

# **Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den Wickelprozess von Papier**

**Dissertation**

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von

**Bernd Güldenber**

aus Jülich

Bochum 2000

Dissertation eingereicht am: 7. Januar 2000

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2000

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L. Götsching

Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik

Heft 00.2

**Bernd Güldenber**

**Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den  
Wickelprozess von Papier**

Shaker Verlag  
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Güldenber*g, Bernd:

Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den Wickelprozess von Papier/  
Bernd Güldenberg.

Aachen : Shaker, 2000

(Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik ; Bd. 2000,2)

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8026-5

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8026-5

ISSN 1616-5497

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*für Sabine*

# VORWORT DES INSTITUTES

Im Rahmen der stetig wachsenden Produktivitäts- und Qualitätsanforderungen in der papiererzeugenden und -weiterverarbeitenden Industrie gewinnt die Wickeltechnik als mehrfacher Bestandteil in den Produktionsabschnitten zunehmend an Bedeutung. Hierbei handelt es sich um Off- und Online-Wickelprozesse, die auf hochautomatisierten Wickelmaschinen zur Herstellung von Papierrollen als Vor- und Fertigprodukte beherrscht werden müssen. Bezüglich der Qualitätsanforderungen geht es insbesondere um einen schädigungsfreien Wickelaufbau mit entsprechender Zylindrizität und Transportstabilität der Papierrollen und bezüglich der Produktivitätsanforderungen um stabile und höchste Produktionsgeschwindigkeiten, verbunden mit einem automatisierten und kontrollierten Wickelprozess.

Um die damit verbundenen maschinentechnischen Entwicklungsziele zu erreichen, ist eine genaue Kenntnis des Wickelvorgangs im Zusammenspiel mit dem Materialverhalten von Papier erforderlich. Analysen zum Stand der Technik und Forschung, wie sie auch dieser Arbeit zugrunde liegen, zeigen erhebliche Wissensdefizite in den grundlegenden Zusammenhängen des Wickelvorgangs auf. Hierbei sind die kinetischen und kinematischen Vorgänge beim Wickeln hervorzuheben, die letztendlich zum Spannungs-Dehnungs-Zustand der spiralförmig aufgewickelten Papierbahn führen. Ausgehend von der Kenntnis dieser Zustände lassen sich dann entsprechende maschinentechnische Maßnahmen für die Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen ableiten.

Vor diesem Hintergrund konzentriert sich diese Dissertation auf die wickelmechanische Analyse der sogenannten Nipwirkung, die in Walzenwicklern in der Kontaktstelle zwischen Wickel und Walze(n) auftritt und ganz wesentlich den Wickelprozess und damit das Wickelergebnis beeinflusst. In den theoretischen und experimentellen Untersuchungen wird zunächst auf systematische Weise gezeigt, dass sich der reale Wickelprozess stufenweise auflösen und für die Untersuchungen in Partialmodelle überführen lässt. Auf dieser Basis werden sodann Wickelmodelle für Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Zustände in den jeweiligen Wickelzonen entwickelt. Hiermit gelingt es erstmals, den Spannungs-Dehnungs-Zustand in der sogenannten aktiven Wickelspirale zu berechnen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird ein neuartiges Messverfahren auf der Basis digitaler Bildverarbeitung zur Erfassung der kinematischen Zusammenhänge in den äußeren Lagen der aktiven Wickelspirale vorgestellt. Die damit durchgeführten Experimente in einem Wickelversuchsstand mit verschiedenen Papiersorten bestätigen einerseits die theoretischen Modellierungsansätze und liefern andererseits Einblick in die wickelmechanischen Zusammenhänge der Lagenverschiebungen in den äußeren Lagen eines Wickels unter Nipwirkung, die maßgeblich zum Spannungs-Dehnungs-Zustand (Wickelhärte) des Wickels beitragen.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen liegen erweiterte wickelmechanische Grundlagen vor, die sich in der industriellen Praxis vielfältig von der Behebung fehlerhafter Wickelprozesse bis hin zur Konzeption von geregelten Wickelprozessen anwenden lassen.

