



Schlussbericht

AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13365 N

Analyse und Ursachen plastischer Dehnungsprofile von Papierbahnen bei der Papierherstellung und Verarbeitung

Dipl.-Ing. Klaus Villforth

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik (PMV),
Technische Universität Darmstadt

Darmstadt, 28. Februar 2005

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz: CC BY 4.0

Namensnennung

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse lokaler plastischer Dehnung von Papier. Die Untersuchung soll klären, in wieweit eine ungleichmäßige Dehnung der Papierbahn bei der Herstellung und der Verarbeitung zu Problemen mit der Dimensionsstabilität und dem Bahnlauf führt. Ausgangspunkt ist die Vermutung, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Dehnungsprofil und Papiermaschineneinstellungen sowie Bahnquerprofilen für Querschrumpfung, Massenverteilung, Feuchtigkeit und Faserorientierung gibt.

Es wird ein bildanalytisches Messverfahren vorgestellt, das die Dehnung im Papier bei der Herstellung und der Verarbeitung erfasst. Dieses nutzt die Markierungen im Papier aus, welche Siebe bei der Blattbildung hinterlassen. Die Siebmarkierungsanalyse filtert mit bildanalytischen Methoden diese periodischen Strukturen aus den unregelmäßigen Strukturen des Blatts.

Zur Analyse der Strukturen wurde im Rahmen des Projekts ein neuer Fuzzy-Cluster-Algorithmus entwickelt. Die Fuzzy-Cluster-Analyse ist ein Verfahren der Mustererkennung zur Gruppierung und Strukturierung von Daten. Dieser neuartige Algorithmus ordnet periodische Strukturen im Papierblatt den zugrundeliegenden Webmustern von Blattbildungssieben zu. Die Methode ist rotationsinvariant, d. h. die Proben müssen nicht ausgerichtet werden. Mit der automatischen Siebmarkierungsanalyse entfällt das zeitraubende und fehlerträchtige manuelle Selektieren von Peaks. Verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse ergeben sich aus der Doppelbestimmung über die Markierungen von Ober- und Untersieb. Die subpixelgenaue Auflösung ergibt eine hohe Genauigkeit.

Ebenfalls neu sind die Auswertealgorithmen, die Einflüsse aus Siebverzug und Querschrumpfung iterativ kompensieren. Die Genauigkeit des Verfahrens wird lediglich durch externe Einflüsse begrenzt. Dazu zählen Schwankungen bei der Siebherstellung, wie z. B. die Gleichlaufschwankungen von Webstühlen und die Siebschrumpfung bei der Thermofixierung.

Mit Hilfe des neuen Verfahrens wurden Zeitungsdruckpapiere und SC-Papiere verschiedener Hersteller untersucht. Während die Querschrumpfungsprofile die charakteristisch hohen Werte im Randbereich zeigen, weist die Längsdehnung ein nahezu gleichmäßiges Profil über die Bahnbreite auf. Der vermutete Zusammenhang zwischen Dehnungsprofilen und Papiermaschineneinstellungen, Querschrumpfung, Massenverteilung, Feuchtigkeit oder Faserorientierung wurde nicht gefunden. Offensichtlich gleichen sich Unterschiede in der Längsdehnung über der Bahnbreite bis zur Aufrollung am Tambour aus.

Um die reversiblen Anteile von Querschrumpfung und Längsdehnung zu bestimmen, wurde auf der Basis der Siebmarkierungsanalyse eine Messmethode entwickelt, bei der das Papier wieder befeuchtet wird. Grundlage hierfür ist die Überlegung, dass die Trocknung einer Papierbahn unter mechanisch und thermisch induzierten Spannungen erfolgt. Während ein Teil dieser Kräfte das Papier irreversibel verformt, wird ein anderer Teil im Fasernetzwerk gespeichert. Wird das Papier befeuchtet, so bilden sich die reversiblen Verformungen zurück, die zu Problemen mit der Dimensionsstabilität und des Bahnlaufs führen können. Auch die Auswertung der reversiblen und irreversiblen Anteile der Längsdehnung zeigt sich durch andere Querprofile unbeeinflusst.

