

# Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

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

**Klaus-Uwe Wolf**

**67**

**Verbesserte Prozeßführung und  
Prozeßplanung zur Leistungs-  
und Qualitätssteigerung beim  
Spulenwickeln**





405 6-5 of 104  
79766  
Verbesserte Prozessführung und Prozessplanung  
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung  
beim Spulenwickeln

Der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erhangung des Grades



**G 97**

**-153**

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

Dipl.-Ing. Klaus-Uwe Wolf  
Tag der Einreichung: 04.02.1997  
Tag der Promotion: 28.05.1997  
Dekan: Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm



## **Vorwort**

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

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für den Freiraum zur Durchführung dieser Arbeit, sowie für die großzügige und vertrauensvolle Förderung.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. H. Meerkamm, Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik bedanke ich mich für die wohlwollende Übernahme des Korreferats.

Herrn Professor Dr.-Ing. W. Glauert danke ich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank Herrn apl. Professor Dr.-Ing. habil. W. Bär für die sehr gute Unterstützung und die Betreuung zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten am Lehrstuhl für Regelungstechnik.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen des Lehrstuhls, vor allem bei denen aus der Gruppe Handhabungs- und Montagetechnik, sowie allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung die Arbeit in dieser Form ermöglicht haben. Ohne dabei den Beitrag anderer zu schmälern, möchte ich besonders Herrn Dipl.-Ing. J. Bräutigam, Herrn Dipl.-Ing. T. Holler, Herrn Dipl.-Ing. M. Koch, Herrn Dipl.-Ing. M. Raab, Herrn Dipl.-Ing. U. Wenger, Herrn Dipl.-Ing. U. Werner und Herrn Dipl.-Ing. B. Zimmer erwähnen.

Nicht zuletzt und besonders herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich immer nach besten Kräften in meiner Arbeit bestärkt und unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Sieglinde, die mich stets bestärkte und ihr fortwährendes, großes Verständnis wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Klaus-Uwe Wolf



# Vorwort

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

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für den Freiraum zur Durchführung dieser Arbeit, sowie für die großzügige und vertrauensvolle Förderung.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. H. Meerkamm, Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik, bedanke ich mich für die wohlwollende Übernahme des Konzepts.

Herrn Professor Dr.-Ing. W. Glauert danke ich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank Herrn apl. Professor Dr.-Ing. habil. W. Bär für die sehr gute Unterstützung und die Betreuung zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten am Lehrstuhl für Regelungstechnik.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen des Lehrstuhls, vor allem bei denen aus der Gruppe Handhabungs- und Montagetechnik, sowie allen Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern, die durch ihre Unterstützung die Arbeit in dieser Form ermöglicht haben. Ohne dabei den Betrag anberaten zu sein, möchte ich besonders Herrn Dipl.-Ing. J. Bräutigam, Herrn Dipl.-Ing. T. Heller, Herrn Dipl.-Ing. M. Koch, Herrn Dipl.-Ing. M. Raab, Herrn Dipl.-Ing. U. Wenger, Herrn Dipl.-Ing. U. Werner und Herrn Dipl.-Ing. B. Zimmer erwähnen.

Nicht zuletzt und besonders herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich immer nach besten Kräften in meiner Arbeit bestärkt und unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau, die mich stets bestärkte und ihr fortwährendes, großes Verständnis und Gedulden dieser Arbeit beigetragen hat.

Klaus-Uwe Woll

Tag der Einreichung:

04.02.1997

Tag der Promotion:

26.05.1997

Ort:

Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm



# Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Maschinen und Systemkomponenten für das Wickeln von Spulen ...</b>	<b>4</b>
2.1	Überblick über die unterschiedlichen Wickelverfahren .....	5
2.2	Rotationswickeln .....	8
2.2.1	Allgemeiner Aufbau und maschinenbauliche Defizite beim Rotationswickeln mit drehendem Wicklungsformkörper .....	10
2.2.2	Steuerungstechnischer Aufbau und Programmierung von Wickelsystemen .....	17
<b>3</b>	<b>Mathematische Beschreibung und Modellierung von Wickelvorgängen</b>	<b>20</b>
3.1	Geometrische und elektrische Größen einer Spule .....	20
3.2	Mathematische Modellierung des Wickelprozesses .....	28
3.2.1	Die statisch eingestellte Drahtzugkraft und ihre Auswirkung auf Draht und Spulenkörper .....	28
3.2.2	Modellierung des Drahtverlaufes unter Berücksichtigung der relevanten Prozeßeinflußparameter .....	42
3.2.3	Die Entstehung von Drahtschwingungen durch Eigen- und Fremderregung .....	51
<b>4</b>	<b>Experimentelle Bestimmung der Prozeßabhängigkeiten beim Spulen- wickeln .....</b>	<b>61</b>
4.1	Meßsysteme und Analysetools zur Ermittlung der beim Wickeln auftretenden Prozeßgrößen .....	61
4.2	Der Einfluß der Wickelprozeßparameter auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften einer Spule .....	68



4.3	Untersuchung des Gleitmittelauftrages im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit des Lackdrahtes .....	77
4.4	Detektion von Drahtschwingungen hervorgerufen durch Eigen- und Fremderregung .....	81
5	<b>Ableitung von Regeln zur verbesserten Planung und Ausführung von Spulenwickelvorgängen .....</b>	<b>84</b>
5.1	Maßnahmen zur Reduzierung der Drahtzugkraftschwankungen ....	84
5.2	Möglichkeiten zur Reduzierung von Drahtschwingungen .....	85
5.3	Notwendige Prozeß- und Systemparameter zur Erzielung lagengenaue Wicklungsaufbauten .....	86
5.4	Maßnahmen zur Effizienzsteigerung an automatisierten Spulenwickelautomaten .....	89
6	<b>Maschinenbauliche Optimierung an Wickelsystemen .....</b>	<b>95</b>
6.1	Angetriebener Axialabzug zur verdrehungsfreien Verarbeitung kritischer Wickelgüter .....	95
6.2	Masseneinflußreduziertes Bremssystem zur Verbesserung des Drahtablaufverhaltens beim Bewickeln unrunder Wickelquerschnitte .....	100
6.3	Kombiniertes Anwickelwerkzeug mit Schneide- und Drahtfördereinrichtung zur Reduzierung von Nebenzeiten .....	106
7	<b>Systeme zur rechnergestützten Prozeßoptimierung und Prozeßführung .....</b>	<b>114</b>
7.1	Modul zur präzisen Voraussage der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Spulen .....	116
7.2	Programm zur Berechnung der optimalen Maschineneinstellparameter für orthozyklische Wicklungen .....	119
7.3	Softwaresystem zur Abschätzung und Reduzierung des Drahtschwingungsaufkommens .....	121
7.4	Integrierte Steuer- und Regelsysteme zum Wickeln auf definierten Ohmschen Widerstand beim Ein- und insbesondere beim Mehrfachwickeln .....	123
7.4.1	Ziele und Anforderungen .....	123
7.4.2	Gegenüberstellung verschiedener Konzepte .....	125
7.4.3	Funktionsweise des realisierten Prozeßregelkreises .....	128



<b>8</b>	<b>Durchgängige CAD-CAM-Verfahrenskette zur rechnergestützten off-line Programmierung von NC-Wickelautomaten .....</b>	<b>133</b>
8.1	Ziele der off-line Programmierung von Wickelautomaten .....	135
8.2	Voraussetzung einer durchgängigen CAD-CAM-Kopplung .....	136
8.2.1	Anforderungen an das CAD-System .....	136
8.2.2	Modellierung der Wickelumgebung .....	137
8.3	Realisierung des Konzeptes .....	141
8.3.1	Problemorientierte Spulenkörpergenerierung .....	143
8.3.2	Drahtspline- und Drahtführerverfahrwegerzeugung .....	145
8.3.3	Durchgängige Planung des gesamten Fertigungsablaufes ..	149
8.3.4	Vollständige Kollisionskontrolle und Simulation .....	151
8.3.5	Anpassung der NC-Programme an die jeweilige Maschinensteuerung .....	152
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>154</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>156</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>163</b>



8	Durchgänge CAD-CAM-Verfahrenskette zur rechnergestützten	133
8.1	Off-line Programmierung von NC-Wickelautomaten	135
8.2	Ziele der Off-line Programmierung von Wickelautomaten	136
8.3	Voraussetzung einer durchgängigen CAD-CAM-Kopplung	136
8.3.1	Anforderungen an das CAD-System	137
8.3.2	Modellierung der Wickelung	141
8.3.3	Realisierung des Koprozess	143
8.3.4	Problemorientierte Spulenkörpergenennung	145
8.3.5	Drahtline- und Drahtführungsverfahrenwegzeugung	149
8.3.6	Durchgänge Planung des gesamten Fertigungsablaufs	151
8.3.7	Vollständige Kollisionskontrolle und Simulation	151
8.3.8	Anpassung der NC-Programme an die jeweilige	152
8.3.9	Maschinensteuerung	154
9	Zusammenfassung und Ausblick	156
10	Literatur	159
11	Abkürzungen und Formelnzeichen	163
12	Ein- und Zweidraht-Schnellzug mit Schneid- und Drahtführer zur Reduzierung von Nebenzeiten	163
13	Systeme zur rechnergestützten Prozessoptimierung zur Erleichterung der Fertigung	163
13.1	Modell zur präzisen Voraussage der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Spulen	163
13.2	Programme zur Berechnung der optimalen Maschineneinstel- parameter für orthozyklische Wicklungen	163
13.3	Softwaresystem zur Abschätzung und Reduzierung des Zusammenbauaufwandes	163
13.4	Auswirkung Steuer- und Regelsysteme zum Wickeln auf den elektrischen Widerstand, die Ein- und Zweidrahtwicklung	163
13.5	Neue Anforderungen	163
13.6	Erweiterung der Fertigung	163
13.7	Erweiterung der Fertigung	163
13.8	Erweiterung der Fertigung	163



# 1 Einleitung

Das Fertigungsverfahren "Wickeln" ist das grundlegende Umformverfahren zur Erzeugung von Windungen und Wicklungen, die in elektrischen Geräten zur Nutzung des elektromagnetischen Prinzips eingesetzt werden.

Die Vielfalt elektrischer und elektronischer Geräte führte zu einem hohen Formenreichtum wickeltechnischer Anwendungen und damit verbunden zu unterschiedlichsten Verfahrensprinzipien bei der Herstellung von Wicklungen.

Dem Wickeln kann hinsichtlich der Einsatzbreite sowohl die Fertigung von Mikrosolen mit Runddrahtdurchmessern von 20  $\mu\text{m}$  und weniger als auch die Massivumformung von Flachkupferschienen mit mehreren  $\text{cm}^2$  Querschnittsfläche für Kraftwerksgeneratortwicklungen zugeordnet werden.

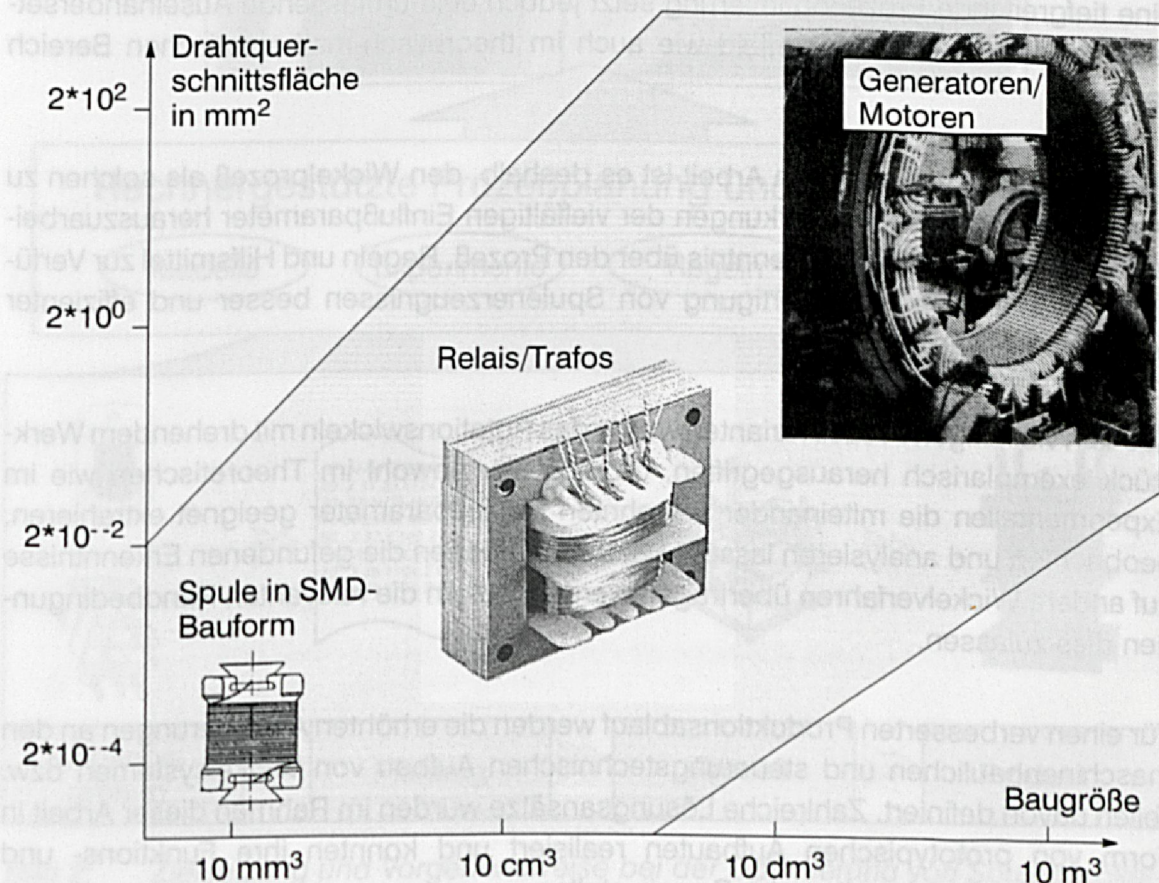


Bild 1: Typische Einsatzbeispiele wickeltechnischer Anwendungen

Um im Wettbewerb mit in- und ausländischen Betrieben konkurrieren zu können, werden an den Produktionsprozeß ständig steigende Anforderungen gestellt. Der Anspruch nach qualitativ hochwertigen Erzeugnissen steht bei schonender und effizienter Nutzung der Ressourcen bis hin zum wirtschaftlichen Einsatz des Menschen



in der Wertschöpfungskette an oberster Stelle, was zwangsläufig sichere und reproduzierbare Fertigungsprozesse erfordert.

Das gilt, wie in allen Bereichen des produktionstechnischen Umfeldes, auch für die Wickeltechnik. Doch stellt sich gerade hier bei der Prozeßoptimierung ein gewisses Defizit an wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen über die beteiligten Prozeßparameter und den gegenseitigen Wirkzusammenhängen dar.

Ein Grund ist die Tatsache, daß die Wickeltechnik sowohl von der Elektrotechnik als auch von der Fertigungstechnik tangiert wird, einem Fachgebiet alleine jedoch nicht zugeordnet werden kann, und die Anforderungen bei der Prozeßgestaltung im industriellen Umfeld meist durch personenspezifisches Fach- und Expertenwissen abgedeckt werden.

Eine tiefgreifende Prozeßoptimierung setzt jedoch eine umfassende Auseinandersetzung im experimentellen Umfeld wie auch im theoretisch-mathematischen Bereich voraus.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, den Wickelprozeß als solchen zu untersuchen, die Wechselwirkungen der vielfältigen Einflußparameter herauszuarbeiten und mit der erweiterten Kenntnis über den Prozeß, Regeln und Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, wie die Fertigung von Spulenerzeugnissen besser und effizienter vollzogen werden kann.

Aus den vielfältigen Prozeßvarianten wurde das Rotationswickeln mit drehendem Werkstück exemplarisch herausgegriffen, da sich hier sowohl im Theoretischen wie im Experimentellen die miteinander verzahnten Prozeßparameter geeignet extrahieren, beobachten und analysieren lassen. Bei Bedarf können die gefundenen Erkenntnisse auf andere Wickelverfahren übertragen werden, sofern die relevanten Randbedingungen dies zulassen.

Für einen verbesserten Produktionsablauf werden die erhöhten Anforderungen an den maschinenbaulichen und steuerungstechnischen Aufbau von Wickelsystemen bzw. Teilen davon definiert. Zahlreiche Lösungsansätze wurden im Rahmen dieser Arbeit in Form von prototypischen Aufbauten realisiert und konnten ihre Funktions- und Leistungsfähigkeit bereits unter Beweis stellen.

Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt stellt die Bereitstellung rechnerunterstützter Planungswerkzeuge für die Wickeltechnik dar. So wurden Systeme erarbeitet, die aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen des Wickelprozesses die optimalen Prozeß- und Maschineneinstellparameter ableiten und generieren, um möglichst wirtschaftlich qualitativ hochwertige Spulenerzeugnisse fertigen zu können.





### Rechnergestützte Prozeßplanung und Prozeßführung

Modelle

Experimente

Regeln

Strategien

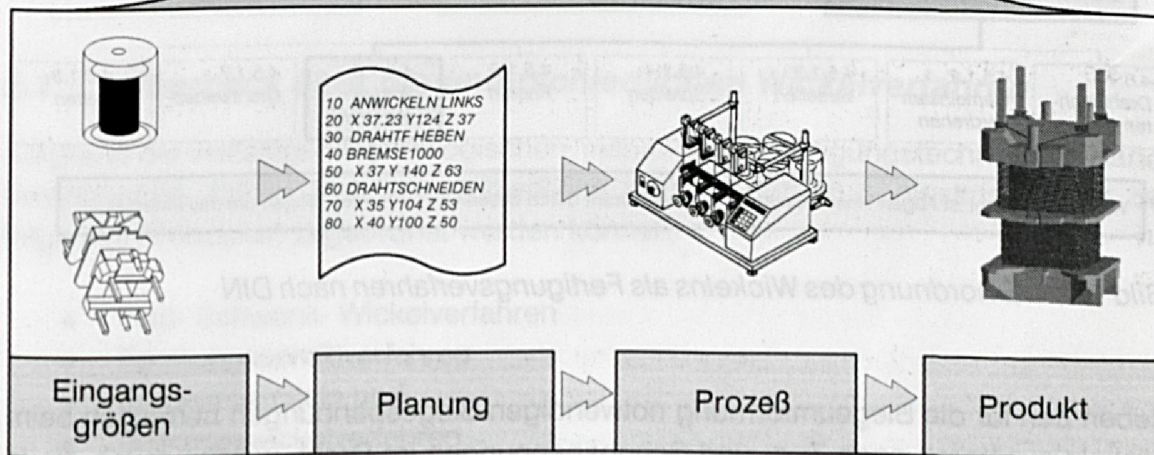


Bild 2: Zielsetzung und Vorgehensweise bei der Optimierung von Spulenwickelprozessen

Desweiteren wird eine durchgängige CAD-CAM-Kopplung für die Wickeltechnik vorgestellt, mit deren Hilfe der Wickelprozeß an CNC-Wickelautomaten interaktiv am CAD-System geplant wird. Hiermit kann eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Gesamtsysteme erreicht werden, da kostenintensive Maschinenstillstandszeiten durch on-line Programmierung mit der Gefahr des Maschinenbruchs vermieden werden.



## 2 Maschinen und Systemkomponenten für das Wickeln von Spulen

Das Wickeln von Spulen kann als Fertigungsverfahren in der DIN 8580 dem Biegeumformen zugeordnet werden und wird wie folgt definiert:

"Wickeln ist doppelt fortschreitendes Biegeumformen eines bandförmigen Werkstücks (Draht), was in einer umlaufenden Schablone (z.B. Spulenkörper) befestigt ist und durch ein Werkzeugteil (z.B. Röhrchendrahtführer) an diese angedrückt wird, wobei das Werkstück in mehreren Windungen spiral- oder schraubenförmig gekrümmt wird." /1/

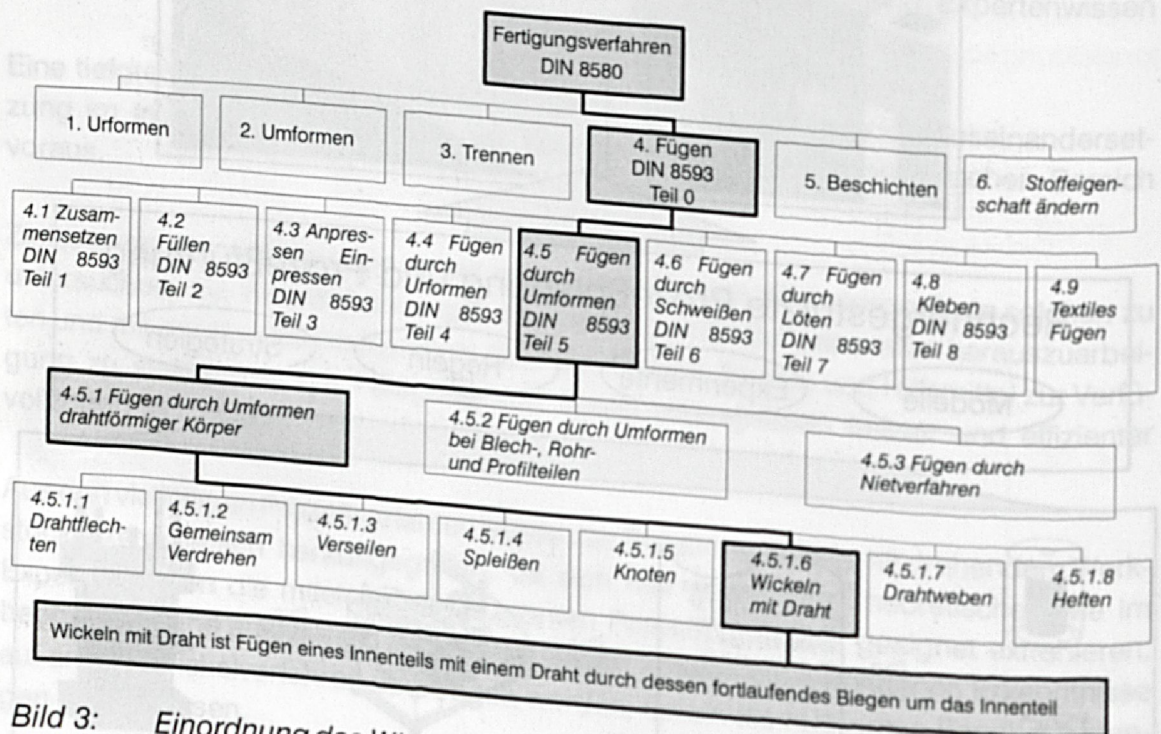


Bild 3: Einordnung des Wickelns als Fertigungsverfahren nach DIN

Neben den für die Biegeumformung notwendigen Biegespannungen herrschen beim Wickeln zusätzlich noch Zug- und Schubspannungen im Draht, welche durch die in Bild 4 skizzierten Kräfte entstehen.

Die Drahtzugkraft, die durch geeignete Drahtbremssysteme aufgebracht wird, hat entscheidenden Einfluß auf das Wickelergebnis:

- Eine zu geringe Drahtzugkraft kann neben unerschwünschten Drahtschwingungen zu ungenügenden Füllgraden und einem unsauberem Wickelbild führen.



- Ein Überschreiten der Drahtzugkraft über den Bereich der elastischen Dehnung hinaus führt zu bleibender Leiterquerschnittsverminderung bis hin zu Drahtriß.

Somit hat die Drahtzugkraft also deutlichen Einfluß auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften einer Spule.

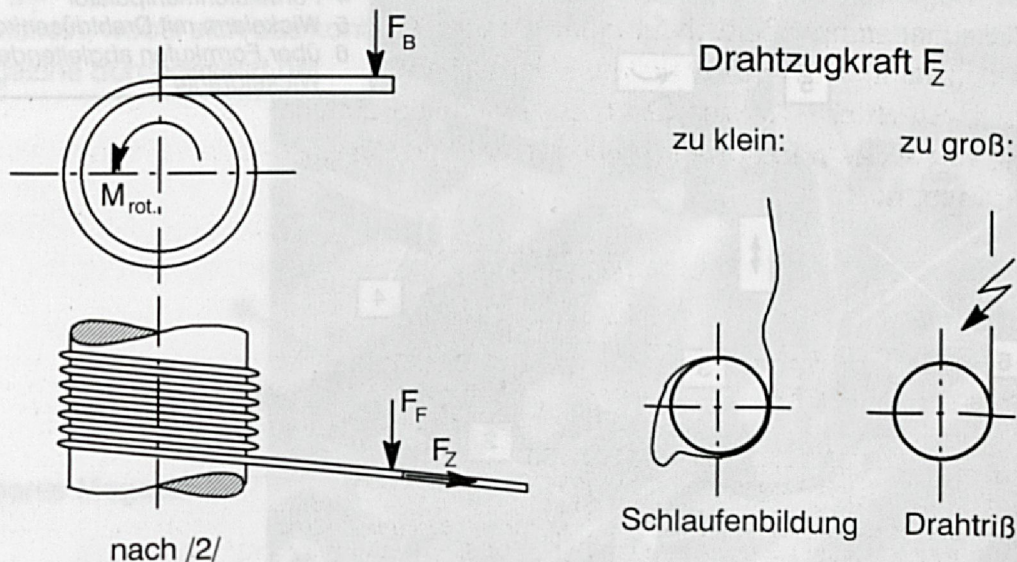


Bild 4: Die beim Wickeln auftretenden und beteiligten Kräfte/Momente und die Auswirkungen der Drahtzugkraft auf das Wickelergebnis

## 2.1 Überblick über die unterschiedlichen Wickelverfahren

Aufgrund der vielfältigen technologischen, insbesondere fertigungstechnischen Randbedingungen, haben sich unterschiedliche Wickelverfahren herauskristallisiert, die folgenden Prinzipien zugeordnet werden können:

- Hub- Schwenk- Wickelverfahren
- Formungsschrittverfahren
- Ringkernwickeln und
- Rotationswickelverfahren

wobei es sich bei den beiden erstgenannten Techniken in erster Linie um Fertigungsmethoden zur Herstellung großer, nichtkreisförmiger Wicklungen, wie z.B. Motorwicklungen handelt.

### Hub-Schwenk-Wickelverfahren

Dieses Prinzip wird bei der direkten Bewicklung von Ständerblechpaketen in der Motorenfertigung eingesetzt. Wie bereits der Name vermuten läßt, setzt sich der Wickel-



vorgang aus einer Folge rotatorischer und translatorischer Bewegungen des Drahtführers zusammen.

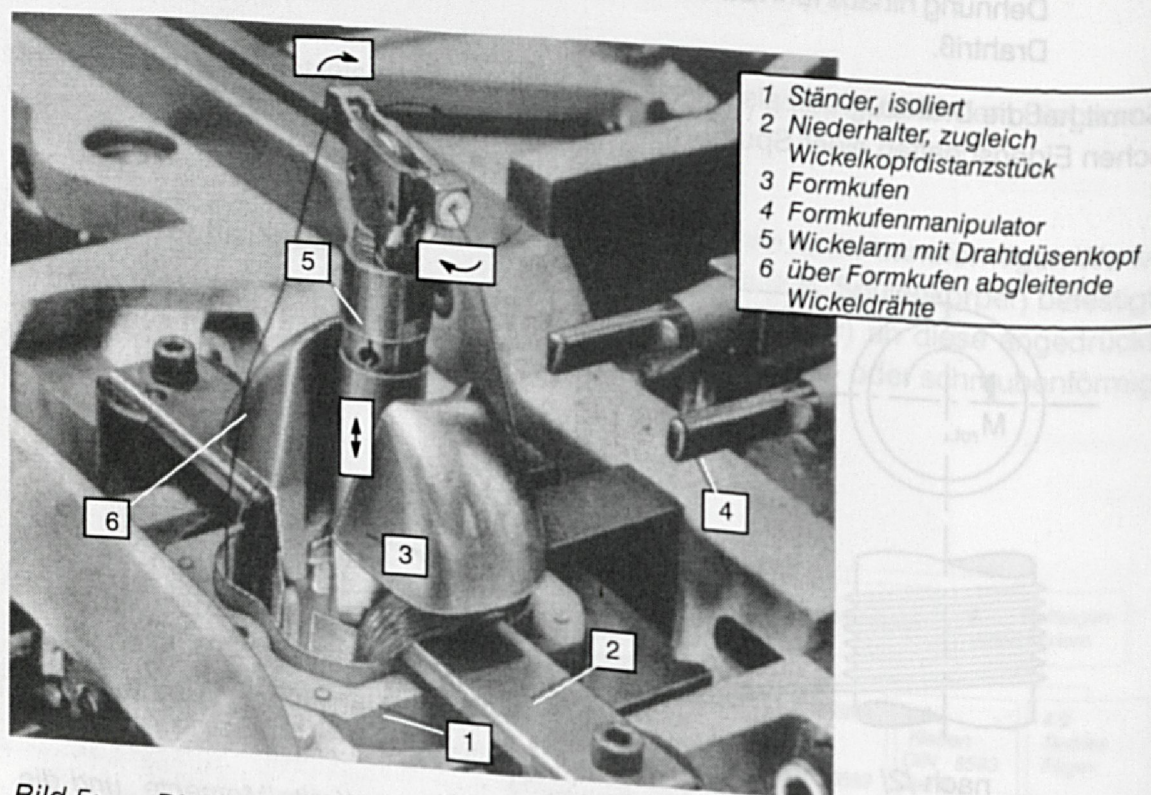


Bild 5: Direkte Motorständerbewicklung im Hub-Schwenk-Wickelverfahren [3/

Der bewegliche Wickelarm (5) füllt bei seiner translatorischen Bewegung die Nuten des Ständers. Zur kontinuierlichen Befüllung der gegenüberliegenden Nut erfolgt in einem Zwischenschritt eine Drehbewegung des Wickelarms, wodurch der Draht - über die Formkufen (3) abgleitend - die gewünschte Form im Wickelkopf annimmt. Nach erfolgreichem Bewickeln der gegenüberliegenden Nut im Zuge der Hubbewegung, schwenkt der Wickelarm wieder in die entgegengesetzte Richtung zurück und erlaubt so die fortschreitende Bewicklung des Ständers. Die Drahtzuführung erfolgt dabei axial durch die Hohlwelle des Wickelarms.

Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung von Wicklungen - ebenfalls prädestiniert für Anwendungen in der Elektromotorenfertigung - ist das sogenannte Formungsschrittverfahren.

### Formungsschrittverfahren

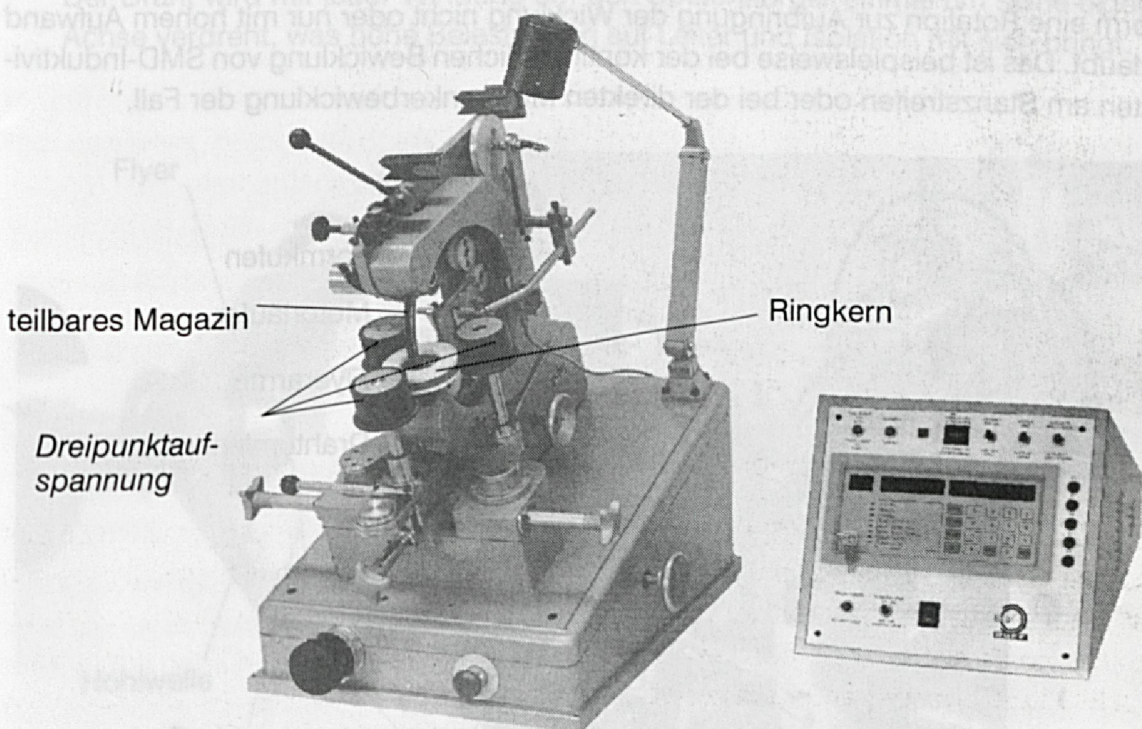
Wesensmerkmal ist das Umformen massiver Leiter - vornehmlich mit rechteckigen Querschnittsflächen - die überwiegend in manuellen Fertigungsschritten weiterverarbeitet werden. Es gibt nur wenige automatisierte Anwendungsfälle für das eher im Starkdrahtbereich angesiedelte Fertigungsverfahren, weswegen hier auch nicht näher darauf eingegangen wird, es der Vollständigkeit halber aber erwähnt werden muß.



Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von geschlossenen Ringkernen kommt dem sogenannten Ringkernwickeln eine ständig wachsende Bedeutung zu:

### **Ringkernwickelverfahren**

Es gibt mehrere Möglichkeiten, einen geschlossenen, torusförmigen Kern zu bewickeln, wobei sich das kontinuierliche Wickeln mit Hilfe angetriebener und teilbarer Magazine durchgesetzt hat.



Bildnachweis: Ruff

**Bild 6:** Handbediente Ringkernwickelmaschine mit teilbarem Magazin

Zum Einlegen des Kerns in die Dreipunktaufspannung, die während des Wickelprozesses zur Vorschubübertragung dient, läßt sich das durch die Kernbohrung des Ringkerns laufende Magazin öffnen. Beim Wickelvorgang wird das Magazin fortlaufend angetrieben und mit Draht von der Vorratsrolle befüllt, während gleichzeitig der Draht über Gleitsteine, Lineale o.ä. wieder aus dem Vorratsmagazin gezogen und um den Kern gewickelt wird. Die außergewöhnlich schlechte Automatisierbarkeit des Vorgangs liegt u.a. an der Tatsache, daß die herauszuführenden Leiterenden und Anzapfungen nicht durch diesen Prozeß wieder an den Kern gewickelt werden dürfen, so daß es sich bei langen Anschlußenden und/oder einer hohen Anzahl von Leiterenden/Anzapfungen meist um einen vom Menschen überwachten und bedienten Fertigungsablauf handelt.



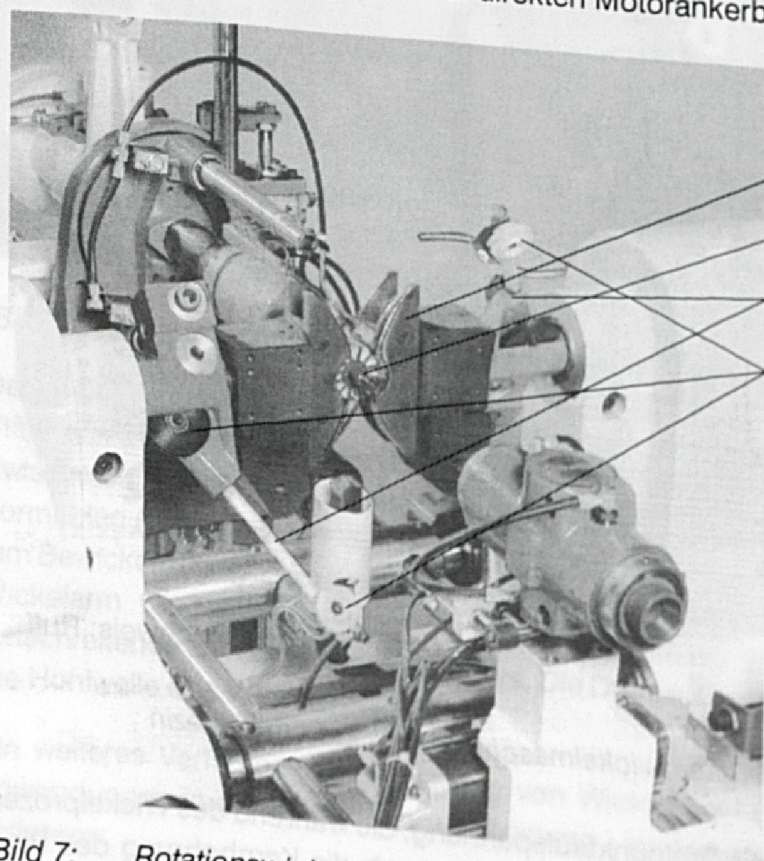
## 2.2 Rotationswickeln

Einen weiten Bereich in der Wickeltechnik deckt das sogenannte Rotationswickeln ab. Hier werden im allgemeinen zwei Verfahren unterschieden:

- Rotationswickeln mit drehendem Werkzeug (Flyerwickeln)
- Rotationswickeln mit drehendem Werkstück (i.a. Spule oder Formträger)

### Flyerwickeln

Dieses Wickelverfahren wird normalerweise dann angewandt, wenn die zu bewickelnde Form eine Rotation zur Aufbringung der Wicklung nicht oder nur mit hohem Aufwand erlaubt. Das ist beispielsweise bei der kontinuierlichen Bewicklung von SMD-Induktivitäten am Stanzstreifen oder bei der direkten Motorankerbewicklung der Fall.



Formkufen

Motorläufer

Flyerarme

Drahtumlenkrollen

Bildnachweis: Aumann

**Bild 7:** Rotationswickeln von Motorankerwicklungen nach dem Flyerwickelverfahren

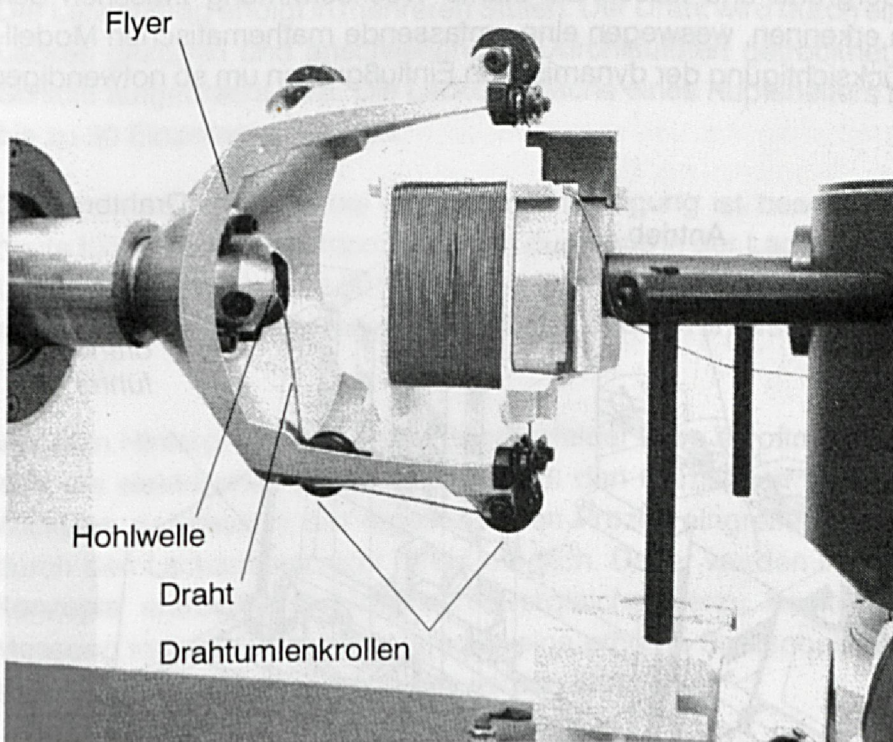
Wollte man im Fall der Motorankerbewicklung die Wicklung durch Rotation des Werkstücks (Läufer) aufbringen, so müßte der Läufer nicht axial, sondern radial zu seiner späteren Rotationsachse bewegt werden, was zum Teil enorme Flugkreisdurchmesser und Massenbewegungen zur Folge haben würde. Daher rotiert hier ein umlaufender und ausgewuchteter Flyer um den während des Wickelns feststehenden Läufer. Formkufen erleichtern das Abgleiten der Wicklungen in die dafür vorgesehenen Läuferfalten.



Die, mittels mehrerer NC-Achsen, beliebig positionierbaren Flyer ermöglichen den vollautomatischen Anschluß der Wicklungsenden am Kommutator.

Die Drahtführung verläuft im Flyer zunächst in einer Hohlwelle zentrisch um die Rotationsachse, bis der Draht durch mehrere Umlenkelemente auf einen Flugkreisdurchmesser größer dem des Spulenkörpers gebracht wird. Vom letzten Umlenkelement, das gleichzeitig die axiale Führung des Drahtes übernimmt, legt sich der Draht beim Wickelprozeß geordnet auf den Spulenkörper bzw. auf die bereits aufgetragenen Windungen. Ein schwerwiegender verfahrensbedingter Nachteil darf im Zusammenhang mit dem Flyerwickeln nicht ungenannt bleiben:

Der Draht wird mit jeder Windung um den Spulenkörper einmal um seine eigene Achse verdreht, was hohe Belastungen auf Leiter und Isolation mit sich bringt.



Bildnachweis:  
Marsilli

**Bild 8:** Wickeln eines Transformators im Flyerwickelverfahren

Ein weiteres wichtiges Wickelverfahren stellt das Rotationswickeln mit drehendem Werkstück dar. In der Regel handelt es sich dabei um einen Spulenkörper oder einen Formungskörper für körperlose Spulen. Durch technologisch bedingte Vorteile läßt sich hier der Wickelprozeß - im Gegensatz zu den anderen Wickelverfahren - im Experiment gut beobachten und die theoretisch erarbeiteten Prozeßabhängigkeiten verifizieren. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Prozeßabhängigkeiten beim Wickeln mit rotierendem Werkstück untersucht, wobei an dieser Stelle anzumerken ist, daß zahlreiche Ergebnisse auf die übrigen Verfahren übertragen werden können.



### 2.2.1 Allgemeiner Aufbau und maschinenbauliche Defizite beim Rotationswickeln mit drehendem Wicklungsformkörper

Bis vor wenigen Jahren waren in einer typischen Wickelei ausschließlich handbediente Tischwickelmaschinen mit mechanischen Windungszählern und reibradgetriebenen Vorschubeinheiten zur Drahtführung im Einsatz. Heute handelt es sich bei einer moderner Wickelmaschine meist um ein CNC-gesteuertes Wickelsystem mit bis zu 24 gleichzeitig angetriebenen Wickelspindeln und zum Teil mehreren NC-Achsen zur automatisierten Drahtführung und zum selbständigen Spulenkörperhandling /4/, /5/.

Bild 9 zeigt exemplarisch ein 6-spindliges Wickelsystem mit seinen Teilkomponenten: **Draht, Wickelform** und **Wickelvorrückung**. Insbesondere bei hohen Abzugsgeschwindigkeiten - Drehzahlen von 24.000 1/min und Drahtabzugsgeschwindigkeiten von bis zu 30 m/s sind heute durchaus üblich - treten dynamische Erscheinungen immer stärker in den Vordergrund und lassen die starke Wechselwirkung zwischen den beteiligten Faktoren erkennen, weswegen eine umfassende mathematische Modellbildung mit der Berücksichtigung der dynamischen Einflußgrößen um so notwendiger wird.

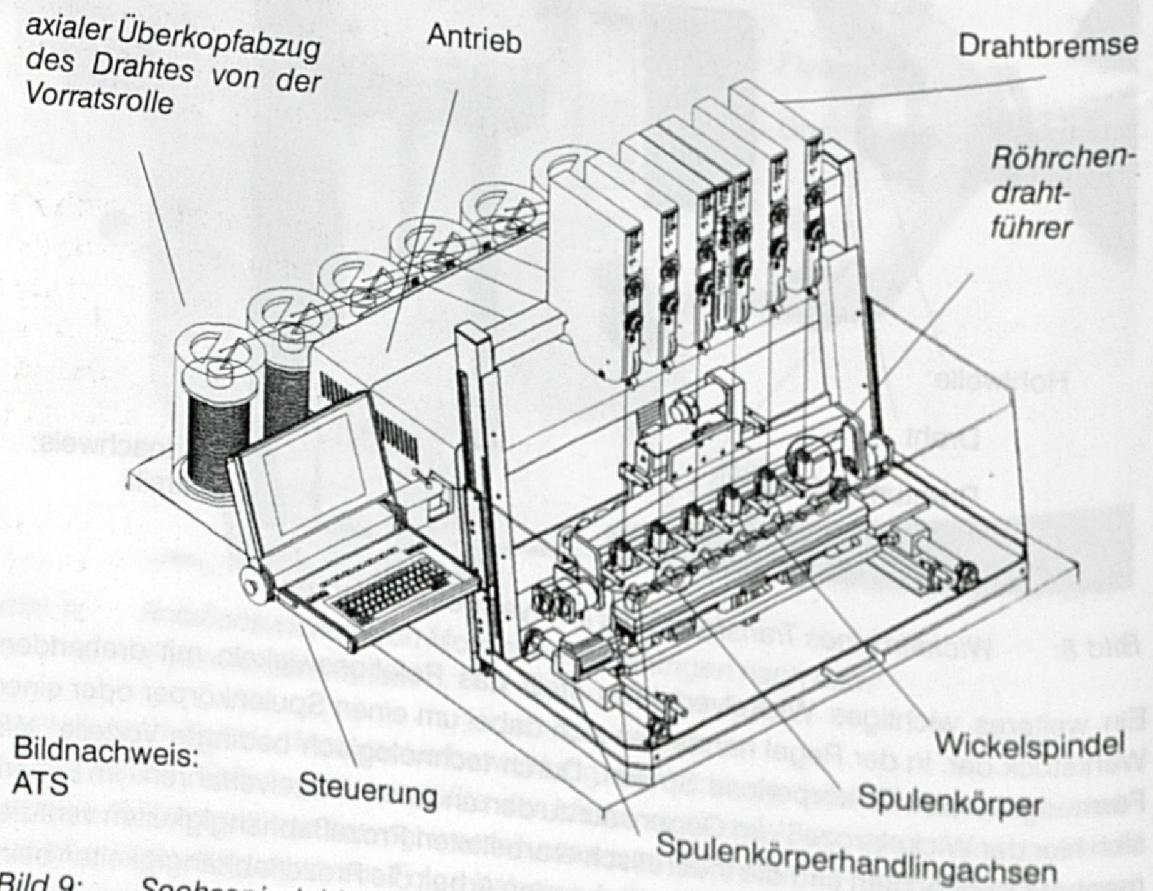


Bild 9: Sechsspindel-Mehrachs-Rotationswickelsystem mit automatisiertem Spulenkörperhandling



## Der Draht

Als Drahtmaterial kommen für Anwendungen in elektrotechnischen Produkten überwiegend Drähte aus Elektrolytkupfer mit hoher Reinheit zum Einsatz. Je nach Art der Isolation unterteilt man in plastisierte, umspinnene und lackisierte Leiter.

Lackdrähte zeichnen sich durch ihren dünnen und elektrisch wie mechanisch hoch beanspruchbaren Isolierlackauftrag aus. Er verleiht ihnen gute Verarbeitungseigenschaften bei gutem Nutzfüllvolumen und hoher Isolationsfestigkeit. Vor allem bei der Verarbeitung von Drahtstärken bis ca. 100  $\mu\text{m}$  ist zu beachten, ob es sich um einen Blankdraht oder einen lackisierten Draht handelt, da hier die Stärke der Lackisolation einen erheblichen Teil des Drahtdurchmessers betragen kann (bis zu 45%) und die mechanischen Eigenschaften der Isolation dann nicht mehr vernachlässigt werden können (vgl. hierzu auch Bild 19).

Der Lackauftrag erfolgt in mehreren Stufen. Der Draht wird durch ein Bad dünnflüssigen Lackes gezogen und anschließend in Durchlauföfen getrocknet, bevor die nächste Schicht aufgebracht wird. Die Lackoberfläche eines Kupferleiters besteht deshalb aus bis zu 30 Einzellackschichten.

Der Entwicklungsstand bei der Lackdrahtfertigung ist beachtlich hoch. Darum sind heute führende Lackdrahtproduzenten durchaus in der Lage, Drahtqualitäten mit einer Leitertoleranz von  $\pm 0,001 \text{ mm}$  zu liefern, was die maximal zulässigen Toleranzen seitens DIN und IEC-Normen ( $\pm 0,003 \mu\text{m}$ ) deutlich unterschreitet [7/, 8/, 9/, 10/, 11/, 12/, 13/].

Vor dem Hintergrund minimaler Toleranzfelder wäre es oftmals trotzdem wünschenswert die elektrischen Eigenschaften (z.B. den Ohmschen Widerstand) während des Wickelns zu erfassen, um regelnd in den Prozeß eingreifen zu können. Das ist aber durch den Lackauftrag nicht direkt möglich. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Konzepte erarbeitet und realisiert (vergleiche hierzu Kapitel 7), wie anhand der Messung indirekter Prozeßparameter eine erhöhte Spulenqualität durch Fertigung in engeren Toleranzfenstern erreicht werden kann.

Zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften erfolgt nach dem Lackierprozeß des Kupferleiters ein Gleitmittelauftrag. Es handelt sich dabei meist um in Alkohol gelöste Paraffine. Andernfalls würde der Draht beim Abziehen von der Vorratsrolle kleben bleiben bzw. sich verhaken und dabei deutlich schlechter in seine gewünschte Form auf dem Spulenkörper aufgebracht werden können. Jedoch bringt der Wachsauftrag auch Nachteile mit sich:

An Umlenkelementen, an den Bremssystemen und in den Röhrchendrahtführern wird die mikroskopisch feine Wachsschicht (5-50 mg Wachs pro  $\text{m}^2$  Lackdrahtoberfläche) abgeschabt, lagert sich dort ab und führt besonders durch das Verstopfen der Drahtführer zu Drahtriß, was Produktionsausfall und langwierige Reinigungsprozesse mit sich



bringt. Ziel war es daher, in experimentellen Versuchsreihen die Verarbeitbarkeit von Lackdrähten, insbesondere unter Variation des Gleitmittelauftrages zu untersuchen, um Aussagen über den optimalen Wachsanteil des Lackdrahtes zu erhalten.

### Die Wickelform

Die Wickelform ist in jedem Anwendungsfeld, bezüglich Geometrie und Abmessungen, sehr vielfältig. Grundsätzlich kann bei der Fertigung in Wickeln von körperlosen Spulen und Wickeln auf Spulenkörper unterschieden werden. Bei körperlosen Spulen wird der Zusammenhalt der Wicklungen durch Verwendung von Vergußmassen, Träufelharzen und/oder Backlackdrähten erreicht /14/. Bei Verarbeitung von Backlackdrähten wird im direkten Anschluß an das Wickeln, bzw. schon während des Wickelprozesses die Backlackschicht des Drahtes soweit erwärmt, daß benachbarte Windungen in den Außenbereichen der Lackschicht miteinander verschmelzen. Das Ergebnis ist nach erfolgtem Abkühlen eine in Grenzen mechanisch belastbare und stabile Spule.

Bis auf einen geringen Anteil an Trafospulen, bei denen mittlerweile eine gewisse Standardisierung vorliegt, ist jeder Spulenkörper eine problemorientierte Speziallösung. Dies ist auch mit ein Grund, weswegen bei der Modellierung der Wickelform auf eine allgemeingültige Beschreibung Wert gelegt wurde. Mit einfachen Geometrieformen (runder, eckiger Spulenkörper) und der Kombination der Geometrieelemente kann zudem der Wicklungsfortschritt beschrieben werden, da ein zunächst eckiger Körper sich mit steigender Lagenanzahl an den Ecken immer mehr abrundet und sich die Wickelform daher immer stärker der eines Kreises annähert.

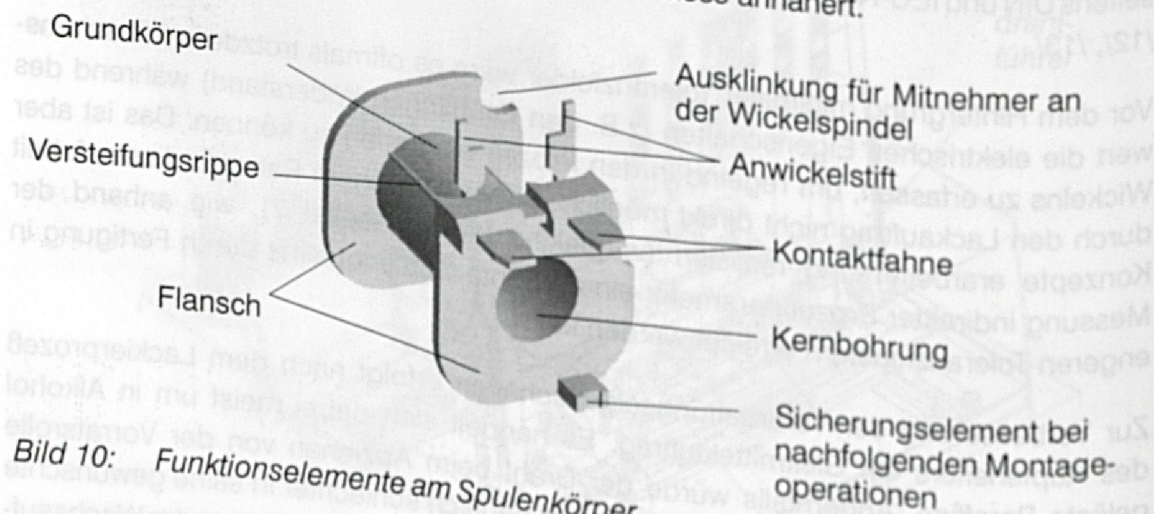


Bild 10: Funktionselemente am Spulenkörper

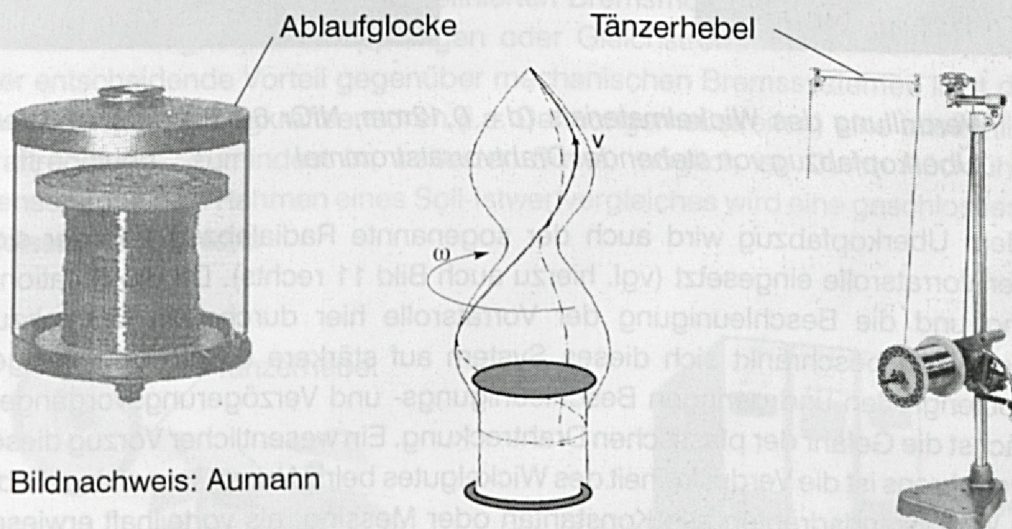
Die Wickelform als solche beeinflusst den Wickelprozeß entscheidend. Besonders bei Abweichungen von der Kreisform ist mit zum Teil hohen dynamischen Belastungen auf den Draht und in Verbindung mit hohen Wickeldrehzahlen mit großen Drahtkörperquerschnitten mit engen Biegeradien hohe plastische Biegespannungen an den Biegekannten und weitere Nachteile hinsichtlich Auffederung und Spulenfestigkeit /15/.



## Die Wickelvorrichtung und die Beschreibung des Wickelvorganges

Wesentliche Bestandteile einer Wickelmaschine sind Steuerung, Antrieb, Wickelspindel(n), Drahtabzug, Führungselemente und Drahtbremse(n), welche durch ihren konstruktiven und mechanischen Aufbau ebenfalls das Wickelergebnis beeinflussen.

Der Draht wird von der Vorratsrolle kontinuierlich abgewickelt. Wie in Bild 9 exemplarisch dargestellt, geschieht dies in den meisten Fällen im sogenannten "Überkopfabzug". Von der feststehenden Spule wird der Draht axial nach oben abgezogen, was zu einer Verdrillung des Drahtes führt. Diese hängt primär vom jeweils vorliegenden Biegeradius des Drahtes auf der Vorratsrolle ab. Im Gegensatz zur Textilindustrie, wo der Faden meist frei Überkopf abgezogen wird /16/, schränken in der Wickeltechnik sogenannte Ablaufglocken eine freie Ballonbildung ein. Der Draht schmiegt sich aufgrund von Fliehkräften der Innenkontur der Ablaufglocke an, was aber die Entstehung von Verdrillungen nicht verhindert.



Bildnachweis: Aumann

**Bild 11:** Axialer Überkopfabzug mit Ablaufglocke in der Spulenwickeltechnik (links), freie Ballonbildung bei Fadenabzug in der Textiltechnik (mitte) /17/ sowie Radialabzug von Wickeldrähten (rechts)

In Bild 12 erkennt man eine Verdrillung, die sich zu einer Schlaufe und letztendlich zu einem Knoten zusammenzieht und einen lagengenauen Wicklungsaufbau nahezu unmöglich machen würde.

Zur Quantifizierung von Verdrillungen beim axialen Überkopfabzug:

Geht man von einer typischen Vorratsspulenabmessung von 160 mm Außendurchmesser aus, verdoppelt sich nahezu die Verdrillung mit kleiner werdendem Biegeradius im Laufe des Abwickelns bis zu einem Mittelwert von ungefähr 3,5 Verdrillungen pro Meter abgespulten Drahtes, bei dann herrschenden 90 mm Windungsdurchmesser auf der Vorratsrolle.



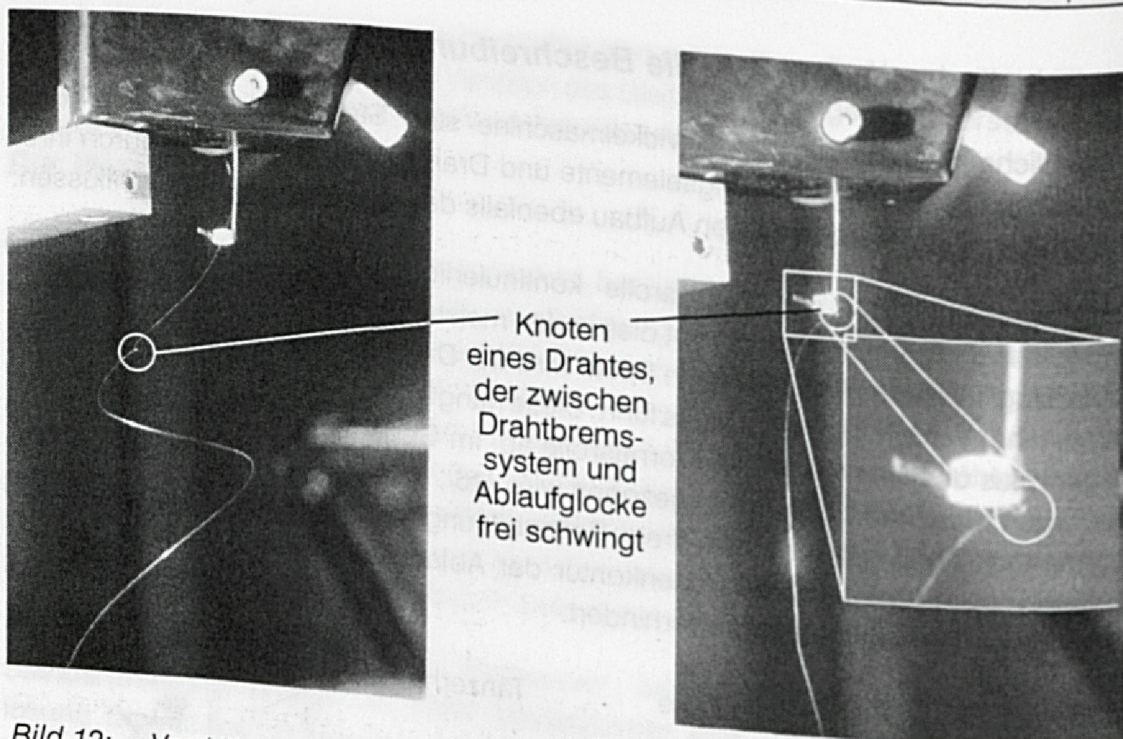


Bild 12: Verdrillung des Wickelmateri- als ( $d = 0,12\text{mm}$ , NiCr 60 15) durch axialen Überkopfabzug von stehender Drahtvorrattstrommel

Neben dem Überkopfabzug wird auch der sogenannte Radialabzug von der sich drehender Vorratsrolle eingesetzt (vgl. hierzu auch Bild 11 rechts). Da die Rotationsbewegung und die Beschleunigung der Vorratsrolle hier durch den Drahtabzug erzwungen wird, beschränkt sich dieses System auf stärkere Drähte bei geringen Vorratsspulengrößen und geringen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen. Sonst wächst die Gefahr der plastischen Drahtreckung. Ein wesentlicher Vorzug dieses Abzugsverfahrens ist die Verdrillfreiheit des Wickelgutes beim Abzug, was sich, z.B. bei legierten Widerstandsdrähten aus Konstantan oder Messing, als vorteilhaft erwiesen hat.

Bei der Verarbeitung verdrillkritischer Wickelmateri- alien unter geringen Drahtzug- kräften sind beide Abzugssysteme (axialer Überkopfabzug - Radialabzug) ungeeignet. Für diesen Anwendungsfall wird in Kapitel 6.1 ein neuartiges Prinzip vorgestellt, das die Vorteile beider Systeme kombiniert.

Im weiteren Verlauf wird der Draht über mehrere Führungs- und Umlenkelemente zur Drahtbremse geleitet. Hier kommen geschlossene Ringösen und sogenannte Sauschwanzfadenführer zum Einsatz, ebenso gelagerte Umlenkrollen und Filzscheiben. Stellenweise haben die Elemente drahtschwingungsdämpfenden Charakter (z.B. Filzscheiben). Generell führen alle derartigen Komponenten zu einer Drahtzug- krafterhöhung, sei es durch Reibung (Filzscheiben, Sauschwanzfadenführer und Ösen) oder durch Umformarbeit (Umlenkrollen). Letztere kann sich wiederum negativ auf die Verarbeitbarkeit der Lackdrähte auswirken.

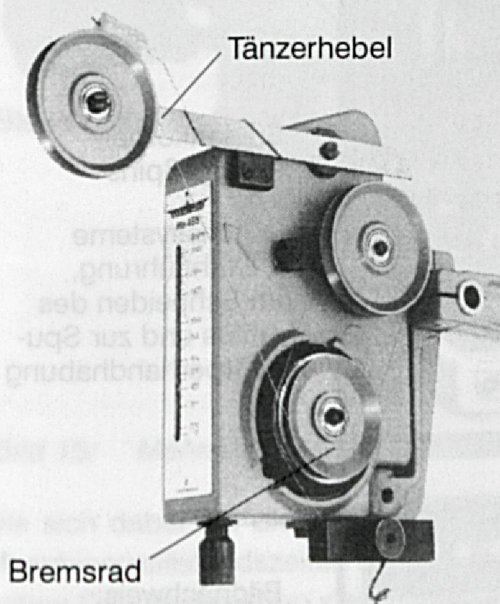


## Drahtbremssysteme

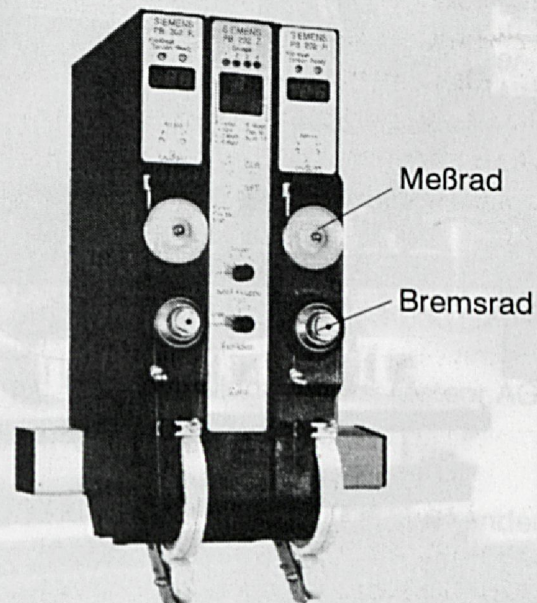
Die Aufgabe eines Drahtbremssystems besteht darin, dem Draht die für die Verarbeitung notwendige Zugspannung möglichst konstant aufzuprägen. Wie bereits in Bild 4 angedeutet, darf die Zugkraft einen bestimmten Bereich weder über- noch unterschreiten, da sonst Drahtreckung und Drahtriß bzw. Schlaufenbildung und unsauberes Wickelbild die Folgen wären.

Bei mechanischen Drahtbremsen geschieht die Zugkrafteinleitung durch Vorgabe eines möglichst konstanten Reibmomentes an einem vom Draht umschlungenen Rad mit Hilfe geeigneter Reibelemente und Hebel-Feder-Systemen. Nachgeschaltete Tänzerhebel ermöglichen u.a. einen beschränkten Drahtrückzug für Verfahroperationen der Drahtführungselemente bei Anwickelbewegungen.

Neben rein mechanisch wirkenden Drahtbremsen kommen auch zunehmend elektronisch geregelte Drahtzugregelsysteme zum Einsatz /18/. Auch hier wird ein vom Draht umschlungenes Rad mit einem definierten Bremsmoment beaufschlagt, wofür meist elektrische Magnetpulverkupplungen oder Gleichstrommotoren verwendet werden. Der entscheidende Vorteil gegenüber mechanischen Bremssystemen liegt darin, daß durch integrierte Zugkraftsensoren (i.a. Dehnungsmeßstreifen) eine tatsächliche Zugkraftregelung, zumindest im weitesten Sinne, möglich ist. Durch Rückführung der Sensorsignale im Rahmen eines Soll-Istwertvergleiches wird eine geschlossene Regelkreisstruktur erreicht.



Bildnachweis: Meteor AG



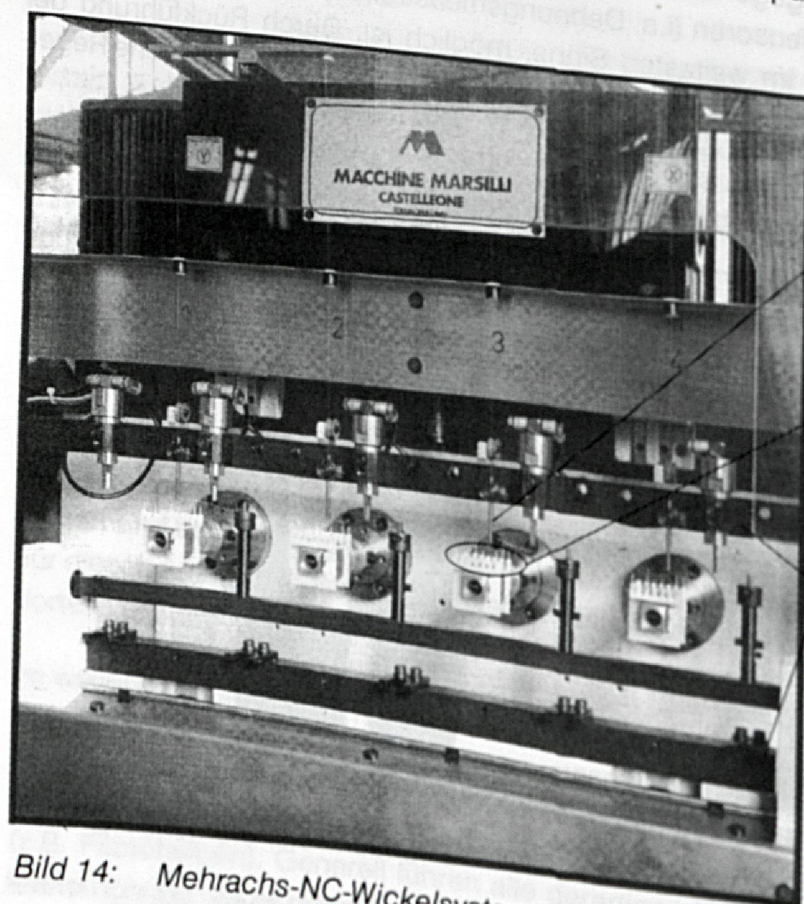
Bildnachweis: Siemens AG

Bild 13: Mechanische (links) und elektronische (rechts) Drahtbremssysteme



Wie später bei der mathematischen Wickelprozeßbeschreibung detailliert erläutert wird, haben alle Bremssysteme, welche bewegte Massen in das Drahtablaufsystem einkoppeln (z. B. durch das rotierende Bremsrad) den Nachteil, daß bei ungleichförmiger Drahtabzugsgeschwindigkeit diese Elemente ebenfalls dynamisch beschleunigt und verzögert werden, was sich in unerwünschten Zugkraftschwankungen äußert. Daher wurde ein masseinflußreduziertes Drahtzugregelsystem entwickelt und prototypisch aufgebaut, das insbesondere bei der Bewicklung unrunder Spulenkörperquerschnitte eine deutliche Reduzierung der dynamischen Zugkraftschwankungen zeigt (vgl. hierzu Kapitel 6.2).

Im weiteren Verlauf gelangt der Draht nun von der Drahtbremse über den eigentlichen Drahtführer zum Wickelort, d.h. an die Stelle, an der der Draht mit der gewünschten Kontur um den Spulenkörper oder allgemeiner um die formgebende Geometrie gelegt wird. Eine oder mehrere NC-Achsen dienen zum gesteuerten Verfahren des Drahtführers, um einen definierten Wicklungsaufbau zu erhalten. Je nach Applikation kommen unterschiedliche Drahtführer zum Einsatz, wobei sogenannte Röhrendrahtführer eine gezielte Drahtführung im Raum ermöglichen. Diese sind Grundvoraussetzung für ein sicheres Umwickeln der Anschlußpins von Spulenanfang, Anzapfung und Spulenende sind.