Ewald G. Welp

## VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp danke ich für die sehr lehrreiche und interessante Zeit, die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die wissenschaftliche Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L. Götsching, Leiter des Institutes für Papierfabrikation der Technischen Universität Darmstadt, danke ich für sein Interesse an meiner Forschungsarbeit sowie die freundliche Übernahme des Koreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. D. Schüler für die zahlreichen, sehr fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Impulse und Herrn Dr. Techn. H. Vomhoff für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und seine konstruktiven Hinweise.

Darüberhinaus danke ich allen Mitarbeitern und Studenten des Lehrstuhls, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank den Herren R. Pflips, K.-D. Jung, cand.-Ing. P. Knoll, cand.-Ing. J. Golz und den Mitarbeitern der Werkstatt für ihren unermüdlichen Einsatz beim Aufbau des Prüfstandes und der Durchführung der experimentellen Untersuchungen sowie den Herren Dipl.-Ing. A. Haffert, Dipl.-Ing. H. Humberg und Dipl.-Ing. O. Kopp für ihr Engagement im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten.

Ganz herzlich danke ich den Herrn Dipl.-Ing. M. Liebig, Modo Paper Stockstadt, Dr.-Ing. R. Paetow, Haindl Papier Walsum, und Dipl.-Ing. S. Loewenberg, Haindl Papier Schwedt, für die Bereitstellung der Versuchspapiere. Die Materialuntersuchungen wurden zum Teil in der Papiertechnischen Stiftung, München, dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt und dem Institut für Papierfabrikation der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Den Verantwortlichen sei für die Bereitstellung der Versuchseinrichtungen gedankt.

Mein ganz spezieller Dank gilt meinen Eltern, Sibille und Willi Guldenberg, die durch Ihren Rückhalt und Ihre Unterstützung während meines gesamten Ausbildungsweges erst die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben. Und schließlich danke ich meiner Frau Sabine, dass sie mit viel Geduld und Verständnis auf so manche gemeinsame Stunde verzichtet hat und mir so die notwendige Rücken- deckung gegeben hat, um diese Arbeit erfolgreich zu beenden.

Bochum, im August 2000

Bernd Guldenberg



# **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	1
<b>2</b>	<b>AUSGANGSSITUATION UND ZIEL</b>	2
2.1	Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen an den Wickelprozess	5
2.2	Einflussparameter des Wickelprozesses	9
2.3	Stand der Technik und Entwicklungstrends	13
2.3.1	Maschinentechnik	13
2.3.2	Entwicklungstrends	19
2.4	Stand der Forschung	21
2.4.1	Spannungszustand der inneren Lagen	21
2.4.2	Spannungszustand der äußeren Lagen	24
2.5	Problemstellung und Zielsetzung	30
2.6	Lösungsansatz und Vorgehen	32
<b>3</b>	<b>MATERIALVERHALTEN VON PAPIER</b>	36
3.1	Auswahl der Papiersorten	39
3.2	Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Maschinenrichtung (MD)	41
3.2.1	Modellierung	41
3.2.2	Ermittelte Materialkennwerte	42
3.3	Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Dickenrichtung (ZD)	45
3.3.1	Modellierung	46
3.3.2	Ermittelte Materialkennwerte	47
3.4	Querkontraktion	50
3.5	Reibverhalten	52
3.5.1	Modellierung	52
3.5.2	Ermittelte Materialkennwerte	55
3.6	Übersicht über die verwendeten Materialkennwerte	58

