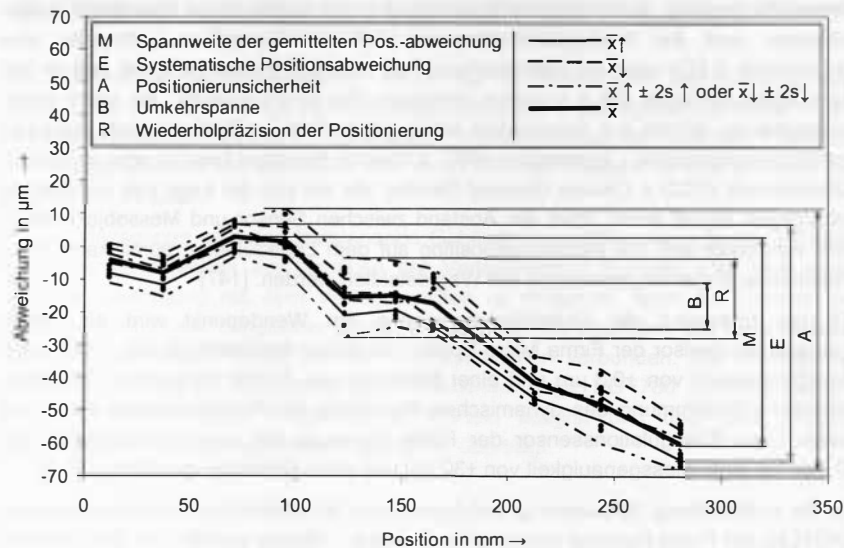


Bild 27: Positionierunsicherheit der Verlegeeinheit – Wickelmaschine 1

#### Wickelmaschine 2

Bild 28 zeigt die Werte der messtechnischen Untersuchungen der Positionierunsicherheit an Wickelmaschine 2. Innerhalb des betrachteten Verfahrenswegs liegt die Spannweite der gemittelten Positionsabweichung  $M = 30 \mu\text{m}$ , die systematische Positionsabweichung  $E = 41 \mu\text{m}$  und die Positionierunsicherheit  $A = 56 \mu\text{m}$ . Für die Wiederholpräzision der Positionierung  $R$  ergibt sich ein Wert von  $46 \mu\text{m}$  und für die Umkehrspanne  $B = 34 \mu\text{m}$ .

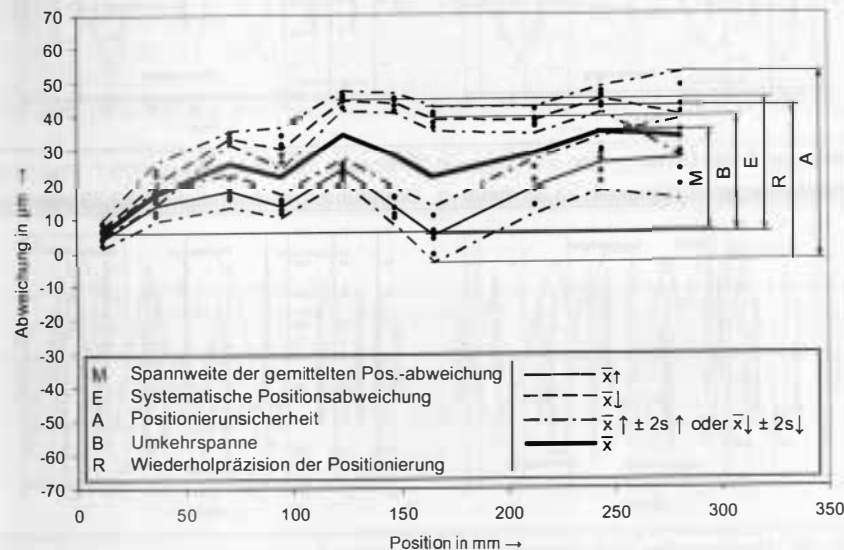
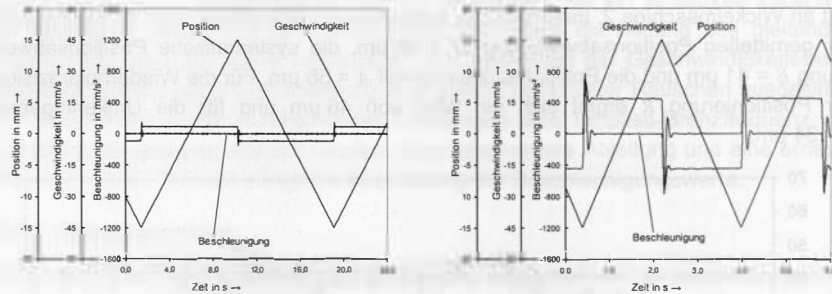


Bild 28: Positionierunsicherheit der Verlegeeinheit – Wickelmaschine 2

#### Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten

Für die Analyse des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens der untersuchten Wickelmaschinen wird die Verfahrbewegung während der Bewicklung eines Spulenkörpers mit einer Kammerbreite von 30 mm betrachtet. Hierbei werden die Drehzahlen stufenweise von 1.000 UpM auf 10.000 UpM mit einer Schrittweite von 1.000 UpM erhöht. Dies entspricht Verlegegeschwindigkeiten zwischen 3,33 mm/s und 33,33 mm/s. In Bild 29 sind, als Auszug der gewonnenen Messergebnisse, die Messkurven für die Sollgeschwindigkeiten 3,33 mm/s, 16,66 mm/s, 23,33 mm/s und 33,33 mm/s dargestellt.

Drehzahl: 1.000 UpM      Drehzahl: 5.000 UpM  
 Drahtführergeschwindigkeit: 3,33 mm/s      Drahtführergeschwindigkeit: 16,66 mm/s



Drehzahl: 7.000 UpM      Drehzahl: 10.000 UpM  
 Drahtführergeschwindigkeit: 23,33 mm/s      Drahtführergeschwindigkeit: 33,33 mm/s

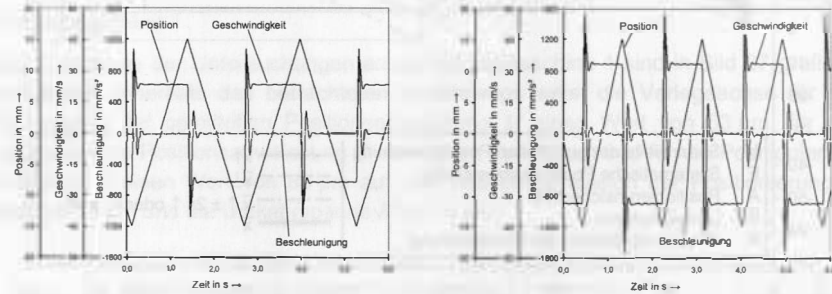
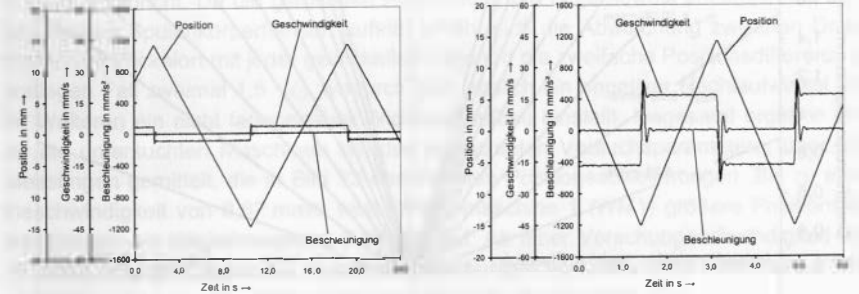


Bild 29: Dynamisches Verhalten der Wickelmaschine 1

Die Verlegeachse der Wickelmaschine 1 zeigt bis zu einer Verlegegeschwindigkeit von 16,66 mm/s einen sehr konstanten, schwankungsarmen Geschwindigkeitsverlauf. Bei höheren Soll-Geschwindigkeiten treten Schwankungen mit einer Schwankungsweite  $\Delta v_{Soll,M1}$  von bis zu 5% des Sollwerts auf. Beim Sollwert 33,33 mm/s liegt die Ausregelzeit nach der Richtungsumkehr bei  $T_{Aus,M1} = 0,19$  s, die Überschwingweite bei 46% bezogen auf den Sollwert und die maximale Beschleunigung bei  $1.540$  mm/s<sup>2</sup>.

Auch bei Wickelmaschine 2 zeigen die Messergebnisse, dass bis zur Mitte des betrachteten Bereichs der Verlegegeschwindigkeit nur sehr geringe Schwankungen auftreten. Lediglich an den Umkehrpunkten kommt es zu leichten Überschwingern. Oberhalb von 16,66 mm/s nehmen die Schwankungen in der Verlegegeschwindigkeit zu. Bei den mit 33,33 mm/s durchgeführten Messungen liegt  $\Delta v_{Soll,M2}$  bei maximal 8% des Sollwerts. Die Ausregelzeit bei der betrachteten Maximalgeschwindigkeit beträgt  $T_{Aus,M2} = 0,23$  s, die Überschwingweite 35% bezogen auf den Sollwert und die Maximalbeschleunigung  $1.245$  mm/s<sup>2</sup>. In Bild 30 sind die Messergebnisse für die Sollgeschwindigkeiten 3,33 mm/s, 16,66 mm/s, 23,33 mm/s und 33,33 mm/s dargestellt.

Drehzahl: 1.000 UpM      Drehzahl: 5.000 UpM  
 Drahtführergeschwindigkeit: 3,33 mm/s      Drahtführergeschwindigkeit: 16,66 mm/s



Drehzahl: 7.000 UpM      Drehzahl: 10.000 UpM  
 Drahtführergeschwindigkeit: 23,33 mm/s      Drahtführergeschwindigkeit: 33,33 mm/s

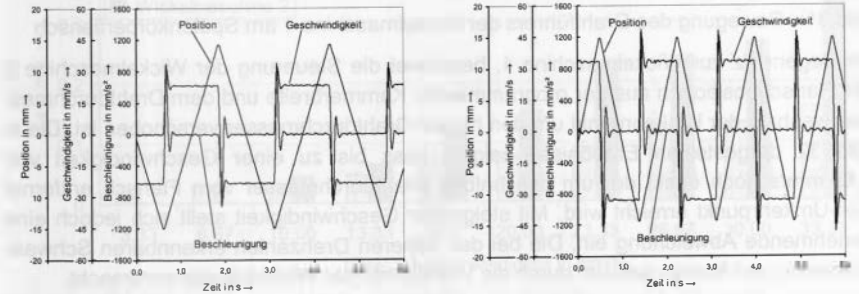


Bild 30: Dynamisches Verhalten der Wickelmaschine 2

Neben der Analyse des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens der Verlegeachsen wird das Verhalten beim Richtungswechsel an den Spulenkörperflanschen untersucht. Bei den Messungen ist der Laser-Triangulationssensor jeweils mittels angepassten Aufnahmen am Maschinenbett fixiert und der Laser-Sensorstrahl auf die Drahtführeraufnahme ausgerichtet.

Innerhalb der durchgeführten Messungen wird die Bewegung des Drahtführers für einen Drahtdurchmesser von 0,2 mm und Spindeldrehzahlen von 1.000 bis 10.000 UpM mit einer Schrittweite von 1.000 UpM betrachtet. Die programmierten Werte entsprechen somit wiederum Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 3,33 und 33,33 mm/s.

In Bild 31 ist das Verhalten des Drahtführers der Maschine 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Verlegegeschwindigkeit die Positionsabweichung am Flansch steigt. Erreicht der Drahtführer bei einer Verlegegeschwindigkeit von 3,33 mm/s den programmierten Umkehrpunkt noch exakt, vergrößert sich die Abweichung mit der Zunahme der Verlegegeschwindigkeit bis auf 0,16 mm bei 33,33 mm/s.

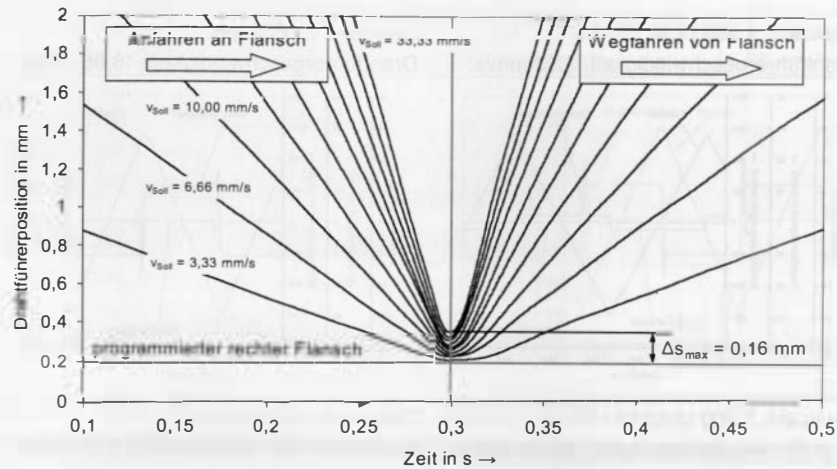


Bild 31: Bewegung des Drahtführers der Wickelmaschine 1 am Spulenkörperflansch

Im Gegensatz zur Wickelmaschine 1, berechnet die Steuerung der Wickelmaschine 2 die Flanschpositionen aus der programmierten Kammerbreite und dem Drahtdurchmesser, weshalb der Umkehrpunkt um den halben Drahtdurchmesser verschoben ist. Die in Bild 32 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 6,66 mm/s noch exakt der um den halben Drahtdurchmesser vom Flansch entfernte Soll-Umkehrpunkt erreicht wird. Mit steigender Geschwindigkeit stellt sich jedoch eine zunehmende Abweichung ein. Die bei den höheren Drehzahlen erkennbaren Schwankungen in den Kurven werden durch die Vibrationen der Wickelspindel verursacht.

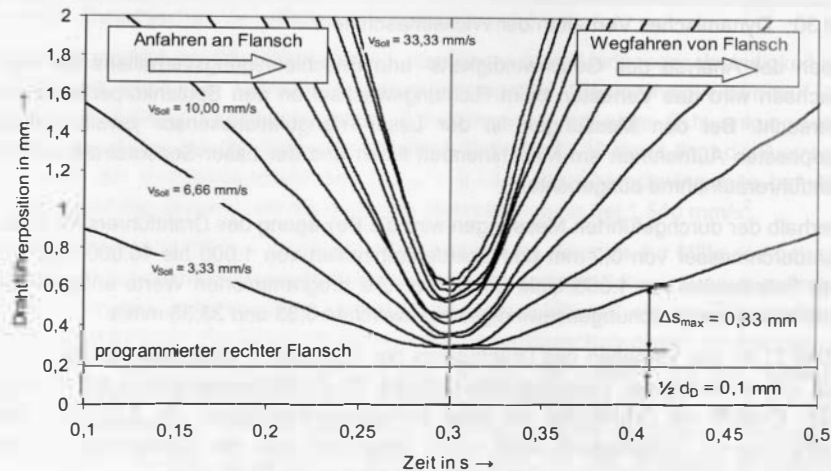


Bild 32: Bewegung des Drahtführers der Wickelmaschine 2 am Spulenkörperflansch

Wie in Bild 32 dargestellt, beträgt die Positionsabweichung bei 33,33 mm/s ca. 0,33 mm, was etwa dem 1,5-fachen des programmierten Drahtdurchmessers von 0,2 mm entspricht. Da die gemessenen Abweichung pro Lage sowohl am linken als auch am rechten Spulenkörperflansch auftritt, erhöht sich die Abweichung zwischen Drahtführer und Wickelort mit jeder gewickelten Lage um die zweifache Positionsabweichung, im vorliegenden Fall zweimal  $1,5 \cdot d_D$ , wodurch sich letztlich ein negativer Nachlaufwinkel und im Weiteren ein nicht lagegenauer Wicklungsaufbau einstellt. Insgesamt ergeben sich für die untersuchten Maschinen bei den betrachteten Versuchsparametern, über fünf Messungen gemittelt, die in Bild 33 dargestellten Positionsabweichungen. Bis zu einer Geschwindigkeit von 6,67 mm/s weist Wickelmaschine 1 (WM1) größere Positionsabweichungen als Wickelmaschine 2 (WM2) auf. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s hingegen liegen die Positionsabweichungen von WM2 über denen von WM1, ab 16,67 mm/s um etwa 100% bezogen auf die Werte von WM1.

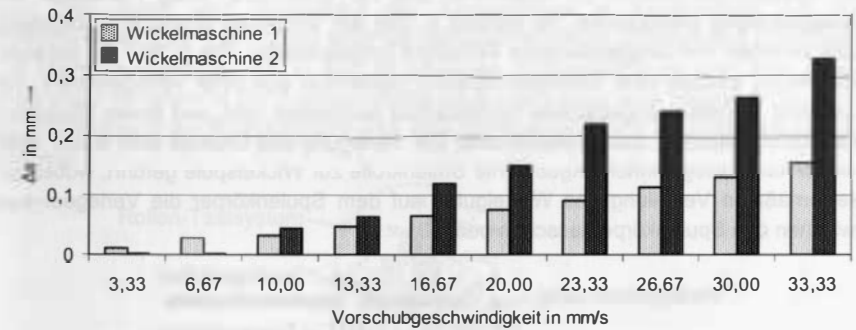


Bild 33: Positionsabweichung der untersuchten Verlegeachsen beim Richtungswechsel am Spulenkörper-Flansch in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

### 3.4.6 Technische Bewertung

Die Analyse der Verlegeachsen aktueller Wickelmaschinen zeigt, dass diese hinsichtlich der untersuchten Parameter zwar bereits hohen Ansprüchen genügen, vor dem Hintergrund der Anforderungen des lagegenauen Wickelns dagegen noch Optimierungspotential besteht. So konnte in den durchgeführten Messungen ermittelt werden, dass sowohl bezüglich der Positionierungsunsicherheit, als auch der Wiederholpräzision Abweichungen auftreten, die über den festgelegten Grenzwerten (siehe S. 43) liegen. Diese können sich bei mehrlagigen Wicklungen zu signifikanten Abweichungen der Ist-Drahtführerposition von der Soll-Position aufsummieren und so einen fehlerfreien Wicklungsaufbau verhindern. Ein weiteres Optimierungspotential stellen die mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit steigenden Positionsabweichungen an den Flanschen dar, die dazu führen, dass der Richtungswechsel des Drahtführers nicht synchron mit dem Draht erfolgt und sich so zusätzliche Abweichungen im Nachlaufwinkel ergeben.

### 3.5 Bisherige Lösungsansätze zur Fertigung lagegenauer Wicklungen

Die Analyse des aktuellen Stands der Technik für die Fertigung lagegenauer Wicklungen wird in zwei Schritten durchgeführt. Im Rahmen einer Patentrecherche werden nationale und internationale Patentdatenbanken nach relevanten Erfindungen durchsucht. Hierbei können verschiedenste Lösungsansätze gefunden werden, die sich aber nicht in den aktuell am Markt erhältlichen Wickelsystemen widerspiegeln, wie eine eingehende Analyse der Marktsituation ergibt.

#### 3.5.1 Patentsituation

Mit dem Ziel eine möglichst gleichmäßige Füllung des Spulenkörpers zu erreichen, besteht ein in verschiedenen konstruktiven Ausführungen anzutreffender Lösungsansatz darin, mittels zweier symmetrisch zum Drahtführer angeordneter Schaltsensoren die Spulenkörperflansche zu detektieren und bei Erkennung eines Flansches die Verlegerichtung umzukehren. So werden in [59] ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Verlegen von langgestrecktem Wickelgut vorgeschlagen. Die in Bild 34 gezeigte Vorrichtung umfasst eine Verlegeeinrichtung, bestehend aus einer Verlegeeinheit, die über eine motorisch angetriebene Spindelachse positioniert wird, und einem Wickelantrieb für die Rotation des Spulenkörpers. Zur Verlegung des Drahtes wird dieser über eine an der Verlegeeinheit angebrachte Umlenkrolle zur Wickelspule geführt, wobei zur gleichmäßigen Verteilung des Wickelgutes auf dem Spulenkörper die Verlegeeinheit zwischen den Spulenkörperflanschen pendelt.

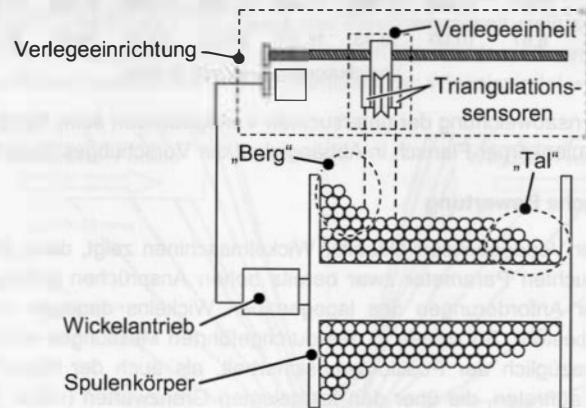


Bild 34: Vorrichtung zum Verlegen von langgestrecktem Wickelgut [59]

Zur Regelung des Wickelprozesses ist an der Verlegeeinheit eine Sensoreinheit angebracht die aus zwei symmetrisch zur Umlenkrolle angebrachten Triangulationssensoren besteht. Während des Wickelprozesses misst der in Verlegerichtung vorauseilende Sensor kontinuierlich den Abstand zur Wicklungsoberfläche und ermöglicht so eine Erfassung der Wicklungstopologie. Sollten sich in Folge falsch eingestellter Flanschpositionen Berge (Richtungswechsel zu spät) oder Täler (Richtungswechsel zu früh) in der

Wicklungstopologie ausbilden, erfolgt automatisch eine entsprechende Korrektur der Wickelparameter in Form einer Verschiebung der Umkehrpunkte an den Flanschen. Daneben können mit den Sensoren die Flansche des Spulenkörpers erfasst und so eine Vereinfachung der Maschinenprogrammierung erreicht werden. Hierdurch erfolgt eine permanente Korrektur der Umschaltpunkte und es wird der unerwünschte Berg- bzw. Talbildung des Wickelgutes an den Flanschen entgegengewirkt. Hinsichtlich der Fertigung lagegenauer Wicklungen ist das Konzept jedoch als ungeeignet einzustufen, da eine Korrektur der Prozessparameter erst nach dem Auftreten eines Fehlers (Berg oder Tal an den Flanschen) im Wicklungsaufbau und dessen Detektion erfolgt. Durch die indirekte und zeitverzögerte Erfassung der Abweichungen im Prozessablauf kann ein lagegenauer Aufbau von Wicklungen nicht sichergestellt werden.

Eine weiteres Konzept für die Fertigung lagegenauer Wicklungen wird in der Offenlegungsschrift „Spulenwickelvorrichtung für perfekte Lagen“ [139] beschrieben. Sie hat zum Ziel, durch eine Anpassung der Kammerbreite in Abhängigkeit des Ist-Drahtdurchmessers, den Aufbau einer lagegenauen Wicklung automatisiert zu fertigen. Die Hauptkomponenten des in Bild 35 gezeigten Anlagenkonzepts sind eine Aufwickeleinheit mit einem in der Breite einstellbaren Spulenkörper, eine Messeinrichtung für die Bestimmung der Kammerbreite und eine Verlegeeinheit mit Drahtdickenmeseinrichtung.

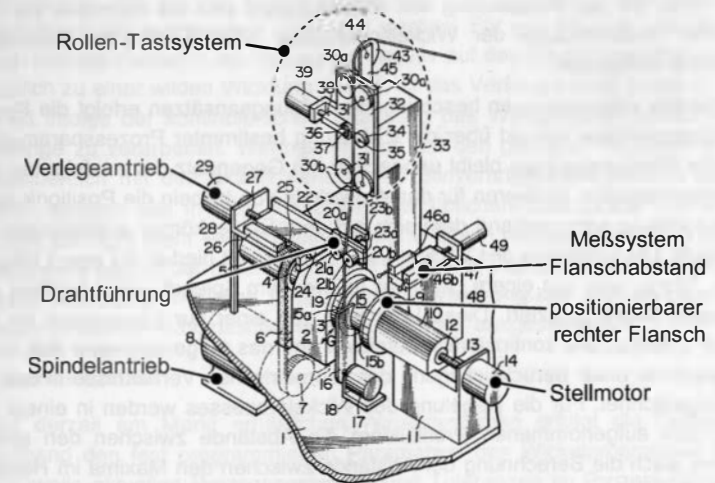


Bild 35: Spulenwickelvorrichtung für perfekte Lagen nach [139]

Zur Durchführung eines Wickelvorgangs wird im ersten Schritt mittels eines Rollen-Tastsystems, die den Draht gegen eine Bezugsrolle drückt, der Drahtdurchmesser bestimmt. Hieraus wird der benötigte Flanschabstand für eine ganzzahlige Windungszahl in der ersten Lage berechnet und ein entsprechender Abgleich mit dem Ist-Flanschabstand durchgeführt. Bei einer Abweichung erfolgt eine Korrektur durch das



Ein- bzw. Ausfahren des rechten Kammerflansches coaxial zur Wickelachse mit einem Stellantrieb. Im Anschluss an diesen Einrichtungsvorgang wird der Draht am Spulenkörper festgelegt und über eine pneumatisch einschwenkbare Andrückvorrichtung gegen den linken Flansch gedrückt. Dieser üblicherweise vom Bedienpersonal ausgeführte Prozessschritt sorgt dafür, dass sich die erste Windung der Wicklung parallel zum Flansch ausbildet und eine Rückfederung des Drahtes im Einlaufbereich des Spulenkörpers unterdrückt wird. Nach der ersten Umdrehung des Spulenkörpers wird die Andrückvorrichtung wieder ausgeschwenkt und der Wickelbetrieb gestartet. Hierbei eilt die Drahtführungseinrichtung um ein 0,5-faches des Drahtdurchmessers hinter dem Wickelort her, wodurch ein lückenfreier Wicklungsaufbau sichergestellt werden soll.

Auch wenn das beschriebene Konzept grundsätzlich eine automatisierte Fertigung lagegenauer Wicklungen ermöglicht, ist es nicht für eine flexible Fertigung hinsichtlich des Spulenkörperdurchmessers einsetzbar, da die teilbaren Wickelschablonen für jeden Spulendurchmesser spezifisch angefertigt werden müssen. Darüber hinaus ist auch die Breite der Spule begrenzt, da sich aus konstruktiven Gründen nur eine begrenzte Spannweite der Kammerbreite realisieren lässt. Insofern bietet sich das Konzept nur für die Fertigung großer Stückzahlen desselben Spulentyps an. Darüber hinaus können mit der beschriebenen Spulenvorrichtung nur kernlose Spulen aus Backlackdraht gefertigt werden, da der Spulenkörper nach Fertigstellung der Wicklung in der Anlage verbleibt [109]. Mit der Verwendung von Backlackdraht sind die Nachteile wie höhere Drahtkosten, Verschmutzen der Wickelschablonen oder zusätzliche Prozesszeiten unvermeidbar verbunden.

Bei den beiden vorangegangenen beschriebenen Lösungsansätzen erfolgt die Regelung des Wicklungsaufbaus indirekt über die Einhaltung bestimmter Prozessparameter, der tatsächliche Wicklungsaufbau bleibt unbeachtet. Im Gegensatz dazu erfolgt bei dem in [133] vorgeschlagenen Verfahren für das Aufwickeln von Kabeln die Positionierung der Verlegeeinrichtung entsprechend dem sich auf dem Spulenkörper ausbildenden Wicklungsverlauf. Die Erfassung des Wicklungsaufbaus erfolgt hierbei mit dem Lichtschnittverfahren. Hierzu wird von einem Laser mit rotierendem Spiegel eine Laserlinie auf die Wicklungsoberfläche projiziert. Diese Linie wird von einer zur Laserebene im Winkel versetzten Videokamera kontinuierlich detektiert und das aufgenommene Bild in einem Auswerterechner unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse in den Profilverlauf umgerechnet. Für die Regelung des Wickelprozesses werden in einem ersten Schritt in den aufgenommenen Profilbildern die Abstände zwischen den einzelnen Windungen durch die Berechnung der Abstände zwischen den Maxima im Höhenprofil bestimmt. Anschließend werden die ermittelten Abstandswerte mit dem durch den Wickelgutdurchmesser bestimmten Sollabstand verglichen. Wird ein Auseinanderdriften der Windungen detektiert, wird die Verlegeachse mit einem Nachstellsignal beaufschlagt, welches der detektierten Abweichung vom Sollabstand entgegenwirkt.

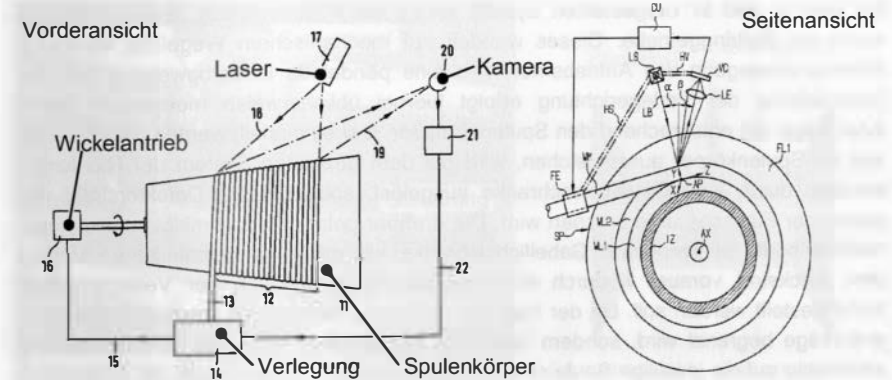


Bild 36: Einrichtung zum Aufwickeln von strangförmigen Wickelgut auf eine Spule [133]

Der vorgeschlagene Lösungsansatz gestattet nur in einem eingeschränkten Rahmen die lagegenaue Verlegung von Wickelgut. Da die Regelung der Verlegung mit einem zeitlichen Versatz zum Auftreten eines Fehlers im Wickelbild erfolgt, kann kein vollständig lückenloser Wicklungsaufbau erzielt werden. Für das Aufwickeln von Kabeln auf Transportspulen, auf das das Patent abzielt, kann die Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens als ausreichend eingestuft werden. Für das Wickeln von Spulen, bei dem sich kleinste Fehler in der Verlegung negativ auf den Wicklungsaufbau auswirken und letztlich zu einer wilden Wicklung führen, ist das Verfahren nicht geeignet. Darüber hinaus ist infolge der kontinuierlichen Erfassung des Wicklungsaufbaus eine enorme Datenmenge zu verarbeiten. Wenngleich dies bei den geringen Wickeldrehzahlen im Kabelspulbereich mit den aktuell verfügbaren Bildverarbeitungssystemen realisierbar erscheint, würden die in der Spulenvickerei üblichen Drehzahlen von mehr als 1.000 UpM ein nicht mehr verarbeitbares Datenvolumen verursachen. Der große Vorteil des Verfahrens liegt in der berührungslosen Erfassung der zur Regelung erforderlichen Parameter. Hierdurch wird eine zusätzliche Beeinflussung des Wickelergebnisses, im Gegensatz zu dem in [139] beschriebenen Verfahren, ausgeschlossen.

### 3.5.2 Marktsituation

Bei den derzeit am Markt erhältlichen Wickelsystemen erfolgt die Drahtverlegung entsprechend den fest programmierten Parametern des Wickelprogramms. Systeme, die die jeweils aktuellen Prozessparameter und Toleranzen im Prozessablauf berücksichtigen sind nicht erhältlich. Die innerhalb der Patentrecherche gefundenen Konzepte können in industrietauglichen Lösungen nicht wiedergefunden werden. Lediglich auf dem Sektor der Umspulteknik sind Systeme verfügbar, bei denen eine Prozessregelung ansatzweise erfolgt. Hauptziel ist es hierbei, durch eine Detektion der Flansche des Spulenkörpers die Verlegerichtung der Drahtführung umzuschalten, um eine möglichst gleichmäßige Füllung der Spule zu erreichen.

Bei dem in Bild 37 dargestellten System erfolgt die Positionierung der Drahtführung durch ein Rollringgetriebe. Dieses wandelt auf mechanischem Wege die konstante Rotationsbewegung des Antriebsmotors in eine pendelnde Linearbewegung um. Die Umschaltung der Verlegerichtung erfolgt hierbei üblicherweise mechanisch durch Anschläge, die entsprechend den Spulenabmaßen fest eingestellt werden. Um Toleranzen im Spulenkörper auszugleichen, wird bei dem gezeigten System der Richtungswechsel durch eine Gabellichtschranke ausgelöst, sobald deren Detektorstrahl von einem der Flansche unterbrochen wird. Die drehbar gelagerte und mittels eines Pneumatikzylinders schwenkbare Gabellichtschranke eilt mit einem einstellbaren Vorlauf dem Wickelort voraus, wodurch ein rechtzeitiges Umschalten der Verlegerichtung sichergestellt werden soll. Da der Hub der Verlegung nicht durch voreingestellte Festanschläge begrenzt wird, sondern durch die Spulenflansche, regelt sich das System selbsttätig auf die jeweilige Spule ein. Positionsfehler oder Änderungen der Spulenbreite werden so automatisch erkannt und die Umschaltpunkte angepasst. [51]

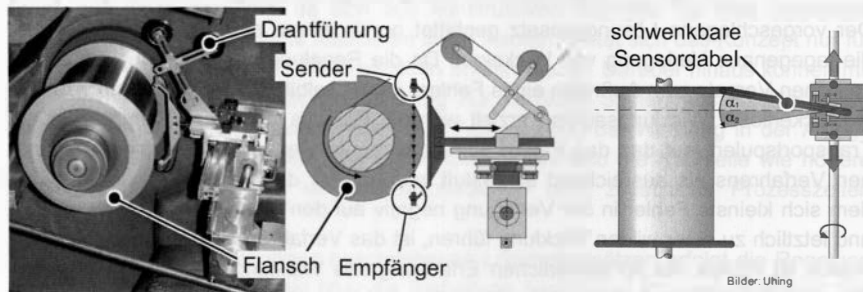


Bild 37: Umspuler Fa. Uhing [77]

Bei dem in Bild 38 gezeigten System der Firma KMK erfolgt die Flanscherkennung mit einem aus zwei symmetrisch zur Drahtführung angeordneten Laser-Triangulationsensoren bestehenden Sensorkopf. Dieser misst mit dem jeweils vorseilenden Sensorkanal kontinuierlich den Abstand zur Oberfläche der Spule und bestimmt hieraus die Position der Flansche zur Festlegung der Richtungsumkehr. Darüber hinaus können Unregelmäßigkeiten in der Füllung der Spule detektiert und ausgeglichen werden. Hierzu wird die mittlere Wickelhöhe der aktuellen Lage mit der Höhe am Flansch verglichen. Ist diese größer als die mittlere Höhe so liegt ein Tal vor und der Umkehrpunkt wird entsprechend nach außen verschoben, ist er niedriger liegt ein Berg vor und der Umkehrpunkt wird entsprechend nach innen verschoben. [89] Für die Fertigung lagegenauer Wicklungen müssen beide Systeme jedoch als nicht geeignet qualifiziert werden, da Prozessparameter erst nach dem Auftreten eines Fehlers im Wicklungsaufbau und dessen Detektion korrigiert werden. Die zeitverzögerte Detektion von Störungen im Prozessablauf sorgt dafür, dass der lagegenaue Aufbau von Wicklungen nicht sichergestellt wird.

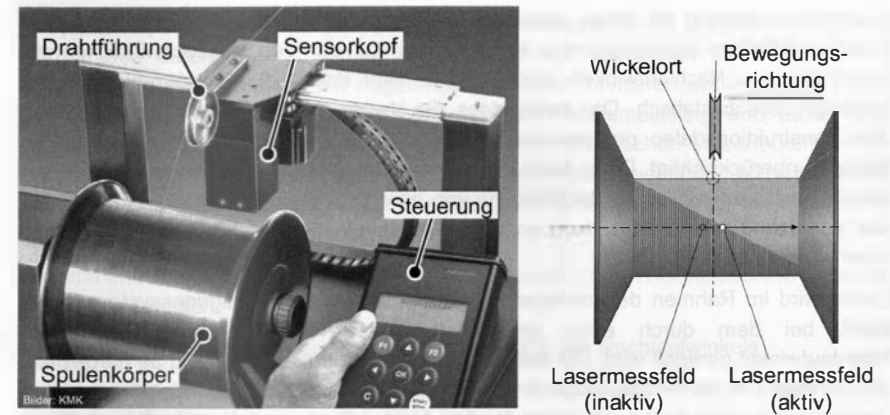


Bild 38: KMK Autowickler [89]

### 3.5.3 Fazit der Patent- und Marktbetrachtung

Die Untersuchung der aktuellen Patent- und Marktsituation hinsichtlich Lösungen für das lagegenaue Wickeln von Spulen hat gezeigt, dass zwar im Bereich der Patentschriften eine Vielzahl von Lösungsansätzen beschrieben werden, am Markt verfügbare Systeme aber nur ansatzweise eine Problemlösung bieten. Hauptziel der angebotenen Systeme ist eine möglichst gleichmäßige Füllung der Spule mit Draht, der exakte Wicklungsaufbau bleibt dabei unberücksichtigt. In der Patentliteratur hingegen finden sich verschiedenste Ansätze zur Sicherstellung eines lagegenauen Wicklungsaufbaus, wengleich diese oftmals, beispielsweise durch produktspezifische Wickel-Werkzeuge, auf spezielle Problemfälle beschränkt sind, und deshalb nicht für eine flexible Fertigung wickeltechnischer Produkte eingesetzt werden können.

### 3.6 Konzept für einen Nachlaufwinkel-geregelten Wickelprozess

Trotz der gestiegenen Anforderungen an die Qualität von Wickelprodukten, sind aktuell keine Fertigungssysteme verfügbar, die sowohl die technischen Voraussetzungen für die Fertigung lagegenauer Spulen bieten, als auch den wirtschaftlichen Bedürfnissen einer flexiblen Produktion genügen. So bedingt die Fertigung lagegenauer Spulen derzeit entweder einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten, beispielsweise für die Führung des Drahts und die Kontrolle des Drahtverlaufs, oder die Investition in teure, produktspezifische Wickelwerkzeuge oder Spulenkörper. Daher wird im Folgenden ein Lösungsansatz entwickelt, der gegenüber dem aufgezeigten Stand der Technik eine flexible Fertigung lagegenauer Spulen bei gleichzeitig minimalem personellem Arbeitsaufwand erlaubt.

Wie die Prozessanalyse in Abschnitt 3.2 zeigt, ist der Nachlaufwinkel der entscheidende Parameter bei der Fertigung lagegenauer Wicklungen. Die Einhaltung des vom Drahtdurchmesser und Spulenkörperdurchmesser abhängigen Prozessfensters ist die

Grundvoraussetzung für einen ebenmäßigen Wicklungsaufbau. Bei derzeit auf dem Markt erhältlichen Wickelsystemen ist eine Korrektur der Verlegegeschwindigkeit zur Einhaltung des Nachlaufwinkels nicht möglich. Hier erfolgt die Programmierung des Wickelprozesses statisch. Das heißt, dass die Verlegegeschwindigkeit entsprechend den Konstruktionsdaten programmiert wird. Die tatsächlich auftretenden Toleranzen bleiben unberücksichtigt. Diese feste Programmierung führt dazu, dass der Drahtführer bereits nach wenigen Lagen der Wicklung vor- bzw. hinterher eilt. In beiden Fällen führt das Verletzen der Nachlaufwinkलगrenzen im weiteren Wicklungsaufbau unweigerlich zu einer wilden Wicklung.

Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein flexibles Fertigungssystem entwickelt, bei dem durch einen prozessintegrierten Regelkreis der Drahtführer-Nachlaufwinkel geregelt wird. Die hierfür erforderliche Struktur ist in Bild 39 dargestellt. Ausgehend von der prozessbegleitenden Erfassung des Ist-Nachlaufwinkels mit einem Sensorsystem wird dieser von einem Nachlaufwinkel-Regler mit dem für die jeweiligen Wicklungsparameter erforderlichen Soll-Nachlaufwinkel abgeglichen. Die Berechnung des Soll-Nachlaufwinkels erfolgt auf Basis der Gleichungen (3.19) und (3.20) für den jeweiligen Draht- und Spulenkörperdurchmesser. Bei Abweichungen des Ist- vom Sollnachlaufwinkel kann durch eine Anpassung der Verlegegeschwindigkeit eine Korrektur des Nachlaufwinkels erfolgen.

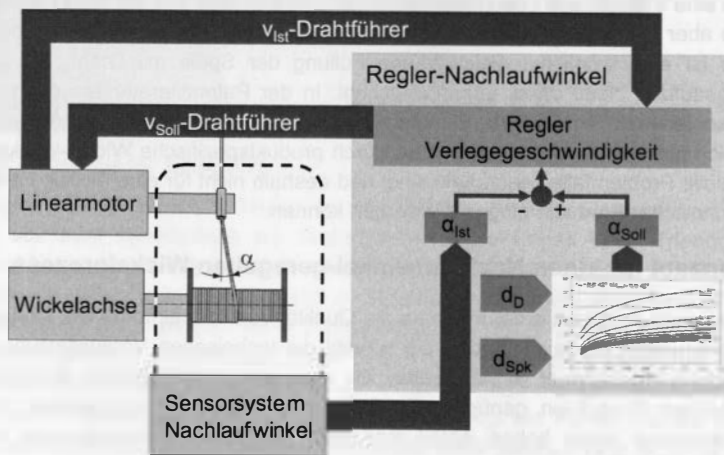


Bild 39: Struktur der Nachlaufwinkel-geregelten Wickelmaschine

Für den Aufbau des Prozessregelkreises werden in Kapitel 4 alternative Sensorlösungen sowie die zugehörigen Auswertelgorithmen für die prozessbegleitende Erfassung des Nachlaufwinkels erarbeitet und umgesetzt. Im Weiteren erfolgt in Kapitel 5 die Auslegung des Nachlaufwinkel-Regelkreises, der die Sensordaten mit den Nachlaufwinkel-Sollwerten abgleicht und geeignete Stellsignale für den Vorschubantrieb generiert, sowie die Entwicklung und Umsetzung einer prototypischen Versuchsanlage. Ein

Hauptarbeitspunkt hierbei ist die Auslegung des Antriebs für die Drahtverlegung. Wie sich in den durchgeführten Untersuchungen gezeigt hat, bieten die üblicherweise verwendeten Verlegeachsen mit Kugelumlaufspindeln Optimierungspotentiale hinsichtlich Genauigkeit und Dynamik. Zur Lösung dieser Problemstellung wird daher eine Drahtverlegung auf Basis eines direkt angetriebenen elektrischen Linearmotors entwickelt. Ziel ist es hierbei, die Vorteile die diese Antriebsart gegenüber konventionellen Lösungen hinsichtlich Regeldynamik und Positioniergenauigkeit bietet, zur Steigerung der Fertigungsqualität zu nutzen [41].

Zusammenfassend sind für den Aufbau der sensorgeführten Wickelmaschine folgende Schritte erforderlich:

- > Entwicklung von Sensorlösungen für die Erfassung des Nachlaufwinkels
- > Konzeption einer Verlegeachse für die hochdynamische und -präzise Positionierung des Drahtführers
- > Auslegung eines Regelkreises für die Regelung des Nachlaufwinkels und die Positionierung des Drahtführers
- > Umsetzung in ein prototypisches Wickelsystem

### Zusammenfassung

Die Fertigung lagegenauer Wicklungen stellt hohe Anforderungen an die Gestaltung des Wickelprozess. Für einen lückenfreien Wicklungsaufbau muss ein vom Drahtdurchmesser und Spulenkörperdurchmesser abhängiger Nachlaufwinkel eingehalten werden. Dies ist infolge der Toleranzen von Drahtdurchmesser und Spulenkörper-Kammerbreite nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich. Weitere Ungenauigkeiten die sich negativ auf die Einhaltung des Nachlaufwinkels auswirken, werden durch die in Wickelmaschinen gebräuchlichen Verlegeachsen verursacht.

Für die flexible Fertigung lagegenauer Wicklungen bieten am Markt verfügbare Lösungen nur ansatzweise eine Problemlösung, da diese lediglich auf eine gleichmäßige Füllung der Spule mit Draht abzielen, dabei den exakten Wicklungsaufbau aber unberücksichtigt lassen. Die in der Patenliteratur offenbarten Ansätze zur Sicherstellung eines lagegenauen Wicklungsaufbaus sind überwiegend auf spezielle Problemfälle beschränkt und deshalb nicht für eine flexible Fertigung wickeltechnischer Produkte geeignet.

Im Folgenden wird daher ein flexibles Fertigungssystem mit prozessintegriertem Regelkreis für die automatisierte Fertigung lagegenauer Wicklungen entwickelt. Neben der Sensorik zur Erfassung des Nachlaufwinkels sind hierzu insbesondere eine hochdynamische Verlegeachse sowie der Nachlaufwinkel-Regelkreis zu konzipieren und prototypisch umzusetzen.

#### 4 Entwicklung alternativer Sensorlösungen für die Bestimmung des Nachlaufwinkels

Im vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, dass der Nachlaufwinkel der entscheidende Parameter für die Fertigung lagegenauer Wicklungen ist. Der entworfene Nachlaufwinkel-Regelkreis stellt daher durch eine Anpassung des Drahtführervorschubs eine Einhaltung des zulässigen Nachlaufwinkels sicher. Hierzu ist es erforderlich den Ist-Nachlaufwinkel prozessbegleitend zu erfassen und auszuwerten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hierzu im Folgenden alternative Sensorlösungen entwickelt und umgesetzt.

Um Beschädigungen am Draht oder Beeinflussungen des Prozesses durch die Messwerterfassung ausschließen zu können, bleiben bei der Entwicklung der Sensorlösungen taktile Sensorsysteme unberücksichtigt. Der Einsatz von induktiven Abstandssensoren für die Erfassung des Nachlaufwinkels wird ebenfalls nicht verfolgt, da für eine sichere Messwerterfassung mit diesem Sensortyp, auch bei geringen Messabständen, Messobjekte mit Abmaßen im Millimeter-Bereich erforderlich sind [49]. Bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Drahtdurchmessern im Zehntel-Millimeter-Bereich, kann von keiner ausreichenden Bedämpfung des Mess-Schwingkreises induktiver Sensoren ausgegangen werden. Auch kapazitive sowie ultraschallbasierte akustische Abstandssensoren müssen für den vorliegenden Anwendungsfall als ungeeignet eingestuft werden. Grund ist der Mindestdurchmesser des für die Abstandsbestimmung mit diesen Sensortypen erforderlichen Messflecks, der in der Größenordnung von mehreren Millimetern liegt und somit die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Drahtdurchmesser übersteigt [49][54]. Berührungslos arbeitend, unabhängig vom Messobjekt-Material einsetzbar und mit Auflösungen im Sub-Millimeter-Bereich verfügbar sind optische Sensoren, weshalb der Fokus der nachfolgend beschriebenen Entwicklungsarbeiten auf optischen Sensorlösungen, wie Laser-Linienscannern oder Bilderkennungssystemen liegt [49][50][54].

Die Erfassung des Nachlaufwinkels ist mit optischen Sensoren nach zwei alternativen Prinzipien möglich. Zum einen kann die Bestimmung direkt am Drahtstück zwischen Drahtführer und Wickelort erfolgen. Hierzu muss lediglich die Position eines Teilstücks des Drahtes relativ zum Drahtführer bekannt sein. Hierdurch ist der Verlauf des Drahtes eindeutig festgelegt und der Nachlaufwinkel kann aus den geometrischen Beziehungen von Messpunktposition zu Drahtführer-Auslass berechnet werden. Alternativ ist eine Bestimmung des Nachlaufwinkels indirekt über eine Auswertung des Wicklungsaufbaus möglich. Hierzu muss aus diesem die Position der aktuell gewickelten Windung ermittelt werden. Ist diese bekannt, ist eine Berechnung des Nachlaufwinkels unter Berücksichtigung der Position des Drahtführers möglich. Neben der Erfassung des Nachlaufwinkels, können die einzelnen Windungspositionen darüber hinaus dazu genutzt werden, den Wicklungsaufbau der Spule zu speichern. Hierdurch sind Aussagen über den inneren Aufbau und somit über die Qualität einer Spule möglich.



Auf Grundlage der beschriebenen Ansätze zur Erfassung des Nachlaufwinkels, werden im Weiteren alternative Lösungen für die sensorielle Ermittlung des Nachlaufwinkels entwickelt. Für die direkte Messung werden zwei Systeme betrachtet, zum einen auf Basis eines Bildverarbeitungssystems, zum anderen mit einem Zeilensensor als Detektor. Im System für die indirekte Bestimmung des Nachlaufwinkels erfolgt die Vermessung des Wicklungsaufbaus mit einem Laser-Profilscanner. Neben der Auswahl geeigneter Sensoren erfolgt die Betrachtung und Analyse der relevanten Randbedingungen sowie die prototypische Realisierung der Erfassungssysteme. Randbedingungen sind hierbei eine möglichst hohe Flexibilität hinsichtlich Drahtfarbe und Drahtdurchmesser sowie eine aufwandsarme Integration in eine Linear-Wickelmaschine. Als weitere Anforderung wird definiert, dass für einen störungsfreien Ablauf der Nachlaufwinkelregelung mindestens einmal pro Windung ein Messwert durch das Sensorsystem erzeugt wird. Das bedeutet, dass sich die Grenzdrehzahl bis zu der ein Nachlaufwinkel-Sensorsystem eingesetzt werden kann, aus der realisierbaren Messfrequenzrate ergibt.