Röhrendrahtführer

Spulenkörper-  
anschlußpins

NC-Achssysteme  
zur Drahtführung,  
zum Schneiden des  
Drahtes und zur Spu-  
lenkörperhandhabung

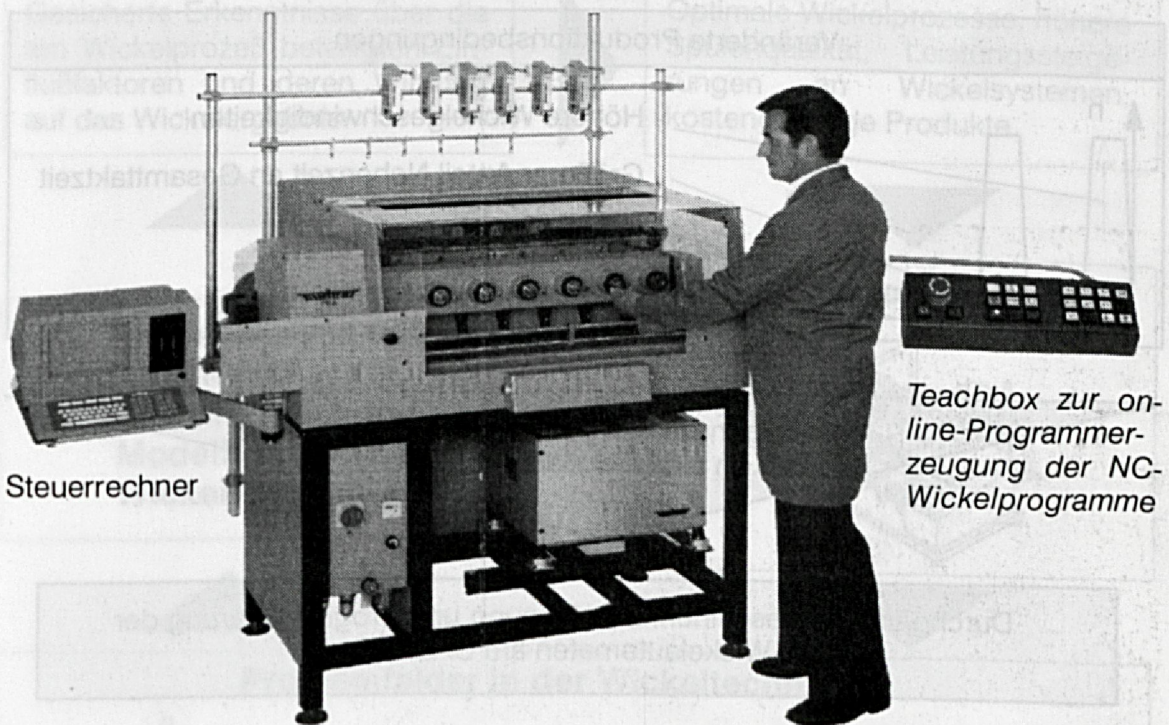
Bildnachweis:  
Marsilli

Bild 14: Mehrachs-NC-Wickelsysteme mit automatisierter Drahtführung zum vollautomatischen Anschließen von Drahtanfang und Drahtende am Spulenkörper



### 2.2.2 Steuerungstechnischer Aufbau und Programmierung von Wickelsystemen

Moderne Wickelmaschinen werden mittlerweile ausnahmslos mit Hilfe von Mikroprozessoren gesteuert. Dabei kommen vorwiegend Transputer- oder PC-Applikationen zum Einsatz. Die Programmerstellung erfolgt vor Ort vom Maschineneinrichter am Wickelsystem im sogenannten Teach-In-Verfahren. Hierbei werden die einzelnen NC-Programmbefehle sequentiell über das Bedienfeld der Maschine eingegeben. Die Verfahrbewegungen, für die zum Teil komplexe Drahtführung zwischen Anschlußpins und Hilfsstiften bzw. zur eigentlichen Wickelkammer, werden zunächst im Schleichgang vorprogrammiert und abgefahren, bevor sie als Verfahrbefehle in das NC-Steuerprogramm übernommen werden.



Bildnachweis: Meteor AG

Bild 15: Mehrspindel-Spulenwickelautomat mit NC-Steuerung

Die sich dabei auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems negativ auswirkenden Maschinenstillstandszeiten und die Gefahr des Maschinenbruchs bei der maschinennahen Programmierung stellen zwei schwerwiegende Defizite bei der derzeit vorherrschenden Vorgehensweise dar.

Waren die eingesetzten Wickelsysteme bislang für die Massenfertigung hoher Losgrößen bei geringer Produktvarianz eingesetzt, so ist in zunehmendem Maße eine Veränderung des Produktionsprofils zu verzeichnen:



Insbesondere in mittelständischen Lohnwickereien erfordern geringe Losgrößen, höhere Produktvarianz und kürzere Produkt- / Produktionszyklen eine flexible Nutzung der NC-Wickelautomaten.

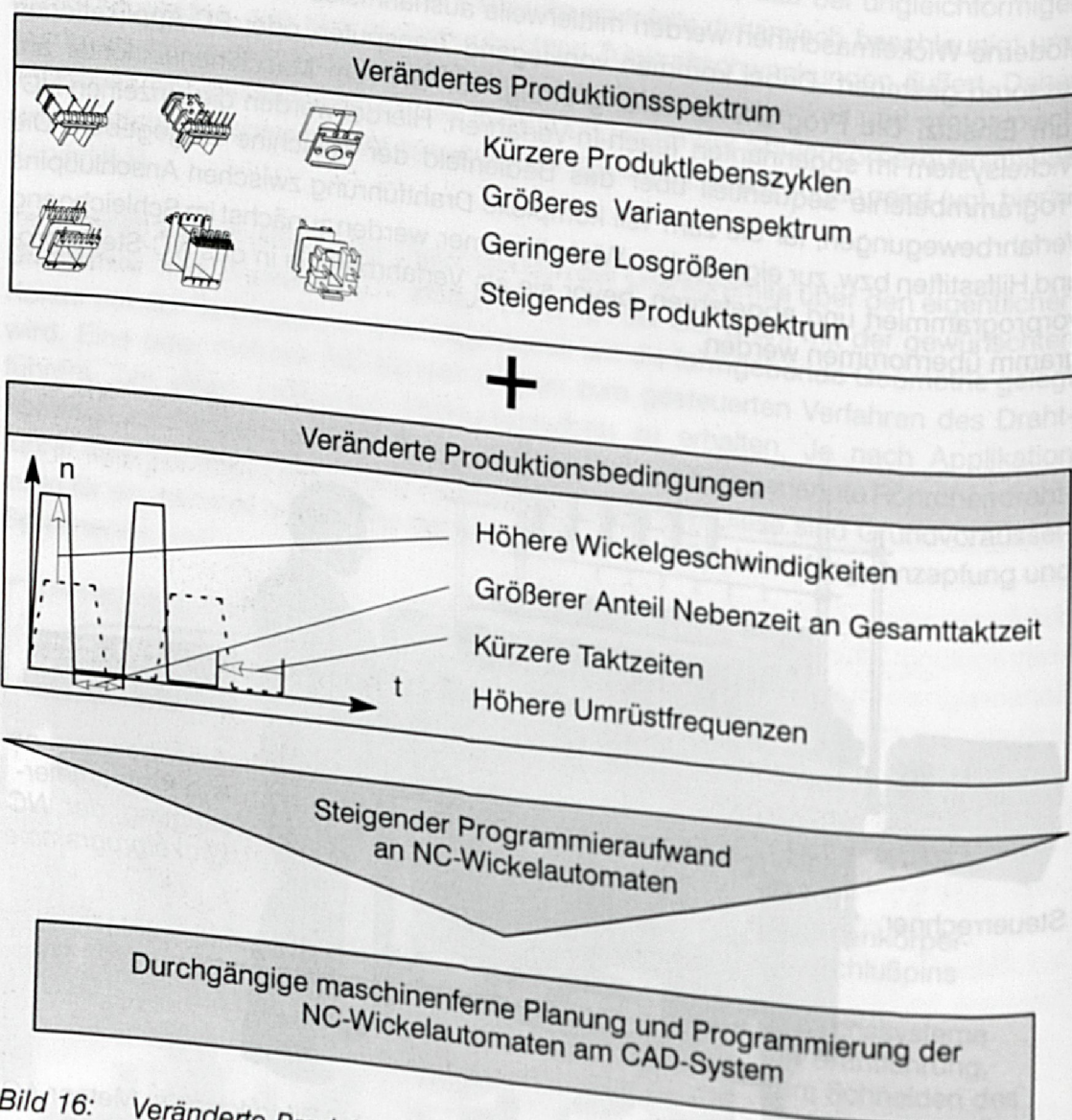


Bild 16: Veränderte Produkt- und Produktionsbedingungen im wickeltechnischen Umfeld und deren Einfluß auf den Programmieraufwand von NC-Wickelautomaten

Der Einsatz einer flexiblen CAD-CAM-Kopplung garantiert die schnelle und effiziente Erzeugung prozelloptimierter NC-Wickelprogramme am leistungsfähigen Rechner-system im off-line Betrieb.

Daher wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein für die Wickeltechnik geeignetes Konzept zur maschinenfernen Wickel-NC-Programmierung erarbeitet, realisiert und



ausgetestet, welches den veränderten Produkt- und Produktionsbedingungen gerecht wird und die Nachteile der herkömmlichen Programmierung vermeidet.

Eine rechnergestützte Programmierung ist aber nur dann sinnvoll, wenn der Fertigungsprozeß (in diesem Fall der Wickelprozeß) als solcher beherrschbar und exakt vorhersehbar ist, so daß die theoretisch erwarteten Ergebnisse mit den tatsächlich erzielten übereinstimmen. Andernfalls ergeben sich nach der maschinenfernen Programmierung in der Produktionsanlaufphase umfangreiche Testläufe und Programmänderungszyklen, die den erhofften Nutzen zunichte machen.

Im Rahmen einer weitreichenden Prozeßanalyse muß der Wickelvorgang detailliert untersucht werden, die theoretisch-mathematischen Zusammenhänge erarbeitet und im Experiment verifiziert werden.



Bild 17: Motivation zur weitreichenden Wickelprozeßanalyse



### 3 Mathematische Beschreibung und Modellierung von Wickelvorgängen

Zur strukturierten Beschreibung der Einfluß- und Prozeßgrößen beim Spulenwickeln bietet sich eine Einteilung einerseits in geometrische und elektrische Größen einer Spule und andererseits in rein prozeßabhängige Größen an.

#### 3.1 Geometrische und elektrische Größen einer Spule

Zu den geometrischen Größen einer Spule zählen, neben dem Wicklungsaufbau, in erster Linie die Spulenabmessungen.

Das Wickelfenster, das sich als Produkt aus Wickelkammerbreite und Wickelkammerhöhe ergibt, stellt den für die Wicklungen verfügbaren Raum dar.

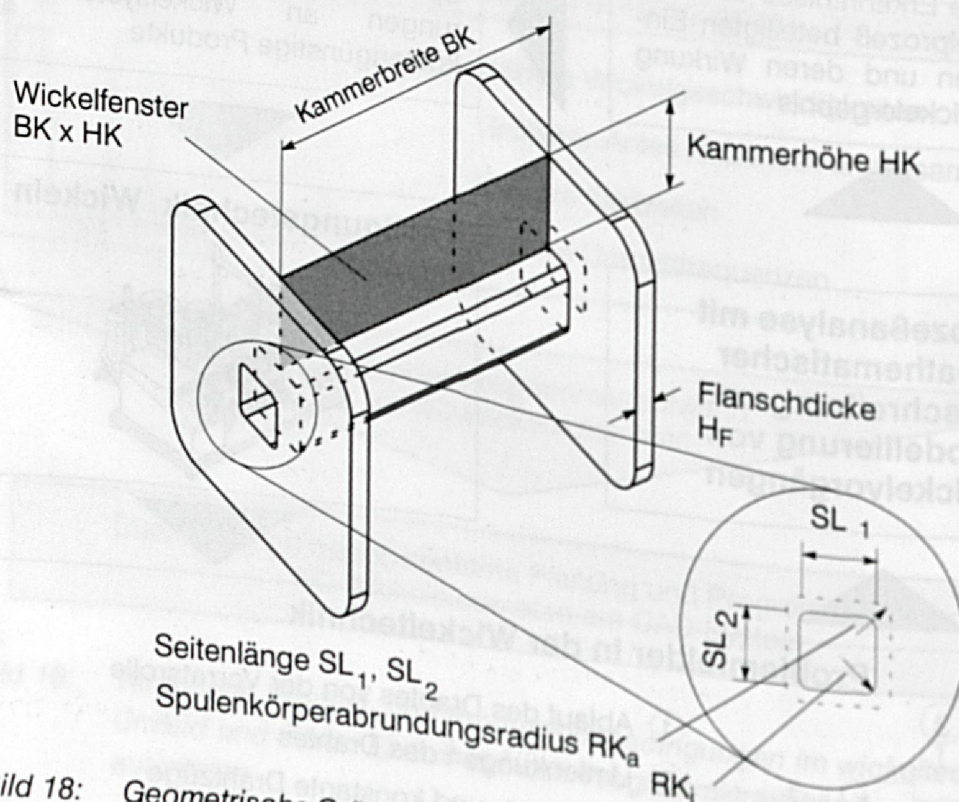


Bild 18: Geometrische Größen am Spulenkörper

#### Wickelfaktor, Wickelfüllfaktor und Lagenaufbau

Sowohl bei der Konstruktion als auch bei der Fertigung von Spulen ist auf eine ausreichende elektrische Isolation der Windungen und auf einen kleinen Bauraum der Spule zu achten.



Aufgrund der Isolationsschicht ist es unmöglich, das zur Verfügung stehende Wickelfenster vollständig mit Kupferquerschnitt auszufüllen. Wie hoch der Anteil des Kupferquerschnittes ist, der im Wickelfenster untergebracht werden kann, läßt sich durch den sogenannten Wickelfüllfaktor beschreiben /19/:

$$\text{Wickelfüllfaktor} = \frac{\text{Kupferquerschnitt ohne Isolierung}}{\text{Wickelfenster}} = \frac{N \cdot \pi \cdot d_{\text{nom}}^2}{4 \cdot BK \cdot HK} \quad (3.1)$$

Da der Anteil der Isolation am Gesamtquerschnitt des Kupferlackdrahtes vornehmlich vom Leiternenddurchmesser abhängt, wird auch der Wickelfüllfaktor stark vom Leiterdurchmesser beeinflusst. Dies ist deutlich in Bild 19 zu erkennen, worin das maßstäbliche Verhältnis von Außen- zu Blankdrahtdurchmesser zweier unterschiedlich starker Drähte dargestellt ist.

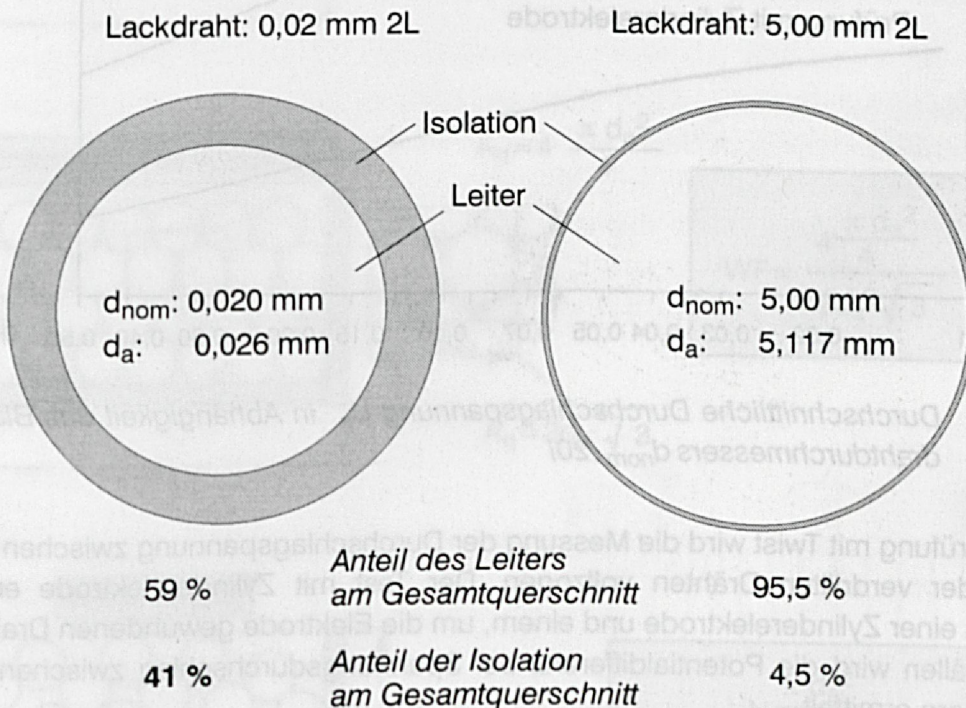


Bild 19: Isolationsanteil am Gesamtquerschnitt verschieden starker Kupferlackdrähte /20/

Je dünner der Draht ist, desto größer ist dabei der Anteil der Isolation am Gesamtquerschnitt. Infolgedessen nimmt mit abnehmender Drahtstärke auch der theoretisch maximal erreichbare Wickelfüllfaktor ab.

Die Dicke der Isolation beeinflusst, neben dem Drahtdurchmesser, der Einsatztemperatur der gewickelten Spule und dem Lacktyp, entscheidend die Durchschlagsspannung des Lackdrahtes /20/.



Die Durchschlagsspannung  $U_D$  bildet sich aus:

$$U_D = t_l \cdot U_\mu \quad (3.2)$$

wobei  $t_l = d_a - d_{nom}$  die Lackzunahme und  $U_\mu$  die Durchschlagsspannung pro  $\mu m$  Isolierstärke gemäß Bild 20 sind.

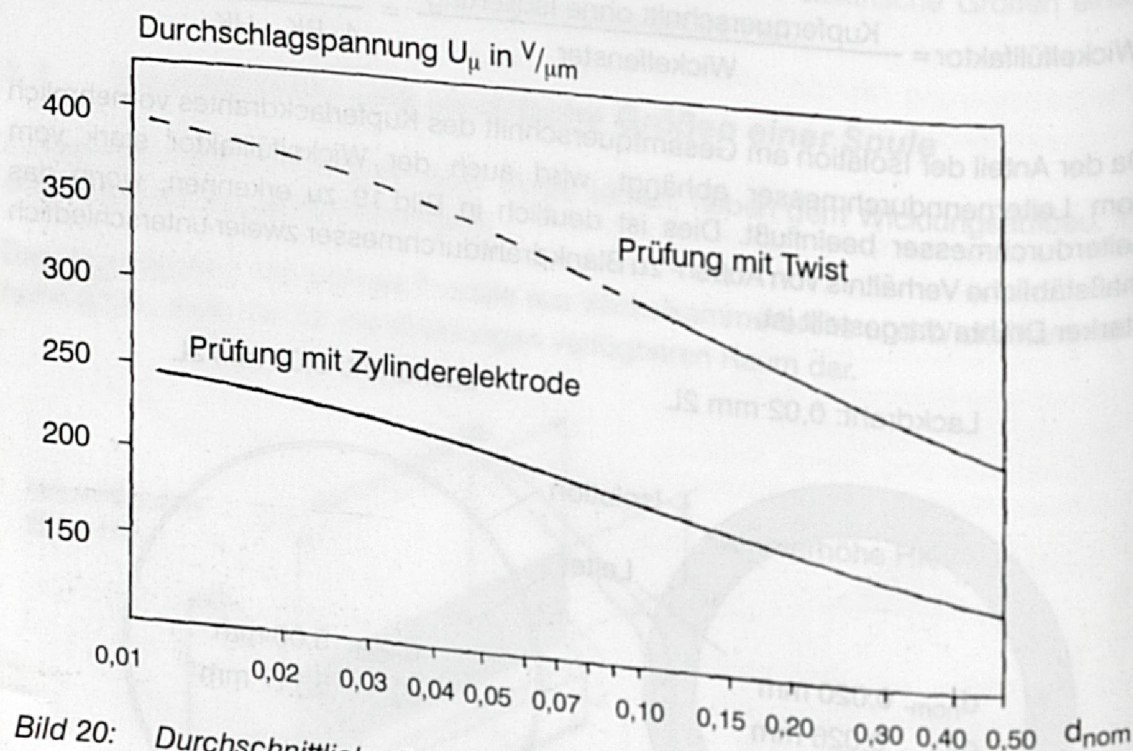


Bild 20: Durchschnittliche Durchschlagsspannung  $U_\mu$  in Abhängigkeit des Blankdrahtdurchmessers  $d_{nom} / 20$

Bei der Prüfung mit Twist wird die Messung der Durchschlagsspannung zwischen zwei miteinander verdrehten Drähten vollzogen. Der Test mit Zylinderelektrode erfolgt zwischen einer Zylinderelektrode und einem, um die Elektrode gewundenen Draht. In beiden Fällen wird die Potentialdifferenz bei Spannungsdurchschlag zwischen den Prüfpartnern ermittelt.

Neben dem Begriff Wickelfüllfaktor wird, im Zusammenhang mit den geometrischen Größen einer Spule, der Begriff Wickelfaktor verwendet.

$$\text{Wickelfaktor (WF)} = \frac{\text{Drahtquerschnitt incl. Isolation}}{\text{Wickelfenster}} = \frac{N \cdot \pi \cdot d_a^2}{4 \cdot BK \cdot HK} \quad (3.3)$$

Wie der Wickelfüllfaktor, so ist auch der Wickelfaktor sehr stark vom letztendlichen Windungs- bzw. Lagenaufbau abhängig.

Bei der sogenannten Lagenwicklung liegen die einzelnen Windungen dicht an dicht nebeneinander. Zwischen den einzelnen Lagen erfolgt eine Zwischen- (Lagen-) isolie-



ung aus Papier oder Kunststoffolie, welche in der in Bild 21 gezeigten Rechnung zur Bestimmung des Wickelfaktors unberücksichtigt bleibt. Die Lagenisolation ist notwendig, da sonst die Windungen der oberen Lage in die Zwischenräume der darunterliegenden Windungen abgleiten würden. Das ist durch die herrschende Drahtzugkraft bedingt, durch die der Draht das Bestreben hat, sich dem kleinstmöglichen Umfang anzupassen.

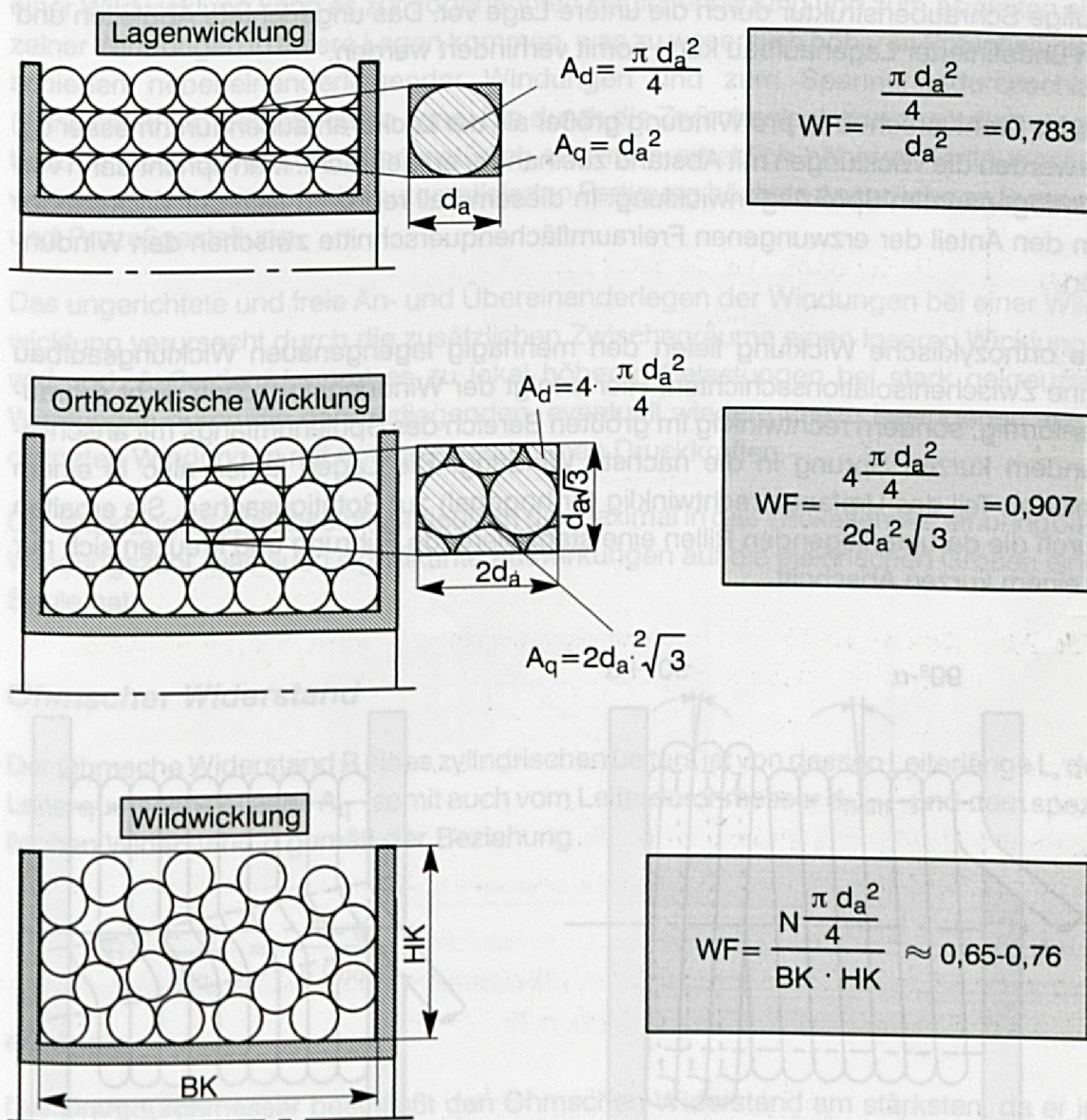


Bild 21: Wickellagenaufbau und zugehöriger Wickelfaktor

Wenn die untere Lage von links nach rechts als linksgängige Schraubenlinie gewickelt wurde, wird durch die Vorschubumkehr der Drahtverlegung am rechten Flansch die folgende Lage als rechtsgängige Schraubenlinie nach links gewickelt.



Das Bestreben der Windungen ist, sich in die Rille der darunter befindlichen Lage legen zu wollen. Dies ist aber durch die unterschiedliche Gängigkeit nicht über die ganze Kammerbreite möglich. Deshalb kommt es zu einem unregelmäßigen Wicklungsaufbau, der sogenannten Wildwicklung.

Mit Hilfe von Zwischenisolationsschichten aus Papier- oder Kunststoffolien lassen sich mehrlagig lagengenaue Wicklungsaufbauten realisieren. Dabei liegt durch die übertragende Wirkung der Zwischenisolation ein quasi "glatter" Untergrund und keine gegenläufige Schraubenstruktur durch die untere Lage vor. Das ungerichtete Abgleiten und ein undefinierter Lagenaufbau kann somit verhindert werden.

Ist der Drahtvorschub  $v_d$  pro Windung größer als der Lackdrahtaußendurchmesser  $d_a$ , so werden die Wicklungen mit Abstand zueinander aufgebracht. Man spricht dann von der sogenannten Spreizlagenwicklung. In diesem Fall reduziert sich der Wickelfaktor um den Anteil der erzwungenen Freiraumflächenquerschnitte zwischen den Windungen.

Die orthozyklische Wicklung liefert den mehrlagig lagengenauen Wicklungsaufbau ohne Zwischenisolationsschichten. Hier erfolgt der Windungsfortschritt nicht schraubenförmig, sondern rechtwinklig im größten Bereich des Spulenumfangs mit anschließendem kurzen Sprung in die nächste Windung. Die Lagen laufen also in einem weiteren Teil des Umfangs rechtwinklig (orthogonal) zur Rotationsachse. Sie erhalten durch die darunterliegenden Rillen eine stabilisierende Führung und kreuzen sich nur in einem kurzen Abschnitt.

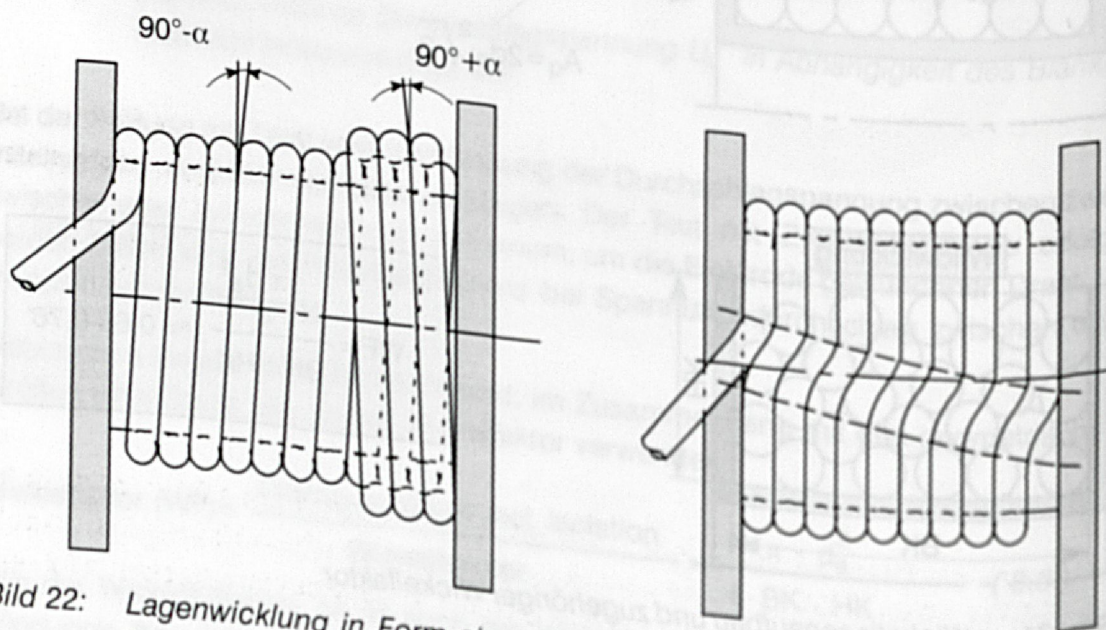


Bild 22: Lagenwicklung in Form einer Schraubenlinie (links) und orthozyklischer Wicklungsaufbau (rechts)



Realisierbar ist ein derartiger Wicklungsaufbau beispielsweise mit Hilfe einer rechtwinklig zur Spulenachse aufgetragenen Rille am Umfang des Spulenkörpers, die den Draht dementsprechend in die orthozyklische Bahn zwingt. Der Rillenabstand muß dabei mindestens so groß wie der maximale Außendurchmesser des verwendeten Drahtes sein.

Gründe für einen lagengenauen oder orthozyklischen Wicklungsaufbau sind zum Beispiel erhöhte Anforderungen an die Hochspannungsfestigkeit der Erzeugnisse. Bei einer Wildwicklung kann es zur sogenannten Häufchenbildung und zum Abgleiten einzelner Windungen in tiefere Lagen kommen, was zu wesentlich höheren Potentialunterschieden nebeneinanderliegender Windungen und zum Spannungsdurchschlag (Kurzschluß) im Betrieb führen kann. Die durch die Zwischenisolation zusätzlich eingebrachte Isolationswirkung führt natürlich zu einem erheblich höheren Fertigungsaufwand und stellt gerade in der automatisierten Fertigung höchste Ansprüche an Systeme und Prozeßgestaltung.

Das ungerichtete und freie An- und Übereinanderlegen der Windungen bei einer Wildwicklung verursacht durch die zusätzlichen Zwischenräume einen loseren Wicklungsverbund. Außerdem kommt es zu lokal höheren Belastungen bei stark gekreuzten Windungen durch die darüberliegenden, eventuell wieder nahezu lagengenau angeordneten Windungen mit entsprechend hohen Druckkräften.

Der Wicklungsaufbau beeinflusst deutlich die maximal in das Wickelfenster einbringbare Windungszahl, was auch signifikante Auswirkungen auf die elektrischen Größen einer Spule hat.

### Ohmscher Widerstand

Der Ohmsche Widerstand  $R$  eines zylindrischen Leiters ist von dessen Leiterlänge  $L$ , der Leiterquerschnittsfläche  $A_q$  - somit auch vom Leiterdurchmesser  $d_{nom}$  - und dem spezifischen Widerstand  $\varrho$  gemäß der Beziehung

$$R = \frac{L \cdot \varrho}{A_q} = \frac{4 \cdot L \cdot \varrho}{\pi \cdot d_{nom}^2} \quad (3.4)$$

abhängig.

Der Drahtdurchmesser beeinflusst den Ohmschen Widerstand am stärksten, da er im Gegensatz zu den anderen Größen quadratisch eingeht. Deshalb können Drahtdurchmesserschwankungen zu erheblichen Abweichungen der Spulenwiderstände führen.



Eine Verkleinerung des Leiterdurchmessers von  $d_{\text{nom}0}$  auf  $d_{\text{nom}1}$  führt zu einer Reduzierung der stromdurchflossenen Fläche und somit zu einer Erhöhung des Ohmschen Widerstandes:

$$\Delta R = R_1 - R_0 = \frac{4L_1 \cdot \rho}{\pi \cdot d_{\text{nom}1}^2} - \frac{4L_0 \cdot \rho}{\pi \cdot d_{\text{nom}0}^2} \quad (3.5)$$

Bei einer mehrlagigen Wicklung geht eine Durchmesserverkleinerung mit einer Verminderung der Windungslänge - bei gleichbleibender Windungszahl - einher, da sich die Windungen enger um den Kern legen.

Diese beiden gegenläufigen Tendenzen bestimmen den Ohmschen Widerstand maßgeblich. Der Einfluß der vom elektrischen Strom durchflossenen Querschnittsfläche ist größer, daraus erfolgt durch eine zunehmende Verkleinerung des Leiterdurchmessers eine Widerstandserhöhung. Die Veränderung des spezifischen Widerstandes, z.B. durch Gefügeveränderungen ist so gering, daß sie für Abschätzungen bei hinreichender Genauigkeit vernachlässigt werden kann.

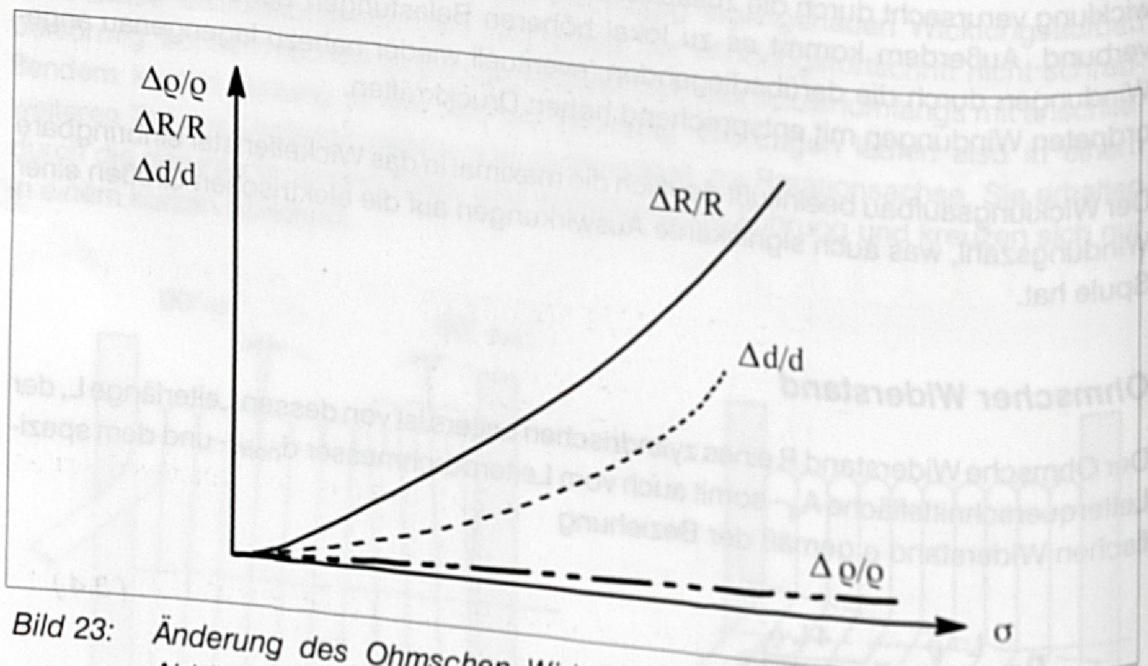


Bild 23: Änderung des Ohmschen Widerstandes und deren Einflussfaktoren in Abhängigkeit der Spannung nach [3]



### Induktivität und Ampèrewindungszahl

Die Induktivität einer geraden Spule läßt sich nach /21/ wie folgt berechnen:

$$L_{\text{ind.}} = 10^{-6} \cdot N^2 \cdot 2 \cdot RK_a \cdot \left( \frac{RK_a}{BK + HK} \right)^n \quad \text{in H} \quad (3.6)$$

$$n = 0,75 \quad \text{für} \quad 0 < \frac{RK_a}{BK + HK} < 1$$

$$n = 0,50 \quad \text{für} \quad 1 < \frac{RK_a}{BK + HK} < 3$$

wobei BK,  $RK_a$  und HK sich gemäß Bild 24 ergeben.

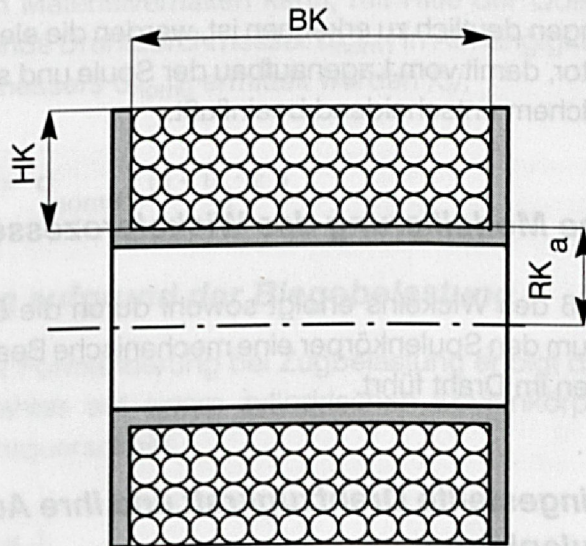


Bild 24: Relevante Spulenabmessungen zur Bestimmung der Induktivität einer Spule /21/

Die Kraft im Magnetfeld, die beispielsweise zur Abschätzung der Ankerkräfte an Relais oder Schützen herangezogen werden kann, errechnet sich zu:

$$F_M = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} \quad \text{in N} \quad (3.7)$$

wobei sich die magnetische Flußdichte zu

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (3.8)$$



und die magnetische Feldstärke  $H$  zu

$$H = \frac{N \cdot J}{l_f} \quad l_f : \text{mittlere Feldlinienlänge} \quad (3.9)$$

ergeben.

Vereinfachend wird zur Auslegung von Spulen oftmals auch die Ampèrewindungszahl herangezogen, die sich aus dem Produkt der von der Stromstärke  $J$  durchflossenen Windungszahl  $N$  ergibt:

$$NJ = N \cdot J \quad (3.10)$$

Wie aus diesen Ausführungen deutlich zu erkennen ist, werden die elektrischen Ergebnisgrößen vom Wickelfaktor, damit vom Lagenaufbau der Spule und somit letztendlich vom Wickelprozeß als solchem entscheidend beeinflusst.

### 3.2 Mathematische Modellierung des Wickelprozesses

Beim Formgebungsprozeß des Wickelns erfolgt sowohl durch die Drahtzugkraft als auch durch eine Biegung um den Spulenkörper eine mechanische Beanspruchung des Drahtes, die zu Dehnungen im Draht führt.

#### 3.2.1 Die statisch eingestellte Drahtzugkraft und ihre Auswirkung auf Draht und Spulenkörper

Die durch die Drahtzugkraft aufgebrachte Spannung in Richtung der Drahtlängsachse ergibt, bei ideal-elastischem Materialverhalten nach dem HOOKE'schen Stoffgesetz, folgende Dehnung  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.11)$$

Wird die 0.2%-Dehngrenze des Kupferwerkstoffs überschritten, beginnt die plastische Formänderung des Drahtes (Bild 25). Die plastische Dehnung in Drahtlängsrichtung entsteht analog zur elastischen Dehnung. Allerdings tritt an Stelle des Elastizitätsmoduls  $E$  der Plastizitätsmodul  $D$ . Dem Spannungs-Dehnungsdiagramm ist zu entnehmen, daß im plastischen Bereich der Plastizitätsmodul keine Konstante, sondern eine Funktion der Dehnung ist.



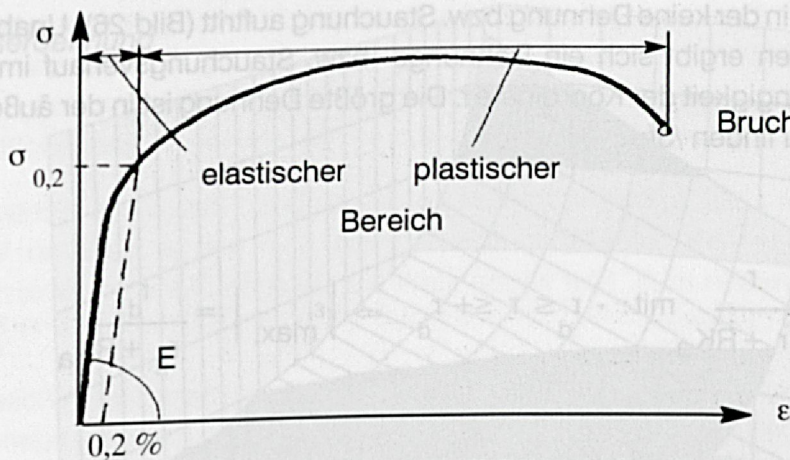


Bild 25: Spannungs-Dehnungsdiagramm für E-CU/3/

Eine Dehnung in Leiterlängsrichtung bewirkt eine Zunahme der Drahtlänge um  $\Delta l$ . Bei ideal-elastischem Materialverhalten kann, mit Hilfe der Querkontraktionszahl  $\nu_d$ , der sich neu einstellende Drahtdurchmesser  $d_{\text{nom1}}$  in Abhängigkeit der Dehnung  $\epsilon$  und des Ausgangsdurchmessers  $d_{\text{nom0}}$  ermittelt werden [3/].

$$d_{\text{nom1}} = d_{\text{nom0}} \cdot (1 - \nu_d \cdot \epsilon) \quad (3.12)$$

### Formänderung aufgrund der Biegebelastung

Im Gegensatz zur Formänderung bei Zugbelastung erfolgt durch eine reine Biegeumformung des Drahtes auf einem zylindrischen Spulenkörper eine unterschiedliche Dehnung im Drahtquerschnitt.

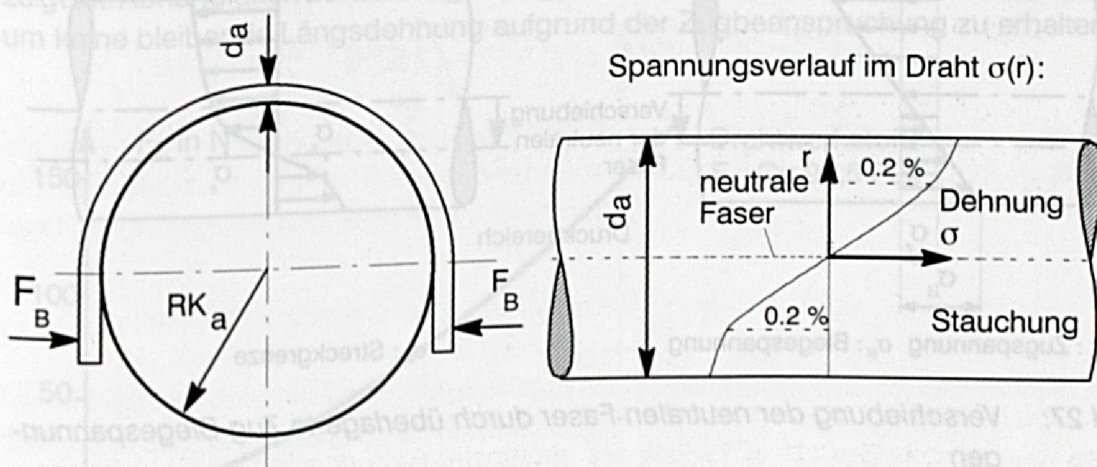


Bild 26: Elastische und plastische Verformung bei reiner Biegebeanspruchung

Die dem Spulenkörper näheren Fasern ( $r < 0$ ) werden gestaucht, bzw. die weiter entfernten Fasern ( $r > 0$ ) gedehnt. In der Mitte des Drahtquerschnitts befindet sich die



neutrale Faser, in der keine Dehnung bzw. Stauchung auftritt (Bild 26). Unabhängig vom Materialverhalten ergibt sich ein Dehnungs- bzw. Stauchungsverlauf im Leiterquerschnitt in Abhängigkeit der Koordinate  $r$ . Die größte Dehnung ist in der äußersten Faser des Drahtes zu finden /3/:

$$\varepsilon(r) = \frac{r}{r_d + RK_a} \quad \text{mit: } -r_d \leq r \leq +r_d \Rightarrow |\varepsilon_{\max.}| = \frac{r_d}{r_d + RK_a} \quad (3.13)$$

### Formänderung aufgrund überlagerter Zug-Biegebelastung

Die für den Wickelprozeß charakteristische Zug-Biegebelastung führt zu einer Überlagerung der Zug- bzw. Biegespannungen. In dem durch Biegung gedehnten Bereich des Drahtes, entsteht durch eine zusätzlich aufgebrachte Zugspannung eine Erhöhung der resultierenden Gesamtspannung.

Im Druckbereich hingegen wirkt die zusätzlich aufgebrachte Zugspannung der durch die Biegung hervorgerufenen Druckspannung entgegen. Daraus ergibt sich eine Verschiebung der neutralen Faser in Richtung der Druckzone (Bild 27).

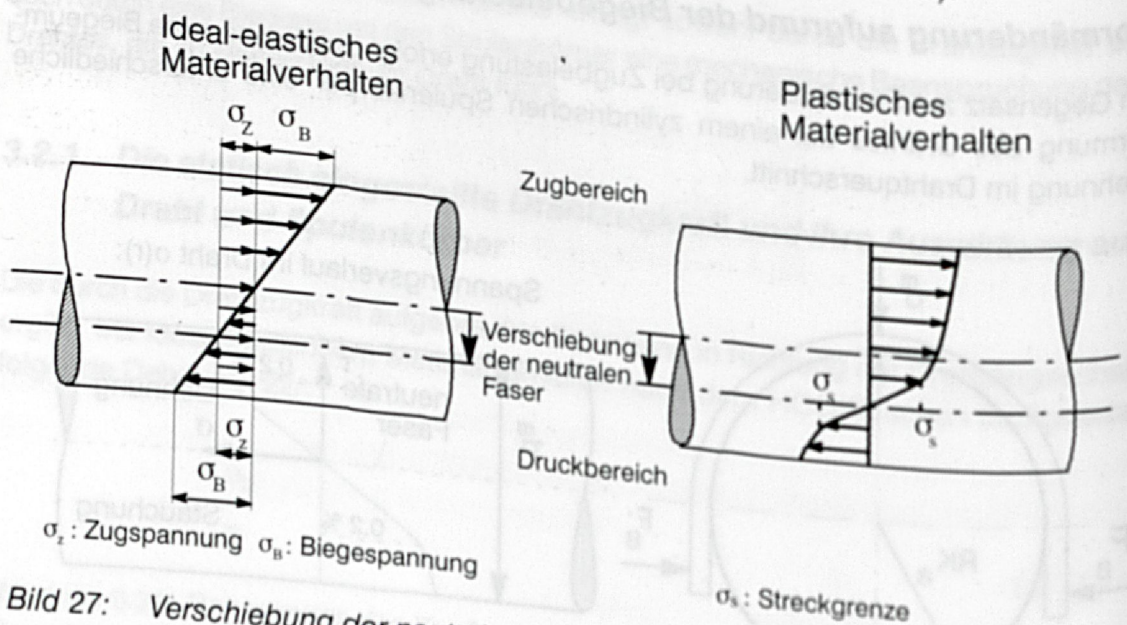


Bild 27: Verschiebung der neutralen Faser durch überlagerte Zug-Biegespannungen

Durch die Überlagerung von Biege- und Zugspannungen können zum Teil beträchtliche Außenfaserdehnungen auftreten, die hohe Ansprüche an die Haftung und Dehnbarkeit des Isolationslackes stellen /23/.



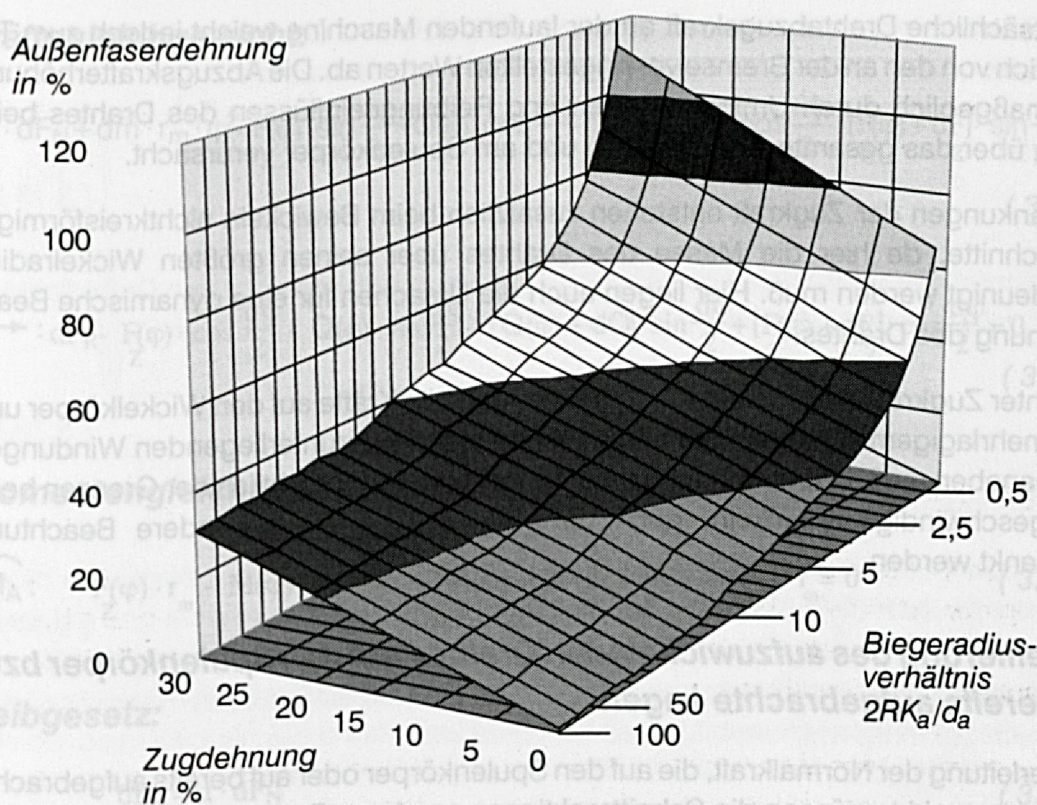


Bild 28: Außenfaserdehnung des Lackdrahtes als Funktion des Biegeradiusverhältnisses und der Dehnung durch Zugbelastung [23]

Um Spulen von gleichmäßiger mechanischer Festigkeit, einem definierten Ohmschen Widerstand und optimaler Wickelraumfüllung zu erhalten, ist das genaue Einhalten der Drahtspannung während des Wickelvorgangs von entscheidender Bedeutung. Bild 29 zeigt die Abhängigkeit der zulässigen Zugkraft vom Drahtdurchmesser bei Kupferdraht, um keine bleibende Längsdehnung aufgrund der Zugbeanspruchung zu erhalten.

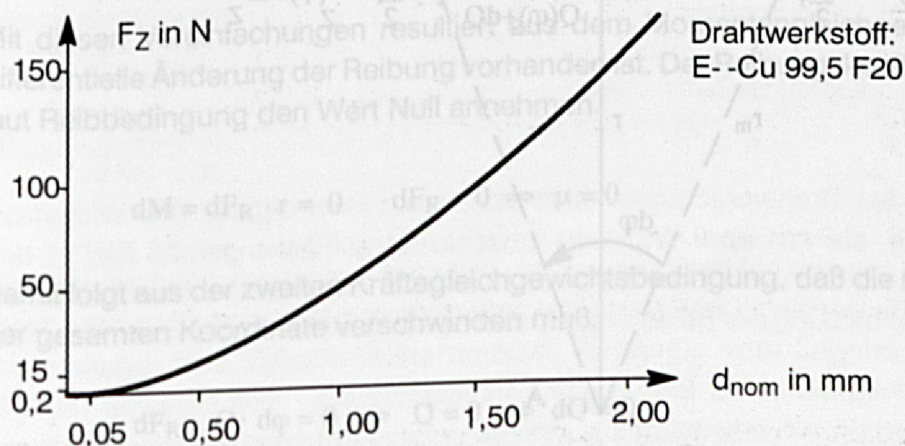


Bild 29: Empfohlene Wickeldrahtzugkraft in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers [25]



Die tatsächliche Drahtabzugskraft an der laufenden Maschine weicht jedoch zum Teil erheblich von den an der Bremse voreingestellten Werten ab. Die Abzugskrafterhöhung wird maßgeblich durch Umformarbeiten und Reibungseinflüssen des Drahtes beim Abzug über das gesamte Ablaufsystem und am Spulenkörper verursacht.

Schwankungen der Zugkraft entstehen zusätzlich beim Bewickeln nichtkreisförmiger Querschnitte, da hier die Masse des Drahtes über seinen größten Wickelradius beschleunigt werden muß. Hier liegen auch die Ursachen für eine dynamische Beanspruchung des Drahtes.

Der unter Zugkraft aufgebrachte Draht übt seinerseits Kräfte auf den Wickelkörper und - bei mehrlagigem Wickelaufbau - auch Kräfte auf die darunterliegenden Windungen aus. Daneben muß, insbesondere bei der Untersuchung hinsichtlich der Grenzen beim Hochgeschwindigkeitswickeln, auch dem Fliehkrafteinfluß besondere Beachtung geschenkt werden.

### Modellierung des aufzuwickelnden Drahtes auf den Spulenkörper bzw. auf bereits aufgebrachte Lagen

Zur Herleitung der Normalkraft, die auf den Spulenkörper oder auf bereits aufgebrachte Windungen wirkt, müssen die Schnittreaktionen an einem Drahtelement ermittelt und anschließend die Gleichgewichtsbedingungen aufgestellt werden. Mit den zwei Kräftegleichgewichten, dem Momentengleichgewicht und dem COULOMB'schen Reibungsgesetz, stehen vier Gleichungen zur Berechnung der Normalkraft zur Verfügung.

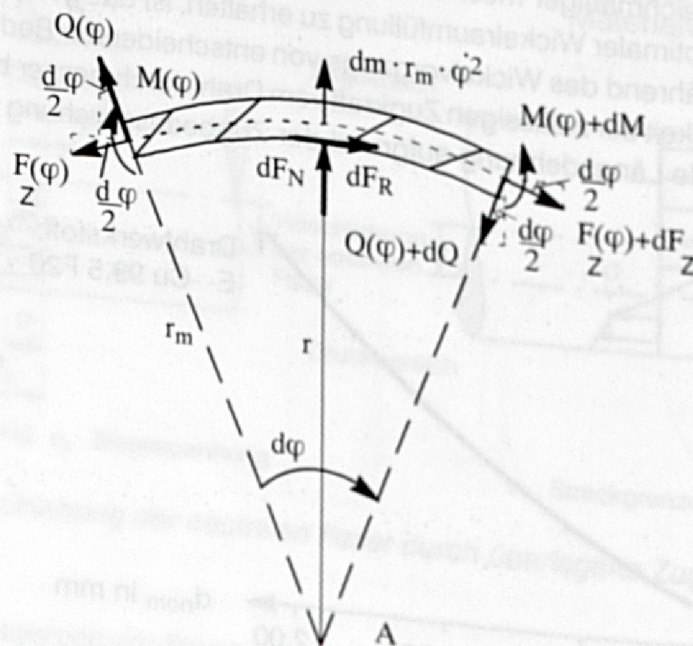


Bild 30: Schnittreaktionen am Drahtelement zur Ermittlung der Belastungen auf den Spulenkörper bzw. auf bereits aufgebrachte Windungen



**Kräftegleichgewicht:**

$$\Sigma \uparrow: dF_N + dm \cdot r_m \cdot \dot{\varphi}^2 - \frac{F(\varphi)}{Z} \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + Q(\varphi) \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} - [Q(\varphi) + dQ] \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} - \frac{[F(\varphi) + dF]}{Z} \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (3.14)$$

$$\Sigma \rightarrow: dF_R - \frac{F(\varphi)}{Z} \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} - Q(\varphi) \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - [Q(\varphi) + dQ] \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + \frac{[F(\varphi) + dF]}{Z} \cdot \cos \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (3.15)$$

**Momentengleichgewicht um A:**

$$\overset{\curvearrowleft}{M}_A: \frac{F(\varphi)}{Z} \cdot r_m - M(\varphi) - dF_R \cdot r + [M(\varphi) + dM] - \frac{[F(\varphi) + dF]}{Z} \cdot r_m = 0 \quad (3.16)$$

**Reibgesetz:**

$$dF_R = \mu \cdot dF_N \quad (3.17)$$

Da die Drahtzugkraft  $F$  und das Moment  $M$  von der Koordinate  $\varphi$  unabhängige Größen sind, haben ihre differentiellen Größen den Wert 0.

$$\frac{dF}{Z} = 0; dM = 0$$

Eine Linearisierung bzw. eine Vernachlässigung differentieller Glieder höherer Ordnung ergibt:

$$\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2} \quad \text{und} \quad \cos \frac{d\varphi}{2} \approx 1 \quad \text{bzw.} \quad dQ \cdot d\varphi = 0$$

Mit diesen Vereinfachungen resultiert aus dem Momentengleichgewicht, daß keine differentielle Änderung der Reibung vorhanden ist. Der Reibungskoeffizient muß daher laut Reibbedingung den Wert Null annehmen.

$$dM = dF_R \cdot r = 0 \quad dF_R = 0 \Rightarrow \mu = 0$$

Damit folgt aus der zweiten Kräftegleichgewichtsbedingung, daß die Querkraft entlang der gesamten Koordinate verschwinden muß.

$$dF_R - Q \cdot d\varphi = 0 \Rightarrow Q = 0 \Rightarrow dQ = 0$$



Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse läßt sich aus der ersten Kräftegleichgewichtsbedingung die pro Windung wirkende Normalkraft ableiten.

$$dF_N + dm \cdot r_m \cdot \dot{\varphi}^2 - F_z \cdot d\varphi = 0 \quad (3.18)$$

Das differentielle Massenelement läßt sich wie folgt in Abhängigkeit von Drahtdicke  $\delta$ , Drahtdurchmesser  $d_a$  und dem mittleren Windungsradius  $r_m$  ausdrücken:

$$dm = \delta \cdot d_a^2 / 4 \cdot \pi \cdot r_m \cdot d\varphi \quad (3.19)$$

Nach Trennung der Variablen und anschließender Integration folgt:

$$F_N(\varphi) = (F_z - \delta \cdot d_a^2 / 4 \cdot \pi \cdot r_m^2 \cdot \dot{\varphi}^2) \cdot \varphi + C \quad (3.20)$$

Da jedoch bei einem Umschlingungswinkel von 0 keine Normalkraft herrschen darf, muß auch die Integrationskonstante C verschwinden.

So ergibt sich, da eine Windung einen Umschlingungswinkel von  $2\pi$  besitzt, eine Normalkraft pro Windung von:

$$F_N = 2\pi \cdot (F_z - \delta \cdot d_a^2 / 4 \cdot \pi \cdot r_m^2 \cdot \dot{\varphi}^2) \quad (3.21)$$

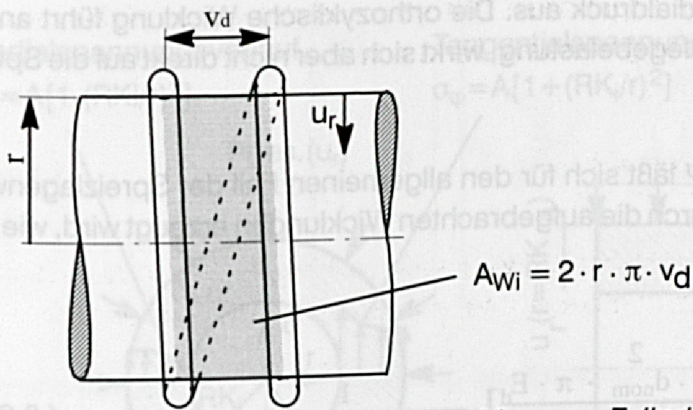
Mit dieser Beziehung läßt sich die kritische Drehzahl abschätzen, bei der keine Normalkraft mehr zwischen dem Spulenkörper und der Windung bzw. zwischen den Windungen herrscht.

$$\dot{\varphi}_{\text{krit.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_z}{\delta \cdot d_a^2 \cdot \pi \cdot r_m^2}} \quad (3.22)$$

In Abhängigkeit des Drahtvorschubes stellt sich, nach Beendigung des Wickelvorganges ( $d\varphi/dt=0$ ), die von einer Wicklung umschlossene Fläche gemäß Bild 31 dar. Daraus ergibt sich für den Druck der Quotient aus wirkender Kraft pro umschlossener Fläche. Er ist zur Ermittlung der Belastung auf den Spulenkörper und dessen Einschnürung erforderlich.

$$p_{\text{cons.}} = \frac{F_N}{r \cdot v_d \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{F_z}{r \cdot v_d} \quad (3.23)$$





**Bild 31:** Die von einer Windung umschlossene Zylinderfläche zur Abschätzung des Radialdruckes auf den Spulenkörper bzw. auf bereits aufgebrachte Lagen

Durch die Einschnürung des Spulenkörpers  $u_r$  nimmt die elastische Spannung in der Windung und somit auch die herrschende Drahtzugkraft ab. Die Windung kann sich theoretisch maximal um den elastischen Anteil der Drahtdehnung zusammenziehen. Die dann letztendlich im Draht herrschende Zugkraft  $F_{\text{res}}$  pro Windung ergibt sich daher aus der beim Wickeln wirkenden Drahtzugkraft  $F_Z$  und eines elastischen Anteils. Dieser errechnet sich aus der Verschiebung  $u_r$ , dem Elastizitätsmodul  $E_d$  des Drahtwerkstoffes, der Leiterquerschnittsfläche  $A_d$  und dem wirksamen Radius  $r$ .

$$F_{\text{res}} = F_Z - F_{\text{el}} \quad \text{mit} \quad F_{\text{el}} = \epsilon_{\text{el}} \cdot E_d \cdot A_q \quad \text{und} \quad \epsilon_{\text{el}} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot u_r}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{u_r}{r}$$

Mit der resultierenden Drahtzugkraft pro Windung

$$F_{\text{res}} = F_z - \frac{u_r}{r} \cdot E_d \cdot A_q$$

folgt für den resultierenden Druck  $P_{\text{res}}$  pro Windung nach Gl. ( 3.23 ) und einigen Vereinfachungen:

$$P_{\text{res}} = \frac{F_{\text{res}}}{(r - u_r) \cdot v_d} \quad r \gg u_r \rightarrow P_{\text{res}} = \frac{F_{\text{res}}}{r \cdot v_d} \rightarrow P_{\text{res}} \approx \left( F_z - \frac{u_r \cdot \pi \cdot d_a^2}{4 \cdot r} \cdot E_d \right) \cdot \frac{1}{r \cdot v_d} \quad (3.24)$$

Zur Abschätzung des Gesamtdruckes werden die Einzeldrücke pro Windung aufsummiert, wobei die Annahme getroffen wird, daß jede Lage für die jeweils darüberliegende Lage wieder eine Zylinderfläche darstellt. Abhängig vom Lagenaufbau (vgl. hierzu Bild 21) ergeben sich unterschiedliche Drücke und Spulenkörperbelastungen. Dies resultiert aus differierenden wirksamen Wickelradien und der Tatsache, daß sich bei einer orthozyklischen Wicklung die Drahtzugkraft in eine radiale und eine axiale Komponente aufteilt. Im Gegensatz dazu wirkt sich bei einer Lagenwicklung die Drahtzugkraft



in vollem Umfang auf den Radialdruck aus. Die orthozyklische Wicklung führt an den Flanschen zu einer erhöhten Biegebelastung, wirkt sich aber nicht direkt auf die Spulenkörpereinschnürung aus.

Mit der Gesamtlagenanzahl  $\Psi$  läßt sich für den allgemeinen Fall der Spreizlagenwicklung der Gesamtdruck, der durch die aufgebrachten Wicklungen erzeugt wird, wie folgt angeben:

$$P_{\text{ges.}} = \sum_{i=0}^{\Psi-1} \left[ F_z - \frac{u_r \cdot d_{\text{nom}}^2 \cdot \pi \cdot E_d}{4 \cdot (RK_a + d_a \cdot i)} \right] \cdot \frac{1}{(RK_a + d_a \cdot i) \cdot v_d} \quad (3.25)$$

Mit den Konstanten  $c_1 = \frac{F_z}{v_d} \cdot \sum_{i=0}^{\Psi-1} \frac{1}{(RK_a + d_a \cdot i)}$

und  $c_2 = \frac{d_{\text{nom}} \cdot \pi \cdot E_d}{4 \cdot v_d} \cdot \sum_{i=0}^{\Psi-1} \frac{1}{(RK_a + d_a \cdot i)^2}$

stellt sich der Gesamtdruck in Abhängigkeit der Einschnürung in vereinfachter Form dar:

$$P_{\text{ges.}}(u_r) = c_1 - c_2 \cdot u_r \quad (3.26)$$

Mit der mathematischen Beschreibung des durch die Wicklung auf den Spulenkörper aufgebrachten radialen Außendruckes, können nun die mechanischen Spannungen bzw. Verschiebungen in einem Spulenkörper näherungsweise ermittelt werden. Als Randbedingungen für den allgemeinen Fall eines zylindrischen Spulenkörpers, dessen Flansche unberücksichtigt bleiben, wird nur ideal-elastisches Materialverhalten zugelassen. Desweiteren wird angenommen, daß stets ebener Spannungszustand herrscht. In dem unter radialen Außendruck stehenden Spulenkörper herrschen Radial- bzw. Tangentialspannungen, die gemäß den Gleichungen (3.27) und (3.28) angegeben werden können, wobei die beiden Konstanten A und B zur Anpassung an die Randbedingungen dienen [24/.

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2} \quad \sigma_\varphi(r) = A + \frac{B}{r^2} \quad (3.27) \quad (3.28)$$

Aus den Spannungsverläufen kann wiederum der Verschiebungsverlauf abgeleitet werden. Der Elastizitätsmodul  $E_{SK}$  und die Querkontraktionszahl  $\nu_{SK}$  sind die den Spulenwerkstoff charakterisierenden Materialkonstanten.



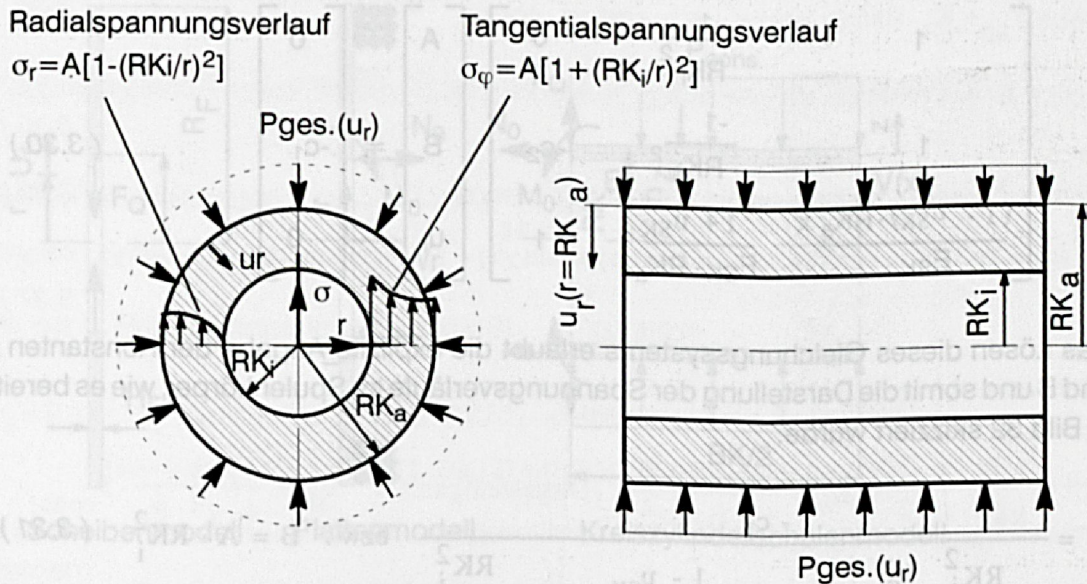


Bild 32: Durch radialen Außendruck der Wicklung hervorgerufener Radial- bzw. Tangentialspannungsverlauf im Spulenkörper

$$u_r(r) = \frac{1 + \nu_{SK}}{E_{SK}} \cdot \left( \frac{1 - \nu_{SK}}{1 + \nu_{SK}} \cdot A \cdot r + \frac{B}{r} \right) \quad (3.29)$$

Zur Anpassung der Konstanten A und B müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- Da keine Radialspannung an einer freien Oberfläche auftreten kann, folgt:

$$\sigma_r(r = RK_i) = 0$$

- Die Radialspannung am Spulenaußendurchmesser entspricht dem dort herrschenden äußeren Radialdruck:

$$\sigma_r(r = RK_a) = -P_{ges} = -c_1 + c_2 \cdot u_r$$

- Die den Radialdruck beeinflussende Verschiebung  $u_r$  entspricht der Spulenkörperverschiebung am Außendurchmesser:

$$U_r(r = RK_a) = -u_r$$

Daraus ergibt sich folgendes Gleichungssystem mit den drei Unbekannten A, B und  $u_r$ .



$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{RK_i^2} & 0 \\ 1 & \frac{-1}{RK_a^2} & -c_2 \\ \frac{(1 - \nu_{SK}) \cdot RK_a}{E_{SK}} & \frac{1 + \nu_{SK}}{E_{SK} \cdot RK_a} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Das Lösen dieses Gleichungssystems erlaubt die explizite Angabe der Konstanten A und B und somit die Darstellung der Spannungsverläufe im Spulenkörper, wie es bereits in Bild 32 skizziert wurde.

$$A = \frac{-c_1}{1 - \frac{RK_i^2}{RK_a^2} + \frac{c_2}{E_{SK}} (1 + \nu_{SK}) \cdot \left( \frac{1 - \nu_{SK}}{1 + \nu_{SK}} \cdot RK_a + \frac{RK_i^2}{RK_a} \right)} \quad \text{bzw.} \quad B = A \cdot RK_i^2 \quad (3.31)$$

Damit läßt sich auch die Spulenkörpereinschnürung in Abhängigkeit der beeinflussenden Faktoren mathematisch ausdrücken, was ein hilfreiches Instrument bei der Spulenkörperdimensionierung im Konstruktionsprozeß darstellt.

$$u_r(r = RK_i) = A \cdot \frac{(1 + \nu_{SK}) \cdot RK_i}{E_{SK}} \cdot \left( \frac{1 - \nu_{SK}}{1 + \nu_{SK}} + 1 \right) \quad (3.32)$$

Um für den Großteil aller Spulenwickelanwendungen die begrenzenden Flansche mitberücksichtigen zu können, muß das vorgestellte Modell dementsprechend erweitert werden. Dazu wird der Spulenkörper in Einzelsysteme gemäß Bild 33 aufgespaltet. Zu der bisher schon geltenden Bedingung, daß nur ideal-elastisches Materialverhalten zugelassen wird, kommt hinzu, daß der Spulenkörper eine dünnwandige Zylinderform aufweisen muß. Basierend auf der vereinfachenden Annahme, daß die Verschiebung der Kreiszyinderschale des Spulenkörpers unbeeinflußt durch die Existenz der Flansche erfolgt, wird der als konstant anzusehende Radialdruck ermittelt.