Im Profil der Längsdehnung bildet sich maßgeblich der aktuelle Bahnlauf ab. Für die Papiereigenschaft bedeutet dies, dass die Längsdehnung eine Grundgröße darstellt, die primär von der Papiermaschine geprägt wird. Die Untersuchung zeigt, dass die Längsdehnung die Festigkeitseigenschaften, insbesondere die Zugsteifigkeit in Längs- und Querrichtung, beeinflusst. Die Verbindung mit

dem Tensile Stiffness Index (TSI) kann nun unter neuen Gesichtspunkten betrachtet werden. Damit schließt das Projekt eine messtechnische Lücke.

Die Untersuchung zeigt den Nutzen des Längsdehnungsprofils zur Maschinendiagnostik. Während die Profile von Querschrumpfung und Zugsteifigkeitsindex TSI sich erst bei höherem Trockengehalt von mehr als 60 % entwickeln, umfasst das Längsdehnungsprofil alle Dehnungen von der Siebpartie bis zum Tambour. Drei der fünf untersuchten Zeitungsdruckpapiere zeigen markante Abweichungen in diesem Profil. Die Ursachen dafür liegen allesamt im Bereich von Sieb- und Pressenpartie. Die Papierbahn ist dort mit einem Trockengehalt unter 50 % besonders empfindlich.

Gleichmäßige Dehnungsprofile sind wichtig für den stabilen Lauf der Papiermaschine. Das entwickelte Messverfahren eignet sich zur Messung dieser Dehnungsprofile und damit zur Überwachung der Produktion. In einem Fall wurde mit Hilfe des Dehnungsprofils eine Breitstreckwalze als Verursacher von Qualitätsschwankungen identifiziert. Aber auch in der Papierverarbeitung lässt sich das Verfahren einsetzen. Am Beispiel der Verformung von SC-Papier bei der Satinage zeigen sich die Möglichkeiten, Fahrweisen und Kalander zu diagnostizieren.

Auf dem Gebiet der Siebmarkierungsanalyse wurden große Fortschritte hinsichtlich Messgenauigkeit und Messaufwand erzielt. Die Papierindustrie sowie Messgerätehersteller sind an dem Messsystem interessiert. Es gibt einen neuen Ansatz, aus dem Verhältnis lokaler Querschrumpfung zur Längsdehnung, unter Berücksichtigung der reversiblen und irreversiblen Anteile, die Züge in der Papiermaschine zu optimieren. Versuche an einer Papiermaschine zur Herstellung von Dekorpapier zeigen erste Erfolge.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Messung von Verformungsprofilen	13
2.1	Siebmarkierungsanalyse.....	13
2.1.1	Entstehung von Siebmarkierungen.....	14
2.1.2	Bildanalytische Vorverarbeitung.....	15
2.1.3	Siebmarkierungsgeometrie im Frequenzbereich	19
2.1.4	Überlagerung von Siebmarkierungen.....	24
2.2	Clusteranalyse periodischer Strukturen.....	25
2.2.1	Bestimmung der Distanzwerte	25
2.2.2	Fuzzy-Clustering	25
2.2.3	Initialisierung der Clusterprototypen	27
2.3	Analyse der Siebmarkierungsgeometrie.....	27
2.3.1	Zusammenhänge im Orts- und Frequenzbereich	28
2.3.2	Berechnung des Längsdehnungsprofils.....	31
2.3.3	Berechnung des Querschrumpfungsprofils	32
2.3.4	Berechnung des Schussfadenwinkels.....	33
2.4	Reversible und irreversible Bahnverformung und ihre Messung.....	34
2.5	Zusammenfassung zur Siebmarkierungsanalyse.....	35
3	Messung von Längsdehnungsprofilen.....	36
3.1	Probenvorbereitung und Messung.....	36
3.2	Prüfparameter	36
3.2.1	Flächenbezogenen Masse	36
3.2.2	Feuchte- und Füllstoffgehalt	36
3.2.3	Nassdehnung	36
3.2.4	Faserorientierung und Zugsteifigkeitsindex	37
3.2.5	Bahnspannung	37
3.2.6	Cocklingindex	37
3.3	Messergebnisse.....	38
3.3.1	Zeitungsdruckpapier A	38
3.3.2	Zeitungsdruckpapier B	44
3.3.3	Zeitungsdruckpapier C	49
3.3.4	Zeitungsdruckpapier D	54
3.3.5	Zeitungsdruckpapier E	60
3.4	Messung plastischer Verformung bei der Papierverarbeitung	64
3.4.1	Messungen an SC-Papier	64
3.4.2	Messungen an LWC-Papier	67
3.4.3	Messung plastischer Dehnung an Kalandern	68
4	Interpretation der Ergebnisse	70
4.1	Bewertung der Längsdehnungs- und Querschrumpfungsmessung	70
4.2	Dehnungsprofil und flächenbezogene Masse sowie Feuchte- und Füllstoffgehalt.....	70
4.3	Dehnungsprofil und Bahnspannungsprofil.....	70