<b>4</b>	<b>THEORETISCHE ANALYSE DES WICKELPROZESSES</b> .....	59
4.1	Lagenverschiebungen in der passiven und aktiven Wickelspirale .....	59
4.2	Lagenverschiebungen und zugehörige Tangentialspannungsänderungen .....	61
4.3	Analyse des Spannungszustands der inneren Lagen (passive Wickelspirale) .....	66
4.3.1	Wickelmodell auf Basis konzentrischer Ringe .....	66
4.3.2	Radial- und Tangentialspannungsverlauf .....	70
4.3.3	Radiale Lagenverschiebungen .....	73
4.4	Analyse des Spannungszustands der äußeren Lagen (aktive Wickelspirale) .....	77
4.4.1	Tangentiale Lagenverschiebungen in der aktiven Wickelspirale .....	77
4.4.2	Besonderheiten des Wälzvorgangs zwischen Wickel und Walze .....	81
4.4.3	Kinetisches Modell für die Außenlage .....	85
4.4.4	Kinematisches Modell für die aktive Wickelspirale .....	100
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE ANALYSE DES WICKELPROZESSES</b> .....	110
5.1	Messverfahren .....	110
5.1.1	Versuchsstand .....	111
5.1.2	Digitale Bilderfassung und -verarbeitung .....	115
5.2	Auswertung der Messergebnisse .....	120
5.2.1	Radiale Lagenverschiebungen .....	120
5.2.2	Tangentiale Lagenverschiebungen .....	121
5.2.3	Tangentialspannungsverlauf in der aktiven Wickelspirale .....	122
5.3	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Messverfahrens .....	124
5.4	Parametervariation .....	130
5.4.1	Versuchsdurchführung und Versuchsparameter .....	130
5.4.2	Ergebnisse .....	131
5.5	Lokalisierung von Haft- und Gleitbereichen .....	140
5.5.1	Versuchsdurchführung .....	140
5.5.2	Ergebnisse .....	141
<b>6</b>	<b>RESÜMEE UND AUSBLICK</b> .....	143
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	145
<b>8</b>	<b>ANHANG</b> .....	156

## VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND INDIZES

### Formelzeichen

$c_v$	[-]	Geschwindigkeitsverhältnis
$d$	[mm]	Durchmesser
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$F$	[N]	Kraft
$G$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Gleitmodul
$h_0$	[mm]	Bahndicke, unverformt
$i$	[-]	Nummer der beobachteten Lage
$j$	[-]	Anzahl der äußeren Lagen relativ zur Lage $i$
$K_1$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Materialkonstante aus Pfeiffers Materialgesetz
$K_2$	[-]	Materialkonstante aus Pfeiffers Materialgesetz
$l$	[mm]	Länge einer Lage
$M$	[Nm], [Nm/mm]	Drehmoment bzw. Drehmoment bezogen auf die Bahnbreite
$N$	[-]	Nummer der Außenlage
$p$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Normaldruck
$q$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Reibschubspannung
$r$	[mm]	Koordinate
$R$	[mm]	Radius
$s$	[mm]	Bahnkoordinate
$s_{rel}$	[-]	relativer Schlupf zweier Wälzkörper
$S$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Grenzspannung aus Paetows Materialgesetz
$t$	[s]	Zeit
$T$	[N/mm]	Linienkraft, bezogen auf die Bahnbreite
$T_E$	[N/mm]	Bahnzug im Einlauf
$T_N$	[N/mm]	Linienkraft im Nip, kurz: Nipkraft
$u$	[mm]	Verschiebung
$u_r$	[mm]	akkumulierte radiale Verschiebung
$u_t$	[mm]	akkumulierte tangentielle Verschiebung
$\delta u_r$	[mm]	radiale Verschiebung einer Lage aufgrund einer neu aufgewickelten Lage
$\delta u_t$	[mm]	tangentiale Verschiebung einer Lage aufgrund einer neu aufgewickelten Lage
$\Delta u_t$	[mm]	akkumulierte tangentielle Verschiebungsdifferenz einer Lage
$\Delta \delta u_t$	[mm]	tangentiale Verschiebungsdifferenz einer Lage aufgrund einer neu aufgewickelten Lage
$v$	[m/min]	Geschwindigkeit