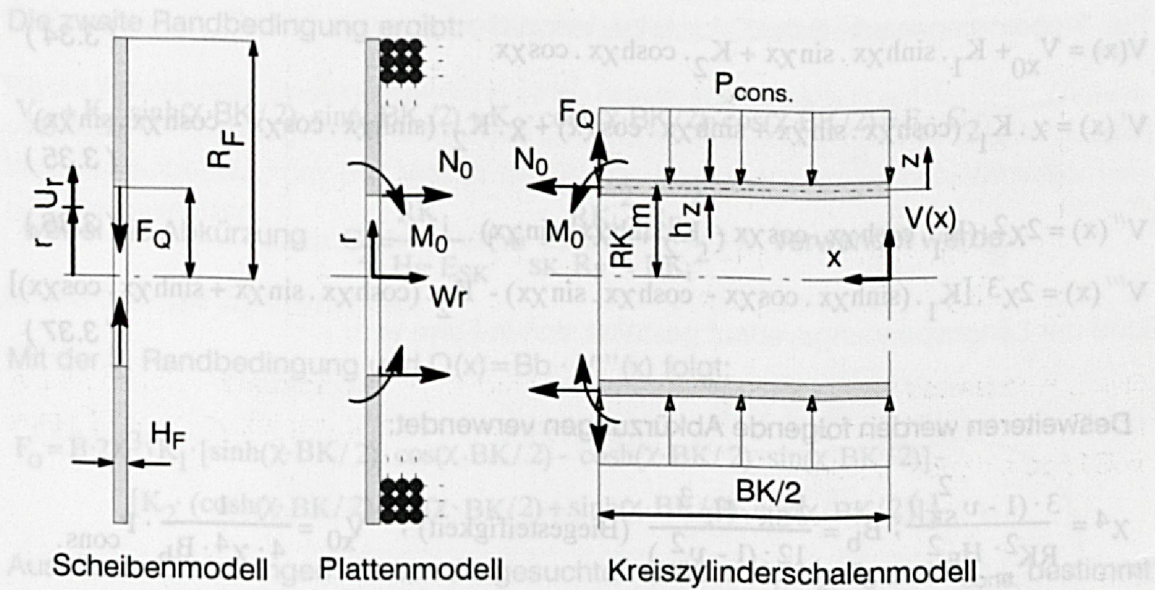


Bild 33: Der in Teilmodellen aufgesplante Spulenkörper zur Berücksichtigung der begrenzenden Flansche bei der Ermittlung der Spulenkörperbelastungen

### Scheibenmodell:

Da im Scheibenmodell ebener Spannungszustand herrscht, entsteht durch die auf den Umfang bezogene Querkraft  $F_Q$  die Radialverschiebung  $u_r(r=RK_i)$  am Scheibeninnenrand /24/.

$$u_r(r=RK_i) = \frac{RK_i}{E_{SK}} \cdot [\alpha_{\varphi}(r=RK_i) - v_{SK} \cdot \sigma_r(r=RK_i)]$$

$$\text{mit: } \sigma_r(r=RK_i) = \frac{F_Q}{H_F} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{\varphi}(r=RK_i) = - \frac{RK_i^2 + R_F^2}{R_F^2 - RK_i^2} \cdot \frac{F_Q}{H_F}$$

$$\text{Damit folgt: } u_r(r=RK_i) = \frac{F_Q \cdot RK_i}{H_F \cdot E_{SK}} \left( - \frac{RK_i^2 + R_F^2}{R_F^2 - RK_i^2} + v_{SK} \right) \quad (3.33)$$

### Zylinderschalenmodell:

Im Zylinderschalenmodell stellt sich folgender Verschiebungsverlauf  $V(x)$  mit den dazugehörigen Ableitungen in Abhängigkeit von  $x$ , der störungsfreien Verschiebung  $V_{x0}$  und den Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  ein.



$$V(x) = V_{x0} + K_1 \cdot \sinh \chi x \cdot \sin \chi x + K_2 \cdot \cosh \chi x \cdot \cos \chi x \quad (3.34)$$

$$V'(x) = \chi \cdot K_1 \cdot (\cosh \chi x \cdot \sin \chi x + \sinh \chi x \cdot \cos \chi x) + \chi \cdot K_2 \cdot (\sinh \chi x \cdot \cos \chi x - \cosh \chi x \cdot \sin \chi x) \quad (3.35)$$

$$V''(x) = 2\chi^2 \cdot (K_1 \cdot \cosh \chi x \cdot \cos \chi x - K_2 \sinh \chi x \cdot \sin \chi x) \quad (3.36)$$

$$V'''(x) = 2\chi^3 \cdot [K_1 \cdot (\sinh \chi x \cdot \cos \chi x - \cosh \chi x \cdot \sin \chi x) - K_2 \cdot (\cosh \chi x \cdot \sin \chi x + \sinh \chi x \cdot \cos \chi x)] \quad (3.37)$$

Desweiteren werden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\chi^4 = \frac{3 \cdot (1 - \nu_{SK}^2)}{RK_m^2 \cdot H_F^2}; B_b = \frac{E_{SK} \cdot H_F^3}{12 \cdot (1 - \nu_{SK}^2)} \quad (\text{Biegesteifigkeit}); V_{x0} = \frac{1}{4 \cdot \chi^4 \cdot B_b} \cdot P_{\text{cons.}}$$

### Plattenmodell:

Die Kippung der Platte in Richtung des Momentes  $M_0$  wird durch die aufgebrachten Drahtwindungen verhindert. Deshalb muß im Zylinderschalenmodell die erste Ableitung an der Einspannstelle ( $BK/2$ ) den Wert Null haben. Ferner gilt für dieses Teilsystem, daß keine Längskraft  $N_0$  aufgebracht wird.

Zusammenfassend ergeben sich daraus folgende Randbedingungen:

1. Die 1. Ableitung der Verschiebung an der Übergangsstelle zum Flansch ist Null.  
 $V'(x=BK/2)=0$
2. An den Einspannstellen müssen die Verschiebungen  $V$  bzw.  $u_r$  übereinstimmen.  
 $V(x=BK/2)=u_r(r=RK_i)$
3. Die Querkraft muß an den Einspannstellen für das Scheibenmodell und das Zylinderschalenmodell den gleichen Wert besitzen.  
 $Q(x=BK/2)=F_0$
4. Die störungsfreie Verschiebung  $V_{x0}$  muß der Verschiebung  $V_1$  entsprechen, die mit Hilfe des auf der Scheibentheorie aufbauenden Berechnungsmodells bestimmt werden kann.  
 $V_{x0}=V_1$

Daraus folgt aus der 1. Randbedingung:

$$K_1 = -C_1 \cdot K_2 \quad \text{mit der Abkürzung:}$$

$$C_1 = \frac{\sinh(\chi \cdot BK/2) \cdot \cos(\chi \cdot BK/2) - \cosh(\chi \cdot BK/2) \sin(\chi \cdot BK/2)}{\cosh(\chi \cdot BK/2) \cdot \sin(\chi \cdot BK/2) + \sinh(\chi \cdot BK/2) \cdot \cos(\chi \cdot BK/2)}$$



Die zweite Randbedingung ergibt:

$$V_{x0} + K_1 \cdot \sinh(\chi \cdot BK/2) \cdot \sin(\chi \cdot BK/2) + K_2 \cdot \cosh(\chi \cdot BK/2) \cdot \cos(\chi \cdot BK/2) = F_0 \cdot C_2$$

wobei die Abkürzung  $C_2 = \frac{RK_i}{H_F \cdot E_{SK}} \cdot \left( v_{SK} - \frac{RK_i^2 + R_F^2}{R_F^2 - RK_i^2} \right)$  verwendet wurde.

Mit der 3. Randbedingung und  $Q(x) = B_b \cdot V'''(x)$  folgt:

$$F_0 = B \cdot 2\chi^3 \{ K_1 \cdot [\sinh(\chi \cdot BK/2) \cdot \cos(\chi \cdot BK/2) - \cosh(\chi \cdot BK/2) \cdot \sin(\chi \cdot BK/2)] - \\ [K_2 \cdot (\cosh(\chi \cdot BK/2) \cdot \sin(\chi \cdot BK/2) + \sinh(\chi \cdot BK/2) \cdot \cos(\chi \cdot BK/2))] \}$$

Aus diesen Gleichungen können die gesuchten Größen  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $F_0$  und  $P_{\text{cons.}}$  bestimmt werden.

$$K_2 = \frac{V_1}{-C_1 [2B_b \chi^3 C_2 (\text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda - \text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda) - \text{sh}\lambda \cdot \text{s}\lambda] - 2B_b \chi^3 C_2 (\text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda + \text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda) - \text{ch}\lambda \cdot \text{c}\lambda} \quad (3.38)$$

Dabei wurden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\sin(\chi \cdot BK/2) = \text{s}\lambda; \quad \sinh(\chi \cdot BK/2) = \text{sh}\lambda; \quad \cos(\chi \cdot BK/2) = \text{c}\lambda; \quad \cosh(\chi \cdot BK/2) = \text{ch}\lambda$$

$$\text{und} \quad C_1 = \frac{\text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda - \text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda}{\text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda + \text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda}$$

$$\text{Für den Druck ergibt sich damit} \quad P_{\text{cons.}} = 4 \cdot \chi^4 \cdot B_b \cdot V = 4 \cdot \chi^4 \cdot B_b \cdot V_1 \quad (3.39)$$

und für die Querkraft

$$F_0 = B_b \cdot 2 \cdot \chi^3 \cdot K_2 [-C_1 \cdot (\text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda - \text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda) - (\text{ch}\lambda \cdot \text{s}\lambda + \text{sh}\lambda \cdot \text{c}\lambda)] \quad (3.40)$$

Damit können nun zusammenfassend die auf den Spulenkörper wirkenden Belastungen angegeben werden. Der Verschiebungsverlauf lautet:

$$V(x) = V_1 - K_2 [C_1 \cdot \sinh \chi x \cdot \sin \chi x - \cosh \chi x \cdot \cos \chi x] \quad (3.41)$$



Der Biegemomentverlauf stellt sich folgendermaßen ein:

$$\sigma_B(x) = \frac{-B_b \cdot V//(x)}{H_F^2} \cdot 6 \quad (3.42)$$

$$\sigma_B(x) = -\frac{B_b}{H_F^2} \cdot 12 \cdot \chi^2 \cdot K_2 \cdot [-C_1 \cdot \cosh \chi x \cdot \cos \chi x - \sinh \chi x \cdot \sin \chi x]$$

Und der Längsspannungsverlauf gestaltet sich in Form von:

$$\sigma_x(x) = -\frac{12}{H_F^3} \cdot B_b \cdot z \cdot V//(x) \quad (3.43)$$

$$\sigma_x(x, z) = -\frac{24}{H_F^3} \cdot B_b \cdot z \cdot K_2 \cdot [-C_1 \cdot \cosh \chi x \cdot \cos \chi x - \sinh \chi x \cdot \sin \chi x]$$

### 3.2.2 Modellierung des Drahtverlaufes unter Berücksichtigung der relevanten Prozeßeinflußparameter

Bild 34 zeigt die relevanten Komponenten eines Spulenwickelsystems mit den für die mathematische Modellbildung notwendigen Systemgrenzen.

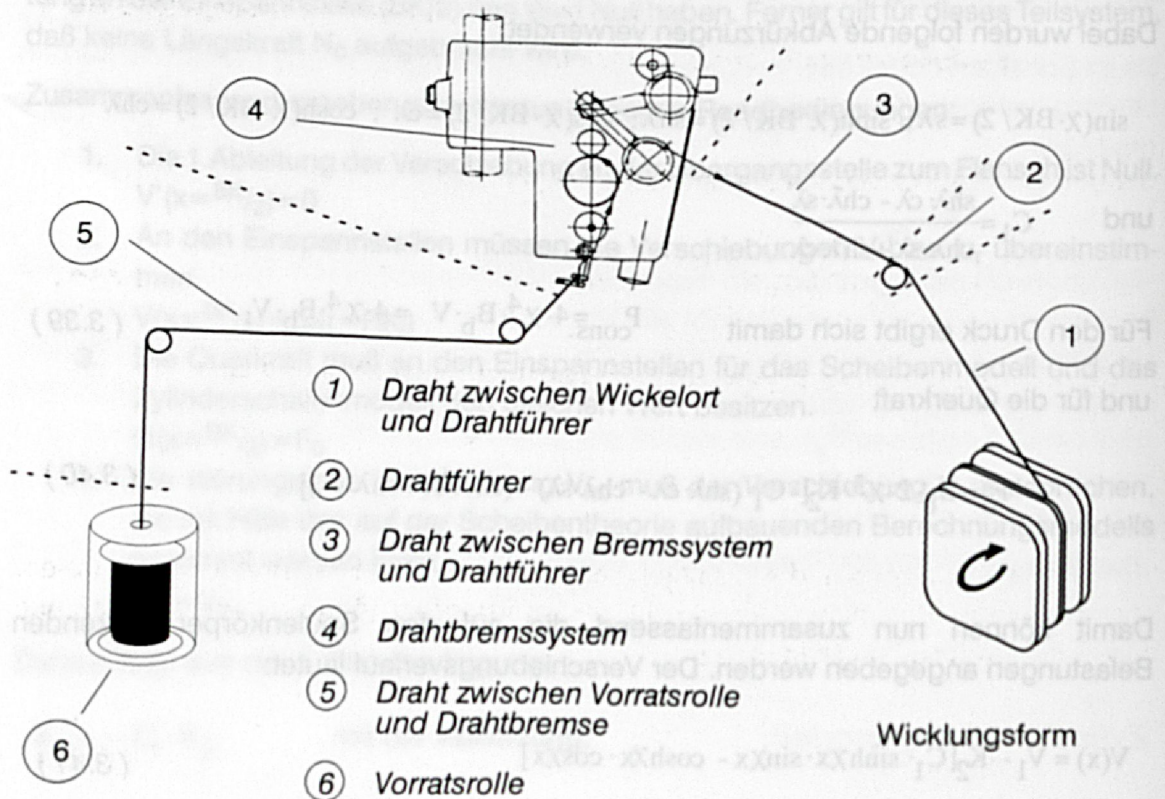


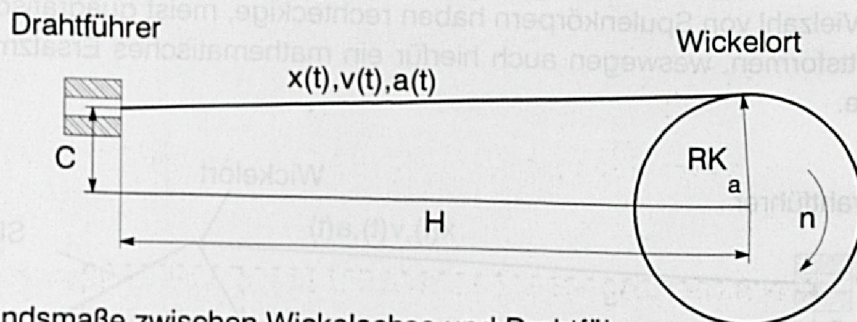
Bild 34: Exemplarisches Wickelsystem mit den für die Modellbildung relevanten Systemgrenzen



### Teilsystem 1, Draht zwischen Wickelort und Drahtführung

Da die Wickel- bzw. Spulenkörperform einen gravierenden Einfluß auf die beim Wickeln auftretenden Abzugsgeschwindigkeiten und Drahtbelastungen hat, wurden hierzu zwei Modelle aufgebaut, um der Vielfalt der in der Praxis anzutreffenden Wickelformen gerecht zu werden.

#### kreisförmige Spulenform



$H, C$  = Abstandsmaße zwischen Wickelachse und Drahtführer

$n$  = Wickeldrehzahl

$x(t)$  = Abstand zwischen Wickelort und Drahtführung

Bild 35: Relevante Einflußgrößen bei der Modellierung des Wickelvorganges beim Bewickeln runder Körperquerschnitte

Aus den geometrischen Zusammenhängen ergibt sich:

$$x(t) = \sqrt{H^2 + C^2 + RK_a^2} = \text{const} \quad (3.44)$$

Die Drahtabzugsgeschwindigkeit  $v(t)$  ergibt sich mit:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$  zu:

$$v(t) = RK_a \cdot \omega = 2 \cdot RK_a \cdot \pi \cdot n = \text{const} \quad (3.45)$$

Für konstante Drehzahl und konstanten Radius - zumindestens in einer Lage - treten, abgesehen von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, keine zusätzlichen dynamischen Belastungen auf, da

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = 0 \quad (3.46)$$

gilt. Würde man beispielsweise dynamische Beschleunigungsvorgänge mitberücksichtigen, müßte die zu beschleunigende Drahtmasse in diesem Teilsystem mit



$$F_{\text{dyn}} = m \cdot a(t) \quad \text{mit} \quad m = A_q \cdot x(t) \cdot \delta \quad (3.47)$$

angesetzt werden, wobei dabei der Masseneinfluß des Isolierlackes unberücksichtigt bliebe.

### unrunde Spulenkörpergeometrie

Eine Vielzahl von Spulenkörpern haben rechteckige, meist quadratische Spulenquerschnittsformen, weswegen auch hierfür ein mathematisches Ersatzmodell erarbeitet wurde.

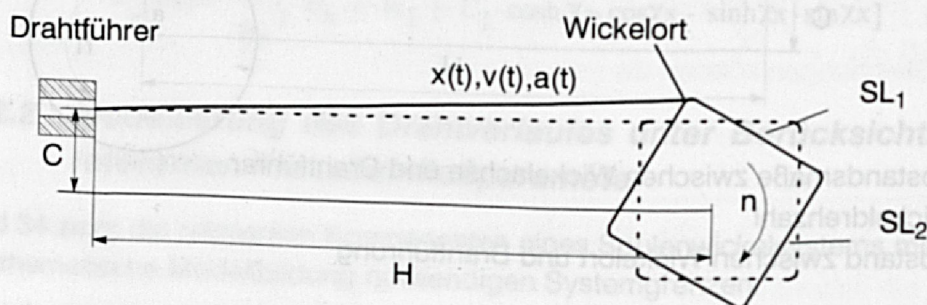


Bild 36: Geometrische Abhängigkeiten beim Bewickeln unrunder Spulenkörperquerschnittsformen

Im obigen Bild legt sich der Draht während einer Spulenkörperumdrehung sukzessive um die vier Körperkanten. Die Stellung, an welcher der Draht tangential an den Spulenkörperflächen anliegt (gestrichelte Darstellung in Bild 36), führt zu einer sprunghaften Veränderung der freien Weglänge  $x(t)$ . Je mehr Lagen übereinander gewickelt werden, desto sanfter wird der Draht um die Spulenkörperkanten gebogen und die Form der Spule nähert sich immer mehr der Kreisform an. Nach Verdrehen eines quadratischen Körpers um jeweils  $90^\circ$ , liegen wieder identische geometrische Gegebenheiten vor ( $\pi/2$ -symmetrisch), während rechteckige, nichtquadratische Körper lediglich eine  $\pi$ -Symmetrie aufweisen /15/.

Zur Ermittlung der sich dynamisch ändernden Drahtlänge  $x(t)$  zwischen Wickelort und Drahtführer müssen zunächst die geometrieabhängigen Umklappwinkel ermittelt werden. Danach erfolgt die Berechnung des zum jeweiligen Zeitpunkt tatsächlich vorliegenden Wickelradiuses und daraus schließlich die freie Drahtlänge  $x(t)$ . Durch Projektion der Rotationsgeschwindigkeit in Drahtverlaufsrichtung kann für jeden Zeitpunkt die tatsächliche Drahtabzugsgeschwindigkeit bestimmt werden. Die zeitliche Ableitung dieser Geschwindigkeitsfunktion ergibt den dynamischen Beschleunigungsverlauf des Drahtes durch das Bewickeln auf unrunde Geometrien. Bild 37 und Bild 38 veranschaulichen die signifikanten Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe beim Wickeln auf unterschiedliche Spulenkörperformen.



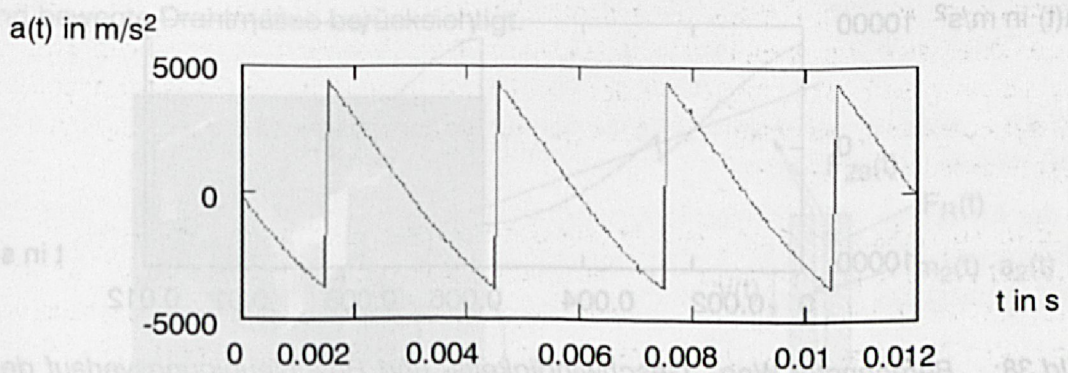
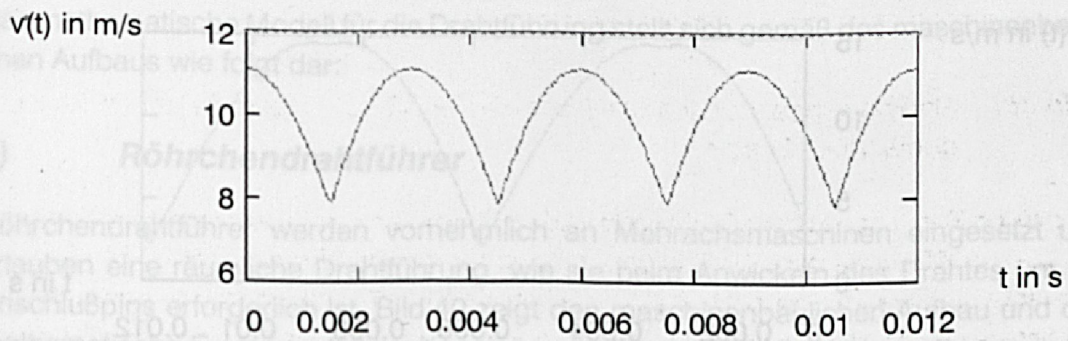
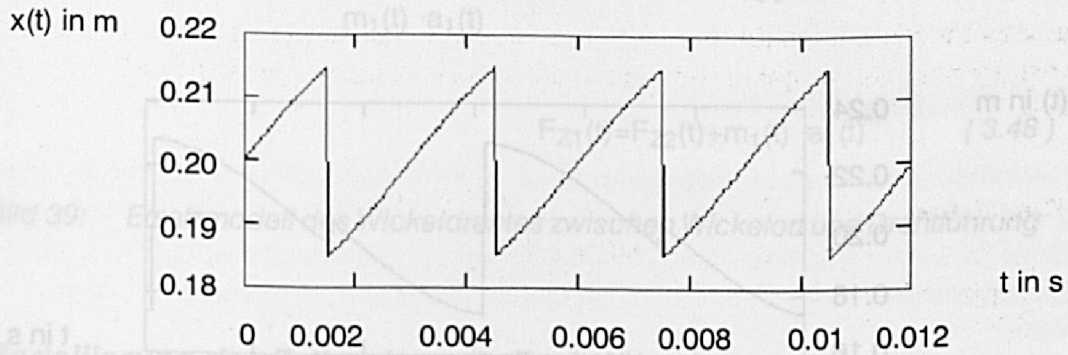
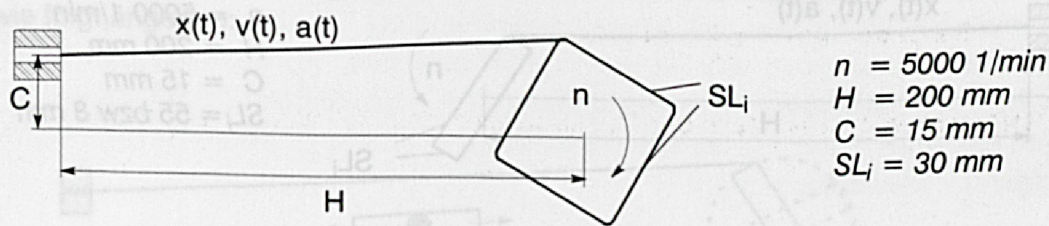


Bild 37: Theoretischer Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf des Drahtes beim Bewickeln eines quadratischen Wickelkörperquerschnittes



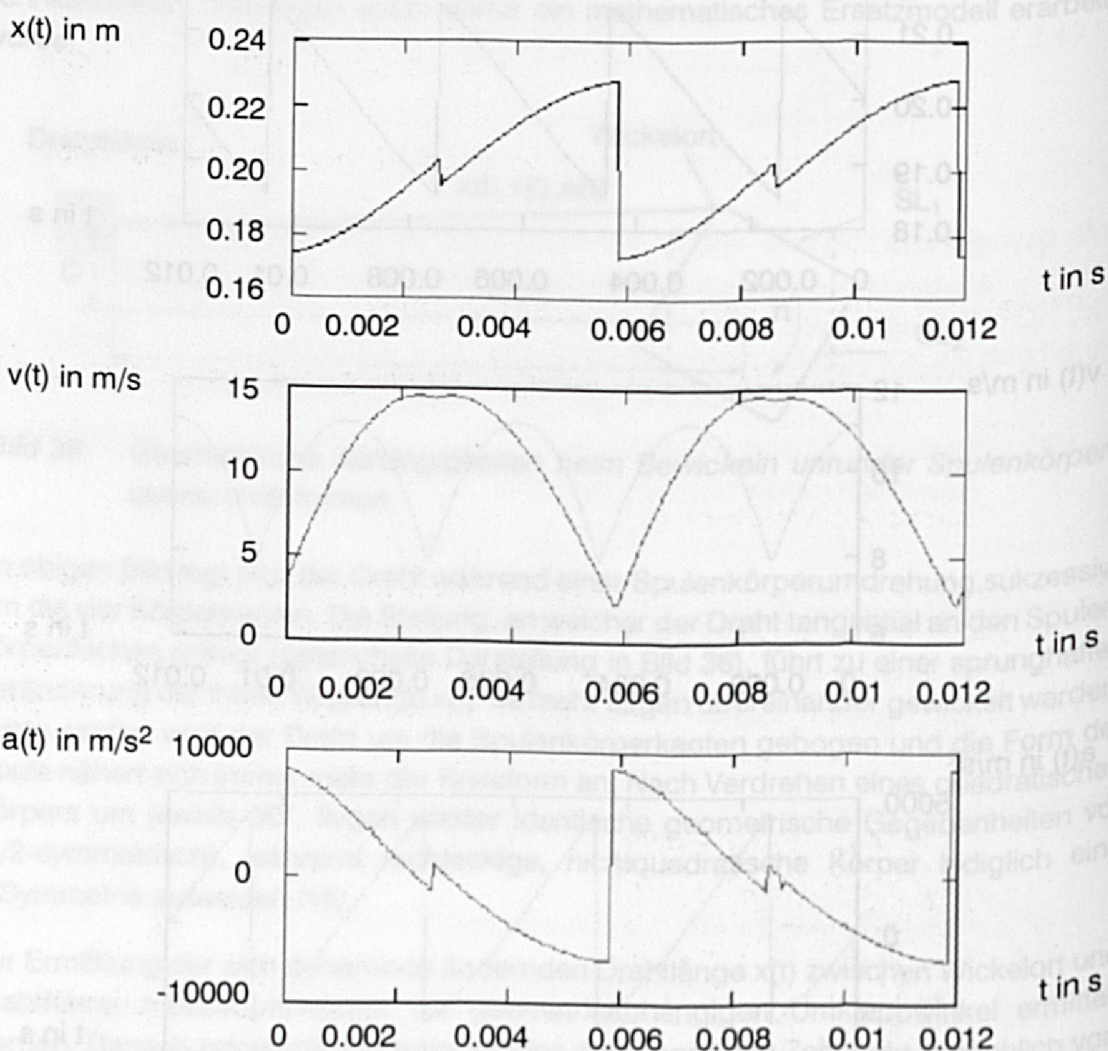
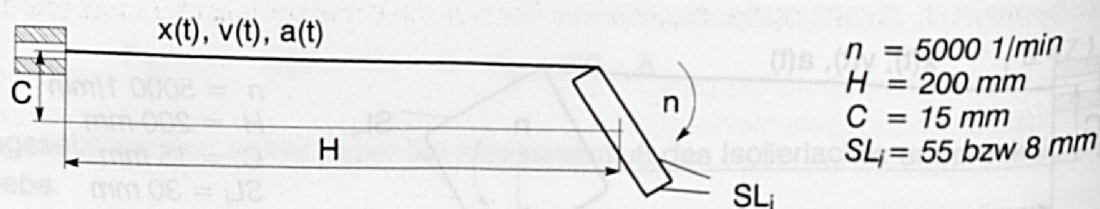
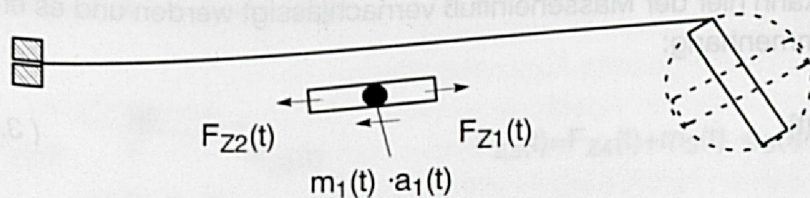


Bild 38: Berechneter Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf des Drahtes beim Bewickeln eines rechteckigen Spulenquerschnittes

Mit Kenntnis der dynamischen Weg- Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe läßt sich nun für den jeweiligen Wickelfall im ersten Teilbereich, unter Vernachlässigung



des elastischen Dämpfungsverhaltens des Drahtes, das mathematische Ersatzmodell wie folgt angeben:



$$F_{Z1}(t) = F_{Z2}(t) + m_1(t) \cdot a_1(t) \quad (3.48)$$

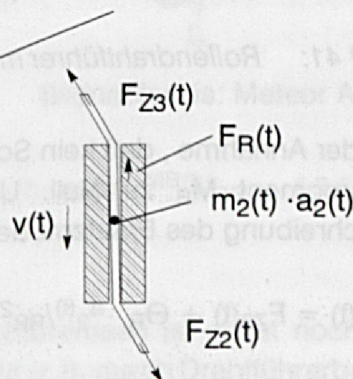
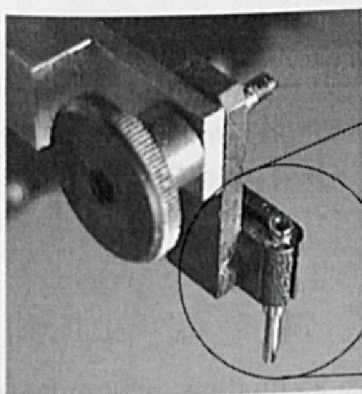
Bild 39: Ersatzmodell des Wickeldrahtes zwischen Wickelort und Drahtführung

### Modellierung des Teilsystems 2, Drahtführung

Das mathematische Modell für die Drahtführung stellt sich gemäß des maschinenbaulichen Aufbaus wie folgt dar:

#### a) Röhrendrahtführer

Röhrendrahtführer werden vornehmlich an Mehrachsmaschinen eingesetzt und erlauben eine räumliche Drahtführung, wie sie beim Anwickeln des Drahtes um die Anschlußpins erforderlich ist. Bild 40 zeigt den maschinenbaulichen Aufbau und das mathematische Ersatzmodell, welches die relevanten Einflußparameter Drahtreibung und bewegte Drahtmasse berücksichtigt.



$$F_{Z2}(t) = F_{Z3}(t) + m_2(t) \cdot a_2(t) + F_R(t) \quad (3.49)$$

Bild 40: Röhrendrahtführer und korrespondierendes Modell

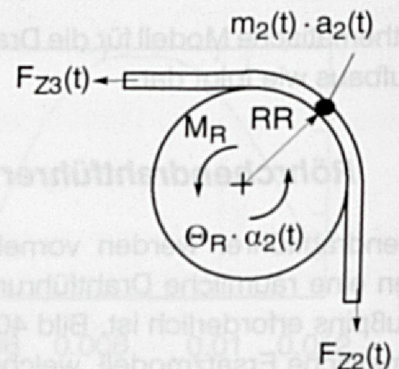
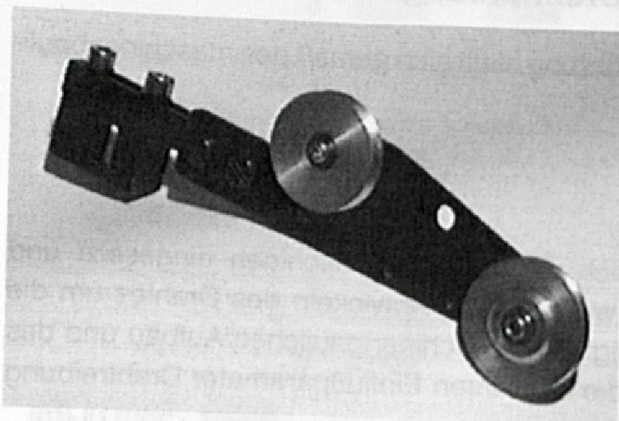


Die Reibkraft  $F_R(t)$  hängt hauptsächlich von der Drahtzugkraft, beiden Biegewinkeln, unter denen der Draht in die Düse ein- bzw austritt und der Oberflächenbeschaffenheit von Drahtführer und Draht ab. Da der Drahtmassenanteil im Röhrendrahtführer gegenüber den bewegten Drahtmassenanteilen in den übrigen Teilsystemen um Faktoren kleiner ist, kann hier der Masseneinfluß vernachlässigt werden und es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$F_{Z2}(t) = F_{Z3}(t) + F_R(t) \quad (3.50)$$

### b) Rollendrahtführer

Rollendrahtführer kommen meist an handbedienten Wickelmaschinen bei der Verarbeitung von Drähten  $> 0,4 \text{ mm}$  zum Einsatz, da durch die sanfte und weitestgehend reibkraftlose Umlenkung an der Rolle die Oberfläche der Drähte geschont wird und das Festlegen von Wicklungsanfang und -ende vom Bedienpersonal vollzogen wird.



$$F_{Z2}(t) = F_{Z3}(t) + \Theta_R \cdot \alpha_2(t) / R_R^2 + M_R / R_R + m_2(t) \cdot a_2(t) \quad (3.51)$$

Bild 41: Rollendrahtführer mit mathematischem Ersatzmodell

Bei der Annahme, daß kein Schlupf zwischen Draht und Umlenkrolle auftritt, wird das Reibmoment  $M_R$  zu Null. Unter Vernachlässigung der Drahtmasse erfolgt die Beschreibung des Ersatzmodells mit:

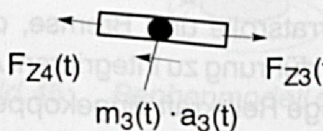
$$F_{Z2}(t) = F_{Z3}(t) + \Theta_R \cdot \alpha_2(t) / R_R^2 \quad (3.52)$$

Kommen mehr als eine Umlenkrolle zum Einsatz, so muß das mathematische Ersatzmodell dementsprechend angepaßt werden.



### Modellierung des Teilsystems 3, Draht zwischen Drahtbremssystem und Drahtführer

Hier ist einzig und allein die zu bewegende Drahtmasse von Bedeutung. Das Ersatzmodell gestaltet sich wie folgt:

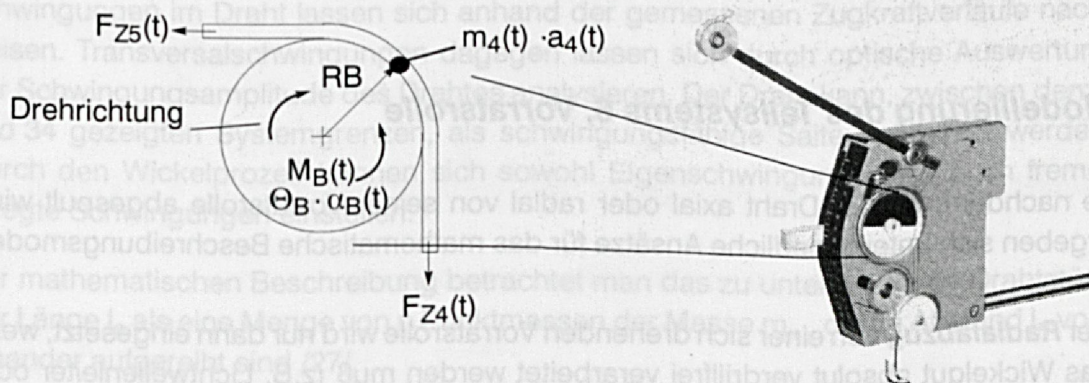


$$F_{z3}(t) = F_{z4}(t) + m_3(t) \cdot a_3(t) \quad (3.53)$$

Bild 42: Ersatzmodell des Drahtes zwischen Drahtbremssystem und Drahtführung

### Modellierung des Teilsystems 4, Drahtbremssystem

Das Erzeugen der gewünschten Drahtzugkraft erfolgt unabhängig davon, ob es sich um ein mechanisches oder elektronisches Drahtbremssystem handelt, meist durch das Aufbringen eines definierten Bremsmomentes an dem mit Draht umschlungenen Bremsrad. Die somit zu bewegendenden Drehmassen führen bei dynamischen Drahtgeschwindigkeitsverläufen zu einer deutlichen Beeinflussung des Gesamtsystems. Das mathematische Ersatzmodell wird wie folgendermaßen angesetzt:



Bildnachweis: Meteor AG

$$F_{z4}(t) = F_{z5}(t) + \Theta_B \cdot a_4(t) / R_B^2 + m_4(t) \cdot a_4(t) + M_B(t) / R_B \quad (3.54)$$

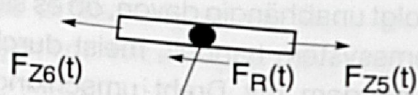
Bild 43: Modell des Drahtbremssystems

Sowohl an mechanischen wie an elektronischen Drahtbremsen ist meist noch ein Tänzerhebel zum Drahtrückzug bei freiwerdendem Draht (z.B. durch Drahtführerbewegungen beim Anwickeln um Lötanschlußstifte) integriert, der seinerseits wieder als Subsystem mit einer sich zu bewegendenden Drahtmasse modelliert werden kann. Vielfach werden diese Tänzerhebel im Praxiseinsatz auf Anschlag gebracht, um die sonst durch den Tänzerhebel eingebrachte zusätzliche Schwingungsneigung zu vermeiden.



### Modellierung des Teilsystems 5, Draht zwischen Vorratsrolle und Drahtbremssystem

Dem Draht wird, wie bereits mehrfach beschrieben, durch das Drahtbremssystem die zum Wickeln notwendige Drahtzugkraft aufgeprägt. Im Bereich zwischen Vorratsrolle und Drahtbremse erfolgt keine gezielte Zugkrafteinleitung. Jedoch ergibt sich, bedingt durch die zum Teil beträchtlichen Abstände zwischen Vorratsrolle und Bremse, die Notwendigkeit, Drahtführungsösen zur kontrollierten Drahtzuführung zu integrieren. An diesen Elementen wird eine drahtgeschwindigkeitsabhängige Reibkraft eingekoppelt, was in Versuchen nachgewiesen werden konnte. Der Masseneinfluß des Drahtes herrscht auch in diesem Teilsystem, so daß sich nachfolgendes mathematische Modell ergibt.



$$F_{Z5}(t) = F_{Z6}(t) + m_5(t) \cdot a_5(t) + F_R(t) \quad (3.55)$$

Bild 44: Modell des Teilsystems zwischen Drahtvorratsrolle und Drahtbremse

### Modellierung des Teilsystems 6, Vorratsrolle

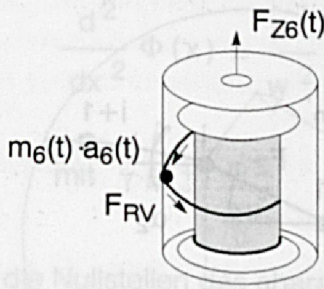
Je nachdem, ob der Draht axial oder radial von seiner Vorratsrolle abgespult wird, ergeben sich unterschiedliche Ansätze für das mathematische Beschreibungsmodell.

Der **Radialabzug** von einer sich drehenden Vorratsrolle wird nur dann eingesetzt, wenn das Wickelgut absolut verdrehfrei verarbeitet werden muß (z.B. Lichtwellenleiter oder biegesteife Widerstandsdrahtlegierungen, die auf keramische Spulenkörper mit höchster Präzision aufgebracht werden müssen). Ansonsten vermeidet man in der Praxis diese Art des Abzuges, da die Rotationsbewegung der Vorratsspule durch das ablaufende Wickelgut eingeleitet wird, was geringe Rotationsmomente und reduzierte Beschleunigungsrampen erfordert, da es sonst unweigerlich zu einer Überlastung des Drahtes kommt.

Beim **Axialabzug** hingegen steht die Vorratsrolle still, und der Draht legt sich schraubenförmig an die Innenwand der Abzugsglocke an, was im Rechenmodell als Reibkraft berücksichtigt wird, die unter anderem von den Faktoren Drahtabzugsgeschwindigkeit, Reibwert der bewachsenen Lackoberfläche, Drahtsteifigkeit und den Geometrie Größen Abzugsglocke/Vorratsrolle abhängt.







$$F_{Z6}(t) = m_6(t) \cdot a_6(t) + F_{RV} \quad (3.56)$$

Bild 45: Rechenmodell des Drahtabzuges im Falle des Axialabzuges

Die in diesem Kapitel bislang erarbeiteten Ersatzmodelle zur Beschreibung der Prozeßabhängigkeiten stellen die mathematische Basis, für die in Kapitel 7 vorgestellten rechnergestützten Werkzeuge, zur Berechnung und zur Optimierung von Wickelvorgängen dar.

### 3.2.3 Die Entstehung von Drahtschwingungen durch Eigen- und Fremderregung

Durch den dynamischen Prozeß des Wickelns entstehen im Draht Schwingungen, die ihrerseits den Prozeß und das Wickelergebnis zum Teil stark beeinflussen. Längsschwingungen im Draht lassen sich anhand der gemessenen Zugkraftverläufe nachweisen. Transversalschwingungen dagegen lassen sich durch optische Auswertung der Schwingungsamplitude des Drahtes analysieren. Der Draht kann, zwischen den in Bild 34 gezeigten Systemgrenzen, als schwingungsfähige Saite betrachtet werden. Durch den Wickelprozeß können sich sowohl Eigenschwingungen als auch fremd-erregte Schwingungen einstellen.

Zur mathematischen Beschreibung betrachtet man das zu untersuchende Drahtstück der Länge  $l_s$  als eine Menge von  $n$  Punktmassen der Masse  $m_\mu$ , die im Abstand  $l_n$  voneinander aufgereiht sind [27].







$$\frac{d^2}{dx^2} \Phi(x) = \frac{p^2}{w^2} \cdot \Phi(x) = \gamma^2 \cdot \Phi(x) \quad (3.60)$$

$$\text{mit } \gamma = \pm \frac{p}{w} \quad (3.61)$$

Da die Nullstellen des charakteristischen Polynoms ( $s^2 - \gamma^2 = 0$ ) alle einfach sind, ergibt sich als allgemeine Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung die Linearkombination von e-Funktionen /26/, deren Exponent jeweils aus dem Produkt einer Nullstelle und der unabhängigen Variablen  $x$  besteht:

$$\Phi(x) = A \cdot e^{\gamma \cdot x} + B \cdot e^{-\gamma \cdot x} \quad (3.62)$$

Die Konstanten A und B dienen zur Anpassung an die Randbedingungen. Für zwei feste Einspannungen lauten die Randbedingungen  $\Phi(0) = 0$  und  $\Phi(l_s) = 0$ . Somit gilt:

$$\Phi(0) = A + B = 0 \quad \text{und} \quad \Phi(l_s) = A e^{\gamma l_s} + B e^{-\gamma l_s} = 0 \quad (3.63), (3.64)$$

Mit der Beziehung

$$\sin\left(\frac{\gamma \cdot l_s}{j}\right) = \frac{1}{2 \cdot j} (e^{\gamma \cdot l_s} - e^{-\gamma \cdot l_s}) \quad (3.65)$$

folgen

$$A = -B \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{j \cdot k \cdot \pi}{l_s} \quad (3.66), (3.67)$$

Man erhält  $\Phi(x)$  durch Einsetzen von (3.66) in (3.62)

$$\Phi(x) = j \cdot 2 \cdot A \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi}{l_s} \cdot x\right) \quad (3.68)$$

Durch Erweiterung des Ansatzes (3.59) auf die unendlich vielen Eigenwerte erhält man mit  $p_{k1} = w\gamma$  und  $p_{k2} = -w\gamma$  (aus (3.61)) für  $y_k$ :

$$y_k = \Phi(x) \cdot (C \cdot e^{p_{k1} \cdot t} + D \cdot e^{p_{k2} \cdot t}) \quad (3.69)$$



und damit für  $y$

$$y = \sum_k y_k$$

Die Konstanten  $C$  und  $D$  dienen wiederum zur Anpassung an die Randbedingungen.

Der Klammerausdruck in (3.69) kann auf die Form

$$\left( \bar{C} \cdot \cos \frac{p_k}{j} \cdot t \right) + \bar{D} \cdot \sin \left( \frac{p_k}{j} \cdot t \right)$$

gebracht werden, da  $p_k$  immer rein imaginär ist /26/.

Für die Eigenkreisfrequenzen ergibt sich

$$\omega_k = \frac{p_k}{j} \quad (3.70)$$

Deshalb folgt für die Eigenfrequenzen

$$f_{k,\text{eigen}} = k \cdot \frac{w}{2 \cdot l_s} \quad (3.71)$$

Für ein festes und ein loses Ende der Saite gelten nach /27/ die Randbedingungen  $y(0)=0$  und  $\partial y / \partial x(l_s)=0$

Somit gilt  $\Phi(0) = 0$  und  $\partial \Phi / \partial x(l_s) = 0$  und für  $\gamma$  folgt:

$$\gamma = j \cdot \frac{(2 \cdot k - 1) \cdot \pi}{2 \cdot l_s} \quad \text{mit } k \in \mathbb{N}$$

unter Berücksichtigung von  $\cos \left( \frac{\gamma \cdot l_s}{j} \right) = \frac{1}{2} \cdot (e^{\gamma \cdot l_s} + e^{-\gamma \cdot l_s})$

Die Eigenfrequenzen ergeben sich zu

$$f_{k,\text{eigen}} = (2 \cdot k - 1) \cdot \frac{w}{4 \cdot l_s} \quad (3.72)$$

Der dynamische Wickelvorgang stellt im Sinne der Schwingungslehre die Erregung des schwingungsfähigen Drahtes an einem Ende dar. Beim Bewickeln unrunder Körper-einzelnen Punktes der Saite mit der Erregerfrequenz, jedoch mit unterschiedlicher Phasenverschiebung gegenüber der Erregung /27/.



Geht man von einer harmonischen Erregung  $y_0 = u_0 e^{j\omega t}$  an einem Ende (z.B.  $x=0$ ) aus, was beim Wickeln, durch die nahezu konstante Wickeldrehzahl durchaus zulässig ist, führt dies zu folgendem Ansatz:

$$y = u(x) e^{j\omega t} \quad (3.73)$$

Mit (3.58) folgt daraus die gewöhnliche Differentialgleichung

$$\frac{d^2}{dx^2} u(x) = - \frac{\omega^2}{w^2} \cdot u(x) \quad (3.74)$$

$$\text{Mit } \gamma^2 = - \frac{\omega^2}{w^2} \quad (3.75)$$

folgt die allgemeine Lösung

$$u(x) = a e^{-\gamma x} + b e^{\gamma x} \quad (3.76)$$

Für die Randbedingungen von zwei festen Enden und Erregung bei  $x=0$  gilt:

$$u(0) = u_0 \quad \text{und} \quad u(l_s) = 0$$

Damit folgt:

$$a + b = u_0 \quad \text{und} \quad a e^{-\gamma l_s} + b e^{\gamma l_s} = 0$$

Setzt man die sich daraus ergebenden Konstanten

$$a = \frac{-u_0 \cdot e^{2\gamma l_s}}{1 - e^{2\gamma l_s}} \quad \text{und} \quad b = \frac{u_0}{1 - e^{2\gamma l_s}}$$

in (3.76) erhält man mit den Beziehungen

$$\gamma = j\eta \quad \text{und} \quad \eta = \frac{\omega}{w} \quad \text{die Lösung}$$

$$u(x) = u_0 \cdot \frac{\sin(\eta \cdot (l_s - x))}{\sin(\eta \cdot l_s)} \quad (3.77)$$

Für  $\sin(\eta l_s) = 0$  d.h.  $\eta l_s = k\pi$  und somit  $\omega = w \cdot k \cdot \pi / l_s$  ergeben sich, aufgrund des Zusammenfallens von Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz der Saite, besonders große Amplituden (Resonanzfall).



Für die Randbedingungen eines festen und eines losen Endes gilt:

$$u(0) = u_0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial x} u(l_s) = 0$$

Für die Konstanten  $a$  und  $b$  folgt deshalb

$$a = \frac{u_0 \cdot e^{2\gamma \cdot l_s}}{1 + e^{2\gamma \cdot l_s}} \quad b = \frac{u_0}{1 + e^{2\gamma \cdot l_s}}$$

und als Lösung

$$u(x) = u_0 \cdot \frac{\cos(\eta \cdot (l_s - x))}{\cos(\eta \cdot l_s)} \quad (3.78)$$

Auch hier ist beim Zusammentreffen von Erreger- und Eigenfrequenz wieder mit besonders großen Amplituden zu rechnen.

Will man die Tatsache berücksichtigen, daß sich der schwingende Draht mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, so muß ein zusätzlicher Term in der Differentialgleichung berücksichtigt werden /28/. Diese lautet dann:

$$(w^2 - v^2) \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} y + 2 \cdot v \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \cdot \partial t} y - \frac{\partial^2}{\partial t^2} y = 0 \quad (3.79)$$

Nach gleicher Vorgehensweise ergibt sich die charakteristische Gleichung der Differentialgleichung zu:

$$(w^2 - v^2) s^2 + 2j \omega v s + \omega^2 = 0 \quad (3.80)$$

Mit deren Lösungen  $s_{1,2} = j \omega (e_1 \pm e_2)$

$$\text{und } e_1 = -\frac{v}{w^2 - v^2} \quad e_2 = -\frac{\sqrt{w^2 - v^2}}{w^2 - v^2} \quad (3.81) \quad (3.82)$$

läßt sich die allgemeine Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung mit

$$u(x) = a \cdot e^{j \cdot \omega \cdot (e_1 + e_2) \cdot x} + b \cdot e^{j \cdot \omega \cdot (e_1 - e_2) \cdot x} \quad (3.83)$$

angeben.



Zusammen mit den Randbedingungen  $u(0)=y_0$  und  $u(l_s)=0$  und einer harmonischen Erregung bei  $x=0$  mit  $y(0,t)=y_0 e^{j\omega t}$  ergeben sich die Konstanten  $a$  und  $b$  zu:

$$a = \frac{-y_0 \cdot e^{-2 \cdot j \cdot \omega \cdot e_2 \cdot l_s}}{1 - e^{-2 \cdot j \cdot \omega \cdot e_2 \cdot l_s}} \quad (3.84)$$

$$b = \frac{y_0}{1 - e^{-2 \cdot j \cdot \omega \cdot e_2 \cdot l_s}} \quad (3.85)$$

Als Lösung folgt

$$y(x,t) = y_0 \cdot e^{j \cdot \omega \cdot e_1 \cdot x} \cdot \frac{\sin[\omega \cdot e_2 \cdot (l_s - x)]}{\sin(\omega \cdot e_2 \cdot l_s)} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (3.86)$$

Maximale Amplituden treten bei  $\sin(\omega e_2 l_s) = 0$  auf, was

$$\omega = \frac{k \cdot \pi}{e_2 \cdot l_s} \quad \text{und somit} \quad f = \frac{k}{2 \cdot l_s} \cdot \sqrt{w^2 - v^2} \quad (3.87)$$

zur Folge hat.

Die Drahtabzugsgeschwindigkeit  $v$  führt letztendlich zu einer Verringerung der Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Drahtes - vgl. Gleichung (3.71) bzw. Bild 47.

Eigenfrequenz des Drahtes in Hz

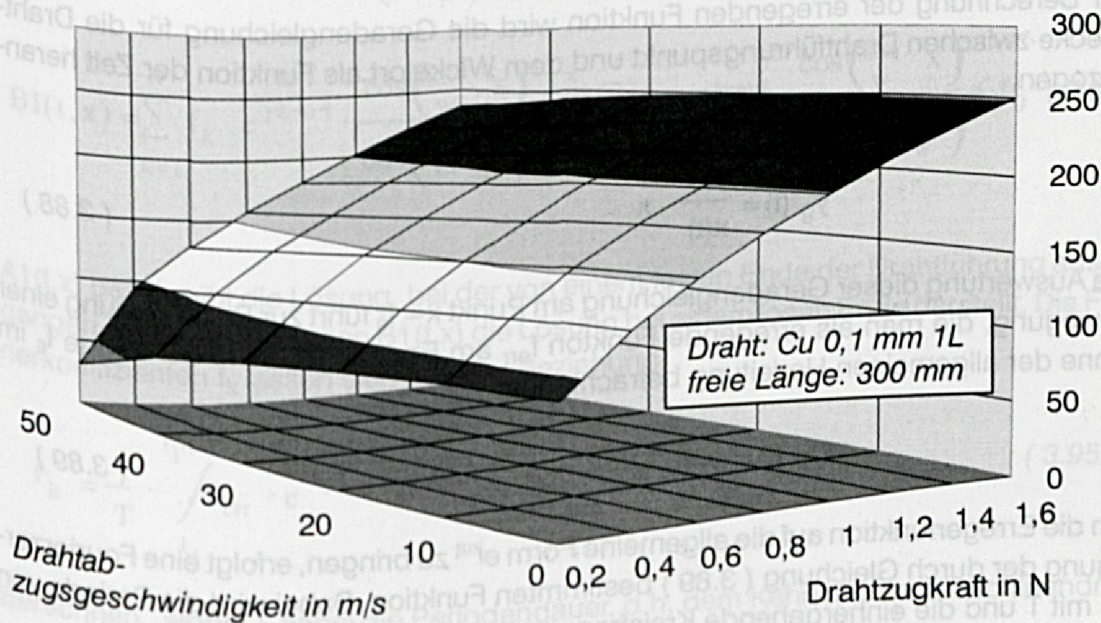


Bild 47: Einfluß der Drahtabzugsgeschwindigkeit auf die Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Drahtes



### Anpassung der allgemeinen Ergebnisse auf die speziellen Gegebenheiten beim Spulenwickeln

Beim Bewickeln unrunder Spulenkörpergeometrien ist die Drahtlänge zwischen dem Drahtführer und dem Wickelort nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit, wie es bereits im vorhergehenden Kapitel eingehend erläutert wurde. Zur Übertragung und zur einfachen Zuordnung der allgemeinen Ergebnisse auf die speziellen Gegebenheiten beim Spulenwickeln bietet sich die Wahl des verwendeten Koordinatensystem gemäß Bild 48 an. Hierin sind die Ausschläge der Erregerfunktion in positiver als auch negativer Richtung gleich groß.

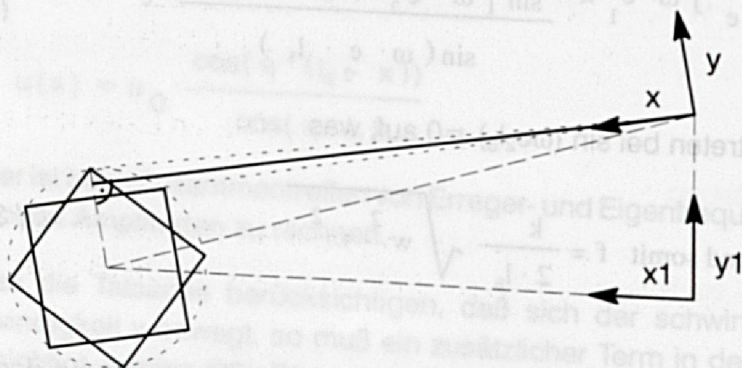


Bild 48: Lage des Koordinatensystems zur Berechnung der Drahtschwingungsverläufe durch Fremderregung

Zur Berechnung der erregenden Funktion wird die Geradengleichung für die Drahtstrecke zwischen Drahtführungspunkt und dem Wickelort als Funktion der Zeit herangezogen.

$$y_g(t) = \frac{y(t)}{x(t)} \cdot x \quad (3.88)$$

Die Auswertung dieser Geradengleichung am Punkt  $x = l_s$  führt zur Beschreibung einer Bewegung, die man als erregende Funktion  $f_{err}$  am Ende einer Saite der Länge  $l_s$  im Sinne der allgemeinen Herleitung betrachten kann.

$$f_{err}(t) = y_g(t, l_s) \quad (3.89)$$

Um die Erregerfunktion auf die allgemeine Form  $e^{j\omega t}$  zu bringen, erfolgt eine Fourierzerlegung der durch Gleichung (3.89) bestimmten Funktion. Dabei wird die Periode von  $f_{err}$  mit  $T$  und die einhergehende Kreisfrequenz mit  $\omega = 2\pi/T$  definiert.

$$f_{err}(t) = \sum_k f_k \cdot e^{j\omega t} \quad (3.90)$$



In den theoretischen Überlegungen wird mit den Gleichungen ( 3.77 ) bzw. ( 3.78 ) in Verbindung mit der Gleichung ( 3.73 ) die Amplitude der schwingenden Saite, bei Erregung mit der Funktion  $e^{j\omega t}$  an einem Ende, in Abhängigkeit von Ort und Zeit angegeben. Da es sich bei der zugrundeliegenden Differentialgleichung um eine lineare handelt, ist es zulässig, die Amplituden der schwingenden Saite für jeden Summanden der Gl. ( 3.89 ) getrennt zu berechnen und anschließend die Einzelergebnisse zu addieren.

Die beiden Summanden, die sich aus den Gleichungen ( 3.77 ) bzw. ( 3.78 ) und ( 3.73 ) ergeben, lauten:

$$S_{1,k} = f_k \cdot e^{jk\omega t} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\sin\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} \quad S_{2,k} = f_k \cdot e^{jk\omega t} \cdot \frac{\cos\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\cos\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} \quad (3.91)$$

$$(3.92)$$

wobei sich  $S_1$  auf den Fall zweier fester Enden bezieht und  $S_2$  ein festes und ein loses Ende annimmt.

Durch Addition von  $S_{1,k}$  und  $S_{2,k}$  ergeben sich folgende Gleichungen für die Amplituden, der im Bereich zwischen Drahtführung und Wickelort auftretenden Schwingungen.

$$A_1(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \cdot e^{jk\omega t} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\sin\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{f}_k \cdot e^{-jk\omega t} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\sin\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} + f_0 \cdot \frac{x}{l_s} \quad (3.93)$$

$$B_1(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \cdot e^{jk\omega t} \cdot \frac{\cos\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\cos\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{f}_k \cdot e^{-jk\omega t} \cdot \frac{\cos\left(\frac{k\omega}{w} \cdot x\right)}{\cos\left(l_s \cdot \frac{k\omega}{w}\right)} + f_0 \quad (3.94)$$

$A_1(t, x)$  beschreibt die Lösung, bei der von einem festen Ende der Drahtführung ausgegangen wurde, wohingegen  $B_1(t, x)$  die Lösung bei einem losen Ende darstellt. Die Fourierkoeffizienten  $f_k$  lassen sich aus der Beziehung

$$f_k = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T} f_{\text{err}} \cdot e^{-jk\omega t} dt \quad (3.95)$$

berechnen, wobei  $T$  dabei die Periodendauer, d.h. dem Kehrwert der Maschinendrehzahl entspricht.



Soll die Geschwindigkeit des Drahtes mitberücksichtigt werden, so ist die Gleichung (3.86) in analoger Weise auszuwerten. Man erhält:

$$\begin{aligned}
 A_{21}(t, x) &= \sum_{k=1}^{\infty} f_k \cdot e^{j \cdot k \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{j \cdot k \cdot \omega \cdot e_1 \cdot (l_s - x)} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega \cdot e_2 \cdot x)}{\sin(k \cdot \omega \cdot e_2 \cdot l_s)} \\
 A_{22}(t, x) &= \sum_{k=1}^{\infty} \overline{f_k} \cdot e^{-j \cdot k \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-j \cdot k \cdot \omega \cdot e_1 \cdot (l_s - x)} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega \cdot e_2 \cdot x)}{\sin(k \cdot \omega \cdot e_2 \cdot l_s)} \\
 A_2(t, x) &= A_{21}(t, x) + A_{22}(t, x) + f_0 \cdot \frac{x}{l_s} \quad (3.96)
 \end{aligned}$$

Die durchschnittliche Drahtgeschwindigkeit  $v$  findet dabei in den Konstanten  $e_1$  und  $e_2$  - aus den Gleichungen (3.81) und (3.82) - ihre Berücksichtigung.

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die wesentlichen Zusammenhänge der Prozeßabhängigkeiten und deren Auswirkungen auf das Wickelergebnis mathematisch modelliert und beschrieben. Im folgenden sollen nun diese Funktionalitäten im Versuch verifiziert werden. Ein schwerwiegendes Defizit bestand bei der dabei notwendigen Prozeßforschung darin, daß am Markt keine geeigneten Meßsysteme angeboten werden, die die hochdynamischen Prozeßgrößen erfassen und weiterverarbeiten können.



## 4 Experimentelle Bestimmung der Prozeßabhängigkeiten beim Spulenwickeln

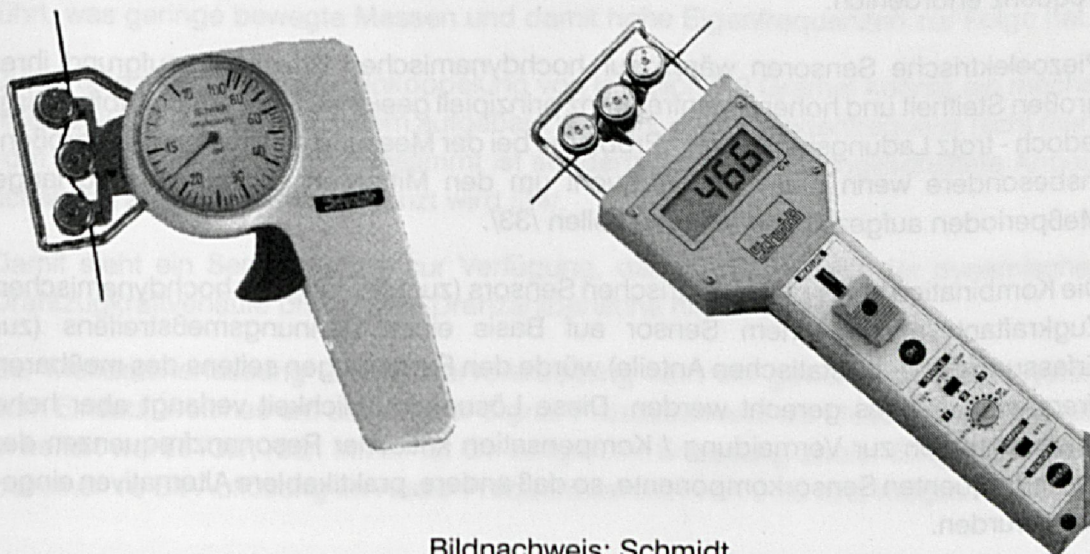
### 4.1 Meßsysteme und Analysetools zur Ermittlung der beim Wickeln auftretenden Prozeßgrößen

Die experimentelle Untersuchung von Spulenwickelvorgängen geschieht in erster Linie durch die hochdynamische Messung der beim Wickeln herrschenden Drahtzugkräfte und durch die Bestimmung der geometrischen und elektrischen Ergebnisgrößen. Zur Messung dieser Größen existieren zahlreiche industrietaugliche Lösungen. Die hochdynamische Drahtzugkrafterfassung hingegen gestaltet sich weitaus schwieriger, wie die eingehende Analyse der am Markt erhältlichen Systeme ergab.

#### Drahtzugkraftmeßsysteme

Zur Messung der Drahtzugkraft kommen im industriellen Fertigungsprozeß sowohl rein mechanisch wirkende als auch elektronische Systeme zum Einsatz. In beiden Fällen wird der Draht aus seiner geradlinigen Laufrichtung ausgelenkt und die resultierenden Kraftkomponenten zur Bestimmung der im Draht wirkenden Kraft herangezogen [29].

In rein mechanisch wirkenden Systemen führt die resultierende Kraftkomponente zur Auslenkung eines Feder-Hebel-Systems. Der Kraftwert wird meist mittels Zeigerinstrumenten dargestellt.



Bildnachweis: Schmidt

**Bild 49:** Handbediente mobile Drahtzugmeßgeräte:  
rein mechanisch mittels Federkraft arbeitendes Meßgerät (links),  
auf DMS-Basis elektronisch arbeitendes Meßgerät (rechts)



Bei elektronischen Drahtzugkraftmessern wird die wirkende Kraftkomponente in der Regel mittels Biegebalken und dem darauf applizierten Dehnungsmeßstreifen in ein elektrisches Signal proportional zur Kraft umgewandelt und in digitaler Form angezeigt /30/.

Der robuste und zuverlässige Aufbau beider Systeme führt bei gering schwankenden - also quasi statistischen - Drahtzugkraftverläufen zu befriedigenden Meßergebnissen. Bei stark und schnell schwankenden Verläufen, wie sie beim Bewickeln unrunder Querschnittsformen durch Massenbeschleunigungen des Drahtes und der Brems Elemente entstehen, zeigen beide Prinzipien systembedingte Schwächen:

Die Eigenfrequenz der Meßsysteme ist gerade in höheren Wickeldrehzahlbereichen zu gering, um zuverlässig die tatsächlich vorherrschende Drahtzugkraft erfassen zu können /31/. Die sich im mechanisch wirkenden System bewegenden Massen führen, in Verbindung mit Dämpfungselementen zur schwingungsberuhigten Anzeige, zu Eigenfrequenzen von weniger als 100 Hz.

Die Steifigkeit des Biegebalkens, der als Träger des DMS bei elektronischen Zugkraftmessern dient, kann aufgrund der begrenzten Auflösung des DMS nicht beliebig groß gewählt werden. Sonst würde die Auflösung im gewünschten Meßbereich zu gering werden. Deshalb ist die Eigenfrequenz herkömmlicher - auf DMS-Technik basierender - elektronischer Drahtzugmeßsysteme im Bereich bis 500 Hz anzusiedeln /32/.

Für die Erfassung der Drahtzugkraftverläufe beim Wickeln, insbesondere beim schnellen Bewickeln unrunder Querschnitte, sind Systeme mit wesentlich höherer Eigenfrequenz erforderlich.

Piezoelektrische Sensoren wären zur hochdynamischen Erfassung aufgrund ihrer großen Steifigkeit und hoher Eigenfrequenz prinzipiell geeignet. Der Ladungsabfluß birgt jedoch - trotz Ladungsverstärker - Probleme bei der Messung statistischer Meßgrößen, insbesondere wenn diese hochfrequent um den Mittelwert schwanken und lange Meßperioden aufgezeichnet werden sollen /33/.

Die Kombination eines piezoelektrischen Sensors (zur Messung der hochdynamischen Zugkraftanteile) mit einem Sensor auf Basis eines Dehnungsmeßstreifens (zur Erfassung der quasistatischen Anteile) würde den Forderungen seitens des meßbaren Frequenzbereiches gerecht werden. Diese Lösungsmöglichkeit verlangt aber hohe Anstrengungen zur Vermeidung / Kompensation kritischer Resonanzfrequenzen der niederfrequenten Sensorkomponente, so daß andere, praktikablere Alternativen eingesetzt wurden.

Piezoresistive Systeme sind, da sie sowohl statische als auch dynamische Anteile driftfrei erfassen können, ebenso geeignet wie kapazitive Sensoren. Beide Systeme wurden aufgebaut und zeigten gute Übereinstimmungen der Meßergebnisse. Die Realisierung des kapazitiven Systems ist in Bild 50 dargestellt.



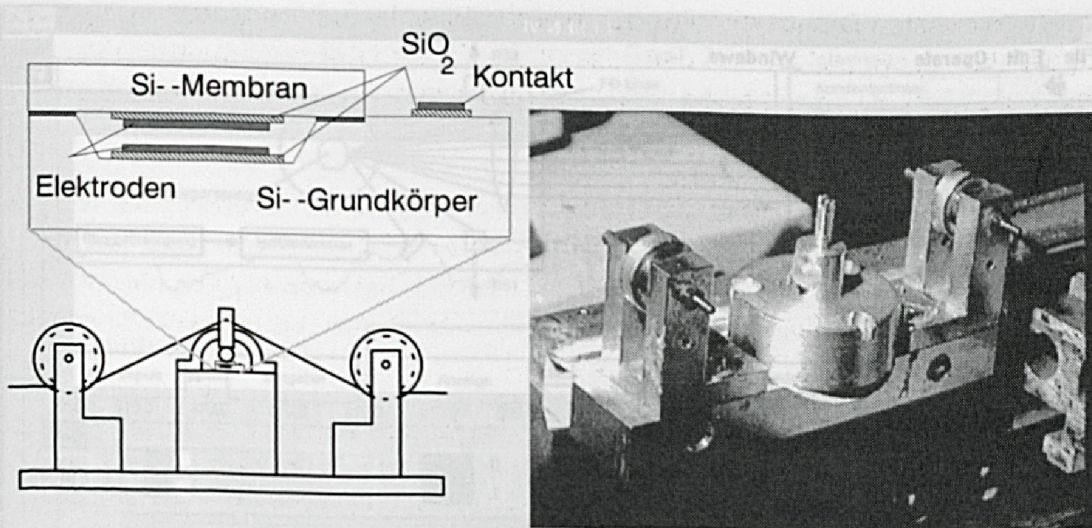


Bild 50: Kapazitives Sensorsystem zur hochdynamischen Messung von Drahtzugcharakteristiken

Beim Wirken einer Zugkraft im Draht wird diese durch Umlenkung über den Sensorstößel senkrecht und biegemomentfrei auf die obere der beiden Kondensatorplatten geleitet. Die Normalkraft führt zu einer minimalen Durchsenkung der Siliziummembran (maximal  $3\text{ }\mu\text{m}$ ). Das entspricht der Veränderung des Plattenabstandes des Meßkondensators. Eine entsprechende Anpaßschaltung generiert hieraus ein der Druckkraft proportionales Spannungssignal. Die Sensorplatten sind in Halbleitertechnik ausgeführt, was geringe bewegte Massen und damit hohe Eigenfrequenzen zur Folge hat.