4.4	Dehnungsprofil und Zugsteifigkeit	71
4.5	Dehnungsprofil und Nassdehnungsmessung.....	71
5	Schlussbetrachtung.....	72
6	Literaturverzeichnis.....	74
7	Danksagung.....	77

Abkürzungsverzeichnis

CD	Querrichtung (cross direction)
DIP	Deinkingstoff (deinked pulp)
DL	2-lagiges Sieb (double-layer)
DL EWA	2-lagiges Sieb mit Füllschuss (double-layer extra weft added)
FS	Führerseite
K	Kettfadenmarkierung im Frequenzbereich
max	Maximum
MD	Maschinenlaufrichtung (machine direction)
min	Minimum
P1, P2, P3, ...	Amplitudenspitzen im Frequenzbereich (Peaks)
PC	Computer (personal computer)
QS	Querschrumpfung
S	Schussfadenmarkierung im Frequenzbereich
SC-Papier	Satiniertes ungestrichenes holzhaltiges Druckpapier (Supercalendered)
TG	Trockengehalt
TL	3-lagiges Sieb (triple-layer)
TS	Triebseite
TSI	Zugsteifigkeitsindex (tensile stiffness index)
TSO	Zugsteifigkeitsorientierung (tensile stiffness orientation)
ZD-Papier	Zeitungsdruckpapier