#### 4.1 Nachlaufwinkelerfassung mittels Bildverarbeitung

Die Bildverarbeitung ist heute ein Standard-Werkzeug der Automatisierung. Dank gesteigerter Rechenerleistung, hochauflösender Kameras, schneller Kamera-Schnittstellen und leistungsfähiger Auswertesoftware bei gleichzeitig stark fallenden Systemkosten, wird sie in zunehmendem Maße für die Steuerung und Regelung in Fertigungsanlagen eingesetzt [4]. Nach [21] ist die industrielle Bildverarbeitung definiert als die berührungslose Erfassung, visuelle Darstellung und automatische Auswertung einer realen Szene aus einer industriellen Umgebung. Innerhalb der Auswertung erfolgt die Gewinnung qualitativer und/oder quantitativer Aussagen über den Bildinhalt. Kennzeichen der industriellen Bildverarbeitung ist, dass nach Abschluss des Bildverarbeitungsprozesses auf Grundlage der ermittelten Ergebnisse oder Messwerte automatische Entscheidungen folgen. Die hieraus generierten Steuerparameter bestimmen nachfolgend den Verlauf ganzer Fertigungsprozesse oder einzelner Teilprozesse oder werden zur Kontrolle einer einzelnen Fertigungseinrichtung, beispielsweise einer Maschine, herangezogen. [21][82]

##### 4.1.1 Beleuchtungsarten für die Bildverarbeitung

Ein industrielles Bildverarbeitungssystem setzt sich im Wesentlichen aus Beleuchtung, Optik, Kamera, Auswerterechner und Software zusammen. Von entscheidender Bedeutung bei der Auslegung eines Bildverarbeitungssystems ist die Beleuchtung, wobei für den weiteren Systemaufbau insbesondere die Beleuchtungsrichtung ausschlaggebend ist [82]. Diese lässt sich in zwei, durch die Objektebene getrennte, Richtungen einteilen, wie in Bild 40 gezeigt.

Bei einer Aufsichtbeleuchtung erfolgt die Beleuchtung aus Richtung der Kamera, bei einer Durchlichtbeleuchtung liegt die Beleuchtung im Halbraum hinter der Objektebene. Für die Bestimmung des Nachlaufwinkels mittels Bilderkennung wurde ein Systemaufbau auf Basis der Durchlichtbeleuchtung gewählt, da diese zahlreiche ausschlaggeben-

de Vorteile bietet. Durch die kontrastreiche Abbildung der Prüfobjekte lassen sich hohe Genauigkeiten bei der Bildauswertung erzielen. Die Abbildung ist unabhängig von den optischen Eigenschaften des Prüfobjekts und somit auch geeignet für unterschiedliche Drahtfarben. Auch verursachen Reflexionen auf der stark reflektierenden Lack- und Drahtoberfläche keine Störungen bei der Bilderfassung, da nicht das reflektierte Licht sondern lediglich der Schattenwurf des Messobjektes ausgewertet wird. [50][82]

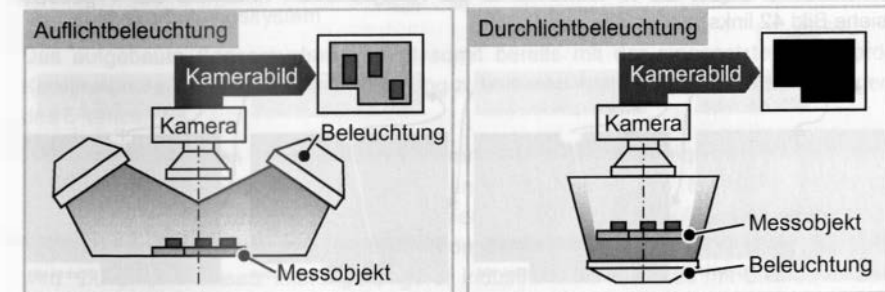


Bild 40: Gegenüberstellung von Aufsicht- und Durchlichtbeleuchtung

##### 4.1.2 Prototypische Realisierung der Nachlaufwinkelerfassung mittels Bildverarbeitung

Bild 41 zeigt den prototypischen Aufbau des Bildverarbeitungssystems für die Messung des Nachlaufwinkels. Die Kamera, in den Vorversuchen eine Standard-USB-Kamera mit einer Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten, ist direkt am Drahtführer montiert und kann über einen Gelenkarm ausgerichtet werden. Die Durchlichtbeleuchtung erfolgt mit einer dimmbaren, diffusen Halogenleuchte. Der dargestellte Bildausschnitt zeigt beispielhaft die Aufnahme eines 0,2 mm Drahtes.

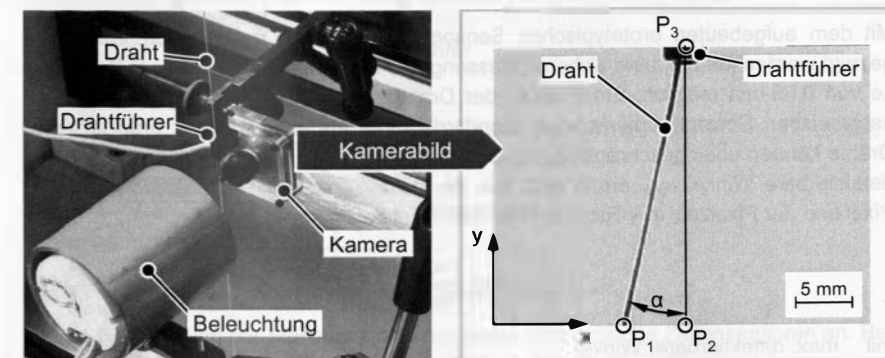


Bild 41: Versuchsaufbau und Kamerabild der Nachlaufwinkelerfassung

Für die Bestimmung des Nachlaufwinkels aus den von der CCD-Kamera aufgezeichneten Bildern wird im aufgebauten Prototypensystem die Bilderkennungssoftware Roboreal eingesetzt. Der entwickelte Erkennungsablauf startet mit der Einstellung der grundlegenden Kameraparameter, wie Belichtung, Helligkeit, Kontrast etc. Anschließend wird mit der Funktion „Threshold“ eine Binärisierung des Bildes vorgenommen. Hierbei werden alle Bildbereiche deren Helligkeitswert oberhalb des eingestellten Schwellwerts liegen auf 0, Bildbereiche mit Helligkeitswert unterhalb auf 1 gesetzt (siehe Bild 42 links).

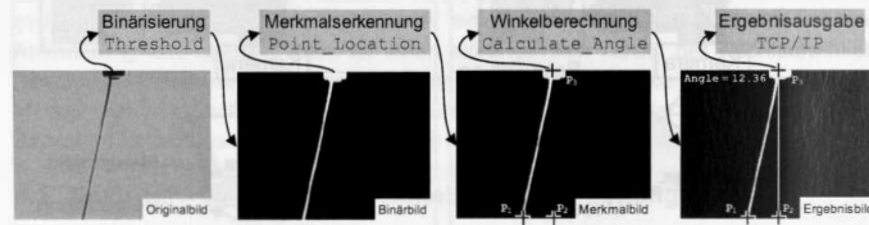


Bild 42: Ablauf der Winkelbestimmung in Roboreal

Der Verlauf des Drahtes ist durch dessen Schnittpunkt  $P_1$  mit dem unteren Bildrand und der Position des Drahtführers am oberen Bildrand  $P_3$  bestimmt. Der für die Winkelbestimmung erforderliche Punkt  $P_2$  ergibt sich durch Projektion des Punktes  $P_3$  auf den unteren Bildrand. Das Auffinden dieser Punkte erfolgt in Roboreal mit Hilfe der Funktion „Point\_Location“, die eine Bestimmung charakteristischer Bildpunkte entlang der Bildränder ermöglicht. Mit der Funktion „Calculate\_Angle“ erfolgt abschließend die Berechnung des Nachlaufwinkels aus den Koordinaten der Punkte  $P_1$  bis  $P_3$  nach den Winkelsätzen des rechtwinkligen Dreiecks.

### 4.1.3 Bewertung der Nachlaufwinkelerfassung mit Bildverarbeitung

Mit dem aufgebauten prototypischen Sensorsystem ist, wie anhand von Versuchen gezeigt werden konnte, eine sichere Erfassung des Nachlaufwinkels ab einer Drahtstärke von 0,05 mm möglich. Ein Einfluss der Drahtfarbe auf das Messergebnis ist nicht nachweisbar. Sowohl kupferfarbene Standard-Drähte als auch rot oder grün lackierte Drähte können uneingeschränkt detektiert werden. Der maximal mit dem Sensorsystem detektierbare Winkel  $\alpha_{max}$  ergibt sich aus der halben Pixelzahl in x-Richtung von 320 Pixel und der Pixelzahl in y-Richtung von 480 Pixel zu:

$$\alpha_{maxBV} = \arctan\left(\frac{\frac{1}{2} n_{Pix,x}}{n_{Pix,y}}\right) = 33,7^\circ \quad (4.1)$$

mit max. detektierbarer Winkel  $\alpha_{maxBV}$  in  $^\circ$   
 Bildverarbeitungssystem  
 Pixelzahl in x-Richtung  $n_{Pix,x} = 640$   
 Pixelzahl in y-Richtung  $n_{Pix,y} = 480$

Die Winkel-Auflösung des Sensorsystems ergibt sich aus dem maximal detektierbaren Winkel  $\alpha_{maxBV}$  sowie der halben Pixelzahl in x-Richtung von 320 Pixel zu:

$$\delta_{aBV} = \frac{\alpha_{maxBV}}{\frac{1}{2} n_{Pix,x}} = 0,105^\circ \quad (4.2)$$

mit Winkelauflösung  $\delta_{aBV}$  in  $^\circ$   
 Bildverarbeitungssystem

Das aufgebaute Sensorsystem verfügt somit bereits mit der eingesetzten Standard-Kamera über eine ausreichende Auflösung zur Erfassung selbst geringer Auslenkungen des Drahtes.

Mit dem aufgebauten Versuchssystem kann eine Messsignalfrequenz, d.h. die vom Auswertesystem, bestehend aus Kamera und Auswertesoftware, lieferbare Anzahl an Messwerten pro Sekunde, von 17 Hz realisiert werden. Das bedeutet, dass bis zu einer Drehzahl von 1.000 UpM einmal pro Umdrehung ein Nachlaufwinkel-Istwert erzeugt wird. Durch den Einsatz leistungsfähigerer Industrie-USB-Kameras mit Bildfrequenzen von bis zu 90 Hz kann die Messsignalfrequenz noch gesteigert werden, so dass die Bereitstellung eines Messwertes je Umdrehung bis 5.400 UpM möglich ist [82].

## 4.2 Nachlaufwinkelmessung mit optischem Zeilensensor

Statt den gesamten Drahtverlauf zwischen Drahtführer und Wickelort optisch zu erfassen und hinsichtlich des Nachlaufwinkels auszuwerten, kann die Messaufgabe auf die Bestimmung eines einzelnen Messpunktes auf dem Draht innerhalb dieses Bereichs reduziert werden. Ist dessen Position relativ zum Drahtführer bekannt, ist eine Berechnung des Nachlaufwinkels auf Grundlage der geometrischen Beziehungen im rechtwinkligen Dreieck möglich (siehe Bild 43).

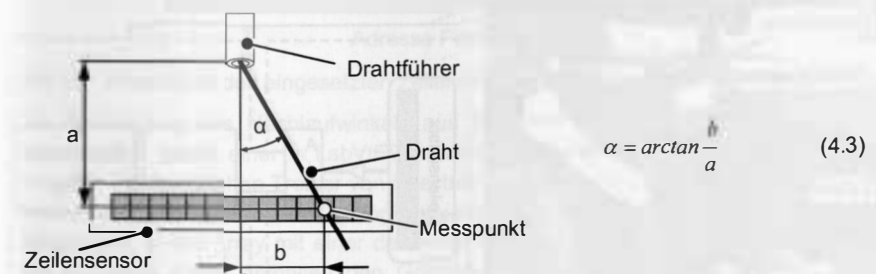
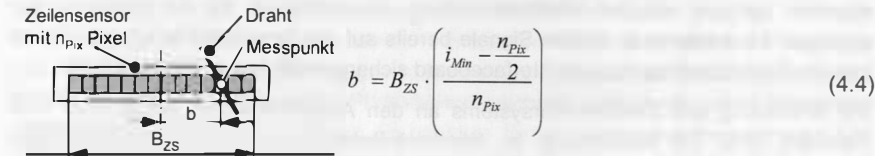


Bild 43: Nachlaufwinkelmessung mittels Zeilensensor

Für die Bestimmung der Messpunktposition bieten sich optische Zeilensensoren an. Bei dieser Sensorart sind die lichtempfindlichen Pixel linienförmig nebeneinander angeordnet, d. h. der Bildaufnehmer ist eindimensional. Das vom Zeilensensor aufgenommene Bild ist hierbei ein Helligkeitsschnitt über das aufgenommene Objekt. Zeilensensoren ermöglichen sehr kurze Auslesezeiten von bis zu 0,1 ms für eine komplette Zeile,

Minimum die Mitte des Drahtes anzeigt. Für die Bestimmung von Extremwerten in Datenreihen verfügt LabVIEW über eine Min-Max-Funktion, die die Zellenadressen der Extremstellen innerhalb des auszuwertenden Arrays ermittelt. Nach Überprüfen des gesamten Datenarrays wird die Zellenadresse des Kurvenminimums am Blockausgang bereitgestellt. Aus dieser kann mit Gleichung (4.4) die Drahtposition relativ zur Sensormitte berechnet und mit Gleichung (4.3) abschließend der Nachlaufwinkel  $\alpha$  bestimmt werden.



mit Drahtposition	$b$	in mm
Sensorbreite	$B_{ZS}$	in mm
Zellenadresse Kurvenminimum	$i_{Min}$	in -
Pixelzahl	$n_{pix}$	in -

#### 4.2.2 Bewertung der Nachlaufwinkelerkennung mit Zeilensensor

Mit dem prototypischen Sensorsystem auf Basis eines Zeilensensors ist die Erfassung des Nachlaufwinkels von Drähten mit einem Durchmesser ab 0,05 mm reproduzierbar möglich. Die in den Versuchen betrachteten Drahtfarben (kupfern, rot, grün) haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Die Winkel-Auflösung des Sensorsystems ergibt sich aus dem maximal detektierbaren Winkel  $\alpha_{max}$ , der vom Abstand des Sensors zum Drahtführer abhängt, sowie der halben Pixelzahl in x-Richtung von maximal 512 Pixel zu:

$$\delta_{\alpha ZS} = \frac{\alpha_{max ZS}}{\frac{1}{2} n_{pix}} = \frac{\arctan\left(\frac{\frac{1}{2} B_{ZS}}{a}\right)}{\frac{1}{2} n_{pix}} \quad (4.5)$$

mit Winkelauflösung Zeilensensorsystem	$\delta_{\alpha ZS}$	in °
maximal detektierbarer Winkel Zeilensensorsystem	$\alpha_{max ZS}$	in °
Abstand Sensor-Drahtführer	$a$	in mm

Für die Abmaße und Kennwerte des Versuchssystems ( $n_{pix} = 1.024$ ,  $B_{ZS} = 10$  mm,  $a = 30$  mm) ergibt sich somit eine Winkelauflösung von ca.  $0,02^\circ$  bei einem erfassbaren Winkelbereich von  $\pm 9,46^\circ$ .

Die Messsignalfrequenz des aufgebauten Sensorsystems wird von der Zykluszeit der Auswerteschleife in LabVIEW bestimmt. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass Signalfrequenzen von 500 Hz prozesssicher möglich sind. Somit kann mit der Nachlaufwinkelerfassung auf Basis des Zeilensensors bis zu einer Drehzahl von 30.000 UpM einmal pro Umdrehung ein Messwert erzeugt werden.

#### 4.3 Prozessüberwachung mit Laser-Profilscanner

Mit dem Ziel, neben der Ermittlung des Nachlaufwinkels für die Regelung des Wicklungsprozesses gleichzeitig einen Beitrag zur Qualitätssicherung im Bereich der Wickeltechnik zu leisten, wird im Folgenden eine Sensorlösung auf Basis eines Laser-Profilscanners entwickelt. Diese Art von Sensor ermöglicht ein zweidimensionales Vermessen von Höhenprofilen, wodurch eine Erfassung des Wicklungsaufbaus bereits während des Wicklungsprozesses ermöglicht wird. Eine Überwachung der Einhaltung bestimmter Parameter, wie die Lage der einzelnen Windungen oder die geometrischen Abmessungen, kann somit prozessbegleitend erfolgen.

Neben der Prozessregelung durch die Kontrolle des Nachlaufwinkels, bietet die Erfassung und Speicherung der Wicklungsdaten neue Möglichkeiten der Qualitätssicherung in der Wickeltechnik. Die Bestimmung der Qualität einer Spule erfolgt derzeit neben der messtechnischen Erfassung der elektrotechnischen Kennwerte, hauptsächlich durch eine subjektive visuelle Beurteilung des Wicklungsaufbaus. Hierbei werden primär die Parameter Gleichmäßigkeit des Wickelbildes, Füllgrad der Spule und Querschnittsform der Wicklung betrachtet. Aussagen über den inneren Aufbau der Spule können nicht erfolgen. Hierzu müsste die Spule zerstörend, mittels eines Schlicfs untersucht werden, wobei auch hiermit exakte Aussagen über den Lagenaufbau schwierig sind. Unter der Voraussetzung, dass es zu keinen Verschiebungen im Wicklungsaufbau kommt, kann mit einem Laser-Profilscanner der Aufbau einer Spule während des Wickelvorgangs erfasst werden. Durch die Detektion der einzelnen Windungspositionen ist der innere Aufbau der Spule bekannt und gesicherte Aussagen über den inneren Aufbau einer Spule möglich.

Die Erfassung des Wicklungsaufbaus erfolgt in dem prototypisch aufgebauten Sensorsystem mit dem Laser-Profilscanner scanCONTROL 2800-25 der Firma Micro Epsilon. Dieser Sensor bestimmt das Höhenprofil des zu vermessenden Objekts nach dem Prinzip des Lichtschnitts (siehe Bild 46). Mittels einer Linienoptik wird eine Laserlinie auf die Oberfläche des Messobjekts projiziert und die entstehende Profillinie von einem CMOS-Bildsensor erfasst. Bei der anschließenden Auswertung im Auswerte-Controller kann das Profil aus der Lage der Profilkurve auf der Sensoreinheit und dem Abstand zwischen Linien- und Empfangsoptik mittels Koordinatentransformation errechnet werden. So kann neben dem Abstand zwischen Linienoptik und Messobjekt (z-Koordinate), auch die zu jedem einzelnen Abstandswert gehörende Position entlang der Laserlinie (x-Koordinate) in Bezug auf das Koordinatensystem des Laserscanners bestimmt werden.

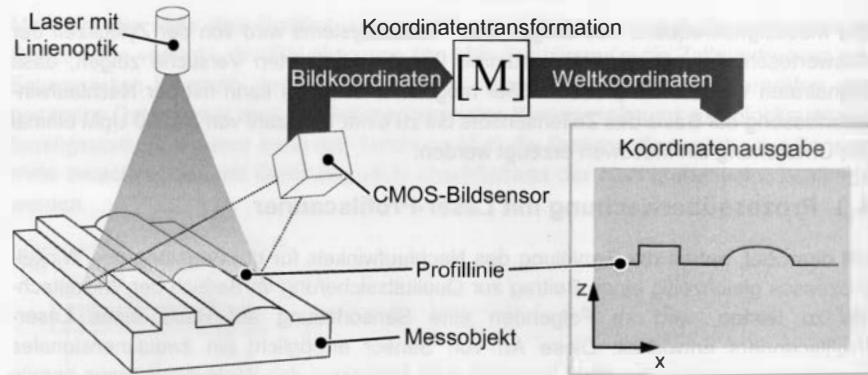


Bild 46: Prinzip des Lichtschnittverfahrens [82]

Zur Aufbereitung der Profildaten ist eine Auswertesoftware erforderlich, welche die aufgezeichneten Profildaten filtert, aufbereitet, auf Plausibilität prüft und die aktuelle Windungsposition bestimmt. Darüber hinaus muss zur Protokollierung des Wicklungsprozesses auch die Kammerbreite und der tatsächliche Durchmesser des verwickelten Drahtes festgehalten werden. Zudem wird für die Aufbereitung der gespeicherten Sensordaten zu einem 3D-Modell CAD-Routinen benötigt, durch die eine automatische Erstellung des Spulenmodells in einer CAD-Umgebung erfolgt<sup>3</sup>. In Bild 47 sind die einzelnen Schritte der Wicklungserkennung mittels Laser-Profilscanner dargestellt.



Bild 47: Ablauf der Wicklungserkennung mittels Laser-Profilscanner

### 4.3.1 Konzept für die Erfassung des Wicklungsaufbaus mit Laser-Profilscanner und Analyse der Messkette

Die Grundlage für die Software zur Erfassung des Wicklungsaufbaus mit Laser-Linienscanner ist das Prinzip der Bild-Subtraktion [21]. In der Bildverarbeitung heißt das, dass zwei Bilder pixelweise voneinander subtrahiert werden, wodurch ein Ergeb-

<sup>3</sup> Bei der Erstellung der Auswertesoftware wurde der Verfasser von Herrn. Dipl.-Ing. Markus Gottschalk unterstützt.

nisbild entsteht, das die Unterschiede zwischen den beiden Eingangsbildern zeigt. Gleichung (4.6) fasst diesen Zusammenhang zusammen.

$$g'(x,y) = g_n(x,y) - g_{n-1}(x,y) \quad (4.6)$$

mit Ergebnisbild	$g'(x,y)$
Aktuelles Bild	$g_n(x,y)$
Vorgänger Bild	$g_{n-1}(x,y)$

Diese Vorgehensweise auf die Erfassung des Wicklungsaufbaus übertragen, bedeutet, dass pro Umdrehung des Spulenkörpers eine Profilaufnahme (siehe Bild 48) der Spulenoberfläche erfolgt, wobei die Aufnahme durch das Nullspur-Signal des Drehgebers der Wickelachse ausgelöst wird. Da sich durch die Subtraktion zweier aufeinander folgender Profile die Gleichanteile in den beiden Aufnahmen aufheben, ergibt sich eine Profillinie, aus der sich eindeutig die Position der neu hinzu gekommenen Windung ableiten lässt.

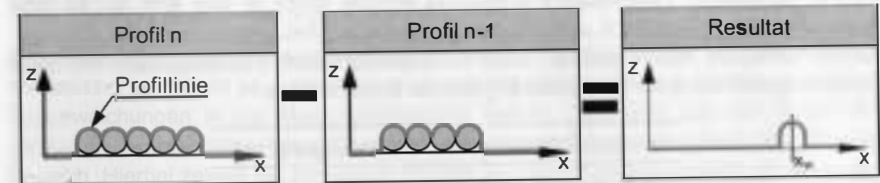
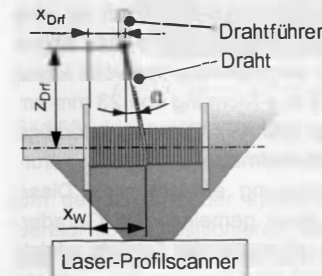


Bild 48: Anwendung des Prinzips der Bild-Subtraktion für die Wicklungserkennung

Aus der ermittelten Wicklungsposition und der Position des Drahtführers in x- und z-Richtung bezüglich des Spulenkörpers kann der Nachlaufwinkel mit Gleichung (4.7) berechnet werden. Hierbei werden in x-Richtung die Positionen des Drahtführers  $x_{Drf}$  und die der Wicklung  $x_W$  ausgehend vom linken Flansch des Spulenkörpers betrachtet, der z-Abstand  $z_{Drf}$  des Drahtführers in Bezug auf die Mittelachse des Spulenkörpers.



$$\alpha = \arctan \left( \frac{x_W - x_{Drf}}{z_{Drf}} \right) \quad (4.7)$$

mit x-Wicklungsposition	$x_W$	in mm
x-Drahtführerposition	$x_{Drf}$	in mm
z-Abstand Drahtführer	$z_{Drf}$	in mm

Unter Berücksichtigung dieses Auswertepinzips werden als Grundlage für die weitere Entwicklung des Sensorsystems im Folgenden die prozessrelevanten Parameter hinsichtlich ihres Einfluss auf Erfassung des Wicklungsaufbaus mittels Laser-Profilscanner analysiert. Die Betrachtung umfasst hierbei die an der Messkette beteiligten Elemente Sensor, Prozessparameter, Spulenkörper und Draht sowie deren gegenseitigen Wechselwirkungen.

### Sensor

Der eingesetzte Laser-Liniensensor hat eine Punktmessfrequenz von 250 kHz und somit bei der maximalen Auflösung von 1.024 Punkten pro Profil, eine Profillrate von ca. 250 Hz. Die tatsächliche realisierbare Frequenz bei der Speicherung und Auswertung von Profilen ist jedoch durch weitere Faktoren begrenzt. Insbesondere die Rechenleistung des Auswerte-PCs ist für die maximal erreichbare Geschwindigkeit von entscheidender Bedeutung. Weiteren Einfluss auf die maximale Profillrate hat die Belichtungszeit, die in einem Bereich zwischen 10  $\mu$ s und 40,95 ms eingestellt und so an die vorliegende Messaufgabe angepasst werden kann. In [93] sind für gängige Materialien die in Tabelle 6 aufgeführten Belichtungszeiten angegeben. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass für kupferfarbenen Standard-Draht mit einer Belichtungszeit von 6 ms die besten Ergebnisse erzielt werden.

Werkstoff Messobjekt	Belichtungszeit ms
Kunststoff weiß	0,1 – 0,5
Kunststoff farbig	0,5 – 1
Kunststoff schwarz	1 - 10
Metall blank	5 - 10

Tabelle 6: Wertetabelle für die Belichtungszeiten des Laser-Profilscanners in Abhängigkeit des Messobjekt-Werkstoffs [93]

Die aus 1.024 x 1.024 Pixel bestehende CMOS-Bildmatrix des Laser-Profilscanners kann in 96 vordefinierten Bereichsaufteilungen betrieben werden. Hierdurch ist eine softwaretechnische Anpassung des Sensor-Messfelds und somit des erfassten Messbereichs an die jeweilige Messaufgabe möglich. Je nach eingestelltem Messfeld ergibt sich ein Messbereich von bis zu 55 mm in z-Richtung und in x-Richtung von 23 mm am Anfang bzw. 41 mm am Ende des Messbereichs (siehe Bild 49). Das trapezförmige Messfeld wird durch die geneigte Anordnung der CMOS-Bildmatrix im Sensor verursacht, durch die die Einhaltung der Scheimpflug<sup>4</sup>-Bedingung erreicht wird. Diese besagt, dass Objekt-, Objektiv- und Bildebene sich in einer gemeinsamen Geraden schneiden müssen, damit die Abbildung der Objektebene mit maximaler Schärfe erfolgt. Übertragen auf den vorliegenden Anwendungsfall bedeutet das, dass alle Messpunkte des Messfelds scharf in die Detektorebene abgebildet werden [129].

<sup>4</sup> Theodor Scheimpflug (\* 7.10.1865; † 22.08.1911) österreichischer Fotograf und Kartograph

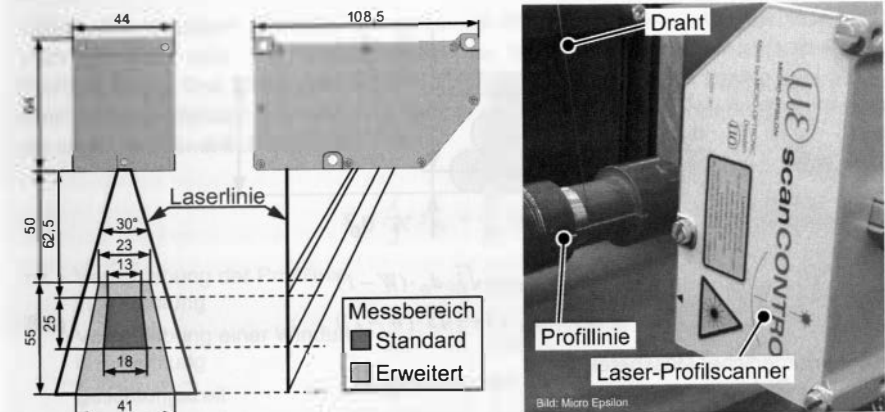


Bild 49: Abmaße und Messbereiche des Laser-Profilscanners [78] (links); Messung mit dem Laser-Profilscanner (rechts)

Die Genauigkeit der Messwerteerfassung hängt von der Größe des eingestellten Messfeldes ab, wobei es insbesondere an den Rändern des Messbereichs zu Linearitätsabweichungen in der Messwerteerfassung kommt. Dies wird aus den in Bild 50 gezeigten Auswertungen des Sensorabnahmeprotokolls des eingesetzten Sensors deutlich. Hierbei zeigen die schwarzen Punkte im linken Bild Messpunkte mit Messfehlern oberhalb der Linearitätsgrenze von 25  $\mu$ m an, im rechten oberhalb von 50  $\mu$ m.

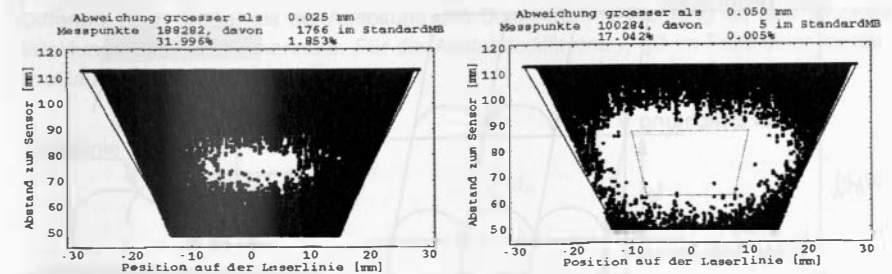
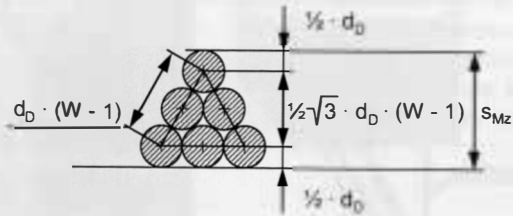


Bild 50: Linearitätsabweichungen in der Messwerteerfassung bei einer Linearitätsgrenze von 25  $\mu$ m (links) und 50  $\mu$ m (rechts) des eingesetzten Sensors [104]

Um den Einfluss der systembedingten Messgenauigkeiten zu minimieren, ist der Sensor so zu positionieren, dass die zu erfassende Messobjektoberfläche in die Mitte des Messfeldes fällt. Das erforderliche Messfenster wird bei der Erfassung des Wicklungsprozesses in x-Richtung durch die Kammerbreite und in z-Richtung durch den Drahtdurchmesser und die Anzahl der Lagen  $W$  bestimmt. Der erforderliche Messbereich in z-Richtung entspricht der Höhe der lagegenauen Wicklung. Somit gilt:





$$s_{Mz} = d_D + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot d_D \cdot (W - 1) = d_D \cdot (1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot (W - 1)) \quad (4.8)$$

mit erforderlicher Messbereich in z-Richtung  $s_{Mz}$  in mm

**Prozessparameter**

Für die Erfassung des Wicklungsaufbaus mit dem Laser-Profilscanner sind in Bezug auf die Prozessparameter in erster Linie die Wickeldrehzahl, die in Umdrehungen pro Minute angegeben wird, und die Verlegegeschwindigkeit von Bedeutung. Bei konstanter Belichtungszeit des Laserscanners nimmt bei einer Erhöhung der Wickeldrehzahl die während einer Belichtung überstrichenen Strecke auf der Spulenoberfläche proportional zu, wie in Bild 51 anhand der schematisch dargestellten Aufsicht auf eine Wicklung bestehend aus drei Windungen zu erkennen ist.

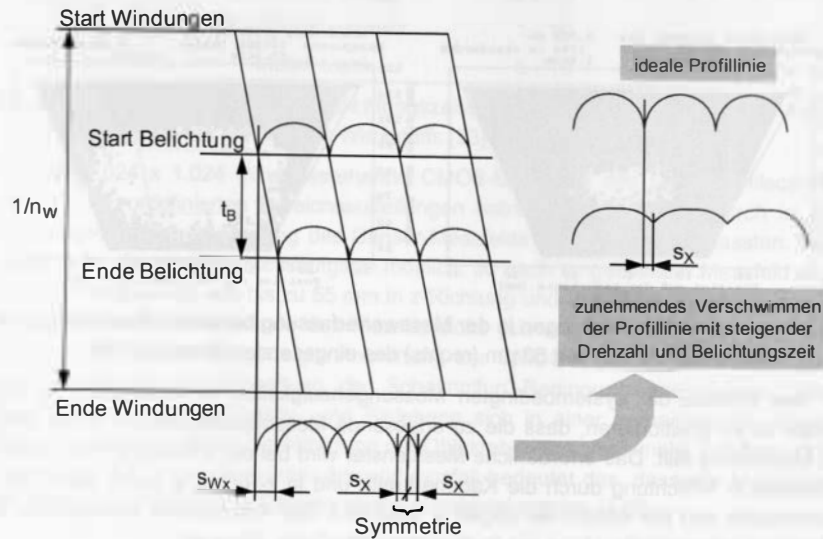


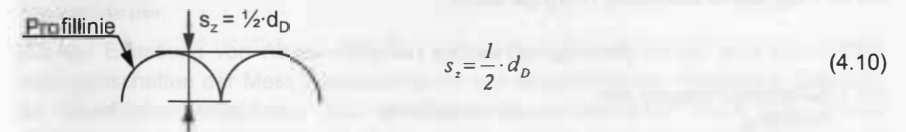
Bild 51: Verschmimmen der aufgezeichneten Profillinie

Infolge des schrägen Verlaufs der einzelnen Windungen, führt eine Erhöhung der Wickeldrehzahl oder der Belichtungszeit zu einer zunehmend verschwommenen Profilaufnahme. Das heißt, das ideale Halbkreisprofil der einzelnen Drähte wird abgeflacht und auseinander gezogen vom Sensor erfasst. Für die Verschiebung der Profillinie ergibt sich somit aus Bild 51:

$$s_x = \frac{1}{2} \cdot s_{wx} = \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot t_B \cdot n_w \quad (4.9)$$

mit Verschiebung der Profillinie in x-Richtung	$s_x$	in mm
Verschiebung einer Windung in x-Richtung	$s_{wx}$	in mm
Belichtungszeit	$t_B$	in s
Wickeldrehzahl	$n_w$	in Hz

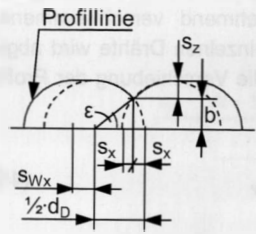
Da bei jeder Umdrehung der Wickelspindel die Messung am selben Punkt neu startet, ist die Verschiebung der Berührungspunkte zweier Wicklungen (siehe Gleichung (4.9)) konstant. Die Breite hinzukommender Wicklungen entspricht deshalb stets dem Drahtdurchmesser, so dass der Sachverhalt für die Berechnung des Drahtdurchmessers bei homogenem Lagenaufbau nur bei der ersten und letzten Windung von Bedeutung ist. Die seitliche Verschiebung infolge des Verschmimmens der Profilaufnahmen führt darüber hinaus dazu, dass der Abstand zwischen Minimum und Maximum der Profilkurve in z-Richtung (nachfolgend mit Abstandsdifferenz  $s_z$  bezeichnet) im Extremfall, d.h. für  $t_B > 1/n_w$ , auf Null absinkt. Wird die Belichtungszeit jedoch so gewählt, dass die Differenz noch größer als die Auflösung des Scanners in z-Richtung ist, sind einzelne Wicklungen dennoch erkennbar. Für die Abstandsdifferenz  $s_z$  gilt im Falle einer idealen Profilaufnahme ( $t_B \rightarrow 0$ ):



$$s_z = \frac{1}{2} \cdot d_D \quad (4.10)$$

mit Abstandsdifferenz  $s_z$  in mm

Mit zunehmender Belichtungszeit nimmt die Verschiebung der Profillinie zu und es verringert sich die Abstandsdifferenz. Es gilt:



$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{\frac{1}{2}d_D - s_x}{\frac{1}{2}d_D}\right) \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} s_z &= \frac{1}{2} \cdot d_D - b \\ &= \frac{1}{2} \cdot d_D - \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot \sin(\varepsilon) \\ &= \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot (1 - \sin(\varepsilon)) \\ &= \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot \left(1 - \sin\left(\arccos\left(\frac{\frac{1}{2}d_D - s_x}{\frac{1}{2}d_D}\right)\right)\right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot \left(1 - \sin\left(\arccos\left(\frac{\frac{1}{2}d_D - \frac{1}{2}d_D \cdot t_B \cdot n_W}{\frac{1}{2}d_D}\right)\right)\right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot d_D \cdot (1 - \sin(\arccos(1 - t_B \cdot n_W))) \end{aligned} \quad (4.12)$$

mit Überschneidungs-Höhe  $b$  in mm  
Überschneidungs-Winkel  $\varepsilon$  in °

Des Weiteren bestimmen die Belichtungszeit des Laserscanners und die Drehzahl der Wickelspindel die Strecke  $s_{IBn}$ , die während einer Profilaufnahme auf der Spulenoberfläche überstrichen wird. Zu deren Bestimmung ist der Außendurchmesser der Wicklung erforderlich. Bei kreisförmigen Spulenkörpern gilt für Wicklungen mit der Lagenzahl  $W$ :

$$d_W = d_{Spk} + 2 \cdot h_W$$

mit  $h_W = s_{Mz}$  (siehe Gleichung (4.8)) gilt somit:

$$d_W = d_{Spk} + 2 \cdot d_D \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot (W - 1)\right) \quad (4.13)$$

mit Außendurchmesser der Wicklung  $d_W$  in mm

Somit kann die während einer Profilaufnahme überstrichene Strecke  $s_{IBn}$  wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} s_{IBn} &= t_B \cdot n_W \cdot u_W = t_B \cdot n_W \cdot \pi \cdot d_W \\ &= t_B \cdot n_W \cdot \pi \cdot \left(d_{Spk} + 2 \cdot d_D \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot (W - 1)\right)\right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

mit während einer Profilaufnahme überstrichene Strecke  $s_{IBn}$  in mm  
Umfang der Wicklung  $u_W$  in mm

Da davon ausgegangen werden kann, dass mit der Länge der während einer Profilaufnahme überstrichenen Strecke auch die Anzahl und die Intensität der externen Störeinflüsse auf die Profilaufzeichnung steigen, ist die Belichtungszeit möglichst klein zu wählen. Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs ist in Bild 52 auf Grundlage von Gleichung (4.14) die überstrichene Wegstrecke für Belichtungszeiten zwischen 1 ms und 10 ms bei einem Spulenkörperdurchmesser von 20 mm und einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm für die erste Lage exemplarisch dargestellt. Im betrachteten Fall beträgt  $s_{IBn}$  beispielsweise für eine Drehzahl von 2.000 UpM bei 4 ms Belichtungszeit 8,5 mm, während dieser Wert bei 10 ms Belichtungszeit auf 21,5 mm ansteigt, was bereits 27% des Spulenkörperumfangs entspricht.

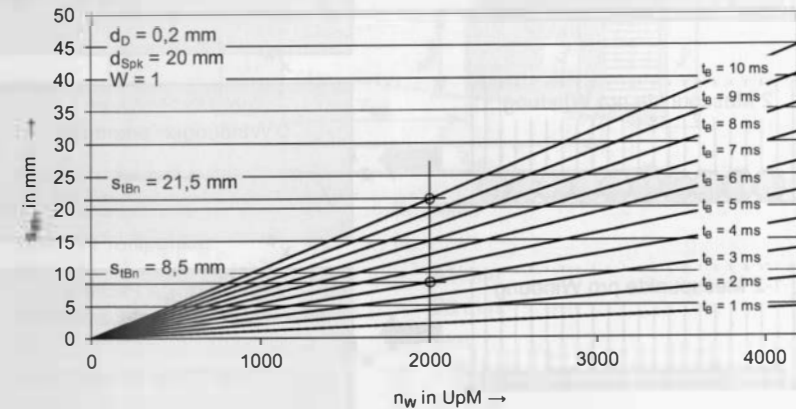


Bild 52: Einfluss von Belichtungszeit  $t_B$  und Wickeldrehzahl  $n_W$  auf die während einer Profilaufnahme überstrichene Strecke auf der Spulenkörperoberfläche  $s_{IBn}$

### Spulenkörper

Für die Erfassung von Abstandswerten mittels Lasermesssystemen sind die Reflexionseigenschaften der Messobjektoberfläche von entscheidender Bedeutung. Spiegelnde Oberflächen reflektieren den einfallenden Laser-Messstrahl nach dem Prinzip „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“, wodurch üblicherweise kein Signal vom Bilddetektor empfangen wird. Oberflächen mit ideal diffusen Reflexionseigenschaften hingegen reflektieren einfallende Lichtstrahlen in alle Raumrichtungen mit konstanter Leuchtdichte, so dass eine Vermessung in allen Raumlagen möglich ist. Für die Wicklungserfassung mittels Laser-Profilscanner muss daher darauf geachtet werden, dass die üblicherweise im Spritzgussverfahren hergestellten Kunststoff-Spulenkörper eine ausreichende Rauigkeit aufweisen.

### Draht

Von besonderer Bedeutung für die Wicklungserfassung ist der Durchmesser des verarbeiteten Drahtes. Infolge der endlichen Auflösung des Laser-Profilscanners in x- und z-Richtung kann nur eine begrenzte Anzahl an Punkten entlang der Profillinie

abgetastet werden. Je kleiner der Drahtdurchmesser, desto weniger Messpunkte entfallen auf eine Windung. Ergibt sich bei der Erfassung von Drähten mit einem Durchmesser oberhalb der Sensor-Auflösung durch Verbinden der einzelnen Messpunkte noch eine deutlich wellenförmige Profilkurve, so kann diese Kurve bei dünneren Drähten zu einer Geraden werden oder auch eine falsche Anzahl an Wicklungen wiedergeben (siehe Bild 53).

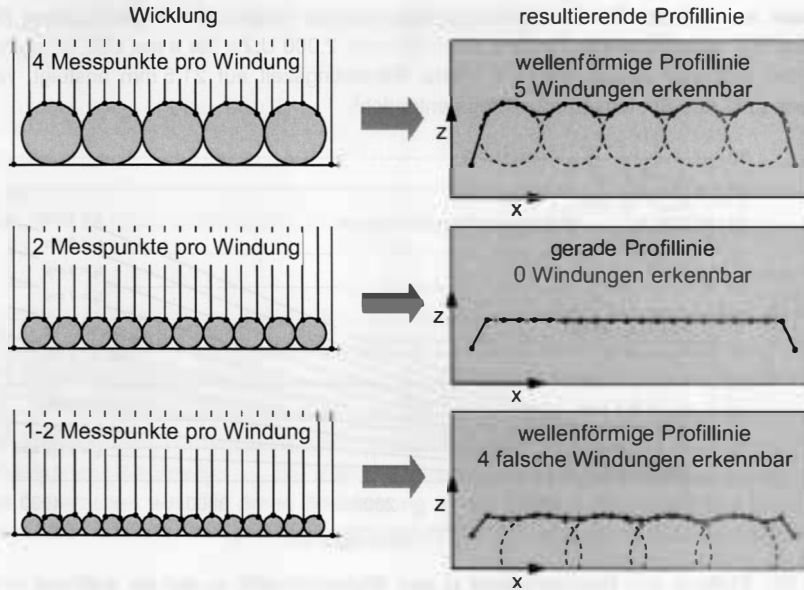


Bild 53: Einfluss des Drahtdurchmessers auf die erfasste Profillinie

Der minimal vom Laser-Profilscanner erkennbare Drahtdurchmesser lässt sich mit dem Shannon-Abtasttheorem bestimmen. Dieses, aus der Signalverarbeitung stammende Theorem besagt, dass es möglich ist, aus den Abtastwerten eines kontinuierlichen, bandbegrenzten Eingangssignals die ursprüngliche Funktion wieder vollständig und fehlerfrei zu rekonstruieren, wenn die Abtastfrequenz mindestens dem Doppelten der im Signal maximal vorkommenden Frequenz entspricht. [66][71]

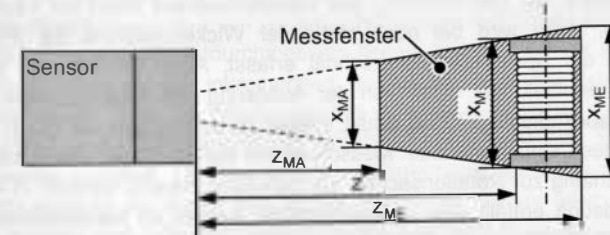
$$f_a \geq 2 \cdot f_{max} \tag{4.15}$$

mit Abtastfrequenz  $f_a$  in Hz  
 Maximale Frequenz des Eingangssignals  $f_{max}$  in Hz

Diese Gesetzmäßigkeit ist auf die Erfassung des Wicklungsaufbaus mit dem Laser-Profilscanner übertragbar. Auch hier soll ein kontinuierliches Signal, das Wicklungsprofil, mit endlicher Ausdehnung abgetastet werden. Die maximale Frequenz des Eingangssignals entspricht in diesem Fall dem Drahtdurchmesser, die Abtastfrequenz der

minimalen Auflösung des Laserscanners in x-Richtung. Durch das V-förmige Messfenster des Laser-Profilscanners ist die Auflösung in x-Richtung abhängig von der Positionierung des Sensors relativ zur zu vermessenden Spule. Am Anfang des Messbereichs teilen sich die 1.024 Messpunkte pro Profil auf eine Strecke von 23 mm auf, am Ende auf 41 mm. Für die Auflösung im Abstand z zum Sensor ergibt sich mit den in Bild 54 dargestellten Verhältnissen:

$$\delta_{xLPS}(z) = \frac{x_M}{i_{pp}} = \frac{1}{i_{pp}} \cdot \left( \frac{x_{ME} - x_{MA}}{z_{ME} - z_{MA}} \cdot (z - z_{MA}) + x_{MA} \right) = \frac{1}{i_{pp}} \cdot \left( \frac{18}{55} z + \frac{73}{11} \text{ mm} \right) \tag{4.16}$$



mit Messfensterbreite	$x_M$	in mm
Anzahl Profilmesspunkte	$i_{pp}$	in -
Messfensterbreite Ende	$x_{ME}$	= 41 mm
Messfensterbreite Anfang	$x_{MA}$	= 23 mm
Abst. Sensor-Spulenoberfl.	$z$	in mm
Messfensterhöhe Ende	$z_{ME}$	= 105 mm
Messfensterhöhe Anfang	$z_{MA}$	= 50 mm
Auflösung Sensor in x-Richtung im Abstand z	$\delta_{xLPS}(z)$	in mm

Bild 54: Variablen für die Bestimmung der Sensorauflösung in x-Richtung

Durch Anwendung des Shannon-Theorems ist der minimal erfassbare Drahtdurchmesser im Abstand z zur Spulenoberfläche bestimmt durch:

$$d_{Dmin}(z) = 2 \cdot \delta_{xLPS}(z) = \frac{1}{i_{pp}} \cdot \left( \frac{36}{55} z + \frac{146}{11} \text{ mm} \right) \tag{4.17}$$

mit min. Drahtdurchmesser  $d_{Dmin}(z)$  in mm

Hiermit ergeben sich am Anfang des Messbereichs ( $z = 50$  mm) ein minimal erfassbarer Drahtdurchmesser von  $45 \mu\text{m}$ , am Ende ( $z = 105$  mm) ein Durchmesser von  $80 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der Bereichsverschiebung des Messfeldes, die mit einer Toleranz von ca. 5% angegeben wird [78], können somit Drähte mit einem Durchmesser von mindestens  $84 \mu\text{m}$  sicher erfasst werden.

### 4.3.2 Realisierung der Auswerte-Software

Auf Grundlage der Ergebnisse des vorangegangenen Abschnitts, werden im Folgenden ausgehend von der Programmoberfläche die einzelnen Programmkomponenten sowie die jeweils zugrunde liegenden Algorithmen der entwickelten Auswertesoftware für den Laser-Profilscanner erläutert. Zur Anbindung an die in C programmierte Treiber-DLL des Laserscanners, erfolgt die Programmierung der Auswertesoftware mit C++ bzw. Visual C++ [92]. Als Entwicklungsumgebung wird Microsoft Visual Studio 2005 und für die graphische Oberfläche die Microsoft Foundation Classes (MFC) eingesetzt.