Durch eine geringe Masseneinkoppelung von lediglich  $0.2\text{ Gramm}$  konnte ein mechanisch äußerst steifes Meßsystem aufgebaut werden, dessen Eigenfrequenz nicht mehr vom mechanischen Aufbau bestimmt ist sondern durch die nachgeschaltete Anpaßschaltung auf ca.  $14\text{ kHz}$  begrenzt wird /34/.

Damit steht ein Sensorsystem zur Verfügung, das die Erfassung der dynamischen Drahtzugkraftverläufe bis in hohe Drehzahlbereiche hinein erlaubt.

Zur Meßdatenerfassung und -weiterverarbeitung kam ein gewöhnliches PC-System zum Einsatz, welches um eine Digital-Signal-Prozessorkarte als Meßdatenschnittstelle erweitert wurde /35/, /36/. Mit ihr ist die zeitgleiche Erfassung zweier Eingangssignale bei einer  $16\text{ Bit}$ -Auflösung im Audio-Frequenzbereich von  $0\text{--}25\text{ kHz}$  möglich /37/.



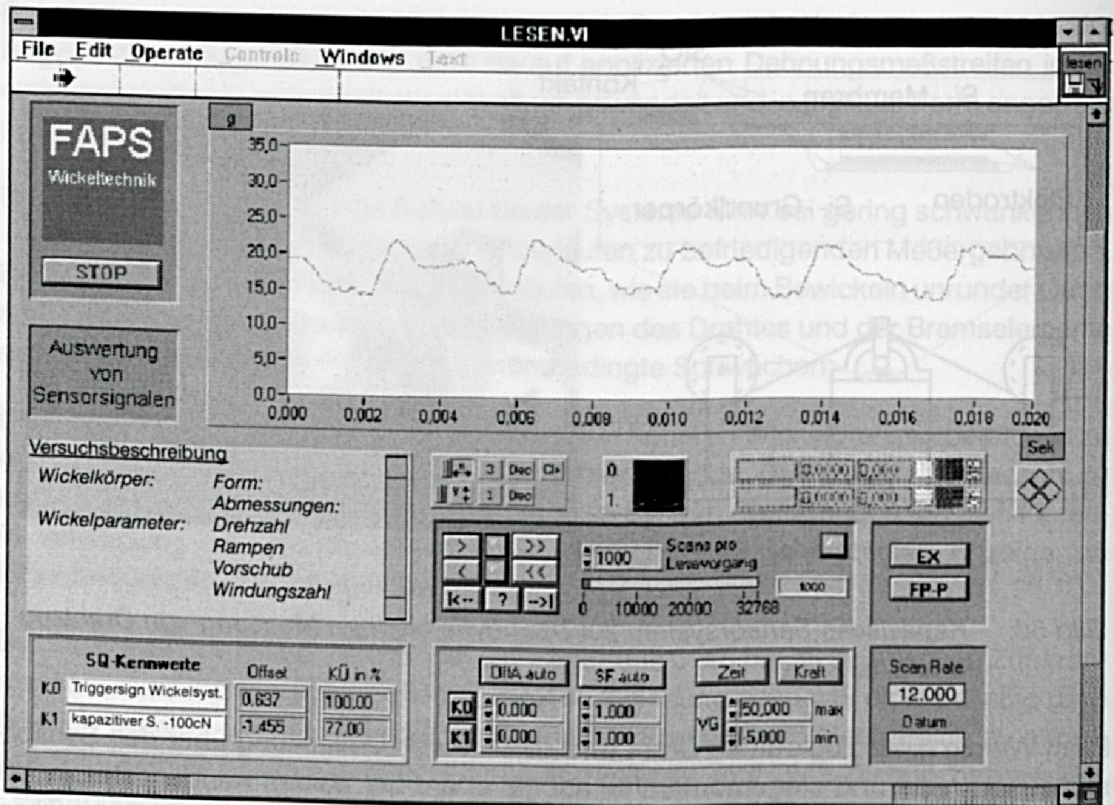


Bild 51: Oberfläche der PC-gestützten Meßdatenerfassungs- und Analysetools zur Ermittlung der dynamischen Drahtzugkraftverläufe

Die Meßdaten können zeitgleich auf Festplatte abgespeichert und on-line am Bildschirm dargestellt werden. Zahlreiche Analyse- und Exportfunktionalitäten, wie freie Skalierung, Mittelwertbildung, Fast-Fourier-Transformation zur Frequenzanalyse und Export in Druck-, Ascii- oder Excelformat, erlauben die flexible Weiterverarbeitung der Meßdaten /38/.

### Drahtdickenbestimmung

In der Wareneingangskontrolle der Lackdrähte und zur Verifizierung der Durchmesseränderung durch den Wickelprozeß werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Meßsysteme gestellt, da Leiterdurchmesser- und Lackdickenschwankungen lediglich im  $\mu\text{m}$ -Bereich zulässig sind. Mechanische Feinzeiger arbeiten berührend, d.h. der Draht kann nicht während des Wickelvorgangs vermessen werden.

Elektronische Laserdickenmeßgeräte eignen sich für die kontinuierliche Messung des durchlaufenden Drahtes, da sie berührungslos mit Abtastraten von einigen 100 Hz den Schattenriß absキャンen, der durch den Laserstrahl erzeugt wird. Laserdickenmeßsysteme mit zwei synchron abtastenden und um  $90^\circ$  versetzten Send- und Empfangseinheiten generieren zudem Aussagen über die Rundheit der Drähte /39/, /40/, /41/.



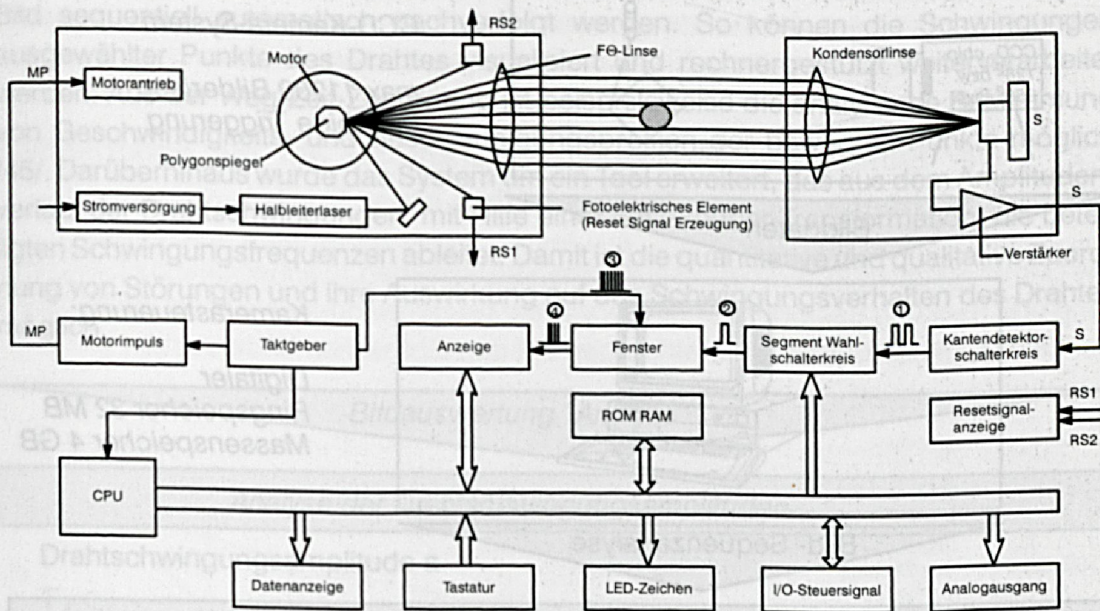


Bild 52: Prinzipschaltbild eines berührungsfreien optischen Drahtdurchmessermeßgerätes mit Laserabtastung

### Prozeßuntersuchung mit Hochgeschwindigkeitskamarasystemen

Gerade für lagengenaue Wicklungsaufgaben ist es neben der Verarbeitung qualitativ hochwertiger Halbzeuge bei definierten Drahtzügen notwendig, den Wickelprozeß in Hinblick auf schwingungsarme Drahtführung hin zu optimieren, vor allem im Bereich zwischen Drahtführer und Wickelort /42/, /43/.

Hier bietet sich die Prozeßuntersuchung mit Hochgeschwindigkeitskamarasystemen auf CCD-Basis mit digitaler Bildspeicherung an. Damit ist eine weiterführende rechnerunterstützte Bild- bzw. Sequenzanalyse möglich.

Die Bildinformationen in Form von Grauwertbildern werden aus dem lichtempfindlichen CCD-Chip ausgelesen und in einem Ringspeicher abgelegt. Die Größe des Ringspeichers bestimmt, neben der Aufnahmefrequenz und der Pixelanzahl des CCD-Chips, die maximal mögliche Aufnahmedauer. Die längste Aufnahmezeit beträgt bei dem hier für die weitreichende Wickelprozeßuntersuchung eingesetzten Kamerateil ca. 2,95 Sekunden bei 64 MB Ringspeichergröße, unter Verwendung eines  $128^2$  Pixel-CCD-Chips bei reduzierter Auflösung von  $128 \times 16$  Bildpunkten und einer Bildfrequenz von 11.137 Bildern pro Sekunde. Dies entspricht bei einer Spulenkörperdrehzahl von 12.000 1/min etwa 590 vollen Umdrehungen. Die temporär im digitalen Bildspeicher abgelegten Bilddaten können in beliebiger Sequenzlänge auf einem Festspeichermedium archiviert werden /44/.



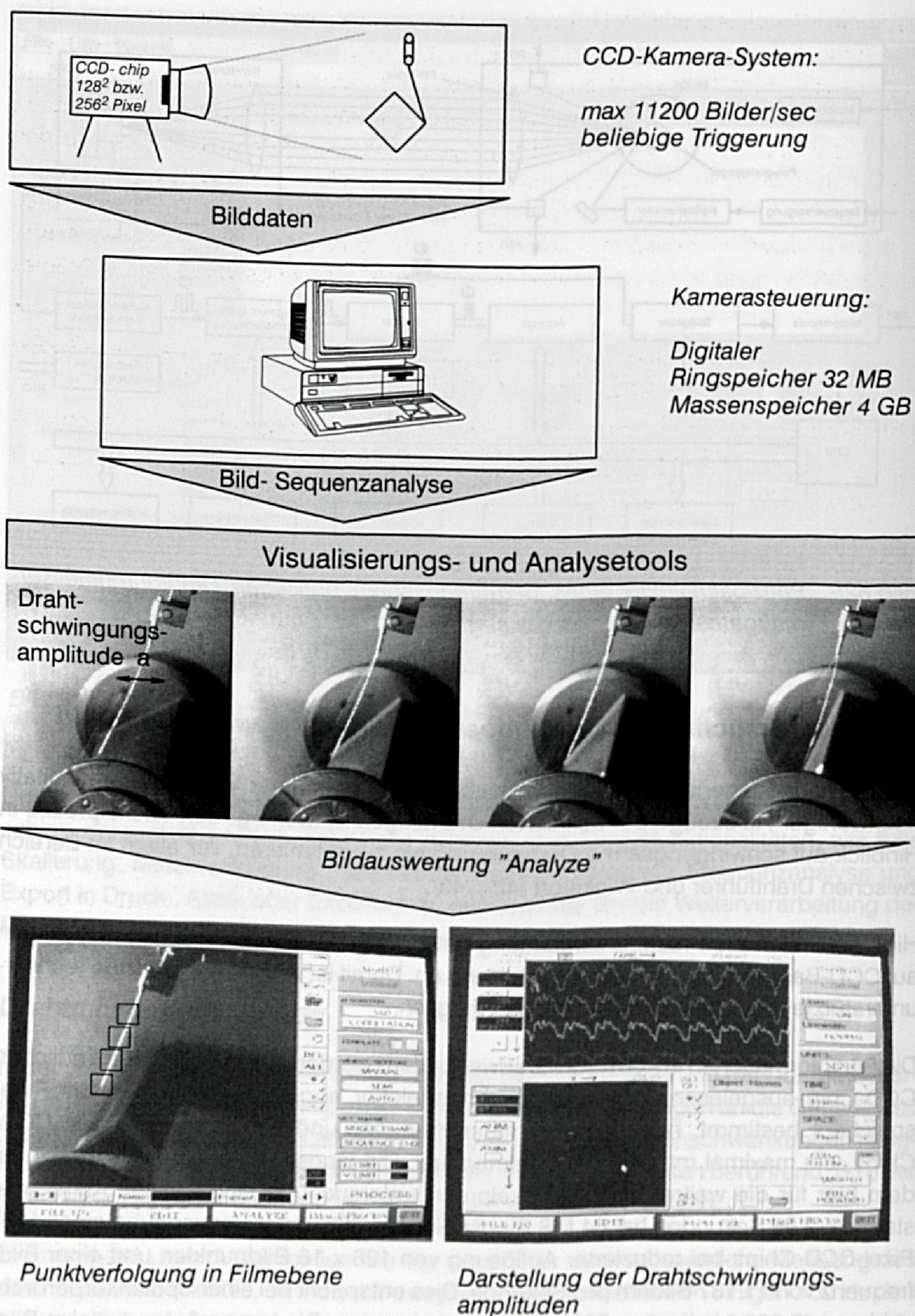


Bild 53: Hochgeschwindigkeitskamerasystem zur Detektion der Drahtschwingungen



Das Auswertetool "Analyze" erlaubt eine flexible Auswahl von Bildpunkten, die Bild für Bild sequentiell automatisch nachverfolgt werden. So können die Schwingungen ausgewählter Punkte des Drahtes visualisiert und rechnergestützt weiterverarbeitet werden. Aus der Weg-Zeit-Zuordnung ist beispielsweise die analytische Bestimmung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen der bewegten Punkte möglich /45/. Darüberhinaus wurde das System um ein Tool erweitert, das aus dem Amplitudenverlauf der Drahtschwingungen, mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation, die beteiligten Schwingungsfrequenzen ableitet. Damit ist die quantitative und qualitative Zuordnung von Störungen und ihre Auswirkung auf das Schwingungsverhalten des Drahtes möglich.

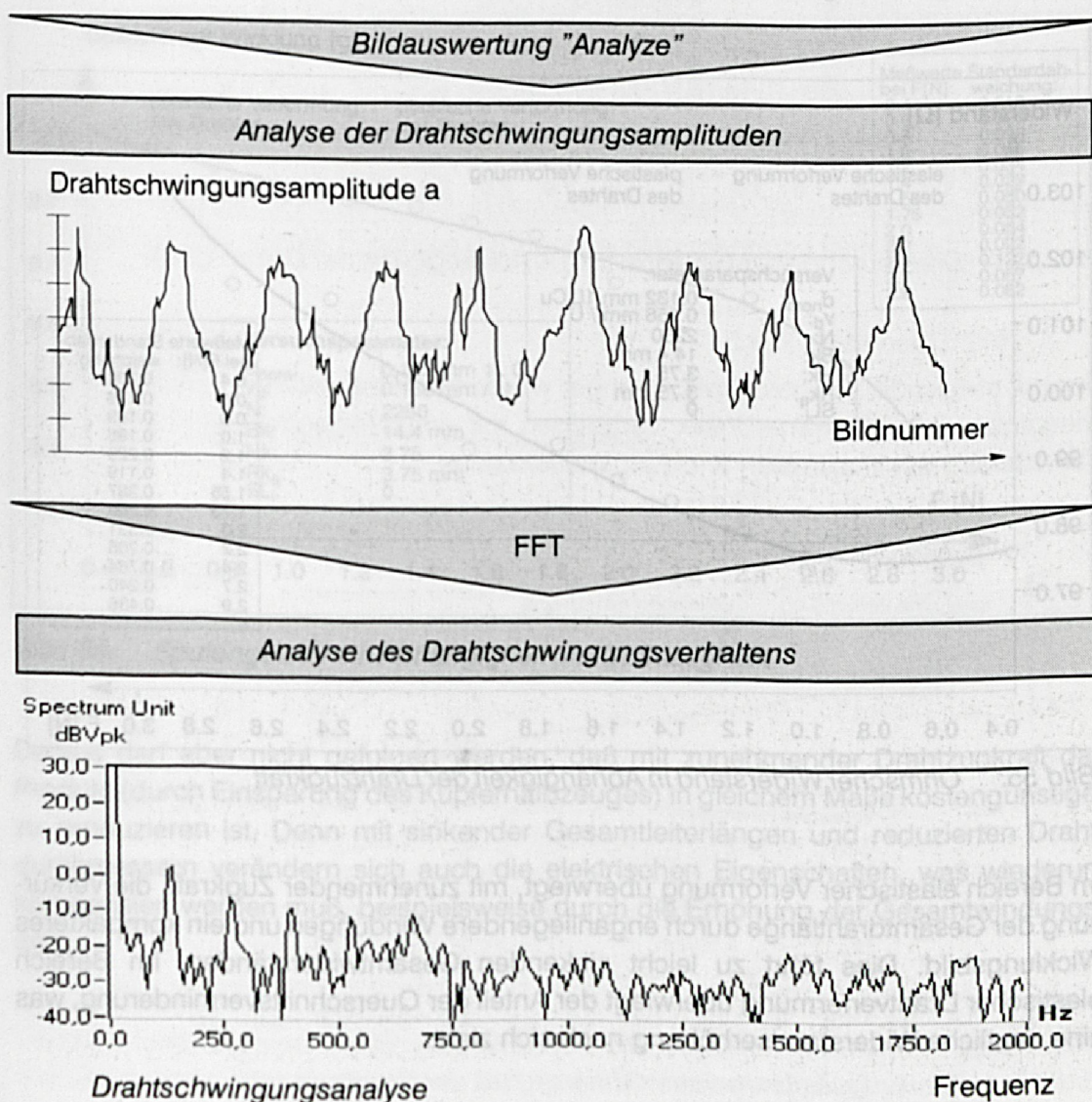


Bild 54: Systeme zur Analyse von Drahtschwingungen



Mit Hilfe der dargestellten Meß- und Analysetools kann der Wickelprozeß als solcher untersucht und die aus der mathematischen Modellbildung abgeleiteten Abhängigkeiten auf ihre Gültigkeit und ihren Einsatzbereich hin verifiziert werden.

#### 4.2 Der Einfluß der Wickelprozeßparameter auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften einer Spule

Die Drahtzugkraft führt, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, in erster Linie zur Einschnürung und Reckung des Drahtes. Bei konstanter Gesamtwindungszahl hat die Variation der Drahtzugkraft folgende Auswirkungen auf den Ohmschen Widerstand:

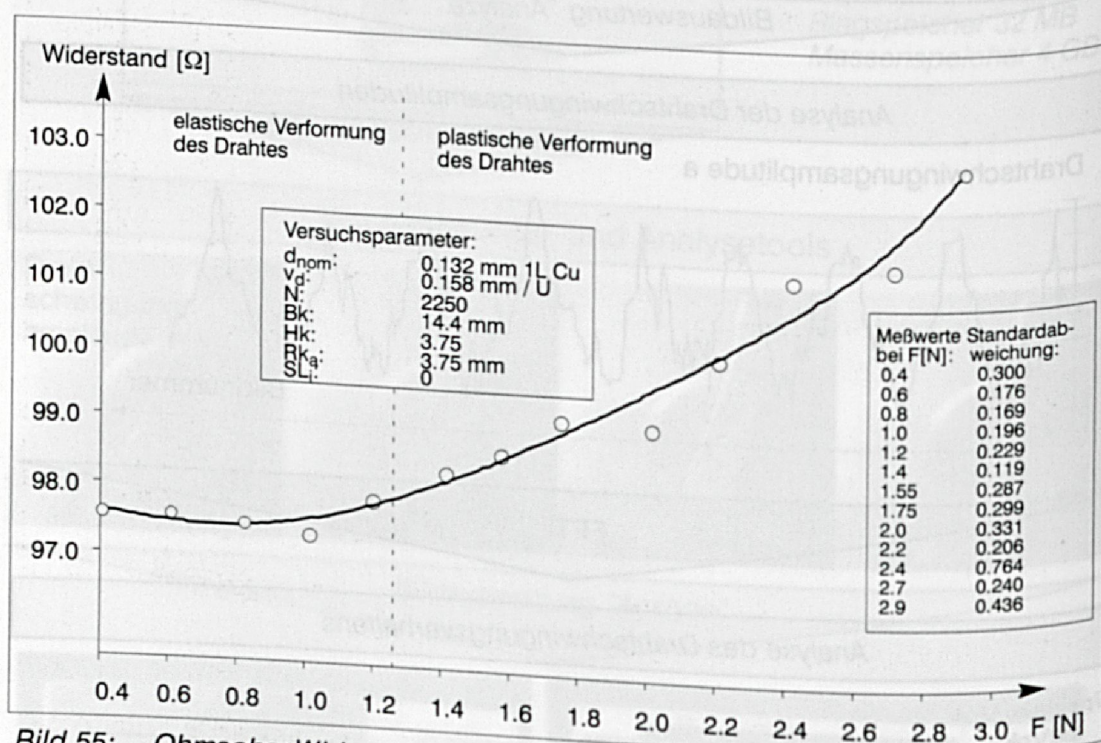


Bild 55: Ohmscher Widerstand in Abhängigkeit der Drahtzugkraft

Im Bereich elastischer Verformung überwiegt, mit zunehmender Zugkraft, die Verkürzung der Gesamtdrahtlänge durch enganliegende Windungen und ein kompakteres Wicklungsbild. Dies führt zu leicht sinkenden Gesamtwiderständen. Im Bereich plastischer Drahtverformung überwiegt der Anteil der Querschnittsverminderung, was eine deutliche Widerstandserhöhung nach sich zieht.



Die signifikante Beeinflussung des Ohmschen Widerstandes durch die jeweils herrschende Drahtzugkraft verdeutlicht die Notwendigkeit, während des Wickelprozesses größtes Augenmerk auf die Drahtzugkraft zu richten und diese möglichst konstant auf einem definierten Wert zu halten. Die in Bild 55 aufgezeigte Widerstandsveränderung würde bei einem typischen KFZ-Relais zu Schwankungen der Ampèrewindungszahl von fast 5% führen (bezogen auf einen Normzug von 120 cN).

Das Gewicht der Kupferwicklungen nimmt mit zunehmender Drahtzugkraft durch sinkende Gesamtleiterlängen und rückläufige Leiterquerschnittsflächen ab.

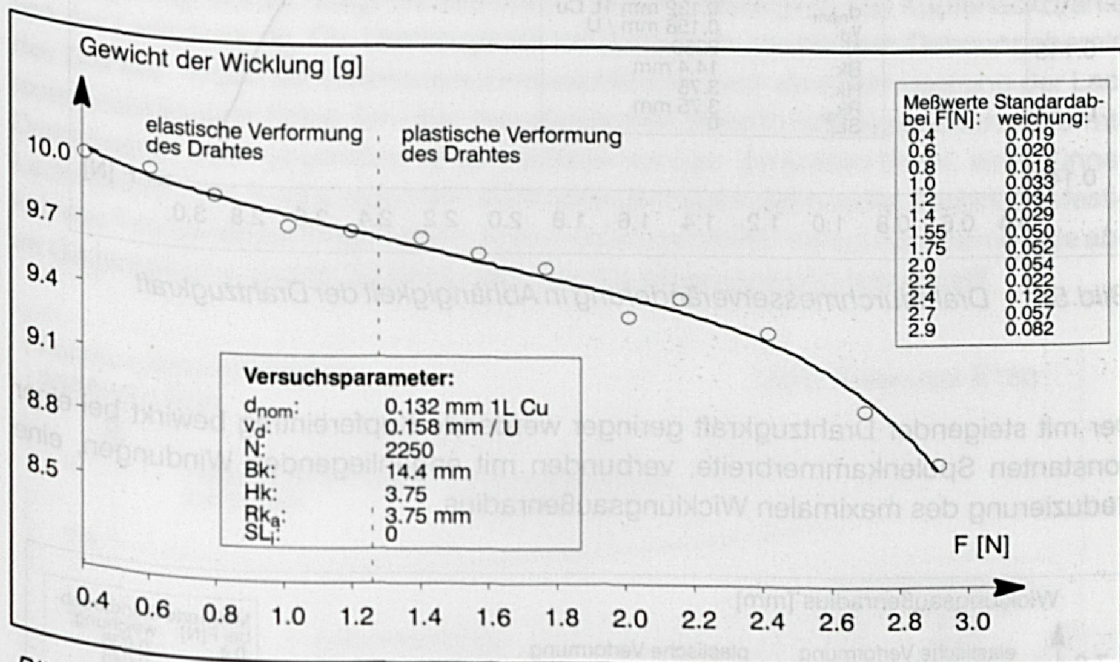


Bild 56: Spulengewicht in Abhängigkeit der Drahtzugkraft

Daraus darf aber nicht gefolgert werden, daß mit zunehmender Drahtzugkraft das Produkt (durch Einsparung des Kupferhalbzeuges) in gleichem Maße kostengünstiger zu produzieren ist. Denn mit sinkender Gesamtleiterlängen und reduzierten Drahtdurchmessern verändern sich auch die elektrischen Eigenschaften, was wiederum kompensiert werden muß, beispielsweise durch die Erhöhung der Gesamtwindungszahl.



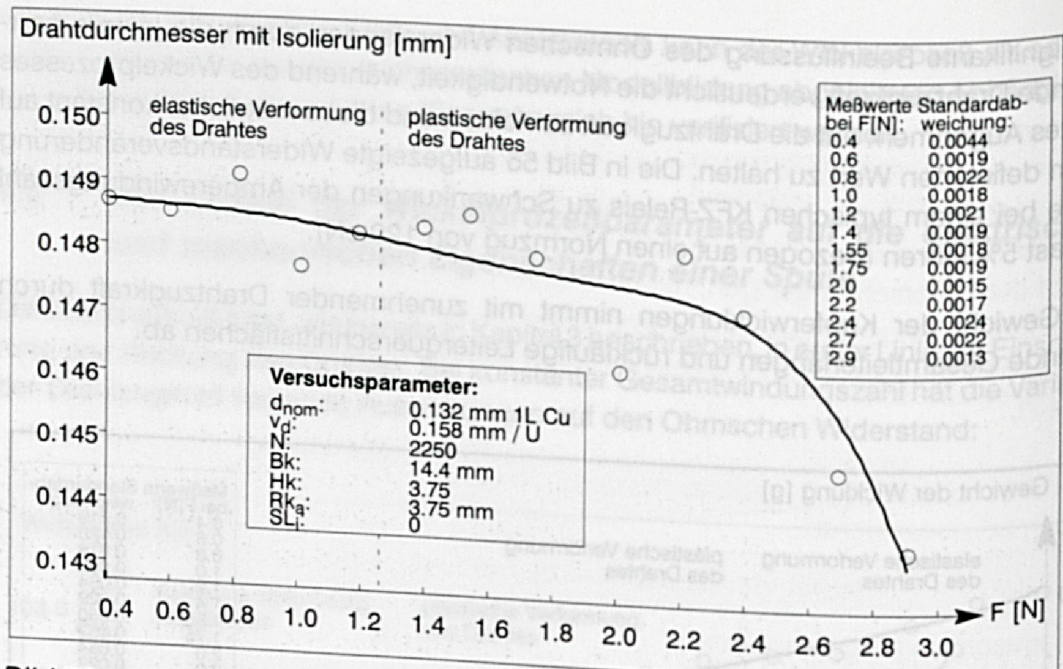


Bild 57: Drahtdurchmesseränderung in Abhängigkeit der Drahtzugkraft

Der mit steigender Drahtzugkraft geringer werdende Kupfereintrag bewirkt bei einer konstanten Spulenkammerbreite, verbunden mit enganeliegenden Windungen, eine Reduzierung des maximalen Wicklungsaußenradius.

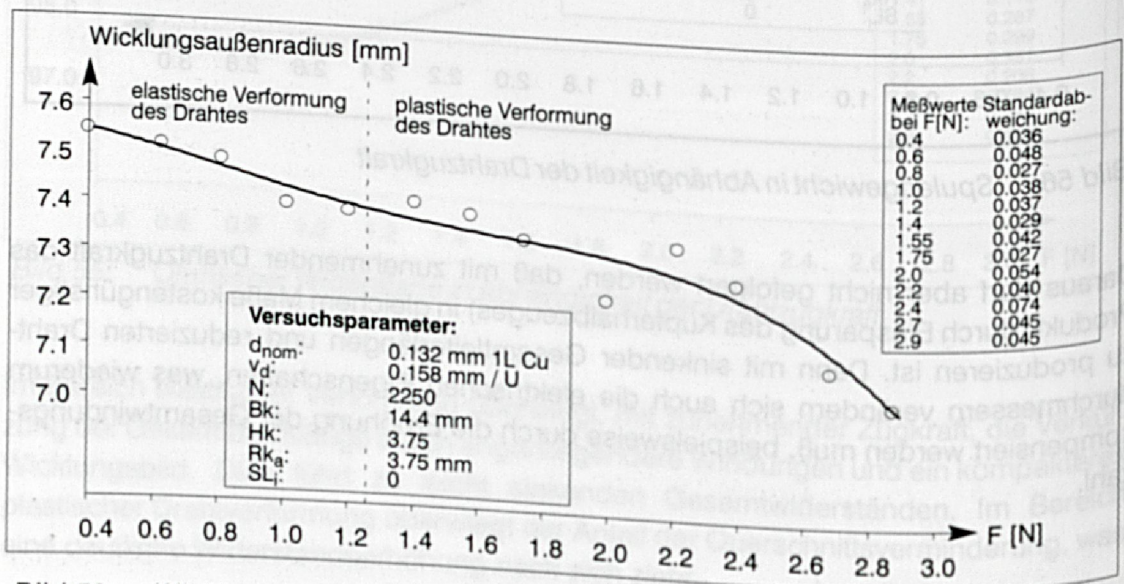


Bild 58: Wicklungsaußenradius in Abhängigkeit der Drahtzugkraft

Der zur Verfügung stehende Wickelraum ist durch stetige Miniaturisierungsbestrebungen oftmals für die eigentliche Wickelaufgabe zu gering bemessen, um alle Windungen einbringen zu können. Wie das vorangegangene Bild zeigt, kann man durch Erhöhung



der Drahtzugkraft das Problem umgehen. Vielerorts ist in der Praxis diese Vorgehensweise anzutreffen.

Jedoch dürfen die damit verbundenen Veränderungen elektrischer und geometrischer Ergebnisgrößen nicht außer acht gelassen werden. Mit Zunahme des Ohmschen Widerstandes reduziert sich bei gleicher Nennspannung die Ampèrewindungszahl und damit die erreichbare magnetische Kraftwirkung der Spule.

Ein überaus interessanter Effekt stellt sich bei der Untersuchung der elektrischen Durchschlagspannung von Spulen bei Variation der Drahtzugkraft dar. Wie bereits in Bild 20 gezeigt wurde, hängt die elektrische Isolationsfestigkeit von Kupferlackdrähten von der Lackdicke ab. Die Drahtzugkraft hat gerade im plastischen Dehnungsbereich des Drahtes, neben der Leiterquerschnittsabnahme, auch eine Verringerung der Lackisolationsstärke zur Folge. Ein über den elastischen Bereich hinaus plastisch verformter Draht besitzt, auch gegenüber einem weitaus weniger gereckten Draht, eine dünnere Lackschicht. Dies müßte eigentlich auch eine geringere elektrische Spannungsfestigkeit des Produktes zur Folge haben. In den experimentellen Versuchsreihen wurde aber im Gegenteil eine leichte Zunahme der Durchschlagspannung festgestellt.

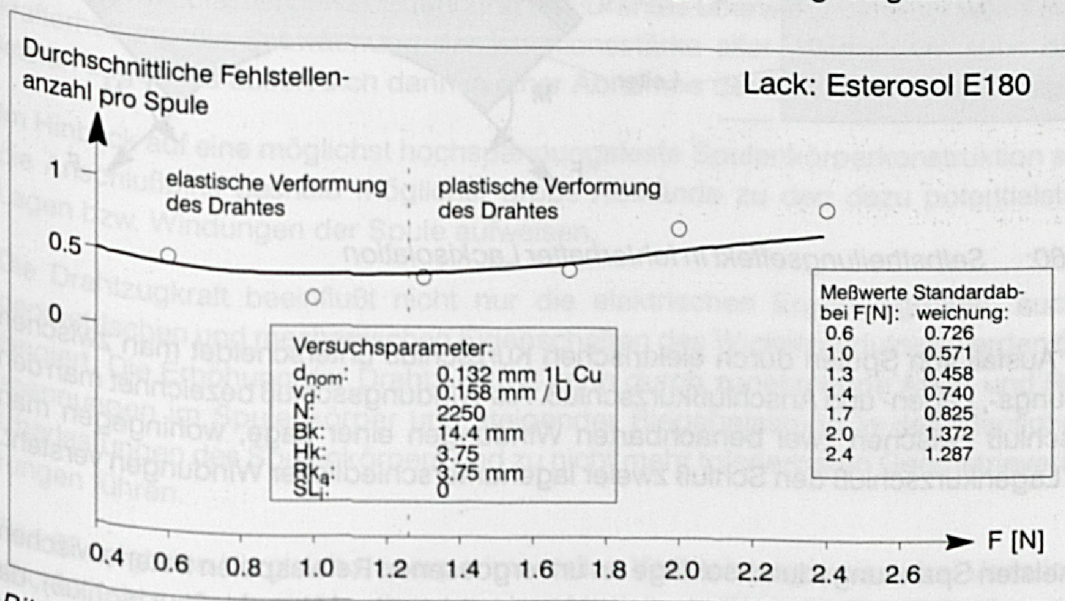


Bild 59: Durchschnittliche Fehlstellenanzahl des Drahtes in Abhängigkeit der herrschenden Drahtzugkraft bezogen auf die verwickelte Gesamtdrahtlänge der jeweiligen Spule (ca. 75m)

Mehrere Faktoren sind hierfür verantwortlich. Die durchschnittliche Fehlstellenhäufigkeit des Drahtes nimmt bei erhöhten Drahtzugkräften nur geringfügig zu, wie aus Bild 59 zu ersehen ist. Durch den sukzessiven lagenweisen Aufbau der Isolationsschicht ist die Isolation als mehrschichtige Hülle um den Leiter zu betrachten. Treten im Herstellungsprozeß der Isolation Einschlüsse oder Fehlstellen auf, so ist der Draht an dieser Stelle nicht notgedrungen schadhaft. Darunter- und darüberliegende Lackschichten können



trotzdem noch eine ausreichende Isolationsfestigkeit gewährleisten. Seitens DIN und IEC sind bis zu 15 Fehlstellen pro 100m Drahtlänge zulässig. Die in den Versuchen detektierte Anzahl von Fehlstellen liegt mindestens um den Faktor 20 günstiger, was die hohe Qualität der Lackdrahthalbzeuge belegt.

Der Draht erfährt während des Wickelprozesses eine Biegebeanspruchung, die in den einzelnen Lackebenen zu unterschiedlichen Dehnungen führt. Die einzelnen Lack-schichten sind in der Lage aufeinander abzugleiten, was einen gewissen Selbstheilungseffekt bewirkt.

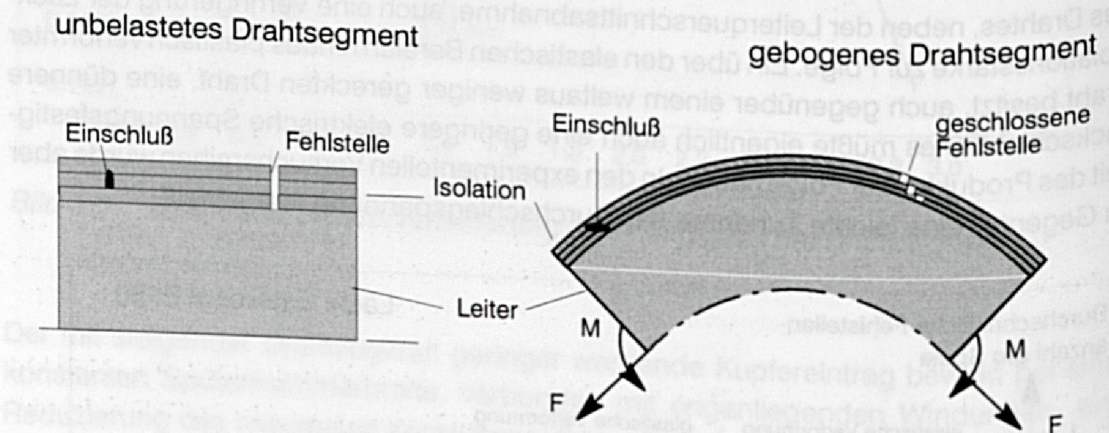


Bild 60: Selbstheilungseffekt in fehlerhafter Lackisolation

Beim Ausfall von Spulen durch elektrischen Kurzschluß unterscheidet man zwischen Windungs-, Lagen- und Anschlußkurzschluß. Als Windungsschluß bezeichnet man den Kurzschluß zwischen zwei benachbarten Windungen einer Lage, wohingegen man beim Lagenkurzschluß den Schluß zweier lagenunterschiedlicher Windungen versteht.

Die meisten Spannungsdurchschläge an unvergossenen Relaispulen treten zwischen dem Anschlußpin und einer Windung der obersten Lage auf (Anschlußkurzschluß), da hier die größte Potentialdifferenz und nur noch die Windung der letzten Lage lackisoliert ist, weil durch die Kontaktierung am Anschlußpin die dortige Lackisolierung aufgelöst wurde. Je näher die letzte Windungslage in den Bereich der leitenden Anschlußpins gelangt, desto kürzer ist die, zum Lackauftrag des Drahtes der letzten Lage, kommende Isolationsstrecke.

Je größer die Drahtzugkraft ist, desto enger und fester werden die Windungen um den Kern gelegt. Die Zwischenräume werden besser ausgefüllt und der maximale Außenradius der Wicklung nimmt ab. Das erkennt man in Bild 61 am leichten Anstieg der Durchschlagsspannung.



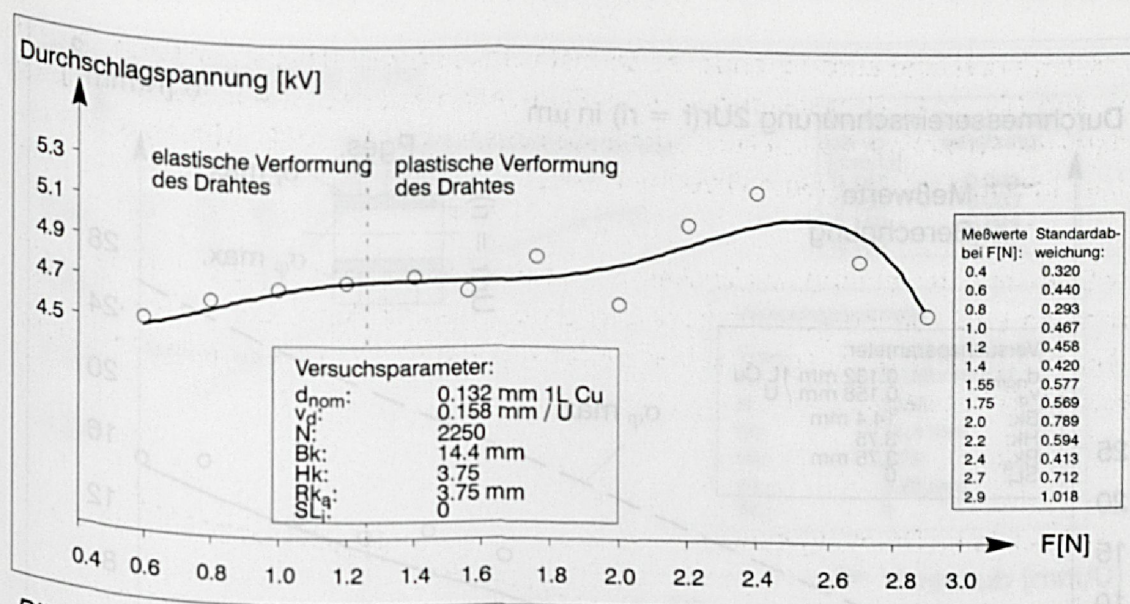


Bild 61: Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Drahtzugkraft

Im Bereich der plastischen Zugdehnung des Drahtes überwiegt bei einer weiteren Zugkrafterhöhung die Schwächung der Isolationsstärke aller Windungen, auch die der letzten Lage. Das äußert sich dann in einer Abnahme der Hochspannungsfestigkeit.

Im Hinblick auf eine möglichst hochspannungsfeste Spulenkörperkonstruktion sollten die Anschlußpins deshalb möglichst große Abstände zu den dazu potentialstarken Lagen bzw. Windungen der Spule aufweisen.

Die Drahtzugkraft beeinflusst nicht nur die elektrischen Ergebnisgrößen, auch die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Wickelproduktes werden davon tangiert. Die Erhöhung der Drahtzugkraft kann durch zunehmende Axial- und Radialspannungen im Spulenkörper und steigender Biegebelastung in den Flanschen zu Überlastungen des Spulenkörpers und zu nicht mehr tolerierbaren Geometrieänderungen führen.

Bild 62 zeigt den Vergleich der experimentellen Versuchsergebnisse bei Variation der Wickeldrahtzugkraft mit dem theoretischen Modell aus Kapitel 3. Deutlich erkennbar ist hierbei die sehr gute Übereinstimmung von Rechenmodell und den Experimenten.



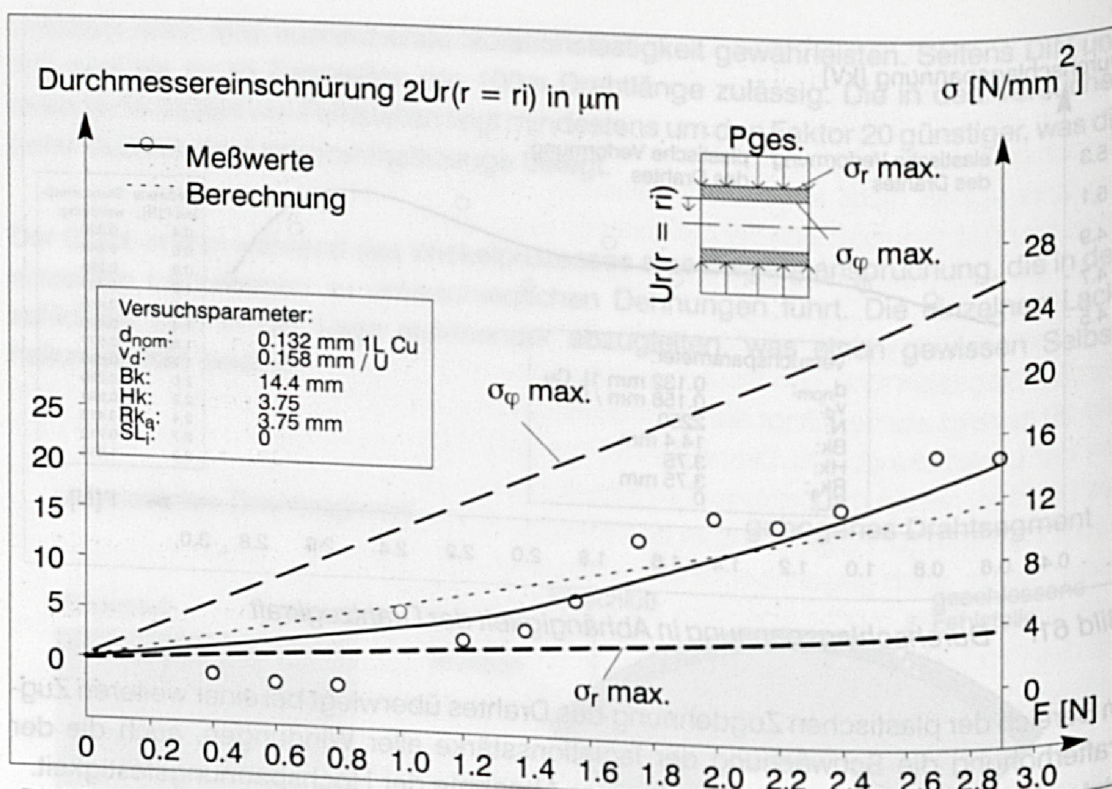


Bild 62: Mechanische Belastungen und Verschiebungen eines zylindrischen Spulenkörpers durch die unter Drahtzugkraft aufgebrachtten Windungen

Der Drahtvorschub stellt, neben der Drahtzugkraft, einen weiteren wichtigen Prozeßeinflußparameter dar. Je größer das Verhältnis Drahtvorschub ( $v_d$ ) zu Lackdrahtaußendurchmesser und Isolierung ( $d_a$ ) ist, desto größer ist der Steigungswinkel bzw. Überkreuzungswinkel zwischen zwei Wickellagen. Spulen mit einem deutlich sichtbaren Überkreuzungswinkel werden auch kreuzgewickelte Spulen oder Kreuzspulen genannt.

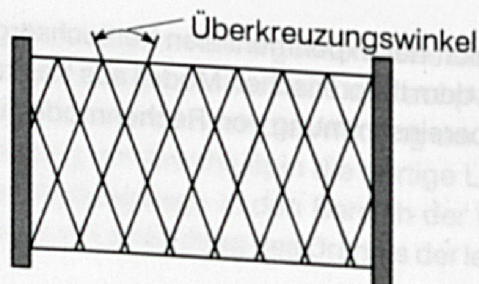


Bild 63: Kreuzwicklung

Mit zunehmendem Drahtvorschub sinkt der Wickelfaktor (vgl. Gleichung 3-3), was bei gleicher Endwindungszahl eine höhere Gesamtlagenanzahl und somit einen größeren Wicklungsaußenradius zur Folge hat.



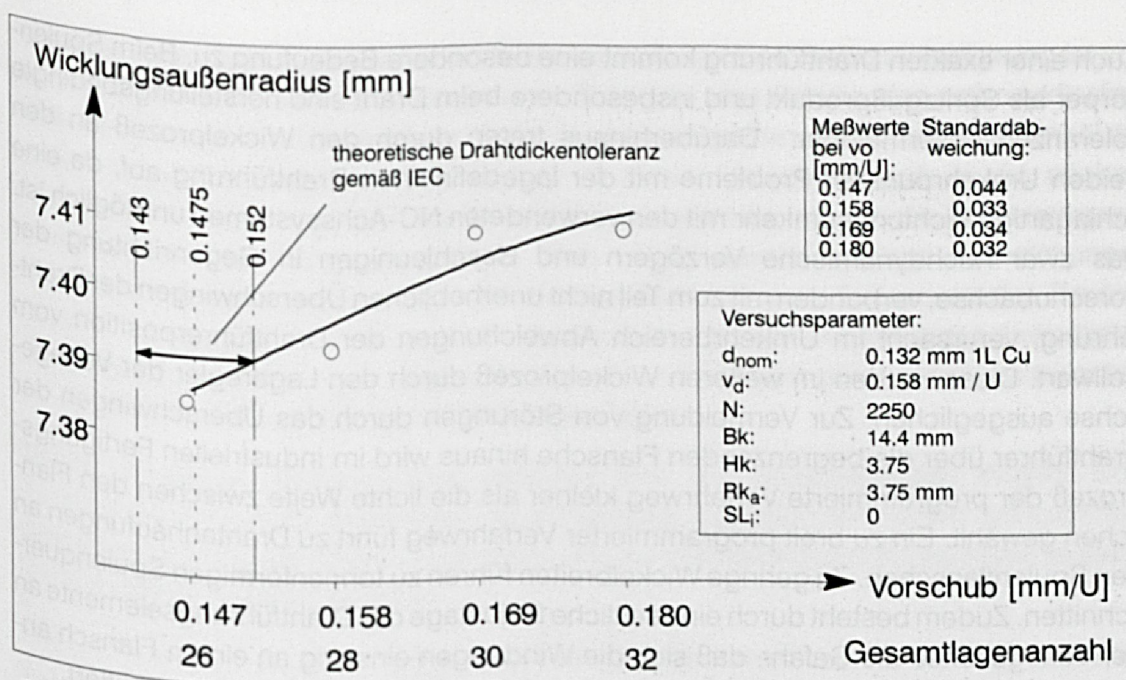


Bild 64: Wicklungsaußenradius in Abhängigkeit des Vorschubes und damit der Lagenanzahl

Die daraus hervorgehende Erhöhung der eingebrachten Drahtmenge erhöht natürlich auch den Ohmschen Gesamtwiderstand der Wicklung.

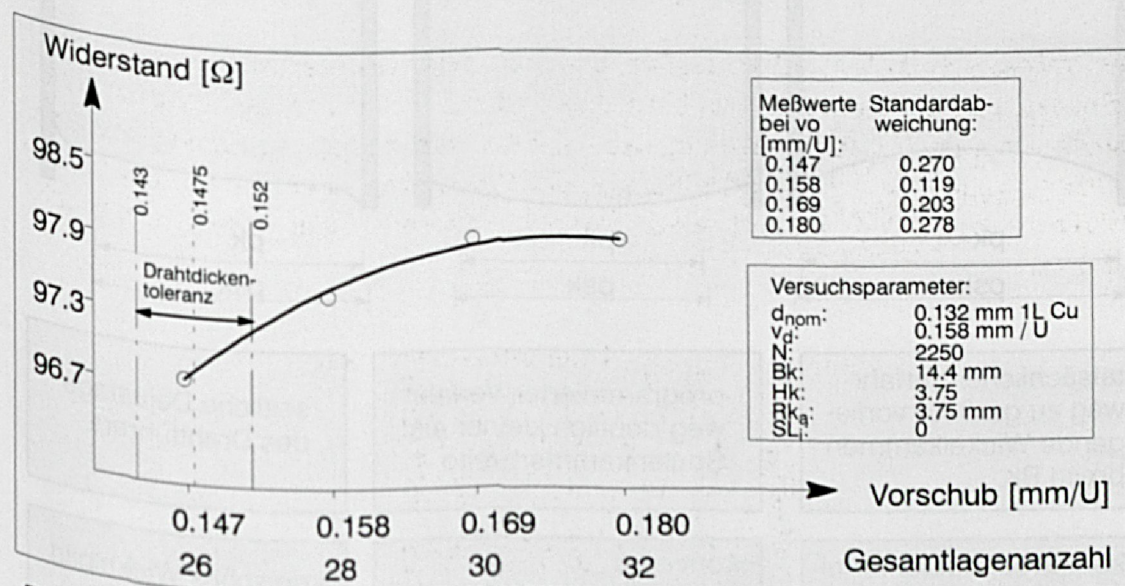
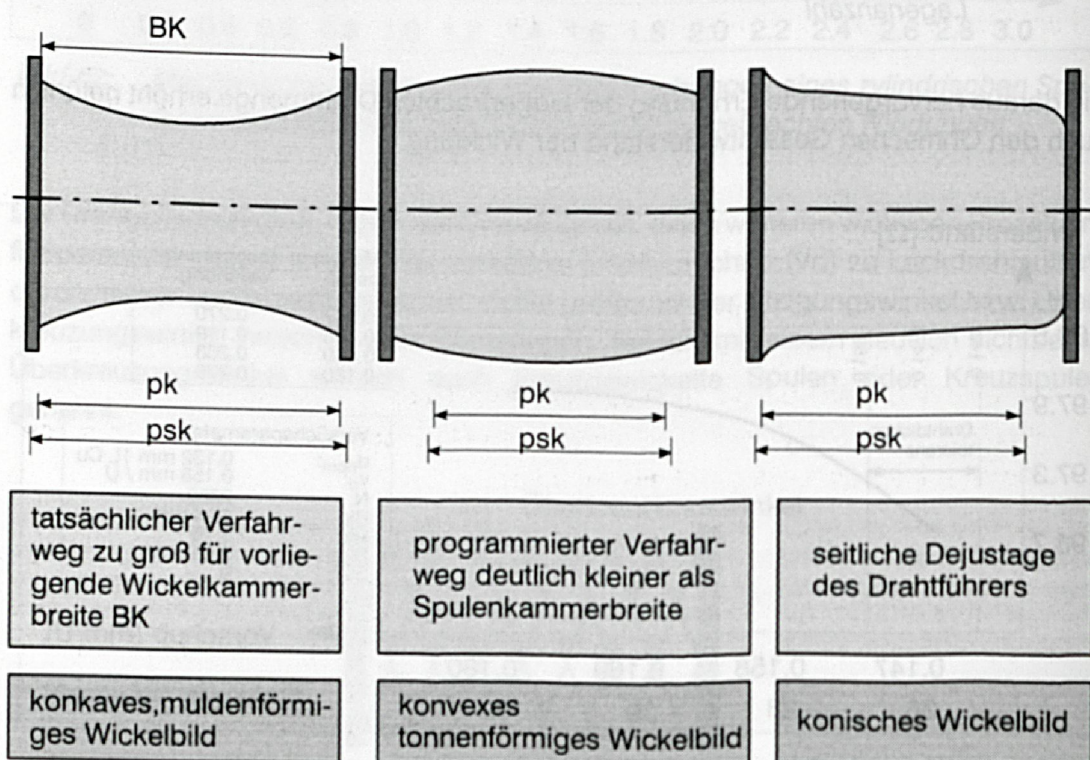


Bild 65: Ohmscher Gesamtwiderstand der Wicklung in Abhängigkeit des Vorschubes und damit der Gesamtlagenanzahl

Daher ist es unabdingbar, den Drahtvorschub bei einer weitreichenden Prozeßoptimierung in geeigneter Form auf das Produkt und den Prozeß abzustimmen.



Auch einer exakten Drahtführung kommt eine besondere Bedeutung zu. Beim Spulenkörper als Spritzgußprodukt und insbesondere beim Draht sind herstellungsbedingte Toleranzen unvermeidbar. Darüberhinaus treten durch den Wickelprozeß an den beiden Umkehrpunkten Probleme mit der lagedefinierten Drahtführung auf, da eine schlagartige Richtungsumkehr mit den verwendeten NC-Achssystemen unmöglich ist. Das zwar hochdynamische Verzögern und Beschleunigen in Gegenrichtung der Vorschubachse, verbunden mit zum Teil nicht unerheblichen Überschwingen der Drahtführung, verursacht im Umkehrbereich Abweichungen der Drahtführerposition vom Sollwert. Diese werden im weiteren Wickelprozeß durch den Lageregler der Verlegeachse ausgeglichen. Zur Vermeidung von Störungen durch das Überschwingen der Drahtführer über die begrenzenden Flansche hinaus wird im industriellen Fertigungsprozeß der programmierte Verfahrensweg kleiner als die lichte Weite zwischen den Flanschen gewählt. Ein zu breit programmierter Verfahrensweg führt zu Drahtanhäufungen an den Spulenflanschen. Zu geringe Wickelbreiten führen zu tonnenförmigen Spulenquerschnitten. Zudem besteht durch eine seitliche Dejustage der Drahtführungselemente an der Verlegeachse die Gefahr, daß sich die Windungen einseitig an einem Flansch anhäufen, was sich in einem von der Zylinderform abweichenden Wickelbild äußert.



pk: programmierter Verfahrensweg

psk: tatsächlicher Verfahrensweg incl. Überschwingen

Bild 66: Auswirkungen der Drahtführung auf die Oberflächengestalt der Wicklungen



Für einen mehrlagig lagengenauen Wicklungsaufbau ohne Zwischenisolierung ist von der wirtschaftlichen und technologischen Seite nur das Prinzip des orthozyklischen Wickelns relevant. Hierbei wird der Draht über einen großen Umschlingungswinkel der Spule orthozyklisch geführt und springt in einem kleinen Bereich in die nächste Windungsrille über. Auf herkömmlichen Wickelsystemen erfolgt die Drahtverlegung kontinuierlich und nicht schrittweise. Das bringt bereits geringe Abweichungen zwischen Drahtführerposition und Solldrahtposition mit sich. Toleranzen des Spulenkörpers, sowie des Drahtes und ein dynamisch von der Vorschubgeschwindigkeit abhängiges Überschwingverhalten können zu noch größeren Abweichungen zwischen der Drahtführer- und der Solldrahtposition führen.

Welche zulässigen Abweichungen zwischen Soll- und Istdrahtposition möglich sind, um trotzdem noch ein definiertes Wicklungsbild, insbesondere einen orthozyklisch lagengenauen Wickelaufbau, zu erhalten, sind bei der Wickelprozeßparameterauswahl von entscheidender Bedeutung.

Hiermit zeigt sich deutlich, daß bei der Konstruktion von Produkten mit wickeltechnischen Komponenten der Wickelprozeß und die Kenntnis über seine Wirkung auf die elektrischen und mechanischen Größen unbedingt mitberücksichtigt werden sollten, um ungewollte Qualitätseinbußen zu vermeiden.

#### **4.3 Untersuchung des Gleitmittelauftrages im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit des Lackdrahtes**

In welchen Größenordnungen die Drahtführerposition von ihrer Sollposition abweichen darf, hängt in erster Linie von vier Faktoren ab:

- Biegeradius des Lackdrahtes
- Durchmesser des Lackdrahtes
- Menge des Gleitmittels auf der Lackdrahtoberfläche
- Oberflächenbeschaffenheit und Rillengeometrie des Grundkörpers bzw. der bereits aufgetragenen Grundbewicklungen

Ein definierter Gleitmittelfilm auf der Lackdrahtoberfläche ist für die Verarbeitungseigenschaften des Drahtes von außerordentlicher Wichtigkeit. Ein fehlender oder ein zu geringer Gleitmittelfilm führt zum Haften und Verhaken des Drahtes an der Vorratsrolle - insbesondere beim Überkopfabzug. Desweiteren legt sich der Draht nicht wie gewünscht an die bereits aufgetragene (vorherige) Windung an, sondern steigt eine Lage höher auf, was bei einem gezielt lagengenauen Wicklungsbild zu Ausschluß führt. Ein zu hoher Gleitmittelanteil verursacht, daß sich Wachspartikel im gesamten Drahtführungssystem, besonders in den dünnen Röhrchendrahtführern, ansammeln und mit mikroskopisch kleinen Lackteilchen zu einer dichten Masse verbacken, welche die freie Drahtführung behindern. Der somit häufig verbundene Drahtriß durch verstopfte Drahtführer ist nur durch Austausch oder Reinigung zu vermeiden, woraus Produktionsstillstand und zusätzliche Kosten entstehen.



Aber auch in den Spulenerzeugnissen führen Wachsreste zu unerwünschten Effekten. Die sich mit der Zeit verflüchtigenden Paraffine können sich in Relais beispielsweise an den Schaltkontakten ablagern. Das äußert sich im Betriebsfall in zunehmenden Übergangswiderständen. Bislang fehlende systematische Untersuchungen sollen Aufschluß über den optimalen Wachsanteil geben, um den Draht störungsfrei und lagengenau verarbeiten zu können. Für diese Zwecke wurden verschiedenste Lackdrähte mit unterschiedlichen Gleitmittelanteilen hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit untersucht. Um ein Maß für die Verarbeitungseignung zu erhalten, wurde der sogenannte Nachlaufwinkel definiert. Er kann sowohl positiv als auch negativ sein und gibt Auskunft darüber, ob der Drahtführer dem momentanen Wickelort in senkrechter Projektionsebene gerade hinterherhinkt oder voreilt.

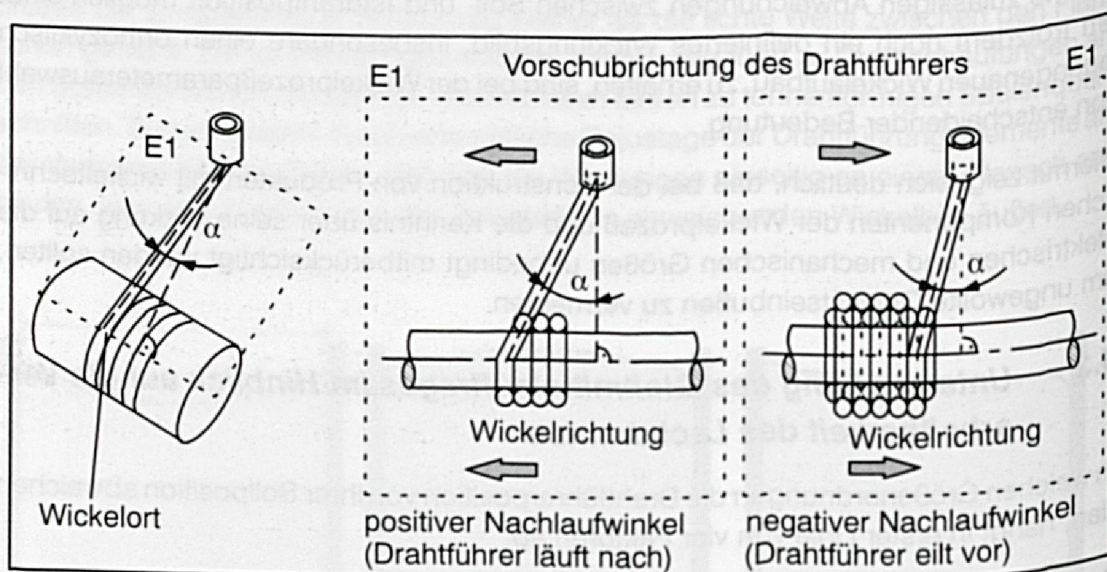


Bild 67: Geometrische Abhängigkeiten bei der Definition des Nachlaufwinkels

Bei sonst identischen Versuchsparametern liegt der maximal negative Nachlaufwinkel bei ca. 30 % des maximal positiven Nachlaufwinkels. Dieser Zusammenhang läßt sich dadurch begründen, daß der Draht bei einem voreilenden Drahtführer nur durch eine Rille geringer Tiefe geführt wird, wohingegen der Draht bei einem nacheilenden Drahtführer durch den gesamten Drahtquerschnitt geführt wird. Bei einem voreilenden Drahtführer (negativer Nachlaufwinkel) ergibt sich bei rein geometrischer Betrachtung - ohne Berücksichtigung plastischer Verformung des Drahtquerschnittes - eine Rillentiefe von  $r_t = 0.268 \cdot r$ .



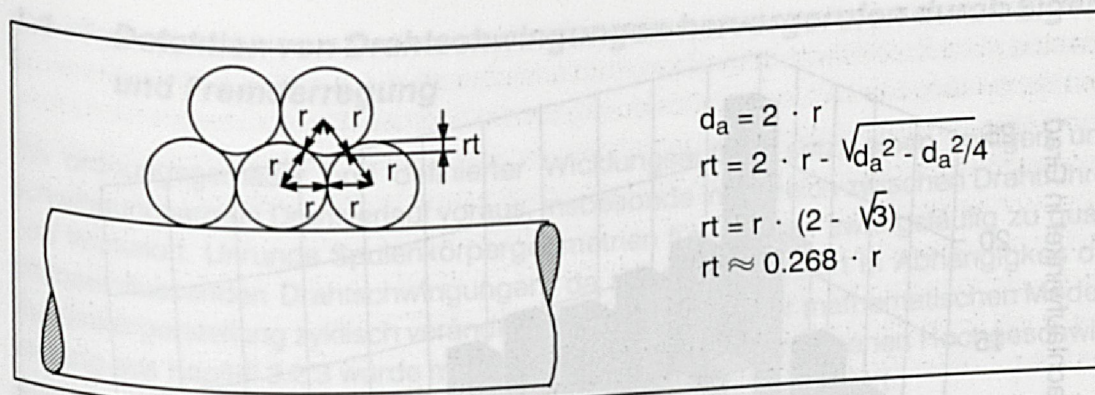


Bild 68: Geometrische Beziehungen an den relevanten Drahtelementen bei voreilendem Drahtführer

Wie aus Bild 69 ersichtlich ist, nimmt der maximal mögliche Nachlaufwinkel ab einer bestimmten Menge Gleitmittel (ca. 8 mg Paraffin/m<sup>2</sup> Lackdrahtoberfläche) nur noch unwesentlich zu. Versuche mit einem Wachsanteil > 30 mg/m<sup>2</sup> - bei denen während der Experimente eine deutliche Wachsansammlung an kritischen Stellen beobachtet werden konnte - haben gezeigt, daß sich dann die maximal erreichbaren Nachlaufwinkel wieder verkleinern. Versuche bei Variation der Drahtabzugsgeschwindigkeiten (0 - 40 m/s) haben bewiesen, daß ein Gleitmittelanteil von ca. 10 mg/m<sup>2</sup> durchaus ausreichend ist, um Drähte sicher und verhakungsfrei mit besten Prozeßparametern, hinsichtlich lagengenaue Verarbeitbarkeit, zu verwickeln. Außerdem bleiben die negativen Einflüsse der Paraffine auf den Prozeß und das Produkt relativ gering.

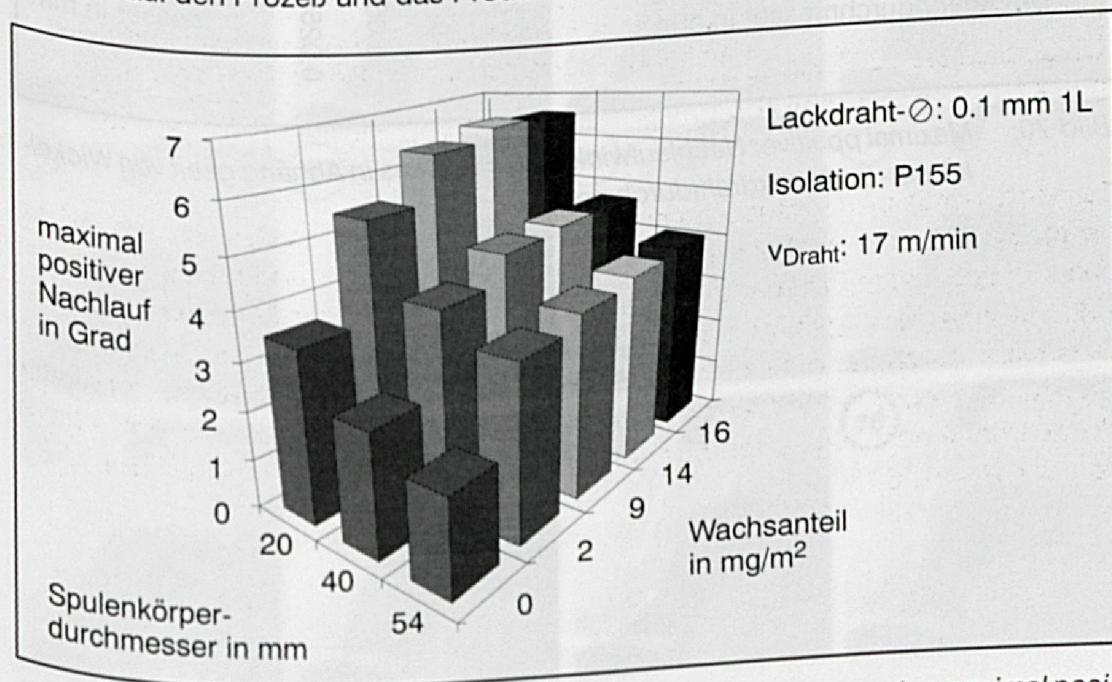


Bild 69: Experimentelle Versuchsergebnisse bei der Bestimmung des maximal positiven Nachlaufwinkels an unterschiedlichen Spulendurchmessern



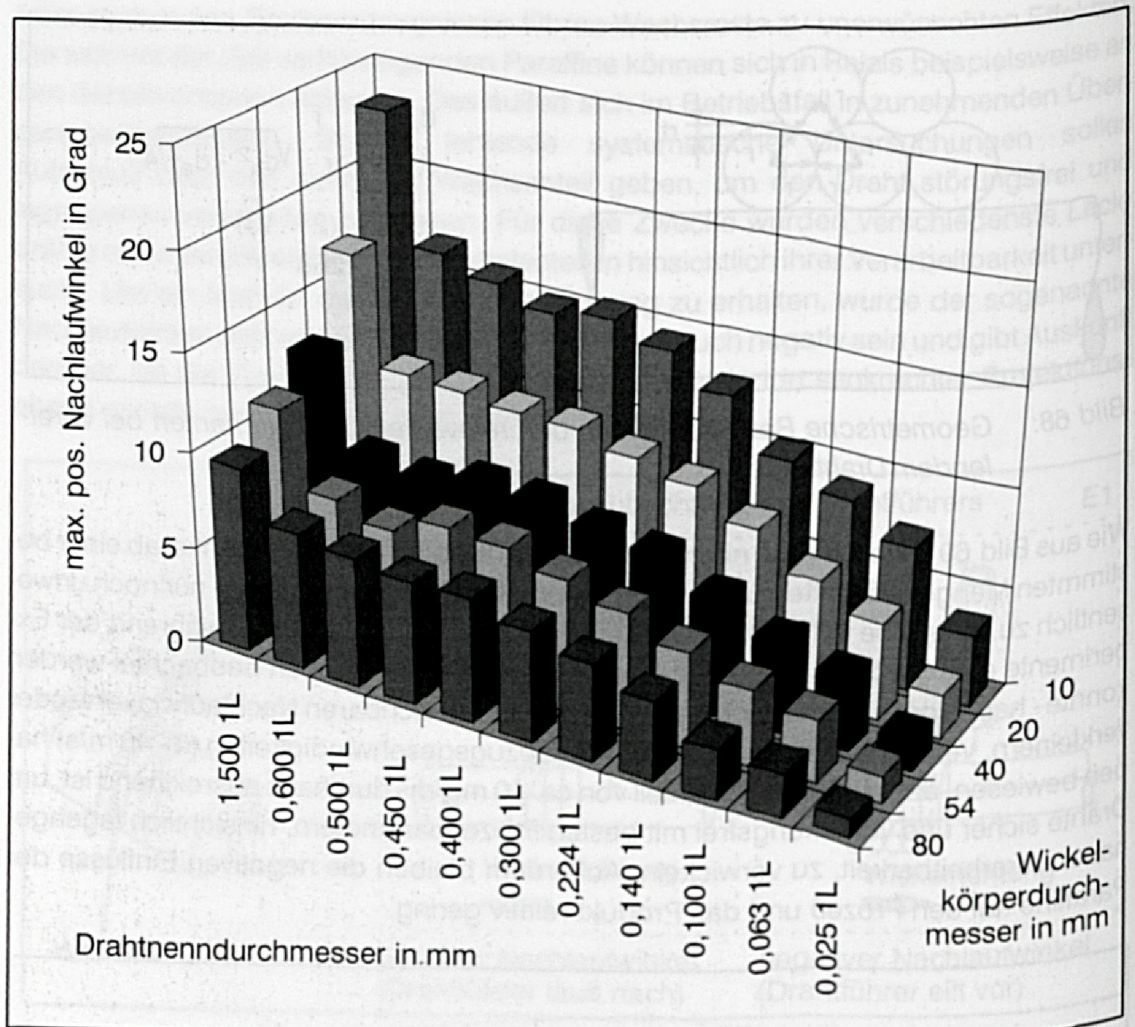


Bild 70: Maximal positiver Nachlaufwinkel des Drahtes in Abhängigkeit von Wickelkörper- und Lackdrahtdurchmesser



#### 4.4 Detektion von Drahtschwingungen hervorgerufen durch Eigen- und Fremderregung

Ein ordnungsgemäßer und definierter Wicklungsaufbau setzt einen ruhigen und schwingungsarmen Drahtverlauf voraus, insbesondere im Bereich zwischen Drahtführer und Wickelort. Unrunde Spulenkörpergeometrien führen aber zwangsläufig zu qualitätsbeeinflussenden Drahtschwingungen, da sich der Wickelort in Abhängigkeit der Spulenkörperstellung zyklisch verändert. Zur Verifikation der mathematischen Modellbildung aus Kapitel 3.2.3 wurde mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Hochgeschwindigkeitskamerasystem der Wickelprozeß beobachtet und analysiert.