Verzeichnis der Formelzeichen

a_{GiCDj}	Lokaler Markierungsabstand in CD der Messung	[mm]
\bar{a}_{GiCD}	Mittlerer Markierungsabstand in CD der Messung	[mm]
a'_{GiCDj}	Lokaler Markierungsabstand in CD am Sieb	[mm]
\bar{a}'_{GiCD}	Mittlerer Markierungsabstand in CD vor der Querschrumpfung	[mm]
a_{GiMDj}	Lokaler Markierungsabstand in MD der Messung	[mm]
\bar{a}_{GiMD}	Mittlerer Markierungsabstand in MD der Messung	[mm]
\bar{a}'_{GiMD}	Mittlerer Markierungsabstand in MD vor der Längsdehnung	[mm]
a_{ij}	Transformationsmatrix, Prototyp einer Siebmarkierung	
B	Bahnbreite während der Messung	[mm]
$B_{pick\ up}$	Bahnbreite an der Pick-up-Walze	[mm]
$d_{Gi j}$	Lokale Markierungsdichte der Messung	[1/cm]
d_i	Periodenabstand im Ortsbereich	[Pixel]
d'_i	Peakabstand vom Koordinatenursprung	[Pixel]
E_{MDj}	Lokaler E-Modul in MD	[Pa]
f_K	Frequenz der Kettfadenmarkierung	[m ⁻¹]
f_S	Frequenz der Schussfadenmarkierung	[m ⁻¹]
M	Anzahl der äquidistanten Bildpunkte in m-Richtung	
N	Anzahl der äquidistanten Bildpunkte in n-Richtung	
n	Anzahl der Messungen über der Bahnbreite	
V	Rapportverhältnis des Webmusters	
$V_{Tambour}$	Geschwindigkeit am Tambour	[m/min]
V_{Sieb}	Geschwindigkeit am Sieb	[m/min]
Δx	Ortsauflösung	[μm]
y_i	Ortsvektor, Peak einer Siebmarkierung	
$\beta_{Gi j}$	Lokaler Schussfadenwinkel der Messung	[°]
$\beta_{GiLD\ kor\ j}$	Lokaler längsdehnungskorrigierter Schussfadenwinkel	[°]
ε_{GiMDj}	Lokale Längsdehnung	[%]
ε_{GiQSj}	Lokale Querschrumpfung der Gruppe	[%]
ε_{MD}	Längsdehnung an der Papiermaschine	[%]
σ_{MDj}	Lokale Bahnspannung in MD	[Pa]
Indizes:		
Gi	Gruppe i , wobei $Gi = \{G1;G2;\dots\}$	
j	Stelle über der Bahnbreite	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Zwei- und dreilagige Siebmuster	14
Abb. 2:	Strömung durch das Sieb bei der Entwässerung	14
Abb. 3:	Querschnitt durch eine dreilagige Gewebestruktur	15
Abb. 4:	Fouriertransformation überlagerter deterministischer Signale.....	16
Abb. 5:	Original und „von Hann“-gefiltertes Durchlichtbild im Ortsbereich.....	17
Abb. 6:	Zentriertes zweidimensionales a) Amplituden- und b) Powerspektrum	18
Abb. 7:	Ungefiltertes und mit einem Hochpassfilter aufbereitetes Amplitudenspektrum	19
Abb. 8:	Ein- und mehrlagige Siebe	20
Abb. 9:	Verschiedene Bindungsarten.....	20
Abb. 10:	Bindungsrapport und Steigungszahl im Orts- und Frequenzbereich	21
Abb. 11:	Siebmarkierungen eines zweilagigen 8-Schaftsieves im Orts- und Frequenzbereich	22
Abb. 12:	Markierungen eines a) zweilagigen 7-Schaftsieves und b) dreilagigen Siebes mit Leinwandbindung.....	22
Abb. 13:	Markierungen des Obersiebs eines Doppelsiebformers	23
Abb. 14:	Markierungen des Untersiebs eines Doppelsiebformers	24
Abb. 15:	Drehung einer Siebmarkierungen im Orts- und Frequenzbereich	28
Abb. 16:	Scherung einer Siebmarkierung	29
Abb. 17:	Siebmarkierung eines in MD gedehnten Papiers	30
Abb. 18:	Siebmarkierung eines in CD geschrumpften Papiers	30
Abb. 19:	Überlagerung von Scherung und Schrumpfung	31
Abb. 20:	Entkopplung von Längsdehnung, Querschrumpfung und Siebverformung.....	33
Abb. 21:	Online-Messung des Bahnspannungsprofils zu Probe B	37
Abb. 22:	Siebmarkierungen der Probe A in der Bahnmitte	39
Abb. 23:	Längsdehnungsprofil der Probe A.....	39
Abb. 24:	Querschrumpfungsprofil der Probe A	40
Abb. 25:	Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe A	40
Abb. 26:	Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe A.....	41
Abb. 27:	Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe A.....	41
Abb. 28:	Nassdehnungs- und Querschrumpfungsprofil der Probe A.....	42
Abb. 29:	Irreversibler Anteil des Querschrumpfungsprofils von Probe A	42
Abb. 30:	Nassdehnung und reversible Querschrumpfung von Probe A	43
Abb. 31:	Funktioneller Zusammenhang zum Wet Stretch Dynamics Analyzer (WSD)	43
Abb. 32:	Irreversibler Anteil im Längsdehnungsprofil der Probe A.....	44
Abb. 33:	Siebmarkierungen der Probe B in der Bahnmitte.....	45
Abb. 34:	Längsdehnungsprofil der Probe B.....	46
Abb. 35:	Querschrumpfungsprofil der Probe B	46
Abb. 36:	Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe B	47
Abb. 37:	Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe B.....	48
Abb. 38:	Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe B.....	48
Abb. 39:	Profile von Dehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung.....	49
Abb. 40:	Siebmarkierungen der Probe C in der Bahnmitte.....	50
Abb. 41:	Längsdehnungsprofil der Probe C.....	51
Abb. 42:	Querschrumpfungsprofil der Probe C	51
Abb. 43:	Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe C	52
Abb. 44:	Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe C	52
Abb. 45:	Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe C.....	53
Abb. 46:	Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung	53