Den ersten Schritt der Überwachung des Wickelprozesses bildet die Vermessung der Kammerbreite. Dazu wird bei noch stehender Wickelmaschine die Profilaufnahme gestartet und der Spulenkörperquerschnitt erfasst. Anschließend wird zunächst ein Referenzwert ermittelt, der einen von der Auflösung des Laserscanners abhängigen Wert ( $5 \cdot \text{Sensor-Auflösung} / 256$ ) erhält. Dieser ist erforderlich, da durch die seitliche Ausbreitung des Laserstrahls zum Messobjekt hin die Flansche, selbst bei ideal senkrechter Ausrichtung zur Rotationsachse, als Schrägen erkannt werden. In Abhängigkeit von der Auflösung entfällt eine unterschiedliche Anzahl an Messpunkten auf diesen Bereich. Zur Bestimmung der Kammergrenzen wird überprüft, für welche beiden um diesen Referenzwert voneinander entfernte Messpunkte, die Abstandsdifferenz maximal ist, sowohl in positiver als auch in negativer Richtung. Von den beiden ermittelten Punktpaaren werden die jeweils zur Kammer zeigenden Punkte dann als Begrenzung festgelegt und deren Abstand in x-Richtung als Kammerbreite ausgegeben.

Zu Beginn der Erkennungsroutine für die Windungspositionen wird anhand der gewählten Sensor-Auflösung, dem eingegebenen Drahtdurchmesser sowie dem Abstand zum Wickelkammergrund die Anzahl an Messpunkten für eine Windung ermittelt. Diese wird im Folgenden als Referenzpunktzahl bezeichnet. Mit dem Start des Wickelprozesses wird pro Umdrehung der Wickelspindel eine Profilaufnahme erstellt. Durch Subtraktion des aktuellen vom vorhergehenden Wicklungsprofil werden die Differenzen zwischen den beiden Aufnahmen ermittelt. Zur Vorfilterung der ermittelten Messpunkte werden alle Ergebnisse außerhalb der Kammergrenzen sowie mit z-Differenzwerten außerhalb eines Bereiches des 0,5- bis 1,5-fachen Drahtdurchmessers aussortiert. Nach vollständiger Filterung eines Profils erfolgt eine Schwerpunktbildung über die Längswerte der als gültig eingestuft Messpunkte sowie die Ermittlung der Seite mit den meisten gültigen Messpunkten relativ zum Schwerpunkt. Anschließend wird auf dieser Seite erneut ein Schwerpunkt gebildet und überprüft, ob die ermittelte Punktzahl der Referenzpunktzahl entspricht. Sollte diese Bedingung erfüllt sein, wird der ermittelte Schwerpunkt als aktuelle Windungsposition übernommen. Der entwickelte Algorithmus beruht auf der Annahme, dass fehlerhafte Messpunkte, beispielsweise durch Reflexionen, zumeist einzeln auftreten und die Wahrscheinlichkeit, dass diese Punkte die oben angegebenen Bedingungen erfüllen, sehr gering ist. Da jedoch, je nach Drahtdurchmesser, mehrere nebeneinander liegende Messpunkte eine neue Wicklung anzeigen, liegt der erste ermittelte Schwerpunkt normalerweise zwischen den fehlerhaften und den tatsächlichen Punkten. Die Prüfung hinsichtlich der zu erwartenden Punktzahl

je Windung und die zweite Schwerpunktbildung führt in Folge zur korrekten Erkennung der Windungsposition in die Mitte der den Schwerpunkt bestimmenden Messpunkte.

Als zusätzliche Auswertefunktion ist die Ermittlung des Drahtdurchmessers aus den vorhandenen Profildaten in die Auswerte-Software integriert. Hierzu wird fortlaufend für die letzten zehn erkannten Windungen überprüft, ob der Unterschied zwischen der dort ermittelten Windungsposition und der vorherigen im Bereich des 0,8- bis 1,2-fachen des eingegebenen oder erkannten Drahtdurchmessers liegt. Falls dies nicht der Fall ist, wird eine Limit-Variable inkrementiert, beim Vergleich der ersten und letzten Windung der 10er-Gruppe je um den Wert drei, sonst um den Wert eins. Zusätzlich muss der Versatz zwischen dem aktuellen und dem von vor neun Windungen erhaltenen Profil im Bereich des 9·0,9- bis 9·1,1-fachen Drahtdurchmessers liegen. Wenn dies nicht zutrifft wird die Limit-Variable ebenfalls um drei inkrementiert. Beträgt deren Wert anschließend maximal zwei, was anzeigt, dass alle Windungen lückenfrei liegen und kein Richtungswechsel beispielsweise an den Kammergrenzen auftrat, wird über diese zehn Windungen ein Drahtdurchmesser gemittelt. Um hier so exakte Ergebnisse wie möglich zu erhalten, führt ein Nichtbestehen der ersten und letzten Vergleiche, die vor allem an den Kammergrenzen relevant sind, oder der Gesamtüberprüfung auch direkt zum Verwerfen der aktuellen Berechnung und es wird mit den nachfolgend aufgenommenen Windungen eine wiederholte Bestimmung durchgeführt. Ist es möglich, für mehrere Berechnungen ein Ergebnis zu ermitteln, was wiederum ein Indikator für homogene Wicklungen bzw. eine gute Qualität des Scannerbildes ist, erfolgt eine fortlaufende Mittelung.

Für die Dokumentation des Wickelprozesses sowie für die Aufbereitung der Windungspositionen zu einem 3D-Modell, erfolgt eine automatische Speicherung der ermittelten Profildaten. Hierdurch wird zu jeder gefertigten Spule automatisch ein Fertigungsprotokoll erstellt, das im Weiteren als Qualitätsnachweis dienen kann. Zur Protokollierung der Messprofile werden diese in fortlaufend nummerierte Dateien abgespeichert. Der Inhalt besteht aus einer der eingestellten Auflösung entsprechenden Anzahl an Zeilen, mit je zwei Spalten. Die erste Spalte enthält die x-Koordinaten, die zweite die Abstandswerte in z-Richtung der einzelnen Messpunkte. Darüber hinaus wird für die 3D-Visualisierung eine Datei „Windungsposition.txt“ angelegt, in der zu jedem einzelnen Profil die Zeit der Aufnahme und die Position der jeweils aktuellen Windung, sowohl bezogen auf die Messpunkte, als auch auf das Laserkoordinatensystem ausgegeben werden.

### 4.3.3 Automatische 3D-Visualisierung von Wicklungen

Zur Visualisierung der prozessbegleitend erfassten Wicklungsdaten zu 3D-Modellen wird die Software Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 (im Folgenden kurz ProE) der Firma Parametric Technology Corporation (PTC) eingesetzt. Dieses CAD-Programm bietet verschiedenste Möglichkeiten zur Erzeugung und Darstellung dreidimensionaler Objekte. Über Softwareschnittstellen ist es zudem möglich, ProE durch die Programmierung benutzerspezifischer Applikationen zu erweitern und Prozesse zu automatisieren. Die Umsetzung der zur Visualisierung der aufgezeichneten Wicklungsdaten erforderlichen

Abläufe erfolgt mit der im ProE-Softwarepaket enthaltenen Schnittstelle J-Link in der Programmiersprache JAVA [102].

Für die Visualisierung der erfassten Wicklungsdaten wird das in Bild 55 dargestellte Musterbauteil modelliert. Es besteht aus vier Komponenten, zwei Flanschen, der Spulenkörperkammer und einer einzelnen Wicklung. Die Parametrierung erfolgt mittels einer Familientabelle, in die für ausgewählte Abmaße oder Parameter des generischen Bauteils individuelle Werte eingetragen und so neue Bauteile erzeugt werden. Die erforderlichen Parameter sind in der Datei „Familientabelle\_Spule“ enthalten, welche die Auswertesoftware ausgibt. Die Gleichungen (4.18) – (4.20) beschreiben die Helix der kreisförmigen Wicklung. Hierbei entspricht  $z$  der Position der Wicklung entlang der Kammer (Startpunkt  $x_1$ , Endpunkt  $x_2$ ), während  $x$  und  $y$  eine Kreisgleichung mit dem Anfangs- und Endradius  $y_1$  bzw.  $y_2$  darstellen, mit  $t$  als Laufvariable von 0 bis 1 und einer Schrittweite von 0,01. Durch den Zusammenbau der einzelnen Wicklungsmodelle ergibt sich das Gesamtmodell der Wicklung.

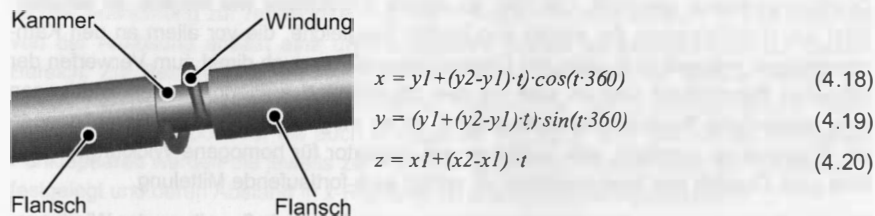


Bild 55: Komponenten und Gleichungen der Musterwicklung

Für den Aufruf der in J-Link programmierten Abläufe wird ein neues Bedienelement mit der Bezeichnung „Spule“ in die Menüleiste der CAD-Umgebung integriert. Durch anwählen von „Spule → Wicklungen erzeugen“ wird das J-Link-Programm gestartet. In den nachfolgenden Dialogen werden die zu verarbeitende Familientabelle eingelesen und die für die Wicklung relevanten Parameter angezeigt. Anschließend erfolgen automatisch die Erzeugung der einzelnen Modelle anhand der in der Familientabelle enthaltenen Daten sowie deren Zusammenbau zur Spulenbaugruppe.

#### 4.3.4 Bewertung der Nachlaufwinkelerkennung mit Laser-Profilscanner

Die Überprüfung der erstellten Auswerte-Software sowie die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Laser-Profilscanner erfolgt anhand der im Folgenden dargelegten Versuche. Untersucht wird hierbei der Einfluss der Parameter Drahtdurchmesser, Drahtfarbe und Drehzahl der Wickelspindel und auf die Wicklungserkennung. Für die Versuche wird ein runder Spulenkörper aus grauem Kunststoff mit einer Kammerbreite von 30 mm und einem Kammerdurchmesser von 22,6 mm verwendet. Die Belichtungszeit beträgt, soweit nicht anders angegeben, 6 ms. Die Bestimmung des Drahtdurchmessers erfolgt, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, über die Mittelwertbildung der Abstandsdifferenz von zehn Wicklungsprofilen, wobei der ermittelte Wert nur dann als gültig übernommen wird, wenn die Wicklungspositionen zwischen zwei Profilen gewisse

Grenzen in Abhängigkeit des vorgegebenen Drahtdurchmessers einhalten. Die Angabe des Anteils erfolgreich bestimmter Durchmesser kann somit als Qualitätsmerkmal des Scannerbildes betrachtet werden. Zur Beurteilung der Messgenauigkeit werden Vergleichsmessungen mittels Messmikroskop (Wicklungspositionen, Kammerbreite) und Laser-Mikrometer (Drahtdurchmesser) durchgeführt. Die Bestimmung der Drahtdurchmesser-Referenz erfolgt für jeden verwendeten Draht durch Messung von 20 Werten an einem 400 mm langen Abschnitt und anschließende Mittelung. Als weiteres Kriterium für die Beurteilung der Qualität der Messungen wird der Messfehler bei der Bestimmung der Kammerbreite betrachtet.

#### Drahtdurchmesser

Die Versuche zur Bestimmung des Einfluss des Drahtdurchmessers erfolgen bei einer Drehzahl von 1.000 UpM. Vermessen wird dabei die erste Lage eines lagegenauen Wicklungsaufbaus. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 7 dargestellt:

	Einheit					
$d_{Cu}$	$\mu\text{m}$	50	100	250	450	1000
$d_D$ Software	$\mu\text{m}$	57	110	271	480	1040
$d_D$ Laserscan Mikrometer	$\mu\text{m}$	53	109	271	478	1044
Abweichung $d_D$	%	7,5	0,9	0,0	0,4	-0,4
Anteil gültiger $d_D$	%	9,6	75,1	84,9	73,1	63,2
BK Software	mm	30,32	30,29	30,29	30,34	30,39
BK Mess-Mikroskop	mm	29,93	29,93	29,93	29,93	29,93
Abweichung BK	%	1,3	1,2	1,2	1,4	1,5
Software zu Mikroskop						
Wicklungspositionen erkannt		JA	JA	JA	JA	JA

Tabelle 7: Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Wicklungserkennung

Wie die durchgeführten Versuche zeigen, ist der Einfluss des Drahtdurchmessers auf die Qualität der mit dem Laserscanner erfassten Wicklungsprofile nur von geringer Bedeutung. Bereits der im Bereich der Auflösungsgrenze des Sensors (siehe Gleichung (4.17)) liegende Draht mit deinem Durchmesser von  $53 \mu\text{m}$  kann mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden. Durch den Algorithmus zur Positionsbestimmung der Auswertesoftware werden auftretende Erkennungsfehler ausgeglichen. Mit steigendem Drahtdurchmesser nimmt die Erkennungsrate stark zu und blieb auf konstant hohem Niveau. Bild 56 zeigt Ausschnitte aus dem jeweils erfassten Wicklungsaufbau sowie die zugehörige Spule für einen 0,45 mm und einen 0,25 mm Draht. Deutlich zu sehen ist die gute Übereinstimmung zwischen Messobjekt und Messergebnis, die erfassten Wicklungspositionen korrelieren sehr gut mit den tatsächlichen Wicklungspositionen. Eine zuverlässige Erkennung der Wicklungspositionen für die Realisierung einer Drahtführerregelung ist bei allen untersuchten Drahtdurchmessern möglich.



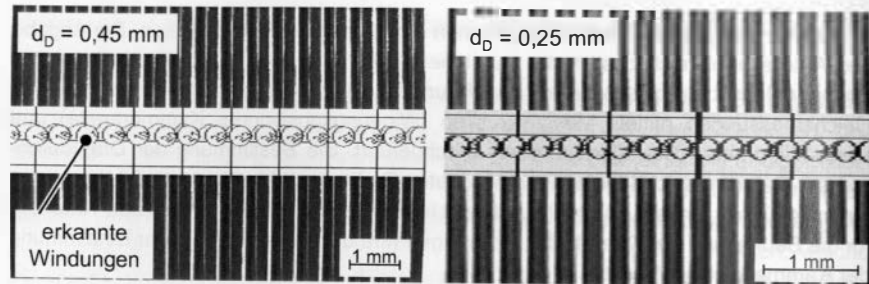


Bild 56: Ausschnitte der Wicklungserkennung bei 0,45 mm und 0,25 mm Draht

Die ermittelten Kammerbreiten schwanken im Bereich weniger Zehntel Millimeter und liegen maximal um 1,5% höher als der mit dem Mess-Mikroskop ermittelte Vergleichswert. Da sich diese geringen Differenzen auch bei allen weiteren Messungen wiederholen, wird in der weiteren Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen auf eine Erwähnung verzichtet.

#### Drahtfarbe

Um den Einfluss der Drahtfarbe auf die Wicklungserkennung zu bestimmen, werden kupferfarbene, rote und grüne Drähte mit einem Nenndurchmesser von 0,25 mm für die Untersuchungen verwendet. Die Versuche werden mit einer Drehzahl von 1.000 UpM durchgeführt. Um die geringe Reflexion des roten Laserlichts auf dem grünen Draht zu kompensieren, wird die Belichtungszeit für eine zusätzliche Messung von standardmäßig 6 ms auf 12 ms erhöht. Betrachtet werden jeweils 108 Windungen, was beim stärksten Draht, dem kupferfarbenen, genau einer lückenfreien Lage entspricht.

Mit dem kupferfarbenen Draht werden durchweg gute Ergebnisse bei der Wicklungserkennung erzielt (siehe Tabelle 8). Neben der exakten Bestimmung des Drahtdurchmessers ist die Erfassung einer hohen Anzahl an gültigen Drahtdurchmessern möglich. Beim roten Draht hingegen verringerte sich die Anzahl der gültigen Drahtdurchmesser leicht. Eine Erhöhung der Belichtungszeit bewirkt keine Verbesserung, verursacht jedoch die Berechnung zu hoher Drahtdurchmesser. Mit der Standard-Belichtungszeit von 6 ms kann der Durchmesser des roten Drahts hingegen mit einer sehr geringen Abweichung von 1,2% ermittelt werden. Für den grünen Draht werden bei einer Belichtungszeit von 6 ms nur 31,3% der Drahtdurchmesser erkannt. Durch eine Verdoppelung der Belichtungszeit auf 12 ms ist eine wesentliche Verbesserung auf 61,6% möglich. Auch die Abweichung bei der Bestimmung des Drahtdurchmessers kann von -3,5% auf 0,4% deutlich verbessert werden.

	Einheit	kupfern	rot	grün	grün
Drahtfarbe	-				
Belichtungszeit	ms	6	6	6	12
$d_D$ Software	$\mu\text{m}$	271	250	246	256
$d_D$ Laserscan Mikrometer	$\mu\text{m}$	271	247	255	255
Abweichung $d_D$	%	0	1,2	-3,5	0,4
Anteil gültiger $d_D$	%	84,9	73,7	31,3	61,6
Windungspositionen erkannt	-	JA	JA	NEIN	JA

Tabelle 8: Einfluss der Drahtfarbe auf die Wicklungserkennung

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Drahtfarbe die Qualität der aufgezeichneten Wicklungsprofile deutlich beeinflusst. Ursache ist die von der Drahtfarbe abhängige Intensität der Reflexion der Laserlinie. Diese Unterschiede können jedoch durch eine Anpassung der Belichtungszeit sowie durch die eingesetzten Korrekturalgorithmen kompensiert werden. Somit sind, selbst bei weniger stark reflektierenden Farben, verwertbare Ergebnisse erzielbar. Die Bestimmung der Windungsposition für die Nachlaufwinkel-Regelung ist unabhängig von der gewählten Drahtfarbe möglich.

#### Drehzahl

Zur Überprüfung des Einfluss der Wickeldrehzahl auf die ermittelten Wicklungsprofile werden Versuche mit 100, 500, 1.000 und 2.000 UpM bei Verwendung des Standardspulenkörpers und 0,25 mm kupferfarbenen Draht durchgeführt. Bei den Versuchen werden 150 Windungen betrachtet, die eineinhalb Lagen entsprechen.

	Einheit	100	500	1000	2000
Wickeldrehzahl	UpM				
$d_D$ Software	$\mu\text{m}$	276	275	274	274
$d_D$ Laserscan Mikrometer	$\mu\text{m}$	271	271	271	271
Abweichung $d_D$	%	1,7	1,4	1,1	1,1
Anteil gültiger $d_D$	%	74,2	72,0	72,2	58,9
Windungspositionen erkannt	-	JA	JA	JA	JA

Tabelle 9: Einfluss der Wickeldrehzahl auf die Wicklungserkennung

Die in Tabelle 9 aufgezeigten Ergebnisse zeigen, dass die Wickelgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Wicklungserkennung hat. Neben durchweg hohen Anteilen an gültigen Ergebnissen bei der Erkennung des Drahtdurchmessers sind auch die Abweichungen bei den Absolutwerten mit maximal 1,7% (entspricht 5  $\mu\text{m}$ ) äußerst gering. Eine zuverlässige Erkennung der Windungspositionen für die Realisierung einer Nachlaufwinkel-Regelung ist bei allen betrachteten Wickeldrehzahlen möglich.

### 3D-Aufbereitung

Die Erfassung und Speicherung der Wicklungsdaten sowie deren Aufbereitung zu einem 3D-Modell stellt einen neuartigen Ansatz zur Qualitätssicherung in der Wickeltechnik dar. Mit der entwickelten Software erfolgt die Aufbereitung und Umwandlung der erfassten Daten zu einem 3D-Spulenmodell automatisiert. Bild 57 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Aufbereitung einer Versuchsspule (Standardspulenkörper, 0,25 mm kupferfarbener Draht, Wickeldrehzahl von 500 UpM, 150 Windungen).

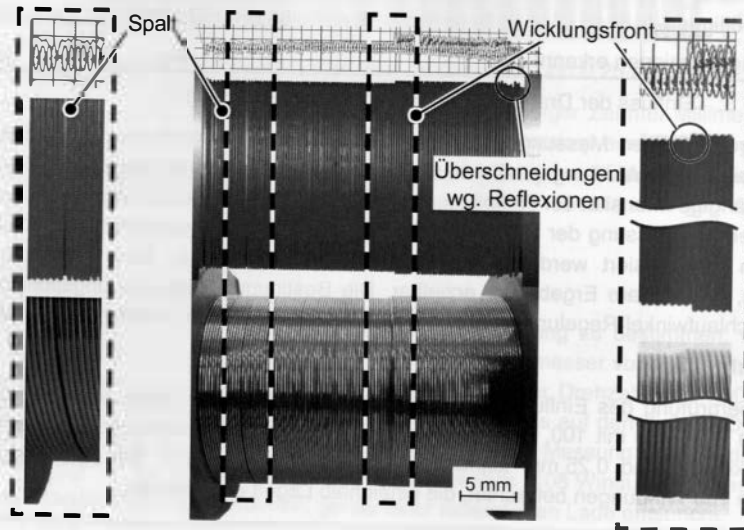


Bild 57: Aufbereitung der Messdaten zu einem 3D-Spulenmodell

Wie in Bild 57 zu sehen, stimmen Wicklungsprofil und aufbereitetes Modell sehr gut miteinander überein. Der Wechsel zur zweiten Lage erfolgt korrekt, jedoch kommt es in Folge von Reflexionen im Bereich der Kammergrenzen zu leichten Verschiebungen in z-Richtung. Im Vergleich mit der Realität ist zu sehen, dass selbst die geringen Abstände, wie der im Bild herausgestellte Spalt, die beim Wickeln zwischen manchen Wicklungen auftraten, sicher erkannt und auch dargestellt werden.

Durch die Beschränkung auf eine Profilerfassung pro Umdrehung stellen die aufgenommenen Daten sowie das daraus erstellte Modell eine Vereinfachung der vermessenen Spule dar. Sprünge, die innerhalb des nicht überwachten Bereichs der Spule auftreten, können nicht überwacht und bei der Modellbildung berücksichtigt werden. Durch die diskrete Auflösung des Laserscanners kann es des Weiteren bei der Visualisierung von Wicklungen mit Drähten nahe der Auflösungsgrenze des Laser-Profils scanners ( $d_D < 60 \mu\text{m}$ ) zu Überschneidungen im Modell kommen.

### 4.4 Gegenüberstellung der entwickelten Sensorlösungen

Für die Bewertung der entwickelten Sensorlösungen zur prozessbegleitenden Erfassung des Nachlaufwinkels ist vor allem die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Systems hinsichtlich der Hauptparameter des Wickelprozesses relevant. Daneben sind die jeweiligen Systemkosten sowie die Anforderungen an den Auswerterechner und die Softwareerstellung von Bedeutung. In Tabelle 10 werden die drei realisierten Prototypen gegenübergestellt. Mit dem Bilderkennungssystem sowie dem Zeilensensorsystem erfolgt eine kontinuierliche, direkte Erkennung des Nachlaufwinkels am abgewickelten Draht. Die beiden Systeme sind fest mit dem Drahtführer verbunden und folgen diesem während des Wickelprozess. Das Sensorsystem mit Laser-Profils scanner bestimmt den Nachlaufwinkel indirekt aus den aufgezeichneten Profildaten der überwachten Spule. Durch eine Subtraktions-Analyse der aufgezeichneten Profildaten wird die Position der aktuellen Windung bestimmt. Nachfolgend kann hieraus bei bekannter Position des Drahtführers der aktuelle Nachlaufwinkel bestimmt werden. Gegenüber den beiden direkten Sensorsystemen bietet das Laser-Profils scanner System die Möglichkeit, die erkannten Windungspositionen zu speichern, und so den Prozessablauf sowie den inneren Aufbau der Spule zu dokumentieren.

Parameter	System 1	System 2	System 3
	Bilderkennung	Zeilensensor	Laser-Profils scanner
Drahtdurchmesser	0	+	0
Drahtfarbe	+	+	0
Drehzahl	0	+	0
Kostenaufwand	+	+	-
Sensorsystem			
Hardwareanforderungen	0	+	0
Inbetriebnahme-Aufwand	0	+	0

Legende: + gering 0 mittel - hoch

Tabelle 10: Beurteilung des Einfluss der untersuchten Parameter und Bewertung der entwickelten Sensorlösungen für die Erfassung des Nachlaufwinkels

In Tabelle 10 ist eine zusammenfassende Bewertung der realisierten Sensorsysteme dargestellt. Das Zeilensensorsystem hat sich in den durchgeführten Untersuchungen als geeignet für die Erfassung des Nachlaufwinkels bei typischen Drehzahlen und Drahtdurchmessern erwiesen. Der Einsatz des Bildverarbeitungssystems ist wegen seiner Bildrate auf Drehzahlen kleiner 1.000 UpM beschränkt. Mit dem Laser-Profils scanner-System ist eine Erfassung bis 2.000 UpM möglich, wobei sich hier die Beschränkung aus dem Verschwimmen der Profilaufnahme mit zunehmender Wickelgeschwindigkeit sowie den hohen Datenmengen ergibt. Bezüglich des Drahtdurchmessers ist eine Bestimmung der Windungsposition mit dem Laser-Profils scanner ab 0,1 mm

sicher möglich. Unterschiedliche Drahtfarben beeinflussen die Erkennungsleistung bei allen Systemen nicht, wobei beim Laser-Profilscanner eine Anpassung der Belichtungszeit hinsichtlich der Drahtfarbe erforderlich ist. Bedingt durch die endliche Auflösung des dritten Prototypensystems, ist die Erkennung des Nachlaufwinkels auf das Messfenster des Sensors beschränkt. Die Systeme 1 und 2 hingegen können unabhängig von den Spulenkörperabmaßen eingesetzt werden. Die Aufzeichnung des Wicklungsaufbaus ist nur mit dem dritten Prototyp möglich, bei Bilderkennung und Zeilensensor kann lediglich eine Speicherung des Verlaufs des Nachlaufwinkels erfolgen. Bezüglich der Systemkosten sind die direkten Erfassungssysteme gegenüber dem dritten System deutlich im Vorteil. Bilderkennungs- und Zeilensensorsystem können für ca. 500,- Euro realisiert werden, wohingegen der Laser-Profilscanner Kosten von ca. 14.000,- Euro verursacht. Der Aufwand für die Inbetriebnahme ist beim Zeilensensorsystem der geringste. Beispielsweise ist keine Fokussierung, wie bei der Kamera des Bilderkennungssystems, oder eine Einstellung der Belichtungszeit, wie beim Laser-Profilscanner erforderlich.

#### **Zusammenfassung**

Für den Aufbau eines Nachlaufwinkel-Regelkreises ist die Erfassung des Nachlaufwinkels erforderlich. Hierzu wurden in dem vorhergehenden Kapitel alternative Sensorsysteme entwickelt, prototypisch realisiert und die Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Für die direkte Erfassung des Nachlaufwinkels wurden zwei Systeme entwickelt, beim ersten wird der Winkel mittels Bilderkennung bestimmt, beim zweiten wird dieser aus der von einem Zeilensensor bestimmten Drahtauslenkung und dem Abstand zum Drahtführer berechnet. Der dritte Prototyp bestimmt aus den von einem Laser-Profilscanner aufgenommenen Profildaten der Wicklungsoberfläche die einzelnen Windungspositionen. Aus der Position der aktuellen Windung und der Drahtführerposition kann so der Nachlaufwinkel bestimmt werden. Darüber hinaus ermöglichen die gespeicherten Positionen der einzelnen Windungen die Generierung eines 3D-Modells der gefertigten Spule. Hierzu wurde eine Kopplung an das 3D-CAD Programm Pro/Engineer realisiert, welche die aufgezeichneten Positionsdaten automatisch in ein CAD-Modell umsetzt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den entwickelten Sensorsystemen die erforderliche Grundlage für den Aufbau eines Nachlaufwinkel-Regelkreises für die Fertigung lagegenauer Wicklungen geschaffen wird.

## **5 Realisierung einer sensorgeführten Wickelmaschine zur automatisierten Fertigung lagegenauer Spulen**

Mit dem im dritten Kapitel vorgestellten und erläuterten Konzept für einen Nachlaufwinkel geregelten Wickelprozess sowie den im vierten Kapitel beschriebenen Systemen zur messtechnischen Bestimmung des Nachlaufwinkels werden wesentliche Voraussetzungen für die Realisierung einer sensorgeführten Wickelmaschine für die flexibel automatisierte Fertigung lagegenauer Wicklungen auf unpräparierten Spulenkörpern geschaffen. Die gewonnenen Ergebnisse dienen im Folgenden als Grundlage für die Auslegung einer Verlegeachse mit linearem Direktantrieb, die Integration der einzelnen Maschinenkomponenten in eine Gesamtstruktur sowie die steuerungs- und softwaretechnische Umsetzung des Nachlaufwinkel-Regelkreises. Die Basis für den prototypischen Aufbau der sensorgeführten Wickelmaschine bildet eine am Markt verfügbare Standard-Wickelmaschine, deren Verlegeachse durch die neu entwickelte Verlegeachse mit Linearantrieb ersetzt wird. Ziel der aufgezeigten Maßnahmen ist es, den Wickelprozess für lagegenaue Spulen zu automatisieren, um so den derzeit hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten bei der flexiblen Fertigung dieses Wicklungstyps zu verringern, die Taktzeiten zu reduzieren, die Qualität zu steigern und die Prozesssicherheit zu erhöhen.

### **5.1 Aufbau einer Verlegeachse mit linearem Direktantrieb**

Für die Fertigung lagegenauer Spulen ist eine hochdynamische und hochpräzise Drahtführerpositionierung erforderlich. Zum einen, um die bei der Richtungsumkehr am Spulenkörperflansch erforderliche synchrone Bewegung von Draht und Drahtführer zu gewährleisten, zum anderen, um die Stellsignale des Positionsreglers mit ausreichender Dynamik umzusetzen. Dabei müssen alle Stellbewegungen mit möglichst geringem Überspringen ausgeführt werden, da sich dieses negativ auf den Wicklungsaufbau auswirken würde. Wie sich in den in Kapitel 3 dargelegten Untersuchungen gezeigt hat, weisen aktuell in Wickelmaschinen eingesetzte Verlegeachsen Optimierungspotentiale sowohl hinsichtlich ihrer Positionier-/Wiederholpräzision, als auch bezüglich der dynamischen Eigenschaften aus. Zum Ausgleich der Nachteile konventioneller Verlegeachsen wird für den Prototypen der sensorgeführten Wickelmaschine eine Verlegeachse auf Basis eines linearen Direktantriebs entwickelt.

Vorschubantriebe auf Basis von Linearmotoren zeichnen sich gegenüber elektromechanischen Vorschubantrieben insbesondere durch bessere dynamische Eigenschaften bei gleichzeitig höherer Regelgüte und geringeren Positionierungsfehlern aus. Gegenüber klassischen Lösungen für Vorschubachsen, bei denen die mechanischen Antriebskomponenten wie Spindel, Lager oder Mutter beispielsweise durch Schwingungen in der Bewegung die Regelbarkeit und Genauigkeit der angetriebenen Achse begrenzen, wird durch deren Entfall bei Linearantrieben die Regelbarkeit entscheidend gesteigert und ein nahezu verschleißfreier Betrieb ermöglicht. Durch die direkte Erfassung der Positions-Istwerte entfallen die üblichen Fehlereinflüsse einer indirekten Positionserfassung, was wiederum zu einer Steigerung der Positionierpräzision beiträgt. Nachfolgend

wird die Vorgehensweise bei der Auswahl der Komponenten für die Antriebslösung mit Linearmotor dargestellt.

Der prinzipielle Aufbau einer Vorschubachse mit Linearmotor ist in Bild 58 dargestellt. Die Hauptkomponenten, deren Auswahl nachfolgend beschrieben wird, sind der Linearmotor, bestehend aus Magnetbahn und Läufer mit Spulen, das Wegmesssystem und die Achssteuerung mit Umrichter und Leistungsversorgung. Weitere Bestandteile sind die Linearführung des Achssystems sowie der Steuerungsrechner.

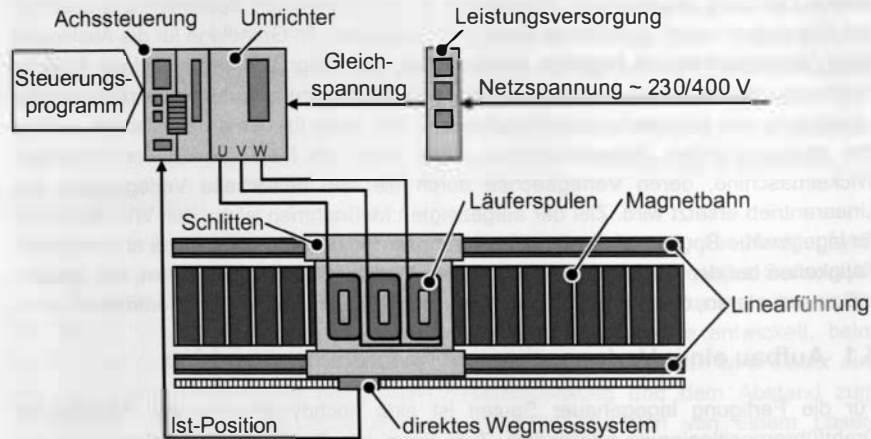


Bild 58: Aufbau einer Vorschubachse mit Linearmotor

### 5.1.1 Randbedingungen für die Auswahl des Linearmotors

Elektrische Linearmotoren stehen in unterschiedlichen Ausführungsformen und Leistungsklassen zur Verfügung. Da bei Linearmotoren im Gegensatz zu rotativen Antrieben keine Beeinflussung der Antriebskraft durch Getriebe möglich ist, spiegelt sich die erforderliche Leistung direkt in der Baugröße des Motors wieder. Die Auswahl der korrekten Linearmotorgröße hängt von den Erfordernissen der Positionieranwendung hinsichtlich Genauigkeit, dynamischen Eigenschaften oder Vorschubkraft ab. Der Ablauf der Auswahl beinhaltet folgende Schritte [145]:

- > Bestimmung der mechanischen Anlagendaten wie bewegte Masse, Verfahrweg, Motoreinbaulage, evtl. auftretende Bearbeitungskräfte, Umgebungsbedingungen
- > Bestimmung der kinematischen Anforderungen wie Beschleunigung bzw. Verzögerung, Geschwindigkeit, Fahr- und Pausenzeiten und Fahrzyklus
- > Bestimmen der auftretenden Kräfte, wie Vorschub- und effektiv benötigte Kraft

Als Grundlage für die Festlegung der Anforderungen an den Linearmotor dienen die ermittelten Messwerte sowie Kenndaten der Referenzmaschinen. Die vom Motor zu bewegnende Lastmasse (Verlegeschlitten bestehend aus Linearlagerschlitten, Lagerbrücke, Drahtführhalterung und Kleinteilen) beträgt  $m_L = 2 \text{ kg}$ . Der für den Einbau verfügbare Bauraum ergibt sich aus der Konstruktion der Verlegeeinheit der Maschine 1, deren Linearführungen für den Aufbau der neuen Verlegeachse genutzt wird. Bei deren Einsatz eines Linearmotors ergibt sich ein effektiver Verfahrweg von 350 mm. Die in Kapitel 3 als Referenz betrachteten Maschinen verfügen über eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von  $v_{max} = 320 \text{ mm/s}$  und eine maximale Beschleunigung von  $a_{max} = 5,6 \text{ m/s}^2$ . Für den auszuwählenden Linearmotor werden diese, um ausreichend Reserven sicherzustellen, auf eine Geschwindigkeit von  $v_{max} = 500 \text{ mm/s}$  und eine Beschleunigung von  $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$  erhöht. Der mit der Verlegeachse verarbeitbare Drahtdurchmesser wird mit 1,5 mm festgelegt.

cke, Drahtführhalterung und Kleinteilen) beträgt  $m_L = 2 \text{ kg}$ . Der für den Einbau verfügbare Bauraum ergibt sich aus der Konstruktion der Verlegeeinheit der Maschine 1, deren Linearführungen für den Aufbau der neuen Verlegeachse genutzt wird. Bei deren Einsatz eines Linearmotors ergibt sich ein effektiver Verfahrweg von 350 mm. Die in Kapitel 3 als Referenz betrachteten Maschinen verfügen über eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von  $v_{max} = 320 \text{ mm/s}$  und eine maximale Beschleunigung von  $a_{max} = 5,6 \text{ m/s}^2$ . Für den auszuwählenden Linearmotor werden diese, um ausreichend Reserven sicherzustellen, auf eine Geschwindigkeit von  $v_{max} = 500 \text{ mm/s}$  und eine Beschleunigung von  $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$  erhöht. Der mit der Verlegeachse verarbeitbare Drahtdurchmesser wird mit 1,5 mm festgelegt.

### Bestimmung der erforderlichen Vorschubkraft

Für die Bestimmung der erforderlichen Vorschubkraft  $F_V$  des Linearmotors ist nach [101] das auf den Motor wirkende Lastkollektiv zu bestimmen. Dieses setzt sich wie folgt zusammen:

$$F_V = F_R + F_A + F_B + F_Z \quad (5.1)$$

mit maximal benötigte Vorschubkraft	$F_V$	in N
Reibkraft	$F_R$	in N
Beschleunigungskraft	$F_A$	in N
Bearbeitungskraft	$F_B$	in N
eventuelle Zusatzkraft	$F_Z$	in N

### Reibkraft

Die Reibkraft  $F_R$  wirkt unabhängig von der Bewegungsrichtung und muss bei jeder Positionierung überwunden werden. Sie ergibt sich aus der Belastung der Führungslager und deren Reibkoeffizient zu [101]:

$$F_R = (F_G + F_D) * \mu = [(m_L + m_P) * g * \cos \beta_V + F_D] * \mu = 0,1 \text{ N} \quad (5.2)$$

mit Gewichtskraft	$F_G$	in N
magnetische Anziehungskraft	$F_D = 0$	(bei Doppelkammausführung)
Lastmasse	$m_L = 2 \text{ kg}$	
Masse des Primärteils	$m_P =$	in Lastmasse eingerechnet
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	
Steigungswinkel des Verfahrwegs	$\beta_V = 0$	
Reibkoeffizient	$\mu = 0,005$	[101]

**Beschleunigungskraft**

Die erforderliche Beschleunigungskraft  $F_A$  ergibt sich aus:

$$F_A = (m_L + m_p) \cdot a_{max} = 20 \text{ N} \quad (5.3)$$

mit Lastmasse	$m_L = 2 \text{ kg}$
Masse des Primärteils	$m_p = \text{in Lastmasse eingerechnet}$
maximale Beschleunigung	$a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$

**Bearbeitungskraft**

Die durch den Draht in Achsrichtung verursachte Bearbeitungskraft wird bestimmt durch die in Drahrichtung wirkende Drahtzugkraft und die Auslenkung des Drahtes in der Wickelebene. In Bild 59 sind die relevanten Kräfteverhältnisse während des Wickelprozesses dargestellt:

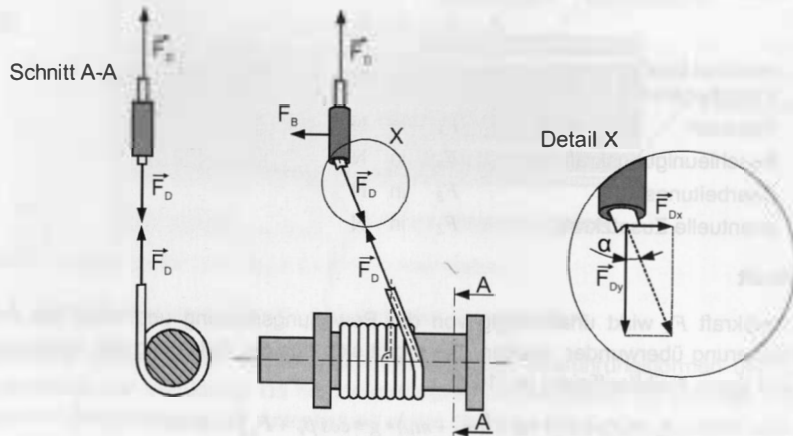


Bild 59: Kräfteverhältnisse beim Wickeln

Unter Vernachlässigung der Reibeffekte im Drahtführer gilt für die von der Verlegachse aufzunehmende Bearbeitungskraft  $F_B$ :

$$F_B = F_{Dx} = F_D \cdot \sin(\alpha) \quad (5.4)$$

mit Drahtzugkraft	$F_D$ in N
x-Komponente der Drahtzugkraft	$F_{Dx}$ in N

Die in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers am Drahtzugregler eingestellte Drahtzugkraft ist während des Wickelprozesses konstant. Folglich ist die Bearbeitungskraft maximal, wenn der Nachlaufwinkel seinen maximalen positiven Grenzwert erreicht hat. Mit Hilfe der in Kapitel 3 ermittelten Gleichung (3.19) zur Bestimmung des maximalen Nachlaufwinkels in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers und des Spulenkörperdurch-

messers, können mit Gleichung (5.4) die maximalen Bearbeitungskräfte berechnet werden. In Bild 60 sind diese für Drahtdurchmesser bis 1,6 mm und vier runde Spulenkörper mit einem Durchmesser von 6 mm, 10 mm, 20 mm und 70 mm dargestellt. Entsprechend der Abnahme der maximalen Nachlaufwinkel mit dem Spulenkörperdurchmesser sinken auch die Bearbeitungskräfte, größere Drahtdurchmesser bewirken hingegen eine Zunahme. Für den in den Anforderungen festgelegten maximal zu verarbeitenden Drahtdurchmesser von 1,5 mm ergibt sich für den kleinsten betrachteten Spulenkörperdurchmesser eine Bearbeitungskraft von 41 N. Eine Betrachtung kleinerer Spulenkörperdurchmesser, die eine höhere Bearbeitungskraft verursachen würden, erfolgt nicht, da die kleinen Biegeradien zu starke Drahtverformungen verursachen würden und insgesamt in Verbindung mit Drahtdurchmessern  $\geq 1,5 \text{ mm}$  als nicht praxisrelevant zu erachten sind.

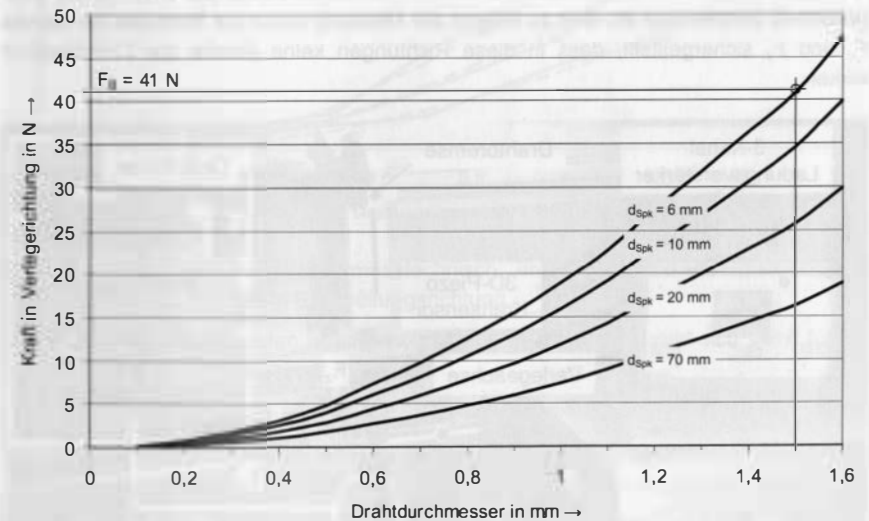


Bild 60: Maximale Kraft in Verlegerichtung in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers und des Spulenkörperdurchmessers

Zur Überprüfung der theoretischen Ergebnisse für die Bearbeitungskräfte, wird mit ausgewählten Drahtdurchmessern zwischen 0,2 und 1,5 mm ein dem lagegenauen Wickeln entsprechender Versuchsprozess betrachtet. Hierzu wird der Drahtführer mit Verlegegeschwindigkeit null programmiert, sodass sich die Wicklung bis zum Erreichen des entsprechenden max. Nachlaufwinkels aufbaut. Hierbei steigt die Kraft in Verlegerichtung, und somit die für die Auslegung des Linearmotors relevante Bearbeitungskraft, kontinuierlich an, wobei sich, entsprechend dem theoretischen Modell, der Maximalwert mit Erreichen des maximalen Nachlaufwinkels einstellt.

Für die Messungen wird ein 3D-Piezo-Kraftsensor 9347 B der Firma Kistler verwendet. Das Funktionsprinzip eines Piezo-Kraftsensors beruht darauf, dass beim Auftreten einer



Kraft auf ein Kristall die Gitterstruktur deformiert wird. Bei der Deformation werden die positiven Silizium- und die negativen Sauerstoff-Ionen gegeneinander verschoben und somit die Ladungsschwerpunkte verlagert, was zur Bildung einer elektrischen Spannung führt [49]. Der Sensor ermöglicht eine direkte Messung der drei senkrecht zueinander stehenden Komponenten einer beliebig gerichteten Kraft, unabhängig vom Kraftangriffspunkt. Durch den Einbau unter Vorspannung, können positive und negative Kräfte in allen Richtungen zeitgleich gemessen werden. Die Wandlung der unter Kräfteinfluss an den Elektroden erzeugten Ladung in eine auswertbare Spannung erfolgt durch einen Ladungsverstärker. In den Messungen wird der Vier-Kanal-Ladungsverstärker Typ 5070 A der Firma Kistler eingesetzt, der speziell für Mehrkomponenten-Kraftmessungen ausgelegt ist. Bild 61 zeigt den Messaufbau für die Bestimmung der Bearbeitungskraft. Die Aufnahme der Kraft in Verlegerichtung erfolgt, wie eingezeichnet, mit dem Messkanal  $F_x$ . Um sicherzustellen, dass der Drahtverlauf ideal geradlinig ausgerichtet ist, wird zu Beginn der Messung durch die Kontrolle der Kanäle  $F_y$  und  $F_z$  sichergestellt, dass in diese Richtungen keine Anteile der Drahtzugkraft wirken.

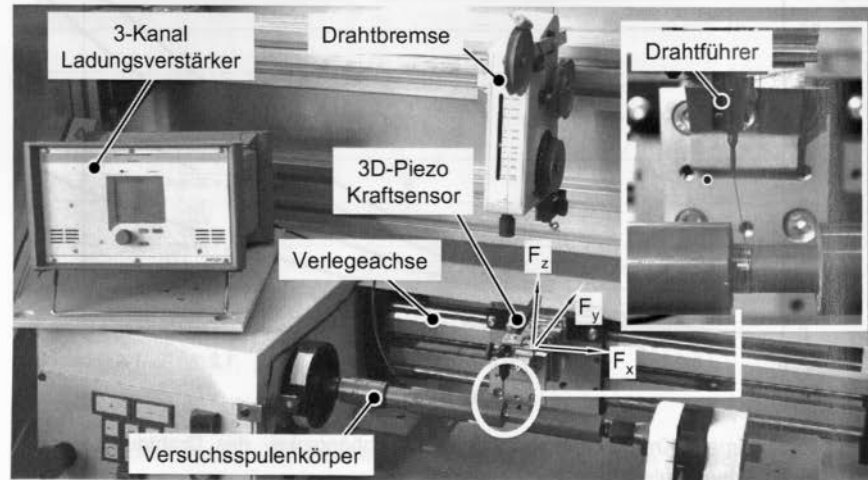


Bild 61: Messaufbau zur Bestimmung der Bearbeitungskraft

Das Diagramm in Bild 62 zeigt eine Zusammenfassung der Messwerte sowie die entsprechenden theoretisch ermittelten Kurven. Die gute Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten maximalen Kräften zeigt, dass das aufgestellte Modell die tatsächlichen Kräfteverhältnisse beim Wickeln gut beschreibt. Bezogen auf die Messwerte für die Drahtdurchmesser von 0,5 mm bis 1,5 mm liegt die Abweichung zwischen den Messergebnissen und den berechneten Werten im Mittel bei unter 5%. Lediglich bei dem kleinsten untersuchten Drahtdurchmesser von 0,2 mm kommt es relativ betrachtet zu stärkeren Abweichungen, da Messungenauigkeiten und Reibungseffekte,

welche im Kraftmodell nicht berücksichtigt werden, bei der geringen Prozesskraft von unter 1 N das Messergebnis stark beeinflussen.