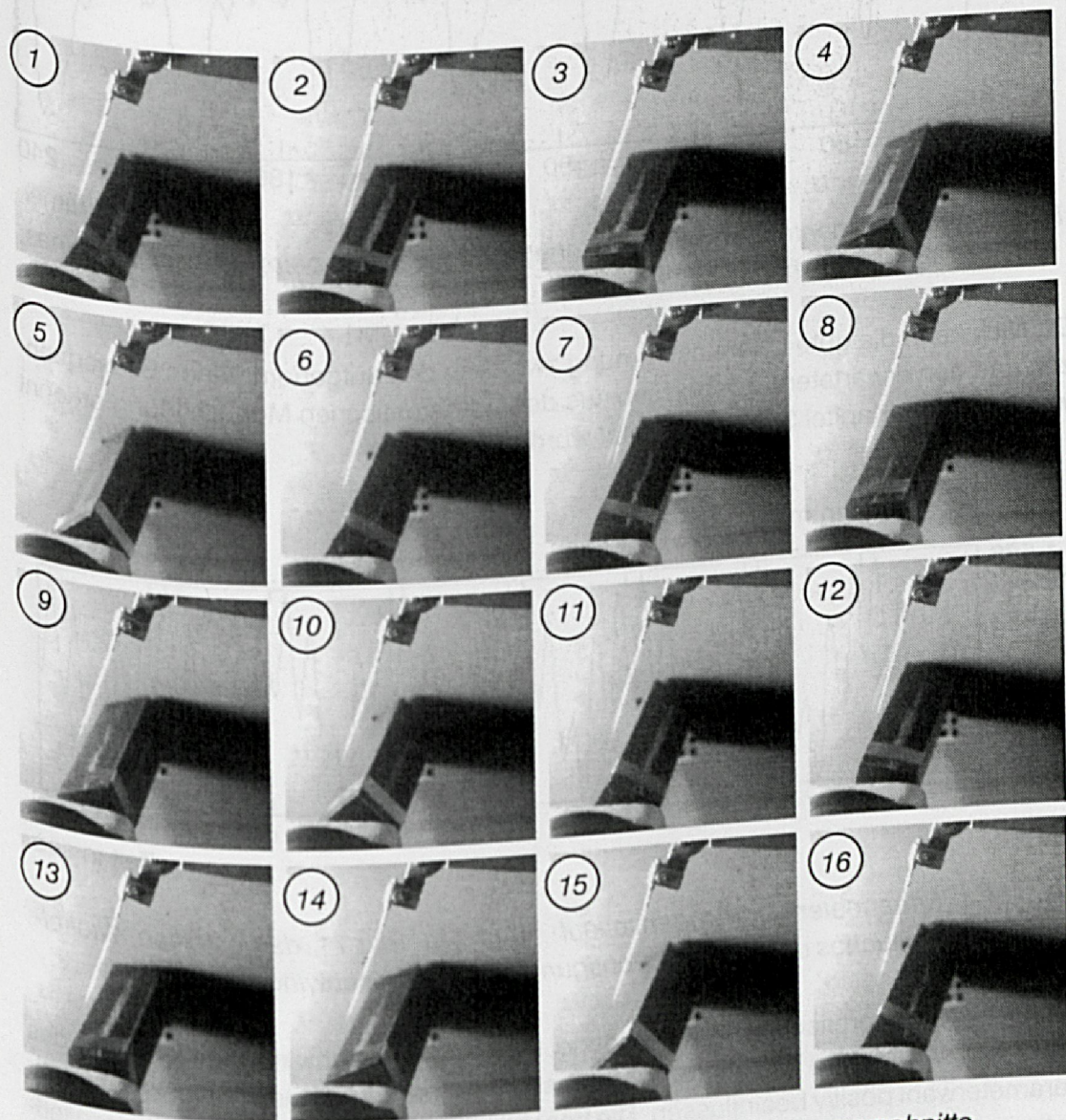


Bild 71: Filmsequenz beim Bewickeln unrunder Spulenkörperquerschnitte



Bild 72 zeigt den experimentell ermittelten Verlauf der Drahtschwingung in ca. 20 mm Abstand vom Drahtführer beim Bewickeln eines quadratischen Wickelkörpers von 30 mm Kantenlänge bei einer Wickeldrehzahl von 2000 1/min. Der 0,1 mm starke Kupferlackdraht wurde mit einer Drahtzugkraft von ca. 80 cN aufgebracht, wobei der Abstand des Drahtführers von der Rotationsachse des Spulenkörpers ca. 80 mm beträgt.

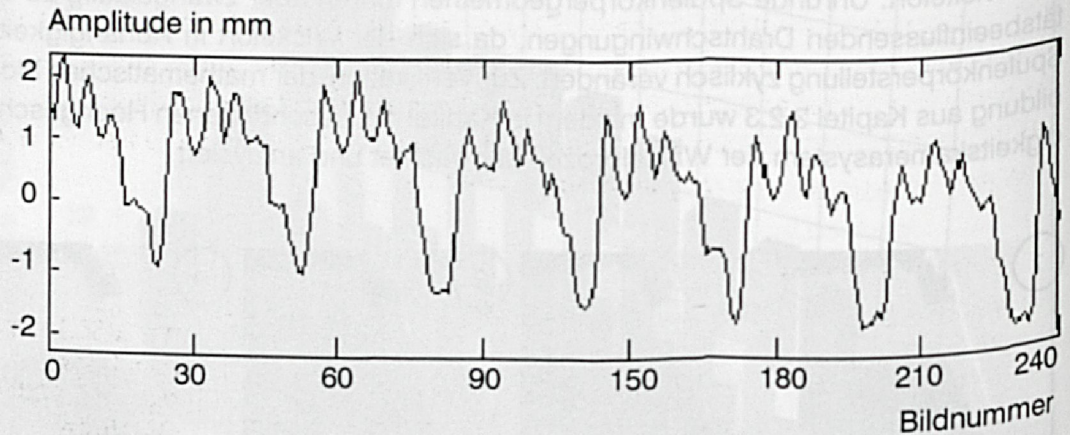


Bild 72: Experimentell ermittelter Schwingungsverlauf beim Bewickeln eines quadratischen Wickelkörpers

Deutlich kann die gute Übereinstimmung zwischen den aufgenommenen Bildsequenzen und den erwarteten Ergebnissen aus der mathematischen Modellbildung erkannt werden, die in Kapitel 3.2.3 hergeleitet wurden.

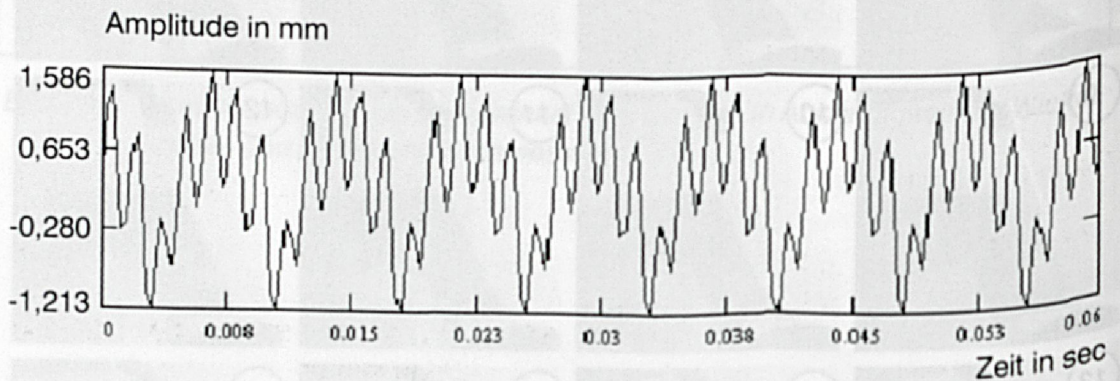


Bild 73: Errechneter Amplitudenverlauf des in Bild 71 dargestellten Wickelversuches unter Berücksichtigung der Drahtgeschwindigkeit

Mit Hilfe der theoretischen Modellbildung läßt sich das Schwingungsverhalten des Drahtes im Vorfeld des Wickelprozesses abschätzen und durch eine geeignete Prozeßparameterwahl positiv beeinflussen. Die beachtlichen Möglichkeiten zur Wickelprozeßoptimierung, die sich durch eine geeignete Prozeßparameterwahl eröffnen, sollen in Bild 74 verdeutlicht werden. Während im oberen Diagramm der Verlauf der Draht-



schwingungsamplitude zu sehen ist, bei dem die gewählten Prozeßparameter zum Zusammenfallen von Erregerfrequenz (durch Rotation des quadratischen Spulenkörpers) und Eigenfrequenz der frei schwingenden Drahtsaite führen, ist im unteren Diagramm das Ergebnis mit optimierten Wickelprozeßparametern zu sehen. Durch Veränderung der freien Schwingungslänge, bei sonst unveränderten Prozeßparametern, konnte das Zusammenfallen von Eigen- und Erregerfrequenz vermieden werden, was sich sofort in deutlich kleineren Drahtschwingungsamplituden und geringeren Störfrequenzanteilen niederschlägt. Je geringer die Schwingungsamplitude, desto ruhiger und definierter legt sich der Draht der gewünschten Wickelform an, desto besser ist das Drahtführungsverhalten und umso größer ist die Wahrscheinlichkeit einen lagengenauen Wicklungsaufbau zu erhalten.

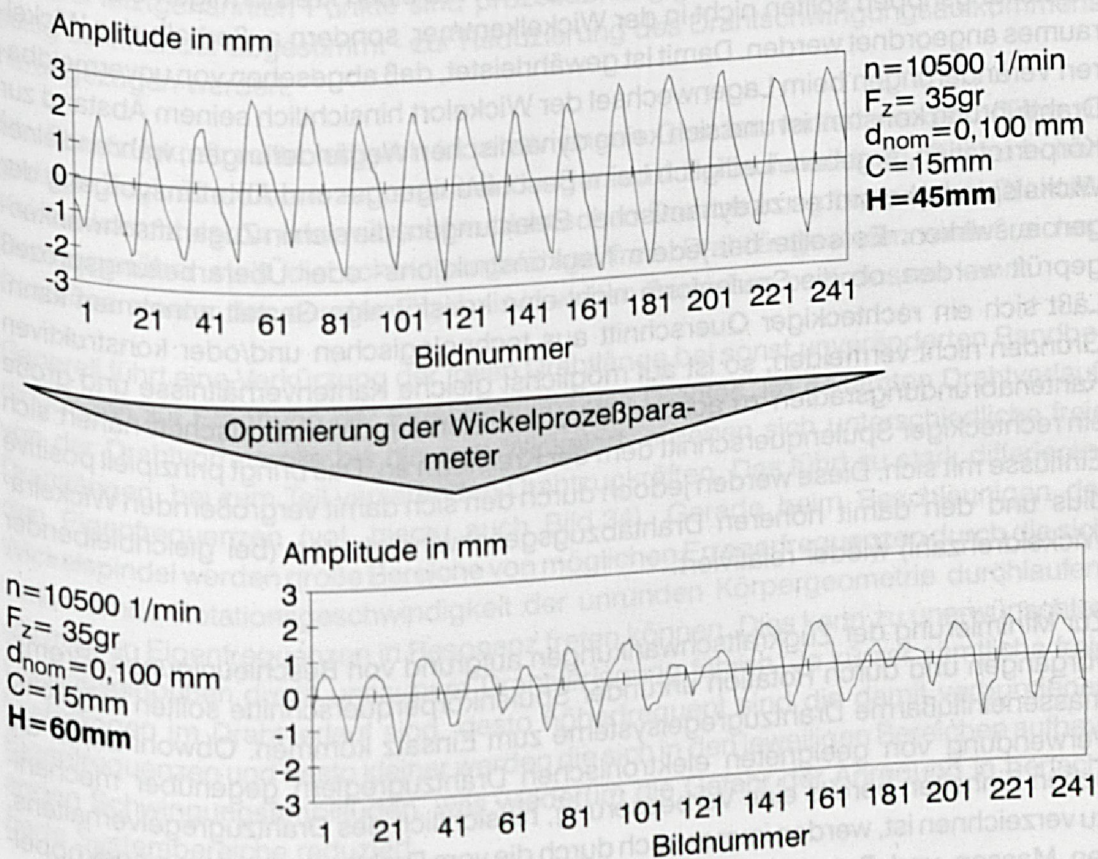


Bild 74: Veränderung der Drahtschwingungsamplituden durch geeignete Wahl der Prozeßparameter

Die experimentellen Ergebnisse des vorliegenden Kapitels bestätigen die Gültigkeit der mathematischen Ersatzmodelle. Mit der Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen den Prozeßparametern und dem Wickelergebnis lassen sich Regeln zur Wahl der optimalen Maschineneinstellparameter ableiten, um qualitativ hochwertige Wickelerzeugnisse unter wirtschaftlichen und rationellen Bedingungen fertigen zu können.



## **5     *Ableitung von Regeln zur verbesserten Planung und Ausführung von Spulenwickelvorgängen***

### **5.1     *Maßnahmen zur Reduzierung der Drahtzugkraftschwankungen***

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, das Auftreten von dynamischen Drahtzugkraftschwankungen zu umgehen.

Ein möglicher Ansatz führt über eine wickelgerechte Spulenkörperkonstruktion. Die für den Wickelprozeß optimale Spulenkörpergestalt hat einen kreisförmigen Querschnitt. Versteifungsrippen sollten nicht in der Wickelkammer, sondern außerhalb des Wickelraumes angeordnet werden. Damit ist gewährleistet, daß abgesehen von unvermeidbaren Veränderungen beim Lagenwechsel der Wickelort hinsichtlich seinem Abstand zur Drahtführung konstant ist und sich keine dynamischen Wegänderungen, während einer Körperrotation, ergeben. Lediglich beim Beschleunigungs- und Abbremsvorgang der Wickelspindel kommt es zu dynamischen Belastungen, die sich in Zugkraftschwankungen auswirken. Es sollte bei jedem Neukonstruktions- oder Überarbeitungsprozeß geprüft werden, ob die Spulenform nicht eine kreisförmige Gestalt annehmen kann. Läßt sich ein rechteckiger Querschnitt aus technologischen und/oder konstruktiven Gründen nicht vermeiden, so ist auf möglichst gleiche Kantenverhältnisse und große Kantenabrundungsradien zu achten. Mit zunehmendem Wickelfortschritt nähert sich ein rechteckiger Spulenquerschnitt dem der Kreisform an. Das bringt prinzipiell positive Einflüsse mit sich. Diese werden jedoch durch den sich damit vergrößernden Wickelradius und den damit höheren Drahtabzugsgeschwindigkeiten (bei gleichbleibender Wickeldrehzahl) wieder relativiert.

Zur Minimierung der Zugkraftschwankungen aufgrund von Beschleunigungs-/Bremsvorgängen und durch Rotation unrunder Spulenkörperquerschnitte sollten möglichst masseneinflußarme Drahtzugregelsysteme zum Einsatz kommen. Obwohl durch die Verwendung von geeigneten elektronischen Drahtzugreglern gegenüber mechanischen Einheiten bereits eine Verbesserung, hinsichtlich des Drahtzugregelverhaltens, zu verzeichnen ist, werden immer noch durch die vom Drahtbremssystem eingekoppelten Massen und Rotationsmomente zusätzliche Belastungen auf den Draht eingebracht. Das schlägt sich in erhöhten Drahtzugkraftschwankungen nieder, da die bisher am Markt erhältlichen Drahtbremssysteme nicht in der Lage sind, die aufgrund der Körperrotation eingebrachten dynamischen Zugkraftschwankungen auszuregeln.

Ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes und prototypisch aufgebautes elektronisches Drahtzugregelsystem (siehe Kapitel 6.2) zeichnet sich durch geringe bewegte Massen aus und führt bei hohen Drahtabzugsgeschwindigkeiten zu deutlich geringeren Drahtzugkraftschwankungen.



## 5.2 Möglichkeiten zur Reduzierung von Drahtschwingungen

Wie sowohl die experimentellen als auch die theoretischen Untersuchungen ergaben, ist das Drahtschwingungsverhalten in erster Linie von folgenden Faktoren bestimmt:

- Materialkonstanten des zu verarbeitenden Drahtes
- Drahtdurchmesser
- Spulenkörperform
- Drahtzugkraft
- schwingungsfähige freie Drahtlänge
- Wickeldrehzahl

Die drei letztgenannten Punkte sind prozeßabhängige Größen. Sie können - gegenseitig aufeinander abgestimmt - zur Reduzierung des Drahtschwingungsaufkommens herangezogen werden.

Die Drahtzugkraft sollte lediglich in relativ engen Grenzen variiert werden. Denn zu geringe Zugkräfte führen zu losen Windungen und Schlaufenbildung. Bei zu hohen Kräften kommt es zur unerwünschten plastischen Drahtreckung bis hin zum Drahtriß. Demgegenüber stellt die schwingungsfähige freie Drahtlänge einen einflußreichen Prozeßparameter dar, der das Ergebnis in weiten Bereichen beeinflussen kann.

Generell führt eine Verkürzung der freien Drahtlänge bei sonst unveränderten Randbedingungen zur Erhöhung der Eigenfrequenz des Drahtes. Im gesamten Drahtverlauf, von der Drahtvorratsrolle bis hin zum Wickelort, ergeben sich unterschiedliche freie Drahtlängen, bei zum Teil variierenden Drahtzugkräften. Das führt zu stark differierenden Eigenfrequenzen (vgl. hierzu auch Bild 34). Gerade beim Beschleunigen der Wickelspindel werden große Bereiche von möglichen Erregerfrequenzen durch die sich verändernde Rotationsgeschwindigkeit der unrunder Körpergeometrie durchlaufen, die mit den Eigenfrequenzen in Resonanz treten können. Dies kann zu unerwünschten Qualitätseinbußen durch unsaubere Drahtverlegung führen. Je kürzer sämtliche freie Drahtlängen im Drahtverlauf sind, desto höherfrequent sind die damit verbundenen Eigenfrequenzen und desto kleiner werden die sich in den jeweiligen Bereichen aufbauenden Schwingungsamplituden, was wiederum die Gefahr der Anregung in benachbarte Systembereiche reduziert.

Daher führen in den Drahtverlauf eingebrachte Dämpfungselemente - beispielsweise in Form von Filzscheiben - zu kürzeren freien Drahtlängen, zu insgesamt höheren Eigenfrequenzen und zu einer verminderten Gefahr von Resonanzerscheinungen mit den Erregerfrequenzen. Die Dämpfungselemente haben aber, neben den erwähnten Effekten, auch Einfluß auf die Drahtzugkraft, die es zu berücksichtigen gilt.

Die Änderung des Abstandes zwischen Drahtführung und Spulenkörper während der Beschleunigungsphase stellt eine weitere Möglichkeit dar, das Drahtschwingungsaufkommen so gering wie möglich zu halten. Jedoch setzt dies einen mehrachsigen NC-



Systemaufbau voraus, der neben der NC-Achsbewegung für den eigentlichen Vorschub, die zeitgleiche Bewegung der darauf orthogonal angeordneten Achse zuläßt.

### 5.3 Notwendige Prozeß- und Systemparameter zur Erzielung lagengenaue Wicklungsaufbauten

Lagengenaue Wicklungsaufbauten stellen, aufgrund der vielfältigen Einflußgrößen auf Draht, Spulenkörper und Prozeß, höchste Anforderungen an die Prozeßgestaltung.

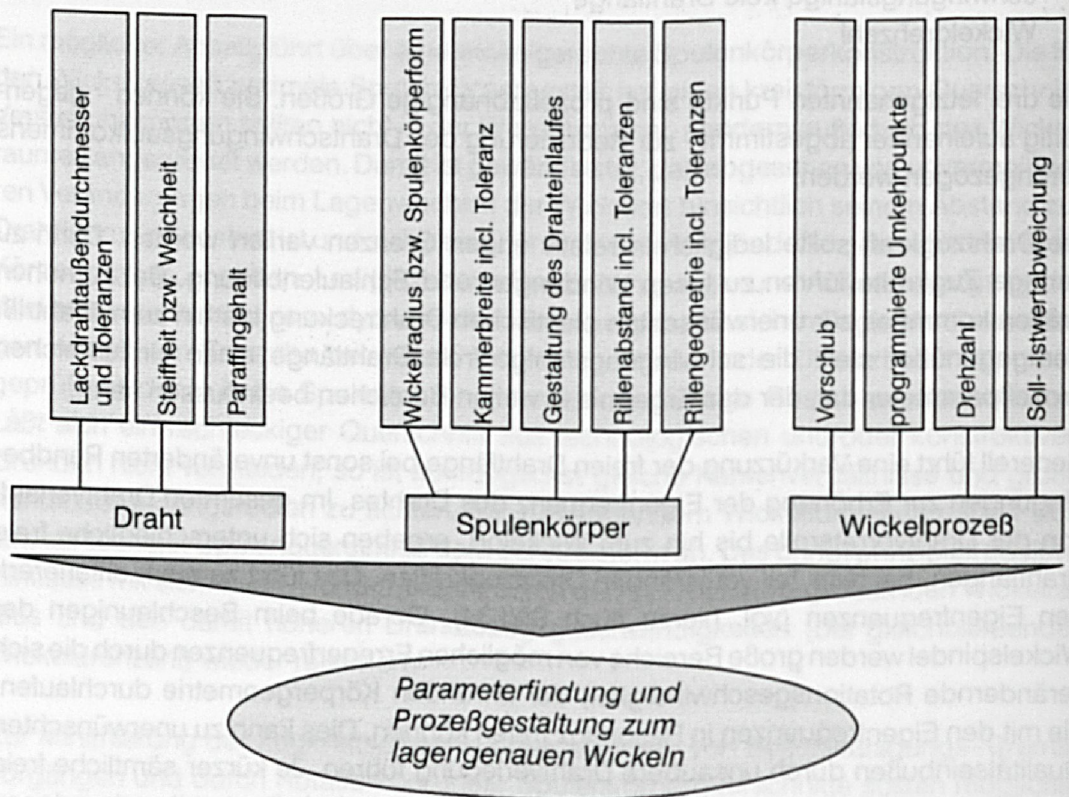


Bild 75: Einflußparameter auf lagengenaue Wicklungsaufbauten

#### Anforderungen an den Draht

Beim Draht ist, neben seinem Durchmesser und seinem Paraffingehalt auf der Lackoberfläche, die Durchmesser-toleranz von entscheidender Bedeutung. Die nach IEC 317 zulässige Drahtdurchmesserschwankung erlaubt bei einem 0,11 mm starken Draht eine Leitertoleranz von  $\pm 0,003$  mm ( $\pm 2,7$  %). Bei einer angenommenen Spulenkammerbreite von 20 mm kann also die maximal einbringbare Anzahl von Windungen pro Lage prinzipiell zwischen 177 und 187 variieren, wenn man dicht an dicht wickeln würde. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß zur definierten und reproduzierbaren Aufbringung der ersten Lage auf den Spulenkörper, eine dem Drahtnennendurchmesser angepaßte



Zwangsführung des Drahtes auf der Spulenkörperoberfläche in Form von orthozyklischen Rillen notwendig ist. Die exakte Verlegung der ersten Lage ist unter dem Gesichtspunkt besonders wichtig, daß bei einer orthozyklischen Lagenwicklung die untere Lage stets die Führung für die folgende darstellt. Der Wunsch nach einem qualitativ stabilen, lagengenauen Wicklungsaufbau erfordert in der Regel die Einschränkung der möglichen Drahtstärkeltoleranz, um auch bei ungünstigen Maßkombinationen dennoch zufriedenstellende Ergebnisse produzieren zu können.

### Anforderungen an den Spulenkörper

Der Spulenkörper wird meist als thermoplastisches Kunststoffspritzgußteil ausgeführt. Die Form des Körpers bzw. der Wickelradius gehen als Parameter genauso ein, wie die Wickelkammerbreite und deren Toleranz.

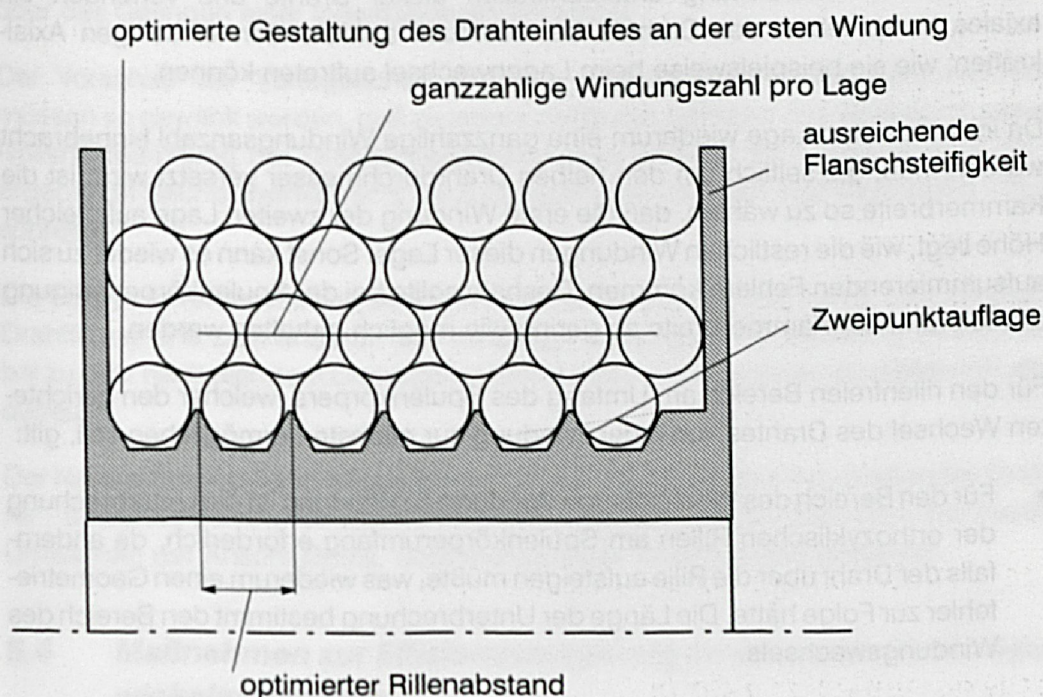


Bild 76: Gestaltungsrichtlinien zur Optimierung von Spulenkörpern

Der Gestaltung des Drahteinlaufes muß besondere Beachtung geschenkt werden. Bereits kleinste Störungen bzw. Abweichungen im Aufbau der ersten Lage können sich mit zunehmendem Wicklungsfortschritt aufsummieren und zu Fehlern im Wicklungsbild führen. Der Drahteinlauf ist so schmal zu gestalten, daß die am Einlaufflansch anliegenden Windungen durch darüberliegende Windungen und den damit verbundenen Radialkräften nicht in den Einlaufkanal seitlich abgleiten können.



Die Kammerbreite und ihre Toleranz müssen u.a. nach folgenden Gesichtspunkten ausgewählt werden:

- Die Breite ist so zu bemessen, daß in jeder Lage ein ganzzahliges Vielfaches einer vollen Windung eingebracht werden kann, da sonst der Windungswechsel mit einer steigenden Lagenanzahl radial umläuft und das Drahtführungsverhalten verschlechtert.
- Der Rillenabstand ist in jedem Fall mindestens so groß zu wählen wie der theoretisch maximal zu verarbeitende Drahtaußendurchmesser, andernfalls kommt es unweigerlich zu Wickelfehlern. In der Praxis muß der Rillenabstand sogar noch größer gewählt werden, da der Draht stets durch Krümmung eine gewisse Unrundheit aufweist, die aus dem Fertigungsprozeß mit abschließender Aufspulung des Drahtes auf den Lieferrollen resultiert /46/, /47/.
- Eine Zweipunktauflage des Drahtes durch eine prismatische Rillenform erlaubt die lagedefinierte Verarbeitung unterschiedlich dicker Drähte und verhindert ein axiales Verschieben des Drahtes bei eventuell auftretenden einseitigen Axialkräften, wie sie beispielsweise beim Lagenwechsel auftreten können.
- Da in der zweiten Lage wiederum eine ganzzahlige Windungsanzahl eingebracht werden muß, die seitlich um den halben Drahtdurchmesser versetzt wird, ist die Kammerbreite so zu wählen, daß die erste Windung der zweiten Lage auf gleicher Höhe liegt, wie die restlichen Windungen dieser Lage. Sonst kann es wieder zu sich aufsummierenden Fehlern kommen. Deshalb sollte bei der Spulenkörperfertigung die Toleranz der Kammerbreite so gering wie möglich gehalten werden.
- Für den rillenf freien Bereich am Umfang des Spulenkörpers, welcher den gerichteten Wechsel des Drahtes von einer Windung zur nächsten ermöglichen soll, gilt:
  - Für den Bereich des Wechsels von Windung zu Windung ist die Unterbrechung der orthozyklischen Rillen am Spulenkörperumfang erforderlich, da andernfalls der Draht über die Rille aufsteigen müßte, was wiederum einen Geometriefehler zur Folge hätte. Die Länge der Unterbrechung bestimmt den Bereich des Windungswechsels.

Eine lange Unterbrechung führt zu langen Übergängen, dementsprechend großen Übergangszonen mit der Gefahr, daß in höheren Lagen keine definierte orthozyklische Führung durch die darunterliegenden Lagen mehr möglich ist. Eine zu kurze Unterbrechung zwingt den Draht während eines kleinen Umfangswinkels zu einer starken Richtungsumkehr. Bei biegesteifen Wickeldrähten und hohen Wickelgeschwindigkeiten kann das Formänderungsvermögen des Drahtes zu gering sein, sich in der gewünschten Form auf den Spulenkörper aufbringen zu lassen. Der Draht steigt undefiniert eine Lage auf und der somit verbundene Geometriefehler hat eine wilde Wicklung zur Folge.



Die Wahl des Umfangbereiches mit Rille (zur Drahtführung) und ohne Rille (zum Windungswechsel) ist stark produktabhängig und wird in erster Linie durch

- Biegeradius des Spulenkörpers
- Drahtdurchmesser
- Fertigkeitseigenschaften des Drahtes und
- gewünschter Wickelgeschwindigkeit

bestimmt.

### **Anforderungen an den Wickelprozeß**

Der Wickelprozeß als solcher entscheidet, aufgrund der dynamischen Drahtführung, über das Gelingen einer lagengenauen Wicklung.

Der Vorschub der Verlegeachse und die programmierten Kammerumkehrpunkte müssen so gewählt werden, daß zu jedem Zeitpunkt während des Wickelprozesses die Istwertabweichung der Drahtführerposition vom Sollwert so gering ist, daß der sich ergebende Nachlaufwinkel nicht die zulässigen Grenzen (vgl. Bild 69 und Bild 70) überschreitet.

Die Folgen wären zum einen eine undefinierte Spreizwicklung bei zu sehr voreilem Drahtführer und zum anderen das vorzeitige Aufsteigen der Wicklung im Wickelraum bei zu sehr nacheilem Drahtführer. Beide Fälle ergeben einen gestörten Wicklungsaufbau.

Der Nachlaufwinkel kann prinzipiell durch eine Vergrößerung des Abstandes Drahtführer - Spulenkörperrotationsachse vergrößert werden, jedoch steht dem die, meist zum Umwickeln der Anschlußpins, notwendige kurze Drahtführung entgegen.

### **5.4 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung an automatisierten Spulenwickelautomaten**

Wie bereits angedeutet, wird eine Vielzahl von Wickelerzeugnissen an Mehrspindel-Mehrachs-Wickelautomaten gefertigt. Für höchste Produktivität bei minimalem Personaleinsatz ist dabei, neben dem Wickelprozeß, auch das Anschließen von Spulenanfang und -ende, sowie das Spulenhänding, vollautomatisiert.

Die detaillierte Analyse der Zeitanteile des Produktionsstillstandes in einer typischen Relaispulenfertigungslinie weist 2 Bereiche auf, die sich äußerst negativ auf die Verfügbarkeit und damit auf die Produktivität des Gesamtsystems auswirken.



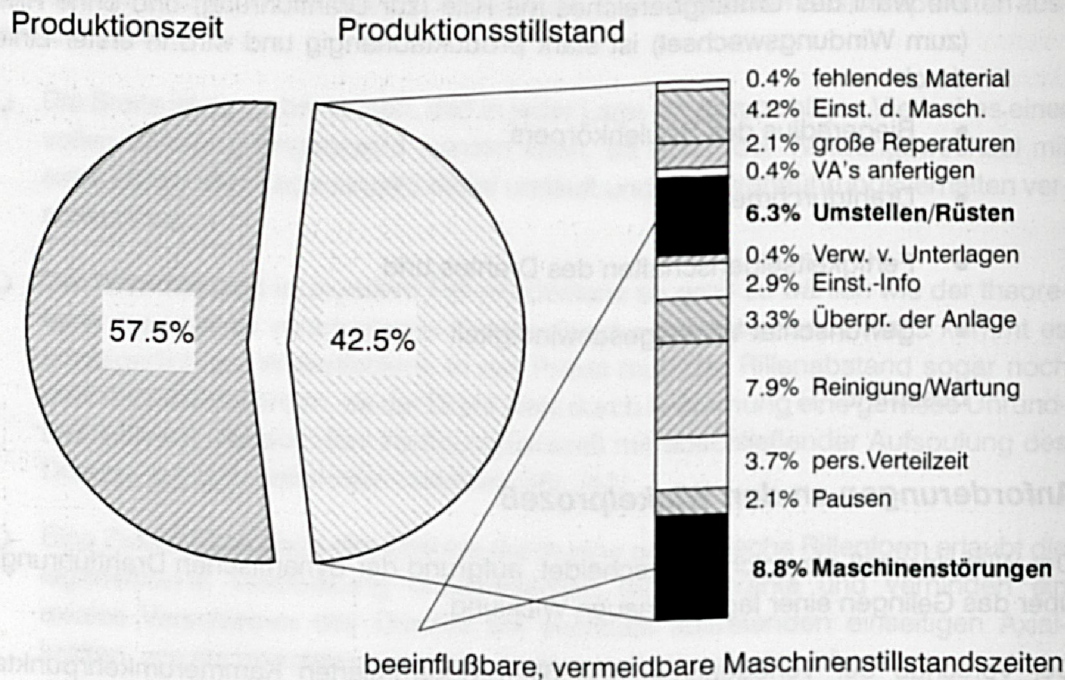


Bild 77: Vergleich der Zeitanteile Produktion - Maschinenstillstand an einer typischen Relaispulenwickelanlage

Diese sind die Maschinenstillstandszeiten durch:

- Umrüstvorgänge und
- Maschinenstörungen (hauptsächlich durch Drahtrisse verursacht)

Hier bietet sich eine umfassende Ursachenforschung an, um Möglichkeiten zur einer weitreichenden Ertragssteigerung an automatisierten Spulenwickelautomaten aufzuzeigen.

### Verkürzung der Maschinenstillstandszeiten aufgrund reduzierter Umrüstanteile

Hier sind an erster Stelle all jene Anstrengungen zu nennen, die auf eine Reduzierung der eingesetzten Drahtvarianten und auf geringe Umrütfrequenzen abzielen.

Das beginnt bereits im Konstruktionsbereich. Hier sollen bei der Spulenauslegung auf die bereits eingesetzten Drahtsorten im Unternehmen bzw. an den vorgesehenen Fertigungseinrichtungen geachtet werden. Es ist dabei eine weitestgehende Harmonisierung der einzusetzenden Drähte anzustreben.

Die Variantenfertigung mehrerer Spulenfamilien erlaubt die Zusammenfassung gleicher Drahtsorten bzw. gleicher Spulenkörperformen. Eine allgemeingültige Aussage,



nach welchen Kriterien vorrangig zu strukturieren ist, kann nicht explizit angegeben werden, da von Fall zu Fall der Aufwand für das Umrüsten der Drähte bzw. die mechanische Umrüstarbeit für einen anderen Spulenkörper abzuschätzen ist. Oftmals dürfte jedoch die Umrüstung auf eine andere Drahtsorte bei unveränderten Spulenkörpern die wirtschaftlichere Lösung sein.

Einen weiteren wesentlichen Punkt bei der Reduzierung der Umrüstzeitanteile stellt der Einsatz geeigneter Drahtvorratsrollen dar. Sofern es die Platzverhältnisse an den Anlagen zulassen, sollten möglichst große Drahtvorratsstrommeln zum Einsatz kommen. Dies kann zu deutlich geringen Umrüstfrequenzen führen.

Spulen- typ*	nominelles Füllgewicht** [kg]	Drahtdurchmesserbereich [mm] (von - bis)											
		0,010 0,019	0,020 0,024	0,025 0,036	0,037 0,048	0,049 0,062	0,063 0,080	0,081 0,120	0,121 0,180	0,181 0,250	0,251 0,315	0,300 0,500	
76/45	0,30												
80/45	0,70												
80	0,70												
99/45	1,40												
100	1,40												
124/45R	2,80												
125	2,80												
159/45R	6,00												
160	6,00												
199/45R	12,00												
200	12,00												
249/45R	26,00												
250	20,50												
250/400	45,00												
315/500	90,00												
400/630	180,00												

\* nach Normen DIN 46399, IEC 264.2.1  
DIN 46383, IEC 264.3.1

\*\* : für mittlere Lackschichtstärke Grad 1

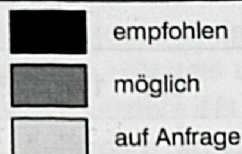


Bild 78: Zuordnung von Lieferspulen für verschiedene Abmessungsbereiche/20/

Folgendes Rechenbeispiel soll die Möglichkeiten verdeutlichen, die sich durch eine geeignete Wahl der Drahtvorratsrollen ergeben:

Mit den Annahmen und Randbedingungen:

Drahtstärke: 0,100mm 1L, mittlerer Füllgrad der Vorratsspulen: 90%

sind dann auf einer 250mm Drahtvorratsspule ca. 252 km Lackdraht verfügbar, bei einer 125 mm Drahtvorratsrolle lediglich 34,5 km. Verwendet man die kleinen Drahtvorratsrollen, müssen diese mehr als sieben mal häufiger gewechselt werden, verbunden mit dementsprechenden Maschinenstillstandszeiten.



### Reduzierung der Maschinenstillstandszeiten durch Vermeidung von Maschinenstörungen

Maschinenstörungen sind an automatisierten Anlagen in erster Linie auf Drahttrisse beim Anwickeln von Drahtanfang bzw. Drahtende zurückzuführen. Das liegt an der Tatsache, daß beim Anwickelvorgang der Draht meist rechtwinklig aus dem Drahtführer herausgeführt wird, um die Anschlußpins bzw. die Hilfsstifte umwickeln zu können.

Diese rechtwinklige Umlenkung führt zu einer deutlichen Zugkrafterhöhung durch zusätzliche Reibkräfte, wie es Versuche an neuwertigen Röhrchendrahtführern belegen.

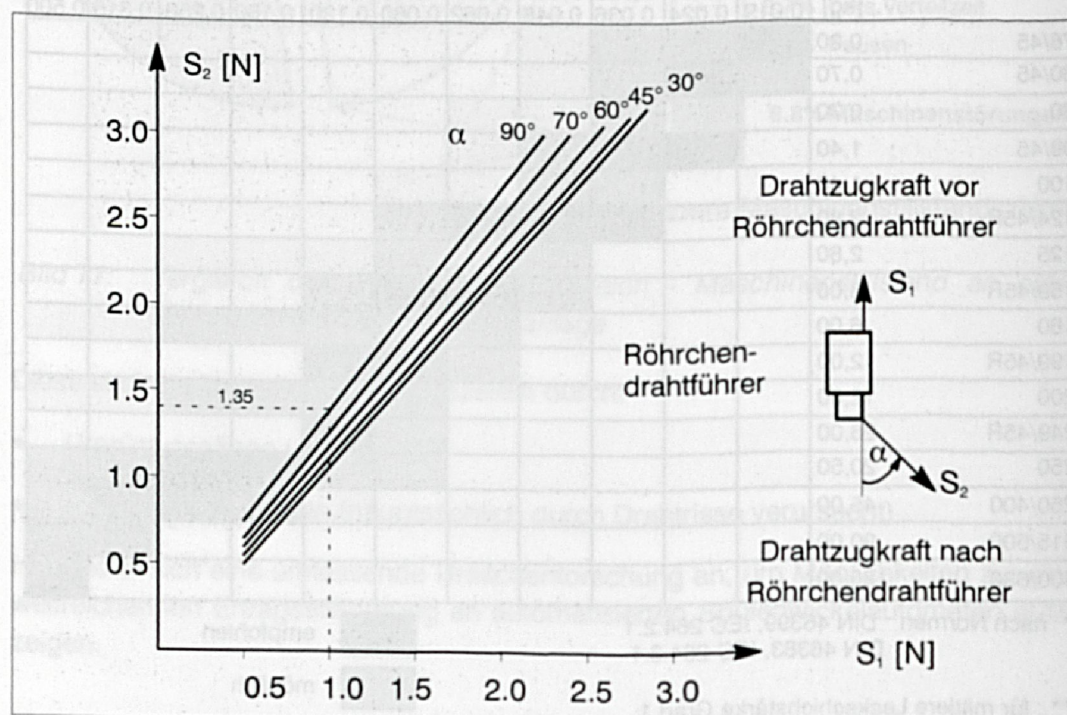
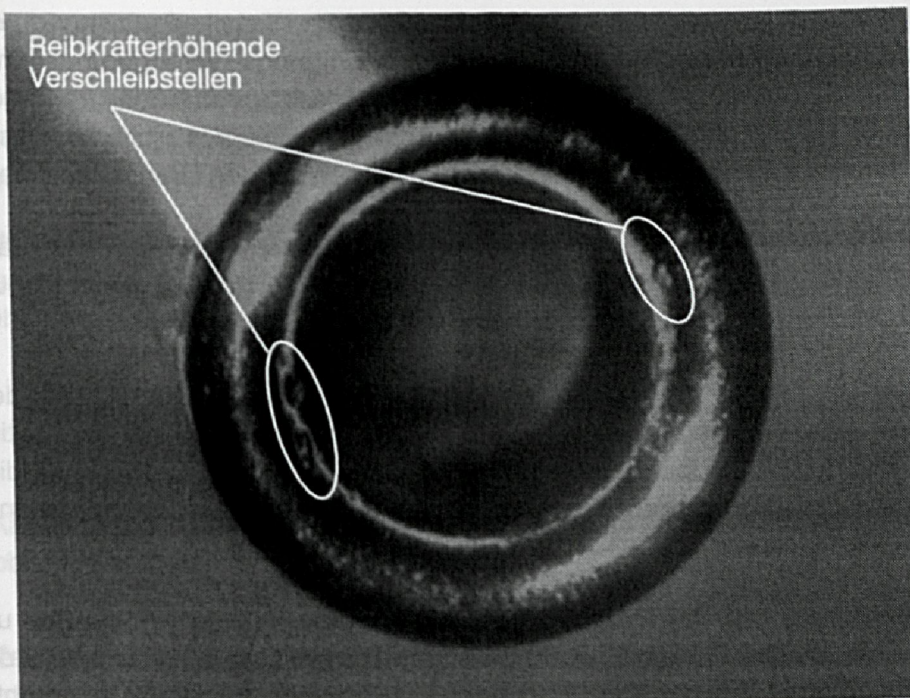


Bild 79: Zugkrafterhöhung am Röhrchendrahtführer in Abhängigkeit des Auslenkwinkels

Darüberhinaus verschärft sich das Problem bei verschlissenen Drahtführern, weil hier die Gefahr besteht, daß der Draht an den Defektstellen des Drahtführers verletzt wird und reißt.

Ein wichtiger Ansatzpunkt zur Vermeidung kostenintensiver Maschinenstörungen ist deshalb die regelmäßige Kontrolle der Drahtführer auf Verschleiß.





**Bild 80:** Verschlossener Drahtführer mit reibkrafterhöhenden Fehlstellen

Eine weitere Möglichkeit stellt sich durch die Reduzierung der Drahtzugkraft beim Anwickelprozeß dar.

Programmierbare elektronische Drahtzugregler bieten die Möglichkeit der flexiblen Einstellung einer reduzierten Drahtzugkraft beim Anwickeln. Eine Schwenkeinheit, die bei rein mechanischen Drahtbremsen verwendet werden kann, führt, um beim Anwickeln die Drahtbremsen in Richtung der Spulenkörper zu bewegen, oftmals schon zum gewünschten Erfolg. Die dabei frei werdende Drahtlänge wird durch den Tänzerhebel aufgenommen. Die anschließenden Umwickelprozesse um Hilfsstifte und Spulenan-schlußpins erfolgen nun mit der Tänzerhebelrückzugskraft. Letztere läßt sich ohne eine mechanische Umrüstung nicht flexibel einstellen. Außerdem können damit nur begrenzte Drahtlängen unter einer verringerten Drahtzugkraft verarbeitet werden. In Fällen, wo dieses Prinzip jedoch eingesetzt werden kann, stellt es eine kostengünstige Alternative dar und führt zu stabilen und störungsreduzierten Anwickelprozessen.

### **Erhöhung der Ausbringungsleistung an automatisierten Spulenwickel-systemen durch reduzierte Taktzeiten**

Die Gesamttaktzeit beim Spulenwickeln setzt sich aus der Hauptzeit (dem Bewickeln der eigentlichen Wickelkammer) und der Nebenzeit (Anwickelprozesse mit Schneideoperationen und Spulenhandling) zusammen.



Die Verkürzung der Hauptzeit kann bei unveränderter Wickelaufgabe nur durch Erhöhung der Drehzahlen und/oder steileren Beschleunigungs-/Verzögerungsrampen der Wickelspindeln geschehen. Ohne umfangreiche maschinenbauliche Veränderungen oder die Fertigung an anderen Wickelsystemen läßt sich dies nicht bewerkstelligen. Dabei ist mit zusätzlichen dynamischen Belastungen auf den Draht zu rechnen.

Die Nebenzeiten, die aufgrund der Anwickelprozesse, dem Schneiden der Drähte und durch Spulenhändingoperationen entstehen, können durch verbesserte Planung und prozeßoptimierende Systemkomponenten deutlich reduziert werden.

Mit Hilfe der in Kapitel 8 vorgestellten CAD-CAM-Verfahrenskette läßt sich der automatisierte Spulenwickelprozeß am CAD-System interaktiv planen und optimieren. Wegoptimierte Verfahrenoperationen mit maximal möglichen Verfahrensgeschwindigkeiten führen zu reduzierten Nebenzeiten, bei minimalen Maschinenstillstandszeiten für die Programmumstellung.

Eine Verkürzung der Fahrzeiten kann durch reduzierte Umwicklungen um den Anschlußpin und den Hilfsstift erreicht werden. Hierbei sind gegebenenfalls die Stiftdurchmesser zu reduzieren. Dies führt aufgrund der Biegeumformung zu erhöhten plastischen Dehnungen, was eine sichere Verbindung gewährleistet. Eckige Stiftformen führen ebenfalls zu hohen plastischen Umformgraden und sicheren Verbindungen. Die Drahtreste, die an den Hilfsstiften störungssicher entsorgt werden müssen, erfordern aber dort in der Regel runde Querschnittsformen.

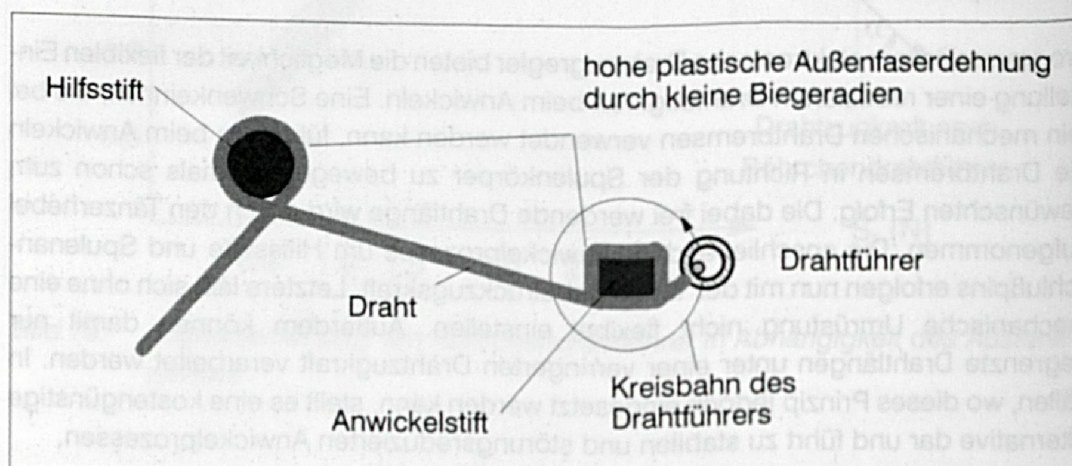


Bild 81: Verfahrensbewegungen des Drahtführers beim Anwickeln des Drahtes an einem Lötstift

Eine weitere Möglichkeit die Taktzeit deutlich zu reduzieren, ergibt sich durch den Einsatz, der in Kapitel 6.3 beschriebenen integrierten Anwickleinheit. Durch deutliche Reduzierung der dann notwendigen Verfahrenoperationen kann die resultierende Taktzeitverkürzung in günstigen Fällen 20% und mehr betragen.



## **6 Maschinentechnische Optimierung an Wickelsystemen**

Aus den Ergebnissen der experimentellen Versuchsreihe und der theoretischen Modellbildung wurden die Einflußparameter und ihre Wechselwirkungen zum Wickelergebnis herausgearbeitet.

Es wurden dabei zahlreiche maschinentechnische Defizite erkannt, die im vorliegenden Kapitel analysiert werden. Darüberhinaus werden Lösungsansätze der damit verbundenen Problemstellungen vorgestellt und diskutiert.

### **6.1 Angetriebener Axialabzug zur verdrehungsfreien Verarbeitung kritischer Wickelgüter**

Wie in Kapitel 2 beschrieben, bringt bereits der Drahtabzug von der Vorratsrolle vielfältige Probleme mit sich.

#### **Defizite beim Axial-Überkopfabzug**

Beim Axial-Überkopfabzug kommt es zu Verdrehungen des Drahtes, die sich in ungünstigen Fällen zu Knoten zusammenziehen (siehe auch Bild 12), den Wicklungsaufbau nachteilig stören und an Engstellen des Drahtablaufes z.B. am Röhrendrahtführer sogar den Drahtriß bewirken. Die während des Wickelns nicht erkannten Knoten führen im Betrieb oftmals zum elektrischen Ausfall der Spule, da durch den engen Biegeradius der Draht im Bereich des Knotens hohen Belastungen und plastischen Deformationen ausgesetzt ist. Diese wirken sich nachteilig auf die elektrische und mechanische Dauerfestigkeit von Leiter und Isolation aus.

Neben dem Problem der Drahtverdrehung besteht beim Axial-Überkopfabzug die Gefahr, daß lose Windungen in axialer Richtung auf der Vorratsstrommeloberfläche abgleiten und einen freien ungehinderten Abzug verhindern. Die Konsequenz davon sind wiederum Drahtzugkraftschwankungen und Drahtriß. Dieses Problem kann durch konische Drahtvorratsstrommeln und/oder einer leicht schräggestellten Anordnung von Trommel und Abzugsglocke vermieden werden.

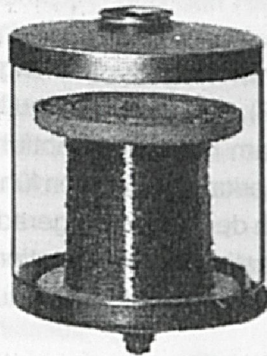
Die Vorteile des Axialabzuges liegen allen voran im einfachen Aufbau; es genügt lediglich eine Drahtabzugsglocke, welche die stehende Drahtvorratsrolle überdeckt. Damit wird eine freie Ballonbildung mit den Problemen zusätzlicher Drahtbelastung durch Fliehkräfte vermieden. Desweiteren sind keine weiteren Massen, außer die des abziehenden Drahtes, zu bewegen bzw. zu beschleunigen.



### Defizite beim Radialabzug

Zum verdrehungsfreien Drahtabzug hat sich der Radialabzug mit einer notwendigerweise drehenden Vorratsrolle durchgesetzt. Hierbei besteht das Problem, daß die Abwickeldrahtgeschwindigkeit von der Vorratsstrommel mit der Aufwickeldrahtgeschwindigkeit am Wickelort übereinstimmen muß, weil sich sonst eine Drahtreckung oder ein Drahtdurchhang einstellen würden. Eine vollständige und exakte Synchronisation zu jedem Zeitpunkt des Wickelvorganges zur Zugkraftfreiheit kann nicht erreicht werden. Radialabzüge sind deshalb mit Ausgleichssystemen (in der Regel Tänzerhebel) ausgerüstet, die kurzzeitige Abweichungen kompensieren können.

*Axialer Überkopfabzug von stehender Vorratsspule*



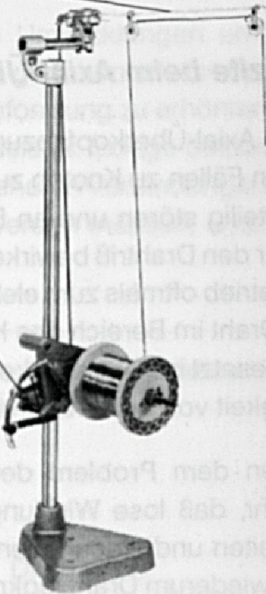
- + einfacher Aufbau
- + keine zusätzlichen Massenbewegungen außer die des gerade abzuziehenden Drahtes

- Fliehkräfte führen an Innenwand der Abzugsglocke zu geschwindigkeitsabhängigen Bremskräften
- Eine Verdrehung pro Umfang des aktuellen Vorratsrollendurchmessers -> Knoten, Drahtreckung, Drahtriß

*Radialer Drahtabzug von rotierender Vorratsspule*

Tänzerhebel

mechanische Bremseinrichtung



- + keinerlei Verdrehung

- aufwendiger Aufbau
- zusätzliche zu beschleunigende Massen (Antrieb, Drahtvorratsstrommel, Brems- und Ausgleichselemente)

Bild 82: Vor- und Nachteile von Axial-Überkopfabzug und Radialabzug der Wickeldrähte von der Drahtvorratsrolle



Der Antrieb der Vorratsrolle erfolgt bei einfachen Radialabzügen durch den abzuziehenden Draht selbst, indem dieser die frei drehbare Vorratsstrommel bewegt. Das bringt Einschränkungen an den zu verarbeitenden Draht, an die zu beschleunigende Vorratsstrommel und an die maximale Beschleunigungsrampe mit sich.

Will man die Einbringung von Zugspannungen aufgrund der Beschleunigung der Vorratsstrommel durch den Draht vermeiden, kommen extern angetriebene Radialabzüge zum Einsatz. Aus den Signalen integrierter Sensoren kann die notwendige Abspulgeschwindigkeit bestimmt werden, welche zur Ansteuerung der Antriebseinheiten der Vorratsrolle herangezogen wird. Es stellt große Anforderungen an Antriebe und Regelung, um die zum Teil schweren Drahtvorratsspulen hochdynamisch beschleunigen und verzögern zu können.

Im folgenden wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes und prototypisch aufgebautes Abspulsystem vorgestellt, das die verdillfreie Bewicklung kritischer Wickelgüter mit reduziertem dynamischen Masseneinfluß und integrierter Drahtzugregelung erlaubt.

Es handelt sich dabei um ein angetriebenes Drahtabzugssystem, welches im weiteren den Draht über einen frei drehbaren Flyer axial aus der Rotationsachse der Vorratsrolle herausführt. Der Abwickelflyer, der flexibel mit einem entgegen der Abwickelrichtung wirkenden Rückdrehmoment beaufschlagt wird, stellt ein neuartiges System der Drahtzugkrafterzeugung dar.

Verschiedene Ausführungsformen zur Drehmomentbeaufschlagung des Flyers, wie z.B. pneumatisch oder elektromagnetisch, wurden hierzu exemplarisch aufgebaut und ausgetestet.

Über den wirksamen Radius des Flyers und dem herrschenden Drehmoment kann die gewünschte Drahtzugkraft, gemäß der Beziehung  $F = M_b/r$ , dem Draht aufgeprägt werden. Somit kann sowohl im Stillstand als auch während des Wickelprozesses der Draht unter einer definierten Zugspannung gehalten werden.

Das der Wickeldrehzahl proportionale Spannungssignal wird beim Start des eigentlichen Wickelsystems zur Ansteuerung der Abwickelspindel herangezogen und dient zum Antrieb der Drahtvorratsstrommel.

Die sich durch verändernde Auf- und Abwickeldurchmesser ergebenden Abweichungen der Auf- und Abwickelgeschwindigkeit äußern sich nicht in nennenswerten Drahtzugkraftänderungen. Sie bewirken lediglich eine Positionsveränderung des Abwickelflyers. Die mit der Lageveränderung verbundenen Massenbeschleunigungen sind, aufgrund der nicht sprungartigen Geschwindigkeitsdifferenzen, relativ gering. Darüberhinaus kann durch Integration eines Sensors, der die Stellung des Flyers ermittelt, ein geschlossener Regelkreis gebildet werden, um den Ort des Abwickelflyers stets konstant zu halten. Dies erlaubt eine in Summe absolut verdillfreie Wicklung. Abweichungen von Auf- und Abwickelgeschwindigkeit äußern sich nicht in erheblichen Draht-



zugkraftschwankungen wie beim herkömmlichen Radialabzug, sondern lediglich in minimalen Verdrillungen, die im weiteren Prozeßverlauf wieder ausgeregelt werden.

Gegenläufig zur Abwickeldrehrichtung angetriebene Einheit mit Magnetpulverbremse zur Erzeugung des Rückdrehmomentes

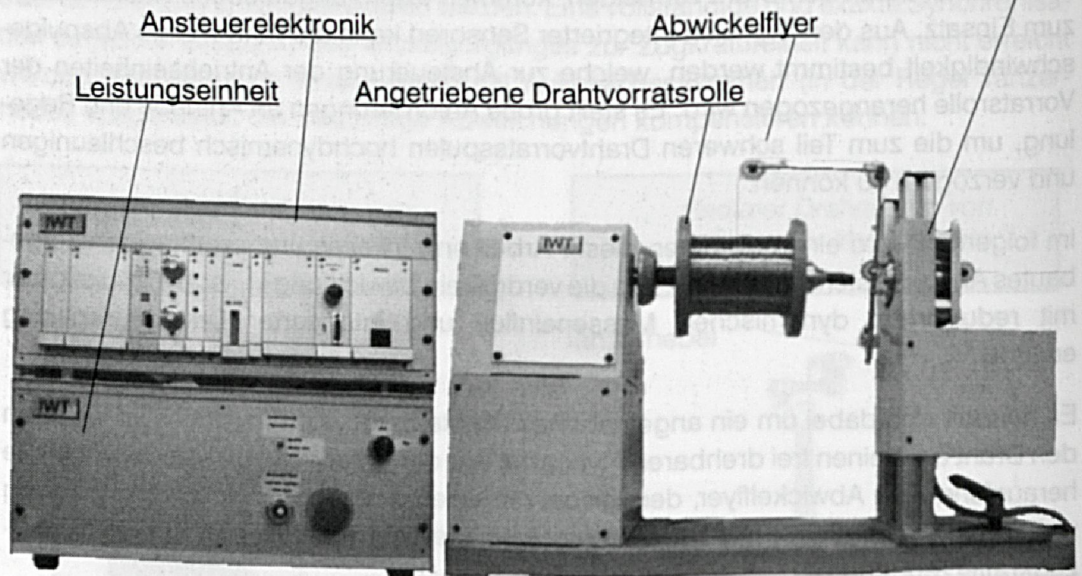


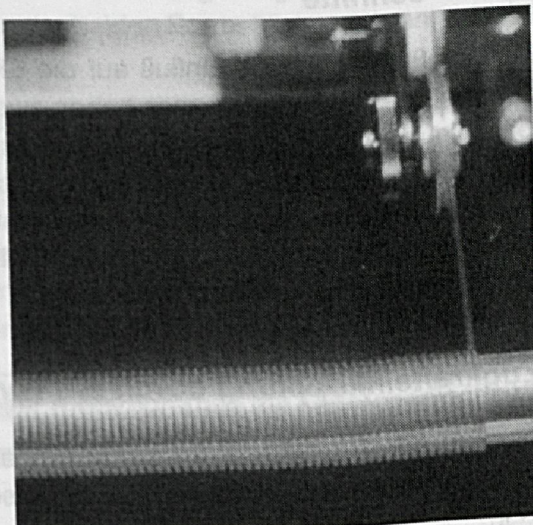
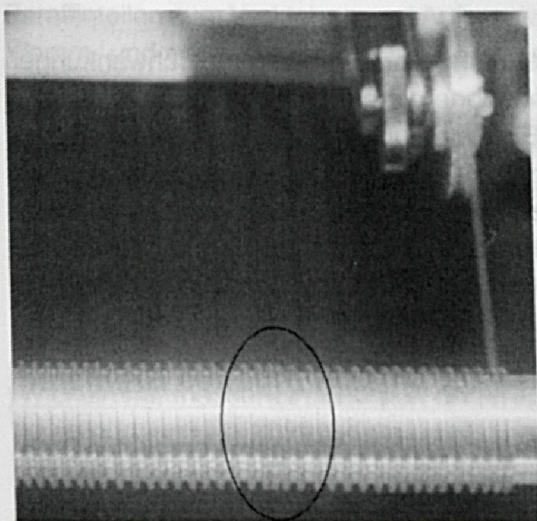
Bild 83: Prototypischer Aufbau des angetriebenen Axialabzuges zur verdrillungsfreien Verarbeitung kritischer Wickelgüter

Dieses System bietet sich in erster Linie für die Verarbeitung verdrillkritischer Güter an, wie es beispielsweise in zunehmendem Maße bei der Verarbeitung von Glasfaserlichtwellenleitern der Fall ist und erlaubt auch erstmalig die Umkehr des Wickelprozesses. Das heißt bei entstandenen Wickelfehlern kann durch eine Richtungsumkehr der Auf- und Abwickelheit das Wickelgut zurückgewickelt werden und der Wickelprozeß an einer beliebigen Stelle fortgesetzt werden /48/.

Das System hat beim Wickeln steifer Widerstandslegierungen auf glatten Oberflächen (Anwendungsbeispiel: Heizwendel auf keramischem Grundkörper) und bei der Verarbeitung von Glasfaserlichtwellenleitern unter geringsten Drahtzugkräften seine hervorragenden Eigenschaften im Praxiseinsatz bewiesen. Mit den deutlichen Vorteilen gegenüber herkömmlichen Abzugssystemen schließt es für Sonderwickelanwendungen die bis dahin dort vorhandene Applikationslücke.



verdrillkritische Kunststoffmaterialien



Vorschubfehler

Heizleiterwendel aus Widerstandslegierung

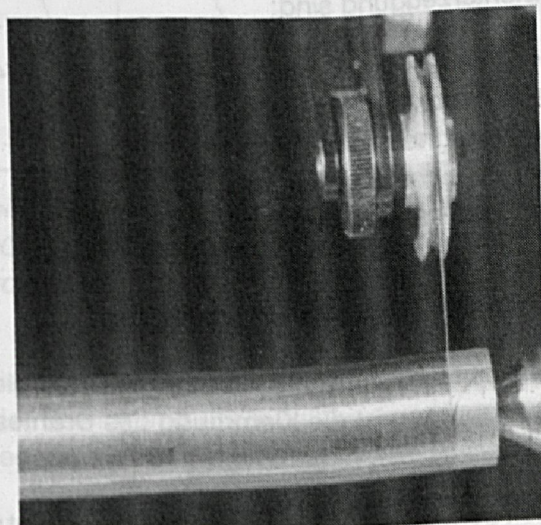
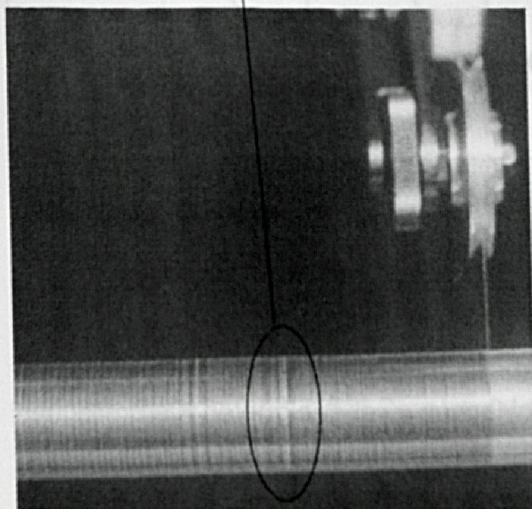


Bild 84: Vorschubfehler beim Bewickeln verdrillkritischer Kunststoffmaterialien und Heizleiterwendeln beim herkömmlichen Axialabzug (jeweils links) und lagerichtige Aufwicklung mit dem angetriebenen Axialabzug und integriertem Flyerbremssystem (jeweils rechts)



## **6.2 Masseneinflußreduziertes Bremssystem zur Verbesserung des Drahtablaufverhaltens beim Bewickeln unrunder Wickelquerschnitte**

Den größten negativen Einfluß auf die Entstehung von Drahtzugkraftschwankungen während des Wickelprozesses haben zweifelsohne die am Drahtbremssystem mitzubeschleunigenden Massen. Sie dienen zur Einkoppelung der Zugkraft auf den durchlaufenden Draht. Daher ist es bei der optimalen Gestaltung von Drahtzugreglern ein wesentliches Ziel, die zusätzlich zum Draht zu bewegenden Massen weitestgehend zu reduzieren. Bei der Entwicklung von Drahtbremsen wurden in der Vergangenheit zwei Wege beschritten.

### **Zugkrafteinkopplung durch ein vom Draht umschlungenes Bremsrad**

Die Zugkraft wird durch ein Bremsrad aufgebracht, welches mit einem konstanten Drehmoment beaufschlagt und vom Draht umschlungen ist.

Die Verwendung eines umwickelten Bremsrades hat den Vorteil, daß über den gesamten Umfang des Bremsrades die Bremskraft auf den Draht übertragen wird. Es besteht keine Gefahr einer örtlichen Beschädigung der Lackoberfläche.

Ansatzpunkte zur Optimierung waren hier die Leichtbauweise des Bremsrades und des Systems zur Drehmomenterzeugung. Die hierfür eingesetzten Prinzipien zur Drehmomenterzeugung sind:

- Feder-Hebel-Systeme mit Reibbelag /49/, /50/
- Druckluft /51/
- Magnetpulverbremsen
- Gleichstrommotoren /52/
- Elektromagneten mit Reibbelag

### **Direkte Zugkrafteinkopplung**

Die einfachste Art und Weise dem Draht die für die Verarbeitung notwendige Zugkraft aufzuprägen ist die Klemmung des Drahtes zwischen zwei geeigneten Klemmflächen /53/, /54/, /55/, /56/.

Seit den Anfängen der Wickeltechnik erfolgt dies beispielsweise mittels Filz- oder Leder-scheiben. Sie werden per Federkraft zusammengepreßt und klemmen den dazwischen durchlaufenden Draht.

Nachteilig ist dabei, daß die im Vergleich zum Lackdraht weiche Bremsbeläge (Filz, Leder o.ä.) durch den zum Teil mit hoher Geschwindigkeit bewegten Draht einlaufen. Es kommt zu einer Verringerung der statisch eingestellten Bremskraft.



In verschleißfreien Anordnungen kommen die Nachteile einer möglichen lokalen Beschädigung und Erwärmung des Drahtes zum tragen, da der Draht durch zwei ebene Hartmetallplatten geführt wird. Desweiteren kann die Ablagerung von Schmutz- und Paraffinteilen zum Verkleben und Aufspreizen der beiden Bremsflächen führen, was die Klemm- und somit die Bremskraft herabsetzt.

Prinzipiell sind die Systeme der direkten Drahtzugkrafteinkopplung wesentlich besser zur hochdynamischen Bewicklung unrunder Spulenkörpergeometrien geeignet, da bis auf den Draht selbst, keine weiteren Massen beschleunigt werden.

Die Drahtzugkraftschwankungen einer einfachen Klemmbremsanordnung mit Leder-scheiben sind im Vergleich zu Drahtbremsen mit Masseneinfluß beim Bewickeln unrunder Spulenkörperquerschnitte deutlich geringer, wie es Bild 85 beweist.

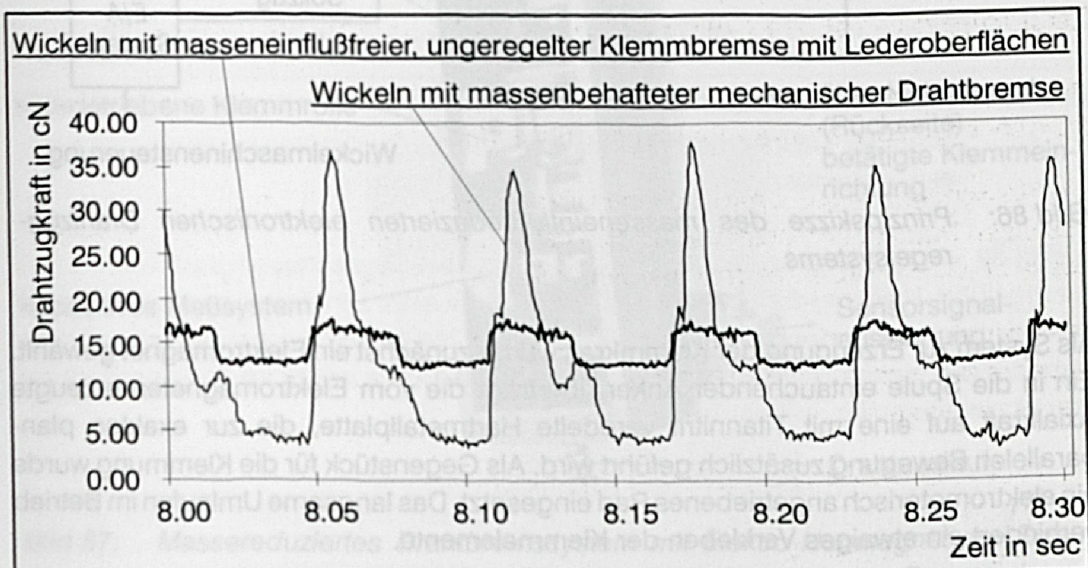


Bild 85: Drahtzugkraftschwankungen beim Bewickeln eines rechteckigen Körperquerschnittes (55x8mm) bei 500  $1/min$  mit 0,063mm 1LCu-Draht bei einer eingestellten Solldrahtzugkraft von 15 cN

Ein geregeltes und masseneinflußreduziertes Drahtbremssystem stellt also eine optimale Anordnung für das Problemfeld der Bewicklung unrunder Spulenkörpergeometrien dar und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit in prototypischen Aufbauten realisiert [57].

Als Meßsystem wurde die, bereits aus den experimentellen Untersuchungen, erfolgreich verwendete kapazitive Sensorsystemanordnung eingesetzt. Durch Veränderung des Auslenkwinkels des Drahtverlaufes aus der Geraden kann mit einem Sensor ein weiterer Bereich der zu messenden Zugkraft abgedeckt werden. Je flacher der Spitzenwinkel am Sensor ist desto größere Kräfte können gemessen werden, allerdings auf Kosten der Auflösung.