$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$\gamma$	[-]	Scherung
$\mu$	[-]	Reibbeiwert
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Normalspannung
$\tau$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubspannung
$\omega$	[Rad/s]	Winkelgeschwindigkeit

## Indizes

0	Ausgangswert
a	axial
b	Bahn
c	Hülse
CD	Querrichtung des Papiers
E	Einlauf
G	Gleitzustand
H	Haftzustand
ini	initial
K	Krümmung
m	mittel
MD	Maschinenrichtung des Papiers
N	normal
Nip	Nip
r	radial
S	Stützwalze
s0	Wert an der Stelle s=0
t	tangential
t0	Ausgangswert zum Zeitpunkt t=0
ur	aufgrund radialer Verschiebung
$\Delta t$	aufgrund tangentialer Verschiebungsdifferenz
w	Wälzkreis
ZD	Dickenrichtung des Papiers

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1	Schema des Papierherstellungsprozesses für Zeitungsdruckpapier (ZDP) und holzfreies gestrichenes Papier (WFC), in Anlehnung an [2] . . . . .	2
Abb. 2	Beispiel für Rollenfehler nach [4]: 1...weiche Hülse, 2...nicht plane Stirnseiten durch Bahnverlaufen, 3...Teleskopieren, 4...Riegelbildung . . . . .	3
Abb. 3	Beispiele für Papierschädigungen im Wickelprozess nach [4]: 1...Kreppfalten, 2...Bahnriß in MD, 3...Kernplatzer . . . . .	4
Abb. 4	Anforderungen an den Wickelprozess . . . . .	5
Abb. 5	Optimaler Wickelhärteverlauf nach [6] . . . . .	6
Abb. 6	Beispiel einer Produktivitätsanalyse von Rollmaschinen nach [2] . . . . .	7
Abb. 7	Leistungsdiagramm einer Rollmaschine nach [2] . . . . .	8
Abb. 8	Einflussparameter auf den Wickelprozess . . . . .	9
Abb. 9	Beitrag einzelner Prozessparameter zum Wickelhärteverlauf einer Rolle, in Anlehnung an [8], [9], [10], [11] . . . . .	11
Abb. 10	Popwicklung und Fertigrollenwicklung im Produktionsprozess . . . . .	13
Abb. 11	Antriebskonzept als Ordnungskriterium verschiedener Wicklerbauarten . . . . .	15
Abb. 12	Anordnung der Fertigrollen als Ordnungskriterium verschiedener Wicklerbauarten . . . . .	16
Abb. 13	Modifikationen des Tragwalzenprinzips . . . . .	17
Abb. 14	Modifikationen des Stützwalzenprinzips . . . . .	18
Abb. 15	Bedarfsanalyse für Tiefdruck-Großrollen nach [2] . . . . .	20
Abb. 16	Typische Radial- und Tangentialspannungsverläufe im Papierwickel bei konstanter einlaufender Bahnspannung . . . . .	23
Abb. 17	Tischversuchsaufbau zur Analyse der Nipmechanik im Wickelprozess nach [43] . . . . .	25
Abb. 18	Wickelmechanische Versuchsstände nach [47], [49] . . . . .	26
Abb. 19	Bahnzug nach dem Nip als Funktion der Nipkraft nach [47] . . . . .	27
Abb. 20	Tangentialspannungsverläufe für zwei verschiedene Wickelprinzipien nach [51] . . . . .	27
Abb. 21	Wickelmechanischer Versuchsstand und Messergebnisse nach [50] . . . . .	28
Abb. 22	Modellierung des Wickelprozesses mit Hilfe von zwei Basismodellen am Beispiel eines Tragwalzenwicklers . . . . .	32
Abb. 23	Klassen von Partialmodellen . . . . .	33
Abb. 24	Übersicht über die Partialmodelle, die im Rahmen experimenteller oder theoretischer Untersuchungen in dieser Arbeit behandelt werden . . . . .	35
Abb. 25	Koordinatensysteme zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens und des Wickelprozesses . . . . .	36
Abb. 26	Mikrotomsschnitte der verwendeten Papiersorten quer zur Laufrichtung . . . . .	40