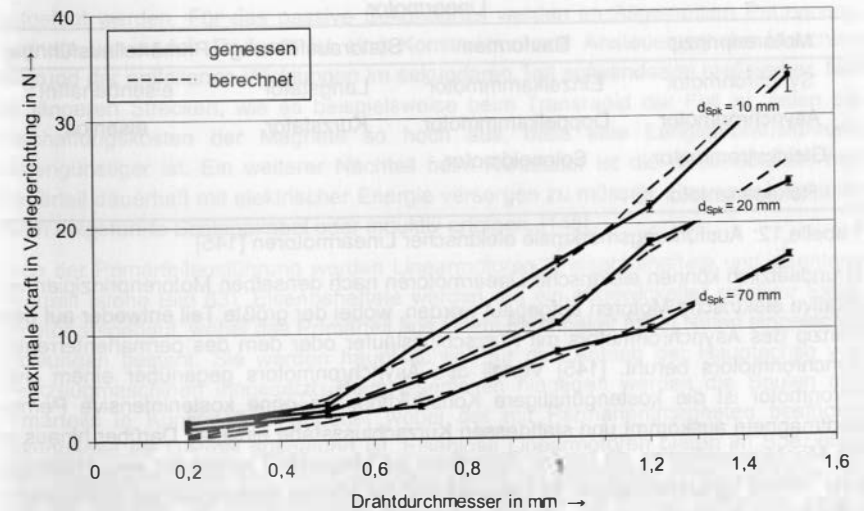


Bild 62: Gegenüberstellung der messtechnisch ermittelten und der berechneten maximalen Kräfte in Bearbeitungsrichtung

Mit der ermittelten maximalen Bearbeitungskraft von  $F_B = 41 \text{ N}$  ergibt sich somit für die maximal benötigte Vorschubkraft  $F_V$ :

$$F_V = F_R + F_A + F_Z + F_B = 60,1 \text{ N} \quad (5.5)$$

Auf Basis der ermittelten Werte kann nachfolgend die Auswahl des Linearmotors sowie der zugehörigen Achssteuerung durchgeführt werden. Die Anforderungen, die bei der Auswahl zu berücksichtigen sind, fasst Tabelle 11 zusammen:

Kennwert		
Lastmasse	$m_L$	= 2 kg
Verfahrweg	$s$	= 0,4 m
maximale Vorschubkraft	$F_{Vm}$	= 60,1 N
maximale Geschwindigkeit	$v_m$	= 0,5 m/s
maximale Beschleunigung	$a_m$	= 10 m/s <sup>2</sup>

Tabelle 11: Anforderungen an den Linearmotor für die Verlegeachse

### 5.1.2 Projektierung eines Linearantriebs für die prototypische Verlegeachse

Elektrische Linearmotoren stehen in unterschiedlichsten Ausführungen zur Verfügung. Sie können nach [145] hinsichtlich elektrischem Motorenprinzip, Bauform, Statorausfüh-

rung und Primärteilausführung unterschieden werden. Die möglichen Ausprägungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Linearmotor			
Motorenprinzip	Bauformen	Statorausführung	Primärteilausführung
Synchronmotor	Einzelkammotor	Langstator	eisenbehaftet
Asynchronmotor	Doppelkammotor	Kurzstator	eisenlos
Gleichstrommotor	Solenoidmotor		
Reluktanzmotor			

Tabelle 12: Ausführungsmerkmale elektrischer Linearmotoren [145]

Grundsätzlich können elektrische Linearmotoren nach denselben Motorenprinzipien wie rotative elektrische Motoren aufgebaut werden, wobei der größte Teil entweder auf dem Prinzip des Asynchronmotors mit Kurzschlussläufer oder dem des permanentenerregten Synchronmotors beruht. [145] Vorteil des Asynchronmotors gegenüber einem Synchronmotor ist die kostengünstigere Konstruktion, die ohne kostenintensive Permanentmagnete auskommt und stattdessen Kurzschlussstäbe einsetzt. Darüber hinaus ist die Montage einfacher, da nur bei Stromfluss ein Magnetfeld aufgebaut wird. Nachteilig sind höhere Verlustleistungen im Sekundärteil, die oftmals leistungsfähige Kühlsysteme erforderlich machen. Die Konstruktion des Synchronmotors mit Permanentmagneten verursacht hingegen größeren Aufwand bei der Montage und konstruktiver Kapselung der Motorteile zum Schutz vor Spänen. Hinsichtlich der erreichbaren Vorschubkräfte bieten Synchronmotoren bei vergleichbarer Baugröße deutlich höhere Kräfte als Asynchronmotoren. Aufgrund der geringen Verluste im Sekundärteil ist ein Betrieb oftmals ohne aktive Kühlung möglich. [145]

Die Unterscheidung zwischen Einzelkamm- und Doppelkammotor soll nachfolgend anhand des Synchronmotors erfolgen. Der Einzelkammotor trägt seine Wicklungen oder Permanentmagnete nur einseitig. Es handelt sich hierbei um die preisgünstigere und konstruktiv einfachere Lösung. Beim Doppelkammotor umschließt das Sekundärteil als U-Profil das Primärteil von beiden Seiten. In der Regel wird der Doppelkammotor als Kurzstator mit bewegtem Sekundärteil ausgeführt. Durch den symmetrischen Aufbau heben sich die Anziehungskräfte auf das Primärteil auf. Weiterhin kann das Gewicht des Sekundärteils reduziert werden wodurch größere Beschleunigungen möglich sind. Dadurch kommt diese Bauweise für kurzhubige Bewegungen mit hohen geforderten Beschleunigungen zum Einsatz. Bei eisenbehafteten Motoren dagegen besteht eine magnetische Anziehungskraft zwischen Primär- und Sekundärteil, die etwa das 2-fache der Vorschubkraft beträgt und durch eine geeignete Führung aufgenommen werden muss. Sie werden bevorzugt als Lastmaschine für große Hübe bei niedriger Dynamik eingesetzt. Die hohen Kräfte resultieren aus dem niedrigeren magnetischen Widerstand, der aus dem magnetischen Material und einem kleinen Luftspalt besteht. Bei eisenlosen Motoren hingegen sind auf beiden Seiten des Primärteils die Luftspalte zu berücksichtigen. [41][145][159]

Bei der Langstatorausführung ist das Primärteil das längere, ruhende Teil und das Sekundärteil das bewegte, kürzere, bei der Kurzstatorausführung umgekehrt. Sowohl Primär- als auch Sekundärteil können je nach Anforderung als das bewegliche Teil festgelegt werden. Für das passive Sekundärteil werden im Allgemeinen Permanentmagnete verwendet. Dadurch ist eine Konstruktion und Ansteuerung der Maschine aufgrund der entfallenen Wicklungen im sekundären Teil aufwandsarm realisierbar. Nur bei längeren Strecken, wie es beispielsweise beim Transrapid der Fall ist, fallen die Anschaffungskosten der Magnete so hoch aus, dass eine Langstatorausführung kostengünstiger ist. Ein weiterer Nachteil beim Kurzstator ist die Notwendigkeit, das Primärteil dauerhaft mit elektrischer Energie versorgen zu müssen. Das kann entweder durch mitgeführte Schleppkabel oder induktiv erfolgen. [145]

Nach der Primärteilausführung werden Linearmotoren in eisenbehaltete und eisenlose unterteilt (siehe Bild 63). Eisenbehaltete werden wie ein abgewickelter rotativer Elektromotor aufgebaut, wobei das Primärteil aus einem Blechpaket mit in Nuten eingelegten Wicklungen besteht. Sie werden hauptsächlich für den Antrieb der Hauptachse von Werkzeugmaschinen eingesetzt. Beim eisenlosen hingegen werden die Spulen des Primärteils in Kunststoff eingebettet wobei der mit Permanentmagneten bestückte Sekundärteil als U-Profil ausgeführt ist. Eisenlose Linearmotoren bieten im Speziellen hohe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte bei gleichzeitig hoher Laufgüte. Sie sind gut geeignet für Anwendungen, wo kleine Massen mit hohen Taktzeiten genau bewegt werden müssen oder eine sehr hohe Gleichlaufgüte gefordert wird. Durch den eisenlosen Aufbau des Primärteils entstehen keine Reluktanzkräfte wodurch rippelfreie Bewegungen möglich sind. [41][145][159]

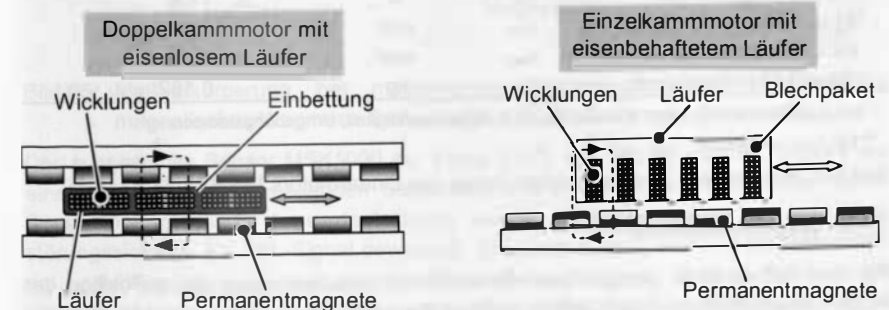


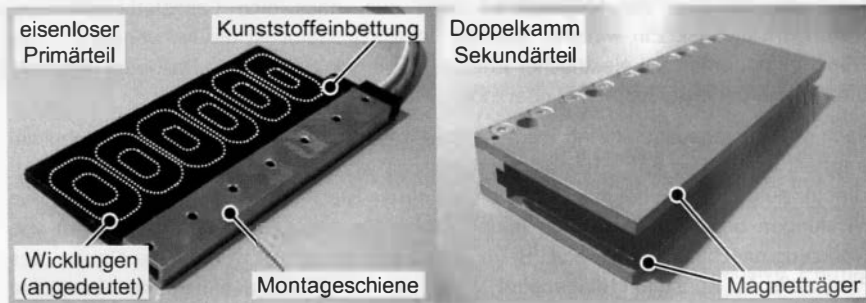
Bild 63: Alternative Ausführungsformen von Linearmotoren [145]

Wegen der positiven Eigenschaften hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Dynamik und vor dem Hintergrund der vergleichsweise geringen erforderlichen Vorschubkräfte, wird bei der durchgeführten Marktrecherche zur Auswahl eines geeigneten Linearmotors für den prototypischen Aufbau der Verlegeachse der Schwerpunkt auf eisenlose Linearmotor-Systeme gelegt. Aus den analysierten Systemen wird der Linearmotor UM 6 N der Firma Tecnotion ausgewählt. Die Bestandteile und technischen Kennwerte

des synchronen Linearmotors mit Kurzstator und Sekundärteil in Doppelkammordnung sind in Bild 64 dargestellt und aufgeführt. Mit der verfügbaren Spitzenkraft von  $F_P = 200 \text{ N}$  erfüllt der UM 6 N Motor die Auswahl-Bedingung

$$F_P \leq F_D \quad (5.6)$$

und ist somit bezüglich der berechneten Kräfte ausreichend dimensioniert.



Kennwert	Formelzeichen	Einheit	Tecnotion UM 6 N
Motortyp	-	-	3-Phasen synchron eisenlos
max. Spannung Ph-Ph	$U_{max}$	V	300
Spitzen-Kraft	$F_P$	N	200
Dauer-Kraft	$F_D$	N	50 ±7
Spitzen-Strom	$I_P$	A	5,5
max. Dauer-Strom	$I_D$	A	1,6
Max. Geschwindigkeit	$v_{max}$	m/s	10
Max. Beschleunigung**	$a_{max}$	m/s <sup>2</sup>	100
Gewicht Spuleneinheit	$m_{Sp}$	kg	0,162

\* abhängig von Anwendung, Kühloberfläche, Luftgeschwindigkeit, Umgebungstemperatur

\*\* bei 2 kg Lastmasse

Bild 64: Bestandteile und Technische Daten des Linearmotors UM 6 N [88]

### 5.1.3 Wegmess-System

Für den Aufbau einer geregelt betriebenen Vorschubachse muss die Ist-Position des Motor-Läufers messtechnisch erfasst werden. Bei einer Vorschubachse mit Linearmotor erfolgt dies durch ein direktes lineares Wegmesssystem, welches die Ist-Positionsdaten als Eingangswerte für den Positionsregelkreis erzeugt. Auswahlkriterien für lineare Weggeber sind nach [101] u. a. die maximale Geschwindigkeit, der erforderliche Verfahrenweg, die Auflösung, die Messgenauigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse (Staub, EMV etc.) sowie die Kosten.

Das eingesetzte Messsystem bestimmt maßgeblich die Systemkosten und die erreichbare Dynamik. In Linearachsen finden vorwiegend optische oder magnetische Weg-

mess-Systeme Verwendung. Nachteile optischer Weggeber sind die aufwändige Montage sowie die, im Vergleich zu magnetischen Systemen, hohen Systemkosten [145]. Daher wird für den prototypischen Aufbau der Verlegeachse ein magnetisches Wegmesssystem verwendet, dessen Beschaffungskosten um ca. 50% unter denen eines vergleichbaren optischen Wegmesssystems liegen. Darüber hinaus ist die Montage aufgrund geringerer Anforderungen an die Genauigkeit mit wesentlich geringerem Aufwand verbunden [94].

Magnetische Wegmess-Systeme bestehen aus einem Magnetband und einem mit magnetoresistiven Sensoren bestückten Abtastkopf (siehe Bild 65). Die Maßverkörperung erfolgt durch eine periodische Aufteilung des Magnetbandes in Nord- und Süd-Pole, wobei die Auflösung A der Länge eines Magnetpols entspricht. Beim Überfahren des Magnetbandes mit dem Abtastkopf ändern sich die Widerstände der Sensoren unter dem Einfluss der magnetischen Felder. Durch die Schaltung von vier Sensoren in einer Wheatstoneschen Brücke ergibt sich beim Überfahren des Magnetbandes eine sinusförmige Brückenspannung  $U_A(x)$ . Zusammen mit dem Signal einer weiteren, versetzt angeordneten Sensorgruppe können im Achsverstärker der Betrag und die Richtung einer Bewegung bestimmt werden. [40]

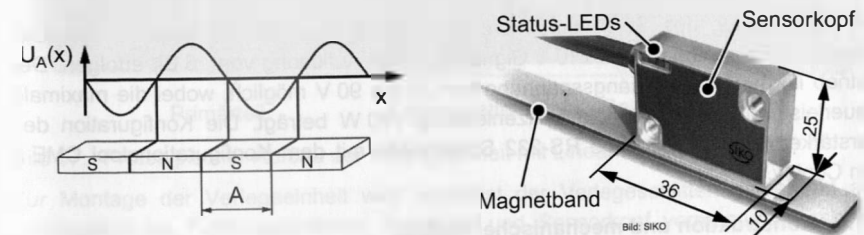


Bild 65: Maßverkörperung bei magnetischen Wegmesssystemen [101] (links); magnetisches Wegmess-System MSK1000 (Maße in mm) [95] (rechts)

Der ausgewählte Sensor MSK1000 der Firma SIKO, vgl. Bild 65 (rechts), besteht aus einem berührungslos messenden Sensorkopf und einem Magnetband. Über die im Sensorkopf integrierte Auswerteelektronik werden die gemessenen Impulse in ein störungssicheres 5 V TTL-Signal gewandelt. Das Magnetband, welches als Metermaterial erhältlich ist, kann über den mit Klebstoff beschichteten Rücken direkt an der Führung des Linearmotors verklebt werden. Zum Schutz vor Beschädigungen wird es nach der Montage mit einem selbstklebenden Edelstahlband abgedeckt. Das Sensorsystem bietet eine Auflösung von 1 µm, eine Wiederholgenauigkeit von ±5 µm und eine maximale Verfahrensgeschwindigkeit von 800 mm/s [95].

### 5.1.4 Servoverstärker

Zur Steuerung und Regelung der Verlegeachse wird der digitale Servoverstärker Accelnet Panel ADP-090 der Firma Copley Controls ausgewählt (siehe Bild 66). Der voll-digitale Aufbau erlaubt eine einfache Parametrierung sowohl der Regelkreisstruktura-

ren als auch der Regelparameter. Je nach Einsatzzweck kann der Regler als Positions-, Strom- oder Geschwindigkeitsregler mit vorkonfigurierten kaskadierten Regelkreisen programmiert und betrieben werden. [84]

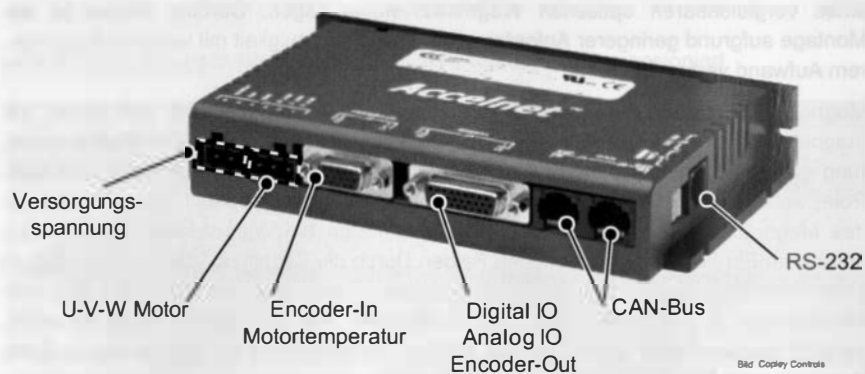


Bild 66: Schnittstellen des Servoverstärkers Accelnet Panel ADP [75]

Die Ansteuerung des Servoverstärkers kann digital (CAN-Bus, Devicenet, Step-Dir-Signale) oder analog mittels  $\pm 10$  V Signal mit einer Auflösung von 16 Bit erfolgen. Der Betrieb ist mit einer Eingangsspannung von 20 bis 90 V möglich, wobei die maximale Dauerleistung 270 W und die Spitzenleistung 790 W beträgt. Die Konfiguration des Verstärkers erfolgt über eine RS-232 Schnittstelle mit dem Konfigurationstool CME 2 von Copley.

### 5.1.5 Konstruktion und mechanischer Aufbau

Um den Aufwand für Neu- bzw. Umkonstruktion zu minimieren, erfolgt die Integration des Linearmotors in die Wickelmaschine auf Basis einer bestehenden Verlegeeinheit. So können beispielsweise die Verbindungsschnittstellen zwischen Verlegeeinheit und Maschinen-Grundplatte oder die vorhandene Gehäusekonstruktion beibehalten und ein aufwandsarmer und schneller Übergang vom Gewindespindel-Antrieb auf den Linearmotor sichergestellt werden. Von der bestehenden Verlegeeinheit werden für die weitere Konstruktion neben der tragenden Grundstruktur insbesondere die Linearführungen des Schlittens übernommen, und auf Grundlage der lediglich in 2D vorhandenen Konstruktionszeichnungen ein 3D-Modell in der CAD-Software Pro/Engineer erstellt. Bei der Integration des Linear-Antriebssystems müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden. Neben der generellen Forderung nach einer fertigungs- und montagegerechten Konstruktion von Linearmotor- und Wegmesssystem-Aufnahme, muss eine Parallelität des Verfahrensweges von Primärteil zu Magnetstrecke  $\leq 0,05$  mm und eine Ebenheit der Befestigungsflächen für Primär- und Sekundärteils  $\leq 0,1$  mm sichergestellt werden [88]. Für einen störungsfreien Betrieb, muss bei der Integration des Sensorkopfes darüber

hinaus ein Sicherheitsabstand von mindestens 40 mm zu dem mit Permanentmagneten bestückten Sekundärteil des Linearmotors eingehalten werden.

Bild 67 zeigt den prototypisch realisierten Aufbau der Verlegeeinheit. Das Primärteil des Linearmotors ist über eine Montagebrücke mit den beiden Schlitten der Linearführung verbunden. Das Sekundärteil ist über eine Verbindungsleiste an der Bodenplatte des Gehäuses befestigt. Zur Sicherstellung der geforderten Toleranzen sind alle relevanten Komponenten mittels Passstiften ausgerichtet. Über einen Anbauwinkel ist auf der Rückseite der Montagebrücke der Sensorkopf des Wegmesssystems angeschraubt, das Magnetband ist auf die Führungs-Trägerplatte des Gehäuses aufgeklebt.

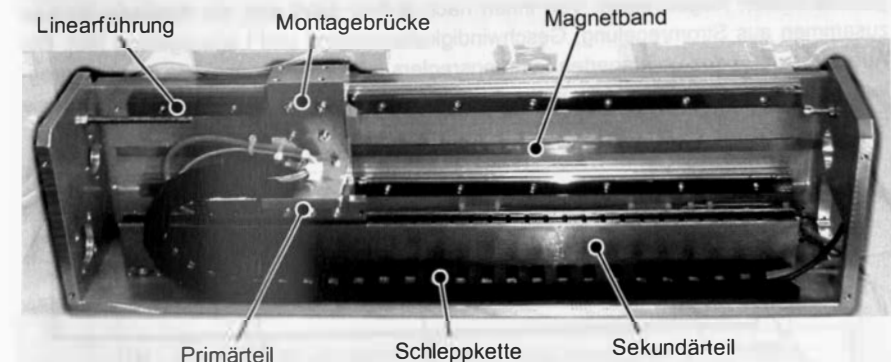


Bild 67: Prototypischer Aufbau der Verlegeeinheit mit Linearmotor

Zur Montage der Verlegeeinheit wird zunächst der Verlegeschlitten bestehend aus Montagebrücke, Führungsschlitten, Primärteil und Sensorkopf vormontiert. Anschließend wird die Verbindungsleiste mit der Bodenplatte und dem Sekundärteil des Motors verschraubt. Durch das Einschieben des Verlegeschlittens von der frei zugänglichen Seite der Verlegeeinheit auf die Führungsschienen und das Anbringen der Schleppkette ist die mechanische Montage abgeschlossen. Zur Komplettierung sind noch die Signal- und Leistungs-Leitungen mit dem Servoverstärker zu verbinden und der Abstand des Sensorkopfes zum Magnetband über Langlöcher zu justieren.

### 5.1.6 Inbetriebnahme der Verlegeachse

Zur Inbetriebnahme der Verlegeachse erfolgt nach der Verdrahtung der einzelnen Antriebskomponenten Motor, Wegmesssystem und Achsverstärker die Parametrierung des Achsverstärkers in der Parametrierungs-Software CME in folgenden Schritten:

1. *Basic Setup*: Grundlegende Eigenschaften des Antriebssystems
2. *Motor/Feedback*: Technische Daten von Motor und Wegmesssystem
3. *DI-IO*: Konfiguration Digitale Ein- und Ausgänge
4. *Auto Phase*: Automatische Kommutierung des Motors
5. *Auto Tune*: Automatische Parametrierung der I-, V- und P-Regelkreise



Nach Durchführung der Grundeinstellungen und Identifikation des Motors durch den Achsverstärker können die Parameter der Positions-, Geschwindigkeits- und Stromregelung konfiguriert werden. Für die nachfolgend durchgeführten Tests wird der Achsverstärker für eine Positionsregelung parametrieren. Bei der anschließenden Integration in die Wickelmaschine wird der Positionsregelkreis in die übergeordnete Maschinensteuerung integriert und auf dem Achsverstärker lediglich eine Stromregelung implementiert. Für die Reglerauslegung wird die in der Software CME2 integrierte Funktion *Auto Tune* verwendet, die die Möglichkeit einer automatischen Abstimmung der Regelkreisparameter bietet. Die im eingesetzten Achsverstärker realisierte Kaskadenregelung ist in Bild 68 dargestellt. Hierbei besteht die gesamte Regelkreisstruktur aus in sich geschachtelten Regelkreisen. Von innen nach außen setzt sich die Kaskadenstruktur zusammen aus Stromregelung, Geschwindigkeitsregelung und Lageregelung [80]. Die Ausgangsgröße des überlagerten Führungsreglers ist die Führungsgröße des Folgereglers. So werden Störgrößen, die in der inneren Schleife auftreten, ausgeglichen bevor sie Einfluss auf die äußeren Regelschleifen haben [61].

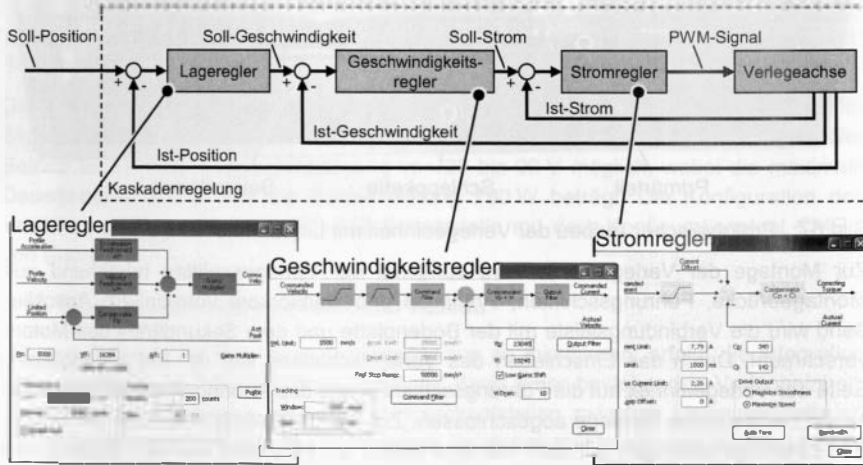


Bild 68: Kaskadenregler der Verlegeachse

### 5.1.7 Analyse und Beurteilung der Verlegeachse mit Direktantrieb

Für den Vergleich mit den untersuchten Referenzmaschinen erfolgt im Weiteren die Analyse und Beurteilung der aufgebauten Verlegeachse mit Direktantrieb<sup>5</sup>. Die Messungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Linearantriebes entsprechen dem in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehen. Die Positionierunsicherheit und Wiederholpräzision wird nach der Norm ISO 230-2 mit einem optischen Längenmessgerät Heidenhain LS 487 ermittelt. Die Analyse der Dynamik und des Verhaltens bei Richtungs-

<sup>5</sup> Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde der Verfasser von Frau Dipl.-Ing. Lolana Maricic unterstützt.

wechsel am Spulenkörperflansch wird mit zwei hochdynamischen und hochauflösenden Laser-Triangulationssensoren durchgeführt.

### Positionierunsicherheit und Wiederholpräzision

Für die Bestimmung der Positionierunsicherheit und Wiederholposition werden zehn Messpositionen in ungleichmäßigen Abständen entlang der 300 mm Messstrecke verteilt und die Positionsabweichungen beim Anfahren mit der Achse ermittelt. Aus den gewonnenen Messwerten resultiert für die Verlegeachse mit Linearmotor das in Bild 69 dargestellte Abweichungsband.

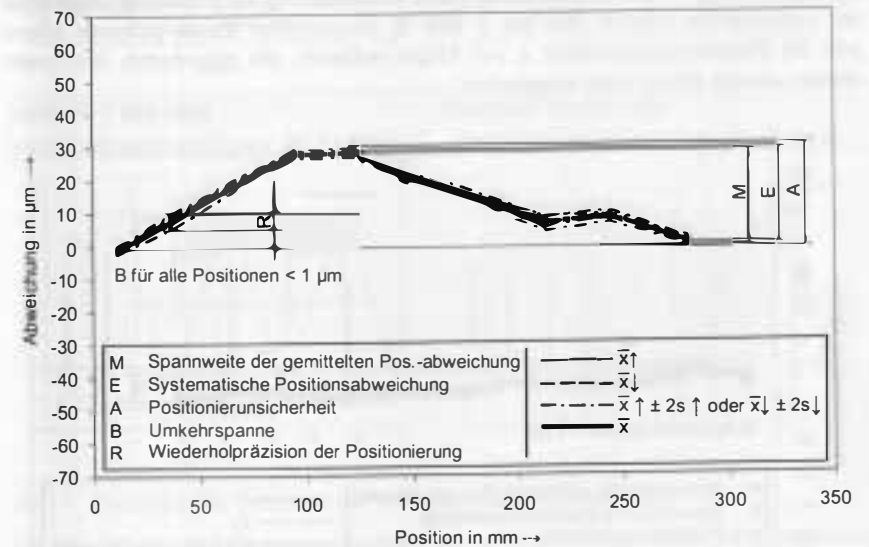


Bild 69: Positionierungsgenauigkeit der Verlegeachse mit Linearmotor für den Verfahrweg von 300 mm

Für den betrachteten Verfahrweg von 300 mm beträgt die Spannweite der gemittelten Positionsabweichung  $M = 29 \mu\text{m}$ , die systematische Positionsabweichung  $E = 30 \mu\text{m}$  und die Positionierunsicherheit  $A = 32 \mu\text{m}$ . Im Vergleich zu den beiden untersuchten Referenzmaschinen (siehe Abschnitt 3.4.5) weist die Verlegeeinheit mit Linearmotor somit um rund 50% bessere Kennwerte auf, erreicht aber noch nicht die festgelegten Zielwerte. Die geforderte Positionierunsicherheit von  $25 \mu\text{m}$  wird um  $7 \mu\text{m}$  überschritten.

Hinsichtlich der Wiederholpräzision  $R$  ergeben sich über den gesamten Messbereich Werte von unter  $5 \mu\text{m}$ . Die geforderte Wiederholpräzision wird somit ohne weitere Maßnahmen eingehalten. Durch den Entfall mechanischer Übertragungselemente bei der Verlegeachse mit Linearantrieb kann systembedingt keine Umkehrspanne auftreten.



Die messtechnisch erfasste Umkehrspanne  $B$  von durchschnittlich  $< 1 \mu\text{m}$  bestätigt diese Aussage.

Eine Verbesserung der Positionierungsunsicherheit des Linearantriebs kann durch eine Achsfehlerkompensation mit Stützpunkten erreicht werden [146]. Hierzu wird in gleichmäßigen Abständen die Abweichung der Achse von der Sollposition gemessen. Aus den ermittelten Abweichungen kann nachfolgend eine Korrekturkurve erzeugt werden, anhand derer für jede beliebige Achs-Sollposition ein Korrekturwert bestimmt wird. Im Betrieb wird die Korrekturkurve vor den Sollwerteingang des Positionsreglers geschaltet, und korrigiert eingehende Sollwerte um den entsprechenden Versatz. Durch die Achsfehlerkompensation ist eine wesentliche Verbesserung der Positionierungsunsicherheit der Verlegeachse möglich. Wie die in Bild 70 dargestellten Messergebnisse zeigen, wird die Positionierungsunsicherheit  $A$  auf  $12 \mu\text{m}$  reduziert, die geforderten Grenzwerte werden von der Achse somit eingehalten.

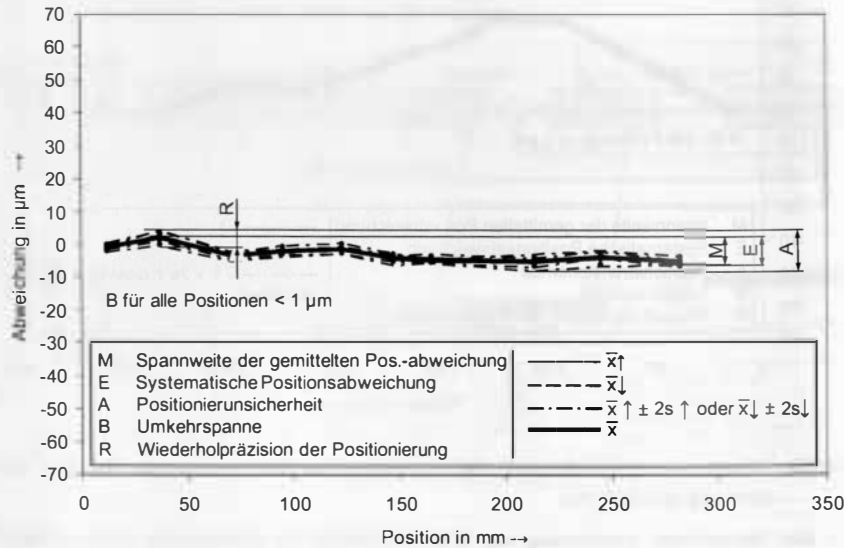


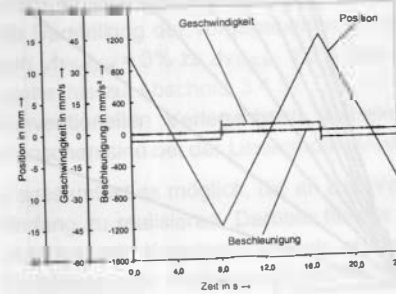
Bild 70: Positionierungsgenauigkeit der Verlegeachse mit Linearmotor für den Verfahrweg von 300 mm mit Achsfehlerkompensation

### Dynamische Kennwerte

Für den Vergleich mit den in Abschnitt 3.4 untersuchten Verlegeachsen mit Kugelgetrieb wird wiederum die Verfahrbewegung während der Bewicklung eines Spulenkörpers mit einer Kammerbreite von 30 mm betrachtet und die Verlegegeschwindigkeit hierbei jeweils stufenweise um 1.000 UpM von 1.000 UpM auf 10.000 UpM erhöht. In Bild 71 sind die Ergebnisse für 2.000 UpM und 10.000 UpM dargestellt.

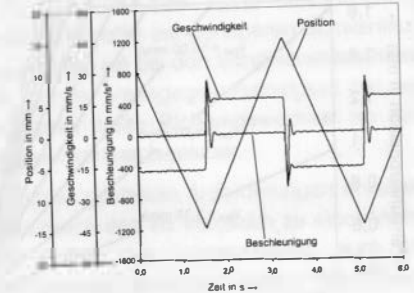
Drehzahl: 1.000 UpM

Drahtführergeschwindigkeit: 3,33 mm/s



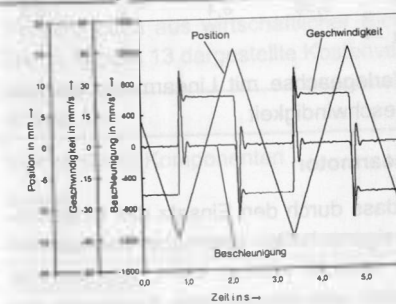
Drehzahl: 5.000 UpM

Drahtführergeschwindigkeit: 16,66 mm/s



Drehzahl: 7.000 UpM

Drahtführergeschwindigkeit: 23,33 mm/s



Drehzahl: 10.000 UpM

Drahtführergeschwindigkeit: 33,33 mm/s

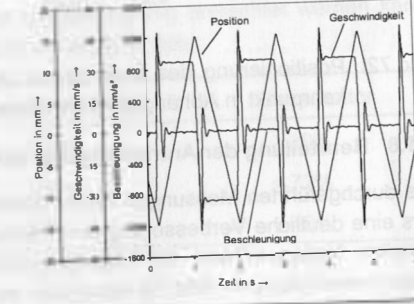


Bild 71: Dynamisches Verhalten der Verlegeachse mit Linearmotor

Wie aus den Messergebnissen ersichtlich ist, weist die Verlegeachse mit Linearmotor bezüglich des Geschwindigkeitsverlaufs nur sehr geringe Schwankungen auf. Unwesentliche Überschinger treten lediglich an den Umkehrpunkten auf. Die Schwankungen bei einer Verlegegeschwindigkeit von 33,33 mm/s belaufen sich auf ca.  $\Delta v_{\text{Soll, Lin}} = 3\%$  des Sollwerts. Die Ausregelzeit bei der betrachteten Maximalgeschwindigkeit beträgt  $T_{\text{Aus, Lin}} = 0,17 \text{ s}$ , die Überschwingweite 24% bezogen auf die Sollgeschwindigkeit und die Maximalbeschleunigung  $1.271 \text{ mm/s}^2$ .

Das Verhalten der Verlegeachse mit Linearantrieb beim Richtungswechsel an den Spulenkörperflanschen ist in Bild 72 dargestellt. Für die Messungen wird die Bewegung des Drahtführers bei konstantem Drahtdurchmesser von 0,2 mm und, entsprechend den Messungen in Abschnitt 3.4, Verlegegeschwindigkeiten zwischen 3,33 und 33,33 mm/s betrachtet. Die Messergebnisse zeigen, dass die Verlegeachse über den gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich den um den halben Drahtdurchmesser vom Flansch entfernten Soll-Umkehrpunkt erreicht. Ein Versatz, wie er bei den konventionellen Maschinen auftritt, ist nicht nachweisbar.

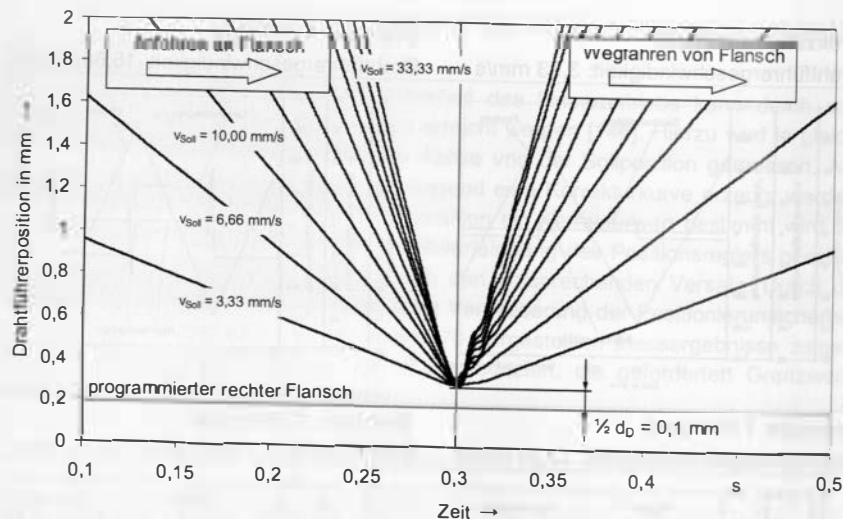


Bild 72: Positionierung des Drahtführers der Verlegeachse mit Linearmotor am Umkehrpunkt in Abhängigkeit der Verlegegeschwindigkeit

### 5.1.8 Beurteilung der Antriebslösung mit Linearmotor

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz des Linearmotors eine deutliche Verbesserung der Positioniereigenschaften gegenüber den konventionellen Verlegeachsen mit Kugelgewindetrieb erreicht werden kann. Wie aus der Zusammenstellung in Bild 73 ersichtlich ist, liegen alle untersuchten Kennwerte des Linearmotors unter denen der Maschinen mit Kugelgewindetrieb. Die festgelegten Anforderungen werden mit der neu entwickelten Verlegeeinheit durchweg eingehalten.

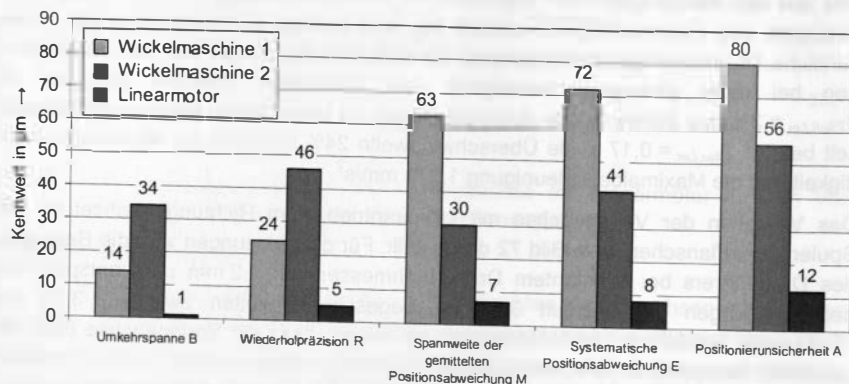


Bild 73: Gegenüberstellung der ermittelten Positioniereigenschaften

Neben den Positionierungseigenschaften wurde auch das dynamische Verhalten des Linearmotors überprüft. Die Messergebnisse bestätigen die erwarteten Vorteile. Neben kürzeren Ausregelzeiten ( $T_{Aus, Lin} = 0,17$  s zu  $T_{Aus, M1} = 0,19$  s bzw.  $T_{Aus, M2} = 0,23$  s) erfolgt die Darstellung der vorgegebenen Geschwindigkeitsprofile mit geringeren Schwankungen ( $\Delta v_{Soll, Lin} = 3\%$  zu  $\Delta v_{Soll, M1} = 5\%$  bzw.  $\Delta v_{Soll, M2} = 8\%$ ) als bei den Vergleichsmaschinen (siehe hierzu Abschnitt 3.4.5). Die mit zunehmender Verlegegeschwindigkeit bei den konventionellen Verlegeachsen auftretenden Fehler beim Richtungswechsel an den Flanschen sind bei der Linearmotor-Verlegeachse nicht nachweisbar.

Insgesamt ist es möglich, die an den Verlegeantrieb gestellten Anforderungen in vollem Umfang zu realisieren. Darüber hinaus können durch den im Vergleich zu einer Verlegeachse mit Kugelgewindetrieb einfacheren Aufbau des Linearantriebs, auch der Fertigungs- und Montageaufwand für die Verlegeeinheit reduziert werden. Wenngleich die Kosten für die Antriebskomponenten höher liegen, ergeben sich bei der Gegenüberstellung der Systemkosten lediglich um 6% höhere Gesamtkosten bezogen auf eine entsprechende Verlegeachse mit Kugelgewindetrieb. Somit kann der aufgebaute Prototyp auch aus wirtschaftlicher Sicht als konkurrenzfähig betrachtet werden kann. Der in Tabelle 13 dargestellte Kostenvergleich verdeutlicht dies.

Kosten für	Kugelgewindetrieb	Linearmotor
Mechanische Komponenten	100%	- 39%
Antrieb	100%	+ 72%
Montage	100%	- 40%
Gesamtkosten	100%	+ 6%

Tabelle 13: Vergleich der Systemkosten der aufgebauten Verlegeachse mit Linearantrieb und einer entsprechenden Verlegeachse

### 5.2 Integration der Nachlaufwinkel-Sensorik in die Maschinenstruktur

Die in Kapitel 4 entwickelten Sensorlösungen für die Erfassung des Nachlaufwinkels beruhen auf zwei alternativen Ansätzen. Bei der direkten Erfassung wird anhand des Drahtverlaufs zwischen Drahtführer und Spulenkörper der Nachlaufwinkel bestimmt. Hierzu wurden zwei Sensorsysteme aufgebaut, zum einen basierend auf einem Bildverarbeitungssystem und zum anderen auf einem optischen Zeilensensor. Bei der indirekten Erfassung wird der Nachlaufwinkel aus der Position der aktuellen Windung und der Position des Drahtführers bestimmt. Das hierfür aufgebaute Sensorsystem erfasst mit einem Laser-Profilsensor die Topologie der Spule und ermittelt mit einer Bild-Subtraktionsanalyse die jeweils aktuelle Windungsposition. Zusammen mit der aktuellen Drahtführerposition und unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse ist eine Berechnung des Nachlaufwinkels möglich. Für die Integration der prototypisch realisierten Sensorsysteme in die Wickelmaschine werden die nachfolgend beschriebenen Optimierungsmaßnahmen durchgeführt.

### Bilderkennungs-System

Zur Integration des Bilderkennungs-Systems in die Wickelmaschine ist es erforderlich, die Beleuchtung, welche im Versuchsaufbau mit einer Halogenlampe realisiert wurde, in eine kompakte Sensoreinheit mit der Kamera zu integrieren. Hierdurch soll unter anderem der Einfluss von Fremdlicht auf das Erkennungsergebnis sowie der Einrichtaufwand reduziert werden. Auf Basis einer systematischen Analyse verfügbarer Systemlösungen für Beleuchtungen wird eine flexible Elektrolumineszenz-Folie (kurz EL-Folie) als Lichtquelle ausgewählt.

Für Beleuchtungszwecke wird in EL-Folien die Eigenschaft bestimmter Materialien genutzt, auf das Anlegen eines elektrischen Feldes mit der Emission von Licht zu reagieren. Bei den nach dem Halbleiterprinzip aufgebauten Systemen hebt das erregende elektrische Feld Elektronen auf ein höheres Energieniveau, von dem aus diese, unter Aussendung von Licht, wieder auf ihr Ausgangsniveau zurückfallen. Der Aufbau von EL-Folien entspricht dem eines Plattenkondensators. Kernelement ist eine Schicht aus elektrolumineszientem Material, die von einer Isolierschicht umgeben zwischen den beiden Kondensatorplatten eingebettet ist. Damit das emittierte Licht aus dem Kondensator austreten kann, muss eine der Kondensatorplatten transparent ausgeführt sein. Zum Schutz gegen mechanische Einflüsse und zur elektrischen Isolierung erfolgt eine Einbettung in eine flexible Kunststoffolie. Für den Betrieb von EL-Folien ist eine Ansteuerung mit sinusförmiger Wechselspannung erforderlich, die üblicherweise aus Gleichspannung mit einem Inverter gewonnen wird. [83]

Vorteile von EL-Folien sind die gleichmäßige, ungerichtete Lichtemission die einem idealen Lambertstrahler entspricht, d.h. die Leuchtdichte ist unabhängig von der Betrachtungsrichtung [126]. Darüber hinaus können sie wegen ihres Aufbaus auf Folienbasis beliebig gebogen und in diesem deformierten Zustand auch betrieben werden. Im Vergleich zu konventionellen Lichtquellen bieten EL-Folien einen sehr geringen Energieverbrauch (ca.  $10 \text{ mW/cm}^2$ ), einen äußerst hohen Wirkungsgrad von 90% sowie Lebensdauern von über 10.000 h. [83]

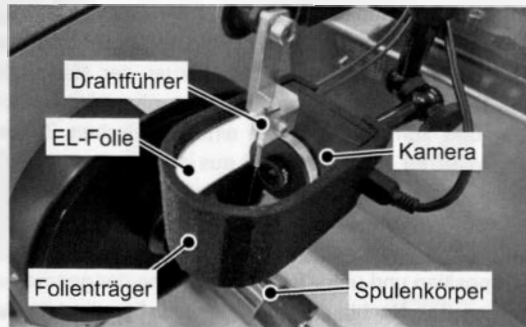


Bild 74: Sensorsystem mit Kamera zur Erfassung des Nachlaufwinkels

Durch die Flexibilität der EL-Folie ergeben sich neue Konstruktionsmöglichkeiten bei der Integration in das Bilderkennungssystem. Im aufgebauten System ist die EL-Folie U-förmig gebogen, mit den Schenkeln parallel zu den Seitenflächen der Kamera montiert. Dies führt zu einer guten Abschirmung des Aufnahmebereichs gegen Fremdlicht und externe Störungen. Zur Fixierung und Stabilisierung der EL-Folie ist diese in einem im Rapid-Prototyping-Verfahren gefertigten Formteil aus Kunststoff verbaut. Hierdurch wird der Abstand zwischen Beleuchtungsquelle und Kamera konstant gehalten und die Folie vor Beschädigungen geschützt.

Ein weiteres Optimierungspotential bietet die im Versuchsaufbau (siehe Abschnitt 4.1.2) eingesetzte Standard-USB-Kamera hinsichtlich der verfügbaren Bildrate. So erreicht diese lediglich eine Bildrate von 17 Hz, wodurch nur bis zu einer Wickeldrehzahl von rund 1000 UpM einmal pro Umdrehung der Nachlaufwinkel bestimmt werden kann. In dem an der sensorgeführten Wickelmaschine integrierten Bilderkennungssystem wird daher eine HighSpeed USB-Kamera der Firma IDS-Imaging GmbH eingesetzt. Diese CCD-Farbkamera bietet bei einer Sensorgröße von  $752 \times 480$  Pixel eine Bildrate von 87 Hz. Hierdurch kann die Grenz-Wickeldrehzahl auf rund 5.200 UpM gesteigert und somit gegenüber dem Versuchsaufbau eine signifikante Leistungssteigerung realisiert werden.

### Zeilensensor-System

Für den Einsatz des Zeilensensorsystems in der Wickelmaschine ist eine kompakte und robuste Sensoreinheit erforderlich. Diese muss die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus umfassen und in ein Gesamtkonzept integrieren. Hierzu wird ein zweigeteiltes Gehäuse aus Kunststoff konstruiert, in dem die Funktionselemente Zeilensensor, Schlitzblende und Beleuchtung verbaut sind (siehe Bild 75). Das Interfaceboard ist in einem separaten Gehäuse verbaut, um den Platzbedarf am Drahtführer zu minimieren.

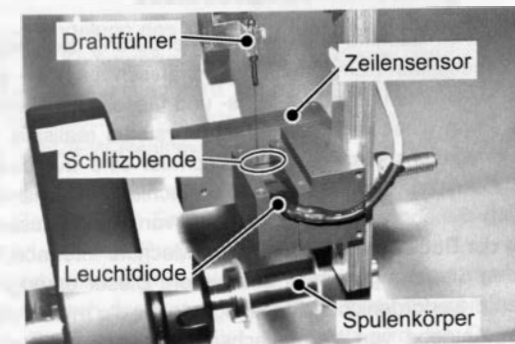


Bild 75: Sensorsystem mit Zeilensensor zur Erfassung des Nachlaufwinkels

Die Beleuchtung des Sensors erfolgt über eine Leuchtdiode, die im oberen Teil des zweigeteilten Sensorkopfs verbaut ist. Diese kann zur Optimierung der Beleuchtungsverhältnisse im Lichtkanal verschoben und über den Gehäusedeckel (in Bild 75 aus

Darstellungsgründen entfernt) geklemmt werden. Die Schlitzblende, welche den lichtempfindlichen Sensorbereich abdeckt, ist im unteren Gehäuseteil des Sensorkopfes integriert. Über einen durchgehenden Schlitz zwischen oberem und unterem Gehäuseteil wird der Draht in den Erkennungsbereich des Sensors eingeführt. Durch die geringe Schlitzbreite wird der Einfluss von Fremdlicht auf die Messung minimiert.