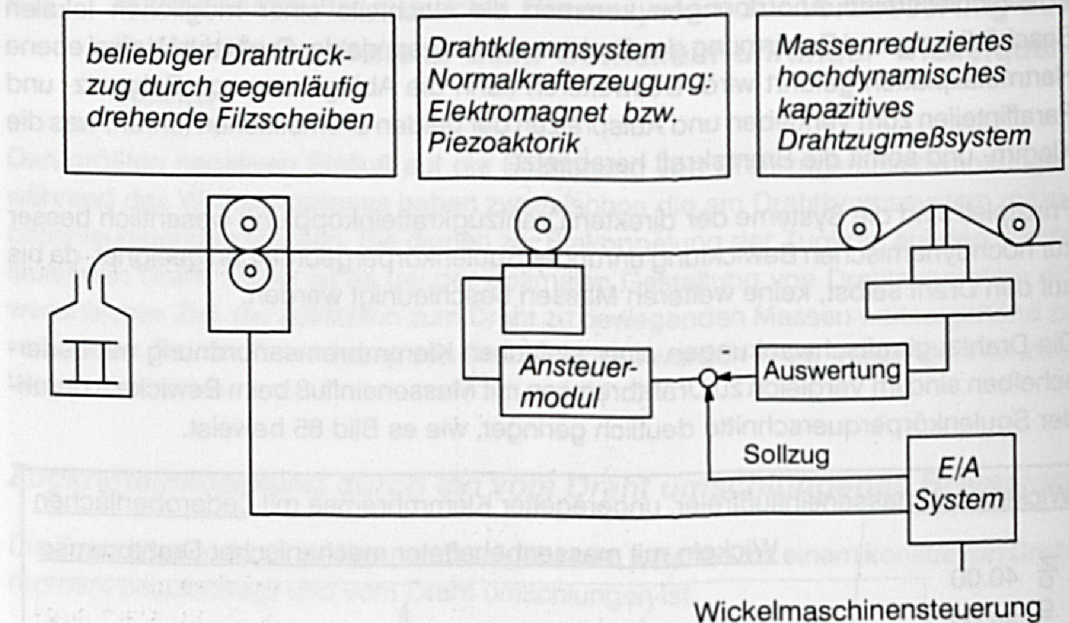


Bild 86: Prinzipskizze des masseneinflußreduzierten elektronischen Drahtzugregelsystems

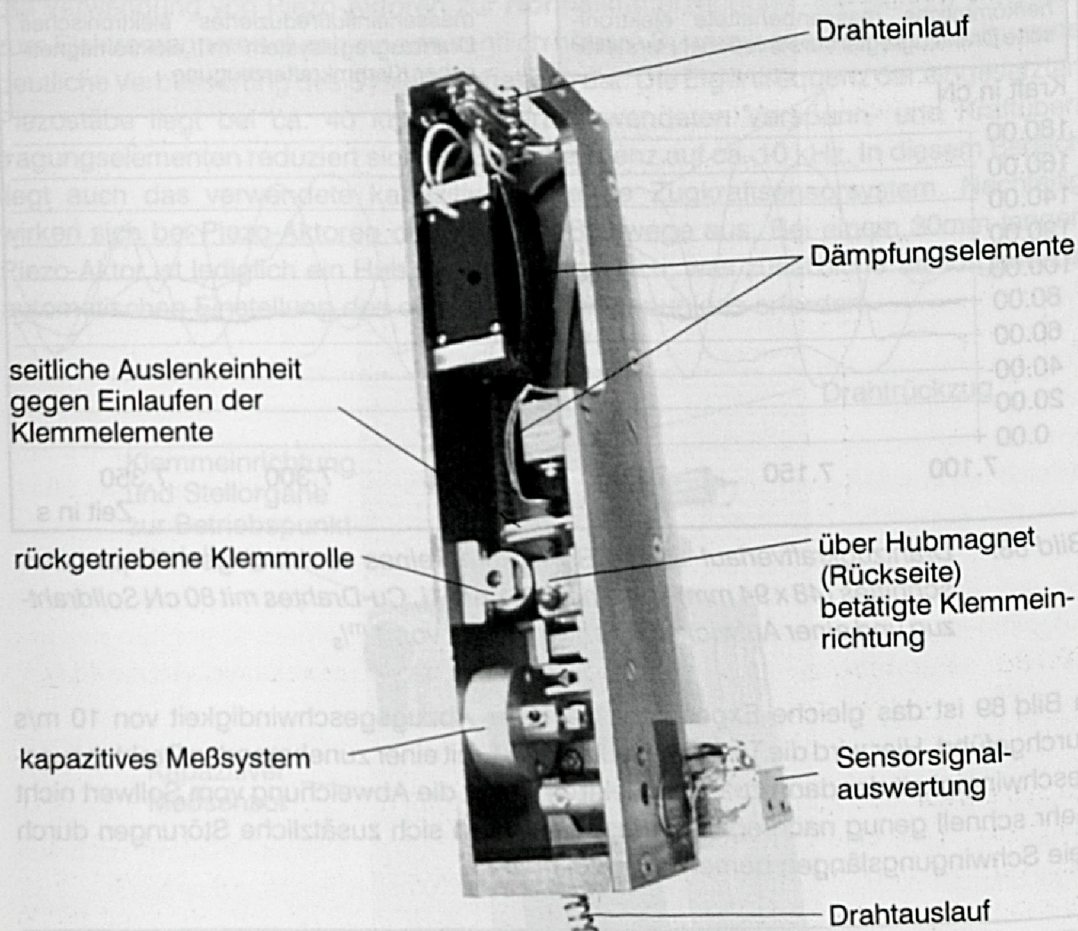
Als System zur Erzeugung der Klemmkraft wurde zunächst ein Elektromagnet gewählt. Ein in die Spule eintauchender Anker überträgt die vom Elektromagneten erzeugte Axialkraft auf eine mit Titannitrit veredelte Hartmetallplatte, die zur exakten planparallelen Bewegung zusätzlich geführt wird. Als Gegenstück für die Klemmung wurde ein elektromotorisch angetriebenes Rad eingesetzt. Das langsame Umlaufen im Betrieb verhindert ein etwaiges Verkleben der Klemmelemente.

Durch den Soll- Istwertvergleich der Zugkräfte und der Rückführung der Signale zur Ansteuerung des Magneten wurde ein geschlossener Regelkreis für das Drahtzugregelsystem aufgebaut.

Eine "harte" Klemmwerkstoffpaarung (Stahlrad- Hartmetallplatte) führt zu unbefriedigenden Zugkraftverläufen.

Die Verwendung zumindest eines weicheren Klemmpartners, z.B. einer überzogenen Rolle oder Klemmplatte aus Leder, erfordert zwar höhere Normalkräfte zur Klemmung, jedoch stellen sich recht zufriedenstellende Zugkraftverläufe ein. Zur weiteren Dämpfung können zusätzliche Elemente, z.B. Lederscheiben, in den Drahtablauf zwischen Klemmsystem und Meßsensor eingebracht werden, welche die statische Bremskraft zwar erhöhen, das Drahtschwingungsverhalten und störende Drahtzugkraftschwankungen aber deutlich reduzieren. Eine somit verursachte Zugkraftehöhung wird durch den Regelkreis in Form von geringeren Magnethubkräften ausgeglichen.





**Bild 87:** Massereduziertes Drahtbremssystem mit Elektro-Hubmagnet zur Erzeugung der notwendigen Klemmkraft und lederüberzogenem Bremsrad.

Das Einlaufen der Lederrolle wird durch die langsame, kontinuierliche Rotation der Bremsrolle entgegen der Drahtlaufriichtung mit seitlichem Verschieben des Drahtes auf der Rollenoberfläche durch eine Keramikgabel gewährleistet. Das garantiert einen nahezu verschleißfreien Betrieb bei gleichzeitig hoher Stabilität der statischen Bremskraftwerte.

Bild 88 zeigt bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 1 m/s die deutlichen Vorteile des massenreduzierten Drahtzugregelsystems gegenüber herkömmlichen elektronischen Drahtzugreglern.



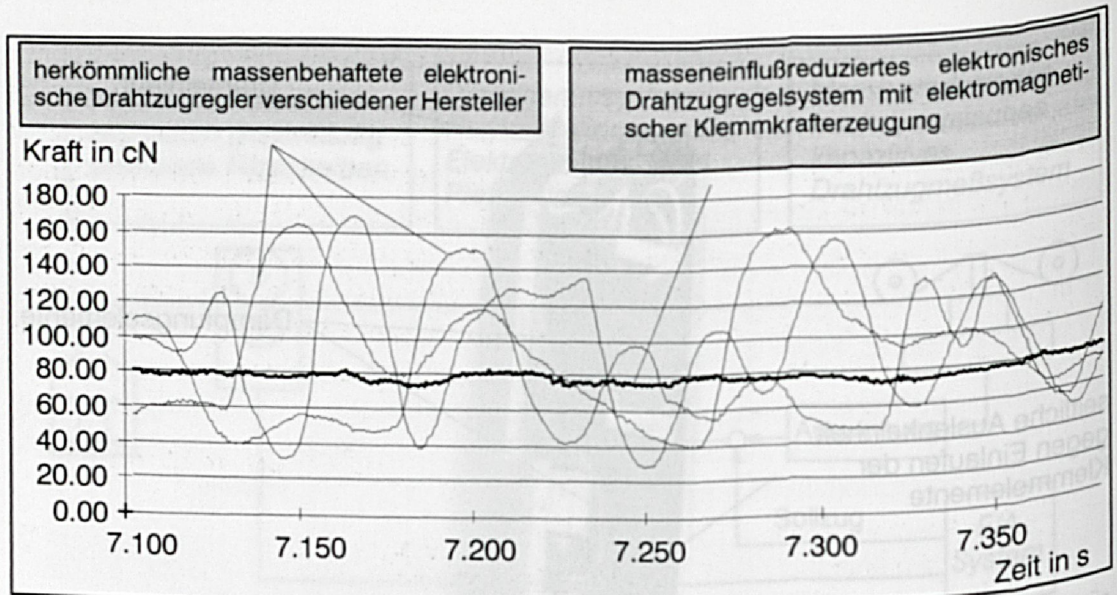


Bild 88: Drahtzugkraftverlauf beim Bewickeln eines rechteckigen Körperquerschnittes (48 x 94 mm) mit einem 0,1 mm 1L Cu-Drahtes mit 80 cN Soll Drahtzug und einer Aufwickelgeschwindigkeit von 1 m/s

In Bild 89 ist das gleiche Experiment bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 10 m/s durchgeführt. Hier wird die Tendenz deutlich, daß mit einer zunehmenden Drahtabzugsgeschwindigkeit der dann zu träge Elektromagnet die Abweichung vom Sollwert nicht mehr schnell genug nachregeln kann. Es machen sich zusätzliche Störungen durch freie Schwingungslängen bemerkbar.

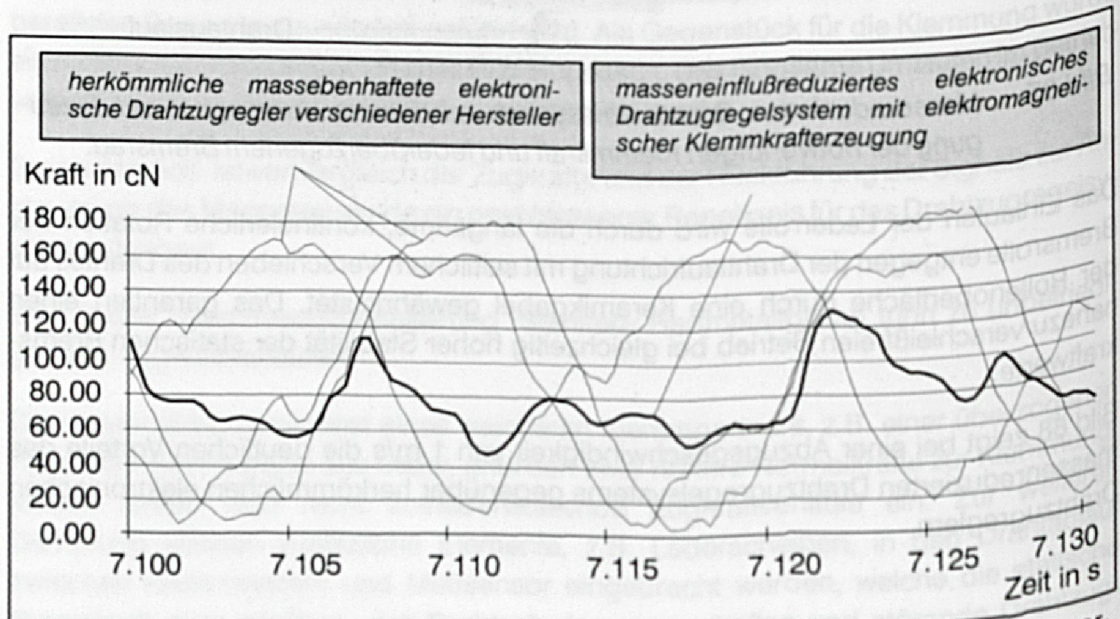


Bild 89: Drahtzugkraftverlauf beim Bewickeln eines rechteckigen Körperquerschnittes (48 x 94 mm) mit einem 0,1 mm 1L Cu-Drahtes mit 80 cN Soll Drahtzug und einer Aufwickelgeschwindigkeit von 10 m/s



Die Verwendung von Piezo-Aktoren zur Normalkrafterzeugung, die sich im Vergleich zum Elektromagneten durch eine wesentlich höhere Dynamik auszeichnen, stellen eine deutliche Verbesserung des Systemverhaltens dar. Die Eigenfrequenz der eingesetzten Piezostäbe liegt bei ca. 40 kHz. Mit den verwendeten Vorspann- und Kraftübertragungselementen reduziert sich die Eigenfrequenz auf ca. 10 kHz. In diesem Bereich liegt auch das verwendete kapazitiv messende Zugkraftsensormesssystem. Nachteilig wirken sich bei Piezo-Aktoren die geringen Stellwege aus. Bei einem 30mm langen Piezo-Aktor ist lediglich ein Hub von 30  $\mu\text{m}$  möglich, was zusätzliche Stellorgane zur automatischen Einstellung des optimalen Betriebspunktes erfordert.

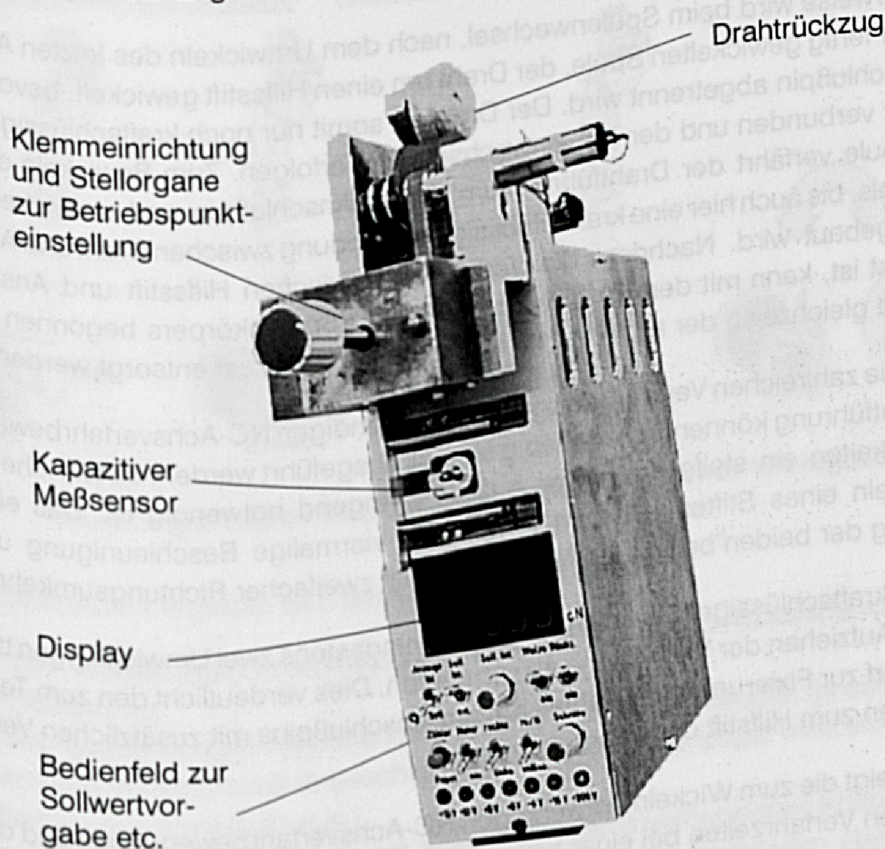


Bild 90: Massenreduziertes Drahtzugregelsystem mit hochdynamischer Piezoaktorik zur Zugkrafterzeugung



### 6.3 Kombiniertes Anwickelwerkzeug mit Schneide- und Drahtförderereinrichtung zur Reduzierung von Nebenzeiten

Für einen sicheren und stabilen Fertigungsprozeß ist der Draht stets unter einer definierten positiven Zugspannung zu halten. Beim vollautomatischen Wickelprozeß vollzieht sich der Spulenwechsel ohne Eingriff durch den Menschen. Daher muß hier, wenn der Draht an der fertig gewickelten Spule abgeschnitten wird, in geeigneter Form geklemmt oder fixiert werden. Nur so sind durch eine definierte Lage des Drahtes reproduzierbare Ausgangsvoraussetzungen für den Wickelprozeß der nächsten Spule gewährleistet.

Üblicherweise wird beim Spulenwechsel, nach dem Umwickeln des letzten Anschlußpins der fertig gewickelten Spule, der Draht um einen Hilfsstift gewickelt, bevor er nahe am Anschlußpin abgetrennt wird. Der Draht ist somit nur noch kraftschlüssig mit dem Hilfsstift verbunden und der Spulenwechsel kann erfolgen. Zum Bewickeln der nächsten Spule verfährt der Drahtführer zum ersten Anschlußpin und umwickelt diesen mehrmals, bis auch hier eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Draht und Anschlußpin aufgebaut wird. Nachdem die Verbindung zwischen Hilfsstift und Anschlußpin aufgelöst ist, kann mit dem Bewickeln des neuen Spulenkörpers begonnen werden, während gleichzeitig der am Hilfsstift verbleibende Drahtrest entsorgt werden muß.

Die für die zahlreichen Verfahrbewegungen notwendigen NC-Achsverfahrbewegungen der Drahtführung können nicht beliebig schnell ausgeführt werden, da für hohe Verfahrensgenauigkeiten ein steifer, massiver Aufbau zwingend notwendig ist. Das einmalige Umwickeln eines Stiftes erfordert jeweils die viermalige Beschleunigung und Verzögerung der beiden beteiligten NC-Achsen mit zweifacher Richtungsumkehr.

Für eine kraftschlüssige Umwicklung werden mindestens zwei Umwicklungen benötigt, um das Aufziehen der Verbindung zu vermeiden. Dies verdeutlicht den zum Teil hohen Zeitbedarf zur Fixierung des Drahtes an den Anschlußpins mit zusätzlichen Verfahrbewegungen zum Hilfsstift und wieder zurück.

Bild 91 zeigt die zum Wickeln notwendigen NC-Achsverfahrbewegungen und die dafür benötigten Verfahrzeiten bei einer typischen Relaispulenfertigung.

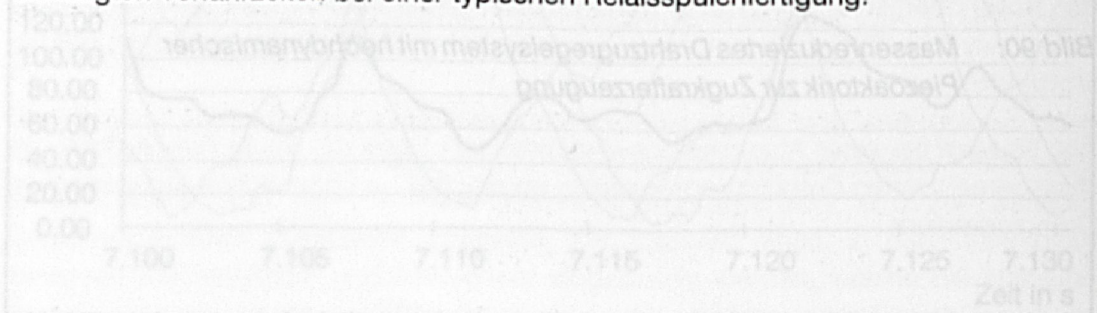


Bild 91: Drahtführerlauf, beim Bewickeln eines rechteckigen Körperquerschnitts (8 x 9 mm) mit einem 0,1 mm  $\varnothing$  Cu-Drahtes mit 80 cN Sollkraft und einer Aufwickelgeschwindigkeit von 10 m/min.



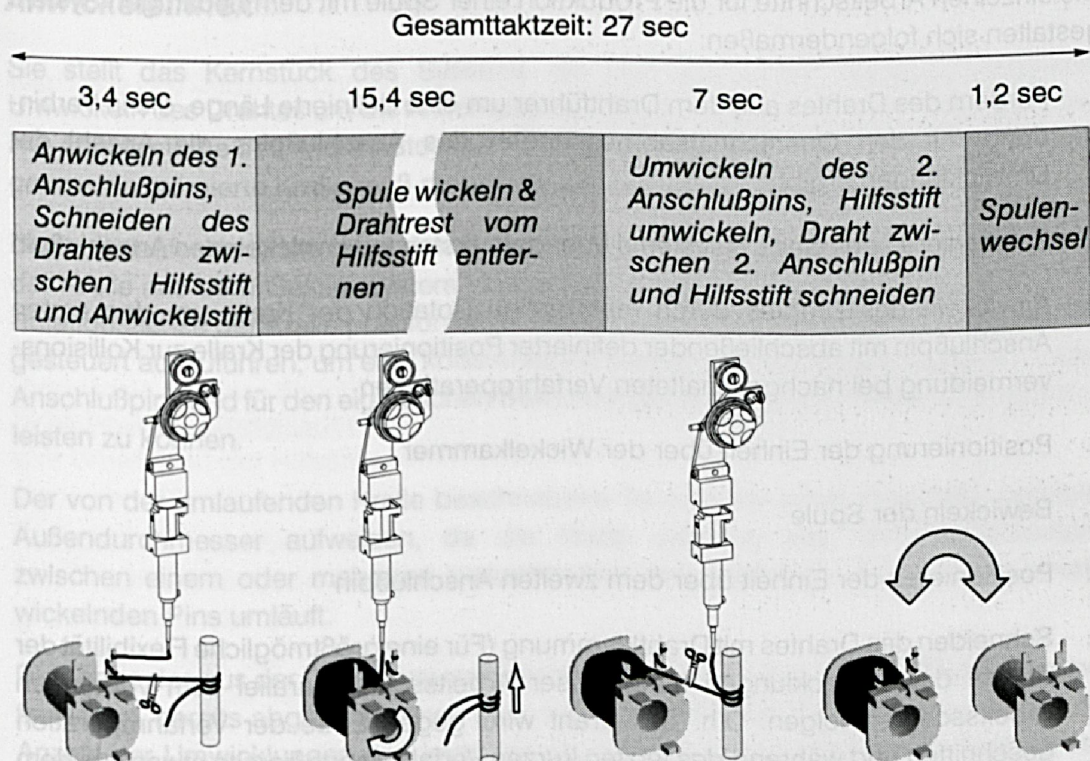


Bild 91: Notwendige Programmschritte beim vollautomatischen Wickelprozeß

Zusammenfassend ergeben sich daraus folgende Defizite:

- Für den vollständigen Anwickelprozeß sind zahlreiche NC-Achsverfahrbewegungen notwendig
- daraus resultieren zum Teil hohe Zeitanteile an der Gesamttaktzeit (je schneller der eigentliche Wickelprozeß abgeschlossen ist, desto ungünstiger wirkt sich der Zeitbedarf für das Anwickeln aus.)
- Es entsteht pro Spule ein Drahtrest. Neben den damit verbundenen Kosten und der Notwendigkeit der störungsfreien Entsorgung des biegeschlaffen Gebildes aus dem Wickelsystem, stellt es eine Verschwendung von Ressourcen dar.

Aus den Defiziten der derzeitigen Vorgehensweise ergeben sich die Ziele für ein neuartiges Anwickelsystem:

- deutliche Reduzierung der Anwickelzeiten
- Vermeidung von biegeschlaffen Drahtabfällen

Eine angetriebene Anwickereinheit windet den Draht um den jeweiligen Anschlußpin, nachdem sie über ihm, mit den NC-Achsen des Wickelsystems, positioniert wurde. Durch die Implementierung von Drahtförder- und Drahtschneideeinrichtungen kann die Entstehung von Drahtabfällen vermieden werden /58/.



Die einzelnen Arbeitsschritte für die Produktion einer Spule mit dem neuartigen System gestalten sich folgendermaßen:

1. Fördern des Drahtes aus dem Drahtführer um eine definierte Länge, die in Verbindung mit den Querschnittsabmessungen des Anschlußpins die Anzahl der Umwicklungen ergibt.
2. Positionieren des Gesamtsystems über dem ersten zu umwickelnden Anschlußpin
3. Anwickeln des Drahtes durch mehrmalige Rotation der Kralle um den ersten Anschlußpin mit abschließender definierter Positionierung der Kralle zur Kollisionsvermeidung bei nachgeschalteten Verfahrenoperationen
4. Positionierung der Einheit über der Wickelkammer
5. Bewickeln der Spule
6. Positionieren der Einheit über dem zweiten Anschlußpin
7. Schneiden des Drahtes mit Drahtklemmung (Für eine größtmögliche Flexibilität der Anzahl der Umwicklungen kann dieser Arbeitsschritt parallel zum vorherigen Arbeitsschritt erfolgen. D.h. der Draht wird gegen Ende der Verfahrenoperation geschnitten und während des letzten kurzen Verfahrenweges bereits etwas aus dem Drahtführer herausgezogen. Dies führt zu einer deutlich geringeren Anzahl von Umwicklungen)
8. Anwickeln des Drahtes durch mehrmalige Rotation der Kralle um den zweiten Anschlußpin mit abschließender definierter Positionierung der Kralle zur Kollisionsvermeidung bei nachgeschalteten Verfahrenoperationen
9. evtl. geringfügiges Verfahren des Drahtführungssystems in eine Position, in der ein kollisionsfreier Spulenwechsel möglich ist.
10. Spulenwechsel

Gemäß den Hauptfunktionen läßt sich das entwickelte System in drei Komponenten gliedern:

- **Anwickeleinheit**
- **Drahtschneide- und Klemmeinrichtung**
- **Drahtfördereinheit**



## Anwickereinheit

Sie stellt das Kernstück des Systems dar und erlaubt ein deutlich schnelleres Umwickeln des Drahtes um die Anschlußpins. Hierfür müssen nicht mehr die massiven NC-Achssysteme des Wickelautomaten verwendet werden. Lediglich eine massen- und geometrieoptimierte Kralle muß mehrmals um den jeweiligen Pin rotieren.

Diese umlaufende Kralle fängt den Draht ein, welcher exzentrisch zur Rotationsachse der Kralle aus dem Gesamtsystem herausgeführt wird und windet ihn um den in der Rotationsachse der Kralle positionierten Anschlußpin. Die Anwickelkralle ist positionsgesteuert auszuführen, um eine kollisionsfreie Bewegung des Gesamtsystems zu den Anschlußpins und für den eigentlichen Bewicklungsprozeß der Wickelkammer gewährleisten zu können.

Der von der umlaufenden Kralle beschriebene Torus sollte einen möglichst geringen Außendurchmesser aufweisen, da die Kralle während des Umwickelprozesses zwischen einem oder mehreren benachbarten Anschlußpin(s) des gerade zu umwickelnden Pins umläuft.

Die Länge des aus der Düse herausstehenden Drahtendes bzw. des im Drahtführer befindlichen, bereits abgeschnittenen aber noch geklemmten Drahtrestes bestimmt die Anzahl der Umwicklungen und kann mit den beiden anderen Systemen Drahtförder- und Drahtschneideeinheit flexibel eingestellt werden.

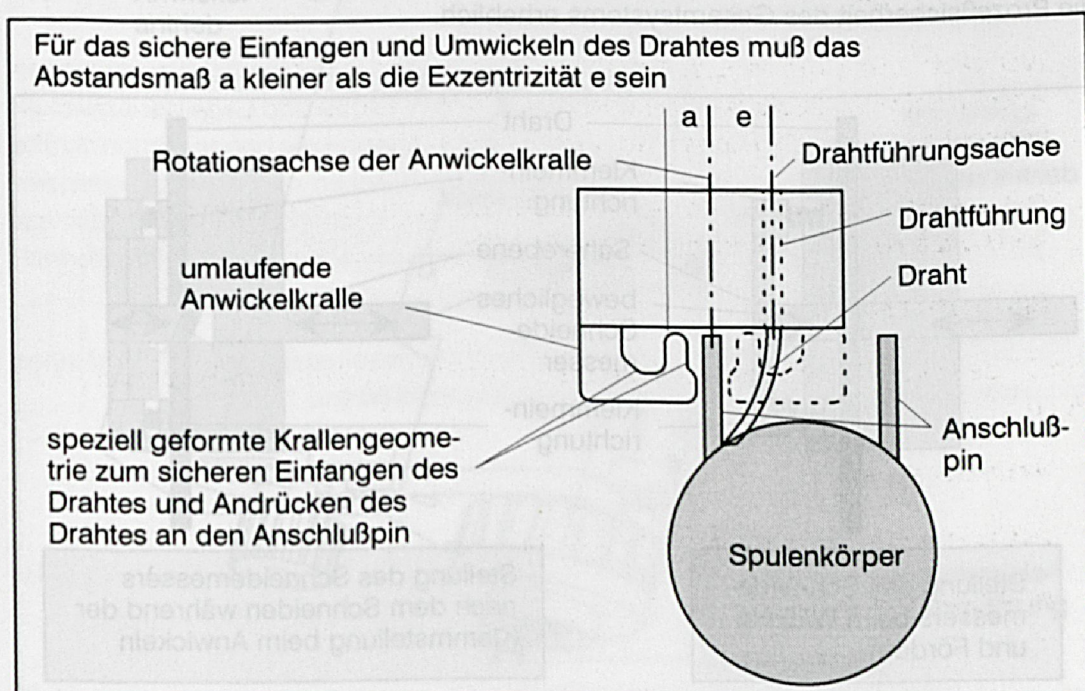


Bild 92: Prinzipskizze der umlaufenden Anwickelkralle bei der Umwicklung des ersten Anschlußpins bei frei herausstehendem Draht aus der Düse



### Drahtschneideeinheit mit integrierter Klemmeinrichtung

Ziel dieser Einheit ist es, den Draht abfallfrei zu schneiden und ihn ober- und unterhalb der Scherebene zu klemmen.

Das Klemmen oberhalb der Scherebene ist deshalb erforderlich, da in der Regel Drahtbremseinheiten verwendet werden, die z.B. mittels ihrer Tänzerhebel den Draht aus der gesamten Einheit herausziehen würden. Der Klemmprozeß zwischen Drahtbremse und Schneideeinheit kann beispielsweise durch ein separates System oder durch die unten beschriebene Drahtfördereinheit erfolgen. Letztere ist nur während des Klemmens und Förderns aktiv und sollte beim eigentlichen Wickeln außer Eingriff sein, um nicht unnötige Beschädigungen an der Lackdrahtoberfläche und einen zusätzlichen Verschleiß zu verursachen.

Das Klemmen unterhalb der Scherebene dient ebenfalls zur Erhöhung der Prozeßsicherheit. Der Draht, der mit definierter Drahtzugkraft in die Wickelkammer eingewickelt wurde, besitzt ein elastisches Rückfederungsbestreben. Ohne Klemmeinrichtung könnte es deshalb zum vorzeitigen Herausziehen des Drahtes aus dem Drahtführer kommen, bevor der Draht definiert um den Anschlußpin gewickelt wurde.

Die Schneideeinrichtung in Form eines Schermessers wurde zur Vermeidung von Drahtabfällen so konzipiert, daß der Draht nur in einer Ebene getrennt wird. Das erhöht die Prozeßsicherheit des Gesamtsystems erheblich.

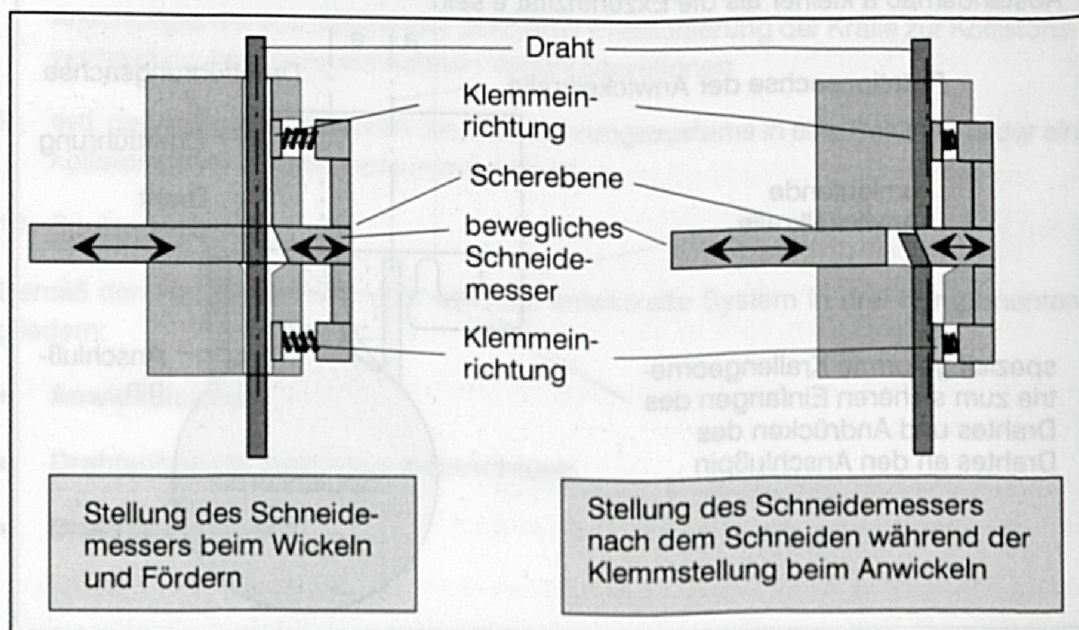


Bild 93: Schneideeinrichtung mit integriertem Klemmechanismus

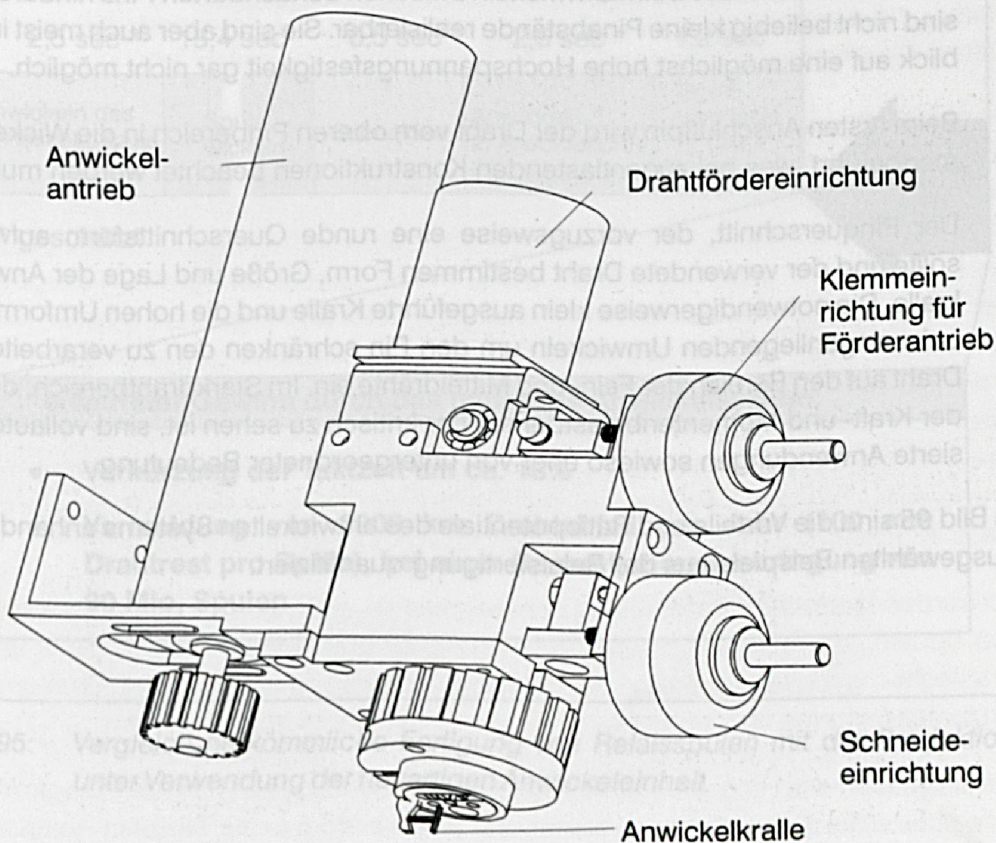


### Drahtfördereinheit

Nachdem der Draht geschnitten und um den Anschlußpin gewickelt wurde, erfolgt der automatisierte Spulenwechsel. Parallel hierzu muß der Draht, welcher um den ersten Anschlußpin der neuen Spule gewickelt werden soll, aus der Scherebene um jene definierte Länge herausgefördert werden, die notwendig ist, den Draht mit der gewünschten Windungsanzahl um den Pin zu wickeln.

Bild 94 zeigt den schematischen Aufbau einer möglichen Ausführungsform des vorgestellten Gesamtsystems zum verbesserten Anwickeln der Anschlußpins.

Einer der Hauptvorteile des hier beschriebenen Systems liegt darin, daß das zeitintensive Umwickeln der Hilfsstifte entfällt. Das damit verbundene Einsparungspotential ist stark vom Zeitanteil des reinen Wickelprozesses abhängig. Je kürzer der eigentliche Wickelprozeß ist, desto stärker machen sich die möglichen Zeitvorteile durch eine erhöhte Ausbringung bemerkbar.



**Bild 94:** Schematischer Aufbau der taktzeitverkürzenden und drahtabfallos schneidenden Anwickleinheit



Für den flexiblen Einsatz an beliebigen Wickelautomaten wurde das System mit einer eigenen autarken Steuerung versehen, die nach Erhalt von digitalen Signalen aus der übergeordneten Wickelmaschinensteuerung die einzelnen Komponenten ansteuert.

Die Steuerung erlaubt im Einrichtemodus die bedienergeführte Einstellung der prozeß-abhängigen Systemparameter wie:

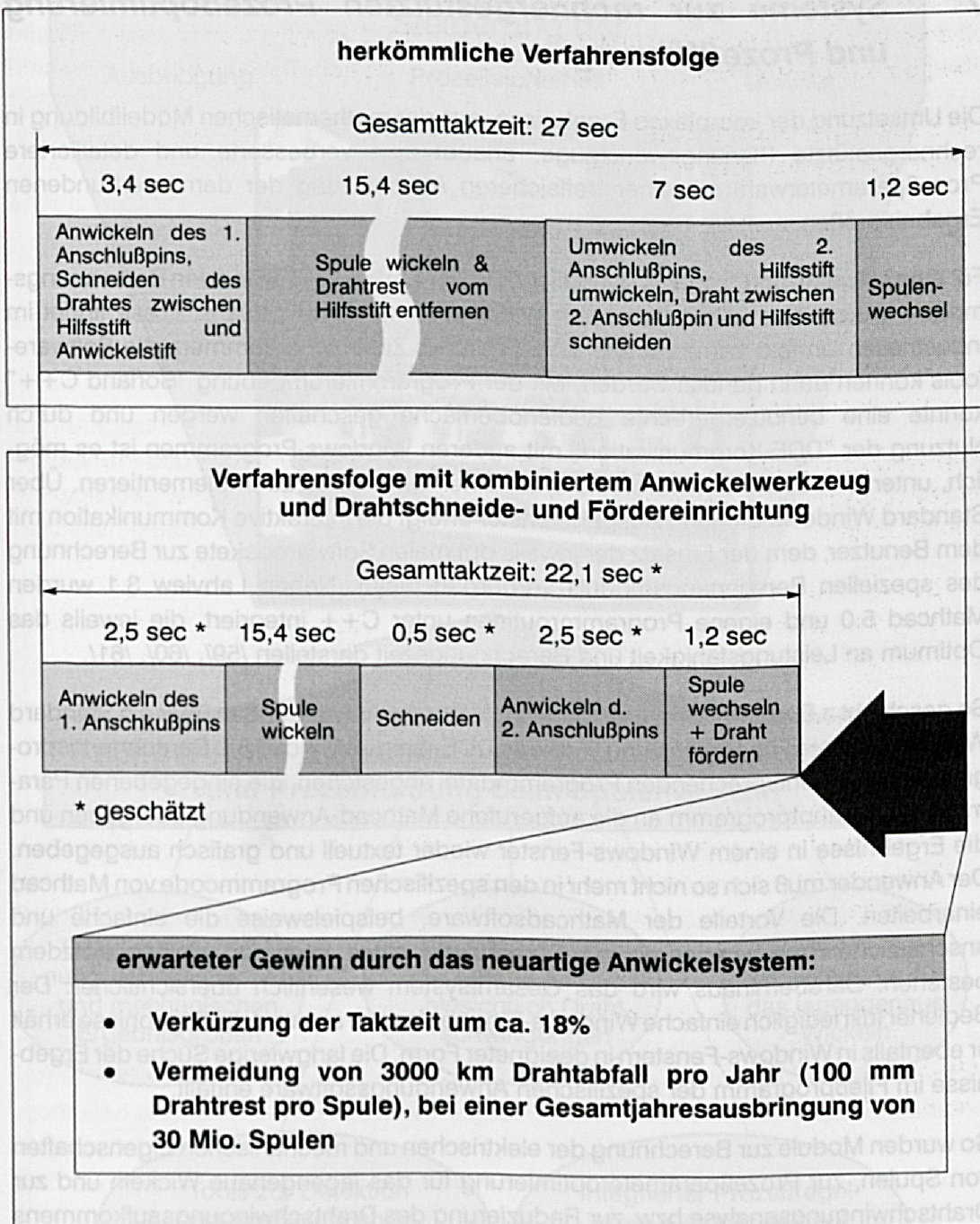
- Wahl der ganzzahligen Umwicklungen der Kralle mit definierter Endstellung
- Einstellung der erforderlichen Drahtförderlänge aus der Scherebene heraus, um den ersten Anschlußpin mit der gewünschten Anzahl von Windungen zu umwickeln
- Einstellung der Wartezeit zwischen Aktivierung der Klemmeinrichtung am Drahtförderantrieb und dem Start des Drahtfördervorgangs

Zwar ist durch den überaus flexiblen Aufbau des Systems der Einsatz in einer breiten Palette von Anwendungen möglich, jedoch ergeben sich dennoch systembedingte Einschränkungen:

- Da die Anwickelkralle beim Umwickeln zwischen benachbarten Pins hindurchläuft, sind nicht beliebig kleine Pinabstände realisierbar. Sie sind aber auch meist im Hinblick auf eine möglichst hohe Hochspannungsfestigkeit gar nicht möglich.
- Beim ersten Anschlußpin wird der Draht vom oberen Pinbereich in die Wickelkammer geführt, was bei zugentlastenden Konstruktionen beachtet werden muß.
- Der Pinquerschnitt, der vorzugsweise eine runde Querschnittsform aufweisen sollte und der verwendete Draht bestimmen Form, Größe und Lage der Anwickelkralle. Die notwendigerweise klein ausgeführte Kralle und die hohen Umformkräfte beim enganliegenden Umwickeln um den Pin schränken den zu verarbeitenden Draht auf den Bereich der Fein- und Mitteldrähte ein. Im Starkdrahtbereich, der von der Kraft- und Momentenbelastbarkeit her kritisch zu sehen ist, sind vollautomatisierte Anwendungen sowieso eher von untergeordneter Bedeutung.

In Bild 95 sind die Vorteile und Ratiopotentiale des entwickelten Systems anhand eines ausgewählten Beispiels aus der Relaisfertigung quantifiziert.





**Bild 95:** Vergleich herkömmliche Fertigung von Relaispulen mit der Produktion unter Verwendung der neuartigen Anwickelmaschine

Neben rein maschinenbaulichen Verbesserungen einerseits bieten sich zur Leistungs- und Qualitätssteigerung in der Wickeltechnik auf der anderen Seite auch rechnergestützte Methoden zur verbesserten und effizienteren Planung der Wickelvorgänge an.



## **7 Systeme zur rechnergestützten Prozeßoptimierung und Prozeßführung**

Die Umsetzung der komplexen Ergebnisse, aus der mathematischen Modellbildung in rechnergestützte Planungswerkzeuge, erlaubt eine verbesserte und detailliertere Prozeßparameterwahl mit einer treffsicheren Abschätzung der damit verbundenen Ergebnisgrößen.

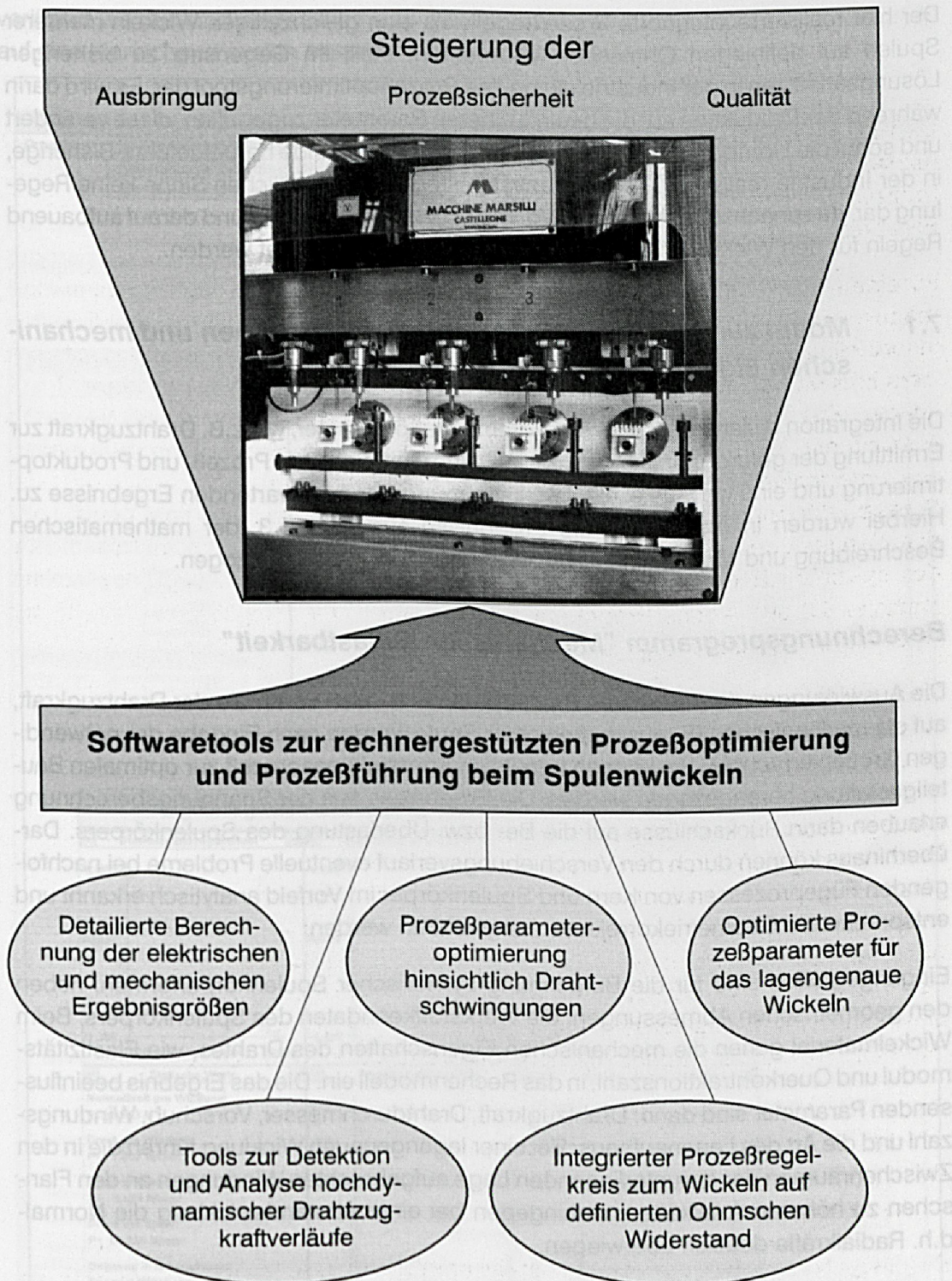
Für eine effiziente und benutzerfreundliche Bedienbarkeit der realisierten Berechnungsmodule wurde eine PC-Plattform mit Windows-Umgebung gewählt. Diese findet im industriellen Umfeld immer stärkere Verbreitung. Zahlreiche kommerzielle Softwaretools können darin genutzt werden. Mit der Programmierumgebung "Borland C++" konnte eine benutzergerechte Bedienoberfläche geschaffen werden und durch Nutzung der "DDE-Kommunikation" mit anderen Windows-Programmen ist es möglich, unterschiedliche Softwaretools unter einer Oberfläche zu implementieren. Über Standard Windows Ein- und Ausgabefenster erfolgt die interaktive Kommunikation mit dem Benutzer, dem der Einsatz der jeweils optimalen Softwarepakete zur Berechnung des speziellen Berechnungsmoduls verborgen bleibt. Neben Labview 3.1 wurden Mathcad 5.0 und eigene ProgrammROUTINEN unter C++ integriert, die jeweils das Optimum an Leistungsfähigkeit und Berechnungszeit darstellen /59/, /60/, /61/.

So geschieht z.B. die Parametereingabe für Mathcad-Anwendungen über ein Standard Windows-Fenster. Im Hintergrund wird das DDE-fähige Mathcad 5.0 Berechnungsprogramm mit der entsprechenden Programmdatei angestoßen, die eingegebenen Parameter vom Hauptprogramm an die aufgerufene Mathcad-Anwendung übergeben und die Ergebnisse in einem Windows-Fenster wieder textuell und grafisch ausgegeben. Der Anwender muß sich so nicht mehr in den spezifischen Programmcode von Mathcad einarbeiten. Die Vorteile der Mathcadsoftware, beispielsweise die einfache und anschauliche Programmierung zur Berechnung eines Integrals, bleiben trotzdem bestehen. Darüberhinaus wird das Gesamtsystem wesentlich übersichtlicher: Der Bediener füllt lediglich einfache Windows-Eingabefenster aus und die Ergebnisse erhält er ebenfalls in Windows-Fenstern in geeigneter Form. Die langwierige Suche der Ergebnisse im Fließprogramm der spezifischen Anwendungssoftware entfällt.

So wurden Module zur Berechnung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Spulen, zur Prozeßparameteroptimierung für das lagengenaue Wickeln und zur Drahtschwingungsanalyse bzw. zur Reduzierung des Drahtschwingungsaufkommens implementiert.

Die Integration des Programms zur hochdynamischen Messung der Drahtzugkräfte mit Hilfe unterschiedlicher Sensorsysteme und weitere Module zur flexiblen Ansteuerung der am Markt erhältlichen elektronischen Drahtzugregler führen zu einem umfassenden Planungs- und Analysesystem für die Prozeßoptimierung des Spulenwickelns (vgl. Kapitel 4.1 und 7.4).





**Bild 96:** Komponenten der realisierten Softwaretools für die Spulenwickeltechnik



Der hier realisierte integrierte Prozeßregelkreis zum gleichzeitigen Wickeln mehrerer Spulen auf definierten Ohmschen Widerstand, stellt im Gegensatz zu bisherigen Lösungsansätzen in der Industrie ein on-line Prozeßoptimierungstool dar. Es wird darin während der Produktion auf die beeinflussbaren Parameter zugegriffen, diese verändert und somit die Homogenisierung der Ohmschen Widerstände herbeigeführt. Bisherige, in der Industrie realisierte, Lösungsansätze stellen im eigentlichen Sinne keine Regelung dar, da zunächst Spulen gewickelt, die Ergebnisse verifiziert und darauf aufbauend Regeln für den Wickelprozeß nachfolgender Spulen abgeleitet werden.

### **7.1 Modul zur präzisen Voraussage der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Spulen**

Die Integration bislang unberücksichtigter Einflußparameter, wie z.B. Drahtzugkraft zur Ermittlung der geforderten Zielgrößen, läßt eine weitreichende Prozeß- und Produktoptimierung und eine weitaus exaktere Bestimmung der zu erwartenden Ergebnisse zu. Hierbei wurden in erster Linie die Ergebnisse aus Kapitel 3, der mathematischen Beschreibung und Modellbildung der Wickelprozesse, herangezogen.

#### **Berechnungsprogramm "Mechanische Belastbarkeit"**

Die Auswirkungen der relevanten Prozeßparameter, allen voran die der Drahtzugkraft, auf die mechanischen Eigenschaften einer Spule werden nach Eingabe der notwendigen Größen errechnet. Sie können bereits im Konstruktionsprozeß zur optimalen Bauteilgestaltung herangezogen werden. Die Ergebnisse aus der Spannungsberechnung erlauben darin Rückschlüsse auf die Be- bzw. Überlastung des Spulenkörpers. Darüberhinaus können durch den Verschiebungsverlauf eventuelle Probleme bei nachfolgenden Fügeprozessen von Kern und Spulenkörper im Vorfeld analytisch erkannt und entsprechende Geometriekorrekturen angestoßen werden.

Eingangsgrößen sind für die Berechnung zylindrischer Spulenkörperformen, neben den geometrischen Abmessungen, die Werkstoffkenndaten des Spulenkörpers. Beim Wickelmaterial gehen die mechanischen Eigenschaften des Drahtes, wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl, in das Rechenmodell ein. Die das Ergebnis beeinflussenden Parameter sind dann: Drahtzugkraft, Drahtdurchmesser, Vorschub, Windungszahl und die Art des Lagenaufbaus. Bei einer lagengenauen Wicklung führen die in den Zwischenräumen der darunterliegenden Lage aufgetragenen Windungen an den Flanschen zu höheren Axialkräften, wohingegen bei einer Abstandswicklung die Normal- d.h. Radialkräfte deutlich überwiegen.

Spulen, die durch Flansche seitlich begrenzt werden, zeigen im Flanschbereich eine radiale Aufweitung und im Mittelbereich die ohnehin vermutete radiale Einschnürung, bei einer insgesamt zunehmenden Spulenausdehnung in axialer Richtung. Die theoretischen Ergebnisse konnten im Rahmen zahlreicher experimenteller Versuchsreihen



verifiziert werden und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zur Praxis. Dies läßt auf eine hinreichend exakte Modellbildung schließen.

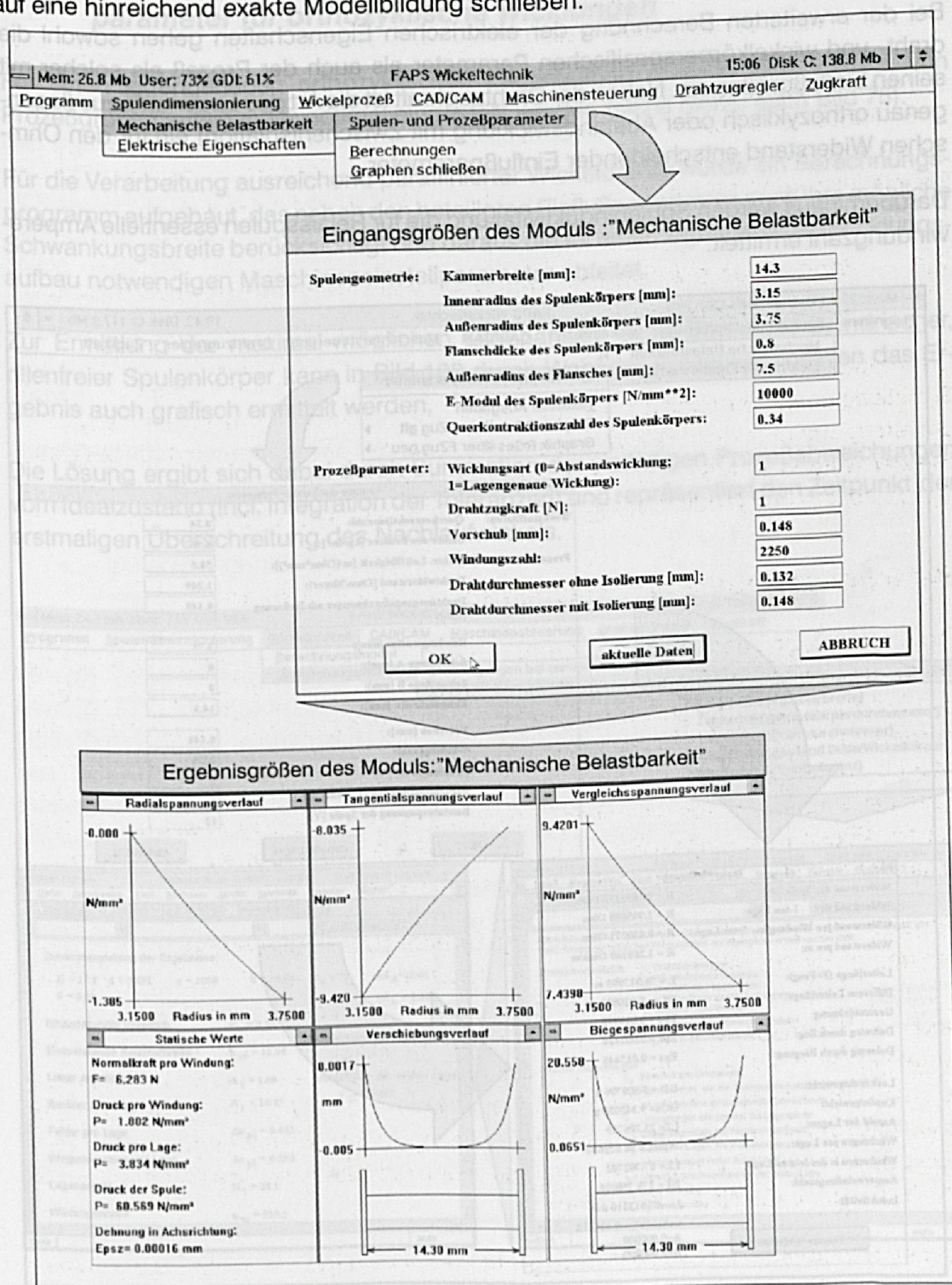


Bild 97: Ein- und Ausgabemasken des Berechnungsprogramms: "Mechanische Belastbarkeit"



## Berechnungsprogramm "Elektrische Eigenschaften"

Bei der erweiterten Berechnung der elektrischen Eigenschaften gehen sowohl die draht- und wickelkörperspezifischen Parameter als auch der Prozeß als solcher mit seinen Einflußgrößen ein. Neben der Drahtzugkraft ist die Art des Lagenaufbaus (lagen- genau orthozyklisch oder Abstandswicklung mit Zwischenisolation) ein für den Ohm- schen Widerstand entscheidender Einflußparameter.

Darüberhinaus werden Spuleninduktivität und die für Relaispulen essentielle Ampère- windungszahl ermittelt.

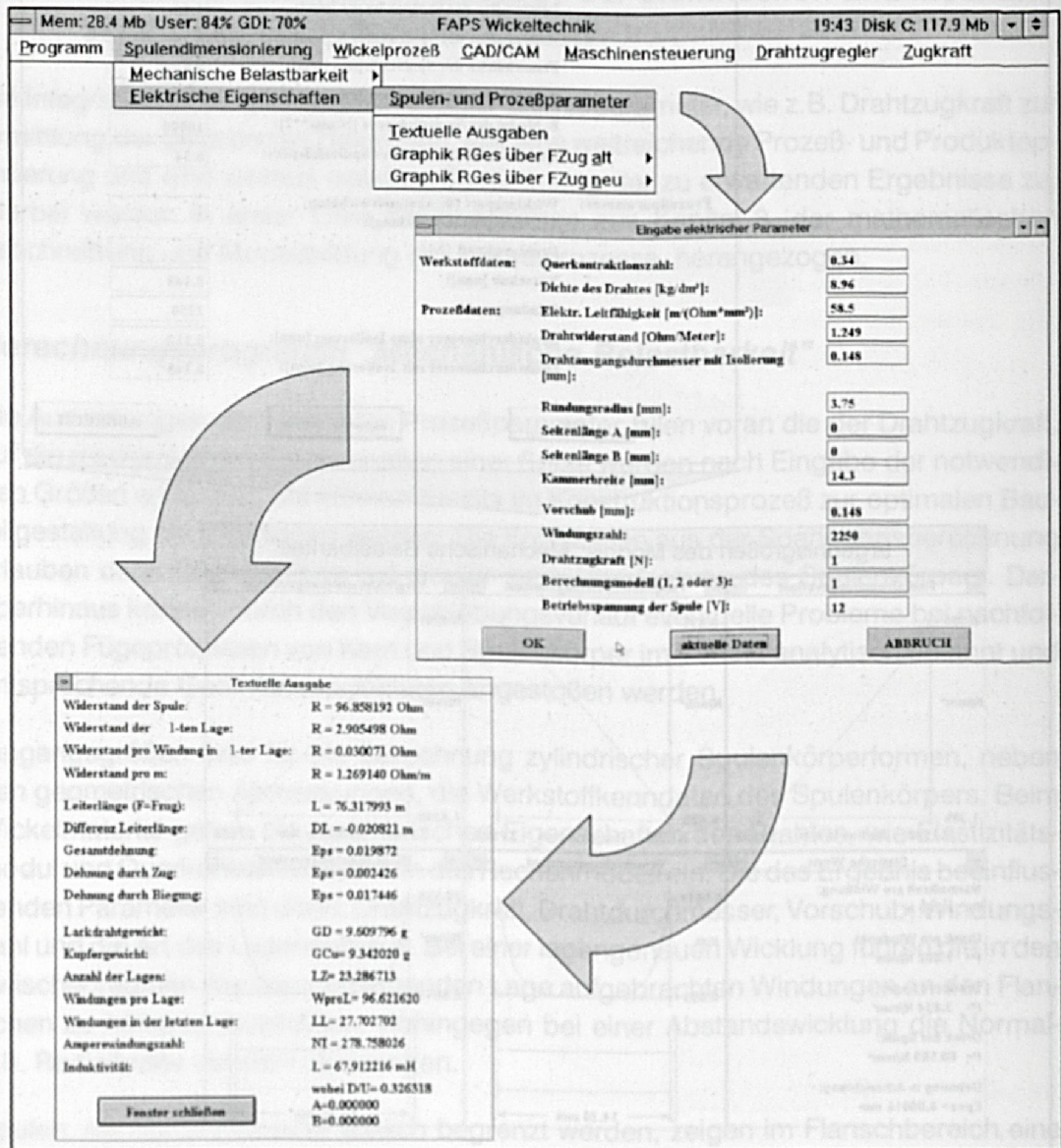


Bild 98: Ein- und Ausgabefenster des Berechnungsprogramms "Elektrische Eigenschaften"



## 7.2 Programm zur Berechnung der optimalen Maschineneinstellparameter für orthozyklische Wicklungen

Für einen lagengenauen orthozyklischen Lagenaufbau müssen eine Vielzahl von Prozeßgrößen aufeinander optimal eingestellt werden (siehe hierzu auch Bild 75).

Für die Verarbeitung ausreichend paraffinierter Wickeldrähte wurde ein Berechnungsprogramm aufgebaut, das neben den beteiligten Einflußparametern auch ihre mögliche Schwankungsbreite berücksichtigt und daraus die für einen lagengenauen Wicklungsaufbau notwendigen Maschineneinstellparameter ableitet.

Zur Ermittlung der maximal möglichen Lagenanzahl beim Bewickeln zylindrischer, rillenfreier Spulenkörper kann in Bild 100 durch Wahl der Prozeßkenngrößen das Ergebnis auch grafisch ermittelt werden.

Die Lösung ergibt sich dabei durch Summation der vielfältigen Prozeßabweichungen vom Idealzustand (incl. Integration der Toleranzen) und repräsentiert den Zeitpunkt der erstmaligen Überschreitung des Nachlaufwinkels.

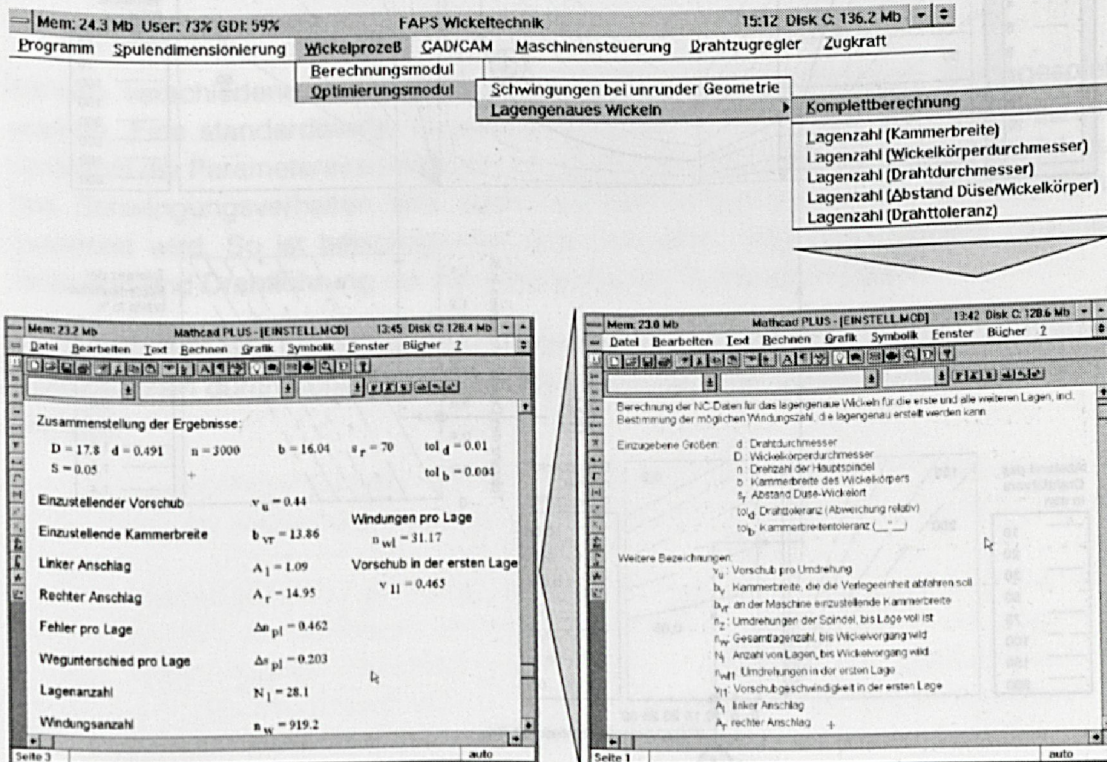


Bild 99: Ein- und Ausgabefenster des Berechnungsprogramms zur verbesserten Prozeßparameterwahl bei lagengenauen Wicklungsaufbauten



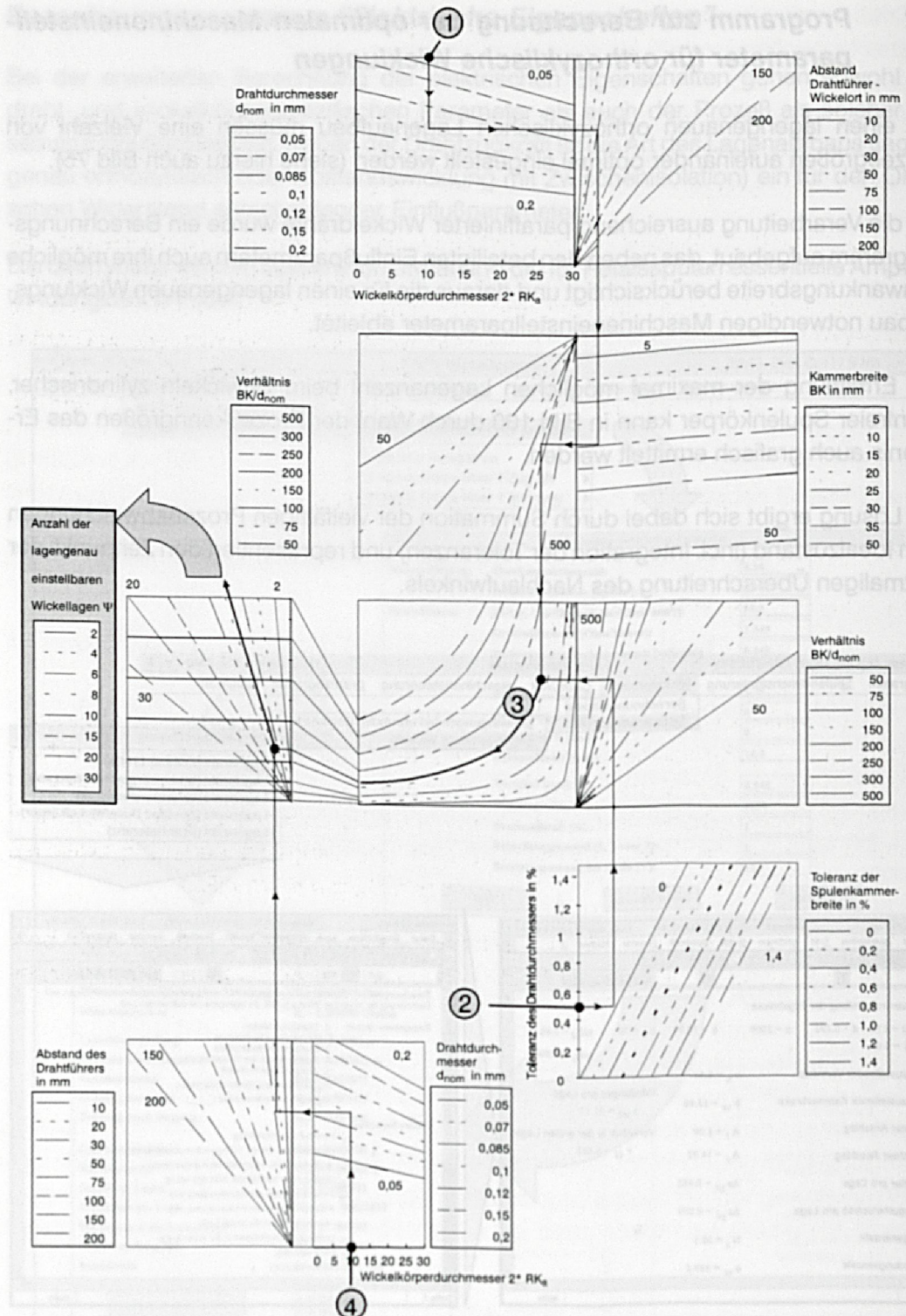


Bild 100: Nomogramm zur Ermittlung der maximal möglichen Lagenanzahl beim Bewickeln rillenfreier, runder Spulenkörpergeometrien unter Berücksichtigung der maßgeblichen Einflußparameter



### 7.3 Softwaresystem zur Abschätzung und Reduzierung des Drahtschwingungsaufkommens

Die Umsetzung der aus Kapitel 3.2.3 erarbeiteten mathematischen Zusammenhänge in ein Berechnungsprogramm gestattet die effiziente Abschätzung der sich einstellenden Drahtschwingungen während des Wickelprozesses.