Abb. 27	Nachgiebigkeits-Materialmodell für Papier nach [72]	41
Abb. 28	Spannungs-Dehnungsverläufe der verwendeten Papiersorten	43
Abb. 29	Experimentell ermittelte Elastizitätsmoduli für Bahnzüge von 0...1 N/mm	43
Abb. 30	Vergleich der experimentell ermittelten Elastizitätsmoduli mit den berechneten E-Moduli nach Paetow und Hooke	44
Abb. 31	Druck-Verformungskurve der Universalprüfmaschine	47
Abb. 32	Belastungskurven dreier aufeinanderfolgender Belastungszyklen und deren Darstellung nach Nullpunktkorrektur auf Basis der Vorkraft	48
Abb. 33	Druck-Verformungskurven von Papier 6 (WF)	48
Abb. 34	Druck-Verformungskurven der verwendeten Papiersorten	49
Abb. 35	Modellierung des Druck-Verformungs-Verhaltens mit Pfeiffers Materialgesetz	50
Abb. 36	Versuchsaufbau und gemessene Reibkurve von Zeitungsdruckpapier	53
Abb. 37	Prüfgeräte und zugehörige Prüfnormen zur Bestimmung der Reibbeiwerte von Papier	55
Abb. 38	Ermittelte Haftreibbeiwerte nach DIN 53119-2 bzw. DIN 53375	56
Abb. 39	Typische Reibkraftverläufe der einzelnen Papiersorten (Messverfahren nach DIN 53375)	57
Abb. 40	Typische Reibkraftverläufe der einzelnen Papiersorten bei Zugabe von Talkum (Messverfahren nach DIN 53375)	57
Abb. 41	Zusammenhang zwischen passiver und aktiver Wickelspirale, radialen und tangentialen Lagenverschiebungen und den behandelten Partialmodellen	59
Abb. 42	Definition von Variablen im Wickel	61
Abb. 43	Radiale und tangentiale Lagenverschiebungen $u_r$ und $u_t$	61
Abb. 44	Radiale Verschiebung einer Lage $i$ während des Wickelprozesses	62
Abb. 45	Tangentiale Verschiebung einer Lage $i$ während des Wickelprozesses	63
Abb. 46	Identifizierung einzelner Lagenmarkierungen und Lagen mit Hilfe der Variablen $i$ und $j$	63
Abb. 47	Annäherung der Wickelspirale durch konzentrische Ringe	66
Abb. 48	Kräftegleichgewicht am Lagenelement	67
Abb. 49	Flussdiagramm des Programms „Wickelmodell“	69
Abb. 50	Graphische Bedienoberfläche des Programms „Wickelmodell“	69
Abb. 51	Radial- und Tangentialspannungsverläufe verschiedener Papiersorten	71
Abb. 52	Wert der Radialspannung im Plateaubereich des Spannungsverlaufes als Funktion des einlaufenden Bahnzuges für verschiedene Papiersorten	72
Abb. 53	Entwicklung der akkumulierten radialen Verschiebungen $u_r(i,j)$ bei fortschreitendem Wickelprozess	73
Abb. 54	Radiale Verschiebungen $\delta u_r$ und Bahnzugänderungen $\delta T_{ur}$ in den Außenlagen eines Wickels	74