Abb. 47:	Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung	54
Abb. 48:	Siebmarkierungen der Probe D in der Bahnmitte	55
Abb. 49:	Längsdehnungsprofil der Probe D.....	56
Abb. 50:	Winkel der Schussmarkierung der Probe D	56
Abb. 51:	Querschrumpfungsprofil der Probe D	57
Abb. 52:	Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe D	57
Abb. 53:	Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe D.....	58
Abb. 54:	Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe E	58
Abb. 55:	Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung	59
Abb. 56:	Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung	59
Abb. 57:	Siebmarkierungen der Probe E in der Bahnmitte.....	60
Abb. 58:	Längsdehnungsprofil der Probe E	61
Abb. 59:	Querschrumpfungsprofil der Probe E	61
Abb. 60:	Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe E.....	62
Abb. 61:	Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe E	62
Abb. 62:	Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe E	63
Abb. 63:	Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung	63
Abb. 64:	Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung	64
Abb. 65:	Siebmarkierungsgeometrie des SC-Rohpapiers der Probe F	65
Abb. 66:	Siebmarkierungsgeometrie der SC-Papiers der Probe F	65
Abb. 67:	Querschrumpfungsprofile der Probe F vor und nach der Satinage	66
Abb. 68:	Längsdehnungsprofile der Probe F vor und nach der Satinage.....	66
Abb. 69:	Längsdehnungsprofile der Probe G vor und nach der Satinage	67
Abb. 70:	Siebmarkierungsgeometrie einer unsatinierten LWC-Probe.....	68
Abb. 71:	Plastische Dehnung im Kalandar	69
Abb. 72:	Zusammenhang zwischen Nassdehnung und reversibler Querschrumpfung.....	71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Messwerte für Probe A.....	38
Tab. 2: Messwerte für Probe B.....	45
Tab. 3: Messwerte für Probe C.....	50
Tab. 4: Messwerte für Probe D.....	55
Tab. 5: Messwerte für Probe E.....	60

1 Einleitung

Jede Papierbahn muss bei ihrem Transport durch die Papier-, Streich- oder Verarbeitungsmaschine gespannt sein, um einen störungsfreien Bahnlauf zu gewährleisten. Besonders kritisch sind die Abschnitte, in denen die Papierbahn frei geführt wird. Diese freien Züge finden sich in der Regel in der Pressenpartie und vor allem in der Trockenpartie von Papier- und Kartonmaschinen sowie in Streichmaschinen. In diesen Abschnitten muss das Fasergefüge den von außen aufgebrauchten Bahnzug aufnehmen.

Durch den Bahnzug in der Papiermaschine dehnt sich die Papierbahn in der Länge und schrumpft in der Breite. Das Fasergefüge richtet sich dabei aus und bildet im Laufe der Trocknung ein festes Netzwerk. Die Entwicklung von Längsdehnung und Querschrumpfung beeinflusst wesentlich die Festigkeit und die Elastizität dieses Netzwerks und damit die Qualität des Papiers.

So interessieren einerseits lokale Spannungen und Dehnungen in den freien Zügen, um den Bahnlauf zu stabilisieren und andererseits um die Qualität des Papiers zu verbessern. Mittlerweile gibt es Bahnspannungs-Messgeräte, die berührungslos ein Profil der lokalen Spannung über die Bahnbreite ermitteln. Lokale Dehnungen lassen sich jedoch nicht erfassen.

Das Forschungsvorhaben wurde initiiert, um diese messtechnische Lücke zu schließen und die Bedeutung der Dehnungsprofile für die Papierherstellung und -verarbeitung darzustellen. Primäres Ziel und Voraussetzung für Untersuchung von Längsdehnungsprofilen ist die Entwicklung einer hinreichend genauen Messmethode.

Ausgangspunkt für das messtechnische Verfahren ist die bildanalytische Bestimmung der Querschrumpfung. Dieses Verfahren extrahiert aus einer Siebmarkierung die lokale Kettfadendichte. Schrumpft die Bahn, so erhöht sich die Frequenz der Markierung. In der Regel steigt die Kettfadendichte bzw. -frequenz im Randbereich um 8 %. Das bisherige Verfahren differenziert mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 0,5$ % absolut für die Messung von Querschrumpfungprofilen hinreichend genau. Um die viel geringeren Schwankungen der Längsdehnung zu erfassen, musste die Messgenauigkeit um Faktor 5 bis 10 verbessert werden.

Die im Antrag spezifizierte Kamera mit $1300 * 1028$ Pixel stellt einen guten Kompromiss zwischen Auflösung und Preis dar, erhöht jedoch die Messgenauigkeit nur um den Faktor 2. Eine weitere Schwierigkeit bei dem Verfahren liegt darin, dass sich die Markierungen von Ober- und Untersieb überlagern und die einzelnen Schuss- und Kettfadenmarkierungen schwer zu trennen sind. Zudem muss ein Siebverzug über den Winkel der Schussfadenmarkierung erkannt und ggf. korrigiert werden.