Neben der durch die Wickeldrehzahl und Spulenkörperform zu erwartende erzwungene Erregung des Drahtes werden die Eigenfrequenzen der frei schwingenden Drahtsaiten bestimmt. Die Quantifizierung der Frequenzverschiebung, die sich durch die Berücksichtigung des mit der gemittelten Geschwindigkeit  $v$  durchlaufenden Drahtes ergibt, führt erst ab Drahtgeschwindigkeiten  $> 25$  m/s zu nennenswerten Abweichungen vom vereinfachten Modell (vgl. hierzu Bild 47, sowie Gl. (3.71) und Gl. (3.87)).

Durch Variation der möglichen Prozeßeinflußparameter, wie:

- Drahtzugkraft,
- frei schwingende Drahtlänge und
- Wickeldrehzahl

können verschiedene Szenarien zur Drahtschwingungsminimierung durchgespielt werden. Eine standardisierte Vorgehensweise führt nicht immer zum gewünschten Optimum der Parametereinstellungen, da die Wickelprozeßoptimierung im Hinblick auf das Schwingungsverhalten sehr stark von den Möglichkeiten des Wickelsystems bestimmt wird. So ist beispielsweise eine definierte Längenveränderung zwischen Wickelort und Drahtführung nur bei mehrachsigen Systemen möglich.

Im allgemeinen sind hohe Eigenfrequenzen der frei schwingenden Saiten anzustreben. Diese können durch hohe Drahtzugkräfte und kurze freie Schwingungslängen erzielt werden.



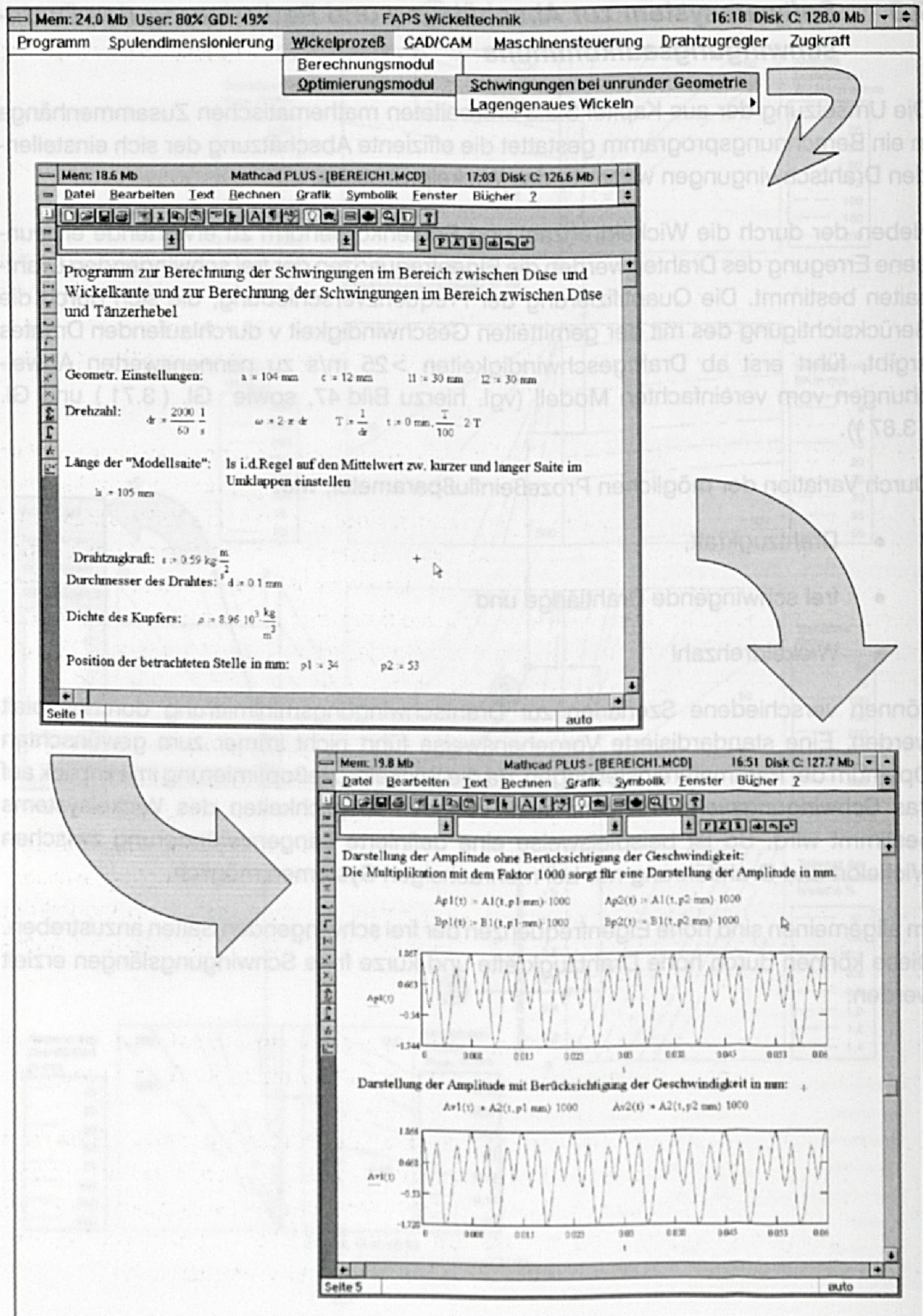


Bild 101: Ein- und Ausgabefenster zur numerischen Berechnung und Minimierung von Drahtschwingungen



## 7.4 Integrierte Steuer- und Regelsysteme zum Wickeln auf definierten Ohmschen Widerstand beim Ein- und insbesondere beim Mehrfachwickeln

### 7.4.1 Ziele und Anforderungen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt werden konnte, ist das Wickelergebnis von einer Vielzahl von Prozeßparametern abhängig. Es führen oftmals Schwankungen des Drahtdurchmessers und/oder hohe Fertigungstoleranzen der Spulenkörperabmessungen zu nicht unerheblichen Abweichungen der elektrischen Ergebnisgrößen, allen voran des Ohmschen Widerstandes.

Der Wickelprozeß als solcher beeinflusst zudem das Wickelergebnis und kann daher auch zur gezielten Beeinflussung genutzt werden. Ein lagengenaue orthozyklischer Wicklungsaufbau führt zu engeren Ergebnisabweichungen als eine Wildwicklung. Er stellt aber auch dementsprechend höhere Anforderungen an die Prozeßgestaltung. Desweiteren führen kleine Abweichungen bei der Prozeßführung und/oder den Eingangsgrößen, die dann ebenfalls eine Wildwicklung zur Folge haben, zu - relativ gesehen - größeren Veränderungen des Wickelergebnisses, als die gleichen Abweichungen bei einer von vornherein wildgewickelten Spule.

Sofern es technologische Gründe nicht zwingend erfordern, sollte ein lagengenaue orthozyklischer Wicklungsaufbau, aufgrund der damit verbundenen hohen Prozeßanforderungen, nicht angestrebt werden. Die dann aber vorliegende Wildwicklung kann zu nicht unerheblichen Ohmschen Widerstandsschwankungen führen. Diese müssen bei der Konstruktion und der Dimensionierung des Produktes berücksichtigt werden. Denn mit dem Ohmschen Widerstand verändert sich die für die erzeugbare Magnetkraft bestimmende Ampèrewindungszahl  $N \cdot J$  nach (Gl. 3.10), da bei konstanter Gleichspannungsversorgung  $I = U/R$  gilt.

Im Betriebseinsatz kann es zu unterschiedlichen Magnetkräften und bei einem zu geringen Ohmschen Widerstand zu einer zu hohen Eigenerwärmung der Spule kommen.

Trotz der vielfältigen und zum Teil stark schwankungsbehafteten Eingangsgrößen muß es das Ziel sein, die Ohmschen Widerstandsschwankungen so gering wie möglich zu halten. Neben qualitativ hochwertigen Erzeugnissen führt dies darüberhinaus zu kostengünstigen Produkten, da bei weniger schwankenden Ergebnisgrößen der Sicherheitsraum durch Überdimensionierung kleiner gehalten werden kann.

Es stellt sich das Problem, daß während des Wickelprozesses der aktuelle Ohmsche Widerstand nicht direkt ermittelt werden kann, da dies die Beschädigung der Lackisolation erfordern würde.



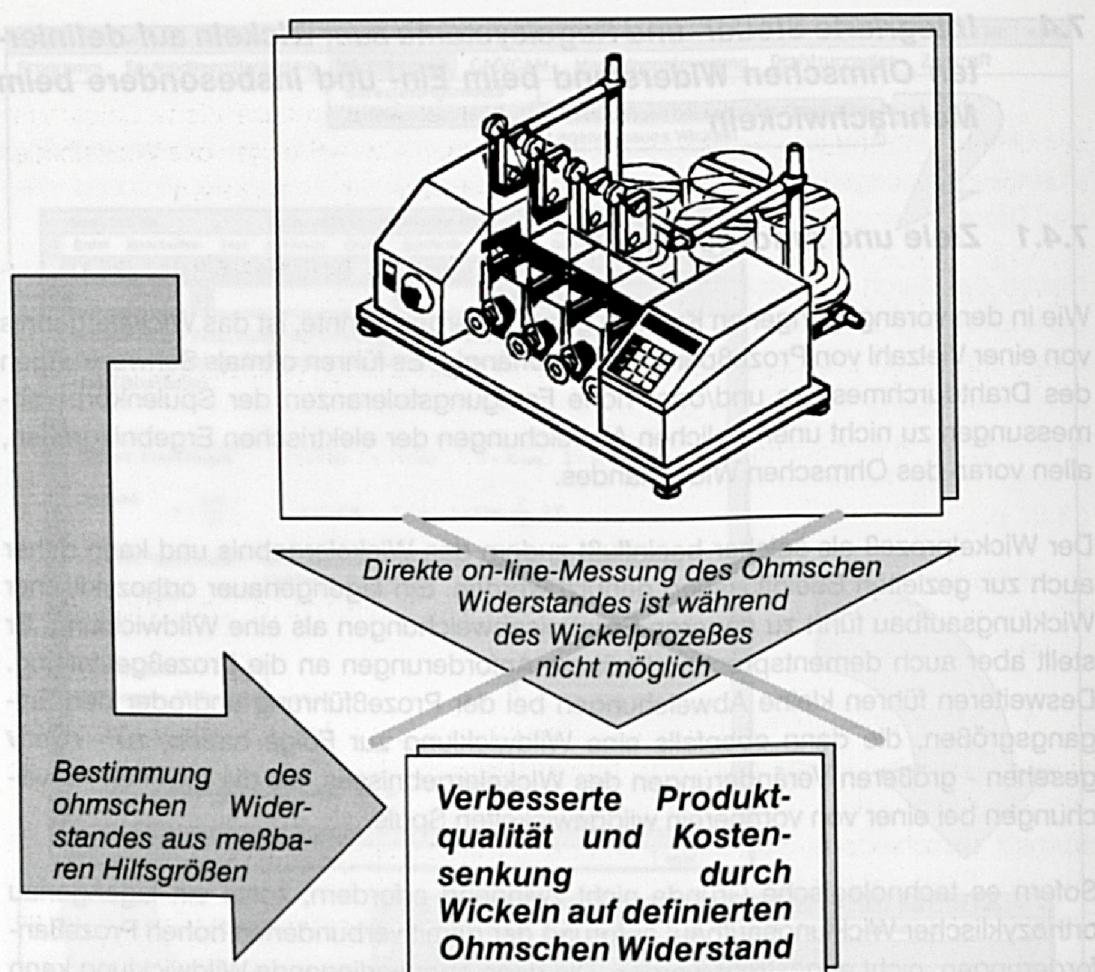


Bild 102: Problemstellung und Lösungsansatz zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Wicklungsgüter

Indirekt läßt sich der Ohmsche Widerstand durch on-line Messungen der verwickelten Drahtlänge in Verbindung mit der Kenntnis des verarbeiteten Drahtdurchmessers und des spezifischen Leitwertes nach Gl.(3.4) bestimmen. Eine umfassende Berücksichtigung der beeinflussenden Prozeßparameter erfordert darüberhinaus die Kenntnis von Drahtzugkraft und den zwischen Drahtbremssystem und Wickelort befindlichen Umlenkelementen in Form von Anzahl und Biegeradius.

Durch unterschiedliche Drahtdicken, insbesondere bei Chargenwechsel und Spulenkörpertoleranzen, ergeben sich bei gleicher Sollwindungszahl abweichende Drahtlängen, unterschiedliche spezifische Widerstände und somit auch differierende Ohmsche Widerstände.



### 7.4.2 Gegenüberstellung verschiedener Konzepte

Bei der Massenproduktion an Mehrspindelsystemen können zusätzliche Dejustagen der einzelnen Drahtführer mit den damit verbundenen Abweichungen des Wickelbildes von der Zylinderform zu weiteren Widerstandsschwankungen beitragen.

Zur Homogenisierung der Ohmschen Widerstände bzw. zum Wickeln auf definierten Ohmschen Widerstand bieten sich prinzipiell zwei Wege an:

- 1) Veränderung der Endwindungszahl vor oder während des Wickelprozesses
- 2) Veränderung des Drahtzuges während des Wickelprozesses

#### **Veränderung der Endwindungszahl vor oder während des Wickelprozesses**

Das führt zur Beeinflussung der Ampèrewindungszahl, da zwar die Stromstärke konstant gehalten wird (durch konstante Ohmsche Widerstände), sich aber die Windungszahl ändern kann. Diese Verfahrensweise bietet sich daher nur für Anwendungsfälle an, bei denen die Ampèrewindungszahl zweitrangig ist.

Ein typisches Anwendungsfeld ist die Fertigung engtolerierter Widerstandswicklungen.

Bei Mehrfachwickelanwendungen im Spießwickelverfahren an Einspindelmaschinen oder beim Wickeln an Mehrspindelwickelautomaten mit synchron angetriebenen Wickelspindeln führt diese Vorgehensweise nicht zum gewünschten Ziel, da die Windungszahl für alle zeitgleich gewickelten Spulen gleichmäßig verändert wird und Drahtdurchmesserunterschiede aus den gleichzeitig eingesetzten Vorratstrommeln nicht ausgeglichen werden können.

Die einzige Möglichkeit, Chargenunterschiede der Lackdrähte aufzuheben, besteht darin, die Drahtdurchmesser zu homogenisieren.

#### **Aktive Beeinflussung des Drahtdurchmessers**

Zum einen kann sie über die Verwendung von Ziehsteinen oder Rollen erfolgen, deren Durchmesser in der Regel so groß sind, wie der kleinste zulässige Durchmesser der zu verarbeitenden Drähte /62/. Bei jedem Produkt- bzw. Drahtstärkebereichswechsel müssen die Ziehsteine mit ausgetauscht oder die Rollen in ihrem Abstand zueinander verändert werden. Dies stellt deshalb einen sehr unflexiblen Aufbau dar.



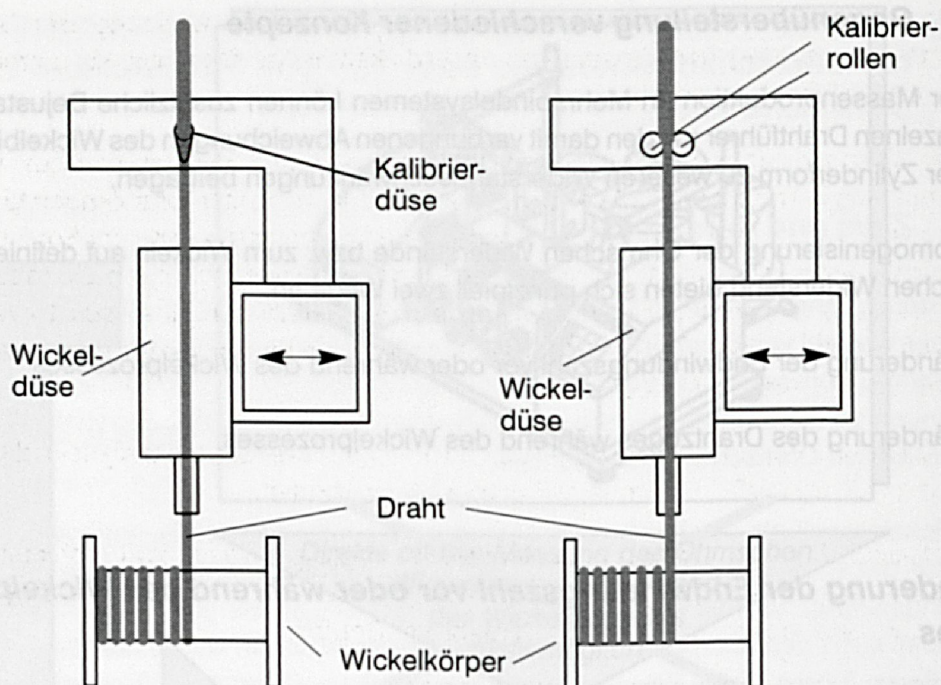


Bild 103: Aktive Drahtdurchmesserbeeinflussung durch Kalibrierung des Drahtes auf Sollmaß

### Veränderung des Drahtzuges während des Wickelprozesses

Durch den in gewissen Grenzen variierbaren Drahtzug kann der Drahtdurchmesser und die verwickelte Drahtlänge beeinflusst werden. Das erlaubt die Beeinflussung und Homogenisierung der Einzelwiderstände bei Mehrfachwickelanwendungen, insbesondere an synchron laufenden Mehrspindelautomaten.

Hierfür können aber nur elektronische Drahtzugreglersysteme eingesetzt werden, denn nur mit solchen ist die bedienerlose Veränderung der Drahtzugkraft während des Wickelprozesses möglich.

Für das gleichzeitige Wickeln mehrerer Spulen ist die zeitsynchrone Erfassung der jeweils aktuell verwickelten Drahtlänge erforderlich. Das kann durch Verwendung von Inkrementaldrehgebern [63] realisiert werden, deren Meßräder vom durchlaufenden Draht umschlungen und auch angetrieben werden. Bei einem Meßraddurchmesser von 65 mm genügt eine Strichanzahl von 200, um eine theoretische Auflösung von ca. 1 mm pro Impuls zu erhalten.

Neben der Ermittlung der verarbeiteten Drahtlänge ist, zur theoretischen Berechnung des Ohmschen Widerstandes, die Kenntnis des spezifischen Widerstandes pro Meter bzw. des Leiterquerschnittes und des materialspezifischen Leitwertes notwendig.

Die Lackisolationsschicht verhindert eine zerstörungsfreie Bestimmung des Leitwertes, daher muß auf den Drahtdurchmesser als Hilfsgröße zurückgegriffen werden. Eine



störungsunempfindliche, automatisierte und berührungslose Messung der Drahtdurchmesser erfordert den Einsatz von Laserdickenmeßgeräten, wie sie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben wurden.

Mit der Veränderung der Endwindungszahl während des Wickelprozesses kann darüberhinaus in stärkerem Maße aktiv auf die jeweils verwickelten Drahtlängen Einfluß genommen werden, um extreme Eingangsgrößenunterschiede seitens der Spulenkörperabmessungen bzw. der unterschiedlichen Drahtdicken auszugleichen. Das setzt jedoch die Möglichkeit des flexiblen Auslesens der aktuellen Windungszahl aus der Wickelmaschinensteuerung und die Übergabe neuer, geänderter Sollwindungszahlen während des Prozesses voraus.

Die Veränderung der Sollwindungszahl darf nur in engen Grenzen zulässig sein, da sich damit in gleichem Maße die Ampèrewindungszahl verändert.

Bild 104 zeigt die während des Wickelprozesses ständig zyklisch zu durchlaufende Abarbeitungsroutine eines integrierten Prozeßregelkreises zum Wickeln auf definierten Widerstand beim gleichzeitigen Wickeln mehrerer Spulen.

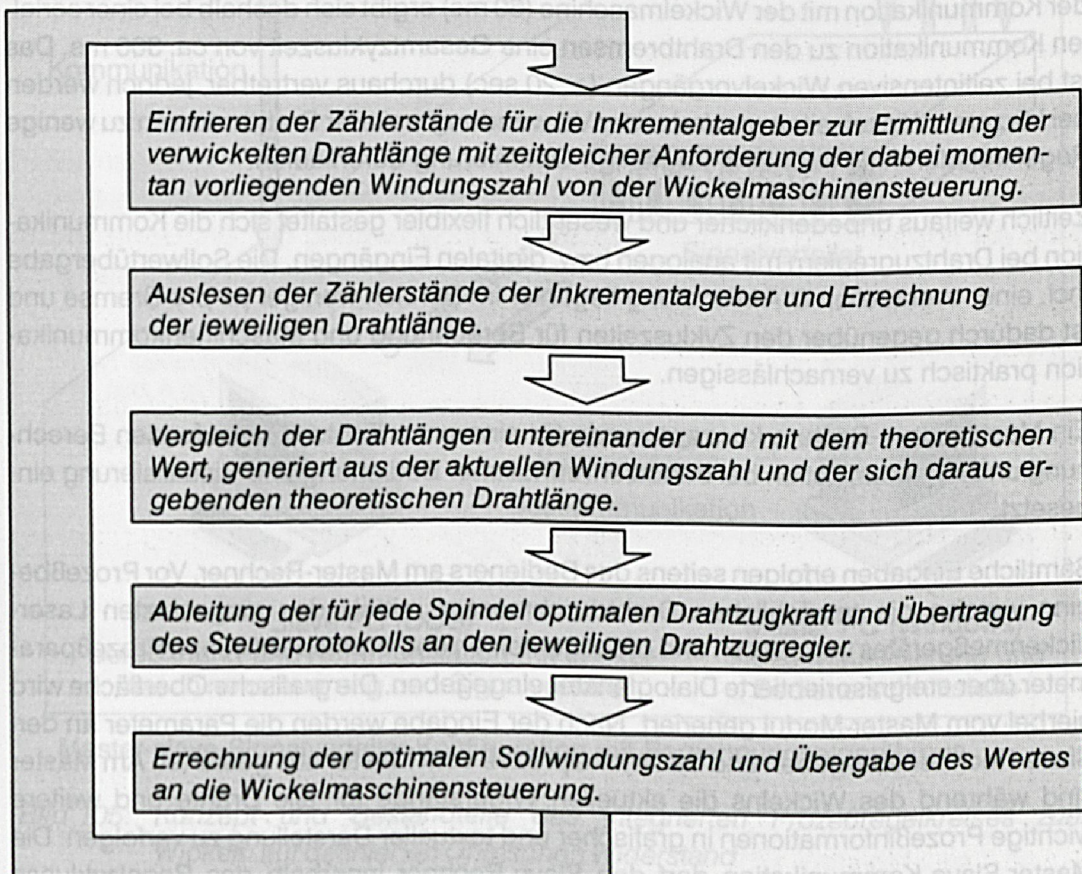


Bild 104: Zyklische Abarbeitungsroutine zum Wickeln auf definierten Ohmschen Widerstand



### 7.4.3 Funktionsweise des realisierten Prozeßregelkreises

Die in Bild 104 vorgestellte und hier eingesetzte zyklische Abarbeitungsroutine muß für jede Spindel mehrmals während des Wickelprozesses durchlaufen werden. Für die serielle Kommunikation mit der Wickelmaschine, zum Einlesen der aktuellen Windungszahl und zur Übergabe der neuen Sollwindungszahl, wurde ein Zeitbedarf von 60 ms ermittelt. Die Zeit zum Einlesen der Inkrementalgeberstände ist mit 3 µs vernachlässigbar gering, die Berechnungen im Regelalgorithmus, welche von der Anzahl der Spindeln abhängen, erfordern für 12 zu versorgende Spindeln eine Zeitscheibe von 50 ms. Hinsichtlich der Kommunikation mit den elektronischen Drahtzugreglern muß unterschieden werden, da die am Markt verfügbaren Bremsen entweder über eine serielle Kommunikation (RS 485) bei einer maximalen Übertragungsrate von 9600 Baud oder über digitale bzw. analoge Eingänge ihre Sollwerte erhalten /64/, /65/, /66/, /67/.

Bei der seriellen Kommunikation ergibt sich bei 12 Drahtzugreglern eine Gesamtübertragungsdauer von ca. 180 ms, da jeweils 16 Zeichen mit einer Geschwindigkeit von 0,83 ms übertragen werden müssen. Mit der Zykluszeit zur Berechnung (50 ms) und der Kommunikation mit der Wickelmaschine (60 ms) ergibt sich deshalb bei einer seriellen Kommunikation zu den Drahtbremsen eine Gesamtzykluszeit von ca. 300 ms. Das ist bei zeitintensiven Wickelvorgängen (> 20 sec) durchaus vertretbar, jedoch werden bei kürzeren Wickelzeiten und/oder der Verwendung weiterer Drahtbremsen zu wenige Regelkreisdurchläufe für eine tragfähige Optimierung durchlaufen.

Zeitlich weitaus unbedenklicher und wesentlich flexibler gestaltet sich die Kommunikation bei Drahtzugreglern mit analogen bzw. digitalen Eingängen. Die Sollwertübergabe incl. einer eventuellen D/A-Wandlung liegt hier im Bereich weniger µs pro Bremse und ist dadurch gegenüber den Zykluszeiten für Berechnung und Maschinenkommunikation praktisch zu vernachlässigen.

Ein Master-Slave-Rechnerkonzept wurde für eine unter Echtzeit ablaufenden Berechnung und Kommunikation bei benutzerfreundlicher Bedienung und Visualisierung eingesetzt.

Sämtliche Eingaben erfolgen seitens des Bedieners am Master-Rechner. Vor Prozeßbeginn werden die tatsächlichen Drahtdurchmesser mittels des eingesetzten Laserdickenmeßgerätes vermessen und die allgemeinen und drahtspezifischen Prozeßparameter über ereignisorientierte Dialogfenster eingegeben. Die grafische Oberfläche wird hierbei vom Master-Modul generiert. Nach der Eingabe werden die Parameter an den Slave-Rechner übergeben und der Wickelprozeß vom Master aus gestartet. Am Master sind während des Wickelns die aktuellen Widerstände für alle Drähte und weitere wichtige Prozeßinformationen in grafischer und textueller Darstellung zu verfolgen. Die Master-Slave-Kommunikation darf den Slave-Rechner innerhalb des Regelzykluses nicht zu lange unterbrechen. Daher wurde anstatt einer seriellen Kommunikation eine schnelle und effektive Buskommunikation realisiert.



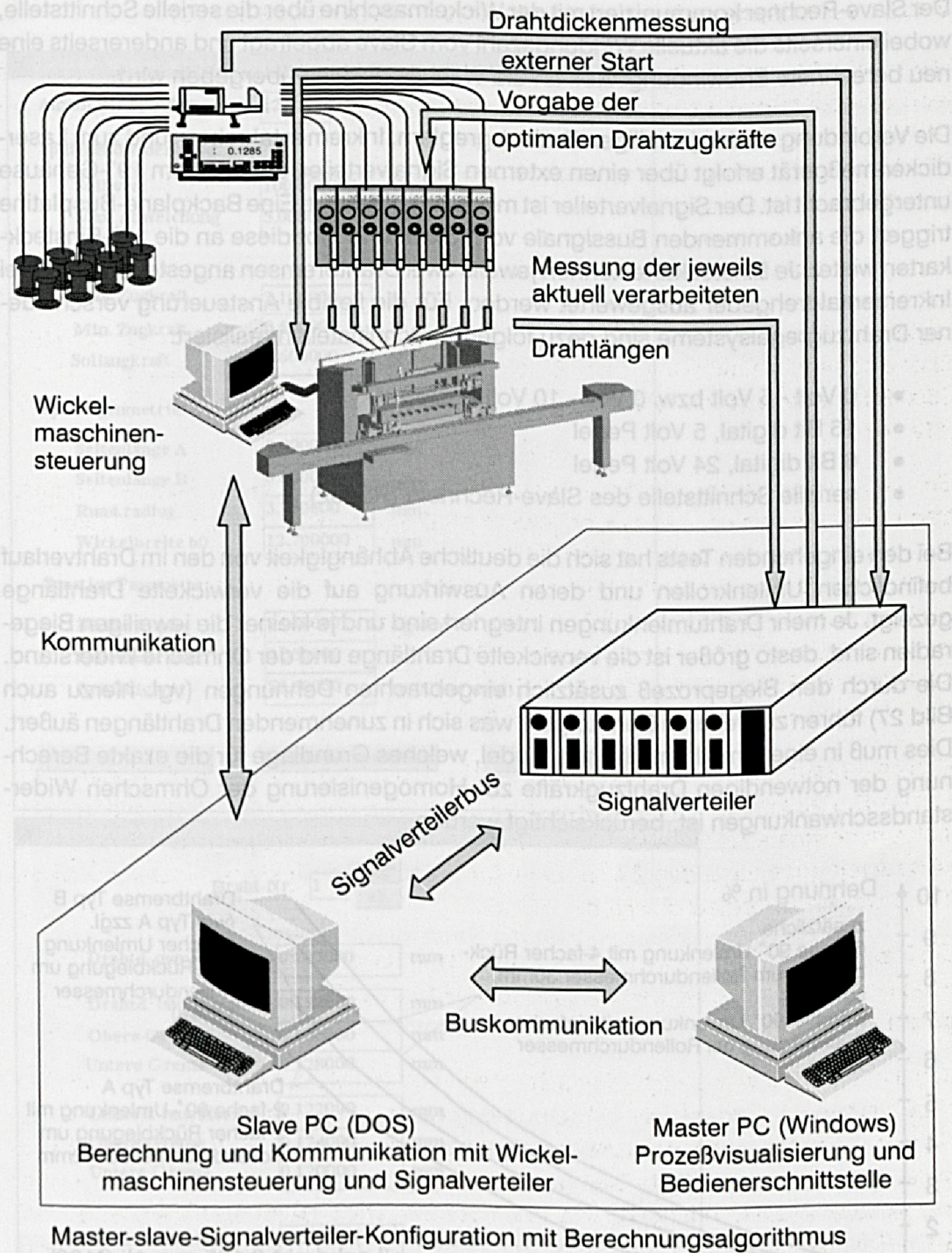


Bild 105: Konzept und Bestandteile des integrierten Prozeßregelkreises zum Wickeln auf definierten Ohmschen Widerstand



Der Slave-Rechner kommuniziert mit der Wickelmaschine über die serielle Schnittstelle, wobei einerseits die aktuelle Windungszahl vom Slave abgefragt und andererseits eine neu berechnete Endwindungszahl an die Wickelmaschine übergeben wird.

Die Verbindung zu den jeweiligen Drahtzugreglern, Inkrementalgebern und zum Laserdickenmeßgerät erfolgt über einen externen Signalverteiler, der in einem 19"-Gehäuse untergebracht ist. Der Signalverteiler ist modular aufgebaut. Eine Backplane-Busplatine triggert die ankommenden Bussignale vom Slave und gibt diese an die 19"-Einsteckkarten weiter. Je Einsteckkarte können jeweils zwei Drahtbremsen angesteuert und zwei Inkrementaldrehgeber ausgewertet werden. Für die flexible Ansteuerung verschiedener Drahtzugregelsysteme sind dazu folgende Schnittstellen realisiert:

- 0 Volt - 5 Volt bzw. 0 Volt - 10 Volt analog
- 16 Bit digital, 5 Volt Pegel
- 6 Bit digital, 24 Volt Pegel
- serielle Schnittstelle des Slave-Rechners (RS232)

Bei den eingehenden Tests hat sich die deutliche Abhängigkeit von den im Drahtverlauf befindlichen Umlenkrollen und deren Auswirkung auf die verwickelte Drahtlänge gezeigt. Je mehr Drahtumlenkungen integriert sind und je kleiner die jeweiligen Biegeradien sind, desto größer ist die verwickelte Drahtlänge und der Ohmsche Widerstand. Die durch den Biegeprozeß zusätzlich eingebrachten Dehnungen (vgl. hierzu auch Bild 27) führen zu weiteren Dehnungen, was sich in zunehmenden Drahtlängen äußert. Dies muß in einem mathematischen Modell, welches Grundlage für die exakte Berechnung der notwendigen Drahtzugkräfte zur Homogenisierung der Ohmschen Widerstandsschwankungen ist, berücksichtigt werden.

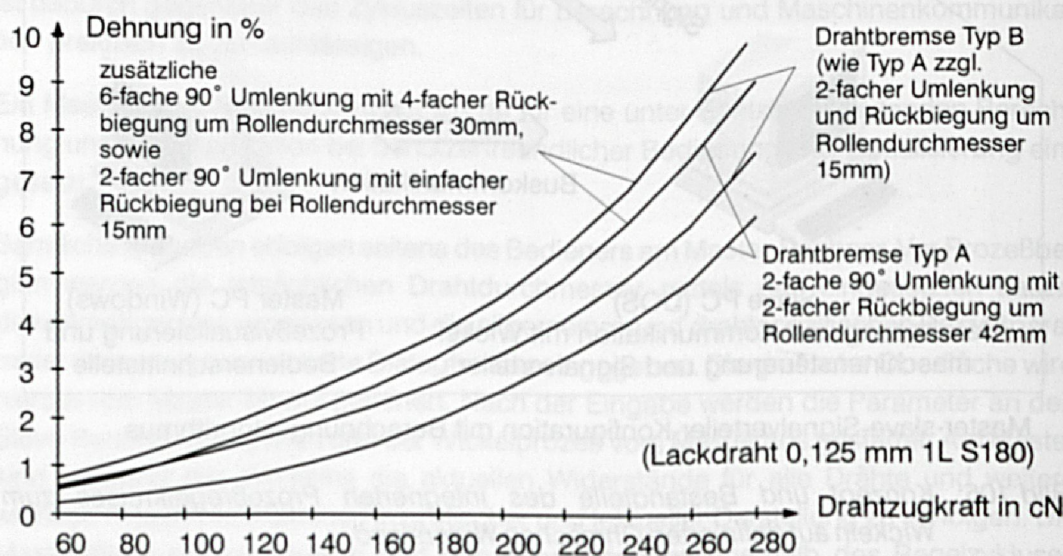


Bild 106: Zu berücksichtigender Einfluß der Biegeumformung an Drahtzugreglern und an Drahtführungselementen auf das Dehnungsverhalten von Drähten



**Eingabe allgemeiner Prozessparameter**

Anzahl der Spindeln:

Spulendwiderstand:

Sollwert	<input type="text" value="100.000000"/>	Ohm
Max. Abweichung	<input type="text" value="5.000000"/>	Ohm

Zugkräfte:

Max. Zugkraft	<input type="text" value="2.100000"/>	N
Min. Zugkraft	<input type="text" value="0.600000"/>	N
Sollzugkraft	<input type="text" value="1.600000"/>	N

Spulengeometrie:

Seitenlänge A	<input type="text" value="0.000000"/>	mm
Seitenlänge B	<input type="text" value="0.000000"/>	mm
Rund.radius	<input type="text" value="3.750000"/>	mm
Wickelbreite b0	<input type="text" value="12.700000"/>	mm

Sonstige Parameter:

Dichte Kupfer	<input type="text" value="8.960000"/>	kg/dm <sup>3</sup>
Querkontr.zahl	<input type="text" value="0.350000"/>	
Leitfähigkeit	<input type="text" value="58.800000"/>	m/(Ohm*mm <sup>2</sup> )

OK    Parameter speichern    Abbrechen

**Eingabe drahtspezifischer Prozessparameter**

Draht-Nr.  auf ab

Drahtd. gemessen  mm

Drahtd. laut Herst.  mm

Obere Grenze  mm

Untere Grenze  mm

Leiterd. laut Herst.  mm

Obere Grenze  mm

Untere Grenze  mm

Widerst./Meter  Ohm/m

OK    Parameter speichern    Abbrechen

Bild 107: Eingabefenster für prozeßspezifische Kenngrößen



Nach dem Start des Prozesses vom Master-Rechner aus erfolgt die permanente Errechnung des aktuellen Ohmschen Widerstandes für die jeweiligen Spindeln mit der Differenzbildung zum gemeinsamen Mittelwert. Auftretende Abweichungen werden durch Korrektur der Drahtzugkraft und damit durch Reckung des nachfolgend verwickelten Drahtbereiches ausgeglichen. Die Spannweite, in der die Drahtzugkraft variieren darf, kann vom Bediener flexibel vorgewählt werden. Somit ist die Begrenzung der maximalen Dehnung des Drahtes auf einfache Art und Weise möglich.

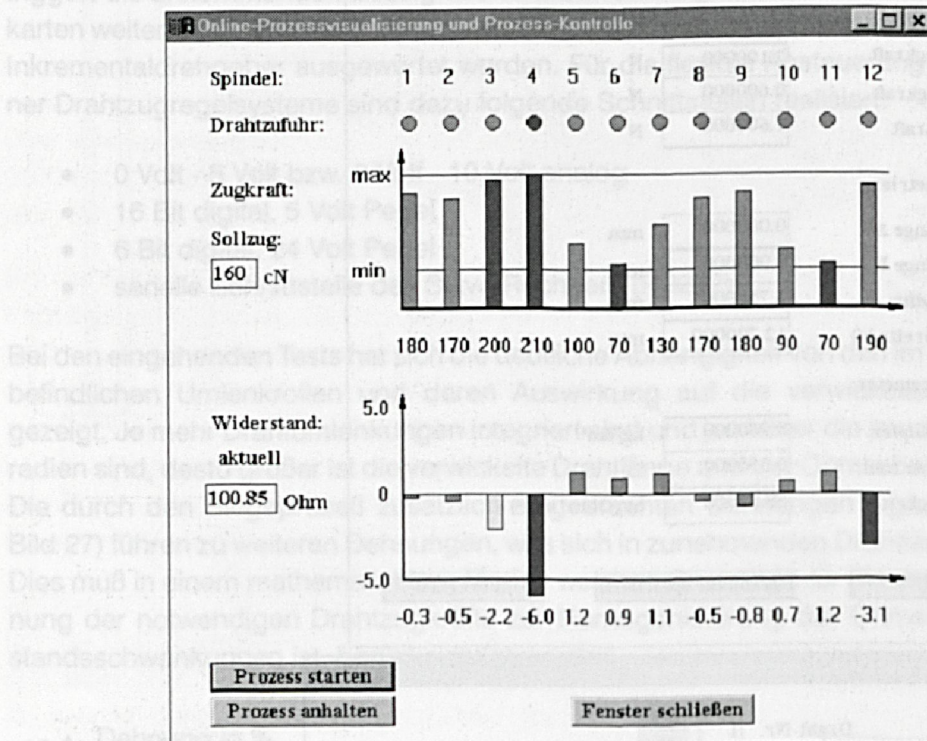


Bild 108: Prozeßvisualisierung am Master-Rechner während des Wickelprozesses

Simulationstests ergaben, daß die für die exemplarische Realisierung verwendeten Systemkomponenten

- Master PC 80486 mit 100 MHz, 16MB RAM,
- Slave PC 80486 mit 40 MHz, 16MB RAM und
- Signalverteiler mit Buskommunikation zum Slave PC

ausreichend sind, um die problemlose Steuerung des integrierten Prozeßregelkreises an einem komplexen Mehrspindelwickelsystem mit bis zu 24 Spindeln übernehmen zu können, ohne daß dabei mit Taktzeitproblemen zu rechnen ist. Dies ist unter anderem auf die geeignete Taskverteilung zurückzuführen.



## 8 Durchgängige CAD-CAM-Verfahrenskette zur rechnergestützten off-line Programmierung von NC-Wickelautomaten

Bei den traditionellen Fertigungsverfahren, wie Drehen oder Fräsen, werden NC- und CNC-Steuerungen seit über 30 Jahren eingesetzt. Hier sind rechnergestützte Programmiersysteme seit langem Stand der Technik /68/, /69/.

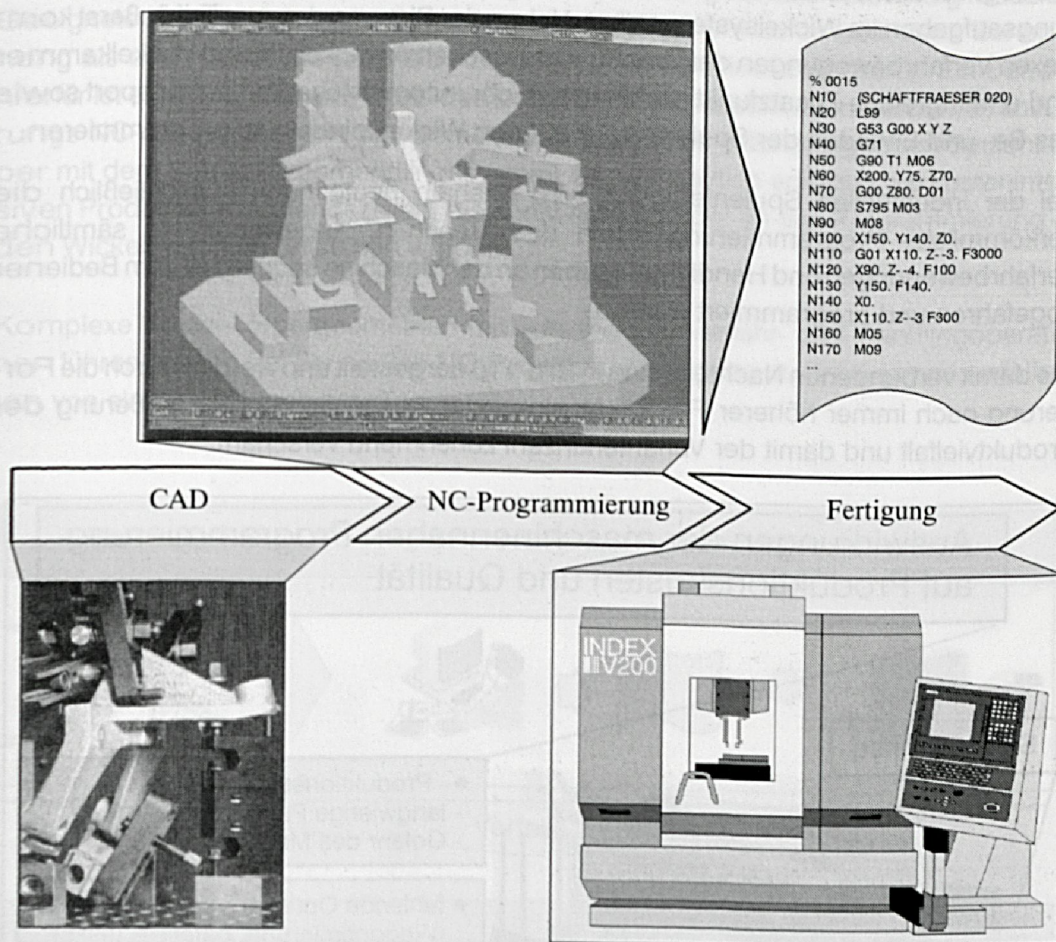


Bild 109: CAD-CAM-Kopplung in der spanenden Fertigung am Beispiel der Fräsbearbeitung

Ziel derartiger Systeme ist durch Minimierung der Maschinenstillstandszeiten eine Ertragssteigerung durch Erhöhung der Effizienz und Reduzierung der Kosten zu erreichen. Die stetige Weiterentwicklung von CNC-Steuerungen, seitens der Hersteller, führte zu einer Harmonisierung der verwendeten Steuerbefehle. Der überwiegende Teil der spanenden Werkzeugmaschinen nutzt einen allgemeingültigen NC-Kern. Standardisierte Postprozessoren, welche die maschinenspezifische Generierung der NC-Codes übernehmen, müssen meist nur noch in Nuancen auf die jeweilige Steuerung



angeglichen werden. Das vereinfacht die Umsetzung der, im Planungssystem erzeugten, allgemeinen Steuerworte in die für die jeweilige Maschinensteuerung lesbaren NC-Codes erheblich.

Dem gegenüber setzte die CNC-Durchdringung an Spulenwickelsystemen deutlich später ein. Rein mechanisch arbeitende Wickelsysteme sind erst seit ca. 10 Jahren nahezu vom Markt verdrängt /70/, /71/, /72/.

Das liegt vor allem an den sehr hohen Anforderungen bei den Handhabungs- und Fertigungsaufgaben im Wickelsystem selbst. Neben der Planung der zum Teil äußerst komplexen Verfahrbewegungen der Drahtführer zwischen Anwickelstift und Wickelkammer sind umfangreiche Zusatzfunktionen wie z.B. der automatische Spulentransport sowie das Be- und Entladen der Spulenkörper auf den Wickelspindeln zu programmieren.

Bei der industriellen Spulenfertigung wird deshalb heute noch ausschließlich die herkömmliche Programmierung durch das "Teach-in" angewandt, wo sämtliche Verfahrbewegungen und Handlingaufgaben an der Maschine sequentiell vom Bediener abgefahren und programmiert werden.

Die damit verbundenen Nachteile sind in Bild 110 dargestellt und werden durch die Forderung nach immer höherer Flexibilität, sinkenden Losgrößen bei Vergrößerung der Produktvielfalt und damit der Variantenanzahl zunehmend verschärft.

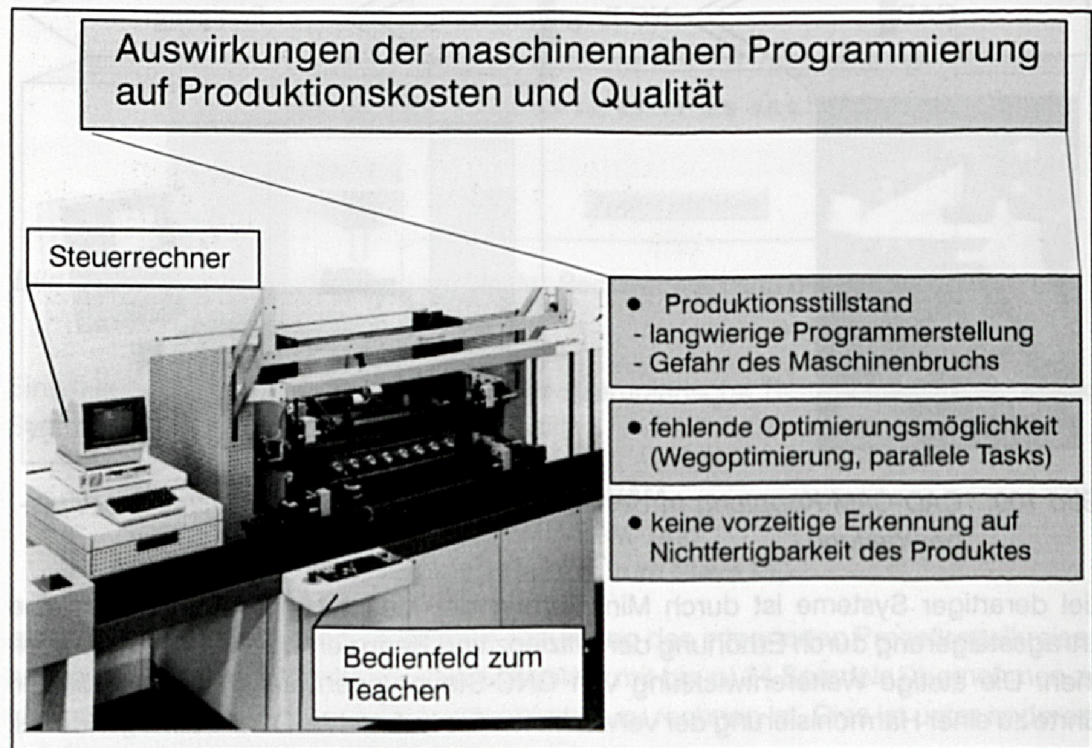


Bild 110: On-line Programmerzeugung am Wickelsystem und damit verbundene Defizite

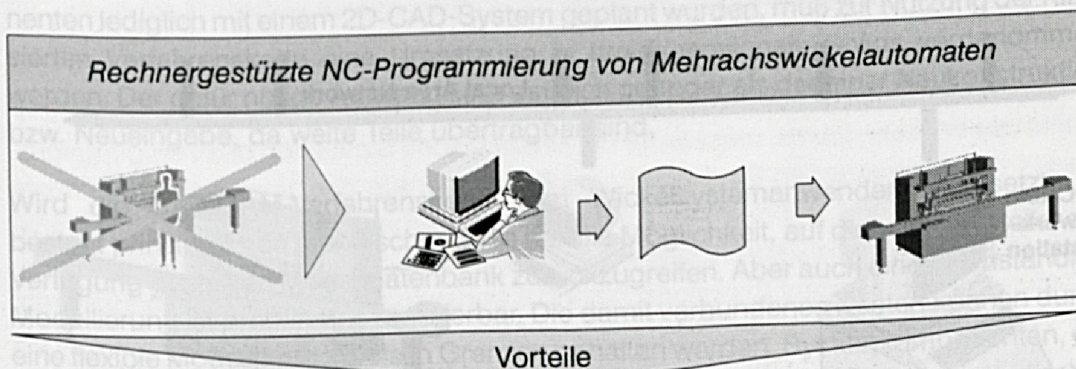


## 8.1 Ziele der off-line Programmierung von Wickelautomaten

Mit Hilfe einer rechnergestützten Wickel-NC-Programmgenerierung ergeben sich zahlreiche Vorteile:

Durch automatisierte Bahnplanungsalgorithmen und Simulation können fehler- und deshalb kollisionsfreie NC-Programme erzeugt werden. Damit ist die sonst erhebliche Gefahr von Kollisionsfahrten bei der Programmerstellung nahezu vollständig reduziert. Geeignete Tools erlauben die Taktzeitoptimierung, sowohl durch optimierte Bahnplanung als auch durch die parallele Abarbeitung unterschiedlicher Tasks. Ein Beispiel hierfür ist einerseits das Anwickeln des Drahtes um den Anschlußpin mit dem Drahtführungs-NC-Achssystem und andererseits das Greifen der nächstfolgenden Spulenkörper mit dem Spulenkörperhandlingssystem. Und schließlich entfallen die kostenintensiven Produktionsstillstandszeiten, die sonst aufgrund der on-line Programmierung an den Wickelsystemen entstehen würden.

Komplexe Spulenkörpergeometrien mit aufwendigen Verfah- und Handlingoperationen führen bislang bei der on-line-NC-Programmerzeugung zu Produktionsausfallzeiten von einem oder mehreren Tagen /73/.



- ☐ fehlerfreie NC-Programme durch automatisierte Bahnplanung und Simulation
- ☐ kein Maschinenbruch durch Kollisionsfahrten bei Programmerstellung
- ☐ Taktzeitoptimierung
- ☐ keine Maschinenstillstandszeiten während der Programmerzeugung

Bild 111: Nutzen der rechnergestützten off-line Programmierung von NC-Wickelautomaten



Ziel einer durchgängigen CAD-CAM-Verfahrenskette für NC-Wickelautomaten ist deshalb die maschinenferne Erzeugung optimierter und fehlerfreier NC-Codes zur Ablaufsteuerung komplexer Wickelsysteme.

## 8.2 Voraussetzung einer durchgängigen CAD-CAM-Kopplung

Ein im Konstruktions- /Planungsbereich integriertes System zur off-line Programmierung setzt neben einer leistungsfähigen Rechnerumgebung auch geeignete Softwaresysteme voraus, um den gesamten Fertigungsvorgang am System planen, simulieren und optimieren zu können.

### 8.2.1 Anforderungen an das CAD-System

Für die umfangreiche Bahnplanung mit einer Kollisionskontrolle ist eine volle 3D-Volumenfunktionalität des CAD-Systems erforderlich. Die visuelle Kollisionserkennung durch den Planer setzt die dreidimensionale Darstellung des Fertigungsprozesses voraus. Der Beobachtungspunkt muß während des Simulationslaufes flexibel und einfach verändert werden können, um eventuelle Kollisionen bei den zum Teil äußerst komplexen Verfahroperationen detektieren zu können. Eine rechnergestützte, automatisierte Kollisionsüberprüfung und -erkennung setzt darüberhinaus einen leistungsfähigen Kinematiksimulator voraus [74].

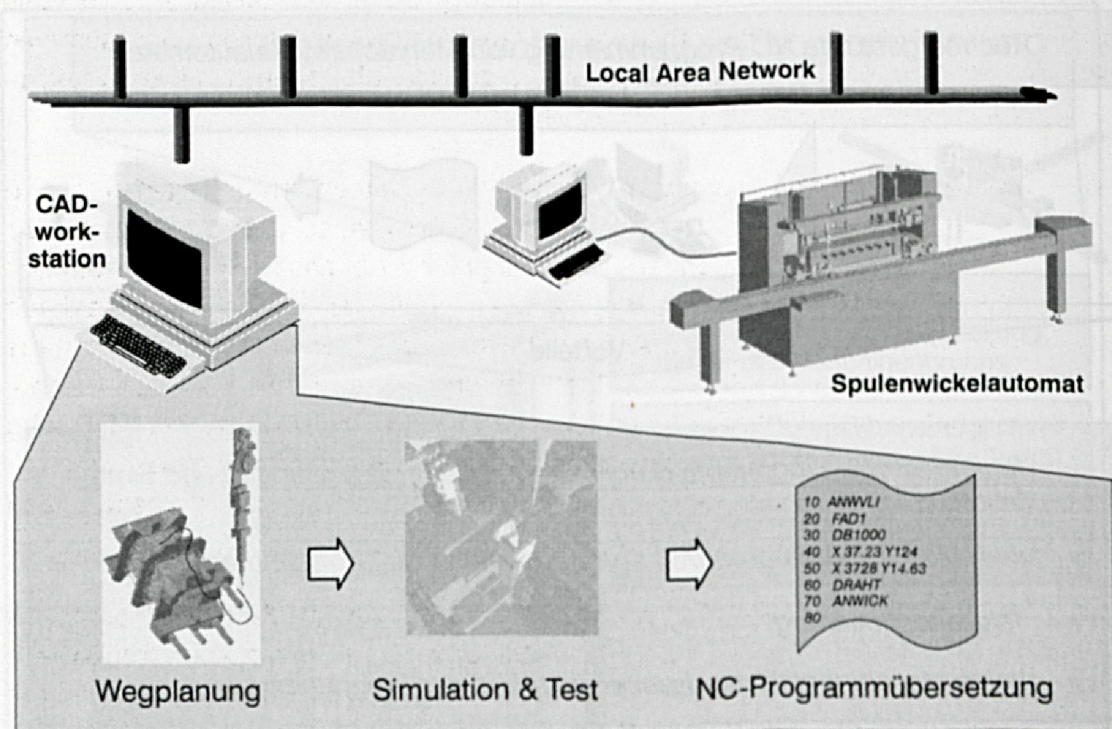


Bild 112: Verknüpfung leistungsfähiger Rechnersysteme aus Planungs- und Fertigungsebene mit Hilfe lokaler Netze



## 8.2.2 Modellierung der Wickelumgebung

Zunächst aber müssen für eine automatisierte Kollisionskontrolle Maschine, Werkzeuge und Spulenkörper als dreidimensionale Solids im CAD-System vorliegen. Dafür ist die vorherige Modellierung des Wickelsystems unumgänglich. Bei der Erzeugung des rechnerinternen Abbildes der realen Wickelumgebung muß auf eine äußerst exakte Übereinstimmung zwischen dem realen System und dem Modell geachtet werden. Andernfalls würde es erhebliche Probleme beim späteren Wickelprozeß mit sich bringen. Zu große Abbildungsabweichungen könnten zur Detektion von Kollisionen führen, die tatsächlich nicht existieren, und bei als fehlerfrei geplanten Bahnbewegungen kann es im realen Prozeß zu schwerwiegenden Kollisionen kommen.

Eine durchgängige CAD-CAM-Verfahrenskette kann sowohl sinnvoll beim Wickelsystemnutzer, d.h. im Wickelunternehmen als auch im besonderen beim Wickelmaschinenhersteller eingesetzt werden. Der Kunde, welcher beim Systemanbieter eine Maschine bzw. ein Komplettsystem ordert, übergibt diesem das zu fertigende Produkt bzw. die Produktpalette. Der Hersteller hat dann die dafür notwendigen NC-Programme zu erzeugen.

Wickelmaschinensystemanbieter setzen heute überwiegend CAD-Arbeitsplätze zur Konstruktion ihrer Maschinen und ihrer Zubehörpalette ein. Sofern die Systemkomponenten lediglich mit einem 2D-CAD-System geplant wurden, muß zur Nutzung der realisierten Verfahrenskette eine Umsetzung in dreidimensionale Solids vorgenommen werden. Der dafür nötige Aufwand liegt deutlich geringer als der einer Neukonstruktion bzw. Neueingabe, da weite Teile übertragbar sind.

Wird die CAD-CAM-Verfahrenskette vom Wickelsystemanwender eingesetzt, so besteht prinzipiell von technischer Seite her die Möglichkeit, auf die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Modelldatenbank zurückzugreifen. Aber auch eine eigenständige Modellierung ist problemlos realisierbar. Die damit verbundenen Kosten können durch eine flexible Modellierungstiefe in Grenzen gehalten werden. Systemkomponenten, die nicht in die Kollisionsbetrachtungen aufgenommen werden müssen, weil sie diesbezüglich unkritisch sind, können dementsprechend grob modelliert werden. Typische Beispiele hierfür sind Teile des Grundgestells, mit denen zu keinem Zeitpunkt der Fertigung Kollisionen auftreten können. Kollisionskritische Elemente müssen, entsprechend ihrer geometrischen Form, exakter abgebildet werden.

Sämtliche Komponenten des Wickelsystems werden in einer Maschinendatenbank abgelegt, auf die im weiteren vom Planungs- und Simulationssystem zugegriffen werden kann. Jedes neue Produkt erfordert eine angepaßte Spulenkörperaufnahme für die Wickelspindeln und auf die Spulenkörperform zugeschnittene Handlingelemente, wie z.B. Greifer. Diese sind im produktspezifischen Bereich der Datenbank zusammengefaßt. Im allgemeinen Teil der Datenbank sind die produktunabhängigen Elemente des Gesamtsystems (Gestell, Drahtbremssysteme etc.) hinterlegt /75/.



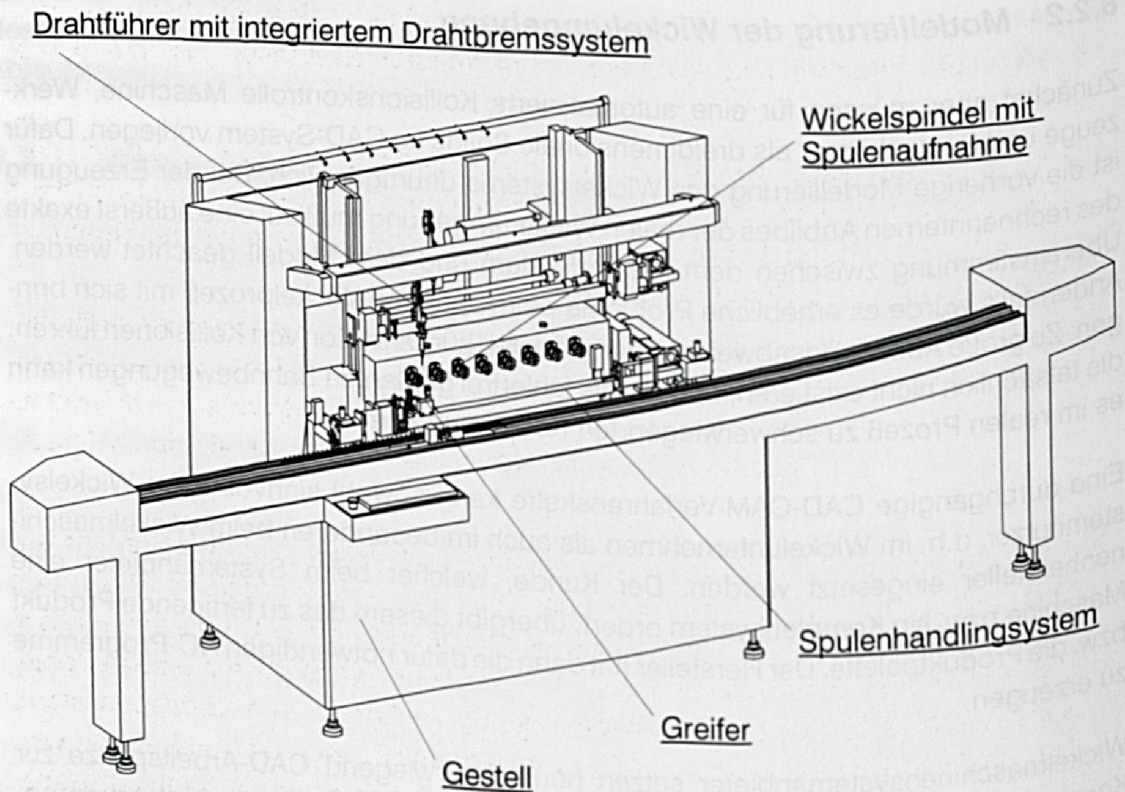


Bild 113: Grafisches Abbild des modellierten Wickelsystems im CAD-System

Neben dem geometrisch exakten Abbild, insbesondere der kollisionsträchtigen Elemente des Wickelsystems, müssen für die kinematische Simulation des Fertigungsprozesses die kinematischen Bindungen und Freiheitsgrade der beweglichen Elemente nachgebildet werden. Bei dem hier, für die exemplarische Realisierung der Verfahrenskette, eingesetzten und damit notwendigerweise auch modellierten 8-Spindelwickelautomaten waren insgesamt 2 rotatorische und 6 translatorische Achsen zu modellieren. Der verwendete Kinematiksimulator gestattet die Nachbildung von Bewegungen mit bis zu sechs Freiheitsgraden /76/. Das Wickelsystem setzt sich aus mehreren Einzelsystemen, sogenannten *Devices*, zusammen:

- Grundelement und Rumpf des Wickelautomaten ist das *Gestell*; es besteht ausnahmslos aus unbeweglichen Teilen.
- Das *Schiffchen* dient zur Bereitstellung der leeren Spulenkörper und zum Abtransport der bewickelten Spulen, es wird am Wickelautomaten von einem Transportband bewegt. Das Schiffchen wird, mittels eines Klinkenvorschubs, verfahren und muß daher eine eigenständige Beweglichkeit erhalten.
- Die acht synchron angetriebenen Wickelspindeln werden als unabhängige Rotationsachse modelliert (*Drehspindel*).



- Das Drahtführungssystem (Device *oberer Balken*) setzt sich aus drei orthogonal zueinander angeordneten, translatorisch wirkenden NC-Achsen zusammen. Dies erfordert die Unterteilung in drei Subsysteme:

Device *ObenZ1* ermöglicht Verschiebungen in Z-Richtung, *ObenY2* Verschiebungen in Y-Richtung und Device *ObenX3* Verschiebungen in X-Richtung. Das Drahtführungssystem erlaubt die Aufnahme, das Wechseln und Bewegen des Fadenführers mit integriertem Drahtbremssystem.

- Der Fadenführer selbst besteht aus zwei Teilen, dem in sich unbeweglichen Grundelement Faden1 und dem Element Faden2. Letzteres kann für Anwickeloperationen pneumatisch abgesenkt und angehoben werden. Das Grundelement beinhaltet die integrierte Pneumatik-Drahtbremse, deren Drahtzugkraft durch Druckveränderung eingestellt wird.

- Das Spulenkörperhandlingsystem (Device *unterer Balken*) mit integriertem Anwickelwerkzeug und Greifern setzt sich aus drei translatorischen NC-Achsen (*UntenZ1*, *UntenY2* und *UntenX3*) und einer pneumatischen Drehachse (Device *Drehträger*) zusammen. Diese erlaubt das Schwenken des gesamten Beladebalkens um  $90^\circ$  zur Ablage und Aufnahme der Spulenkörper vom Transportsystem. Die Greifer (*Greiferl*, *Greiferr*) und das Anwickelwerkzeug (*Schneide*) sind wiederum in bewegliche (*Greiferarml*, *Greiferarmr*, *Schneidkopfmesser*) und unbewegliche Elemente (*Greifer*, *Schneidkopfhalter*) untergliedert.

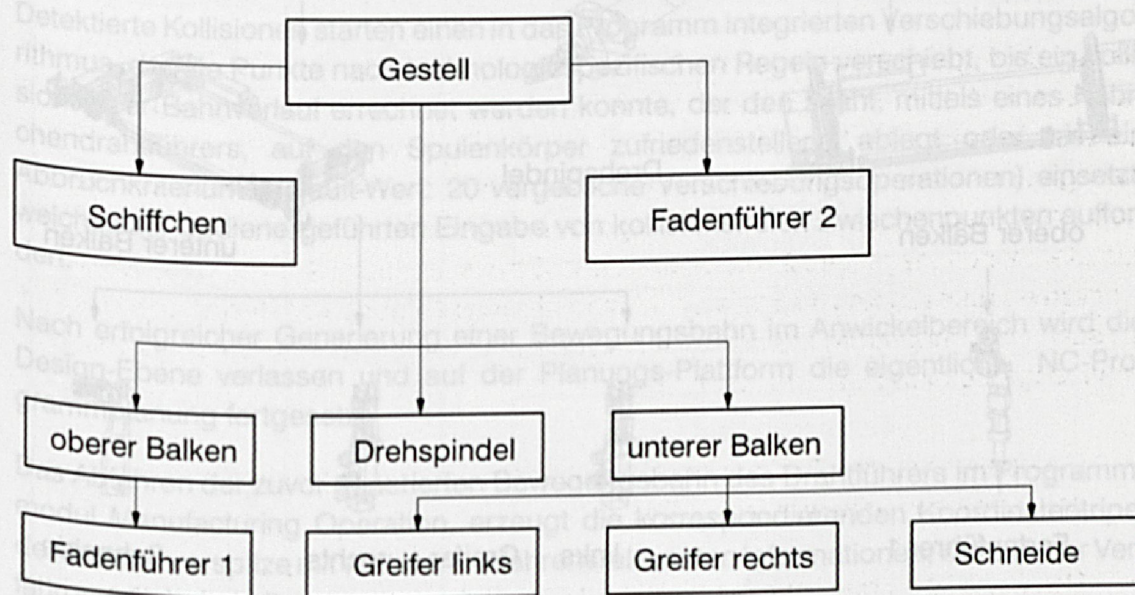


Bild 114: Segmentstruktur des modellierten NC-Wickelautomaten

Die Definition der einzelnen Maschinensegmente wird durch Eingabe von Ausgangspunkt, maximaler und minimaler Auslenkung, sowie den maximalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bestimmt.



Die Festlegung der kinematischen Bindungen und Freiheiten der Devices geschieht über konstante oder variable Übergänge, die entweder Verschiebungen oder Rotationen darstellen.

Auf diese Art und Weise kann jedes, als dreidimensionales Volumenmodell im CAD-System, abgebildete Wickelsystem um die notwendigen kinematischen Informationen erweitert und für spätere Simulationsläufe vorbereitet werden.

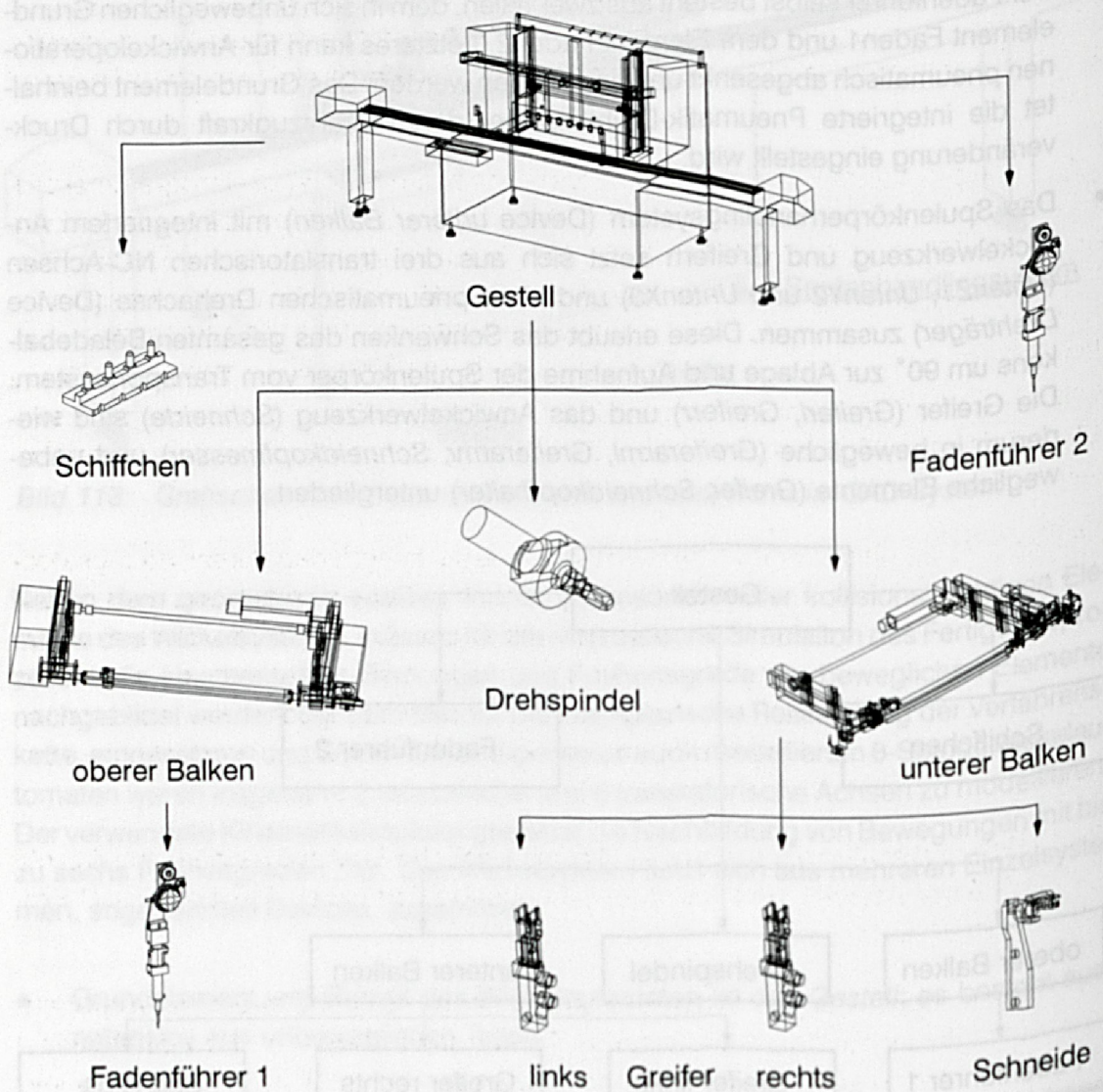


Bild 115: Deviceelemente des eingesetzten Mehrachsmehrspindelwickelautomaten



### 8.3 Realisierung des Konzeptes

Das nun vorliegende rechnerinterne Abbild des Wickelsystems stellt die notwendige Basis für die durchgängige Planung des Wickelvorganges am CAD-System dar.

Eine weitere Voraussetzung ist die Existenz des dreidimensionalen, volumenorientierten Abbildes des Spulenkörpers. Hierzu wurde ein Programm (SPULENKÖRPERERZEUGUNG vgl. Bild 116) zur interaktiven Erzeugung des Spulenkörpers aus parametrisierten Geometrieprimitiven realisiert. Eine vorangestellte Analyse am Markt erhältlicher Spulenkörper ergab die Ableitung der, für eine CAD-gestützte Konstruktion, notwendigen Geometriegrundelemente, welche in strukturierten Konstruktionsmakros integriert wurden.