### Laser-Profilscanner-System

Ein robustes, stabiles und gleichzeitig präzises Führungssystem zur Positionierung des Laser-Profilscanners ist eine Grundvoraussetzung für reproduzierbare Messwerterfassung. Für die Aufnahme des Laser-Profilscanners wird ein in den 3-Raumachsen verstellbares Achssystem an der Wickelmaschine verbaut, das diesen Anforderungen gerecht wird. Das aus DryLin® T Führungsschienen der Fa. Igus aufgebaute System ermöglicht eine flexible Positionierung des Sensors relativ zur Wickelspindel. Über Klemmungen in den Achsschlitzen werden die einzelnen Achspositionen fixiert.

Für die Ermittlung des Wicklungsprofils mit dem aufgebauten Sensorsystem ist vom Laser-Profilscanner pro Umdrehung der Wickelspindel eine Profilaufnahme zu erstellen. Zur Sicherstellung eines konstanten Auslösezeitpunkts muss hierzu die Nullspur des Drehgebers der Wickelspindel die Profilaufnahme starten. Für die Triggereingabe der Profilaufnahme steht am Sensor-Controller ein Triggereingang zur Verfügung, der mit einem 5V-TTL-Signal angesteuert wird. Zur galvanischen Entkopplung und zum Ausschluss von Störeinflüssen auf den Achscontroller der Wickelachse erfolgte die Kopplung mit dem Sensor-Controller über einen Spannungsfolger LM 358. Dieser, von einer externen Spannung gespeiste Baustein, bildet die am Eingang anstehende Spannung aus der Speisespannung nach und stellt sie am Ausgang, mit der vom Controller benötigten Stromstärke zwischen 10 und 15 mA, zur Verfügung.

### 5.3 Implementierung des Prozessregelkreises

Für den Aufbau der Wickelmaschine und die Implementierung des Prozessregelkreises sind die in Bild 76 dargestellten Komponenten mechanisch, energie- sowie datentechnisch miteinander zu verknüpfen. Aus Stabilitäts- und Geschwindigkeitsgründen ist der Prozessregelkreis in Form eines verteilten Rechnersystems realisiert. Die Regelkreisstrukturen für die Verlegeachse und die Wickelspindel sind auf einem Steuerungs-Rechner mit Echtzeit-Betriebssystem realisiert. Der Nachlaufwinkel-Istwert wird von den alternativ einsetzbaren Sensorsystemen erfasst und von einem Auswerterechner, der auch der Darstellung der Bedienoberfläche (Human-Machine-Interface, kurz HMI) dient, aufbereitet und an den Steuerungsrechner übergeben. Dieser erzeugt aus den eingehenden Prozessdaten die erforderlichen Steuersignale für die mittels digital und analog IO angeschlossenen Antriebe von Verlegeachse und Wickelspindel. Im Folgenden werden die einzelnen Funktionselemente detailliert beschrieben.

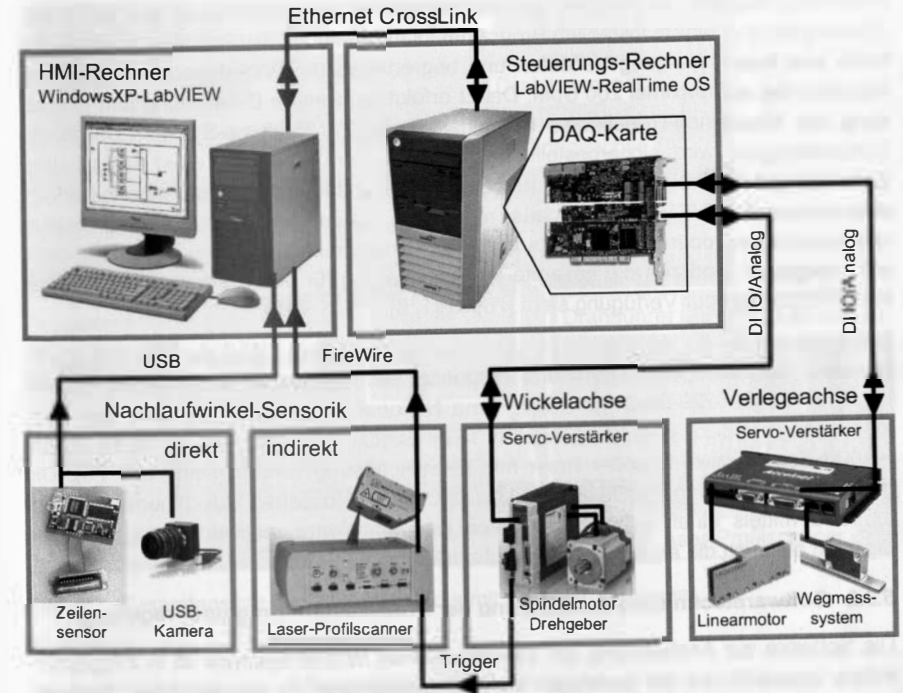


Bild 76: Hauptkomponenten und Struktur des Wickelmaschinen Prototyp

#### 5.3.1 Steuerungssystem für die Wickelmaschine

Die Steuerung und Regelung des Wickelsystems wird mit einem verteilten Rechnersystem realisiert. Für die Kommunikation mit dem Bediener und die Einbindung der Sensorik zur Nachlaufwinkelenerfassung wird ein Windows-LabVIEW-System eingesetzt. Die Umsetzung der zeitkritischen Regelkreise für die Hauptspindel und die Verlegeachse erfolgt auf einem LabVIEW-Realtime-System.

LabVIEW ist ein graphisches Programmiersystem auf Basis des Datenflusskonzepts, welches sich im Rahmen von Entwicklungsprojekten als leistungsfähige Entwicklungsumgebung bewährt hat. Das Programmierkonzept beruht darauf, dass aus vordefinierten und parametrierbaren Funktionsblöcken, die über Verbindungsleitungen miteinander verbunden werden, durch den Benutzer ein Schaltbild erzeugt wird, aus dem LabVIEW ein ausführbares Programm abgeleitet. Hierdurch wird, im Gegensatz zu textuellen Programmiersprachen wie C++ oder Java, implizit eine hohe Transparenz der entwickelten Software erreicht und eine schnelle Programmerstellung ermöglicht. [39][69]

Bei den ersten Versuchen zur Implementierung der Maschinensteuerung zeigt sich, dass der verwendete Standard Windows-PC mit LabVIEW nicht für die Ausführung der



Maschinen-Regelkreise geeignet ist. Die mangelnde Echtzeitfähigkeit des Windows-Systems führt zu einem instabilen Programmablauf sowie schwankenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen und begrenzt so die Wickelgeschwindigkeit der Hauptspindel auf maximal 200 UpM. Daher erfolgt die weitere Entwicklung und Umsetzung der Maschinen-Regelkreise auf einem LabVIEW-Realtime-System. Durch die Echtzeitfähigkeit wird sichergestellt, dass das System innerhalb einer festgelegten Zeitdauer auf ein Ereignis reagiert, das heißt, die Durchführung eines Vorgangs erfolgt deterministisch [154]. Darüber hinaus, muss das System keine Hintergrundapplikationen koordinieren oder auf Interrupts von Hardware-Peripherie (Maus, Tastatur, Sound etc.) reagieren, wodurch die gesamte Rechnerleistung für die Abarbeitung der Regelkreis-Programme zur Verfügung steht [76][81][128].

Die Ansteuerung der Maschinenkomponenten (Achsenregler – Wickelachse und Verlegeachse, Reglerfreigabe, Dreh- und Weggeber etc.) erfolgt im aufgebauten System durch eine PCI-6229-DAQ-Karte der Firma National Instruments, die über vier Analogausgänge und 32 Analogeingänge mit 16 bit Auflösung und 25 kS/s sowie 48 Digital-I/O-Kanäle und zwei Encoder/Timer mit 32-bit-Auflösung verfügt (siehe Bild 76). Die galvanische Trennung der DAQ-Karte von den angeschlossenen Maschinenkomponenten wird mittels einer selbst entwickelten Kopplungskarte realisiert, die sowohl die digitalen als auch die analogen Signale überträgt.

### 5.3.2 Softwaretechnische Realisierung der Prozesssteuerung und -regelung

Die Software zur Ansteuerung der sensorgeführten Wickelmaschine ist in Programmblöcke unterteilt, die die jeweiligen Steuerungsstrukturen für die einzelnen Prozessschritte enthalten. Nach dem Start der Steuerungssoftware erfolgt durch den Real-Time-Rechner zunächst die Initialisierung der Maschine und Referenzierung der Verlegeachse. Anschließend kann der Bediener im Programmfenster „Wickelparameter“ die erforderlichen Prozessdaten eingeben und an die Steuerung übergeben. Der Start des Wickelprozesses erfolgt im Programmfenster „Prozess“, welches die relevanten Prozessparameter, wie Drehzahl, Drahtführerposition oder Nachlaufwinkel, sowie den jeweils aktuellen Prozessschritt anzeigt. In Bild 77 sind die Benutzeroberfläche sowie das aufgebaute Wickelsystem dargestellt.

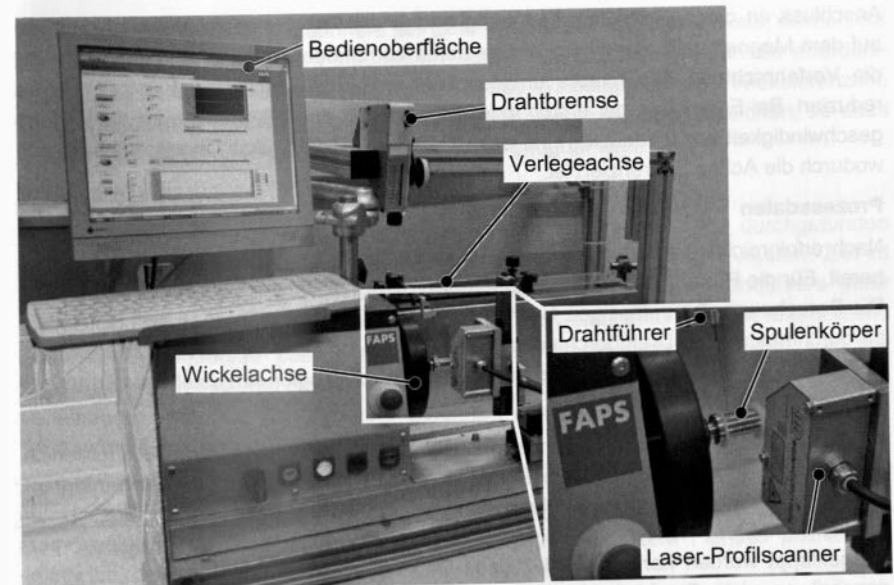


Bild 77: Gesamtansicht des Wickelsystems mit Laser-Profilscanner

### Referenzierung

Der in der Verlegeachse verbaute inkrementelle Weggeber erzeugt bei Bewegung zwei Ausgangssignale, aus denen der Betrag und die Richtung einer Bewegung abgeleitet werden kann. Für Positionieraufgaben ist jedoch zusätzlich eine Referenzierung der Achse nach dem Einschalten der Anlage erforderlich. Hierdurch ist die absolute Position der Achse bekannt und alle eingehenden Inkrementalsignale können zur Positionsbestimmung gegen diese Referenzposition verrechnet werden.

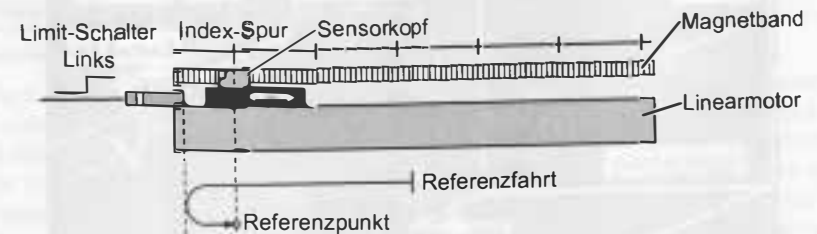


Bild 78: Referenzierung der Verlegeachse

Zur Steigerung der Präzision der Verlegeachse erfolgt die Referenzierung im aufgebauten Prototypen zweistufig (siehe Bild 78). Nach dem Programmstart wird die Reglerfreigabe des Achsverstärkers auf High geschaltet und ein Geschwindigkeitssollwert von  $-10$  mm/s übergeben. Hierdurch verfährt die Verlegeachse in negativer Richtung, solange, bis der Limit-Schalter am linken Ende des Verfahrensweges aktiviert wird. Im



Anschluss an diese Grob-Referenzierung erfolgt die Fein-Referenzierung anhand der auf dem Magnetstreifen des Wegmesssystems vorhandenen Indexmarken. Hierzu wird die Verfahrrichtung des Motors umgeschaltet und die Geschwindigkeit auf 5 mm/s reduziert. Bei Erkennung der ersten Indexmarke durch den Wegegeber wird die Verfahr- geschwindigkeit auf 0 reduziert und der Positionszähler des Achsregelkreises genullt, wodurch die Achse referenziert ist.

**Prozessdaten**

Nach erfolgreicher Referenzierung der Verlegeachse ist die Wickelmaschine betriebs- bereit. Für die Produktion ist die Eingabe der prozessrelevanten Parameter erforderlich. Die Berechnung des zulässigen Nachlaufwinkels erfordert die Eingabe von Spulenkör- perdurchmesser und Drahtdurchmesser. Zur Steigerung der Prozesssicherheit wird aus dem eingegebenen Drahtdurchmesser die am Drahtzugregler einzustellende Drahtzug- kraft berechnet und angezeigt.

Zusätzlich sind die Position des linken Flansches sowie die Kammerbreite erforderlich. Sollten diese nicht bekannt sein, ist in der Software eine Teach-In Funktion integriert, mit der eine Vermessung des Spulenkörpers möglich ist. Hierzu ist am Verlegeschlitten ein schwenkbarer Tastwinkel angebracht der zur Vermessung des Spulenkörpers ausgeklappt werden kann (in Bild 79 aus Darstellungsgründen ohne Nachlaufwinkel- sensorik gezeigt). Zur Maßaufnahme wird der Verlegeantrieb stromlos geschaltet, so dass der Schlitten manuell positioniert werden kann. Durch Anlegen des Tasthebels am linken Flansch des Spulenkörpers und Übernahme der Achsposition ist der Startpunkt der Wicklung bekannt. Die Kammerbreite wird durch das Antasten des rechten Flansches ermittelt. Aus den ermittelten Messwerten, der Breite des Tasthebels sowie dem Abstand zwischen Tasthebel und Drahtführer können die für den Wickelprozess relevanten Positionsdaten berechnet werden.

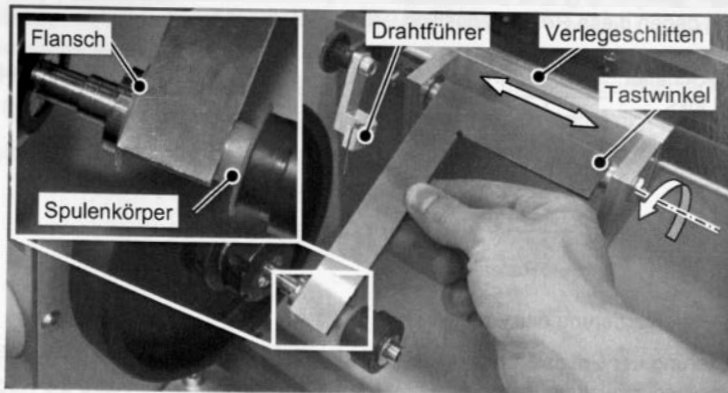


Bild 79: Tastwinkel zur Bestimmung der Flanschpositionen

Bei Einsatz des Laser-Profilscanners zur Bestimmung des Nachlaufwinkels, werden die Kennwerte des Spulenkörpers automatisch erfasst. Komplettiert werden die erforderlichen Prozessdaten durch die Eingabe der Werte Windungszahl und Wickeldrehzahl. Die eingegebenen Daten werden in globalen Variablen zwischengespeichert, so dass sie über die einzelnen Programmfenster hinweg verfügbar sind.

**Wickelprozess**

Für die Auslegung des Wickelprozesses werden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen verschiedene Verfahrprofile für die Drahtverlegung analysiert. Ziel ist es, durch eine geeignete Gestaltung der Verfahrbewegung des Drahtführers unter Berücksichtigung der aktuellen Prozesssituation, die Genauigkeit des Wickelprozesses und den Spulenaufbau positiv zu beeinflussen. Für die Untersuchungen wird der Wickelprozess in einzelne Phasen eingeteilt und in einfachen Wickelversuchen getrennt voneinander analysiert. Aus den durchgeführten Versuchen ergeben sich die in Tabelle 14 zusammengefassten Strategien:

Prozessphase	Strategie
#1 Festlegen des Drahts	Drahtführer wird senkrecht über linkem Flansch positioniert, Hauptspindel wickelt 3 Windungen
#2 Start des Wickelprozess	Hauptspindel startet Wickelvorgang, Drahtführer läuft los, sobald Soll-Nachlaufwinkel erreicht ist
#3 Wickeln zwischen den Flanschen	Drahtführer eilt mit Soll-Nachlaufwinkel dem Wickelort nach
#4 Anfahren an den Flansch	Drahtführer beschleunigt, damit Wickelort und Drahtführer parallel am Flansch ankommen
#5 Richtungsumkehr	Drahtführer wartet an Flanschposition bis sich der Soll-Nachlaufwinkel eingestellt hat

Wiederholung der Phasen 3 – 5 bis Soll-Windungszahl erreicht ist

Tabelle 14: Phasen des Wickelprozess

Die in Tabelle 14 aufgeführten Prozessphasen werden in eine Prozess-Ablaufsteuerung überführt und in LabVIEW mit Hilfe einer CASE-Struktur umgesetzt, die diese sequentiell abarbeitet. In Prozessschritt #1 wird für das Festlegen des Drahtes am Spulenkörper der Drahtführer senkrecht über dem linken Spulenkörperflansch positioniert. Nach dem Fixieren des Drahtes durch den Bediener werden drei Windungen gewickelt und der Prozess zur Überprüfung des Wickelbildes und evtl. erforderliche Korrekturen gestoppt. Bei einem lückenfreien Wicklungsbild kann der Wickelprozess gestartet werden. Hierzu werden in Prozessschritt #2 Wickelspindel und Verlegeachse aktiviert, wobei die Bewegung des Verlegeschlittens erst dann gestartet wird, wenn der Ist-Nachlaufwinkel, in Folge der sich aufbauenden Wicklung, dem Soll-Nachlaufwinkel entspricht. Im folgenden Prozessschritt #3 eilt der Drahtführer bis zum Erreichen eines Umschaltabstands mit dem eingestellten Nachlaufwinkel dem Wickelort nach. Bei Erreichen des

Umschaltabstandes schaltet die Prozess-Ablaufsteuerung von Nachlaufwinkel-Regelung auf Positions-Regelung in Prozessschritt #4 um. Ziel ist es, dass der Drahtführer synchron mit dem Wickelort am Flansch ankommt, so dass sich beim Wechsel der Wickelrichtung kein negativer Nachlaufwinkel einstellt. Nach Positionierung des Drahtführers über dem Flansch wird im Ablauf der Prozessschritt #5 zur Richtungsumkehr gestartet. Diese überwacht den Nachlaufwinkel und schaltet auf den Prozessschritt #3, sobald der Soll-Nachlaufwinkel erreicht ist. Die Prozessschritte #3 - #5 werden im Folgenden bis zum Erreichen der Soll-Windungszahl wiederholt.

Die einzelnen Prozessschritte bedingen die Realisierung angepasster Regelkreisstrukturen. In LabVIEW werden diese mit Funktionsblöcken erstellt, die anhand der Ein- und Ausgangsvariablen programmübergreifend angesprochen werden können. Für die aufgezeigten Prozessschritte sind drei Regelkreisstrukturen erforderlich, ein Windungszahl-Regelkreis für die Wickelspindel sowie ein Positions- und ein Nachlaufwinkel-Regelkreis für die Verlegeachse.

#### Windungszahlregelung-Wickelspindel

Zielgröße bei der Positionsregelung der Wickelspindel ist die vorgegebene Soll-Windungszahl der zu wickelnden Spule, die unter Berücksichtigung der geforderten Wickelgeschwindigkeit angefahren werden muss. Die Umsetzung des Regelkreises erfolgt in Form einer Kaskadenregelung. Den äußeren Regelkreis bildet die Windungszahlregelung die aus der Differenz von Soll-Windungszahl und Ist-Windungszahl die aktuell erreichte Windungszahl bestimmt und hieraus die Stellgröße für den Drehzahl-Regelkreis ableitet. Die Erfassung der Ist-Windungszahl erfolgt durch den Encoder-Kanal 1 der DAQ-Karte des RealTime-Rechners der die Encoderimpulse der Wickelachse auswertet. Dieser wird zu Beginn des Wickelprozesses auf Null gesetzt und summiert die eingehenden Signale mit einer Auflösung von 0,01 Umdrehungen.

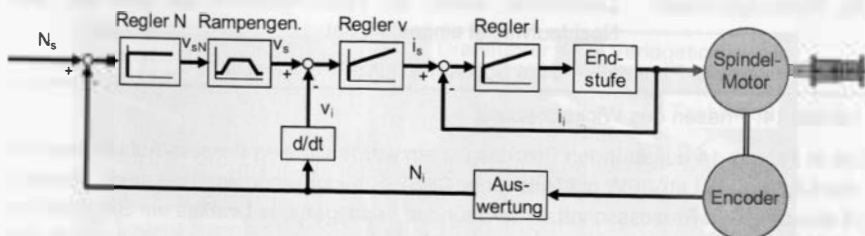


Bild 80: Blockschaltbild der Windungszahlregelung

Das Stellsignal des Windungszahlregelkreises bildet nach Aufbereitung durch einen Rampengenerator die Eingangsgröße für den Drehzahl-Regelkreis (siehe Bild 80). Dieser, in PI-Struktur ausgelegte Regler, erzeugt die Stellgröße für den Motorverstärker der Wickelspindel. Die Ist-Geschwindigkeit der Wickelspindel wird aus den vom Encoder-Kanal 1 aufgenommenen Daten abgeleitet. Zur Gewährleistung eines sanften, ruckfreien Anlaufs und Abbremsens der Wickelachse werden die Drehzahl-Sollwerte durch einen Rampengenerator vorgegeben. Dieser erhöht die Soll-Drehzahl rampen-

förmig mit einem einstellbaren Steigungs-Faktor bis auf die programmierte Prozess-Drehzahl bzw. reduziert diese entsprechend am Ende des Wickelprozesses. Das vom Regler erzeugte Signal wird durch den Digital-Analog-Wandler (DAC) der DAQ-Karte in ein Spannungssignal im Bereich zwischen  $\pm 10$  V umgewandelt und über den Analogkanal 0 an den Steuereingang der Achssteuerung der Wickelspindel übertragen. Um Änderungen an den Regelkreisparametern während der Laufzeit vornehmen zu können und so die Regloptimierung zu vereinfachen, wird der im Motorverstärker der Wickelspindel integrierte Drehzahlregelkreis durch eine neutrale Parametrierung ausgeschaltet, so dass die eingehenden Sollwerte unverändert in den Stromregelkreis einfließen.

#### Positionsregelung-Verlegeachse

Der Positionsregelkreis ist für das Anfahren des linken Flansches zu Beginn des Wickelprozesses und zur Positionierung senkrecht über den Flanschen beim Wechsel der Wicklungsrichtung erforderlich. Die Realisierung erfolgt in Form einer Kaskadenregelung aus Positions-, Geschwindigkeits- und Stromregelkreis (siehe Bild 81). Der von der Prozess-Ablaufsteuerung vorgegebene Soll-Positionswert wird mit dem von Encoder-Kanal 2 der DAQ-Karte erfassten Positionswert des Wegmesssystems verglichen und anschließend mit einem PI-Regler der Sollwert für den Geschwindigkeits-Regelkreis generiert. Dieser erzeugt unter Berücksichtigung der vorgegebenen Geschwindigkeitsgrenzen das Stellsignal für den Stromregelkreis des Linearmotor-Achsverstärkes. Das Stellsignal wird via DAC auf Analogkanal 1 mit einem  $\pm 10$  V Signal übertragen.

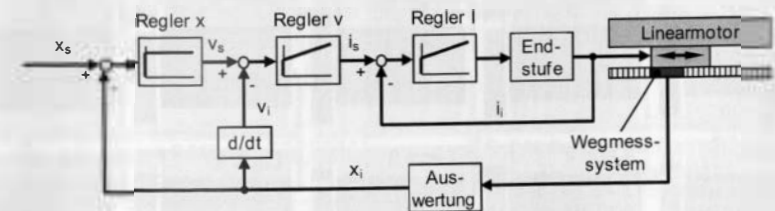


Bild 81: Blockschaltbild der Positionsregelung-Verlegeachse

#### Nachlaufwinkelregelung-Verlegeachse

Mit dem Ziel, den Nachlaufwinkel während des Wickelprozesses durch eine Anpassung der Verfahrgeschwindigkeit der Verlegeachse zu regeln, wird in der Kaskadenregelkreisstruktur der Verlegeachse der Positionsregler durch einen Nachlaufwinkelregler ersetzt (siehe Bild 82). Zur Festlegung des Nachlaufwinkel-Sollwerts wird anhand der vorgegebenen Prozessparameter Drahtdurchmesser und Spulenkörperdurchmesser der maximal positive Nachlaufwinkel gemäß den Gleichungen (3.19) und (3.20) berechnet. Der Ist-Nachlaufwinkel wird von der eingesetzten Nachlaufwinkel-Sensorik erfasst, entweder direkt durch das Bilderkennungs- oder Zeilensensorsystem oder indirekt durch das Laser-Profilscanner-System. Um die Verlegerichtung bei der Bestimmung des Nachlaufwinkels zu berücksichtigen wird der gemessene Ist-Nachlaufwinkel mit einem von der Prozess-Ablaufsteuerung erzeugtem Richtungsflag multipliziert. Aus der

Regeldifferenz wird über einen Proportional-Regler das Stellsignal für den anschließenden Geschwindigkeitsregelkreis generiert. Die nachfolgende Struktur entspricht der oben beschriebenen Positionsregelung der Verlegeachse.

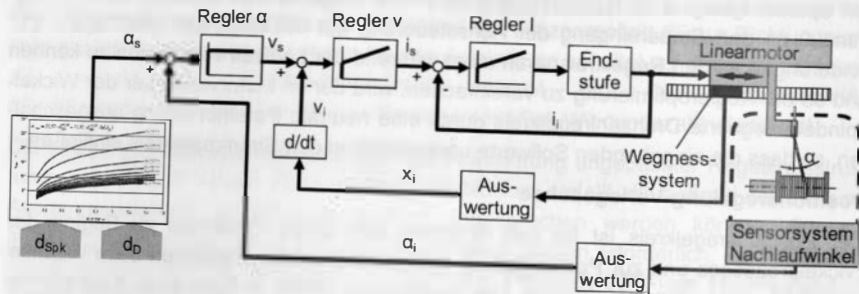


Bild 82: Blockschaltbild der Nachlaufwinkelregelung-Verlegeachse

### 5.4 Funktionsnachweis

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des aufgebauten Wickelsystems wurden verschiedene Versuchsspulen mit Drähten in einem Durchmesserbereich von 0,1 mm bis 0,5 mm gewickelt. Die Fertigung von Versuchsspulen konnte hierbei mit allen drei entwickelten Nachlaufwinkel-Sensorsystemen erfolgreich durchgeführt werden.

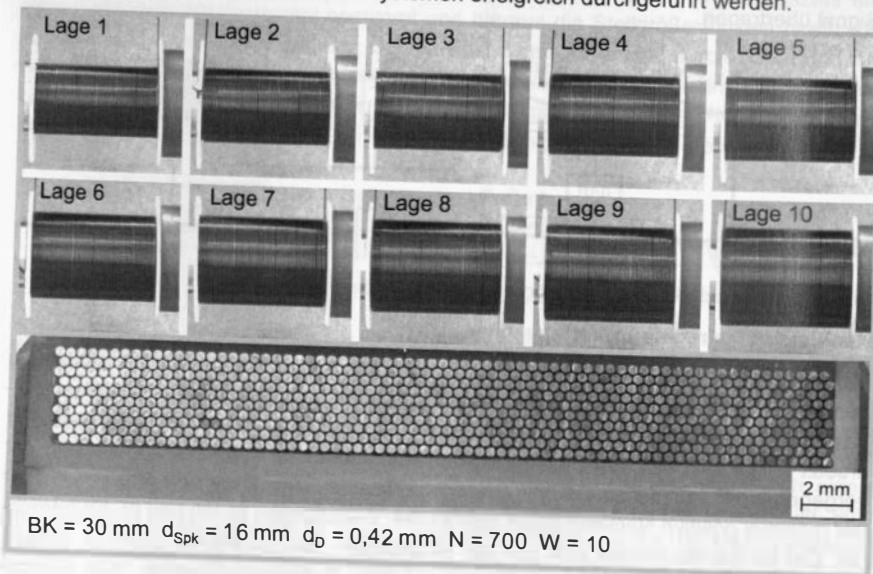


Bild 83: Einzelne Lagen einer mit dem aufgebauten Wickelsystem gefertigten Spule (aufgenommen während der Fertigung) (oben); Schliff der Spule (unten)

Bild 83 zeigt im oberen Teil die einzelnen Lagen einer mit dem aufgebauten Wickelsystem gefertigten Spule [23]. Die Aufnahmen wurden am Ende der jeweiligen Lage während des Wickelprozesses erstellt. Auf dem Spulenkörper mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Kammerbreite von 30 mm wurden 700 Windungen eines 0,42 mm Drahtes in 10 Lagen gewickelt. Wie in den Aufnahmen gut zu sehen ist, bauen sich die einzelnen Lagen sehr gleichmäßig auf. Die Windungen verlaufen lückenfrei, annähernd parallel zu den Flanschen. Fehlstellen sind innerhalb des gesamten Wicklungsaufbaus nicht zu erkennen. Auch im Schliff ist der lagegenaue Aufbau der Spule gut erkennbar. Die einzelnen Windungen fügen sich lückenlos ineinander, und nutzen so den verfügbaren Wickelraum ideal aus. Bei einer Windungsanzahl von  $N = 700$  und einem Drahtdurchmesser von  $d_D = 0,42$  ergibt sich eine Gesamtquerschnittsfläche der Windungen von  $A_{DW} = 96,9 \text{ mm}^2$ . Die Wicklungsfläche berechnet sich aus der Kammerbreite von  $BK = 30 \text{ mm}$  und der Differenz von Spulenkörperdurchmesser  $d_{SpK} = 16 \text{ mm}$  und äußerem Wicklungsdurchmesser. Dieser liegt im Mittel über die 10 Versuchsspulen bei  $d_W = 23,5 \text{ mm}$ , sodass sich die mittlere Wicklungsfläche auf  $A_W = 112,5 \text{ mm}^2$  beläuft. Der mechanische Füllfaktor liegt bei den gefertigten Versuchsspulen folglich bei  $k = 86\%$ , und somit nur um 5% unter dem maximal realisierbaren mechanischen Füllfaktor von 91% (siehe Abschnitt 3.1).

Der positive Einfluss des lagegenauen Wicklungsaufbaus auf die Schwankungen der elektrischen Spuleneigenschaften kann mit den gefertigten Versuchsspulen bestätigt werden (siehe Bild 84). Innerhalb der zehn Versuchsspulen liegt die Schwankungsbreite der Induktivität bezogen auf den Mittelwert bei lediglich  $\pm 0,7\%$ , die des Kupferwiderstands bei  $\pm 0,6\%$ . Bei marktüblichen Standard-Spulen gilt ein Toleranzfenster von  $\pm 5\%$ , so dass die gefertigten Spulen um mehr als 80% geringere Schwankungen als herkömmlich gefertigte aufweisen [6][123].

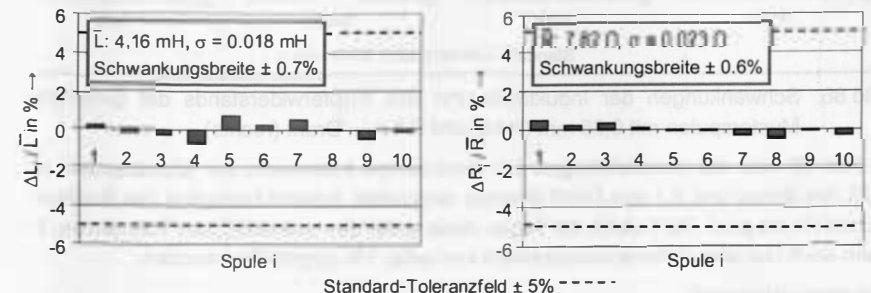


Bild 84: Schwankungen der Induktivität und des ohmschen Widerstands der gefertigten Musterspulen mit 0,42 mm Draht [35]

In Versuchen mit weiteren Drahtdurchmessern werden vergleichbar gute Ergebnisse erzielt. Bild 85 zeigt die Querschnitte von Versuchsspulen mit 0,25 mm sowie 0,1 mm Draht. Auch hier ist erkennbar, dass mit dem realisierten Wickelsystem durchweg ein gleichmäßiger Wicklungsaufbau mit einer hohen Packungsdichte erzielt werden kann.

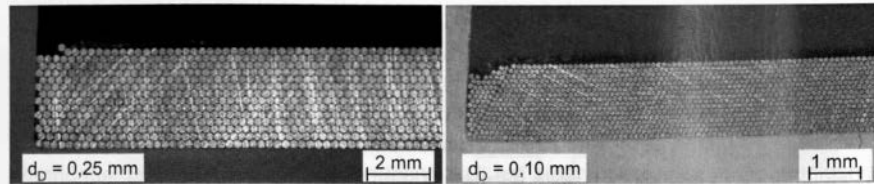


Bild 85: Querschnitte von Versuchsspulen mit 0,25 mm und 0,10 mm Draht

Unvermeidbare Fehlstellen oder Lücken treten lediglich im Bereich der Flansche auf, da es hier zum Aufsteigen des Drahtes in die nächst höhere Lage kommt (siehe Bild 85 rechts). Trotz dieser vereinzelt Unregelmäßigkeiten in den Randbereichen, kann durch die Nachlaufwinkel-Regelung über den weiteren Querschnitt ein störungsfreier Lagenaufbau erreicht werden. Der mittlere mechanische Füllfaktor liegt bei den Spulen mit  $d_D = 0,25$  mm bei  $k = 84\%$  und bei den Spulen mit  $d_D = 0,1$  mm bei  $k = 81\%$ . Es zeigt sich, dass die erreichbaren Füllfaktoren mit Abnahme des Drahtdurchmessers sinken. Die Ursache hierfür kann in dem mit zunehmender Windungszahl steigenden Anteil an kleinsten Fehlstellen und Lücken im Wicklungsaufbau gesehen werden.

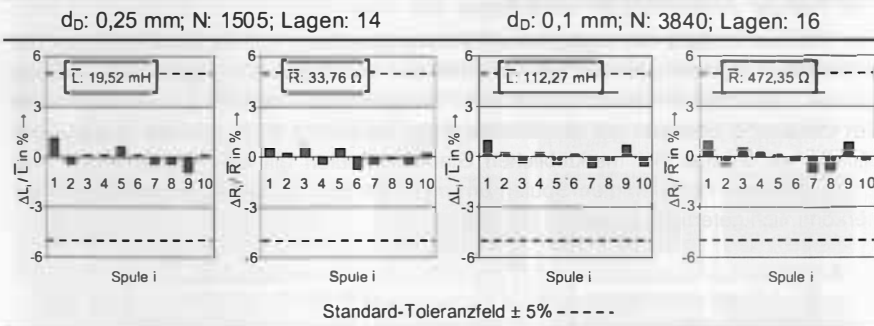


Bild 86: Schwankungen der Induktivität und des Kupferwiderstands der gefertigten Musterspulen mit 0,25 mm (links) und 0,1 mm Draht (rechts)

In Bild 86 sind die Schwankungen der elektrischen Kennwerte der Musterspulen mit 0,25 mm (links) und 0,1 mm Draht (rechts) dargestellt. Sowohl bezüglich des Kupferwiderstands als auch der Induktivität liegen diese unter den marktüblichen Toleranzen. Es kann auch hier eine Schwankungsbreiten von unter 1% eingehalten werden.

### Zusammenfassung

Ziel des vorangegangenen Kapitels war die Entwicklung eines Wickelsystems für die automatisierte Fertigung lagegenauer Wicklungen auf unpräparierten Spulenkörpern. Hierzu wurde aufbauend auf den Ergebnissen des Kapitels 3 und unter Einbeziehung der in Kapitel 4 realisierten Sensorsysteme für die Erfassung des Nachlaufwinkels ein flexibles Fertigungssystem exemplarisch aufgebaut, bei dem durch eine prozessbegleitende Regelung der Drahtführer-Nachlaufwinkel überwacht wird. Der entworfene

Regelkreis passt entsprechend der Regeldifferenz von Ist- und Soll-Nachlaufwinkel die Verlegegeschwindigkeit an und stellt so einen störungsfreien Wicklungsaufbau sicher. Um die für den vorliegenden Anwendungsfall erforderliche hohe Präzision und kurze Reaktionszeit des Vorschubantriebes zu gewährleisten, galt es des Weiteren eine hochdynamische Antriebslösung für die Drahtführerpositionierung zu entwickeln. Durch die Entwicklung einer Verlegeachse mit linearem Direktantrieb konnte die Positionierunsicherheit im Vergleich zu bestehenden Achssystemen, entschieden verbessert werden. Abschließend wurde anhand von Wickelversuchen die Funktionsfähigkeit des aufgebauten Wickelsystems, der Sensorsysteme und des Nachlaufwinkel-Regelkreises überprüft. Die gefertigten Versuchsspulen bestätigten die Erwartungen hinsichtlich der Einhaltung enger Toleranzen der elektrischen Eigenschaften aufgrund des lagegenauen Wicklungsaufbaus und weisen insgesamt mechanische Füllfaktoren von über 80% auf.

## 6 Entwicklung und Realisierung eines robotergestützten Wickelsystems

Die Fertigung wickeltechnischer Produkte mit komplexem Wicklungsaufbau stellt eine große Herausforderung bei der Produktion elektrotechnischer Erzeugnisse dar. Konventionelle Wickelsysteme für das Linear- oder Flyerwickeln bieten hier oftmals nicht die benötigte Flexibilität und den fertigungstechnischen Funktionsumfang. Das Nadelwickelverfahren bietet im Vergleich zu anderen Wickelverfahren ein hohes Maß an Anwendungsflexibilität. Allerdings stellen die verfügbaren Nadelwickelmaschinen maschinenbauliche Sonderkonstruktionen dar, welche im Allgemeinen kunden- und produktspezifisch ausgelegt werden. Daher sind mit dem Einsatz der Nadelwickeltechnik üblicherweise beträchtliche Lieferzeiten und Anschaffungskosten verbunden. Diese Nachteile können durch die Verwendung eines Industrieroboters für die Führung der Wickelnadel umgangen werden. Neben den vergleichsweise geringeren Anschaffungskosten bietet dieser Ansatz weitere Vorteile, beispielsweise in Hinblick auf Prozessgestaltung und Anwendungsflexibilität, wie in diesem Kapitel gezeigt wird. Hierzu werden ausgehend von einer Betrachtung aktueller technologischer Entwicklungen und marktgetriebener Trends die verfahrensspezifischen Eigenschaften dargelegt, die sich aus dem Einsatz eines Roboters für das Nadelwickeln ergeben. Auf dieser Basis erfolgen die Auswahl eines Robotersystems sowie der Aufbau einer Versuchszelle. Die Ermittlung der verfahrensrelevanten Kennwerte sowie die Beschreibung möglicher Einsatzfelder anhand eines Beispielprodukts ermöglichen abschließend eine Beurteilung des realisierten Wickelsystems.

### 6.1 Aktuelle Systemlösungen der Wickeltechnik vor dem Hintergrund technologischer und marktgetriebener Entwicklungen

Die Fertigung wickeltechnischer Produkte ist von verschiedenen Parametern beeinflusst, die sich auf aktuelle technologische sowie marktgetriebene Entwicklungen zurückführen lassen. Marktseitig ist eine steigende Nachfrage an kundenspezifischen Wickelprodukten sowie kleiner werdende Losgrößen und Stückzahlen erkennbar [14]. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Flexibilität und Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Fertigungssysteme [17]. Diesen Anforderungen kann mit den derzeit am Markt erhältlichen Systemen nur bedingt begegnet werden. So sind die für das Flyerwickeln üblicherweise eingesetzten Systemlösungen durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet, was bei den eingesetzten Wickelmaschinen zu einem stark spezialisierten Aufbau führt. Daneben wirkt sich der hohe Zeitbedarf für das Rüsten der Maschinen (Einrichten der Flyer, Schablonen, Führungsbacken etc.) bei kleinen Losgrößen negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus. Ein Hauptnachteil des Flyerwickelns ist, dass zur Formung der Wicklung beziehungsweise zur Führung des Drahtes bei der Bewicklung von Motorläufern Führungsbacken notwendig sind [62]. Diese werden speziell für jeden Läufer Typ mit hohem Zeitaufwand angefertigt. Hierbei werden die Führungsbacken zunächst spanend vorgefertigt und mittels Feinbearbeitungsverfahren für das Polieren



vorbereitet. Im Anschluss an das Hochglanzpolieren werden die Backen in der Flyerwickelmaschine eingesetzt und getestet. In mehreren Iterationsschleifen werden die Führungsbacken nachgearbeitet, bis ein einwandfreies Abgleiten des Drahtes in die Nuten erfolgt. Auch beim Linearwickeln kann mit den vorhandenen Systemlösungen nur bedingt auf die genannten Problemstellungen reagiert werden. So ist mit Einspindel-Tischwickelmaschinen zwar eine los- und variantenflexible Produktion möglich, dies allerdings wegen des erheblichen Anteils an manuellen Prozessschritten zu Lasten der Taktzeit. Die auf hohe Mengenleistung hin ausgelegten Wickel-Vollautomaten sind aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrades stark produktspezifisch aufgebaut. Hierdurch wird bei jedem Produktwechsel ein hoher Umrüstaufwand verursacht und eine auftragsflexible Produktion verhindert. Darüber hinaus werden bei der Fertigung von Elektromotor-Statoren durch das Wickeln einzelner, nicht zusammenhängender Spulen mittels Linearwickeln weitere Prozessschritte erforderlich. So umfasst die Montage der einzelnen Spulen in die Nuten des Stator-Blechpakets das Einlegen sowie das nachfolgende Richten und Fixieren. Beim anschließenden Schalten werden die Spulen entsprechend des vorgegebenen Wickelschemas miteinander durch Hartlöten oder Heiß-Crimpen elektrisch verbunden. Diese zusätzlichen Prozessschritte führen bei einer manuellen Durchführung zu einem hohen Zeitaufwand und somit hohen Personalkosten, bei automatisierten Systemlösungen zu unflexiblen produktspezifischen Fertigungsanlagen. [36]

Neben den wirtschaftlichen Entwicklungen, stellen aktuelle technologische Fortschritte Herausforderungen und Chancen für die Wickeltechnik dar. So erlaubt die 3D-MID-Technologie die Integration von Spulenkörpern in Schaltungsträger oder Gehäusestrukturen, wodurch eine kompaktere Gestaltung elektrotechnischer Produkte ermöglicht wird [106]. Als Beispiel können hier in Zündschlüssel integrierte Transponder oder drahtlose Systeme zur Energieübertragung in der Medizintechnik genannt werden. Das Bewickeln solcher integrierter Spulenkörper ist mit den heute verfügbaren Wickelverfahren nur mit erheblichem Aufwand möglich. Darüber hinaus stellen Bereiche wie die Medizin- oder Automotivetechnik noch weiter reichende Anforderungen an die Gestaltungsmöglichkeiten von induktiven Bauelementen. Insbesondere die Anpassung der Spulenform an das jeweilige Produkt wird zukünftig an Bedeutung gewinnen, wodurch deren Fertigung mit konventionellen Verfahren erschwert wird [14].

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass mit den heute verfügbaren Systemlösungen zum Linear- bzw. Flyerwickeln den derzeitigen ökonomischen Anforderungen, wie kleine Losgrößen oder hohe Produktflexibilität, nur eingeschränkt begegnet werden kann. Daneben können die gestalterischen Möglichkeiten, die aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet Elektronikproduktion bieten, nicht voll ausgeschöpft werden. [36]

Eine wesentlich höhere fertigungstechnische Flexibilität bietet das Nadelwickelverfahren, welches für die direkte Bewicklung von Elektromotor-Statoren oder -Rotoren eingesetzt wird. Hierzu wird der Drahtführer entweder kurvenscheibengesteuert oder von NC-Achsen geführt, um den zu bewickelnden Spulenträger bewegt, wobei diese

Fügebewegung üblicherweise durch eine Kombination aus rotatorischer Oszillationsbewegung des Wickelkörpers und translatorischer Oszillationsbewegung der Wickelnadel realisiert wird. Neben der direkten Bewicklung von Blechpaketen liegt der besondere Vorteil des Nadelwickelns in der Möglichkeit, Schaltungsoperationen darzustellen. Hierzu werden die Blechpakete mit Deckscheiben und Kontaktierungselementen ausgestattet, in die der Draht, vom Drahtführer oder Hilfsachsen geführt, eingeklemmt wird. Somit wird gegenüber konventionellen Verfahren eine Verkürzung der Prozesskette erreicht.

Beim Vergleich der erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten, schneiden die kurvenscheibengesteuerten Maschinen besser als die auf Basis von NC-Achsen ab, da die zeitintensiven Berechnungsvorgänge für die Bewegungsplanung in den Achssteuerungen entfallen. Nachteil ist jedoch die geringe Flexibilität gegenüber einem Produktwechsel, da veränderte Produktabmaße eine Neuauslegung der Kurvenscheiben bedingen. Hingegen ist mit frei-programmierbaren NC-Achsen eine Anpassung der Drahtführerbewegung aufwandsarm möglich. Die Angabe der Wickelgeschwindigkeit von Nadelwicklern erfolgt in Hüben pro Minute oder Windungen pro Minute und wird in Abhängigkeit der Länge der Flugbahn angegeben. Bei einer Hubhöhe von 30 mm und einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm erreichen aktuelle NC-Nadelwickler eine Hubzahl von bis zu 400 Hüben pro Minute, was einer Verfahrgeschwindigkeit von 0,8 m/s entspricht [97].

Für die Zukunft ergibt sich ein steigender Bedarf an flexiblen und kostengünstigen Systemlösungen für das Nadelwickeln. Gründe sind das Bestreben die fertigungstechnische Flexibilität zu steigern und gleichzeitig den Anteil manueller Arbeitsinhalte im Bereich der Produktion wickeltechnischer Produkte zu reduzieren, um die Nachteile der manuellen Fertigung, wie hohe Personalkosten, schwankende Fertigungsqualität oder eintönige Tätigkeiten, zu umgehen. Derzeit sind jedoch mit dem Einsatz der Nadelwickeltechnik noch hohe Investitionskosten verbunden, da die verfügbaren Anlagen noch immer maschinenbauliche Sonderlösungen darstellen. Die zumeist kundenspezifische Entwicklung, Konstruktion und Fertigung eines Nadelwicklers verursachen hohe Kosten, die den Einsatz dieser Technologie nur bei Mittel- und Großserienfertigungen rechtfertigen.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Vermeidung der hohen Investitionskosten stellt der Einsatz eines, im Vergleich, kostengünstigen Industrieroboters (IR) für das Führen der Wickelnadel dar. Industrieroboter sind als Standardkomponenten automatisierter Produktionsanlagen in einer großen Bandbreite bezüglich Leistungsdaten und Kinematik von einer Vielzahl an Anbietern verfügbar. In vielen Anwendungsbereichen sind Industrieroboter aus wirtschaftlichen Gründen bereits weit verbreitet. Neben dem klassischen Einsatz in der Handhabungs- und Montagetechnik werden sie auch für Bearbeitungsaufgaben, wie beispielsweise Lackieren, Laserschweißen oder Entgraten, erfolgreich eingesetzt [1]. Nach [149] ist insbesondere im Bereich der spanenden Fertigung von einem steigenden Anteil an Robotern auszugehen. Aus dem Einsatz eines Industrieroboters für das Führen der Wickelnadel ergeben sich neben den

geringeren Investitionskosten verschiedene Vorteile hinsichtlich Prozessgestaltung und Anwendungsflexibilität, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

### 6.2 Konzept für das robotergestützte Wickeln

Bei den in Abschnitt 2.2 vorgestellten konventionellen Wickelverfahren erfolgt die Erzeugung der für das Wickeln erforderlichen Fügebewegung durch eine Kombination unterschiedlicher kinematischer Einzelemente bzw. unter Zuhilfenahme von Drahtführungselementen. Im Gegensatz hierzu kann durch den Einsatz eines Roboters die Drahtverlegung ausschließlich durch das Bewegen des Drahtführers auf einer an den Spulenkörper angepassten Flugbahn erfolgen, wobei der Spulenkörper während des Wickelvorgangs ortsfest verbleiben kann. Hierdurch kann auf komplexe Werkstückträger mit integrierter Kinematik zu Werkstückhandhabung verzichtet werden, wodurch ein weiterer Kostenvorteil generiert wird. Die Verwendung eines Industrieroboters ermöglicht es, die Verlegebewegung flexibel an die spezifischen Anforderungen des Wickelproduktes anzupassen. Das Verfahrensprinzip kann so eine flexible Produktion verschiedenster wickeltechnischer Produkte ermöglichen, für die üblicherweise gänzlich unterschiedliche Sondermaschinen notwendig sind. In Bild 87 sind Prozessalternativen für das Rotations- und das Flyerwickeln dargestellt, die durch das Konzept ermöglicht werden [20].