Abb. 55	Radiale Verschiebungen $\delta u_r$ und Bahnzugänderungen $\delta T_{ur}$ unterschiedlicher Papiersorten .....	75
Abb. 56	J-Linien-Test .....	77
Abb. 57	Akkumulierte tangentielle Verschiebung der Lagen bei Einsatz eines Stützwalzenwicklers .....	78
Abb. 58	Experimentell ermittelte Gesamtverschiebungs-Linie eines Walzenwicklers .....	79
Abb. 59	Tangentialverschiebungen aufgrund vorgegebener Tangentialdehnungsänderungen .....	80
Abb. 60	Aufnahme des Nipbereichs (Papier 5: WFC, Nipkraft: $T_N = 20 \text{ N/mm}$ ) .....	81
Abb. 61	Einteilung der Wälzvorgänge in unterschiedliche Klassen .....	82
Abb. 62	Kinetisches Modell zur Analyse der Haft- und Gleitvorgänge in der Außenlage eines Wickels .....	85
Abb. 63	Gleichgewicht der Linienkräfte am Bahnelement der Außenlage .....	87
Abb. 64	Flussdiagramm des Programms „Kinetisches Modell“ .....	93
Abb. 65	Graphische Bedienoberfläche des Programms „Kinetisches Modell“ .....	93
Abb. 66	Schematische Darstellung der Geschwindigkeitsverläufe im kinetischen Modell .....	94
Abb. 67	Verlauf der Reibschubspannungen und Geschwindigkeiten im Einflussbereich des Nips als Berechnungsergebnis für den Standardfall .....	96
Abb. 68	Geschwindigkeitsprofil im Nipzentrum für das Festkörpermodell des Wickels .....	102
Abb. 69	Vermessung des Nipbereichs .....	102
Abb. 70	Geschwindigkeitsprofil im Nipzentrum nach Annahme (1) .....	104
Abb. 71	Verlauf der Differenz der Haftgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit im Nipzentrum in Abhängigkeit der Anzahl neu aufgewickelter Lagen .....	105
Abb. 72	Gleitwinkel im Einlauf in Abhängigkeit der Anzahl neu aufgewickelter Lagen .....	106
Abb. 73	Geschwindigkeitsverlauf einer Lage $i$ in Abhängigkeit des Drehwinkels und daraus resultierende mittlere Lagengeschwindigkeiten pro Umdrehung .....	107
Abb. 74	Einfluss des max. Gleitwinkel $\alpha_{Gmax}$ und der Anzahl $n_3$ sich mit der Stützwalze drehenden Lagen $n_3$ auf den Bahnzugverlauf .....	108
Abb. 75	Schematischer Aufbau des Wickelversuchsstandes .....	111
Abb. 76	Foto des Wickelversuchsstandes .....	112
Abb. 77	Vorlauf der Lagenmarkierungen .....	113
Abb. 78	Aufbau der Messtechnik .....	113
Abb. 79	Flussdiagramm des Messprogramms .....	114
Abb. 80	Bedienoberfläche des Messprogramms .....	115
Abb. 81	Prozess der digitalen Bildverarbeitung .....	118
Abb. 82	Ermittlung der akkumulierten radialen und tangentialen Verschiebung einer Lagenmarkierung .....	119