Um die Genauigkeit zu verbessern, musste das Verfahren grundlegend überarbeitet werden. Der bildanalytische Teil liefert die Koordinaten der Markierungen nun in Subpixel statt in ganzen Pixel. Überlagerte Markierungen trennt der entwickelte Fuzzy-Cluster-Algorithmus. Dieser bezieht auch die Oberwellen der Markierungen in die Analyse ein, wodurch die erforderliche Genauigkeit zur Messung von Längsdehnungsprofilen letztendlich erreicht wird.

Mit dieser Messmethode lassen sich die plastischen Verformungen in solchen Papieren zuverlässig bestimmen, die über ausreichend starke Siebmarkierungen aufweisen. Dies ist für Zeitungsdruckpapiere die Regel. Auch LWC- und SC-Rohpapiere weisen Siebmarkierungen auf. Durch die Strichschicht des LWC-Papiers wird die Siebmarkierung weitgehend abgedeckt, so dass diese Papiere nur schwer vermessen lassen. Beim Kalandrieren von SC-Rohpapieren

wird die Oberfläche des Papiers eingeebnet. Auch diese Papiere bereiten Probleme, ihre Siebmarkierung zuverlässig zu identifizieren.

Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen plastischen Dehnungsprofilen und Profilen der flächenbezogenen Masse, Feuchtegehalt, Bahnspannung und Zugsteifigkeit, erfolgte an unterschiedlichen Zeitungsdruckpapieren. Die Proben wurden hinsichtlich der Faserstoffzusammensetzung und der Bauart der Trockenpartie ausgewählt. Verschiedenartige Siebkonstruktionen wurden einbezogen, um den Algorithmus zu testen.

Die Messergebnisse werden im Detail dargestellt. Es zeigt sich, dass die Längsdehnung als eigenständige Kenngröße zu betrachten ist. Es konnte kein Zusammenhang mit anderen Prozessparametern gefunden werden. Offensichtlich bestimmt alleine die Papiermaschine die Dehnung der Bahn in Maschinenrichtung. Die Papierbahn wird von der Siebpartie über die Pressenpartie bis zum Ende der einreihigen Trockenpartie nahezu lückenlos geführt. Veränderungen können nur in den relativ kurz gehaltenen freien Zügen auftreten.

Wegen der fehlenden Freiheitsgrade in Maschinenrichtung ist die Längsdehnung über die Bahnbreite relativ konstant. Schwankungen über 0,2 % bis 0,3 % weisen auf Probleme in der Bahnführung hin.

Die verbesserte Siebmarkierungsanalyse eröffnet nicht nur Möglichkeiten zur Messung von Längsdehnungen im Papier, sie erstellt auch viel genauere Querschrumpfungsprofile. In Verbindung mit der im Rahmen des Projekts entwickelten Methode zur Messung irreversibler Verformungen lassen sich reversible Anteile ohne äußere Kräfte quantifizieren. Die Methode eignet sich deutlich besser zur Messung von Nassdehnungen als die WSD-Methode, bei der die Proben unter einer Vorspannung stehen. Die Untersuchung zeigt einen engen Zusammenhang zwischen der reversiblen Querschrumpfung und dem Zugsteifigkeitsverhältnis $TS_{IMD/CD}$. Letzteres wird mit den Laufeigenschaften der Bahn (Runnability) und deren Rollneigung (Curl) in Verbindung gebracht.

Die Messmethoden können offline zur Qualitätsanalyse und zur Prozessdiagnose für die Papierherstellung und deren Verarbeitung eingesetzt werden. Wegen der automatisierten Siebmustererkennung eignet sich das Verfahren für Routinekontrollen und online Überwachungen. Durch den kostengünstigen Aufbau und die einfache Handhabung erfüllt das System die Anforderungen für den Einsatz in kleinen und mittleren Unternehmen.

2 Messung von Verformungsprofilen

Die moderne Antriebstechnik regelt mit hoher Genauigkeit die Geschwindigkeit der einzelnen Gruppen der Papiermaschine und damit die Dehnung der Papierbahn in den freien Zügen. Das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Poperoller und Siebpartie entspricht der Gesamtdehnung der Bahn. Sie setzt sich aus elastischen, viskoelastischen und plastischen Dehnungsanteilen zusammen. Letztendlich finden sich die plastischen Dehnungen im Papier wieder.