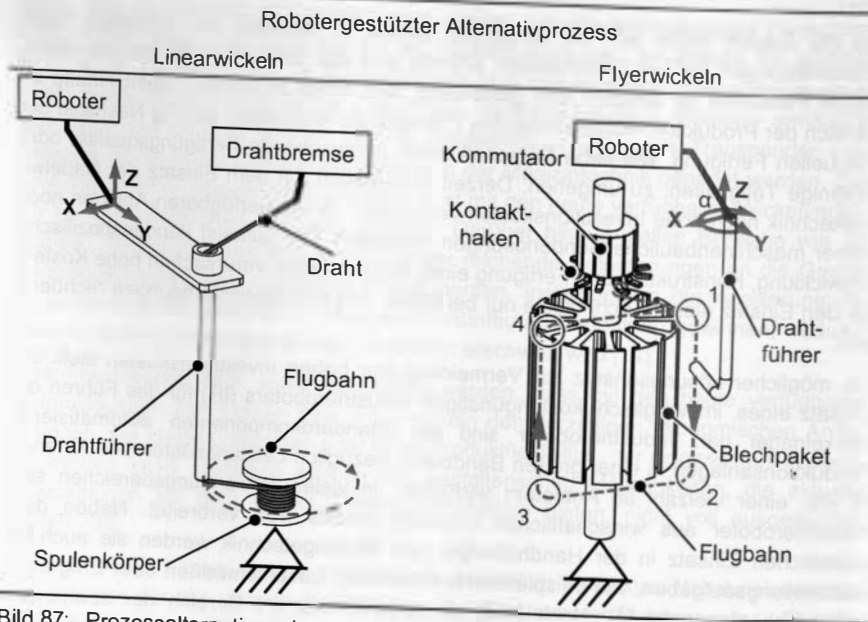


Bild 87: Prozessalternativen des robotergestützten Wickelns [20]

Wie in Bild 87 links gezeigt, können Spulen, die gewöhnlich nach dem Prinzip des Linearwickelns gefertigt werden, mit dem vorgestellten robotergestützten Verfahren durch ein helikales Bewegen des Drahtführers um den Spulenkörper gewickelt werden. Hierbei entspricht die Steigung der Helix dem Vorschub bei einer konventionellen Wickelmaschine. Neben kreisförmigen Spulenformen ist auch die Bewicklung beliebig geformter Spulenkörperquerschnitte möglich, wobei die Flugbahn durch entsprechende Stützpunkte festgelegt wird.

Das herkömmlich nach dem Flyer-Verfahren durchgeführte Bewickeln von Motorläufern oder ähnlichen Mehrkammer-Spulenkörpern ist mit dem entworfenen Verfahren durch den Einsatz eines drehbaren, gewinkelten Drahtführers möglich (Bild 87 rechts). Hierzu wird der Drahtführer auf einer Flugbahn um den senkrecht stehenden Läufer bewegt. Die Flugbahn wird entsprechend der Abmessungen des zu bewickelnden Läufer-Blechpakets programmiert. Nach vollständiger Bewicklung eines Motorpols wird der Drahtführer um den Polwinkel gedreht und der Draht am Kommutator angewickelt. Diese Schritte werden bis zur vollständigen Bewicklung des Motorläufers wiederholt. Durch den drehbaren Drahtführer kann der Läufer während des gesamten Wickelprozesses ortsfest verbleiben. Hierdurch entfallen die bei konventionellen Wickelmaschinen erforderlichen Handhabungseinrichtungen für das Weitertakten des Läufers. [36]

freiprogrammierbare Drahtführerflugbahn	ortsfester Spulenkörper	Verfahrens- flexibilität	Funktions- integration
			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Station 1 Wickeln</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Station 2 Montieren</div> </div>
			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">Station 1 Wickeln + Montieren</div>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilität hinsichtlich &gt; Wicklungsmuster &gt; Spulenkörperform</li> <li>- Einsparung zusätzlicher Drahtführungselemente</li> <li>- Reduzierung der Werkzeugkosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wickeln direkt auf Werkstückträger</li> <li>- Einfache Parallelisierung von Wickelvorgängen</li> <li>- Reduzierung von Taktzeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Universell einsetzbares Wickelverfahren</li> <li>- Standardroboter statt Sondermaschinen</li> <li>- Erhöhung des Standardisierungsgrads</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminierung von Handhabungsschritten</li> <li>- Verkürzung der Prozesskette</li> <li>- Reduzierung der Investitionskosten</li> </ul>

Bild 88: Technische und wirtschaftliche Vorteile des robotergestützten Wickelns

Das beschriebene Wickelverfahren auf Basis eines Industrieroboters bietet gegenüber konventionellen Lösungen zahlreiche Vorzüge, die zusammenfassend in Bild 88

dargestellt sind. Insbesondere die Flexibilität des Verfahrens hinsichtlich der Spulenform, die durch eine frei programmierbare Flugbahn des Drahtführers ermöglicht wird, ist als Vorteil anzusehen. So ist es möglich, nahezu beliebige Wicklungsmuster auf beliebig geformten Bauteilen zu realisieren oder Motorwicklungen ohne spezielle Hilfsmittel zur Drahtführung, wie sie beim Flyerwickeln erforderlich sind, zu fertigen [25]. Durch den Wegfall dieser Hilfsmittel kann darüber hinaus die Flexibilität erhöht, der Rüstaufwand deutlich reduziert und somit ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Verfügbarkeit des Wickelsystems geleistet werden.

Des Weiteren ist es mit dem Verfahren möglich, Spulenkörper direkt auf Werkstückträgern zu bewickeln, woraus sich weitere Vorteile ergeben. So kann durch den Einsatz von Werkstückträgern ein durchgängiges Ordnungssystem in der Fertigung realisiert werden, da die Spulenkörper während des gesamten Fertigungsprozesses auf dem Werkstückträger verbleiben. Ferner ist im Vergleich zu konventionellen Wickelverfahren eine Verringerung der erforderlichen Handhabungsschritte möglich, wodurch letztlich eine Reduzierung der Taktzeiten und somit der Störungsanfälligkeit erreicht werden kann [26]. Zusätzlich ist mit dem Wickelverfahren eine einfache Parallelisierung von Wickelvorgängen realisierbar, da durch die Kombination mehrerer Drahtführer zu einem Drahtführerkamm die vom Roboter ausgeführte Wickelbewegung für das gleichzeitige Bewickeln einer entsprechenden Anzahl von Spulenkörpern nutzbar ist. Somit ist es möglich, in einem Takt eine komplette Reihe der auf einem Werkstückträger bereitgestellten Spulenkörper zu bewickeln (siehe Bild 88).

Vorteilhaft sind darüber hinaus die Verfahrensflexibilität und die Funktionsintegration des robotergestützten Wickelverfahrens. Zum einen wird die Funktionalität konventioneller Wickelverfahren kombiniert, zum anderen kann der zur Bewegung des Drahtführers eingesetzte Roboter auch für Montageaufgaben verwendet werden [26]. Eine beispielhafte Prozesskette könnte darin bestehen, dass der Roboter nach dem Bewickeln des Läufers oder Ständers eines Elektromotors auch das anschließende Montieren der beiden Komponenten durchführt. Hierdurch wird der Einsatz kostengünstiger Standardlösungen der Automatisierungstechnik anstatt komplexer Sondermaschinenlösungen sowohl für das Wickeln als auch für das Montieren ermöglicht. Darüber hinaus können durch die Funktionsintegration von Handhabungs- und Beschickungsvorgängen die zugehörigen Handhabungseinrichtungen eingespart und somit Prozessketten robuster gestaltet werden. Daneben wird durch die hohe Flexibilität des Verfahrens eine hohe Auslastung des robotergestützten Wickelsystems ermöglicht, wodurch sich insbesondere für mittelständische Unternehmen umfassende Rationalisierungspotentiale durch die Automatisierung von Wickel- und Montageprozessen ergeben.

### 6.3 Aufbau einer Versuchsanlage für das robotergestützte Wickeln

Aus dem beschriebenen Konzept für das robotergestützte Wickeln ergeben sich für die Gestaltung der Zellenperipherie sowie für die Auswahl eines geeigneten Industrierobotersystems spezifische Anforderungen. Neben den erforderlichen Freiheitsgraden sind

hierbei die speziellen Randbedingungen, die sich aus der oszillierenden Bewegung des Drahtführers ergeben, zu berücksichtigen

#### 6.3.1 Auswahl einer Roboterkinematik für die Versuchsanlage

Die zur Umsetzung des vorgestellten Wickelverfahrens erforderlichen Freiheitsgrade des Industrieroboters ergeben sich aus den zu realisierenden einzelnen Prozessschritten. Für das Wickeln von Spulen vergleichbar dem Linearwickeln sind, um beliebig geformte Flugbahnen darstellen zu können, drei translatorische Freiheitsgrade erforderlich. Sollen auch Motorläufer oder ähnliche rotationssymmetrische Mehrkammer-Spulenkörper bewickelt werden, ist es zusätzlich notwendig, den Drahtführer parallel zur Läuferachse drehen zu können [26]. Neben den erforderlichen Freiheitsgraden sind weitere Aspekte bei der Roboterwahl zu berücksichtigen. Von entscheidender Bedeutung für die erreichbaren Prozesszeiten sind die verfügbaren Verfahrensgeschwindigkeiten und Beschleunigungen. Insbesondere bei nicht kreisrunden Flugbahnen mit linearen Verfahrbewegungen sind pro Windung eine Vielzahl von Richtungswechseln der Verfahrbewegung des Drahtführers erforderlich, die bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten entsprechende Beschleunigungswerte der Roboterachsen erforderlich machen. Ein weiterer Aspekt bei der Roboterwahl ist die statische Steifigkeit und das Schwingungsverhalten der Kinematik. Während des Wickelprozesses wirken durch die Drahtzugkraft Prozesskräfte auf den Roboter ein, die mit zunehmendem Drahtdurchmesser eine elastische Verformung des Handhabungsgeräts und so, bei einem zu starken Abweichen des Drahtführers von seiner Soll-Flugbahn, Kollisionen verursachen können. Des Weiteren können die oszillierenden Drahtführerbewegungen zu einem Aufschwingen des Systems führen, wenn sich die unteren Eigenfrequenzen des Robotersystems infolge zu geringer dynamischer Steifigkeit mit der Prozessfrequenz überschneiden.

Industrieroboter können bezüglich ihres Aufbaus in serielle oder parallele Kinematiken unterteilt werden [144]. Bei seriellen Kinematiken sind die einzelnen kinematischen Grundelemente (translatorische oder rotatorische Achsen) in Serie miteinander verbunden. Im Allgemeinen trägt hierbei ein kinematisches Glied den Antrieb, der das nächste Glied antreibt, und den Abschluss der Kette bildet der bewegte Endeffektor. Auf Grund der seriellen Struktur ist diese kinematische Grundform von Industrierobotern nach [37] in den realisierbaren Verfahrensgeschwindigkeiten, Nutzlasten und Genauigkeiten beschränkt. Da zur Verbesserung dieser Kennwerte eine Steigerung der Steifigkeit und Dynamik erforderlich ist, werden steifere Gelenke und stärkere Antriebe benötigt. Hierdurch erhöht sich jedoch die Gesamtmasse des Systems, weshalb zur Kompensation wiederum leistungstärkere Antriebe notwendig werden. Nach [65] kann somit in Zukunft nur mit begrenzten Leistungssteigerungen bei seriellen Roboterkinematiken gerechnet werden. Aktuelle serielle Kinematiken wie Scara-, 6-Achs- oder Linearroboter bieten Verfahrensgeschwindigkeiten in einem Bereich zwischen 2 und 2,5 m/s und Beschleunigungen von 20 bis 25 m/s<sup>2</sup>.

Höhere dynamische Kennwerte können mit Robotern mit paralleler kinematischer Struktur erreicht werden. Bei dieser Bauform erfolgt die Führung des Endeffektors durch mehrere Gelenkketten die zusammen, je nach Bauform, eine oder mehrere geschlossene kinematische Kette/-n bildet/-n. Der wesentliche Vorteil der sich hieraus für den Aufbau von Robotern ergibt, ist die Möglichkeit die Antriebe ortsfest im nicht bewegten Teil des Roboters zu positionieren. Hierdurch können die bewegten Massen im Vergleich zu seriellen Kinematiken wesentlich reduziert und so Steigerungen der dynamischen Eigenschaften erreicht werden. Da die Antriebe direkt auf die Nutzlast wirken und nicht noch zusätzlich nachfolgende Armglieder bewegen müssen, bieten parallele Roboterkinematiken wie Hexapoden oder Tripoden deutlich höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Insbesondere Tripoden weisen aufgrund ihrer geringen Armgewichte herausragende dynamische Eigenschaften auf, die um ca. Faktor 4 über denen von seriellen Kinematiken liegen [65]. Darüber hinaus wird im Vergleich zu seriellen Kinematiken eine höhere Genauigkeiten und Steifigkeit erreicht, da sich die Positionierfehler und Elastizitäten der einzelnen Antriebsachsen nicht addieren. Lediglich in Bezug auf das Verhältnis von Arbeitsraum zu Bauraum sind parallele Kinematiken im Nachteil gegenüber seriellen. Dies resultiert direkt aus der parallelen Anordnung der Führungsketten und der Überlagerung der individuell begrenzten Arm-Reichweiten [65]. In Tabelle 15 sind die alternativen Roboterkinematiken zusammenfassend bewertet.



Kinematik	Parallel	Seriell
		
Geschwindigkeit	++	0
Beschleunigung	++	0
Arbeitsraum/Bauraum	-	+
Steifigkeit	+	-

Tabelle 15: Bewertung alternativer Roboterkinematiken [26][65]

Insgesamt bieten parallele Kinematiken somit für den Einsatz zum robotergestützten Wickeln entscheidende Vorteile gegenüber seriellen Kinematiken. Insbesondere die herausragenden dynamischen Eigenschaften sprechen für den Einsatz einer Parallelkinematik. Im aufgebauten Versuchssystem wird deshalb der parallelkinematische

Roboter IRB 340 der Firma ABB eingesetzt. Nachfolgend werden der Aufbau sowie die Komponenten der realisierten Versuchsanlage beschrieben.

### 6.3.2 Komponenten der Versuchszelle

In Bild 89 ist der Aufbau der Versuchszelle für das robotergestützte Wickeln gezeigt. Bei dem verwendeten IRB 340 Roboter der Firma ABB wirken im Gegensatz zu klassischen Industrierobotern die Antriebsachsen parallel auf den Endeffektor. Die Parallelkinematik besteht aus einer festen oberen Plattform und einer bewegten unteren Plattform, die über mehrere parallelkinematische Glieder miteinander verbunden sind. Mit der Kinematik des eingesetzten Roboters kann der Endeffektor in den drei translatorischen Raumachsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  bewegt und durch eine zentral angebrachte, doppelkardanische Achse um die  $z$ -Achse gedreht werden. Die max. Traglast von 1 kg ermöglicht die Verarbeitung von Drähten bis zu einem Durchmesser von 0,4 mm, wodurch ein weites Feld an wickeltechnischen Produkten abgedeckt wird [25]. Die max. Verfahrensgeschwindigkeit beträgt 10 m/s bei einer Beschleunigung von 100 m/s<sup>2</sup>. Der zylinderförmige Arbeitsraum des Roboters hat einen Durchmesser von 1.130 mm und eine Höhe von 250 mm.

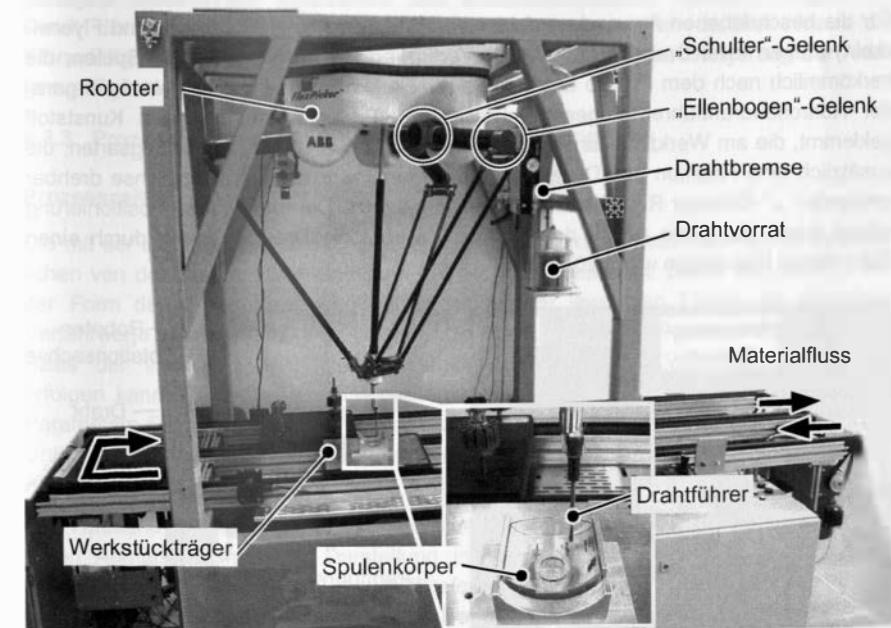


Bild 89: Versuchszelle für das robotergestützte Wickeln mit parallelkinematischem Roboter IRB 340 der Firma ABB [25]



zweilagigen Wicklung mit einer Drahtstärke von 0,2 mm und einer Windungszahl von 50. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Tool-Center-Points (TCP) wird auf den Maximalwert von 10 m/s eingestellt. Zur leichteren Übertragbarkeit auf andere Windungszahlen werden die gemessenen Zeiten im Folgenden auf eine Windung umgerechnet.

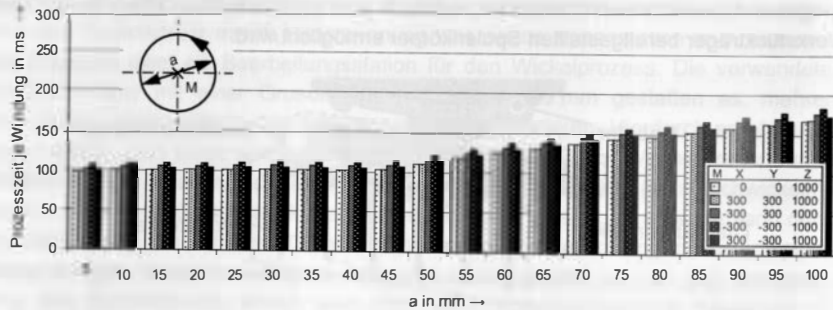


Bild 92: Prozesszeit pro Windung für eine kreisförmige Flugbahn in Abhängigkeit des Durchmessers und der Position des Flugbahn-Mittelpunkts M

Die Prozesszeit pro Windung für die kreisförmige Flugbahn liegen bis zu einem Durchmesser von 45 mm auf einem konstanten Niveau von ca. 100 ms (siehe Bild 92). Dies entspricht dem vom Verfahrenweg unabhängigen Zeitbedarf der Robotersteuerung für die Bestimmung der Bahnpunkte sowie die Koordination der Roboterachsen. Die Zunahme des Verfahrensweges schlägt sich erst bei größeren Durchmessern in höheren Prozesszeiten nieder. Die Wachstumsrate liegt bei 1,2 ms je mm Zunahme des Durchmessers.

Bei der quadratischen Flugbahn ist die Prozesszeit je Windung für  $a \leq 20$  mm nahezu konstant bei 75 ms, der Einfluss des Verfahrensweges ist sehr gering. Für  $a > 20$  mm steigt die Prozesszeit, entsprechend des zunehmenden Verfahrensweges, linear um etwa 2,5 ms je mm Seitenlänge an (siehe Bild 93).

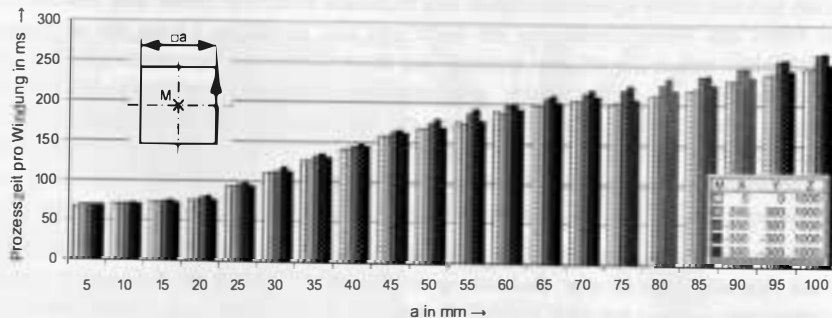


Bild 93: Prozesszeit pro Windung für eine quadratische Flugbahn in Abhängigkeit der Seitenlänge und der Position des Flugbahn-Mittelpunkts M

Bei der rechteckigen Flugbahn hingegen ergibt sich die geringste Prozesszeit je Windung nicht bei der kürzesten Wegstrecke, sondern bei  $a = 20$  mm mit 75 ms (vgl.

quadratische Flugbahn). Die Ursache für dieses Minimum liegt darin, dass die Robotersteuerung die Bahnbeschleunigung bei sehr nahe nebeneinander liegenden Punkten stark reduzieren muss, damit diese unter Einhaltung der programmierten Positioniergenauigkeit angefahren werden können. Hierbei fällt die Reduzierung der Beschleunigung umso größer aus, je kleiner der Punktabstand ist. Die Messergebnisse zeigen, dass die Prozesszeiten ausgehend von  $a = 5$  mm bis  $a = 20$  mm um 2,5 ms je mm in Längsrichtung des Rechtecks fallen (siehe Bild 94). Für  $a > 20$  mm steigen die Prozesszeiten wegen der Zunahme an Wegstrecke mit 1 ms je mm wieder an.

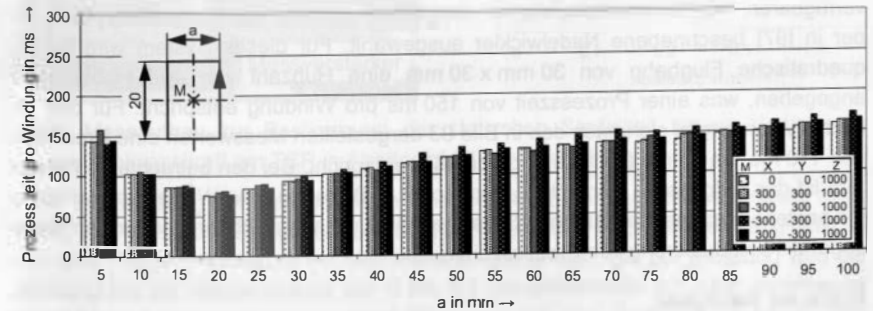


Bild 94: Prozesszeit pro Windung für eine rechteckige Flugbahn in Abhängigkeit der Seitenlänge und der Position des Flugbahn-Mittelpunkts M

Aus den Messwerten können für die betrachteten Flugbahnformen Näherungsgleichungen zur Ermittlung der Prozesszeit in Abhängigkeit der Windungszahl und der Flugbahnabmaße aufgestellt werden. Hierzu wird aus den aufgenommenen Prozesszeiten und der gefahrenen Windungszahl  $N = 50$  der mittlere Zeitbedarf für eine Windung berechnet. Insgesamt ergeben sich hieraus die in Tabelle 16 aufgeführten Gleichungen.

Form	Näherungsgleichung
Kreis	$T_{PK}(a, N) = \begin{cases} N \cdot 100 \text{ ms} & \text{für } a \leq 45 \text{ mm} \\ N \cdot (100 \text{ ms} + (a - 45 \text{ mm}) \cdot 1,2 \text{ ms}) & \text{für } a > 45 \text{ mm} \end{cases}$
Quadrat	$T_{PQ}(a, N) = \begin{cases} N \cdot 75 \text{ ms} & \text{für } a \leq 20 \text{ mm} \\ N \cdot (75 \text{ ms} + (a - 20 \text{ mm}) \cdot 2,7 \text{ ms}) & \text{für } a > 20 \text{ mm} \end{cases}$
Rechteck	$T_{PR20}(a, N) = \begin{cases} N \cdot (75 \text{ ms} + (20 \text{ mm} - a) \cdot 2,5 \text{ ms}) & \text{für } a \leq 20 \text{ mm} \\ N \cdot (75 \text{ ms} + (a - 20 \text{ mm}) \cdot 1 \text{ ms}) & \text{für } a > 20 \text{ mm} \end{cases}$
mit Prozesszeit Kreis	$T_{PK}$ in ms
Prozesszeit Quadrat	$T_{PQ}$ in ms
Prozesszeit Rechteck 20 mm	$T_{PR20}$ in ms
Durchmesser/Seitenlänge	$a$ in mm

Tabelle 16: Näherungsgleichungen zur Bestimmung der Prozesszeit in Abhängigkeit der Flugbahnform, -größe und Windungszahl



Bezüglich der Positionsabhängigkeit der Prozesszeiten kann festgestellt werden, dass bei der Mehrzahl der durchgeführten Messungen das Minimum in der Mitte des Arbeitsraumes liegt. In den Positionen  $x/y/z = -300/300/1.000$  und  $x/y/z = -300/-300/1.000$  ergeben sich hingegen durchweg höhere Prozesszeiten als in der Mitte. Der Unterschied beträgt bis zu 11%. Die Ergebnisse an den Positionen  $x/y/z = 300/300/1.000$  und  $x/y/z = 300/-300/1.000$  weichen hingegen nur geringfügig von denen in der Mitte des Arbeitsraums ab.

Anhand der aufgenommenen Zeiten, kann das aufgebaute Versuchssystem mit marktverfügbaren NC-Nadelwickelsystemen verglichen werden. Als Vergleichssystem wird der in [97] beschriebene Nadelwickler ausgewählt. Für dieses System wird für eine quadratische Flugbahn von 30 mm x 30 mm eine Hubzahl von 400 Hüben/Minute angegeben, was einer Prozesszeit von 150 ms pro Windung entspricht. Für das Versuchssystem ergibt sich nach den in Bild 93 dargestellten Messwerten eine Prozesszeit von 110 ms, was einer Reduzierung von 26% entspricht. Bei den betrachteten Parametern ist das aufgebaute Versuchssystem somit in Bezug auf die Wickelgeschwindigkeit mit bestehenden markterhältlichen Systemen nicht nur vergleichbar, sondern ermöglicht sogar eine Reduzierung von Prozesszeiten.

**Statische Steifigkeit**

Während des Wickelprozesses wirkt die Drahtzugkraft als Prozesskraft auf den Drahtführer und somit auf den Werkzeugflansch des Roboters. Durch die einwirkende Kraft wird der Werkzeugflansch von seiner Soll-Flugbahn abgedrängt, was bei zu starken Abweichungen beispielsweise Kollisionen zwischen Drahtführer und Spulenkörper verursachen kann. Die Nachgiebigkeit eines Roboters gegenüber angreifenden Kräften hängt von dessen statischer Steifigkeit ab. Diese gibt an, wie stark der Werkzeugflansch des Roboters unter Einwirkung einer externen Kraft von der unbelasteten Position verdrängt wird. Nach [73] gilt für die statische Steifigkeit eines Roboters am Werkzeugflansch in Richtung der kartesischen Koordinatenachsen:

$$c_x = \frac{F_x}{\Delta s_{xAb}}; c_y = \frac{F_y}{\Delta s_{yAb}}; c_z = \frac{F_z}{\Delta s_{zAb}} \quad (6.1)$$

mit Steifigkeit in Richtung der Koordinatenachse i  $c_i$  in N/mm  
 Kraft in Richtung i  $F_i$  in N  
 Ablenkung in Richtung i  $\Delta s_{iAb}$  in mm

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die statischen Steifigkeiten des eingesetzten Roboters in Richtung der drei kartesischen Raumachsen bestimmt. Hierzu wird dem System in jeder Richtung nacheinander mit einer Mikrometer-Messschraube eine Ablenkung aufgeprägt. Diese wird ausgehend von der Messschraube über eine Kraftmessdose auf einen am Werkzeugflansch montierten Winkel in das System eingebracht. Mit der Kraftmessdose wird laufend die Reaktionskraft des Systems auf die von außen eingeprägte Ablenkung erfasst (siehe Bild 95).

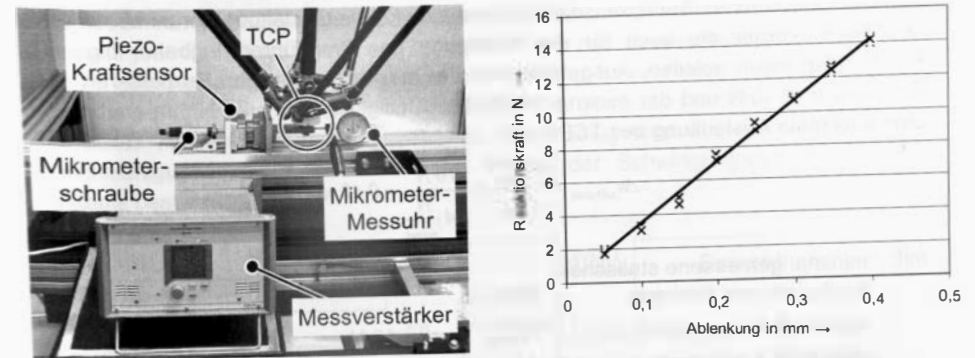


Bild 95: Messaufbau zur Bestimmung der statischen Steifigkeit (links); Verlauf der Reaktionskraft am TCP in Abhängigkeit der Auslenkung

Da die Skalenteilung der Messschraube eine exakte Überprüfung der Ablenkung nicht zulässt, wird diese auf der gegenüberliegenden Seite des Roboter-Werkzeugflanschs durch eine Präzisionsmessuhr mit Mikrometerteilung erfasst. Bei der Messung wird die Ablenkung mit der Messschraube von 0 bis 0,4 mm schrittweise mit einer Schrittweite von 0,05 mm erhöht und die jeweilige Reaktionskraft des Systems gemessen. Der Messaufbau sowie ein ausgewähltes Mess-Beispiel sind in Bild 95 dargestellt.

Die statische Steifigkeit am Werkzeugflansch wird an sechs charakteristischen Messpunkten im Arbeitsraum des Roboters bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 96 dargestellt. Es zeigt sich, dass die eingesetzte Parallelkinematik eine stark richtungsabhängige Steifigkeit aufweist. In x- bzw. y-Richtung liegen die Steifigkeitswerte in einem Bereich zwischen 24 und 39 N/mm. In z-Richtung hingegen werden deutlich höhere Steifigkeitswerte erreicht. Hier belaufen sich die Werte im Minimum auf 285 N/mm und im Maximum auf 331 N/mm

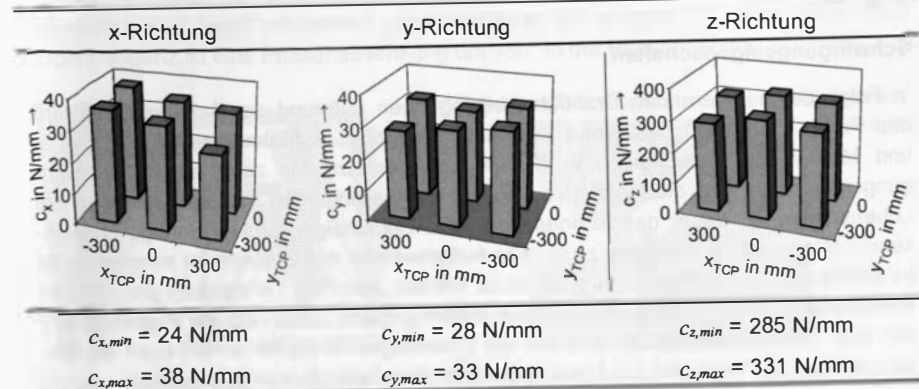


Bild 96: Statische Steifigkeit des TCP im Arbeitsraum an ausgewählten Messpunkten

Aus den gewonnenen Steifigkeitsdaten lassen sich für die Gestaltung der zu bewickelnden Spulenkörper als auch für die Auslegung der Drahtführer-Flugbahn folgende Randbedingungen ableiten. Ausgehend von der maximal zulässigen Prozesskraft des Roboters von 10 N und der minimal ermittelten Steifigkeit  $c_{x,min} = 24 \text{ N/mm}$  ergibt sich eine maximale Auslenkung des TCPs von:

$$\Delta s_{xAb,max} = \frac{F_{P,max}}{c_{x,min}} = \frac{10 \text{ N}}{24 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} = 0,42 \text{ mm} \quad (6.2)$$

mit minimal gemessene statische Steifigkeit des Roboters	$c_{x,min}$	=	24 N/mm
maximale Prozesskraft	$F_{P,max}$	=	10 N
maximale Auslenkung	$\Delta s_{xAb,max}$	in	mm

Mit einem Sicherheitsfaktor von 2 zur Berücksichtigung von zusätzlichen Störursachen, wie Nachgiebigkeiten im Wickelwerkzeug, Form- und Lageabweichungen im Spulenkörper oder mechanischen Schwingungen, ergibt sich für die Auslegung der Drahtführerflughahn ein einzuhaltender Sicherheitsabstand zwischen Drahtführerumfang und zu passierenden Kanten, Flächen oder Formelementen von:

$$D_{sicher} = \Delta s_{xAb,max} \cdot S = 0,84 \text{ mm} \approx 1 \text{ mm} \quad (6.3)$$

mit Sicherheitsabstand	$D_{sicher}$	in	mm
maximale Auslenkung	$\Delta s_{xAb,max}$	=	0,42 mm
Sicherheitsfaktor	$S$	=	2

Hieraus folgt, dass bei der Auslegung des zu bewickelnden Spulenkörpers der Abstand zwischen zwei vom Drahtführer zu passierenden Kanten, Flächen oder Formelementen größer gewählt werden muss als der Durchmesser des Drahtführers zuzüglich 2 mm Sicherheitsabstand. So ist sichergestellt, dass auf beiden Seiten des Drahtführers eine ausreichende Abstandsreserve, auch bei maximaler Belastung durch die Drahtzugkraft, eingehalten wird.

### Schwingungseigenschaften

In Folge der oszillierenden Drahtführerbewegungen aufgrund der Achssollwerte wird das Fertigungssystem bestehend aus Industrieroboter, Aufnahmegeßtel, Peripherie- und Materialflusskomponenten in Schwingung versetzt. Mit zunehmender Schwingungsintensität steigt die Gefahr von negativen Auswirkungen auf beispielsweise die Lebensdauer der Lager des Roboters oder die Spuleneigenschaften infolge schwankender Drahtzugkräfte. Um ein zu starkes Aufschwingen des Systems zu vermeiden, ist es erforderlich die Prozessparameter so zu wählen, dass die Frequenzen der von den Bewegungen des Roboters verursachten Schwingungen außerhalb der Eigenfrequenzen des Systems liegen. Um dies bei der Prozessgestaltung berücksichtigen zu können, werden im Folgenden die Eigenfrequenzen der Versuchsanlage bestimmt.

Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen bietet sich das Verfahren der Übertragungsfunktionsanalyse mit Impulshammer an [73]. Hierbei wird das zu untersuchende System mit einem Hammer definiert angeregt und der zeitliche Verlauf der Schlagkraft  $f(t)$  mit einem integrierten piezoelektrischen Kraftaufnehmer gemessen und durch ein rechnergestütztes Auswertesystem aufgezeichnet. Gleichzeitig wird über einen Drei-Achsen-Beschleunigungsaufnehmer der zeitliche Verlauf der Schwingungsantwort  $a(t)$  des Systems bestimmt.

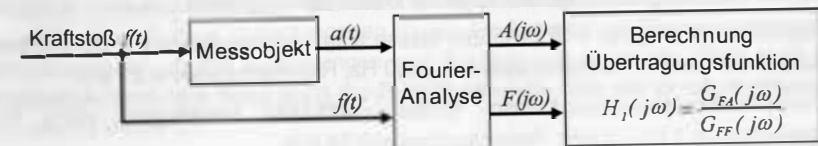


Bild 97: Prinzip der Übertragungsfunktionsanalyse mittels Impulshammermethode [157]

Für die Bestimmung des Übertragungsverhaltens, werden die aufgezeichneten Signale  $f(t)$  und  $a(t)$  mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen. Ergebnis sind die Spektralfunktionen  $F(j\omega)$  für die Anregungskraft und  $A(j\omega)$  für die Systembeschleunigung, die zur Bestimmung der Übertragungsfunktion zueinander ins Verhältnis gesetzt werden [2][148]. Hierbei wirken sich aber Störungen in den Messsignalen (Messrauschen) direkt auf die ermittelte Übertragungsfunktion aus. Eine Unterdrückung von Störungen im aufgenommenen Antwortsignal ist durch die Bildung der Übertragungsfunktion aus dem Quotienten des Kreuzleistungsspektrums  $G_{FA}(j\omega)$  zum Autoleistungsspektrum  $G_{FF}(j\omega)$  möglich (siehe Bild 97) [146]. Die so ermittelte Übertragungsfunktion wird auch als  $H_1$ -Schätzung bezeichnet. Anhand des somit bekannten Verlaufs von Amplitude und Phase der Übertragungsfunktion ist eine Bestimmung der Eigenfrequenzen des untersuchten Systems möglich. Eine Eigenfrequenz liegt dann vor, wenn eine Struktur auf eine Anregung mit einer erhöhten Amplitude reagiert. In der Übertragungsfunktion ist eine Eigenfrequenz somit durch eine Überhöhung im Amplitudenverlauf gekennzeichnet. Ein weiteres Charakteristikum einer Eigenfrequenz ist eine Phasenabsenkung um  $180^\circ$  in der Phasendarstellung. [146].

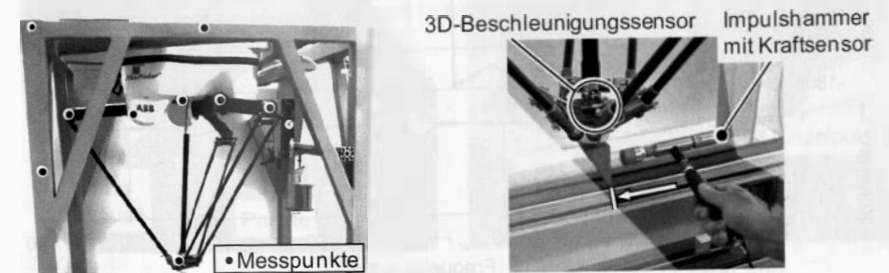


Bild 98: Messpunkte zur Bestimmung der Eigenfrequenzen (links); Impulsanregung des Roboters am Werkzeugflansch mittels Impulshammer (rechts)

Die Systemantwort auf die Impulsanregung wird an insgesamt 10 Messpunkten, deren Positionen in Bild 98 dargestellt sind, durchgeführt, wobei die Symmetrie des Systems bei der Auswahl der Messpunkte ausgenutzt wird. Neben dem Werkzeugflansch sind die Messpunkte in den Ellenbogen sowie den Schultergelenken des Roboters, der Mitte des Robotergehäuses und an 3 Punkten des Aufnahmegestands angeordnet. Die Anregung des Systems erfolgt jeweils über den in der Mitte des Arbeitsraums ( $x/y/z = 0/0/1.000$  mm) positionierten Werkzeugflansch. Für die experimentelle Bestimmung der Eigenfrequenzen werden folgende Messmittel eingesetzt:

- > Impulshammer: Kistler – 9724A5000, Masse 5 kg, Messbereich 0 – 5 kN, Empfindlichkeit 0,25 mV/N, Frequenzbereich 0 – 500 Hz, Resonanzfrequenz 27 kHz
- > Drei-Achs-Beschleunigungssensor: Kistler – 8792A50, Messbereich  $\pm 50$  g, Frequenzbereich 2 Hz – 3 kHz, Resonanzfrequenz 54 kHz

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die wesentlichen Eigenfrequenzen das Wickelsystem bei  $F_{E1} = 11$  Hz,  $F_{E2} = 39$  Hz und  $F_{E3} = 62$  Hz liegen. Im Bereich dieser Frequenzen zeigt der in Bild 99 dargestellte Amplitudengang deutliche Überhöhungen der Amplitude und der Phasengang jeweils signifikante Phasenabsenkungen. Der gleichmäßige Verlauf der Kohärenz nahe dem idealen Wert 1, deutet auf eine hohe Güte der erfassten Messsignale hin. Lediglich im Bereich der Eigenfrequenzen sind geringfügige Absenkungen erkennbar, die Hinweis auf geringfügige Nichtlinearitäten oder Störungen sein können.

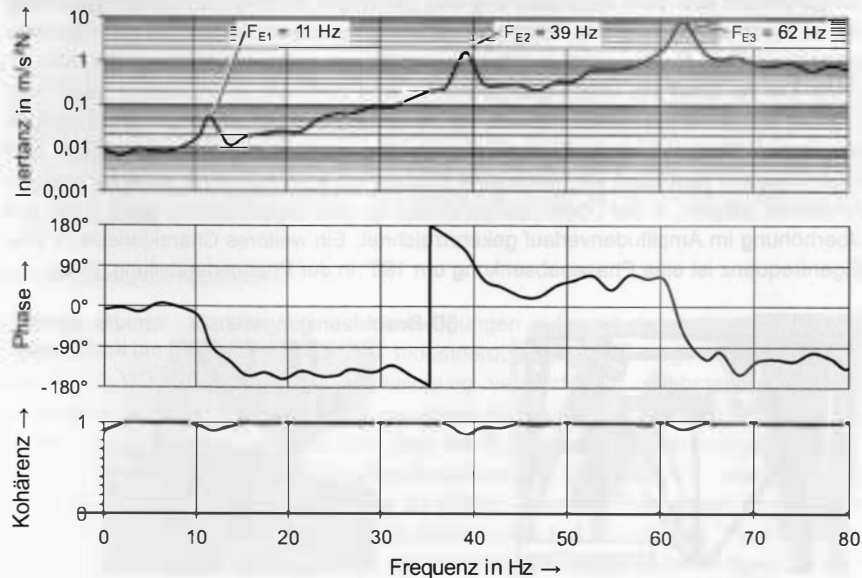


Bild 99: Amplituden- und Phasengang sowie Kohärenzverlauf des robotergestützten Wickelsystems

Die Relevanz der Eigenfrequenzen für die Prozessgestaltung ergibt sich aus der Gegenüberstellung mit den Frequenzen der Schwingungen, die durch die Verfahrbewegungen des Roboters erzeugt werden. In der nachfolgenden Betrachtung wird zu deren Bestimmung näherungsweise davon ausgegangen, dass die Periodendauer der von Roboterbewegungen verursachten Schwingung der Zeit für das Abfahren einer Windung entspricht. Somit ergibt sich mit der minimal gemessenen Prozesszeit je Windung von 70 ms (siehe Abschnitt 6.3.3 – Prozesszeiten) bei einer rechteckigen Flugbahn eine maximale Frequenz von  $F_{Fmax} = 14,3$  Hz. Für die Prozessgestaltung sind somit  $F_{E2}$  und  $F_{E3}$  nicht relevant.  $F_{E1} = 11$  Hz hingegen ist bei der Auswahl der Prozessparameter zu berücksichtigen, um ein Aufschwingen des Systems zu vermeiden. Dies kann beispielsweise durch eine Anpassung der Flugbahnabmaße oder der Verfahrgeschwindigkeit erreicht werden.

#### 6.4 Funktionsnachweis anhand eines Anwendungsbeispiels

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des prototypischen Wickelsystems sowie zur Verifikation der aufgeführten Vorteile wird dieses anhand der Fertigung eines elektronisch kommutierten Gleichstrommotors getestet. Dieser Motor besteht aus einem Stator mit sechs integrierten Spulenkörpern und einem mit Permanentmagneten bestückten Rotor (siehe Bild 100). Die Spulen im Stator werden mittels einer Transistor-Brückenschaltung und einem Mikrocontroller angesteuert. Hieraus ergibt sich die Bezeichnung „elektronisch kommutiert“ (kurz „EC“), da bei diesem Motortyp die gewöhnlich mittels Kommutator und Schleifbürsten realisierte Kommutierung durch eine elektronische Schaltung erfolgt.

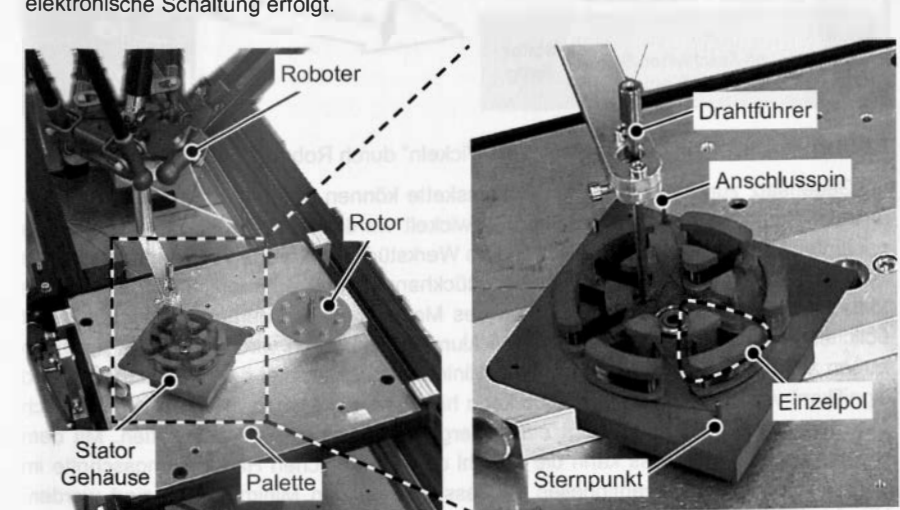


Bild 100: Direktes Bewickeln des EC-Motor-Stators in der Versuchszelle [25]

In Bild 100 ist die Bewicklung des Stators in der Versuchszelle dargestellt. Die Gesamtansicht im linken Bildteil zeigt den in der Wickelzelle gespannten Werkstückträger, der sowohl für den Transport des Statorgehäuses als auch für den Rotor dient. Der rechte Detailausschnitt zeigt die Bewicklung eines Einzelpols des Stators. Der aus drei Polpaaren bestehende Stator wird mittels drei Anschlusspins mit der Ansteuerschaltung verbunden. Bei der Bewicklung ist zu beachten, dass die erste Wicklung eines Polpaars im Uhrzeigersinn und die zweite gegen den Uhrzeigersinn gewickelt werden muss. [25]

Beim Einsatz eines konventionellen Wickelverfahrens müssten die Motorwicklungen einzeln vorgefertigt, beispielsweise auf Spulenkörpern oder aus Backlackdraht, und anschließend in den Stator verbaut werden. Des Weiteren sind die Einzelspulen entsprechend dem Schaltbild des Motors durch Löt- oder Schweißverbindungen miteinander zu verbinden und an den Kontaktpins des Stators anzuschließen. Zwischen den beschriebenen Prozessschritten sind noch weitere Handhabungsschritte, beispielsweise für die Vereinzelung der Spulen, oder Prüfschritte, wie das Bestimmen des Wicklungssinns, erforderlich.