Den ersten Schritt, im Rahmen der rechnergestützten off-line Wickelprogrammerzeugung, stellt die flexible Modellierung des Drahtes auf der Oberfläche des Spulenkörpers dar (DRAHTVERLAUFGENERIERUNG). Der Drahtverlauf im Anwickelbereich, zwischen Anschlußpin und Wickelkammer, erlaubt die Ableitung der dazu korrespondierenden Verfahrensbewegungen des Drahtführers (VERSATZSPLINEERZEUGUNG), um den Draht in der gewünschten Form auf dem Spulenkörper ablegen zu können. Diese Verfahrensbewegungen werden im Anschluß auf mögliche Kollisionen zwischen den beteiligten Elementen (Spulenkörper, Drahtführer und weiteren Maschinenkomponenten) untersucht.

Detektierte Kollisionen starten einen in das Programm integrierten Verschiebungsalgorithmus, der die Punkte nach technologiespezifischen Regeln verschiebt, bis ein kollisionsfreier Bahnverlauf errechnet werden konnte, der den Draht, mittels eines Röhrendrahtführers, auf den Spulenkörper zufriedenstellend ablegt oder bis ein Abbruchkriterium (default-Wert: 20 vergebliche Verschiebungsoperationen) einsetzt, welches zur bedienergeführten Eingabe von kollisionsfreien Zwischenpunkten auffordert.

Nach erfolgreicher Generierung einer Bewegungsbahn im Anwickelbereich wird die Design-Ebene verlassen und auf der Planungs-Plattform die eigentliche NC-Programmplanung fortgesetzt.

Das Abfahren der zuvor generierten Bewegungsbahn des Drahtführers im Programmmodul Manufacturing Operation, erzeugt die korrespondierenden Koordinatentripel der Drahtführerspitze mit weiteren verfahrensrelevanten Informationen, wie z.B. der Verfahrensgeschwindigkeit.



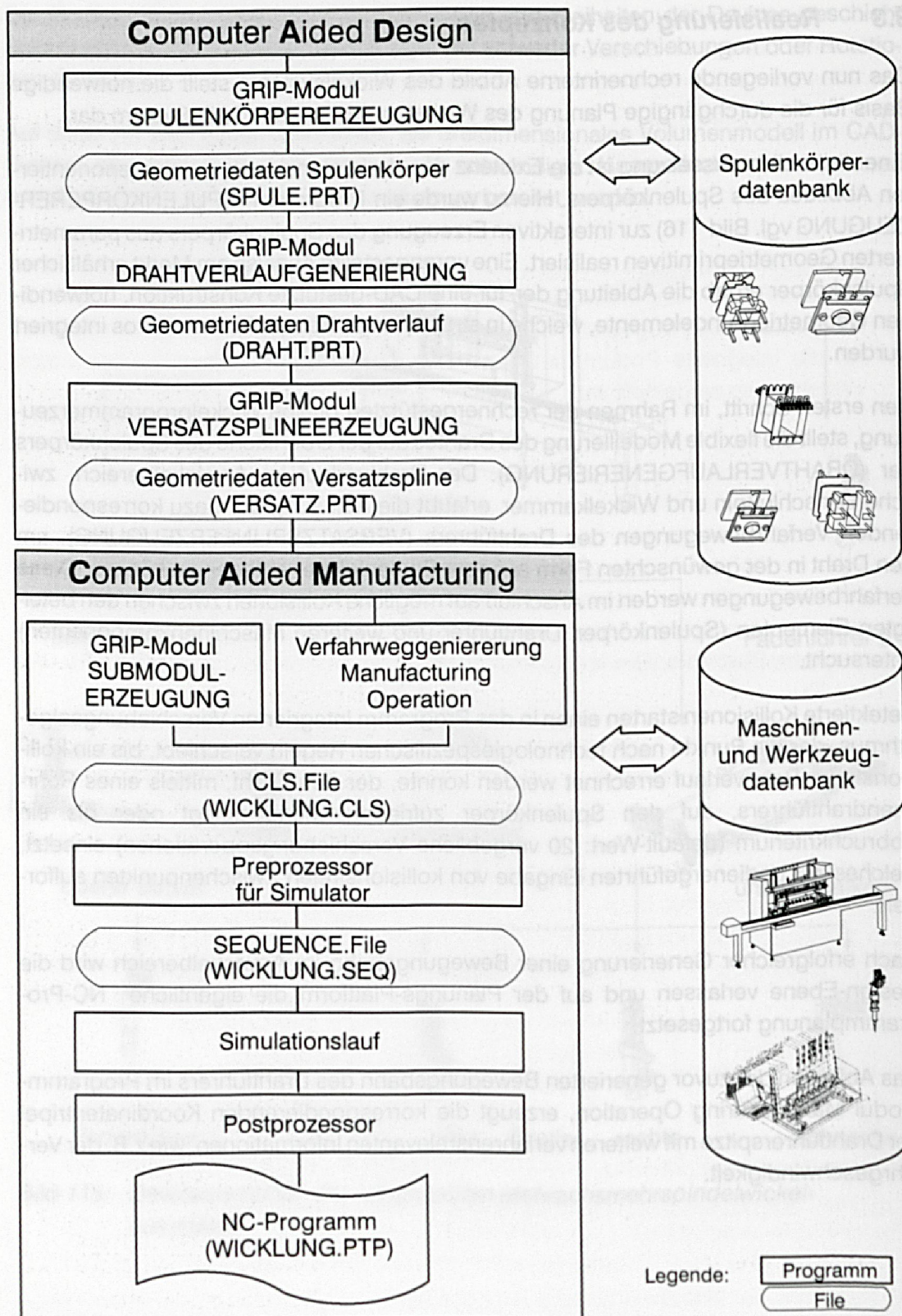


Bild 116: Programm- und Filestruktur der realisierten CAD-CAM-Verfahrenskette



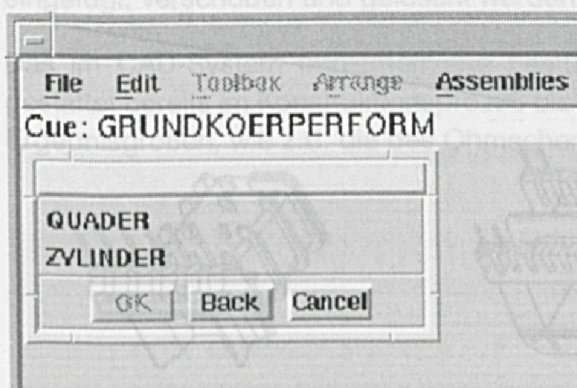
Daneben können, mit Hilfe des eigens dafür realisierten Submodulgenerators, die für die Wickeltechnik notwendigen Befehlsfolgen interaktiv erzeugt werden. Sämtliche Informationen werden in einem gemeinsamen Informationsfile (cutter location source file) zusammengefaßt. Es bildet die Grundlage für die anschließende Simulation und die abschließende Generierung der maschinenspezifischen NC-Codes. Für den Simulationslauf werden die dazu notwendigen Informationen mit Hilfe eines Preprozessors in ein für den Simulator ausführbares File (z.B. Wicklung.seq) übersetzt. Der Postprozessor extrahiert aus dem cutter-location-source-file die relevanten Informationen und setzt sie in ein für den Wickelautomaten ausführbares NC-File um.

### 8.3.1 Problemorientierte Spulenkörpergenerierung

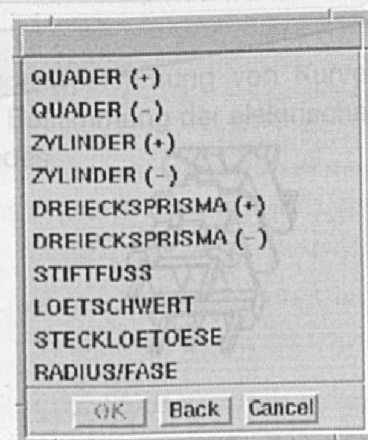
Technologiespezifische Konstruktionsmakros erlauben, im realisierten Softwaremodul SPULENKÖRPERERZEUGUNG durch Addition und Subtraktion einfacher Geometrieprimitive, den zielgerichteten, flexiblen Aufbau beliebiger Spulenkörpergeometrien als dreidimensionale Volumenkörper.

In der Wickeltechnik ständig wiederkehrende Geometrielemente, wie Grundkörper rund oder eckig, Flansch, Anschlußstift, Stecklötöse etc. und die Spulenkörpergrundformen (Quader- und Zylinderspule) werden hierbei in parametrisierter Form aufgebaut und miteinander verknüpft. Durch temporär erzeugte Hilfspunkte auf den Oberflächen des gerade modellierten Geometrieelementes ist eine effiziente und einfache Positionierung bzw. Verschiebung der nachfolgenden Teilkörpergeometrien möglich.

Das für die exemplarische Realisierung verwendete CAD-System "Unigraphics" gestattet problemlos die Erzeugung und Einbindung eigenständiger Konstruktionsprogramme unter GRIP (**GR**aphic **I**nteractive **P**rogramming). Es handelt sich um eine systemeigene Programmiersprache zur Einbettung von Graphikbefehlen in ein ausführbares, eigenständiges Programm /77/.



Grundkörpererzeugung



Körperermodifikation

Bild 117: Startmakros zur parametrisierten Spulenkörpergenerierung



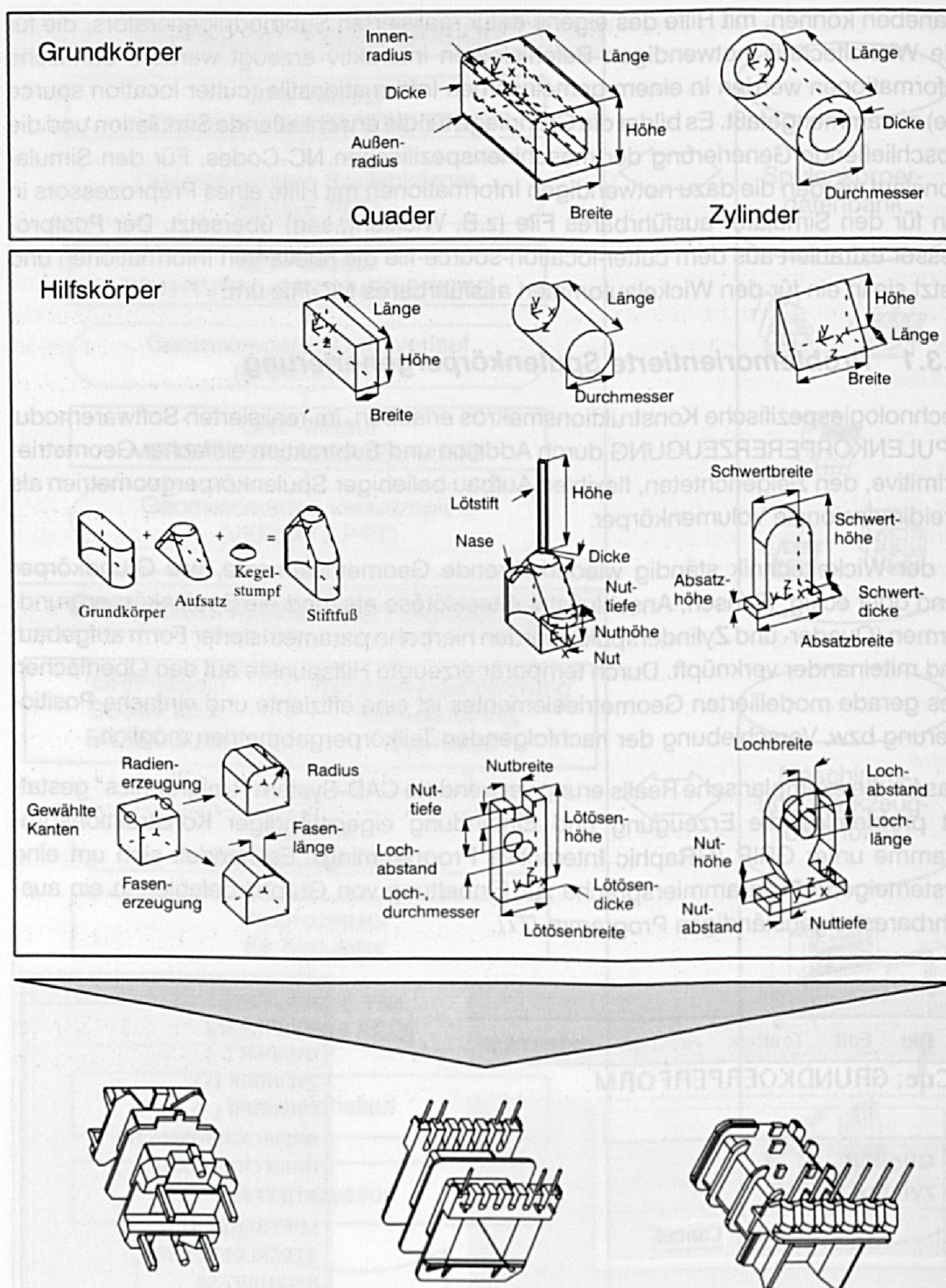


Bild 118: Flexible Spulenkörpergenerierung mit Hilfe parametrierter Geometrieprimitive



### 8.3.2 Drahtspline- und Drahtführerverfahrenwegerzeugung

Auf den so in einfacher Art und Weise modellierten Spulenkörper muß in einem weiteren Schritt der Drahtverlauf, wie er tatsächlich auf der Spulenoberfläche zum Liegen kommt, modelliert werden.

Dazu dient das entwickelte Softwareprogramm DRAHTVERLAUFSERZEUGUNG. Im Bereich des Wickelfensters wird hier der Draht auf der Oberfläche des Spulenkörpers, dem realen Prozeß entsprechend, in Form einer Schraubenlinie abgelegt, deren Steigung dem Vorschub des Drahtführers entspricht. Die dabei entstehenden Splinepunkte können - technologischen Regeln folgend - in Normalenrichtung der Spulenkörperoberfläche verschoben werden, so daß bei rechteckigen Körperquerschnitten das Auffederungsverhalten des Drahtes Berücksichtigung findet. Bei runden Spulenkörperformen erfolgt eine Normalenverschiebung lediglich um den halben Drahtdurchmesser, weshalb der Drahtquerschnitt stets außerhalb des Spulenkörpers liegt. Der Drahtschlauch, der dadurch entsteht, befindet sich exakt auf der Spulenkörperoberfläche und berührt diese linienförmig.

Der Drahtverlauf zwischen der Wickelkammer und dem Anschlußpin wird interaktiv erzeugt. Die relevanten Oberflächenelemente des Spulenkörpers werden mit Netzlinien versehen, deren Abstände vom Planer frei wählbar sind. Aus der Menge der so entstandenen Netzpunkte werden sequentiell jene ausgewählt, die den Drahtverlauf exakt repräsentieren. Nach orthogonaler Verschiebung werden diese Punkte mit der Drahtkurve aus der Wickelkammer verbunden. Diesem Schema folgend werden sämtliche Kurvenstücke zwischen Pin und Kammer erzeugt und liegen in Form eines verbundenen Splines im CAD-System vor.

Der flexible Programmaufbau erlaubt es dem Bediener, den Spline umfassend auch im nachhinein zu modifizieren. So können beliebig Wicklungen und einzelne Splinepunkte eingefügt, verschoben und gelöscht werden.

Das im CAD-System implementierte Feature der Längenbestimmung von Kurven gestattet bereits im Konstruktionsprozeß die treffsichere Bestimmung der elektrischen Ergebnisgrößen, wie z.B. die des Ohmschen Widerstandes.



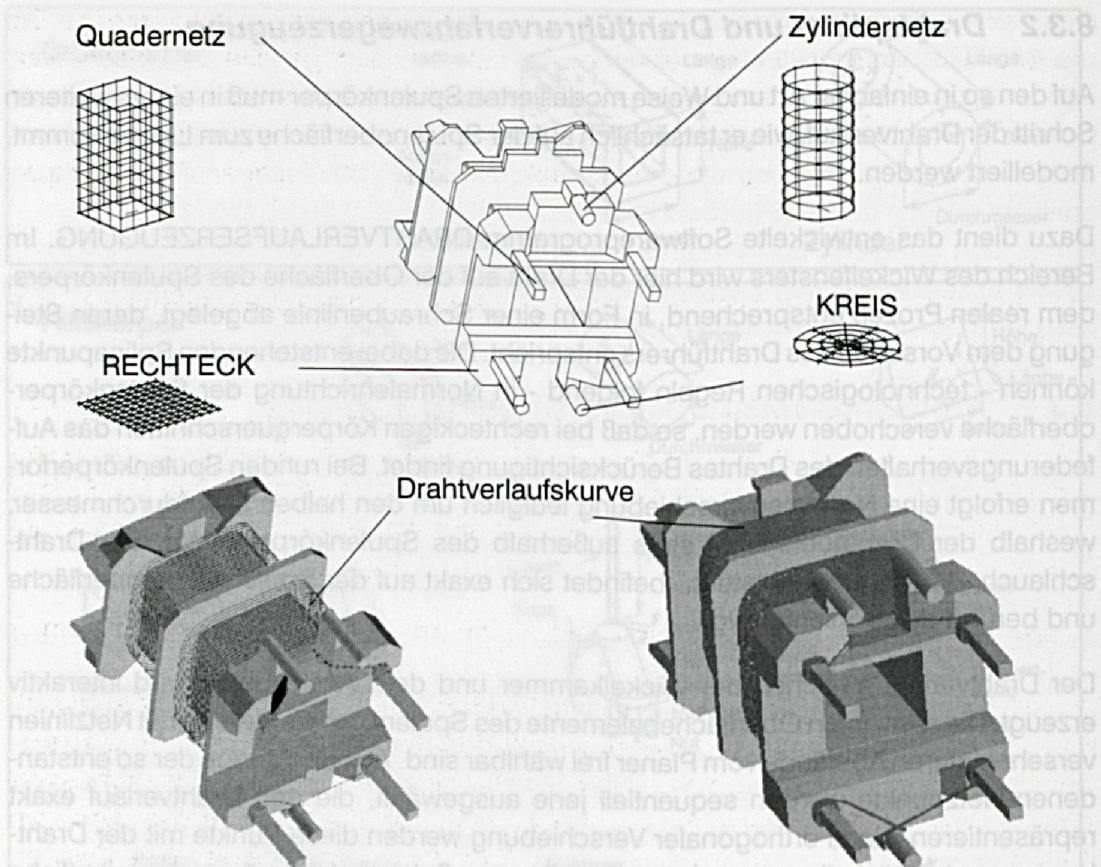


Bild 119: Flexible Konstruktion der Drahtverlaufskurve auf den Oberflächenelementen des Spulenkörpers

### Das Modul Versatzsplineerzeugung

Der eigentliche Wickelprozeß, nämlich das Bewickeln der Wickelkammer, wird durch einen einzigen NC-Befehl angestoßen. Die Erzeugung dieses Befehls stellt nicht das eigentliche Problem im Rahmen einer rechnergestützten NC-Programmerstellung dar. Wesentlich komplexer und fehlerträchtiger ist die Planung der Drahtführerbewegungen vom Anschlußpin in die Wickelkammer hinein und nach erfolgtem Wickeln wieder heraus zum nächsten Anschlußpin.

Für diesen überaus komplexen Vorgang wurde das Modul Versatzsplineerzeugung aufgebaut, welches die Planung der Drahtführerbewegungen ebenfalls automatisiert am Rechnersystem durchführt.

Aus dem Gesamtspline des Drahtverlaufes wird die relevante Raumkurve zwischen Anschlußpin und Wickelkammer ausgewählt. Ein anschließender Algorithmus verschiebt die Raumkurve vektoriell. Die Vektorlänge und die Anteile der Verschiebung in tangentialer, normaler (bzgl. Drahtsplines) und in senkrechter Richtung (bzgl. des Maschinenkoordinatensystems) können flexibel, seitens des Bedieners, gewählt werden. Die so



entstandene Raumkurve repräsentiert die Bewegungsbahn der Drahtführerspitze. Die im System voreingestellten Defaultwerte zur Transformation generieren typische Verschiebungsgrößen zur Erzeugung weitgehend kollisionsfreier Versatzsplinekurven an einer Vielzahl unterschiedlicher Spulenkörper, wobei die letztendliche Kollisionskontrolle für jedes Verfahrprogramm erneut, mit Hilfe des nachfolgenden Tools, erfolgen muß.

### **Automatische Kollisionsdetektions- und Korrekturalgorithmen im Anwickelbereich**

Das integrierte Kollisionserkennungs- und Kollisionsvermeidungsmodul detektiert die dabei auftretende Kollisionen zwischen Drahtführer, Draht und Spulenkörper und versucht bei gefundenen Kollisionen die Bahnkurve so zu verändern, daß der Drahtführer den Draht störungsfrei in der gewünschten Art und Weise auf den Spulenkörper abwickelt.

Zu den einzelnen Schritten des Kollisionserkennungs- und -vermeidungsalgorithmus:

Zunächst wird der erste Splinepunkt dahingehend untersucht, ob er durch die automatisierte Verschiebung innerhalb oder außerhalb des Spulenkörpers liegt. Falls er sich innerhalb befindet, muß er vom Bediener interaktiv aus dem Spulenkörper heraus verschoben werden. Im weiteren prüft das Programm, ob die Vektoren der folgenden Punkte in den Spulenkörpersolid eindringen. Trifft das zu, so stellt dies eine Kollision zwischen Spulenkörper und Drahtführerspitze dar und die dafür verantwortlichen Splinepunkte werden im Raum so nach außen transformiert, daß sie mindestens um den Drahtdurchmesser, zuzüglich einem vom Bediener wählbaren Abstandsmaß, versetzt werden. Nicht ursprünglich in den Spulenkörper verschobene Splinepunkte werden ebenfalls auf das erwähnte Sicherheitsmaß abgeprüft und gegebenenfalls in ihrer Lage verändert.

Die Transformation erfolgt in Richtung des kürzesten Abstandes zwischen dem Punkt und der Spulenkörperteiloberfläche. In zu engen parallelen Spalten, die keine gültige Punktplatzierung erlauben, erfolgt anschließend eine vertikale Verschiebung aus dem Spalt heraus.

Nach einer zu Beginn des Programmlaufs frei wählbaren Anzahl von Rechendurchläufen bricht das Optimierungstool die Punktverschiebung ab, sofern nicht in der Zwischenzeit ein alternativer Raumpunkt gefunden werden konnte, der kollisionsfrei anzufahren ist. In diesem Fall muß der Bediener diesen Punkt von Hand dem System vorgeben. Nach Abarbeitung sämtlicher Stützpunkte des Splines erhält man eine Raumkurve, die zu keinem Zeitpunkt in den Spulenkörper eindringt. Das ist ein wichtiges Kriterium für die Kollisionsfreiheit zwischen Drahtführer und Spulenkörper. Im nächsten Schritt wird der gesamte Drahtführer auf Kollision zum Spulenkörper hin untersucht. Das rechnerinterne Ersatzmodell eines Röhrchendrahtführers ist ein Zylinder mit



den äußeren Abmessungen des Röhrchendrahtführers. Das sequentielle Abfahren der diskretisierten Bahnpunkte überprüft, ob Spulenkörper und Zylindersolid zu irgendeinem Zeitpunkt verschmelzen, was wiederum eine Kollision bedeuten würde. Ist dies der Fall werden die betroffenen Bahnpunkte so lange verschoben bis ein kollisionsfreier Weg gefunden wird oder das Abbruchkriterium zum Tragen kommt und der Punkt vom Bediener editiert werden muß.

Ferner wird eine Ebene aus den einzelnen Drahtverlaufssplinepunkten und geraden Strecken zu den korrespondierenden Versatzsplinepunkten aufgespannt. Das entspricht dem freien Biegeverlauf des Drahtes zwischen Drahtführerspitze und Drahtverlaufspunkt. Gerade im Feindrahtbereich, für den diese Verfahrenskette im speziellen entwickelt wurde, läßt sich die Biegelinie, die sich zwischen der Drahtführerspitze und dem korrespondierenden Drahtsplinepunkt einstellt, hinreichend genau als Gerade vereinfachend darstellen.

Diese aufgespannte Ebene darf zu keinem Zeitpunkt Elemente des Spulenkörpers schneiden, da das im realen Prozeß ein Verhaken des Drahtes am Verschneidungspunkt mit dem Spulenkörper zur Folge hätte, was wiederum einen undefinierten Drahtverlauf auf der Spulenkörperoberfläche mit sich bringt.

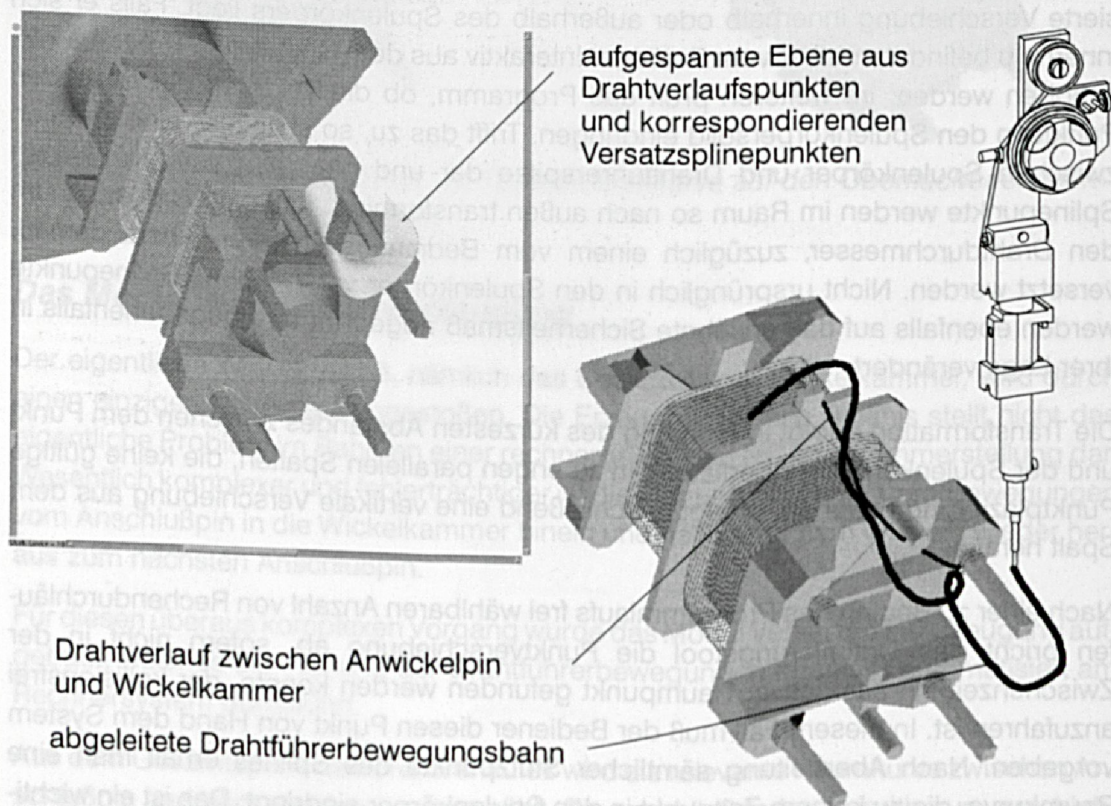


Bild 120: Erzeugung der Drahtführerbewegungsbahn aus dem Drahtverlauf zwischen Anschlußpin und Wickelkammer



### 8.3.3 Durchgängige Planung des gesamten Fertigungsablaufes

Die flexible off-line Programmierung von Wickelmaschinen erfordert zunächst die Beschreibung der notwendigen Arbeitsschritte in maschinenunabhängiger, textueller Art und Weise /75/.

In Anlehnung an bestehende CAD/CAM-Kopplungen (z.B. Frästechnik), werden diese Steuerbefehle in allgemeiner Form in einem sogenannten Cutter Location Source File (cls-file) abgelegt. Anschließend werden die darin enthaltenen Informationen entweder zur vollständigen Maschinensimulation herangezogen und/oder mit Hilfe eines Postprozessors in ein, von der jeweiligen Wickelmaschinensteuerung, lesbares und ausführbares NC-file übersetzt /78/, /79/, /80/.

Da es in DIN 66025 und 66215 noch keine technologiespezifischen Steuerworte für Wickelmaschinensteuerungen gibt, erfolgte eine Analyse der am Markt gängigen Wickelmaschinensteuerungen und daraus die Ableitung notwendiger Steuerworte für die Spulenwickeltechnik /81/.

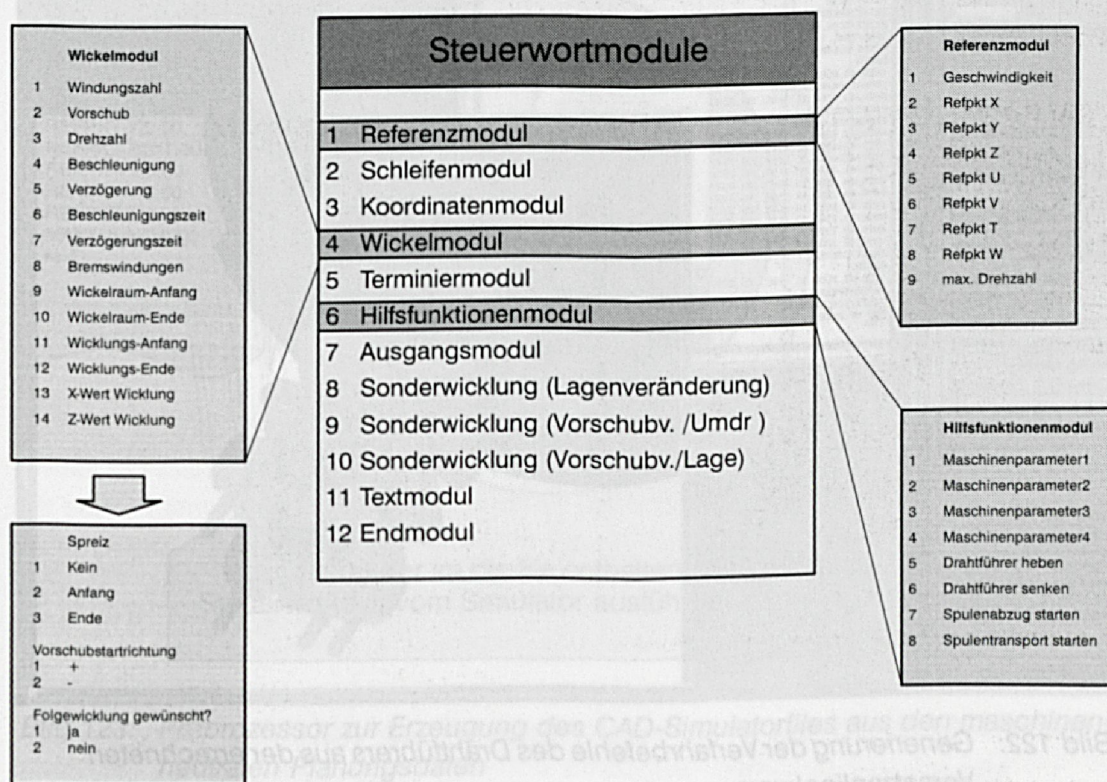


Bild 121: Flexible Wickel-NC-Programmierung mittels Steuerwortgenerator

Für die Erzeugung eines maschinenneutralen cls-files stehen nun zwölf Submodule in einem Generatorprogramm zur Verfügung, die sämtliche wickeltechnik-spezifischen Steuerworte in einer logisch strukturierten Form enthalten. Diese Module können in



beliebiger Reihenfolge und Kombination aneinandergesetzt werden und selbstverständlich auch mehrmals aufgerufen werden. Daneben werden hier die, bereits aus der Versatzsplinegenerierung, erzeugten Verfabrbewegungen des Drahtführers zwischen Anschlußpin und Wickelkammer integriert. Das Planungssystem erlaubt die flexible Wahl der Punktabstände zwischen den einzelnen Koordinatentripeln. Damit kann die Genauigkeit, mit der die geplante Kurve vom Wickelsystem angenähert abgefahren wird, bestimmt werden. Durch die fehlende Bahninterpolationsmöglichkeit der Wickelmaschinenpositionierachssysteme erfolgt das Verfahren zwischen zwei Koordinatentripeln stets geradlinig. Sanfte Kurvenübergänge können deshalb nur durch Erhöhung der Punktzahl und den damit verbundenen kurzen Geradenstücken dazwischen realisiert werden.

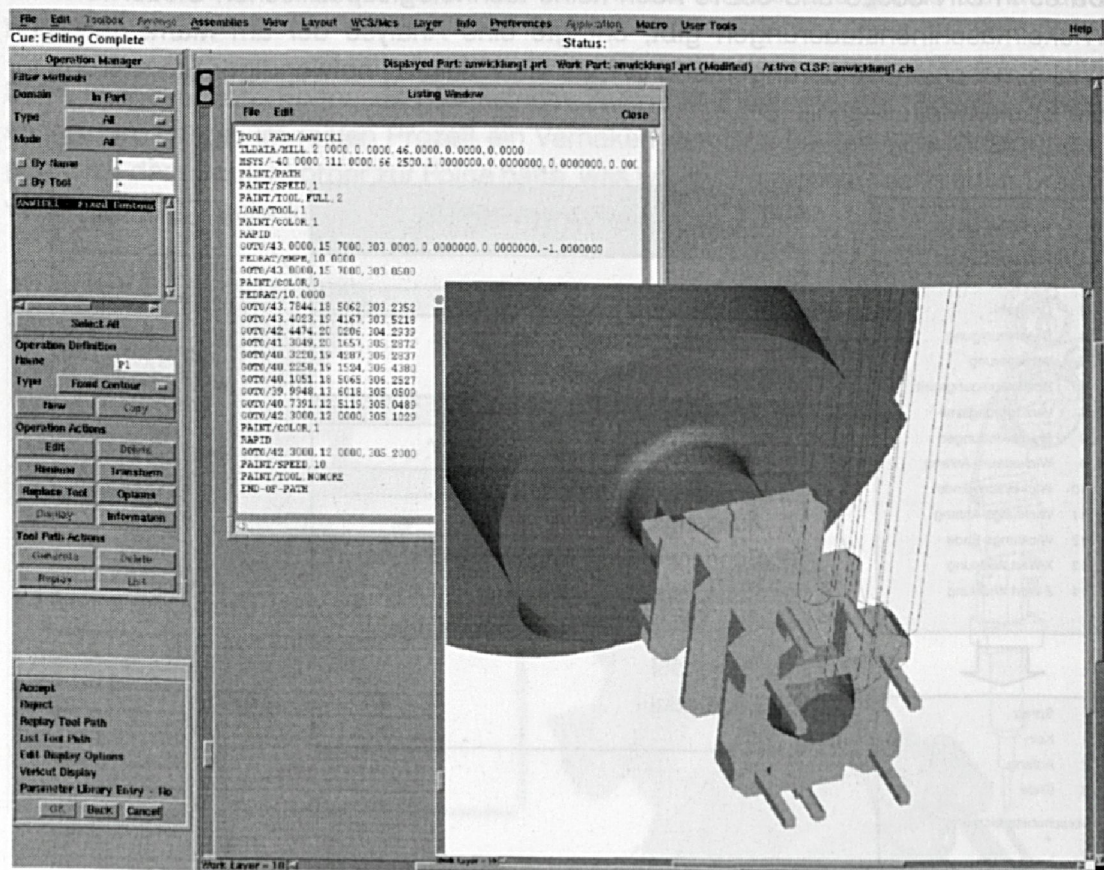


Bild 122: Generierung der Verfabrbefehle des Drahtführers aus der errechneten Versatzsplinekurve

Das so entstandene File enthält nun sämtliche Informationen, die zum Wickeln des Produktes notwendig sind. Es erlaubt aber auch die vorherige Simulation des Fertigungsverfahrenes um beispielsweise eine vollständige Kollisionsüberwachung mit allen im Wickelsystem befindlichen Elementen automatisiert durchführen zu können.



### 8.3.4 Vollständige Kollisionskontrolle und Simulation

Ein speziell für die Ablaufsimulation von Spulenwickelvorgängen unter Unigraphics entwickelter Preprozessor setzt dazu die nötigen Informationen aus dem cutter location source file in ein sogenanntes sequence-file um, das als Datengrundlage für den Simulator dient. Bei der Simulation können aus der Menge aller im System enthaltenen Objekte jene explizit ausgewählt werden, welche auf gegenseitige Kollision im Programmablauf untersucht werden sollen. Es müssen dadurch nicht alle Objekte auf gegenseitige Kollision überprüft werden, weil eine Kollision in manchen Fällen technisch nicht möglich ist. Darüberhinaus reduziert die flexible Auswahl der zu überprüfenden Elemente die Rechenzeit erheblich /82/.

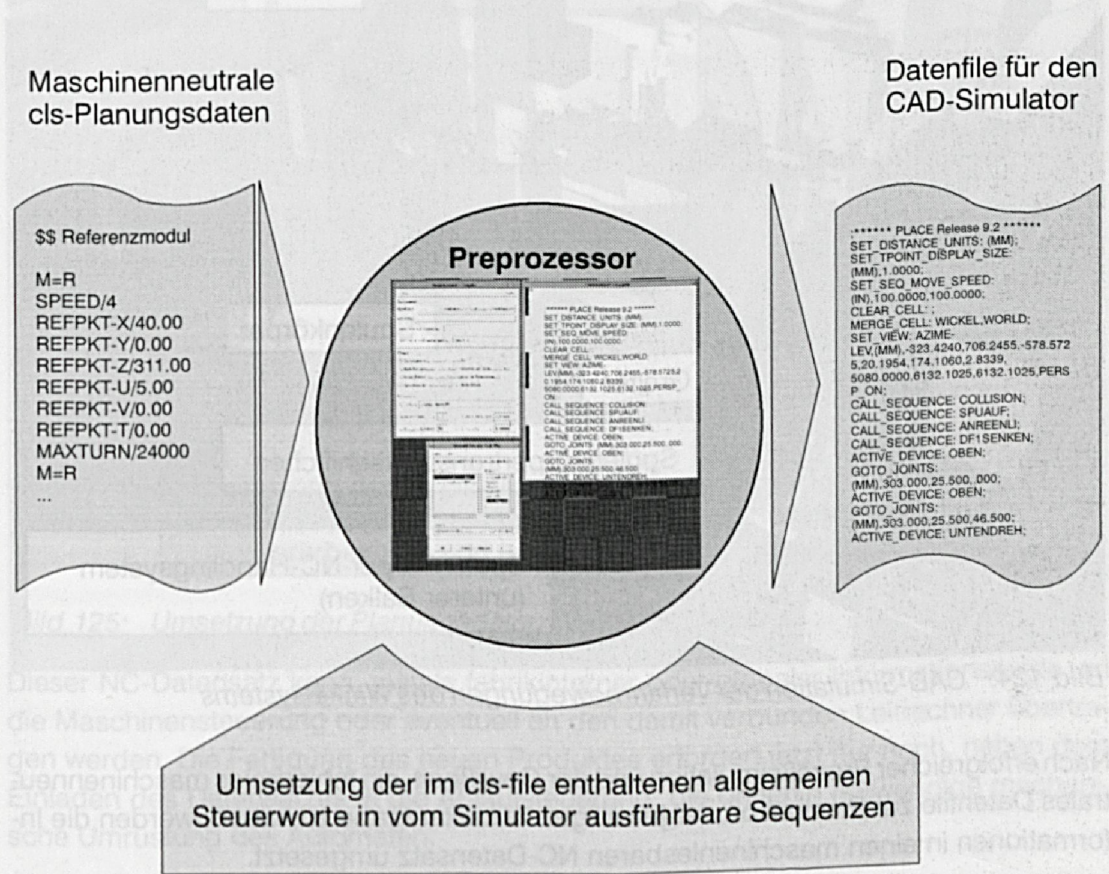


Bild 123: Preprozessor zur Erzeugung des CAD-Simulatorfiles aus den maschinenneutralen Planungsdaten

Für die Ablaufsimulation des gesamten Fertigungsprozesses ist, neben dem produkt-spezifischen cls-file und dem daraus abgeleiteten sequence-file, das rechnerinterne Abbild der Produktionseinrichtung erforderlich. Sowohl die geometrischen Abmessungen der Maschine als auch die kinematischen Bindungen müssen dabei möglichst exakt vorliegen, vgl. hierzu auch Kapitel 8.2.2.



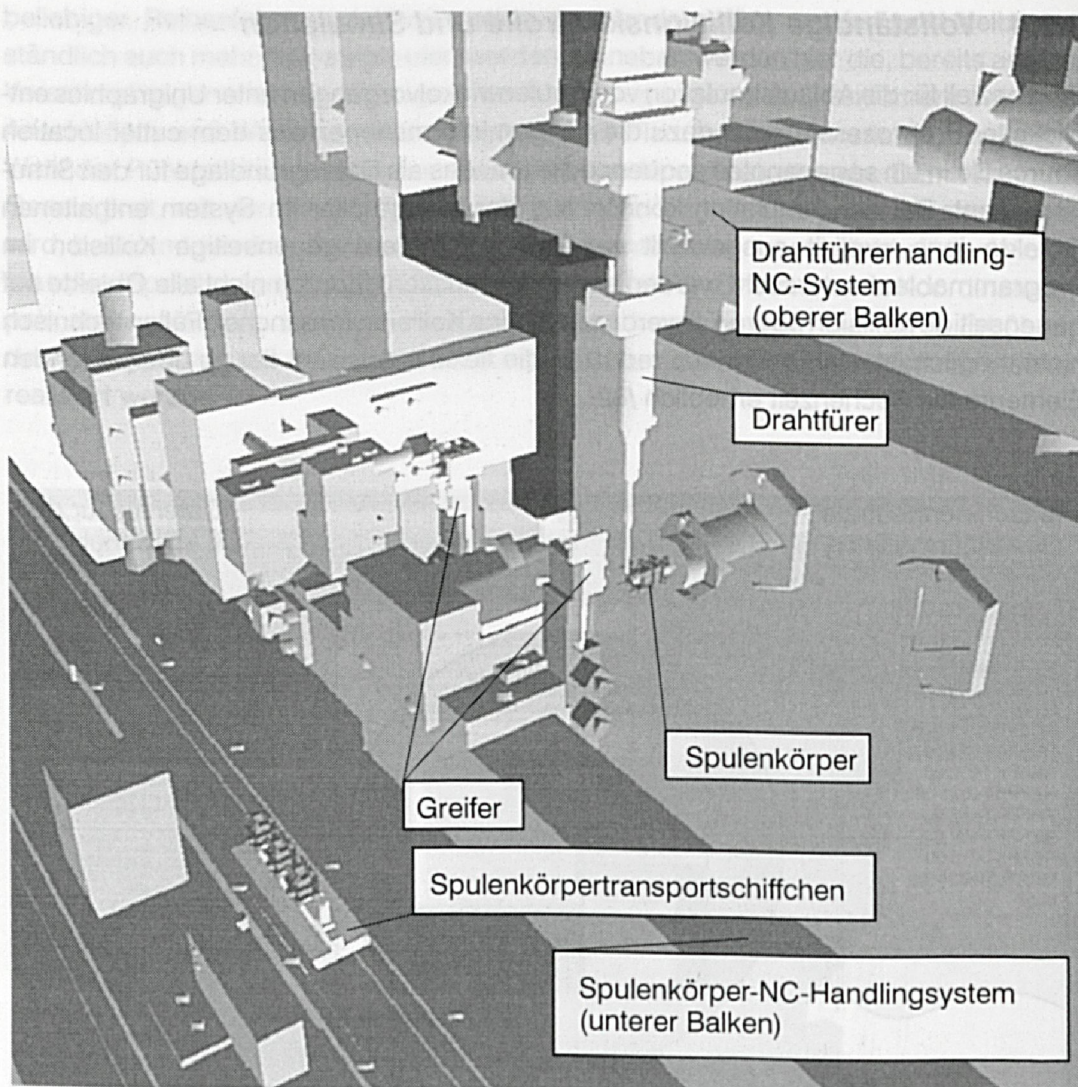


Bild 124: CAD-Simulation der Verfabrbewegungen des Wickelsystems

Nach erfolgreicher Prozeßsimulation und der Gewißheit, ein fehlerfreies maschinenneutrales Datenfile zur Produktion der jeweiligen Wickelaufgabe zu haben, werden die Informationen in einen maschinenlesbaren NC-Datensatz umgesetzt.

### 8.3.5 Anpassung der NC-Programme an die jeweilige Maschinensteuerung

Die Strukturen der eingesetzten Wickelmaschinensteuerungen weichen stark voneinander ab, da im Gegensatz zur Dreh- oder Frästechnik kein standardisierter allgemeingültiger NC-Kern Verwendung findet. Es handelt sich um Sondermaschinen mit zum Teil sehr unterschiedlichen Funktionsumfängen, deshalb hat jeder Wickelmaschinenhersteller seine eigenen, auf die unterschiedlichen Funktionsumfänge zurechtgeschnitten-



nen, Steuerungen entwickelt. Jede Wickelmaschinensteuerung erfordert einen speziell dafür abgestimmten NC-Datensatz.

Dies geschieht im Rahmen der realisierten CAD-CAM-Verfahrenskette mit Hilfe eines Postprozessors, der das allgemeine cls-file einliest und daraus den für die Wickelmaschinensteuerung lesbaren NC-Programmcode erzeugt /76/.

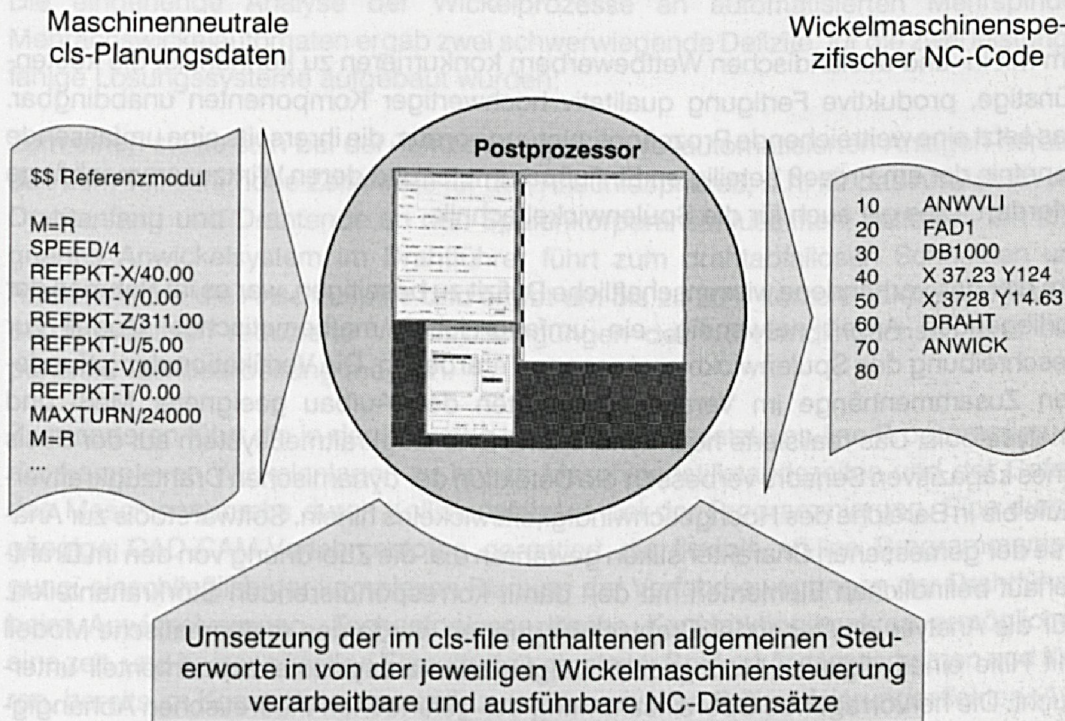


Bild 125: Umsetzung der Planungsdaten in einen NC-Code

Dieser NC-Datensatz kann, mittels fabrikinterner oder globaler Informationsnetze, an die Maschinensteuerung oder eventuell an den damit verbunden Leitreehner übertragen werden. Die Fertigung des neuen Produktes erfordert jetzt nur noch, neben dem Einladen des Datensatzes in die Ablaufsteuerung, die ohnehin notwendige mechanische Umrüstung des Automaten.

Die hier beschriebene und im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisierte durchgängige CAD-CAM-Verfahrensfolge stellt für die Programmierung von NC-Spulenwickelautomaten ein überaus leistungsfähiges und effizientes Werkzeug dar. Mit ihr kann die Gefahr des Maschinenbruchs im Einrichtebetrieb und der Anteil der Maschinenstillstandszeiten durch die maschinenferne Programmierung deutlich reduziert werden.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Wickeln stellt für die Herstellung elektromagnetischer Komponenten ein, wenn nicht das wichtigste Fertigungsverfahren dar. In vielen Fällen handelt es sich dabei um Spulenwicklungen. Der kontinuierlich zunehmende Verbrauch an Lackdrähten im Feinst- und Feindrahtbereich bis 1 mm Drahtdurchmesser belegt die seit Jahrzehnten anhaltenden Zuwachsraten von elektrischen und elektronischen Produkten /6/, /20/.

Um mit in- und ausländischen Wettbewerbern konkurrieren zu können, ist die kostengünstige, produktive Fertigung qualitativ hochwertiger Komponenten unabdingbar. Das setzt eine weitreichende Prozeßoptimierung voraus, die ihrerseits eine umfassende Kenntnis der am Prozeß beteiligten Einflußparameter und deren Wirkzusammenhänge erfordert. Dies gilt auch für die Spulenwickeltechnik.

Um hier das vorhandene wissenschaftliche Defizit zu beseitigen, war es im Rahmen der vorliegenden Arbeit notwendig, ein umfangreiches mathematisches Modell zur Beschreibung des Spulenwickelprozesses zu erarbeiten. Die Verifikation der gefundenen Zusammenhänge im Versuch erforderten den Aufbau geeigneter Meß- und Analysetools. Das realisierte hochdynamische Drahtzugkraftmeßsystem auf der Basis eines kapazitiven Sensors verbessert die Detektion der dynamischen Drahtzugkraftverläufe bis in Bereiche des Hochgeschwindigkeitswickelns hinein. Softwaretools zur Analyse der gemessenen Charakteristiken gewähren u.a. die Zuordnung von den im Drahtverlauf befindlichen Elementen mit den damit korrespondierenden Störkraftanteilen. Für die Analyse entstehender Drahtschwingungen wurde das mathematische Modell mit Hilfe eines digitalen Hochgeschwindigkeitskamarasystems experimentell untersucht. Die hervorragende Übereinstimmung der gefundenen theoretischen Abhängigkeiten mit den Experimenten belegen die Gültigkeit der gefundenen Zusammenhänge und gestatten eine darauf aufbauende Ableitung von Regeln zur Prozeßoptimierung. Die feine Modellierung, welche die Auswirkungen des Wickelprozesses auf die geometrischen und elektrischen Eigenschaften von Spulen mitberücksichtigt, dient einer verbesserten Produkt- und Fertigungsplanung.

Die tiefgreifende Auseinandersetzung mit der Spulenwickeltechnologie brachte zudem eine Reihe von bis dahin noch nicht gelösten maschinenbaulichen Defiziten zu Tage.

So führt der konstruktive Aufbau von kommerziellen Drahtzugregelsystemen - sowohl bei elektronischen als auch bei rein mechanischen Systemen - beim Bewickeln unrunder Spulenkörperquerschnittsformen zur Einkopplung zusätzlicher Drahtzugkraftschwankungen. Das liegt an den im Bremssystem mitbewegten rotierenden Massen. Es wurden hochdynamische Drahtzugregelsysteme entwickelt, die mit entsprechend empfindlicher Zugkraftmeßsensorik ausgerüstet sind. Diese begünstigen die Bewicklung unrunder Querschnittsformen unter wesentlich höheren Drahtabzugsgeschwindigkeiten mit geringeren Drahtzugkraftschwankungen.



Der stabilen Verarbeitung verdrellkritischer Halbzeuge wird bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Wickelgüter eine immer größere Bedeutung zugemessen. Hierfür konnte ein System entwickelt werden, welches die verdrellfreie Bewicklung in einem sehr hohen Drahtzugkraftbereich durch einen neuartigen Drahtzugkrafteinkoppelmechanismus erlaubt. Der konstruktive Aufbau gewährleistet die Möglichkeit, den Prozeß umzukehren und somit flexibel zurückzuspulen.

Die eingehende Analyse der Wickelprozesse an automatisierten Mehrspindel-Mehrachswickelautomaten ergab zwei schwerwiegende Defizite, für die zwei leistungsfähige Lösungssysteme aufgebaut wurden:

Zum einen stellte sich bei der Taktzeitanalyse an vollautomatisierten Anlagen heraus, daß zum Teil sehr hohe Zeitanteile für den Anschlußprozeß, d.h. für das Anwickeln von Drahtanfang und Drahtende an den Spulenkörperanschlußstiften, entfallen. Ein integriertes Anwickelsystem im Drahtführer führt zum drahtabfallosen Schneiden und Anwickeln um die Anschlußpins und ergibt um bis zu 20% kürzere Taktzeiten. Das ist durch drastisch reduzierte Verfahrbewegungen der NC-Handlingachsen und eine parallele Taskbearbeitung möglich.

Zum anderen führt die in der Industrie bis heute eingesetzte on-line Programmierung der komplexen Wickelanlagen zu hohen Maschinenstillstandszeiten und der Gefahr des Maschinenbruchs durch Kollisionsfahrten bei der Programmierung. Eine durchgängige CAD-CAM-Verfahrensfolge garantiert die flexible off-line Programmerzeugung, einschließlich der komplexen Planung der Verfahrbewegungen der Drahtführer beim Anwickelvorgang. Technologiespezifische Konstruktionsmakros ermöglichen eine zeit- und kostengünstige Erzeugung komplexer Spulenkörpergeometrien und führen, bereits im Konstruktionsprozeß, zu wirkungsvollen Rationalisierungseffekten. Aus dem automatisiert geplanten Drahtverlauf auf der Spulenkörperoberfläche werden die notwendigen Verfahrbewegungen für die Drahtführer abgeleitet. Integrierte Simulationstools und Kollisionsvermeidungsalgorithmen führen zu optimierten Steuerungsdaten, die mit Hilfe von Postprozessoren in für Wickelmaschinensteuerungen les- und ausführbare NC-Datensätze umgesetzt werden.

Die vorgestellten Prinzipien und Systeme sollen einen Beitrag dazu leisten, wie im Hochlohnland Bundesrepublik Deutschland durch eine geeignete Prozeßführung und Prozeßplanung qualitativ hochwertige Wickelerzeugnisse effizient und kostengünstig produziert werden können.



## 10 Literatur

- /1/ Hofner, K.-H.:  
Verfahren der Umformtechnik, Carl Hanser Verlag, München, 1969
- /2/ Liebe, W.:  
Probleme der Optimierung des Wickelvorgangs unter Berücksichtigung der wesentlichen mathematisch-physikalischen Zusammenhänge zur Stabilisierung und Verbesserung der Qualität des Erzeugnisses, dargestellt am Beispiel der Herstellung von Spanngittern an Elektronenröhren, Technische Hochschule Ilmenau, 1975
- /3/ Tzscheuschler, R., u.a.:  
Technologie des Elektromaschinenbaus, Verlag Technik, Berlin, 1990, S. 272-329
- /4/ N. N.:  
Programmierbare Wickelmaschine mit erweitertem Programm, Draht (36), 1985, H. 7, S.: 319
- /5/ Kohler, R.:  
Vom Bediener geführt, Vorteile freiprogrammierbarer, bedienergeführter Wickelmaschinen, Elektrotechnik (65), 1983, H. 24, S. 56f
- /6/ N.N.:  
Kupferwerkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik, Informationsschrift des Deutschen Kupfer-Instituts, Berlin, 1992
- /7/ N. N.:  
Technische Daten für Kupferlackdrähte, IEC - Norm 317-0-1
- /8/ Reichhart, F.:  
Ohne Mittelzug vom Grob- zum Feinstdraht, Draht (37), 1986, H. 3, S. 107f
- /9/ Jütte, F.:  
Under control - Multi sensor system for process monitoring during drawing, Wireworld 1/93, S. 40-42
- /10/ N.N.:  
Lackdrähte und ihre Herstellung, Draht (41), 1990, H. 3, S. 315f
- /11/ N. N.:  
High-quality wires for high-tech applications, Wireworld 2/93, S. 24-28
- /12/ Runge, J.:  
Tendenzen bei Lackdrähten im internationalen Vergleich, Draht (39), 1988, H. 10, S. 1012ff



- /13/ Runge, J.:  
Schmelzharze - Die moderne Alternative der Wickeldrahtfertigung, Draht (42), 1991, H. 4, S.237-240
- /14/ Reiser, H.J.:  
Eigenschaften und Verarbeitbarkeit von Lackdrähten mit verbackbarer Außenschicht, Draht (35), 1984, H. 5, S. 216ff
- /15/ Edler, R.:  
Drahtspannungen beim Wickeln von Vierkantspulen, Zeitschrift E und M, Jahrgang 70, Heft 15/16, S. 348-353
- /16/ Simon, L.:  
Fadenabzug von stehenden Spulen bei hohen Geschwindigkeiten, Textiltechnik (27), 1977, S. 147 - 152
- /17/ De Barr:  
The physics of yarn tensions and balloon shapes, Journal of the Textile Institute, (51), 1960
- /18/ N. N.:  
Drahtzugregler bremst und beschleunigt, Draht (43), 1992, H. 5, S. 497
- /19/ Osterland, W.:  
Der Einfluß der Leiter-Eigenschaften auf Wickelfaktor und Wickelarbeit, Tagungsband Betriebstechnik, ZVEI, Frankfurt, 1969
- /20/ N.N:  
Informationsschrift der Elektrisola Lackdraht Gruppe, Reichshof-Eckenhagen, 1994
- /21/ Friedrich, W, u.a.:  
Tabellenbuch Elektrotechnik Elektronik, F. Dümmers Verlag, Bonn, 1993
- /22/ Gieck:  
Technische Formelsammlung, 27. erweiterte Auflage, Verlag Gieck, Heilbronn, 1981
- /23/ Steinhaus, R:  
Zum Begriff der Außenfaserdehnung bei Wickeldrähten mit Lackisolierung, Sonderdruck aus Elektronorm, Heft 7, Hamburg, 1976
- /24/ Kuhn, G.:  
Höhere Festigkeitslehre, Vorlesungsskript, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen, 1993
- /25/ N. N.:  
Siemens AG, Fachkreis 1.6 Wickeltechnik: Feindrahtwickeltechnik, München, 1989



- /26/ Bronstein u.a.:  
Taschenbuch der Mathematik, 21. Auflage, Verlag Harry Deutsch, Thun, 1985
- /27/ Wagner, K. W.:  
Einführung in die Lehre von den Schwingungen und Wellen, 2. Auflage,  
Dieterich'sche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden, 1947
- /28/ Kostyuk V. I. u.a.:  
Vibrations of a longitudinally moving string and some problems in dynamics  
of winding sets, Soviet applied mechanics, Nr. 3, New York, 1983, p. 261-267
- /29/ Honigmann, M.:  
Electronic measurement of tensile force on wires and ropes, wire world interna-  
tional vol 26, Nr. 6, Düsseldorf, 1984, p. 256f
- /30/ N. N.:  
DMS ein universelles Hilfsmittel zur Spannungsanalyse, Firmenschrift Hottin-  
ger Baldwin Meßtechnik, 1993
- /31/ Bonfig, K.W.:  
Technische Druck und Kraftmessung, Expert - Verlag, Ehningen, 1988
- /32/ N.N.:  
Elektronischer Zugspannungsmesser Typ DTM aus Sonderbeilage 04 Messen  
Auswerten Regeln, Draht-Zeitschrift (36), 1985, H. 1
- /33/ N. N.:  
Informationsbroschüre der Kistler Piezo - Instrumentation, Winterthur, 1992
- /34/ Ziegler, K.:  
Informationsbroschüre der ISM Dr. Ziegler und Bilger GmbH, Freiburg, 1994
- /35/ Stearns, S. D.:  
Digitale Verarbeitung analoger Signale, Oldenburg Verlag, München/Wien,  
1987
- /36/ Schrüfer, E.:  
Signalverarbeitung, Numerische Verarbeitung digitaler Signale, Carl Hanser  
Verlag, München/Wien, 1992
- /37/ N.N.:  
AT-DSP2200 User Manual, National Instruments Corporation, Austin, USA,  
1993
- /38/ N.N.:  
Software Reference Manual for Labview for Windows, National Instruments  
Corporation, Austin, USA, 1993



- /39/ Richter, B.:  
Laser Scan Devices for industrial application, wire (42), no. 6, Coburg, 1992,  
p. 529 - 532
- /40/ Schulz, W.:  
Dickenmessung von Feindrähten, Drahtwelt 7, 1979, S. 303 - 305
- /41/ N. N.:  
Operation Manual Laser Scan Micrometer, Mitutoyo Corporation, Tokyo, 1992
- /42/ George, H. A.:  
How to avoid problems when winding perfect layer coils, Insulating Circuits,  
June 1977, p. 17 - 21
- /43/ Roisum, D.:  
Winder vibration can reduce operating efficiency and increase maintenance  
costs, Tappi Journal (71), 1988, p. 87 - 96
- /44/ N.N.:  
CAMSYS+, Hochgeschwindigkeitskamerasystem-Systembeschreibung,  
Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen, Erlangen, 8/1994
- /45/ N.N.:  
Analyse, Programm zur automatischen Bewegungsanalyse, Fraunhofer-Insti-  
tut für integrierte Schaltungen, Erlangen, 5/1994
- /46/ Lenders, W. L. L.:  
Das orthozyklische Wickeln von Spulen, Philips' Technische Rundschau, Jahr-  
gang 23, Nr. 12, Eindhoven, 1962, S. 401 - 416
- /47/ N.N.:  
Merkblatt Orthozyklisches Wickel von Spulen, Aumann Systemtechnik GmbH,  
Espelkamp
- /48/ N.N.:  
Offenlegungsschrift DE 4411447 A1 (1995 - 10 - 05). Bedeker, H., Wolf, K.:  
Wickeleinrichtung, Deutsches Patentamt
- /49/ N.N.:  
Patentschrift DE 3436187 C2 (1990 - 04 - 05). Tanac Engineering K. K.; Takeda,  
Shuji, Oume: Drahtspannvorrichtung für eine elektrische Spule herstellende  
Wickelmaschine, Deutsches Patentamt
- /50/ N.N.:  
Patentschrift DE 2318884 C2 (1982 - 02 - 25). Beyer, E.; Gäng, H.: Vorrichtung  
zum Konstanthalten des Drahtzuges bei Wickelmaschinen, Deutsches Patent-  
amt



- /51/ N.N.:  
Patentschrift DE 3336970 C2 (1989 - 10 - 26). Gottschalk, W.: Vorrichtung zum Wickeln von Draht zu elektrischen Spulen, Deutsches Patentamt
- /52/ N.N.:  
Offenlegungsschrift DE 4035862 A1 (1990 - 11 - 10) Noiret, J.: Vorrichtung zur Spannungsregulierung eines Drahtes für eine Spule, Deutsches Patentamt
- /53/ N.N.:  
Europäische Patentanmeldung EP 0309381 A1 (1988 - 09 - 05) Hock, L.: Drahtbremsvorrichtung, Europäisches Patentamt
- /54/ N.N.:  
Patentschrift DE 2740723 C2 (1981 - 09 - 17). Dietz, D.: Vorrichtung zum Erzeugen einer gleichmäßigen Abzugskraft eines Drahtes, Deutsches Patentamt
- /55/ N.N.:  
Patentschrift DE 2919145 C2 (1982 - 11 - 25). Rosenkranz, W.: Drahtbremse für eine Wickelmaschine für elektrische Spulen, Deutsches Patentamt
- /56/ N.N.:  
Offenlegungsschrift DE 4019139 A1 (1991-12-19). Hock, L.: Drahtführeinrichtung, Deutsches Patentamt
- /57/ N.N.:  
Patentanmeldeschrift 19638238-33 (1996-09-19), Wolf, K., Meyer J.: Verfahren und Vorrichtung zur Regelung der Zugkraft eines Spulenwickeldrahtes, Deutsches Patentamt
- /58/ N.N.:  
Patentanmeldeschrift 19638250-33 (1996-09-21), Wolf, K.: Drahtführungsvorrichtung für eine Spulenwickelmaschine, Deutsches Patentamt
- /59/ Renner G.:  
Borland c++ - Das Kompendium, Markt und Technik Verlag, Haar b. München, 1992
- /60/ Norton P., Yao P.:  
Borland C++, Programmierung unter Windows 3, Wolfram's Verlag, Attenkirchen, 1993
- /61/ N.N.:  
Mathcad 5.0 Plus, Benutzerhandbuch, Cambridge, 1994
- /62/ N.N.:  
Offenlegungsschrift DE 4005359 A1 (1991-08-22), Katzorke R., Vorrichtung zum lagenweisen Wickeln von Drähten elektrischer Spulen, Deutsches Patentamt



- /63/ N.N.:  
Baumer electric, Technisches Informationsmaterial, Friedberg, 1995
- /64/ N.N.:  
Altic De-reelers, Technische Dokumentation, Paris, 1995
- /65/ Festari, V.:  
Marsilli Programmierbares elektronisches Abspulgerät TEP, Dokumentation, Castelleone, 1996
- /66/ N.N.:  
Meteor MDR 1-20, Funktionsbeschreibung und Handbuch, Rüslikon, 1994
- /67/ N.N.:  
Simas PB 202 Programmierbarer Drahtzugregler, Berlin, 1993
- /68/ Kief, H.B.:  
NC/CNC-Handbuch, NC-Handbuch-Verlag, Michelstadt, 1996
- /69/ Blöchl, W.:  
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- /70/ N.N.:  
Feindrahtwickelmaschinen, Draht, Bamberg, 7/1974, S. 395 - 402
- /71/ Müller, R.:  
Maschinen zum Wickeln und Konfektionieren von Leitern, Drahtwelt, Bamberg, 5/1983, Seite 124 - 127
- /72/ Müller, R.:  
Automation and flexible design of coil winding, wire world, vol 27, Düsseldorf, p. 22 - 25
- /73/ Feldmann, K.; Wolf K.-U.:  
Computer based planning of coil winding processes for improvements in efficiency and quality, Proceedings zur Electrical Manufacturing and coil winding, Rosemont, 1996, p. 299 - 305
- /74/ Feldmann, K.; Wolf K.-U.:  
Entwicklung technologiespezifischer Verfahrensketten am Beispiel der Spulenwickeltechnik, VDI-Seminar Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme, VDI-Bildungswerk, Düsseldorf, 1996
- /75/ N.N.:  
Manufacturing Operation - operational description, Volume 1 & 2, Mc Donnell Douglas Corporation, Cypress CA, 1995



- /76/ N.N.:  
Simulation, Build, Place - operational description, Mc Donnell Douglas Corporation, Cypress CA, 1995
- /77/ N.N.:  
GRIP Programming Manual, Volume 1 & 2, Mc Donnell Douglas Corporation, Cypress CA, 1995
- /78/ N.N.:  
Firmenschrift Marsilli spa, Castelleone, 1996
- /79/ N.N.:  
Programmieranleitung Wickelsteuerung, V1.00, Meteor AG, Rüschnikon, 1992
- /80/ N.N.:  
Filemanager für Automaten, V1.00, Meteor AG, Rüschnikon, 1992
- /81/ N.N.:  
DIN-Taschenbuch 200, NC-Maschinen, Numerische Steuerungen, 3. Auflage, Beuth-Verlag, Berlin, 1992
- /82/ Feldmann, K.; Wolf K.-U.:  
Rechnergestützte Planung von Wickelvorgängen zur Leistungs- und Qualitätssteigerung bei der Spulenfertigung, Zeitschrift Produktionsautomatisierung, Oldenbourg-Verlag, 3/94, S. 11 - 14



## 11 Abkürzungen und Formelzeichen

$A_q$	Leiterquerschnittsfläche
$A_{Wi}$	Von einer Windung umschlossene Fläche
$B$	magnetische Flußdichte
$B_k$	Wickelkammerbreite
$D$	Plastizitätsmodul
$E_d, E_{SK}$	Elastizitätsmodul des Drahtwerkstoffes, bzw. des Spulenkörpers
$F_B$	Drahtbiegekraft
$F_F$	Drahtführungskraft
$F_M$	Magnetkraft
$F_N$	Normalkraft am Drahtelement
$F_R$	Reibkraft
$F_Z$	Drahtzugkraft
$H$	magnetische Feldstärke
$H, C$	Abstandsmaße zwischen Wickelachse und Drahtführer
$H_F$	Dicke des Spulenkörperflansches
$H_k$	Wickelkammerhöhe
$J$	Stromstärke
$L$	Leiterlänge
$L_{ind}$	Induktivität
$M$	Biegemoment am Drahtelement
$M_R$	Reibmoment
$M_{rot}$	Rotationsmoment
$N$	Windungszahl
$NI$	Ampèrewindungszahl
$Q$	Querkraft am Drahtelement



R	Ohmscher Widerstand
RR	Radius der Umlenkrolle
RB	Radius der Bremsrolle
R <sub>F</sub>	Außenradius des Spulenkörperflansches
R <sub>k</sub>	Wirksamer Biegeradius
RK <sub>a</sub> , RK <sub>i</sub>	Außen- - bzw. Innenradius des Spulenkörpers
RK <sub>m</sub>	mittlerer Spulenkörperradius
S	von Feldlinien durchdrungene Fläche
SL <sub>i</sub>	Wickelkantenlänge
T	Periodendauer
U <sub>D</sub>	Durchschlagspannung
WF	Wickelfaktor
a(t)	Beschleunigungsverlauf des Drahtes beim Wickeln
d <sub>a</sub>	Lackdrahtaußendurchmesser incl. Isolierung
d <sub>nom</sub>	Blankdrahtdurchmesser ohne Isolierung
l <sub>f</sub>	mittlere Feldlinienlänge
l <sub>n</sub>	Abstand der Punktmassen
l <sub>s</sub>	Schwingungsfähige Teilleiterlänge
m <sub>μ</sub>	Punktmasse des schwingungsfähigen Teilleiterstücks
n	Drehzahl
pk	programmierter Verfahrensweg der Drahtführung in der Wickelkammer
psk	tatsächlicher Drahtführerverfahrensweg incl. Überschwingbewegung
r	Radiuskoordinate
t <sub>l</sub>	Lackzunahme
u <sub>r</sub>	Verschiebung in radialer Richtung
u <sub>μ</sub>	spezifische Durchschlagspannung pro μm Lackdicke
v <sub>d</sub>	Drahtvorschub



$v(t)$	Geschwindigkeitsverlauf des Drahtes beim Wickeln
$x(t)$	Abstand zwischen Wickelort und Drahtführung
$\Theta_R$	Trägheitsmoment
$\delta$	Dichte
$\varepsilon$	Dehnung
$\mu$	Reibkoeffizient
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante $1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
$\mu_r$	Permeabilitätszahl
$v_d$	Querkontraktionszahl
$\varrho$	spezifischer Widerstand
$\sigma_B$	Biegespannung
$\sigma_S$	Streckgrenze
$\sigma_Z$	Zugspannung
$\varphi$	Bogenwinkel eines Drahtelementes
$\Psi$	Anzahl der aufgetragenen Wickellagen



**ISSN 1431-6226**  
**ISBN 3-87525-092-3**