In Querrichtung schnürt die Längsdehnung die Bahn ein. Zusätzlich schrumpft die Bahnbreite beim Trocknen. Längsdehnung und Querschrumpfung verformen das Fasergefüge und die damit verbundenen Markierungen. Im Jahre 1991 veröffentlichte Wadhams ein bildanalytisches Verfahren, das die Frequenz von Siebmarkierung in Längs- und Querrichtung ermittelt, um die Dimensionsänderung des Papiers zu bestimmen [1].

Ein Problem des Verfahrens ist die begrenzte Genauigkeit. Sie konnte im Laufe der Zeit von $\pm 1\%$ auf ca. $\pm 0,5\%$ absolut gesteigert werden. Damit eignet sich das Verfahren, um Querschrumpfungsprofile zu messen [2, 3, 4, 5]. Weitere Probleme liegen in der Identifizierung und der Zuordnung von Markierungen. Zudem müssen die Papierproben bei der Messung exakt in Maschinenrichtung ausgerichtet werden.

Im Rahmen des Projekts wurde das Verfahren überarbeitet und ein Fuzzy-Clusteralgorithmus entwickelt der auch überlagerte Markierungsmuster eindeutig erkennt.

2.1 Siebmarkierungsanalyse

Ziel der Siebmarkierungsanalyse ist es, deterministische Signale im Papier zu erfassen, die Geometrie von Markierungen zu bestimmen und zu analysieren. Das Messverfahren gliedert sich in drei Stufen, die bildanalytische Vorverarbeitung, die Clusteranalyse periodischer Strukturen und die abschließende Analyse der Siebmarkierungsgeometrie.

Die **bildanalytische Vorverarbeitung** umfasst die klassische Bildanalyse von der Aufnahme von Bildern über deren Transformation und Filterung bis zur Markierung von Objekten. Mit ihrer Hilfe lassen sich Grauwertbilder soweit aufbereiten, dass Siebmarkierungen als periodisches Muster im Frequenzbereich sichtbar werden. Markierungen werden nun mit Subpixelgenauigkeit präzise erfasst.

Die mathematische Beschreibung der Siebmarkierungsgeometrie im Frequenzbereich durch Vektoren bildet den Grundstein zu der Markierungsanalyse. Die Identifizierung und die Klassifizierung überlagerter Markierungen erfolgt mittels **Clusteranalyse periodischer Strukturen**. Der für diese Aufgabe entwickelte Fuzzy-Clusteralgorithmus analysiert neben den Grundfrequenzen einer Markierung auch deren Oberwellen und erreicht dadurch die maximale Genauigkeit.

Die **Analyse der Siebmarkierungsgeometrie** interpretiert die identifizierten Strukturen. Zunächst werden Schussfadendichte, Kettfadendichte, Rapportverhältnis, Markierungsintensität, Scherwinkel der Schussfadenmarkierung und die Ausrichtung der Papierprobe als Drehwinkel zur Maschinenrichtung bestimmt. Anschließend werden Längsdehnung, Querschrumpfung und Siebverformung iterativ entkoppelt.

2.1.1 Entstehung von Siebmarkierungen

Siebe sind maßgeschneiderte Produkte, an die extrem hohe Anforderungen gestellt werden. Sie sind hinsichtlich der Markierungsneigung und der Wasserdurchlässigkeit auf den Rohstoff und auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Papiersorte abgestimmt. Hier spielt die Beschaffenheit der dem Papier zugewandten Seite die entscheidende Rolle.

Die mechanische Stabilität und die Lebensdauer des Siebs in der Papiermaschine bestimmen maßgeblich die Konstruktion der Tragseite. Papierseite und Tragseite müssen papiertechnologisch und webtechnisch aufeinander abgestimmt werden. **Abb. 1** zeigt Siebmuster mit unterschiedlichen Drahtstärken und Strukturen.