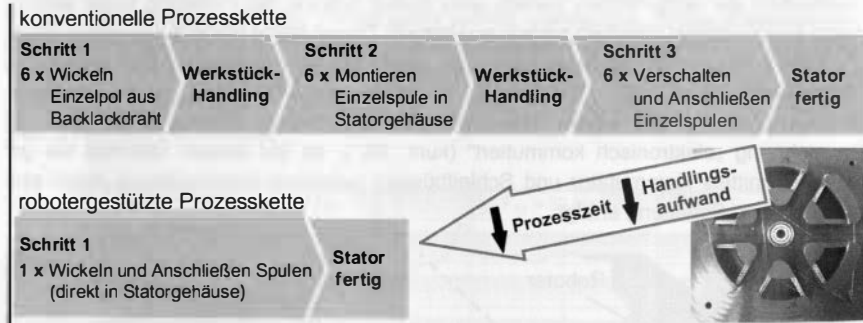


Bild 101: Verkürzung der Prozesskette „Wickeln“ durch Robotereinsatz [25][26]

Im Gegensatz zur konventionellen Prozesskette können durch den Einsatz des Roboters die Spulen direkt auf den Stator gewickelt werden. Da der Stator während des gesamten Prozessablaufs ortsfest auf dem Werkstückträger verbleiben kann, sind keine zusätzlichen Einrichtungen für die Werkstückhandhabung erforderlich [25]. Durch das fortlaufende Wickeln der sechs Spulen des Motors entfallen darüber hinaus die sonst üblichen Trennstellen zwischen den Wicklungen. Hierdurch wird die Anzahl der nach außen zu führenden Anschlüsse auf ein Minimum reduziert und der Schaltungsaufwand signifikant verringert. Darüber hinaus kann hierdurch die Menge an Drahtabfall deutlich reduziert werden. Bild 101 zeigt einen Vergleich der beiden Prozessketten. Mit dem robotergestützten Prozess kann die Anzahl der erforderlichen Handhabungsschritte im Vergleich zu einer konventionellen Prozesskette auf ein Minimum reduziert werden. Hierdurch ergibt sich insgesamt ein robuster Prozessablauf in Verbindung mit verkürzten Prozesszeiten, da Nebenzeiten für die Werkstückhandhabung entfallen.

### Zusammenfassung

Die Nadelwickeltechnik ermöglicht hinsichtlich der Automatisierung wesentliche Vorteile im Vergleich zum Linear- oder Flyerwickeln. Die erforderliche komplexe Anlagentechnik verursacht jedoch hohe Investitionskosten wodurch ein wirtschaftlicher Einsatz in der Klein- und Mittelserienfertigung erschwert wird. Einen möglichen Lösungsansatz stellt der Einsatz eines kostengünstigen Industrieroboters statt der üblichen Sonderkonstruktion dar. Auf Grundlage dieses Ansatzes wurde ein Versuchssystem aufgebaut, in dem die Bewegung des Drahtführers durch einen parallelkinematischen Industrieroboter erfolgt. Anhand von Untersuchungen wurden die Kennwerte des Versuchssystems bestimmt. Neben der Ermittlung der Prozessgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Flugbahnform und -größe wurden die statische Steifigkeit des Robotersystems sowie die Eigenfrequenzen bestimmt. Anhand eines Beispielprodukts, einem EC-Motor mit sechs Einzelspulen, konnte die Funktionsfähigkeit des Systems gezeigt und die prinzipielle Eignung des verwendeten Roboters für die Nadelwickeltechnik nachgewiesen werden.

## **7 Rechnergestützte Werkzeuge zur Programmerstellung für die Steuerung des Wickelroboters**

Durch die Entwicklung durchgängiger rechnergestützter Konstruktions- und Fertigungswerkzeuge konnte im Bereich der spanenden Fertigungsverfahren seit Mitte der 1980er Jahre eine wesentliche Reduzierung des Aufwands für die Programmerstellung erreicht werden. In der Spulenwickeltechnik sind vergleichbare Softwarelösungen nicht verfügbar [151]. Üblicherweise werden Programme für Wickelmaschinen auf Grundlage der in der elektrotechnischen Auslegung bestimmten Spulenparameter vom Fertigungsplaner auf Basis von Erfahrungswissen in Befehlssätze für die Wickelmaschine umgesetzt. Die hiermit verbundenen Nachteile, wie Produktionsstillstand durch langwierige Programmerstellung, verbunden mit der Gefahr des Maschinenbruchs sowie fehlende Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Wegplanung, werden durch die Forderung nach immer höherer Flexibilität, sinkenden Losgrößen bei Vergrößerung der Produktvielfalt zunehmend verschärft.

Der Einsatz eines Industrieroboters für die Fertigung wickeltechnischer Produkte stellt bezüglich der Programmerstellung eine weitere Herausforderung dar. Neben dem erforderlichen Fachwissen aus dem Bereich der Wickeltechnik sind zusätzlich Kenntnisse in der Programmierung von Industrierobotern erforderlich. Für das Wickeln von Spulen mit der in der aufgebauten Versuchszelle eingesetzten Parallelkinematik sind komplexe, dreidimensionale Bewegungsbahnen erforderlich, deren Programmierung im klassischen „Teach-In“ Verfahren als zu zeitaufwendig eingestuft werden muss. Zielstellung dieses Kapitels ist es daher, aufbauend auf einer Analyse und Bewertung der derzeit zur Roboter- und Maschinenprogrammierung eingesetzten Konzepte, alternative rechnergestützte Programmierwerkzeuge zu entwickeln, die eine aufwandsarme und effiziente Erstellung von Steuerungsprogrammen für das Versuchssystem ermöglichen. Im Weiteren werden die zur Konzeption erforderlichen Schritte dargelegt sowie die jeweilige softwaretechnische Umsetzung erläutert.

### **7.1 Roboter- und Maschinenprogrammierung in der Fertigung**

Bei Programmierverfahren für Industrieroboter kann nach [43] zwischen direkten Verfahren, sog. Online-Verfahren, und indirekten Verfahren, auch Offline-Verfahren genannt, unterschieden werden. Bei den in der industriellen Anwendung noch immer weit verbreiteten direkten Verfahren, erfolgt die Programmerstellung unter Einsatz des zu programmierenden Robotersystems. Hieraus ergeben sich einige Nachteile. Da das Robotersystem während der Programmerstellung und -optimierung nicht für die Fertigung genutzt werden kann, entstehen hohe Rüstzeitanteile. Des Weiteren sind die Qualität des erzeugten Programms sowie der Zeitbedarf für die Erstellung in hohem Maße vom Können und Erfahrungswissen des Programmierers abhängig. Darüber hinaus ist die Gefahr von Kollisionen zwischen Roboter und Zellenperipherie während des manuellen Positionierens des Roboters sehr hoch. Ein entscheidender Vorteil von Online-Verfahren ist jedoch, dass beispielsweise Elastizitäten des Roboters, Ungenau-



igkeiten in der Roboterkinematik oder Maßabweichungen in den Werkstückaufnahmen bei der Programmierung mit erfasst werden, und so eine implizite Fehlerkorrektur erfolgt. Untergruppen der direkten Programmierverfahren sind Teach-In-, Play-Back- und sensorgeführte Misch-Verfahren. Die Programmerstellung im Teach-In-Verfahren erfolgt durch Positionieren des Roboterflansches mit dem Eingabegerät am gewünschten Punkt und anschließender Übernahme der Koordinaten in das Roboterprogramm. Weitere erforderliche Parameter sind die Verfahrensgeschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Bewegungsart zwischen den getachten Punkten (Point-to-Point, linear, zirkular). Ein Haupteinsatzfeld der Play-Back-Programmierung ist das Lackieren mittels Industrieroboter. Hierbei wird der Roboter vom Programmierer manuell entlang der gewünschten Raumkurve geführt und die Robotersteuerung speichert in festen Zeitabständen die Positionswerte der einzelnen Roboterachsen ab. Durch den Einsatz von Sensoren wird die Programmerstellung entscheidend vereinfacht. So kann beispielsweise die Erstellung von Verfahrensbewegungen für das Bahnschweißen dadurch erfolgen, dass lediglich Start- und Endpunkt der Bewegung vorgegeben werden, und die Erfassung des Weges dazwischen, durch ein automatisches Abtasten des Werkstücks mit einer am Werkzeugflansch des Roboters montierten Sensorik zur Kantendetektion erfolgt. [43]

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Anlagenverfügbarkeit, gewinnen indirekte Programmierverfahren für Industrieroboter zunehmend an Bedeutung. Hauptmerkmal dieser Verfahren ist es, dass die Programmerstellung nicht auf der Robotersteuerung des Zielsystems erfolgt, sondern auf einem separaten Offline-Programmiersystem. Hierdurch ist eine Verlagerung der Programmerstellung in die Arbeitsvorbereitung möglich, wodurch insbesondere eine Reduzierung von Nebenzeiten erreicht wird. Bei indirekten Programmierverfahren kann zwischen textuellen oder CAD-gestützten Verfahren unterschieden werden. [43][144]

Bei textuellen Verfahren wird der Programmcode, bestehend aus Geometriedaten, Verfahrensbefehlen, Schleifenstrukturen oder IO-Befehlen, über eine Tastatur in einen Editor auf einem Offline-Programmiersystem erstellt. Die Programme werden in der Programmiersprache der jeweiligen Robotersteuerung geschrieben. Im Gegensatz zur NC-Programmierung für Werkzeugmaschinen, bei der ein einheitlicher NC-Befehlssatz verwendet wird, sind die Steuerbefehle für Industrieroboter nicht genormt sondern herstellerspezifisch. Somit ist für die Programmerstellung neben einer genauen Kenntnis des Anlagenaufbaus ein umfangreiches Expertenwissen in der jeweiligen Programmiersprache notwendig. [144]

Die Basis CAD-gestützter Verfahren zur Roboterprogrammierung bilden 3D-Modelle des Roboters und der Zellenkomponenten (Vorrichtungen, Transportbänder, Greifer etc.). Diese Geometriemodelle werden in einer Simulationsumgebung zu einem Gesamtmodell der Fertigungszelle zusammengebaut und kinematisiert. Hierbei werden die einzelnen Gelenke des Roboters entsprechend den realen Bedingungen modelliert und durch Zuweisung von Freiheitsgraden (rotatorisch/translatorisch) mathematisch definiert. Anhand des Zellenmodells können im Weiteren Roboterprogramme bewegungs-

orientiert oder aufgabenorientiert erstellt werden. Bei der bewegungsorientierten Programmerstellung wird das Programm durch die schrittweise Vorgabe von Bewegungen einschließlich der zugehörigen Bewegungsparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Pose etc.) erstellt. Bei der aufgabenorientierten Programmerstellung wird aus der Vorgabe der einzelnen Handhabungsaufgaben (z. B.: Bauteil X von Punkt A nach Punkt B) unter Berücksichtigung des Zellenmodells der erforderliche Bewegungsablauf automatisch vom Simulationsprogramm erzeugt. Die erzeugten Bewegungsprogramme können anschließend hinsichtlich Kollisionsfreiheit geprüft, Prozesszeit optimiert und Prozessablauf angepasst werden. [46][144]

Zusammenfassend sind die Merkmale indirekter CAD-gestützter und direkter Programmierverfahren für Industrieroboter nach [43] in Tabelle 17 dargestellt:

direkte Programmierverfahren	indirekte CAD-gestützte Programmierverfahren
- reales Robotersystem und Anlagenumgebung erforderlich	- 3D-Modell von Roboter und Anlagenumgebung erforderlich
- Fertigungsanlage während der Programmierung nicht verfügbar	- Programmierung in der Arbeitsvorbereitung
- Testen der Anwenderprogramme am realen System	- Testen der Programme durch Simulation
- Qualität der Roboterprogramme abhängig von der Erfahrung des Programmierers	- Unterstützung des Programmierers durch intelligente, rechnerbasierte Hilfsmittel

Tabelle 17: Merkmale direkter und indirekter Programmierverfahren nach [43]

Im Vergleich zu den aufgezeigten Verfahren zur Programmerstellung für Industrieroboter haben sich auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen teilweise alternative Ansätze entwickelt. Diese werden durch einen standardisierten Befehlssatz ermöglicht, der sich, ausgehend von der Einführung der NC-Technik in den 1950er Jahren, entwickelt hat. Bei den eingesetzten Verfahren kann zwischen der textuellen Erstellung, der Werkstattorientierten-Programmierung und der CAD-CAM-Kopplung unterschieden werden. [43]

Vergleichbar der textuellen Programmierung von Industrieroboter kann auch die Erstellung von Ablaufprogrammen für Werkzeugmaschinen manuell erfolgen. Ein NC-Programm besteht aus fortlaufend nummerierten Sätzen, die die einzelnen Programmanweisungen enthalten. Trotz der Unterstützung durch eine automatische Syntax-Überprüfung oder vordefinierte Zyklen ist für die Programmerstellung ein hohes Expertenwissen erforderlich. Die Anwendung ist auf einfache Werkstücke beschränkt und nicht für die Erstellung komplexer Programme, wie beispielsweise das Fräsen von Freiformflächen, geeignet. Vorteilhaft ist, dass die Programmerstellung unabhängig von der zu programmierenden Werkzeugmaschine auf einem separaten Programmiersystem erfolgen kann, und somit keine Produktionskapazitäten blockiert werden. [43]

Mit dem Ziel höherer Produktivität und Flexibilität im Fertigungsbereich wurden gegen Ende der 1980er Jahre Ansätze zur „Werkstatorientierten Programmierung“ (kurz WOP) entwickelt. Charakteristisch für diesen Programmieransatz ist, dass die Erstellung des NC-Programms direkt an der Werkzeugmaschine in einer grafisch-interaktiven Bedienoberfläche mit intuitiven Bildsymbolen und Eingabemasken, parallel zum Bearbeitungsprozess, erfolgt. Für die Kontrolle der erzeugten Programme werden die resultierenden Werkzeugbewegungen vorab simuliert und graphisch dargestellt. [140]

Für die Erstellung von Bearbeitungsprogrammen für komplexe Werkstücke hat sich im Bereich der spanenden Fertigung der Einsatz von CAD/CAM-Ketten bewährt. Bestandteile sind einerseits eine CAD-Software (CAD: Computer Aided Design) für die Konstruktion der Bauteile sowie zur Erstellung der benötigten Fertigungszeichnungen und andererseits eine CAM-Software (CAM: Computer Aided Manufacturing) für die automatisierte Erzeugung der CNC-Bearbeitungsprogramme. Ausgehend von der Modellierung des Bauteils im CAD-System, werden in der CAM-Software die Verfahrbewegungen für die CNC-Maschine abgeleitet und durch einen Postprozessor in einen maschinenspezifischen Programmcode übersetzt. Hierbei sind die Rohteilabmaße, Spannmittel, Bearbeitungsparameter (Vorschub, Drehzahl etc.) sowie maschinenspezifische Eigenarten zu berücksichtigen. [140][55]

Neben der Reduzierung des Programmieraufwands liegt ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens darin, dass NC-Programme für komplexe 3D-Geometrien, wie beispielsweise Freiformflächen, sicher und automatisiert erstellt werden können. Ein wesentlicher Nachteil des Verfahrens ist es jedoch, dass relativ schnell sehr große Programme entstehen, da die CAM-Systeme im Normalfall keine Schleifenstrukturen erzeugen, sondern entsprechend oft die erforderliche Sequenz in den Programmablauf schreiben. Die Schnelligkeit und Flexibilität der Systeme führt aber dazu, dass dieser Nachteil in Kauf genommen werden kann. [55][130]

## 7.2 Werkstatorientiertes Programmiersystem für den Wickelroboter

Mit dem Ziel eine aufwandsarme Programmierung des Versuchssystems zu ermöglichen, wurde eine werkstattnahe Programmierumgebung entwickelt, die in Anlehnung an die im Bereich der spanenden Fertigung eingesetzten Systeme, eine unkomplizierte Programmierung des Versuchssystems ermöglicht. Die erstellte Software gestattet auch Benutzern ohne Erfahrung in der Programmierung von Industrierobotern eine schnelle Erstellung von Steuerungsprogrammen und reduziert Stillstandszeiten, da die Programmerstellung nicht am Roboter selbst, sondern auf einem separaten Rechner erfolgt. Nachfolgend werden der Aufbau und der Funktionsumfang der realisierten Programmierumgebung dargestellt und beschrieben.

### 7.2.1 Aufbau des Programmiersystems

In der Software zur werkstatorientierten Programmierung des roboterbasierten Wickelsystems sind Routinen für typische Querschnittsformen von Spulen realisiert. Die Erstellung von Programmen ist für kreisförmige und rechteckige Flugbahnen sowie für

Freiformen durch die Eingabe von Stützpunkten möglich. Ausgehend von der Auswahl der Flugbahnform erfolgt die Eingabe der Wicklungsparameter in problemspezifischen Eingabemasken. Zur Kontrolle der eingegebenen Werte werden diese graphisch dargestellt. Integrierte Funktionen zur Plausibilitätsprüfung stellen einen fehlerfreien Programmaufbau sicher und verhindern somit Produktionsausfälle. Nach einer abschließenden Zusammenstellung aller eingegebenen Werte zu deren Überprüfung durch den Benutzer, wird aus diesen automatisch das entsprechende Programm für den Roboter erzeugt. Hierzu werden die Eingabewerte in ein Steuerungsprogramm-Template geschrieben, welches die erforderlichen ProgrammROUTINEN für die Ausführung der Wickeloperationen enthält (siehe Bild 102).

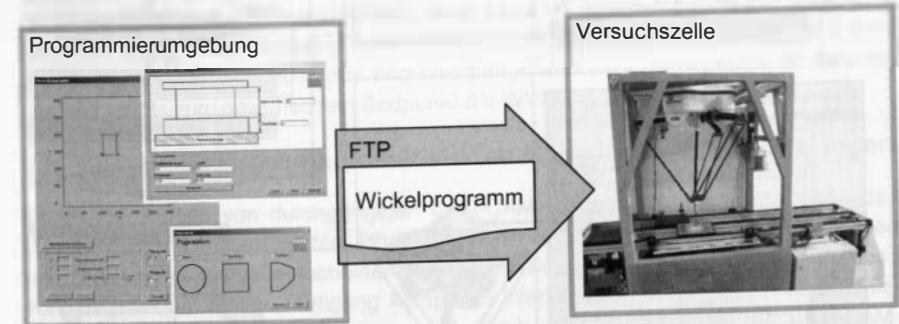


Bild 102: Ablauf der Programmerstellung im werkstatorientierten Programmiersystem

Nach der Übertragung der eingegebenen Parameter in das Template liegt das Steuerungsprogramm für den Roboter im Arbeitsverzeichnis des Programmierrechners vor. Durch die Möglichkeit der Einbindung der Robotersteuerung in ein Ethernet-Netzwerk, kann anschließend die Programmübertragung direkt mittels FTP aus der aufgebauten werkstatorientierten Programmierumgebung erfolgen.

### 7.2.2 Steuerungsprogramm-Template für den Wickelroboter

Die Programmierung von ABB-Robotern erfolgt in der Programmiersprache RAPID. Die Hauptbestandteile eines RAPID-Programms sind die „Haupt-Routine“, Unterroutinen und Programmdateien. Für die Abarbeitung eines Programms werden darüber hinaus Systemroutinen auf der Robotersteuerung vorgehalten, auf die aus Programmen heraus zugegriffen werden kann. Den Startpunkt eines RAPID-Programms bildet die „Haupt-Routine“, von der ausgehend, weitere Routinen aufgerufen werden. Durch die Programmierung von Routinen ist es möglich Programme in kleinere Abschnitte zu unterteilen, und so übersichtlicher zu gestalten. Routinen werden in Rapid in drei Typen eingeteilt. Prozeduren dienen der wiederkehrenden Ausführung von Instruktionen, ein Rückgabewert wird nicht erzeugt. Funktionen liefern als Ergebnis einen Rückgabewert, den sie aus übergebenen oder selbst eingelesenen Parametern erzeugen. Interrupt-Routinen dienen der Behandlung von Interruptsignalen, die beispielsweise durch

Ein-/Ausgabeereignisse oder Fehler erzeugt werden. Der prinzipielle Aufbau des Steuerungsprogramms für den Wickelroboter ist in Bild 103 dargestellt.

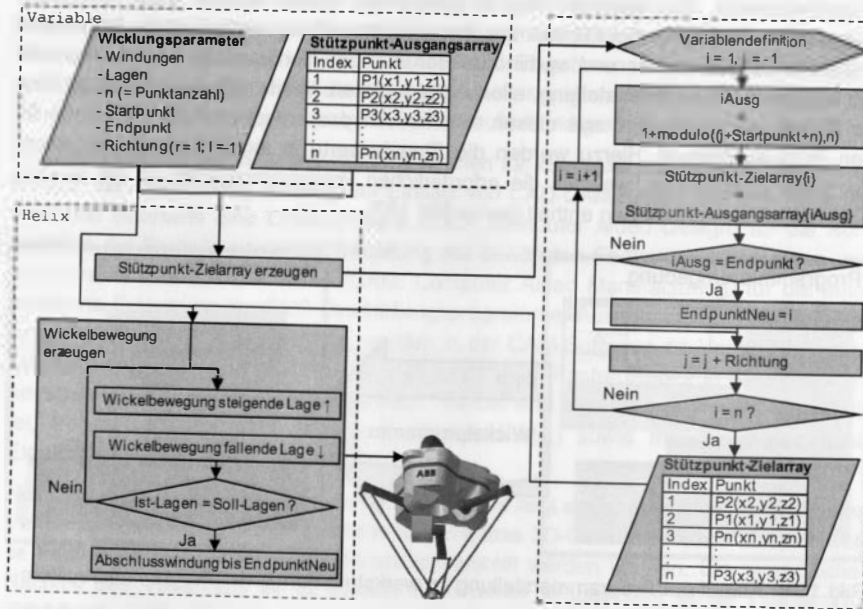


Bild 103: Aufbau des Steuerungsprogramms für die Erzeugung der Wickelbewegungen

Die zur Ausführung der Wickelbewegungen erforderlichen Abläufe sind in der Prozedur „Helix“ umgesetzt. Im ersten Abschnitt der Funktion wird in Abhängigkeit der Wicklungsparameter Richtung, Startpunkt und Endpunkt aus den im Stützpunkt-Ausgangsarray abgespeicherten Flugbahn-Stützpunkten das Stützpunkt-Zielarray für die Wickelbewegung erzeugt. Der hierfür erstellte Algorithmus (siehe Bild 103 rechts) füllt schrittweise das Stützpunkt-Zielarray mit den entsprechenden Stützpunkten des Stützpunkt-Ausgangsarrays. Hierzu wird mit der Modulo-Funktion in Abhängigkeit des Startpunkts, der Laufvariablen  $j$  sowie der Punktanzahl  $n$ , der zum neuen Punkt (Index = Laufvariable  $i$ ) gehörende Index  $iAusg$  des zu übertragenden Punktes berechnet und dieser in das Stützpunkt-Zielarray kopiert. Neben der Übertragung der Stützpunkte, ist es für den Abschluss der Wickelbewegung zusätzlich erforderlich, dass der Index des Wicklungs-Endpunkts im Stützpunkt-Zielarray bekannt ist. Hierfür wird, sobald  $iAusg$  dem Endpunkt-Index entspricht, der Variablen „EndpunktNeu“ der Wert von  $i$  zugewiesen. Auf Grundlage des Stützpunkt-Zielarrays erfolgt im Weiteren die Erzeugung der Verfahrbefehle für den Wickelprozess.

Der Programmcode für die Erzeugung der Wickelbewegung besteht aus mehreren ineinander geschachtelten Schleifenstrukturen. Im ersten Schritt erfolgt die Überprüfung der Anzahl der gewickelten Lagen. Ist diese kleiner als die Sollanzahl wird im nächsten

Schritt anhand eines Richtungsflags bestimmt in welche z-Richtung die Wickelbewegung auszuführen ist. Für den Wert 0 wird in positive, für 1 in negative z-Richtung gewickelt. In der nachfolgenden Schleife wird geprüft, ob die Anzahl der bereits gewickelten Windungen kleiner ist als die Soll-Windungszahl pro Lage. Ist diese noch nicht erreicht, erzeugt eine weitere Schleifenstruktur die Bewegungsbefehle für eine einzelne Windung. Hierzu werden schrittweise die Punkte des Zielpositionsarrays mit dem RAPID-Befehl MoveL für lineare Roboter-Verfahrbewegungen angefahren, wobei der Versatz in z-Richtung eines Punktes in Abhängigkeit der bereits gewickelten Windungen und des Index des jeweiligen Stützpunktes berechnet wird. Nach Erreichen der geforderten Windungszahl einer Lage wird das Richtungsflag invertiert, so dass im nächsten Durchlauf der Hauptschleife eine Lage in entgegengesetzte z-Richtung gewickelt wird. Dieser Vorgang wiederholt sich bis die geforderte Anzahl an Lagen erstellt wurde. Zum Abschluss des Wickelvorgangs wird mit einer weiteren Schleife der Drahtführer bis zum gewünschten Endpunkt der Wicklung verfahren.

### 7.3 CAD-Werkzeug zur automatisierten Modellierung von Wicklungen

Durch den Aufbau von durchgängigen CAD-CAM Ketten im Bereich der spanenden Fertigung konnte in den letzten Jahren der Programmieraufwand wesentlich reduziert und so die Produktivität entscheidend gesteigert werden. Insbesondere die Erstellung von Programmen für die Fertigung komplexer Werkstücke, wie beispielsweise Spritzgusswerkzeuge mit Freiformflächen, wird durch die Unterstützung mit CAD-CAM-Werkzeugen erheblich vereinfacht. Auch im Bereich der Wickeltechnik ist eine Zunahme an komplexen Wicklungsformen erkennbar, da Spulen in ihrer geometrischen Form in zunehmendem Maße an die Produktform angepasst werden oder neue Motorenkonzepte spezifische Spulenformen bedingen. Jedoch haben sich kommerziell erhältliche Softwaresysteme für deren Konstruktion sowie für die anschließende Ableitung der zur Fertigung erforderlichen Daten aus den CAD-Modellen als ungeeignet erwiesen.

Ziel der beiden folgenden Abschnitte ist daher der Aufbau einer durchgehenden CAD-CAM-Kette für die Programmierung des Versuchssystems. Den Ausgangspunkt der CAD-CAM-Kette bildet die Modellierung des Spulenkörpers und der Wicklung. Hierbei ist die exakte Konstruktion der Produktgeometrie die entscheidende Voraussetzung für eine genaue Programmierung des Wickelsystems. Hierzu wird im nachfolgenden Abschnitt der Aufbau eines CAD-Werkzeugs beschrieben, das eine automatische Erzeugung von Wicklungen ausgehend von der Querschnittsform des Spulenkörpers und den Spulenparametern ermöglicht. Die Realisierung des CAD-Werkzeugs erfolgt im Konstruktionssystem CATIA der Firma Dassault Systèmes.

#### 7.3.1 Bestehende Werkzeuge zur Modellierung von Wicklungen

Die derzeit am Markt verfügbaren 3D-CAD-Systeme bieten nur eingeschränkte Unterstützung bei der Modellierung von Wicklungen. So können die in CAD-Softwarepaketen wie Pro/Engineer der Firma PTC oder CATIA der Firma Dassault Systèmes integrierten Funktionen zur Konstruktion von Federn lediglich zur Modellierung von Spulen mit einer

Lage genutzt werden. Die zur Modellierung einer Feder erforderlichen Schritte werden nachfolgend am Beispiel von CATIA erläutert.

Zur Modellierung einer Schraubenfeder wird der Querschnitt des Federdrahts entlang einer räumlichen Schraubenlinie, auch Helix genannt, extrudiert (siehe Bild 104) [60]. Die Konstruktion der Schraubenlinie erfolgt in CATIA in der Funktionsumgebung „Drahtmodell- und Flächenkonstruktion“. Im ersten Konstruktionsschritt wird die Lage der Schraubenlinie im Raum durch die Konstruktion des Startpunktes sowie der Mittelachse festgelegt. Der Abstand Achse-Startpunkt bestimmt hierbei den Durchmesser der Feder. Für die Definition der Schraubenlinie wird die Funktion Helix genutzt. Neben der Auswahl von Startpunkt und Mittelachse werden die Parameter Steigung, Umdrehungen (= Windungen), Höhe, Ausrichtung (= Drehsinn) sowie Anfangswinkel abgefragt. Im Weiteren erfolgt in der Funktionsumgebung „Teilekonstruktion“ die Modellierung des Schraubenkörpers. Hierzu wird am Startpunkt in einer zur Schraubenlinie senkrechten Ebene der Drahtquerschnitt als Kreis skizziert. Abschließend wird mit der Funktion Rippe durch Definieren der Schraubenlinie als Zentralkurve und des Querschnittskreis als Profil die Feder erzeugt. [45]

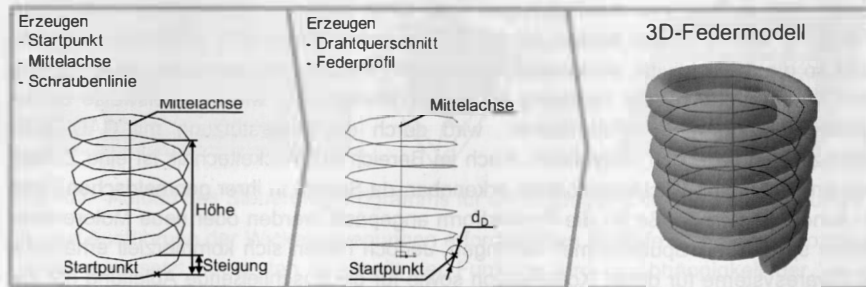


Bild 104: Ablauf der Modellierung einer Schraubenfeder in CATIA

Um auf Grundlage dieser Vorgehensweise das Modell einer mehrlagigen Spule zu erstellen, müssen zunächst die einzelnen Lagen der Spule sowie die Übergangsstücke zwischen den Lagen modelliert und anschließend zu einer Baugruppe montiert werden. Aufgrund ihrer Komplexität und des damit verbundenen hohen Zeitaufwands muss diese Art der Modellierung als begrenzt praxistauglich eingestuft werden. Die Vorgehensweise begrenzt die Produktivität einer CAD-CAM-Kette entscheidend und verhindert eine effiziente Modellierung von Spulen. Durch die Beschränkung auf Spulen mit einem kreisförmigen Querschnitt, genügt sie darüber hinaus nicht den gewachsenen Ansprüchen an die Gestaltung von Wicklungen.

### 7.3.2 Konzept für die Wicklungsmodellierung in CATIA

Ziel der Entwicklung des im Folgenden beschriebenen CAD-Werkzeugs ist es, eine schnelle, aufwandsarme sowie unkomplizierte Modellierung von Spulen innerhalb eines bestehenden CAD-System zu ermöglichen. Ausgehend von der Konstruktion des

Spulenkörpers und der Eingabe der Spulenparameter (Anzahl der Lagen, Windungszahl, Drahtdurchmesser etc.) in eine Parametermaske, soll das Modell der Wicklung automatisch erzeugt werden. Hierbei soll das Werkzeug, ausgehend von der Querschnittsform des Spulenkörpers, selbständig die Wicklungsgeometrie generieren. Hierzu ist es erforderlich, dass das Werkzeug in einem ersten Schritt den Querschnitt des Spulenkörpers analysiert und entsprechend des Drahtdurchmessers eine Schraubenlinie für eine einzelne Windung erzeugt. Dieser Vorgang ist anschließend bis zum Erreichen der Windungszahl einer Lage zu wiederholen, wobei der Startpunkt einer Windung jeweils um die Steigung der Wicklung zu verschieben ist. Ist die Schraubenlinie einer Lage vollständig erzeugt, kann der durch den Durchmesser des Drahtes definierte Drahtquerschnitt an dieser entlang extrudiert werden.

Um den Wechsel zwischen den einzelnen Lagen zu modellieren, ist die Erzeugung von Übergangswindungen erforderlich. Eine Übergangswindung verbindet den Endpunkt der letzten Windung einer Lage mit dem Startpunkt der ersten Windung der folgenden Lage. Als zusätzliche Funktion soll neben der Modellierung von Wicklungen die Ableitung der für die Programmierung des roboterbasierten Wickelsystems erforderlichen Daten automatisiert erfolgen. Dies soll automatisiert auf Basis der eingegebenen Wicklungsdaten sowie dem CAD-Modell der Wicklung erfolgen.

### Eingesetztes CAD-System

Die Entwicklung des CAD-Werkzeugs zur Wicklungsmodellierung erfolgt im CAD-System CATIA der Firma Dassault Systèmes in der Version V5 Release R 18. Das Softwaresystem, dessen Name die Abkürzung für „Computer Aided Three-dimensional Interactive Application“ ist, beinhaltet Module zur digitalen Produktkonstruktion (CAD), -simulation (CAE) und Fertigungsplanung (CAM). Durch den integrativen Ansatz von CATIA entfallen die oft zahlreichen Schnittstellen zwischen den verschiedenen rechnergestützten Werkzeugen der Produktentwicklung. Daten können unproblematisch zwischen den einzelnen Programmmodulen ausgetauscht werden. Die für den Aufbau des CAD-Werkzeugs erforderlichen CATIA-Module sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Modulname	Funktion	Dateityp
Part Design	Konstruktion von Bauteilen	*.CATPart
Assembly Design	Montage von Bauteilen zu Baugruppen	*.CATProduct
Wireframe and Surface	Erzeugung von Drahtmodell- und Flächengeometrien	*.CATPart

Tabelle 18: Übersicht der im CAD-Werkzeug eingesetzten CATIA Programmmodule

Für die Erstellung eigener Module oder Plug-Ins verfügt CATIA über die Programmierschnittstelle CAA V5 (= Component Application Architecture V5). Mit dieser können Algorithmen zur Steuerung von Konstruktionsabläufen auf Basis von Makros oder



selbsterstellte Benutzeroberflächen in CATIA integriert werden. Die Programmierung der Makros kann in CATScript (= funktionsreduziertes VBScript), CATVBS (= vollständiges VBScript) und CATVBA, zur Einbindung von Menüs, erfolgen. [158]

### 7.3.3 Programmtechnische Umsetzung

Die Modellierung der Wicklung erfolgt ausgehend von einem vorhandenen Modell eines Spulenkörpers (siehe Bild 105). Im ersten Schritt des Modellierungsablaufs werden die den Spulenkörpergrund definierenden Flächen vom Benutzer angewählt. Nach der Eingabe des Drahtdurchmessers wird aus den angewählten Flächen eine um den halben Drahtdurchmesser verschobene Versatzfläche erzeugt. Im Weiteren wird durch das Verschneiden dieser Versatzfläche mit einer zur Rotationsachse des Spulenkörpers senkrechten und durch den unteren Flansch des Spulenkörpers vertikal festgelegten Ebene eine Schnittlinie generiert. Diese legt die Querschnittsform der zu erzeugenden Wicklung fest. Um die ebene Schnittlinie in eine Schraubenlinie zu überführen, werden auf dieser, ausgehend vom ausgewählten Startpunkt, 100 Stützpunkte in der Richtung des festgelegten Wickelsinns äquidistant verteilt. Anschließend werden die einzelnen Stützpunkte in z-Richtung verschoben, wobei sich der Betrag der jeweiligen Verschiebung aus dem Index des Punktes, der dessen Position auf der Schnittlinie wiedergibt, und dem Drahtdurchmesser gemäß nachfolgender Gleichung ergibt:

$$z(P[n]) = \frac{n}{100} \cdot d_D \quad (7.1)$$

mit z-Koordinate	$z$	in mm
Stützpunkt	$P$	in -
Index	$n$	in -

Da die Darstellung der Schnittlinie in der Ebene des unteren Spulenkörperflanschs erfolgt, wird jeder Punkt der ersten Windung zusätzlich zu der mit Gleichung (7.1) berechneten Verschiebung um den halben Drahtdurchmesser in positiver z-Richtung verschoben. Mit der Funktion „Spline“ wird anschließend die Schraubenlinie durch die generierten Stützpunkte automatisch erzeugt. Basierend auf dem eingegebenen Drahtdurchmesser erfolgt im Weiteren die Erstellung des Wicklungsquerschnitts der abschließend mit der Funktion Rippe entlang der Schraubenlinie extrudiert wird. Der hiermit abgeschlossene Vorgang der Erzeugung einer Windung muss zur Modellierung der ersten Lage entsprechend der Windungszahl pro Lage  $N_{W, Soll}$  wiederholt werden. Dies wird durch ein entsprechendes Verschieben der Stützpunkte und wiederholtes Durchlaufen der Funktionen zur Windungserzeugung erreicht. Für die Erstellung der weiteren Lagen ist es erforderlich, entsprechend der jeweiligen Lagenzahl  $W$  eine neue Versatzfläche zu erzeugen, wobei sich der Abstand aus folgender Gleichung ergibt:

$$\Delta VF = \frac{1}{2} d_D + d_D \cdot (W - 1) \quad (7.2)$$

mit Abstand der Versatzfläche	$\Delta VF$	in mm
-------------------------------	-------------	-------

Der beschriebene Ablauf zur Erzeugung der einzelnen Lagen wird bis zum Erreichen der Ziellagenzahl wiederholt, wobei bei den geraden Lagenzahlen die Windungserzeugung vom oberen Spulenkörperflansch aus mit invertierten Vorzeichen in der Steigung durchgeführt wird.

Die Verbindung der einzelnen Lagen an den Umkehrpunkten ist mit Übergangswindungen realisiert, deren Erstellung ebenfalls automatisiert erfolgt. Die Schraubenlinie einer Übergangswindung verläuft nicht wie bei den einzelnen Windungen dreidimensional sondern hat die Form einer zweidimensionalen Spirale, die in einer zu den Flanschen parallelen Ebene liegt. Den Startpunkt der Spirale bildet der Endpunkt der Lage  $n_L$ , der Endpunkt ist festgelegt durch den Startpunkt der Lage  $W+1$ . Die Berechnung der Stützpunkte die die Leitlinie festlegen, erfolgt auf Basis der Stützpunkte der beiden zu verbindenden Lagen. Für jeden Stützpunkt wird durch die nachfolgenden beschriebene Koordinatentransformation eine, seinem Abstand zum Startpunkt der Übergangswindung entsprechende, Verschiebung berechnet. Hierzu werden die Richtungskomponenten des Vektors zwischen dem Punkt  $P[n]$  in der Lage  $W$  und dem entsprechenden Punkt  $P[n]$  in der Lage  $W+1$  mit dem Verhältnis aus  $n/\text{Gesamtpunktzahl}$  (im realisierten Programm 100 Punkte) multipliziert und zu den Richtungskomponenten des Punktes  $P[n]$  in der Lage  $W$  addiert. Die z-Komponente beträgt für alle Punkte am unteren Flansch den halben Drahtdurchmesser und am oberen Flansch dessen z-Koordinate minus dem halben Drahtdurchmesser.

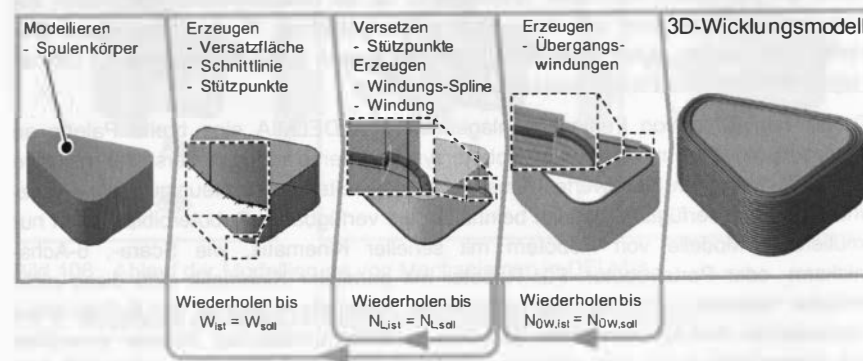


Bild 105: Ablauf der automatischen 3D-CAD-Wicklungsmodellierung

Aufbauend auf den eingegebenen Daten sowie mit Hilfe des CAD-Modells der Wicklung können die zur Simulation der Roboterbewegungen sowie für die Erstellung eines Roboterprogramms benötigten Daten abgeleitet werden. Als Grundlage dient wiederum das in Abschnitt 7.2 beschriebene Rumpfprogramm, das als Eingangsparameter die Stützpunkte der Roboterflugbahn sowie die Spulenparameter (Lagenanzahl, Steigung, Drehsinn etc.) benötigt. Die erforderlichen Spulenparameter werden direkt aus den eingegebenen Werten übernommen. Für die Erzeugung der Stützpunkte der Roboterflugbahn ist eine weitere Versatzfläche des Spulenkörpergrunds erforderlich. Diese wird



in ausreichend großem, kollisions sicherem Abstand zu den Flanschen erzeugt und mit der Ebene durch den unteren Flansch verschnitten. Auf der sich hieraus ergebenden Schnittlinie werden entsprechend dem oben beschriebenen Ablauf äquidistant Stützpunkte verteilt und in einem weiteren Schritt auf die für eine ausreichend genaue Wiedergabe der Kontur der Schnittlinie erforderliche Punkteanzahl reduziert. Somit stehen auf Grundlage der modellierten Wicklung alle Daten zur Verfügung, die im Weiteren für die Programmierung des Roboters oder die Simulation des Programmablaufs in einer Kinematiksimulation erforderlich sind.

#### 7.4 Kinematische Simulation des Wickelroboters

Für den Aufbau einer durchgängigen CAD-CAM-Kette ist die reale Fertigungsumgebung mit Hilfe eines geeigneten Simulationsprogramms in ein virtuelles Modell zu übertragen. Hierzu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die 3D-Simulationssoftware DELMIA V5 der Firma Dassault Systèmes eingesetzt, welche im Kern auf dem CAD-System CATIA beruht. Hierdurch ist ein problemloser Datenaustausch mit dem entwickelten CAD-Werkzeug zur Wicklungsmodellierung sichergestellt. Die Abkürzung DELMIA steht für „Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application“ und beschreibt ein Softwarepaket, das im Sinne einer rechnergestützten Fabrikplanung unter anderem die Bereiche Planung, Visualisierung, Simulation und Absicherung von Produktionskonzepten, Fertigungszellenlayouts oder Produktionsprozessen abdeckt. Neben der Simulation manueller Arbeitsplätze ist der Hauptanwendungsbereich die Planung und Auslegung automatisierter robotergestützter Fertigungsanlagen. Der Planer wird hierbei durch integrierte Werkzeuge wie Kollisionserkennung, Offline-Programmierung oder Prozesszeitanalyse unterstützt.

Für die Simulation von Fertigungsanlagen steht in DELMIA eine breite Palette an Simulationsmodellen marktüblicher Robotersysteme verschiedener Hersteller inklusive deren kinematischen Kennwerte (Achsgeschwindigkeiten, -beschleunigungen, Grenzwinkel etc.) zur Verfügung. Jedoch beinhalten die verfügbaren Roboterbibliotheken nur simulierbare Modelle von Robotern mit serieller Kinematik, wie Scara-, 6-Achs-Knickarm- oder Portalroboter. Für Roboter mit paralleler Kinematik sind diese nicht verfügbar, weshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Ansatz für den Aufbau eines kinematischen Simulationsmodells für einen parallelkinematischen Roboter entwickelt wird. Dieser erlaubt es das aufgebaute Wickelsystem auf Basis des ABB IRB 340 FlexPickers in DELMIA zu modellieren, zu simulieren und Fertigungsabläufe zu optimieren.<sup>6</sup>

##### 7.4.1 Modellierung von Mechanismen in der Simulationsumgebung

Die Modellierung kinematisch simulierbarer Mechanismen erfolgt üblicherweise in drei Schritten. Den ersten Schritt bildet die Modellierung der einzelnen Komponenten des

<sup>6</sup> Bei der Entwicklung des Simulationsmodells wurde der Verfasser von Herrn cand. ing. Alexander Partheymüller unterstützt.

Mechanismus. Liegen diese nicht schon als Modelle aus der mechanischen Konstruktion vor, können diese mit den integrierten CAD-Werkzeugen erstellt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Montage, das sogenannte Assembly, der einzelnen Komponenten zum Mechanismus. Hierbei ist es zweckmäßig die zusammenhängenden Komponenten eines Bauteils vorab zu einer Unterbaugruppe zusammenzufassen und den Zusammenbau des Mechanismus mit diesen Unterbaugruppen durchzuführen. In dem in Bild 106 dargestellten Beispiel wird zunächst der Oberarm, bestehend aus einem Rohrstück und zwei Endhülsen vormontiert und anschließend in den Gesamtzusammenbau eingefügt. Im dritten Schritt der Mechanismuserstellung erfolgt die Definition der einzelnen Mechanismen im Modell, die sogenannte Kinematisierung. Dies erfolgt in DELMIA im Programmmodul „Device Building“ mit der Funktion „New Mechanism“. Die Definition eines Mechanismus erfordert zum einen die Zuweisung eines Gelenktyps (Drehgelenk, Zylindergelenk, Schubgelenk etc.) und zum anderen die Verknüpfung mit der entsprechenden Verbindung in der Baugruppe. Abschließend ist für die korrekte Ausführung des Mechanismus die im Raum feststehende Komponente mit der Funktion „Fixed Part“ festzulegen. Nach erfolgreicher Kinematisierung des Modells, können die einzelnen Gelenke des Mechanismus mit der Funktion „Jog Mechanism“ getestet werden.

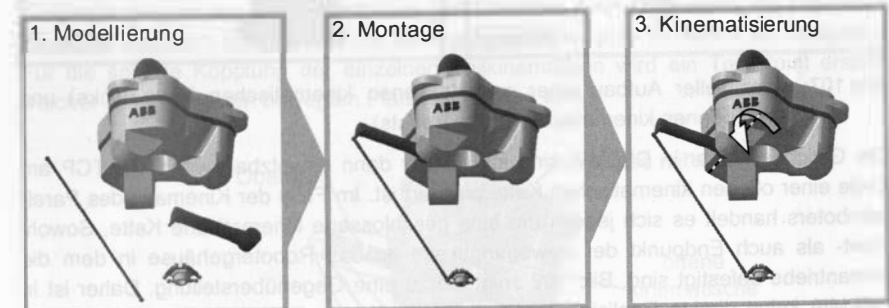


Bild 106: Ablauf der Modellierung von Mechanismen in DELMIA

##### 7.4.2 Probleme der Modellierung parallelkinematischer Roboter

Das Simulationspaket DELMIA bietet zum Aufbau und zur Simulation von Fertigungsanlagen einen umfangreichen Katalog mit vordefinierten Robotermodellen. Diese können über das Programmmodul „Device Task Definition“ oder „Workcell Sequencing“ aus dem Katalogbrowser in die Simulationsumgebung geladen werden. Neben zahlreichen Robotern mit serieller Kinematik ist auch ein Modell des in der Wickelzelle eingesetzten IRB 340 FlexPicker (im folgenden Parallelroboter genannt) vorhanden. Dieses kann jedoch nur als statisches, nicht simulierbares Modell in Fertigungszellen eingebunden werden. Der Versuch, eine Bewegungssimulation mit dem Modell durchzuführen wird von DELMIA nicht unterstützt, die einzelnen Armgelenke können nicht manipuliert werden.

Die Ursache für diesen Sachverhalt liegt darin, dass in DELMIA Mechanismen nur dann als simulierbare Ressource angelegt werden können, wenn sie als inverse Kinematik mit der Funktion „Inverse Kinematics“ definierbar sind. Diese Funktion bestimmt mit integrierten mathematischen Gleichungslösern aus der Struktur der Kinematik die jeweiligen Bewegungsgleichungen. Mit diesen können, am Beispiel eines Industrieroboters beschrieben, die einzelnen Gelenkwinkel zwischen den Armelementen der Roboterkinematik aus der Position und Orientierung, der sogenannten Pose, des Tool Center Points (kurz TCP) am Endeffektor berechnet werden.



Bild 107: Prinzipieller Aufbau einer geschlossenen kinematischen Kette (links) und einer offenen kinematischen Kette (rechts)

Die Gleichungslöser in DELMIA sind jedoch nur dann einsetzbar, wenn der TCP am Ende einer offenen kinematischen Kette platziert ist. Im Falle der Kinematik des Parallelroboters handelt es sich jedoch um eine geschlossene kinematische Kette. Sowohl Start- als auch Endpunkt der Bewegungskette ist das Robotergehäuse in dem die Armantriebe befestigt sind. Bild 107 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung. Daher ist in DELMIA keine direkte Realisierung parallelkinematischer Roboter mit der integrierten Funktion „Inverse Kinematics“ möglich. Um dennoch eine Simulation der Wickelzelle zu ermöglichen, wird im Folgenden ein alternativer Ansatz zur Kinematisierung aufgezeigt und am Beispiel eines vereinfachten Robotermodells umgesetzt.

#### 7.4.3 Konzept für die kinematische Simulation parallelkinematischer Roboter

Grundvoraussetzung für die Durchführung zeitabhängiger Simulationen von Robotern, wie beispielsweise die Bestimmung des Zeitbedarfs für das Abfahren eines Fahrwegs, ist, dass der zu untersuchende Roboter als Ressource mit inverser Kinematik verfügbar ist. Hierfür muss das Modell des Roboters jedoch als offene kinematische Kette vorliegen. Die Struktur der betrachteten Parallelkinematik bildet jedoch eine geschlossene kinematische Kette weshalb die vorhandenen Gleichungslöser ungeeignet für die Bestimmung der Bewegungsgleichungen sind. Daher verfolgt der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und nachfolgend beschriebene Ansatz den Weg, die

kinematische Struktur des Parallelroboters in einzelne simulierbare serielle Kinematiken aufzuteilen und diese durch geeignete Randbedingungen in ein der realen Kinematik entsprechendes Gesamtmodell zu überführen.