Abb. 83	Vergleich der gemessenen und der berechneten, akkumulierten radialen Verschiebung $u_r$ .....	120
Abb. 84	Tangentiale Verschiebungsdifferenz $\Delta\delta u_t(i,j)$ und akkumulierte tangentielle Verschiebungsdifferenz $\Delta u_t(i,j)$ .....	121
Abb. 85	Tangentialspannungsverlauf in der aktiven Wickelspirale unter Berücksichtigung der Tangentialspannungsänderungen aus radialen und tangentialen Lagenverschiebungen .....	123
Abb. 86	Typische Verläufe der Verschiebungsdifferenz $\Delta\delta u_t$ und der akkumulierten tangentialen Verschiebungsdifferenz $\Delta u_t$ für Papier 6 .....	124
Abb. 87	Typische Verläufe der Verschiebungsdifferenz $\Delta\delta u_t$ und akkumulierten tangentialen Verschiebungsdifferenz $\Delta u_t$ für Papier 1 .....	125
Abb. 88	Lagenmarkierungen der Messreihen gemäß Abb. 86 und Abb. 87 .....	126
Abb. 89	Reproduzierbarkeit der Prozessparameter-Einstellungen Bahnzug $T_E$ und Nipkraft $T_N$ .....	127
Abb. 90	Entwicklung der akkumulierten tangentialen Verschiebungsdifferenz in der Hülsennähe .....	128
Abb. 91	Einfluss der Nachgiebigkeit des Wickels auf die akkumulierte tangentielle Verschiebungsdifferenz .....	129
Abb. 92	Einfluss des Parameters „einlaufender Bahnzug $T_E$ “ auf den nipinduzierten Tangentialspannungsaufbau .....	132
Abb. 93	Einfluss des Parameters „einlaufender Bahnzug $T_E$ “ hinsichtlich der Verteilung der nipinduzierten Tangentialspannung auf die einzelnen Nipdurchläufe .....	132
Abb. 94	Einfluss des Parameters „Nipkraft $T_N$ “ auf den nipinduzierten Tangentialspannungsaufbau .....	134
Abb. 95	Einfluss des Parameters „Nipkraft $T_N$ “ hinsichtlich der Verteilung der nipinduzierten Tangentialspannung auf die einzelnen Nipdurchläufe .....	134
Abb. 96	Einfluss des Parameters „Reibbeiwert“ auf den nipinduzierten Tangentialspannungsaufbau .....	136
Abb. 97	Einfluss des Parameters „Reibbeiwert“ hinsichtlich der Verteilung der nipinduzierten Tangentialspannung auf die einzelnen Nipdurchläufe .....	136
Abb. 98	Verhältnis der nipinduzierten Tangentialdehnung, der nipinduzierten Tangentialspannung bzw. des nipinduzierten Bahnzuges der einzelnen Papiersorten zum Mittelwert aller Papiersorten .....	137
Abb. 99	Einfluss des Parameters „Papiersorte“ auf den nipinduzierten Tangentialspannungsaufbau .....	138
Abb. 100	Einfluss des Parameters „Papiersorte“ hinsichtlich der Verteilung der nipinduzierten Tangentialspannung auf die einzelnen Nipdurchläufe .....	138
Abb. 101	Versuchsanordnung zur Ermittlung der Lagenverschiebung $u_t$ als Funktion des Drehwinkels $\varphi$ .....	140
Abb. 102	Tangentiale Verschiebung als Funktion des Drehwinkels .....	142

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1	Vergleich von Popewicklung und Fertigrollenwicklung. . . . .	14
Tab. 2	Ordnungsschema bedeutender Wickelmodelle zur Berechnung des Spannungsaufbaus im Wickel . . . . .	22
Tab. 3	Übersicht über existierende Messverfahren zur Beurteilung des Spannungsaufbaus im Wickel . . . . .	24
Tab. 4	Hauptbelastungen des Papiers im Wickelprozess . . . . .	38
Tab. 5	Charakterisierung der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Papiersorten . . . . .	39
Tab. 6	Bewertung einzelner Einflussfaktoren auf die Reibbeiwerte. . . . .	54
Tab. 7	Übersicht der Materialkennwerte der verwendeten Papierproben . . . . .	58
Tab. 8	Zu erwartende radiale Gesamtverschiebung $u_r(j=15)$ und daraus resultierende Bahnzugänderung $\Delta T_{ur}$ während der experimentellen Untersuchungen . . . . .	76
Tab. 9	Berechnungsergebnisse des kinetischen Modells . . . . .	98
Tab. 10	Vergleich der experimentellen und berechneten, akkumulierten radialen Verschiebung $u_r$ [mm]. . . . .	121
Tab. 11	Parametereinstellungen eines Versuchszyklus . . . . .	131
Tab. 12	Tangentialspannung im Einlauf und im Auslauf der aktiven Wickelspirale bei Variation des einlaufenden Bahnzuges . . . . .	131