Den ersten Schritt des Aufbaus des kinematischen Modells bildet die Modellierung der seriellen Teilkinematik, die in Bild 108 dargestellt ist. Sie besteht aus dem oberen ortsfesten Gehäuse in dem die Antriebe montiert sind, dem Oberarm der über ein Drehgelenk mit einem Antrieb verbunden ist, dem linken Unterarm mit jeweils einem Kugelgelenk an den Enden sowie der unteren bewegten Platte. In der Teilkinematik wird nur einer der Unterarme modelliert, da sich bei Montage beider Unterarme eine weitere parallele Kinematik ergibt, die zu Problemen bei der Kinematisierung führen würde. Den Startpunkt der offenen kinematischen Kette bildet die ortsfeste Platte und den Endpunkt die bewegte Platte. Für den Aufbau, werden ausgehend von der ortsfesten Platte die einzelnen Elemente eines Armes montiert. Das Einhalten dieser Reihenfolge ist entscheidend für die korrekte Ausführung der Gleichungslöser der Funktion „Inverse Kinematics“ und somit für den Einsatz des Modells. Durch das Aktivieren der Funktion „abhängiger Winkel“ bei der Verbindung zwischen Oberarm und Antrieb wird erreicht, dass diese Verbindung in der späteren Simulation von außen angesprochen und manipuliert werden kann. Im Weiteren wird der TCP an die bewegte Platte der Kinematik gesetzt und die Grundstellung des Gelenkes Antrieb-Oberarm, die sogenannte „Home Position“, auf  $0^\circ$  sowie die Bewegungsgrenzen auf  $-100^\circ$  bis  $+90^\circ$  festgelegt. Für die spätere Kopplung der einzelnen Teilkinematiken wird ein Tool-Point erstellt, welcher mit der unteren bewegten Platte verbunden wird.

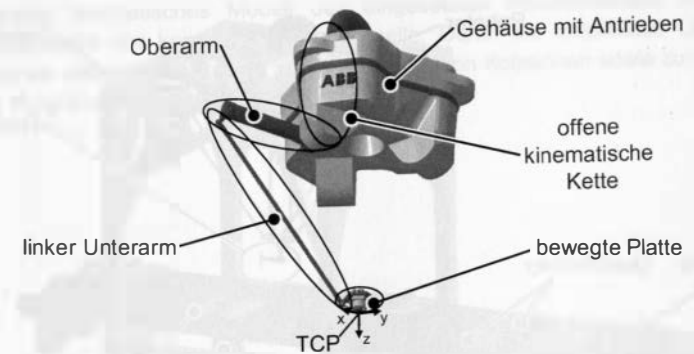


Bild 108: Teilkinematik des Parallelroboters mit offener kinematischer Kette

Das Überführen der montierten Teilkinematik in eine simulierbare Ressource erfolgt nun mit der Funktion „Inverse Kinematics“. Im zugehörigen Eingabefenster werden die Elemente Start- und Endkörper sowie das TCP-Koordinatensystem durch Anwählen der entsprechenden Elemente am Modell festgelegt (ortsfeste Platte, bewegte Platte, Tool-Point) und der Berechnungslauf zur Bestimmung der Kinematik gestartet. Der erfolgreiche Abschluss des Berechnungsvorgangs wird durch das Ändern des Symbols der Teilkinematik von Produkt zu Ressource im Modellbaum angezeigt. Nach derselben

Vorgehensweise wird im Weiteren eine zweite Teilkinematik mit dem rechten Unterarm aufgebaut und in eine simulierbare Kinematik überführt.

Der Aufbau des Gesamtmodells des Parallelroboters erfolgt im Programmmodul „Workcell Sequencing“ in dem dreimal die Teilkinematik mit linkem Unterarm und dreimal die Teilkinematik mit rechtem Unterarm eingefügt werden. Für die korrekte Ausrichtung der einzelnen Arme zueinander, wird ein Paar der Teilkinematiken um 120° und ein weiteres um 240° bezüglich der z-Achse rotiert. Zwar überlagern sich die oberen ortsfesten Platten und unteren bewegten Platten nun korrekt, jedoch sind die TCP der einzelnen Arme nicht einheitlich orientiert. Dies wird dadurch erreicht, dass mit der Funktion „Tag Transformation“ die Tool-Points der einzelnen Arme bezüglich des Weltkoordinatensystems symmetrisch ausgerichtet werden. Da die TCP über die Definition in der inversen Kinematik mit den entsprechenden Tool-Points verknüpft sind, überträgt sich die Umorientierung automatisch.

Da jeder Arm des aufgebauten Modells einen eigenständigen Roboter darstellt, muss für eine fehlerfreie Simulation sichergestellt sein, dass diese die einzelnen Wegpunkte einer Bewegungsbahn zueinander synchron anfahren. Eine Bewegungsbahn setzt sich zusammen aus den einzelnen Wegpunkten, die in DELMIA in Form von „Tasks“ zusammengefasst werden. Um einen synchronen Bewegungsablauf zu erreichen, wird im ersten Schritt jedem Arm des Robotermodells derselbe Bewegungs-Task zugewiesen. Anschließend werden die Arme durch die Funktion „Multi Resource Simulation“ im Programmmodul „Workcell Sequencing“ miteinander verknüpft, wodurch ein synchrones Starten der einzelnen Robotertasks erreicht wird.

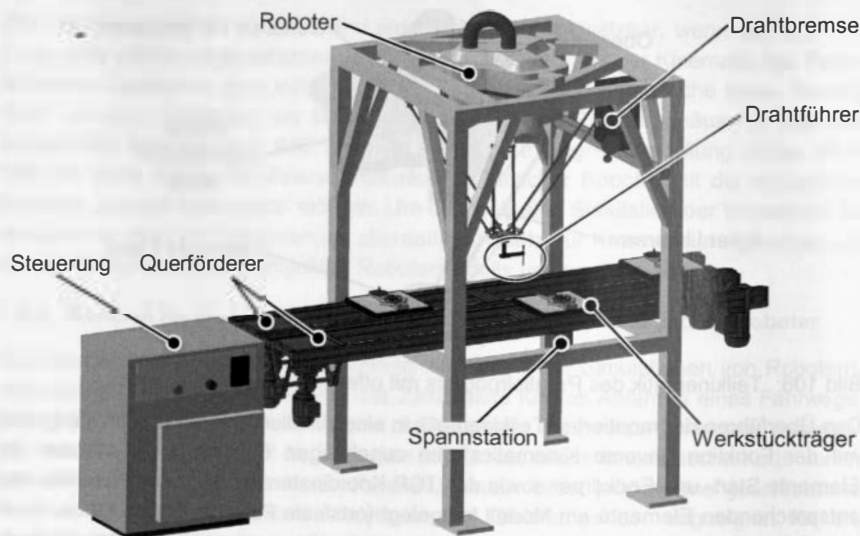


Bild 109: Simulationsmodell der Wickel-Versuchszelle mit Parallelroboter

Bild 109 zeigt die komplett modellierte Versuchszelle mit Parallelroboter, Doppelgurtbandförderern, Querförderern und Werkstückträger. Für eine realitätsnahe Simulation des Fertigungsablaufs sind der Querförderer und der Werkstückträger ebenfalls als simulierbare Ressource modelliert. Für die virtuelle Steuerung des Roboters ist eine Ablaufprozedur integriert, die entsprechend des in Abschnitt 7.2 beschriebenen Steuerungsprogramms die Stützpunkte für die Wickelbewegung erzeugt. Hierdurch ist es mit dem aufgebauten Simulationsmodell möglich, zum einen die mit dem CAD-Werkzeug generierten Daten (Abschnitt 7.3) als auch die mit dem werkstatorientierten Programmierwerkzeug (Abschnitt 7.2) erstellten Programme zu simulieren und vor der Übertragung auf die reale Versuchszelle auf Fehler oder Kollisionen zu überprüfen.

### Zusammenfassung

Mit den in dem vorangegangenen Kapitel beschriebenen rechnergestützten Werkzeugen für die Programmierung des Versuchssystems wird eine aufwandsarme und effiziente Erstellung von Steuerungsprogrammen ermöglicht. So wurde zum einen eine Programmierumgebung in Anlehnung an die werkstatorientierte Programmierung im Bereich der spanenden Fertigung aufgebaut. Diese führt den Benutzer anhand von Eingabemasken durch die Programmerstellung und erzeugt aus den eingegebenen Parametern automatisch ein lauffähiges Roboterprogramm. Basis der Programmerstellung ist ein Rumpfprogramm, welches die Schleifenstrukturen für die Generierung der Wickelbewegungen enthält. Zum anderen wurden die für den Aufbau einer durchgängigen CAD-CAM-Kette erforderlichen Software-Komponenten entwickelt. Neben einem CAD-Werkzeug für die automatische Modellierung von Wicklungen sind dies ein simulierbares kinematisches Modell des eingesetzten Parallelroboters sowie das Simulationsmodell der kompletten Versuchszelle. Durch die aufgebaute CAD-CAM-Kette wird ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung von Kollisionen sowie zur Reduzierung der Programmierzeiten geleistet.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung und der Einsatz innovativer und leistungsfähiger Fertigungsprozesse und –konzepte für die Produktion wickeltechnischer Produkte, sind entscheidende Voraussetzungen für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit in einem zunehmend globalisierten Marktumfeld. Übergreifendes Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, durch die Konzeption und Entwicklung flexibler Automatisierungslösungen für die Spulenfertigung sowie deren Umsetzung und Qualifizierung im Rahmen von prototypischen Versuchssystemen, einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung von wickeltechnischen Fertigungsprozessen zu leisten.

Eine wesentliche Herausforderung im Bereich der Wickeltechnik sind die kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Qualität von Wickelprodukten. Sowohl bei den elektrischen Eigenschaften, als auch bei den geometrischen Abmessungen sind immer engere Toleranzen einzuhalten. Dies ist mit herkömmlich gefertigten, sog. „wildgewickelten“ Spulen nur begrenzt möglich. Mit „lagegenauen“ Wicklungen kann hingegen deutlich höheren Qualitätsansprüchen Genüge geleistet werden. Jedoch sind die Anforderungen an die Gestaltung des Wickelprozesses im Vergleich zur Fertigung wildgewickelter Spulen wesentlich komplexer, wie die im Rahmen der Arbeit durchgeführte systematische Betrachtung der prozessrelevanten Problemfelder gezeigt hat. Als entscheidender Prozessparameter wurde der Nachlaufwinkel identifiziert, der für die Erzielung eines lagegenauen Wicklungsaufbaus innerhalb eines vom Drahtdurchmesser und Spulenkörperdurchmesser abhängigen Toleranzfensters gehalten werden muss. Da eine Analyse und Bewertung des Stands der Technik auf dem Gebiet der Fertigung lagegenauer Wicklungen ein Defizit an geeigneten Technologien aufgezeigt hat, wurde auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse ein Konzept für einen prozessintegrierten Regelkreis zur automatisierten Fertigung lagegenauer Wicklungen entworfen sowie die für die Umsetzung des Regelkreiskonzepts in ein Prototypensystem erforderlichen Schritte abgeleitet.

Grundvoraussetzung für den Aufbau eines Nachlaufwinkel-Regelkreises ist die prozessbegleitende Erfassung des Nachlaufwinkels mittels geeigneter Sensorik. Hierzu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit drei alternative Sensorsysteme entwickelt, prototypisch realisiert und getestet. Bei zwei der realisierten Systeme erfolgt eine direkte Erfassung des Nachlaufwinkels, zum einen mittels Bilderkennung, zum anderen mit einem Zeilensensor. Der dritte Prototyp misst mit einem Laser-Profilscanner die Oberfläche der Wicklung und bestimmt aus dem Profil die einzelnen Windungspositionen. Aus der Position der aktuellen Windung und der Drahtführerposition kann so der Nachlaufwinkel abgeleitet werden. Darüber hinaus ermöglichen die gespeicherten Positionen der einzelnen Windungen die Generierung eines 3D-Modells der gefertigten Spule, wodurch sich neue Möglichkeiten zur Qualitätssicherung im Bereich der Wickeltechnik ergeben.

Aufbauend auf den Ergebnissen des dritten Kapitels und unter Einbeziehung der im vierten Kapitel realisierten Nachlaufwinkel-Sensorsysteme, wurde im Weiteren ein



flexibles Fertigungssystem zur automatisierten Fertigung lagegenauer Wicklungen exemplarisch aufgebaut, bei dem durch eine prozessbegleitende Regelung der Drahtführer-Nachlaufwinkel innerhalb der zulässigen Toleranzen gehalten wird. Hierzu wird durch den implementierten Regelkreis die Verfahrensgeschwindigkeit der Verlegeachse entsprechend der Regeldifferenz zwischen Ist- und Soll-Nachlaufwinkel angepasst und so ein störungsfreier Wicklungsaufbau sichergestellt. Zur Erreichung der erforderlichen Dynamik und Präzision in der Drahtverlegung wurde eine hochdynamische Verlegeachse mit linearem Direktantrieb entwickelt. Hierdurch war eine entscheidende Verbesserung der Positionierungsicherheit im Vergleich zu bestehenden Achssystemen möglich. Nach dem Aufbau und der softwaretechnischen Realisierung des Nachlaufwinkel-Regelkreises konnten in den durchgeführten Wickelversuchen durchweg positive Ergebnisse erzielt sowie die Funktionsfähigkeit des aufgebauten Systems nachgewiesen werden. Die Kennwerte der gefertigten Versuchsspulen bestätigten insgesamt die Erwartungen hinsichtlich der Einhaltung enger elektrischer Toleranzen aufgrund des lagegenauen Wicklungsaufbaus. So liegen die Abweichungen für die Induktivität sowie für den Kupferwiderstand bei allen Versuchsspulen unter 1% des jeweiligen Mittelwerts, wobei mechanische Füllfaktoren in einem Bereich von 81% bis 86% erreicht werden.

Ein weiterer wesentlicher Arbeitsinhalt war die Entwicklung und Realisierung eines robotergestützten Wickelsystems auf Basis eines parallelkinematischen Industrieroboters, das gegenüber den kostenintensiven maschinenbaulichen Sonderlösungen der Wickeltechnik zahlreiche Vorteile bietet. Neben der Bestimmung der technologischen Kennwerte des Versuchssystems (Prozessgeschwindigkeit, Steifigkeit, Eigenfrequenzen) erfolgte im sechsten Kapitel der Nachweis der Funktionsfähigkeit des aufgebauten Systems sowie die Überprüfung der prinzipiellen Eignung des verwendeten Roboters für die Fertigung von Wickelprodukten anhand eines Stators für einen elektronisch kommutierten Gleichstrommotors.

Ausgehend von einer Betrachtung der in der industriellen Fertigung verbreiteten Programmierverfahren, erfolgte im siebten Kapitel die Entwicklung zweier alternativer rechnergestützter Werkzeuge für die Programmierung des Versuchssystems. Einerseits wurde eine Softwareumgebung in Anlehnung an die werkstatororientierte Programmierung im Bereich der spanenden Fertigung realisiert. Ausgehend von den mittels Eingabemasken erfassten Parametern erzeugt die Software auf Basis eines Steuerungsprogramm-Templates, welches die Schleifenstrukturen für die Generierung der Wickelbewegungen enthält, automatisch ein lauffähiges Roboterprogramm. Darüber hinaus wurden die für den Aufbau einer durchgängigen CAD-CAM-Kette erforderlichen Software-Komponenten entwickelt und zusammengeführt. Den Ausgangspunkt der Kette bildet die Modellierung der Wicklung in CATIA, die durch das im Rahmen der Arbeit entwickelte CAD-Werkzeug wesentlich vereinfacht wird. Auf Grundlage des Modells der Wicklung erfolgt anschließend die Ableitung der zur Fertigung der Wicklung erforderlichen Stützpunkte. Im Weiteren wird mit dem entwickelten Ansatz zur kinematischen Simulation parallelkinematischer Roboter in DELMIA sowie dem aufgebauten virtuellen Modell des Versuchssystems eine offline Planung des Wickelvorgangs ermöglicht. Durch die CAD-CAM-Kette wird ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung von Kollisio-

nen sowie zur Reduzierung des Programmieraufwandes geleistet und der Programmiervorgang insgesamt vereinfacht. Da zur Programmerstellung keine vertieften Kenntnisse in der Roboterprogrammierung erforderlich sind, wird mit den rechnergestützten Programmierwerkzeugen insgesamt ein effizienter Einsatz des robotergestützten Versuchssystems sichergestellt.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der wickeltechnischen Produktion leisten einen wichtigen Beitrag zur Beherrschung der stetig steigenden Qualitäts- und Kostenanforderungen an Wickelprodukte. Zum einen ist es mit dem realisierten Nachlaufwinkel-geregelten Wickelsystem gelungen, die Fertigung lagegenauer Wicklungen flexibel zu automatisieren, wodurch dem steigenden Bedarf an leistungsoptimierten Wickelprodukten begegnet werden kann. Zum anderen konnte mit den Untersuchungen zum Einsatz eines parallelkinematischen Industrieroboters für das Wickeln, ein alternativer Lösungsansatz für die automatisierte Fertigung komplexer Wickelprodukte aufgezeigt werden, der eine Verkürzung konventioneller Prozessketten bei gleichzeitig geringen Investitionskosten ermöglicht.

Der Ausblick auf Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann in drei Themenfelder gegliedert werden. Das erste betrifft die Optimierung des Nachlaufwinkel-geregelten Wickelsystems. Hier gilt es zu untersuchen, wie die realisierbaren Wickelgeschwindigkeiten durch den Einsatz von zukünftig verfügbaren Rechnersystemen mit höheren Taktraten oder Sensoren mit verbesserter Auflösung und Bildrate gesteigert und so höhere Ausbringungsraten erreicht werden können. Des Weiteren sollten die entwickelten Ansätze zum lagegenauen Wickeln hinsichtlich der Verarbeitung von rechteckigen Spulenkörpern angepasst werden, um so das Einsatzspektrum auf diesen für den Elektromaschinenbau besonders wichtigen Spulentyp zu erweitern. Darüber hinaus stellt die Verbesserung des Verhaltens bei der Drahtverlegung an den Flanschen ein weiteres Optimierungsfeld dar. Ein möglicher Ansatzpunkt um hier ein Abrutschen der Drähte zu vermeiden, könnte in einer prozessbegleitenden Fixierung der Drähte, beispielsweise durch den Sprühauftrag von Kleber, liegen. Das zweite Themenfeld überspannt Arbeiten zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des robotergestützten Wickelsystems. Forschungsbedarf besteht hier hinsichtlich der Verarbeitung von größeren Drahtdurchmessern ( $d_D > 0,4$  mm) sowie der Verarbeitung von parallelen Drähten, um so eine direkte Bewicklung von Statoren für Elektromotoren zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund ergeben sich die Forschungsinhalte des dritten Themenfeldes, die dazu dienen sollen, die bestehende CAD-CAM-Kette zum Einsatz in Verbindung mit der Verarbeitung von Starkdraht zu befähigen. Hierzu ist die Entwicklung und Validierung eines Modells zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens des Drahts sowie dessen Integration in die Simulationsumgebung erforderlich, um den Einfluss der mit zunehmendem Drahtdurchmesser steigenden Prozesskräfte auf die Positionierung des Drahtführers und des Drahtes bereits bei der Programmerstellung zu berücksichtigen.



## 9 Summary

The development and the use of innovative and highly efficient manufacturing processes and concepts for the production of winding products are crucial preconditions for the preservation of competitiveness in an increasingly globalised market. Overall goal of this doctoral thesis was it therefore to make a decisive contribution to the optimisation of the production processes for coils by the design and development of flexible automation solutions as well as their implementation and validation in the basis of prototypical test systems.

The continuously increasing demands on the quality of winding products are a key challenge in the field of coil winding. Increasingly tighter tolerances of electrical characteristics and geometrical dimensions have to be fulfilled. This is limited with conventionally manufactured, so-called "random wound" coils. With "perfect layer" windings, significant higher quality requirements can be fulfilled. However, the requirements for the design of the winding process compared to the production of random-wound coils are much more complex, as shown by the systematic examination of the process-relevant issues in this thesis. Herein, the angle-of-lag has been identified as the decisive process parameter. In order to achieve a perfect layer winding, the angle-of-lag has to be kept within a tight tolerance window which depends on the wire- and the bobbin-diameter. As a state of the art analysis and evaluation in the field of perfect layer coil production has shown a lack of appropriate production technologies, a concept for a process-integrated closed loop control for the automated production of perfect layer windings was designed and the steps for the implementation into a prototype system were derived.

Basic requirement for the realisation of an angle-of-lag closed loop control is the inline measurement of the angle-of-lag by means of appropriate sensors. Within this thesis three alternative sensor systems have been developed, prototypically realised and tested. With two of the realised sensors the angle-of-lag is directly detected, on the one hand by means of image recognition, on the other hand with a CMOS-line sensor. The third prototype measures the surface of the winding with a laser profile scanner and determines the single winding positions from the profile. So the angle-of-lag can be derived from the position of the current winding and the wire guide position. Furthermore, the stored positions of the single windings allow the generation of a 3D model of the manufactured coil, resulting in new opportunities for quality assurance in the field of coil winding.

Building on the results of the third and fourth chapter, a flexible manufacturing system for the automated production of perfect layer coils was prototypically realised. It keeps the angle-of-lag within the allowed tolerances by a process-integrated closed loop control. For this purpose, the speed of the traverse axis is controlled according to the deviation between actual and nominal angle-of-lag and thus, by the implemented closed loop control, an error-free winding structure is achieved. A highly dynamic traverse axis with linear direct drive has been developed to accomplish the necessary dynamic

values and precision for the positioning of the wire. Hereby a decisive improvement of positioning uncertainty compared to existing axis-systems was possible. Within the tests of the realised prototypical winding system consistently positive results were achieved. The characteristics of the manufactured test coils confirmed the expectations regarding compliance with close electrical tolerances due to the perfect layer winding structure. The deviations for the inductance and resistance of all trial coils have been below 1% of the respective average and the reached mechanical filling factors range from 81% to 86%.

Further substantial work content of the thesis was the development and implementation of a robot-based winding system with a parallel kinematical industrial robot, which offers numerous advantages over the cost-intensive special-engineered solutions currently available for coil winding. In addition to determining the technological characteristics of the test system, the functional demonstration of the established system as well as the review of the fundamental suitability of the robot for the production of winding products on the basis of a stator for an electronically commutated direct drive was content of the sixth chapter.

On the basis of a review of the programming techniques used in industrial production, two alternative software tools for programming the robot winding system have been developed within the seventh chapter. On the one hand, a software environment based on the work-place-oriented programming in the area of metal-cutting production was realised. In addition, the components for the development of an integrated CAD-CAM chain have been realised. The modelling of the winding is the starting point of the chain. Based on the model of the winding, the base-points required for winding the coil are derived. In addition, offline planning of the winding process is made possible with the developed approach for the kinematic simulation of parallel kinematical robots in DELMIA and the implemented virtual model of the test system. The CAD-CAM chain contributes to the avoidance of collisions, reduction of the programming effort and the simplification of the programming process as a whole.

The results of the investigations and developments in the field of coil winding carried out within this doctoral thesis make an important contribution to control the increasing quality and cost requirements on winding products. On the one hand it was possible to flexibly automate the production of perfect layer coils with an angle-of-lag controlled winding system. On the other hand, with the investigations on the usage of a parallel kinematical industrial robot for coil winding an alternative solution for the automated production of complex winding products was demonstrated, which allows the shortening of conventional process chains and the reduction of investment costs at the same time.

## Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E.; et al.: *Dynamisches Verhalten von Industrierobotern - Schwingungseinfluss bei der robotergestützten spanenden Bearbeitung*. In: VDI-Z - Integrierte Produktion, Jahrgang 150, Heft 6 (2008), S. 27–30.
- [2] Abele, E.; Weigold, M.; Kulok, M.: *Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern - Statische und dynamische Analyse der vollseriellen Kinematik*. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95, Heft 9 (2005), S. 666–671.
- [3] Albach, M.: *Grundlagen der Elektrotechnik 1 - Erfahrungssätze, Bauelemente, Gleichstromschaltungen*. München: Pearson Education Deutschland, 2004.
- [4] Bauer, N.: *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung - Qualitätssicherung in der Praxis*. 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer-IRB Verlag, 2008.
- [5] Beuth, K.: *Bauelemente*. 18. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2006.
- [6] Bichler, M.: *Kupfer im Relais – ein heißes Eisen*. In: Elektronik Informationen, Jahrgang 40, Heft 5 (2008), S. 2-3.
- [7] Böge, A.: *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 19. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [8] Böhmer, E.; Ehrhardt, D.; Oberschelp, W.: *Elemente der angewandten Elektronik - Kompendium für Ausbildung und Beruf*. 15. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [9] Bork, B.; Gao, H.: *Linear-Direktantriebe in Werkzeugmaschinen*. In: Werkstatt und Betrieb, Jahrgang 131, Heft 7-8 (1998), S. 654–663.
- [10] Braasch, J.: *Genauigkeit von Vorschubachsen*. Firmenschrift, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, 2005.
- [11] Bronstein, I. N.; et al.: *Taschenbuch der Mathematik*. 7. Auflage. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2008.
- [12] Brunt, B. E.: *Coil Termination Technology - An Overview of the Various Methods Available*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2003, EMCWA, Cincinnati, Ohio, USA, 23.-25. September 2003.
- [13] Busch, R.: *Elektrotechnik und Elektronik - Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker*. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008.

- [14] Camardella, M.: *Coil Winding Automation – A Look at the Future*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2000, EMCWA, Cincinnati, USA. 31. Oktober – 2. November 2000.
- [15] Camardella, M.; Manning, T.: *Winding Perfect Layer Coils*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1989, EMCWA, Chicago, USA, 25.–28. September 1989.
- [16] Clausert, H.; et al.: *Grundgebiete der Elektrotechnik 1 - Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder*. 10. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2008.
- [17] Dobroschke, A.: *Innovative Ansätze zur Leistungssteigerung in der Wickeltechnik*. In Tagungsband: Auslegung und Betrieb flexibler Montagesysteme, VDI Wissenforum IWB GmbH, Fürth, 23.-24. Juli 2005.
- [18] Dobroschke, A.: *Innovative Wickeltechnologien für neue Motorenkonzepte*. In Tagungsband: Flexibel automatisierte Produktion und Montage elektrischer Antriebe, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 27. Oktober 2010.
- [19] Dobroschke, A.: *Wickeltechnik*. In: Landau, K. (Hrsg.): *Lexikon Arbeitsgestaltung*. Stuttgart: Genter Verlag, 2007.
- [20] Dobroschke, A.; Weller, W.: *Verfahren und Vorrichtung zum Erzeugen von Spulenwickeln*. Offenlegungsschrift DE 102007048254 A1, 2009.
- [21] Erhardt, A.: *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008.
- [22] Feldmann, K.: *Assembly Process - Handbook of Industrial Engineering*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [23] Feldmann, K.; Dobroschke, A.: *Closed-Loop Process for Perfect Layer Winding*. In Tagungsband: Inductica 2009, CWIEME Ltd., Berlin, 5.-7. Mai 2009.
- [24] Feldmann, K.; Dobroschke, A.: *Innovative Approaches for Optimising Tension Control*. In Tagungsband: Inductica 2004, CWIEME Ltd., Berlin, 15.-17. Juni 2004.
- [25] Feldmann, K.; Dobroschke, A.: *Roboterassistiertes Fertigungsverfahren für innovative Wickelprodukte*. In: wt Werkstattstechnik online, Heft H 9 (2008), S. 738–744.
- [26] Feldmann, K.; Dobroschke, A.: *RobWind - An Innovative Robot-Based Winding Method*. In Tagungsband: Inductica 2008, CWIEME Ltd., Berlin, 10.-12. Juni 2008.

- [27] Feldmann, K.; Dobroschke, A.: *Tension-Control With a Magnetorheologic-Actuator*. In Tagungsband: Inductica 2007, CWIEME Ltd., Berlin, 22.-24. Mai 2007.
- [28] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Alternative Assembly Concepts for Drive Systems and Components*. In: Mechanical Engineering in Bavaria, Heft 1 (2005), S. 8–14.
- [29] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Alternative Montagekonzepte für antriebstechnische Produkte*. In: Maschinenbau in Bayern, Heft 1 (2005), S. 8–14.
- [30] Feldmann, K.; Dobroschke, A.; Junker, S.: *Advanced Processes and Systems for the Automated Assembly of Magnetic Components for Electrical Machines*. In Tagungsband: 1st CIRP-International Seminar on Assembly Systems, CIRP, Stuttgart, 15.-17. November 2006.
- [31] Feldmann, K.; Wenger, U.: *Different Approaches for Tension Control*. In Tagungsband: Coil Winding, Insulation & Electrical Manufacturing Conference CWIEME 2001, CWIEME Ltd., Berlin, 26.-28. Juni 2001.
- [32] Feldmann, K.; Wenger, U.: *Optimization for Wire Tensioners*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2001, EMCWA, Cincinnati, USA, 16.–18. Oktober 2001.
- [33] Feldmann, K.; Wenger, U.: *Optimization of Tensioners for Winding Systems*. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. (Hrsg.): *Production Engineering, Annals of the German Academic Society for Production Engineering - Vol. VIII/2*. Berlin: WGP, 2001.
- [34] Feldmann, K.; Wenger, U.; Dobroschke, A.: *Robot-Based System for Complex Winding Structures*. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. (Hrsg.): *Production Engineering, Annals of the German Academic Society for Production Engineering - Vol. XII/2*. Berlin: WGP, 2004.
- [35] Franke, J.; Dobroschke, A.: *Automated Winding of Perfect-Layer-Coils With a Laser-Sensor Based Closed-Loop-Process*. Konferenz: CIRP January-Meeting 2010, CIRP, Paris, 21. Januar 2010.
- [36] Franke, J.; Dobroschke, A.: *Robot-Based Winding-Process for Flexible Coil Production*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2009, EMCWA, Nashville, USA, 30. September – 01. Oktober 2009.
- [37] Frindt, M.: *Modulbasierte Synthese von Parallelstrukturen für Maschinen in der Produktionstechnik*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2001.

- [38] Frohne, H.; Moeller, F.: *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*. 21. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [39] Georgi, W.; Metin, E.: *Einführung in LabVIEW*. München: Carl Hanser Verlag, 2009.
- [40] Gevatter, H. -J.; Grünhaupt, U.: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [41] Gißler, J.: *Elektrische Direktantriebe*. Firmenschrift, Parker Hannifin GmbH Electromechanical Automation Europe, Offenbach, 2004.
- [42] Groß, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.: *Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2006.
- [43] Grote, K. -H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- [44] Hahn, I.: *Skript - Berechnung und Auslegung elektrischer Maschinen*. Lehrstuhl für elektrische Antriebe und Maschinen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- [45] Hartmann, S.; Vajna, S.: *CATIA V5 - kurz und bündig - Grundlagen für Einsteiger*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [46] Haun, M.: *Handbuch Robotik - Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [47] Hellerich, W.; Harsch, G.; Haenle, S.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe - Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*. 9. Auflage. München, Wien: Hanser, 2004.
- [48] Hering, E.; Bressler, K.; Gutekunst, J.: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [49] Hesse, S.; Schnell, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion - Ausführung - Anwendung*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [50] Jahr, I.: *Lexikon der industriellen Bildverarbeitung*. Baunach: Spurbuchverlag, 2003.
- [51] Joachim Uhing KG GmbH+Co.: *Sensor steuert Verlegebreite*. In: Draht, Jahrgang 61, Heft 1 (2010), S. 14–15.

- [52] Kampker, A.; Burggräf, P.; Deutskens, C.: *Produktionsstrukturen für Komponenten künftiger Elektrofahrzeuge*. In: ATZproduktion, Jahrgang 3, Heft 2 (2010), S. 48–53.
- [53] Kawamurat, T.; et al.: *Study on High Precision Winding of Toroidal Coil and Automation of Its Process*. In Tagungsband: International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italien, 8.-12. Juli 2001.
- [54] Kern, T.: *Entwicklung haptischer Geräte*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [55] Kief, H.; Roschiwal, H. A.: *CNC-Handbuch 2009/2010*. München: Hanser Verlag, 2009.
- [56] Kiel, E.: *Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [57] King, D. C.: *Toroidal Coil Winding & Constructions Techniques*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2005, EMCWA, Indianapolis, USA, 23.-26. September 2005.
- [58] Kubo, I.: *Perfect Layer Coil Winding Method*. In: Electronic Parts and Materials, Jahrgang 7, Heft 9 (1970), S. 108–111.
- [59] Lämmermann, H.: *Verfahren und Vorrichtung zum Verlegen von langgestrecktem Wickelgut*. Offenlegungsschrift EP 1847498 A1, 2007.
- [60] List, R.; Sternberg, M.: *CATIA V5 - Grundkurs für Maschinenbauer - Bauteil- und Baugruppenkonstruktion, Zeichnungsableitung*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
- [61] Lunze, J.: *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [62] Manning, T. A.: *A Comparison between Flywinding and Rotating Spindle Methods of Winding Coils*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1997, EMCWA, Rosemont, USA, 22.-25. September 1997.
- [63] Manning, T. A.: *Tension control during the coil winding process*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2003, EMCWA, Cincinnati, USA, 23.-25. September 2003.
- [64] Manning, T. A.: *Special Problems Incurred when Manufacturing Coils with Fine Magnet Wire*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2005, EMCWA, Indianapolis, USA, 23.-26. September 2005.

- [65] Merz, M.: *PenTec - ein neues Parallelstruktur-Konzept*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2005.
- [66] Meyer, M.: *Signalverarbeitung - Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [67] Mirza, N. I.: *Toroidal coil winding machines making the best choice*. In Tagungsband: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference 1993, EMCWA, Chicago, USA, 4.-7. Oktober 1993.
- [68] Mirza, N. I.: *Principals of Toroidal Coil Winding*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1996, EMCWA, Rosemont, USA, 18.-21. September 1996.
- [69] Mütterlein, B.: *Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2007.
- [70] Nagel, T.: *Zahnriemengetriebe - Eigenschaften, Normung, Berechnung, Gestaltung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [71] Naundorf, U.: *Digitale Elektronik - Theoretische Grundlagen und Schaltungsanalysen*. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 2004.
- [72] Nerreter, W.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. 2. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, 2011.
- [73] Neugebauer, R.; et al.: *Parallelkinematische Maschinen - Entwurf, Konstruktion, Anwendung*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2006.
- [74] N. N.: *Abnahmeprotokoll Längenmessgerät*. Firmenschrift, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, 2008.
- [75] N. N.: *Accelnet Panel - Digital Servoamplifier for Brushless or Brush Motors*. Firmenschrift, Copley Controls Corporation, Cabton, USA, 2009.
- [76] N. N.: *Auswahl der geeigneten LabVIEW-Real-Time-Plattform*. National Instruments (Hrsg.): <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7754>, Zugriff am 23. April 2010.
- [77] N. N.: *Berührungslose Flanschabtastung FA*. Firmenschrift, Joachim Uhing KG GmbH+Co, Mielkendorf, 2008.
- [78] N. N.: *Betriebsanleitung scanCONTROL 2800/2810*. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, 2008.

- [79] N. N.: *Coil Winding Tensioners - Catalogue*. AL TIC (Hrsg.): <http://www.coil-winding-tensioners.com/catalogue.html>, Zugriff am 14. April 2010.
- [80] N. N.: *CME 2 User Guide*. Firmenschrift, Copley Controls Corporation, Cabton, USA, 2007.
- [81] N. N.: *Converting a Desktop PC to a LabVIEW Real-Time Target*. National Instruments (Hrsg.): <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2733>, Zugriff am 14. April 2010.
- [82] N. N.: *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. Firmenschrift, Stemmer Imaging GmbH, Puchheim, 2010.
- [83] N. N.: *Datenblatt Elektrolumineszenz*. DKN GmbH & Co. KG (Hrsg.): [http://www.el-folien.com/global/dbbin/elfolien\\_datenblatt.pdf](http://www.el-folien.com/global/dbbin/elfolien_datenblatt.pdf), Zugriff am 09. Juni 2010.
- [84] N. N.: *Field Oriented Control*. Firmenschrift, Copley Controls Corporation, Cabton, USA, 2009.
- [85] N. N.: *Herstellungsprozess Kupferlackdraht*. Elektrisola Dr. Gerd Schildbach GmbH&Co.KG (Hrsg.): <http://www.elektrisola.com/de/produkt/produktionsprozess.html>, Zugriff am 27. Mai 2010.
- [86] N. N.: *High Performance Linear Image Sensors - ELIS-1024 IMAGER*. Firmenschrift, Panavision Imaging LLC, Homer, USA, 2009.
- [87] N. N.: *Hohlpreisliste 505 - Wickeldrähte rund, Wickeldrähte flach - Stand Juli 2010*. Firmenschrift, Synflex Elektro GmbH, Blomberg, 2010.
- [88] N. N.: *Installing Tecnotion Ironless Linear Motors*. Firmenschrift, Tecnotion B.V., Almelo, Niederlande, 2007.
- [89] N. N.: *KMK-Autowickler - Selbsteinstellende optische Drahtverlegung nach neuem Sensorprinzip*. Firmenschrift, KMK - Getriebebau, Kiel, 2006.
- [90] N. N.: *Kupfer in der Elektrotechnik - Kabel und Leitungen*. Deutsches Kupfer-Institut e.V. Düsseldorf (Hrsg.). Datei: [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/pdf/kab.pdf](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/pdf/kab.pdf), Zugriff am 08. Oktober 2010.
- [91] N. N.: *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*. Firmenschrift, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, 2007.
- [92] N. N.: *LLT.DLL - Schnittstellendokumentation*. Firmenschrift, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, 2007.



- [93] N. N.: *LLT2800 Operating Manual Part B*. Firmenschrift, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, 2007.
- [94] N. N.: *MagLine - Magnetische Längen- und Winkelmesssysteme*. Firmenschrift, SIKO GmbH, Buchenbach, 2009.
- [95] N. N.: *Magnetsensor MSK1000*. Firmenschrift, SIKO GmbH, Buchenbach, 2009.
- [96] N. N.: *Metallnotierungen für Kabel 2011*. Kabelverband Online (Hrsg.): [http://www.kabelverband.org/delnotizen/Metallnotierung\\_2011.htm](http://www.kabelverband.org/delnotizen/Metallnotierung_2011.htm), Zugriff am 28. Februar 2011.
- [97] N. N.: *Nadelwickelmaschine NWS 6-122,5*. Aumann GmbH (Hrsg.): <http://www.aumann.com/147.html>, Zugriff am 11. Oktober 2010.
- [98] N. N.: *Nanokristallines Vitroperm - EMV-Produkte*. Vakuumschmelze GmbH & Co. KG (Hrsg.): [http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/docroot/medialib/documents/broschueren/kbbrosch/PKB\\_EMV\\_D.pdf](http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/docroot/medialib/documents/broschueren/kbbrosch/PKB_EMV_D.pdf), Zugriff am 31. Januar 2011.
- [99] N. N.: *Orthozyklisches Wickeln*. Ingenieurbüro für Elektro-Maschinenbau (Hrsg.): <http://www.emt-net.de/motorkomponenten/orthozyklisches-wickeln.html>, Zugriff am 12. April 2010.
- [100] N. N.: *Platform Notes - J-Link for Pro/ENGINEER Wildfire 3.0*. PTC (Hrsg.): [http://www.ptc.com/WCMS/files/34084/en/34084en\\_file1.pdf](http://www.ptc.com/WCMS/files/34084/en/34084en_file1.pdf), Zugriff am 09. Juni 2008.
- [101] N. N.: *Praxis der Antriebstechnik – Servotechnik*. Firmenschrift, SEW-Eurodrives, Bruchsal, 2006.
- [102] N. N.: *Pro/ENGINEER FAQ 2008 - J-Link*. PTC (Hrsg.): [http://www.proefaq.com/?page\\_id=130](http://www.proefaq.com/?page_id=130), Zugriff am 02. Juni 2008.
- [103] N. N.: *Rundspulen: Weisser Spulenkörper*. Weisser Spulenkörper GmbH & Co KG (Hrsg.): <http://www.weisser.de/de/produkte/spulenkoerper/rundspulen.html>, Zugriff am 21. Mai 2010.
- [104] N. N.: *Sensor-Abnahmeprotokoll Laser-Profilscanner*. Firmenschrift, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, 2006.
- [105] N. N.: *Spulen und Verpackungen*. Elektrisola Dr. Gerd Schildbach GmbH&Co KG (Hrsg.): <http://www.elektrisola.com/de/spulen-und-verpackungen/europa.html>, Zugriff am 21. Mai 2010.
- [106] N. N.: *Technologie 3D-MID - Räumliche elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Hanser Verlag, 2004.

- [107] N. N.: *Umsatz mit Drähten steigt, Marge sinkt wegen Rohstoff und Energiekosten*. ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (Hrsg.): [http://www.zvei.org/depresse/depressearchivarchiv\\_2006/depresdetailumsatz\\_mit\\_draehlen\\_steigt\\_marge\\_sinkt\\_wegen\\_rohstoff\\_und\\_energiekosten](http://www.zvei.org/depresse/depressearchivarchiv_2006/depresdetailumsatz_mit_draehlen_steigt_marge_sinkt_wegen_rohstoff_und_energiekosten), Zugriff am 09. Oktober 2010.
- [108] N. N.: *USB-Zeilenkameramodule*. Firmenschrift, Eureka Messtechnik GmbH, Köln, 2009.
- [109] N. N.: *Verbackungsmethoden*. Elektrisola Dr. Gerd Schildbach GmbH&Co.KG (Hrsg.): <http://www.elektrisola.com/de/backlackdraht/verbackungsmethoden.html>, Zugriff am 09. Oktober 2010.
- [110] N. N.: *Winding accessories*. Marsilli & Co. S.p.A. (Hrsg.): [http://www.marsilli.it/index.php?option=com\\_content&view=article&id=46&Itemid=99&lang=de](http://www.marsilli.it/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=99&lang=de), Zugriff am 16. April 2010.
- [111] N. N.: *Zubehör für die Wickeltechnik*. IWT GmbH (Hrsg.): <http://www.iwt-gmbh.de/de/index.php/content/view/58/74/>, Zugriff am 15. April 2010.
- [112] N. N.: *Zubehör - Wickeltechnik*. RUFF GmbH (Hrsg.): [http://ruff-worldwide.de/prodotti/Linear%20Winding/Accessories/accessories\\_eng.pdf](http://ruff-worldwide.de/prodotti/Linear%20Winding/Accessories/accessories_eng.pdf), Zugriff am 14. April 2010.
- [113] N. N.: *Zulässige Drahtzugkraft für Wickeldrähte - Synflex Elektro GmbH* (Hrsg.): <http://www.synflex.de/de/support/berechnungstabellen/cul-zugkraft.html>, Zugriff am 12. Juli 2011.
- [114] N. N.: *ZVEI Mitgliederversammlung 2007 - Bericht*. Firmenschrift, ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (Hrsg.), Frankfurt am Main, 2007.
- [115] N. N.: *ZVEI Mitgliederversammlung 2010 - Bericht*. Firmenschrift, ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (Hrsg.), Frankfurt am Main, Juni 2010.
- [116] Norm DIN 16901: *Kunststoff-Formteile; Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße*. Stand: November 1982.
- [117] Norm DIN 55350-13: *Wiederholpräzision*. Stand: Juli 1987.
- [118] Norm DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Stand: September 2003.
- [119] Norm DIN 8593-5: *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Stand: September 2003.

- [120] Norm DIN EN 60317-0-1: *Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten - Teil 0-1: Allgemeine Anforderungen - Runddrähte aus Kupfer, lackisoliert*. Stand: Februar 2009.
- [121] Norm IEC 60034-1 ed12.0: *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. Stand: Februar 2010.
- [122] Norm IEC 60264: *Packaging of winding wires*. Stand: Januar 1968.
- [123] Norm IEC 61605 ed2.0: *Fixed inductors for use in electronic and telecommunication equipment*. Stand: Juni 2005.
- [124] Norm ISO 230-2: *Werkzeugmaschinen - Prüfregelein für Werkzeugmaschinen - Teil 2: Bestimmung der Positioniergenauigkeit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen*. Stand: März 2006.
- [125] Patterson, P.; Capindale, D.: *Flexible Manufacturing for the Assembly of Small Electric DC Motors*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1997, EMCWA, Rosemont, USA, 22.-25. September 1997.
- [126] Pedrotti, F.; et al.: *Optik für Ingenieure*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [127] Perneder, R.: *Handbuch Zahnriementchnik - Grundlagen, Berechnung, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [128] Ponce-Cruz, P.; Ramirez-Figueroa, F.: *Intelligent Control Systems with LabVIEW*. London, Dordrecht, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2010.
- [129] Poprawe, R.: *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [130] Rosemann, B.; Freiburger, S.; Landenberger, D.: *CAD/CAM mit Pro/Engineer - Einstieg in die NC-Programmierung*. München: Hanser Verlag, 2005.
- [131] Sanchez, R. O.; Sumanadasa, P. M.: *Perfect Layer Winding of Selonoids*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 2004, EMCWA, Indianapolis, USA, 20.-22. September 2004.
- [132] Schlien, U.: *Schaltnetzteile und ihre Peripherie - Dimensionierung, Einsatz, EMV*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [133] Schneider, R.; et al.: *Verfahren und Einrichtung zum Aufwickeln von strangförmigen Wickelgut auf eine Spule*. Offenlegungsschrift DE 19726285 A1, 1998.

- [134] Schuh, G.: *Fabrikplanung in Zeiten der Globalisierung*. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95, Heft 4 (2005), S. 174 ff.
- [135] Schulz, D.: *Handbuch Elektrotechnik - Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. 5., korrigierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [136] Spickermann, D.: *Passive elektronische Bauelemente*. Weil der Stadt: J. Schlemmbach Fachverlag, 2001.
- [137] Stiny, L.: *Handbuch passiver elektronischer Bauelemente - Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung*. Poing: Franzis Verlag, 2007.
- [138] Süße, R.; et al.: *Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik 2*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [139] Taneda, Y.; et al.: *Perfect Layer Coil Winding Apparatus*. Offenlegungsschrift US 4244539, 1981.
- [140] Vajna, S.; et al.: *CAX für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [141] van Brussel, H.; van den Braembussche, P.: *Robust Control of Feed Drives with Linear Motors*. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Jahrgang 47, Heft 1 (1998), S. 325-328.
- [142] van den Berg, T. A.: *Manufacturing Flat Coil Configurations for Stepper Motors*. In Tagungsband: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, EMCWA, Rosemont, USA, 18.-21. September 1995.
- [143] Voss, G.; Hefti, K.: *Importance and Methods of Tension Control*. In Tagungsband: Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference 1997, EMCWA, Rosemont, USA, 22.-25. September 1997.
- [144] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [145] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 3 - Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [146] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.

- [147] Weichert, N.; Wülker, M.: *Messtechnik und Messdatenerfassung*. München: Oldenbourg Verlag, 2000.
- [148] Weigold, M.: *Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [149] Weigold, M.; Stein, S.: *Trendbericht - Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern*. In: Werkstatt und Betrieb, Jahrgang 139, Heft 5 (2006), S. 34-42.
- [150] Weissgerber, W.: *Elektrotechnik für Ingenieure 1 - Gleichstromtechnik und Elektromagnetisches Feld*. 8. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [151] Wenger, U.: *Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2004.
- [152] Wicki, S.: *Berechnung der Spulen*. N. N. (Hrsg.): [http://www.elektromaschinenbauer.de/index.php?option=com\\_rubberdoc&view=doc&id=87&format=raw](http://www.elektromaschinenbauer.de/index.php?option=com_rubberdoc&view=doc&id=87&format=raw), Zugriff am 21. Januar 2011.
- [153] Wolf, K.-U.: *Verbesserte Prozessführung und Prozessplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [154] Wörn, H.; Brinkschulte, U.: *Echtzeitsysteme - Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [155] Wuppermann, C.-D.; Schoppa, A.: *Merkblatt 401 - Elektroband und -blech*. Firmenschrift, Stahl-Informationszentrum (Hrsg.), Düsseldorf, 2005.
- [156] Zach, F.: *Leistungselektronik*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, Wien: Springer Verlag, 2010.
- [157] Zeller, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [158] Ziethen, D.: *CATIA V5 - Makroprogrammierung mit Visual Basic Script*. 2. Auflage. München: Hanser Verlag, 2006.
- [159] Zimmer, D.; et al.: *Direktantriebe passend ausgewählt - Elektromagnetische Direktantriebe im Vergleich*. In: Antriebstechnik, Jahrgang 44, Heft 2 (2005), S. 2-6.
- [160] Zschunke, F.: *Aktoren auf der Basis des magnetorheologischen Effekts*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.

# 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: Delfe 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 Matrize**  
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 Ehmamn  
**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: Maitin 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 Blagewinkelmessung 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 Blechblegetelle**  
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 spritzgeossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregulierung 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 Hopperdletzel  
**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 Fertigungszeilen 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**  
144 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwasser  
**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 Spulnwickeln**  
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



ISSN 1431-6226  
ISBN 978-3-87525-317-7