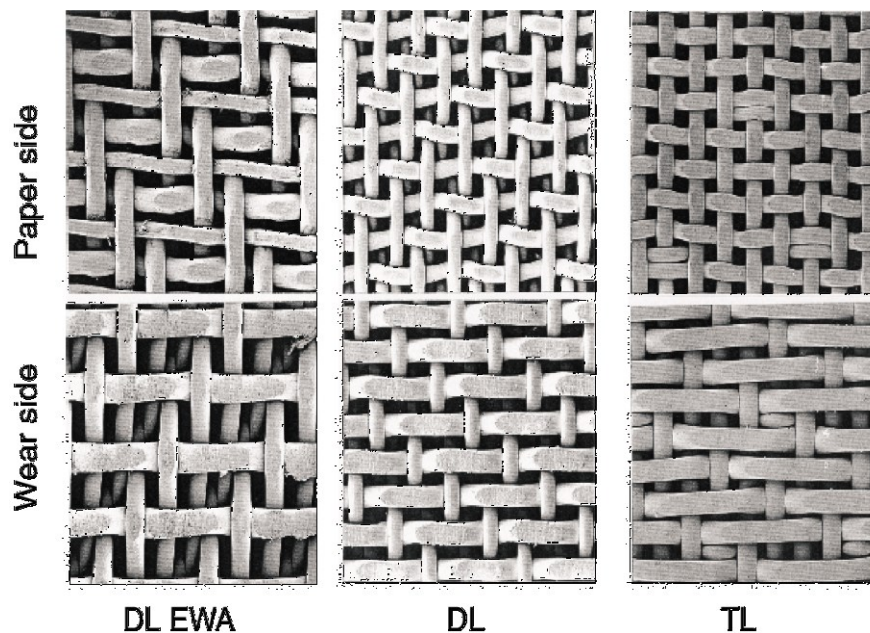


Abb. 1: Zwei- und dreilagige Siebmuster [6]

Siebmarkierungen entstehen bei der Blattbildung durch eine lokal unterschiedliche Entwässerung. Man unterscheidet topographische Markierungen, bei der sich die Papierseite des Siebs im Papier abbildet, und hydraulische Markierungen, die aus der Strömung bei der Entwässerung, wie in **Abb. 2** skizziert, resultiert.

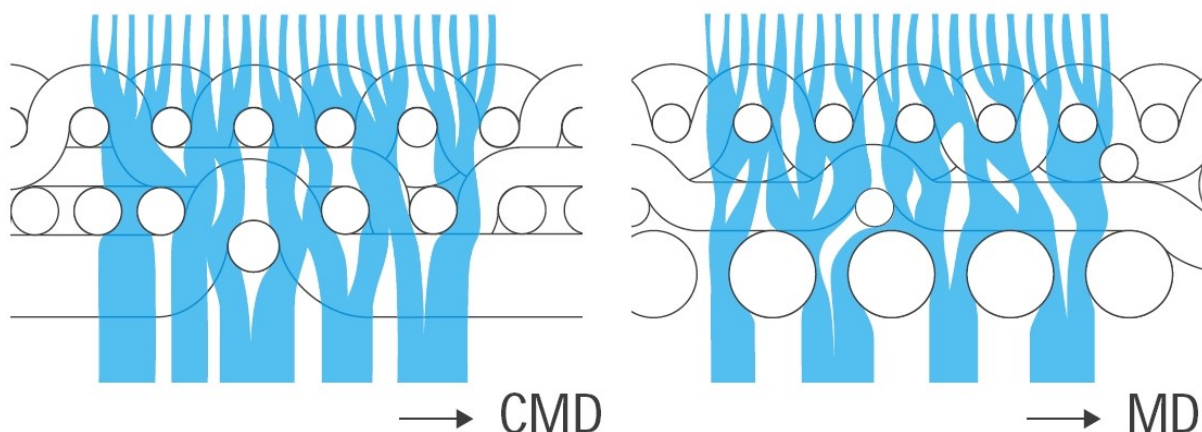


Abb. 2: Strömung durch das Sieb bei der Entwässerung

Diese Strömungsmuster entstehen aus der Überlagerung des feineren Webmusters der Papierseite und der gröber strukturierten Tragschicht. Den komplexen mehrlagigen Aufbau moderner Siebe zeigt **Abb. 3**. Abhängig von der Entwässerungsgeschwindigkeit und den Druckimpulsen an den Entwässerungselementen, setzt sich eine Siebmarkierung mehr oder weniger deutlich aus unterschiedlichen Webmustern zusammen.

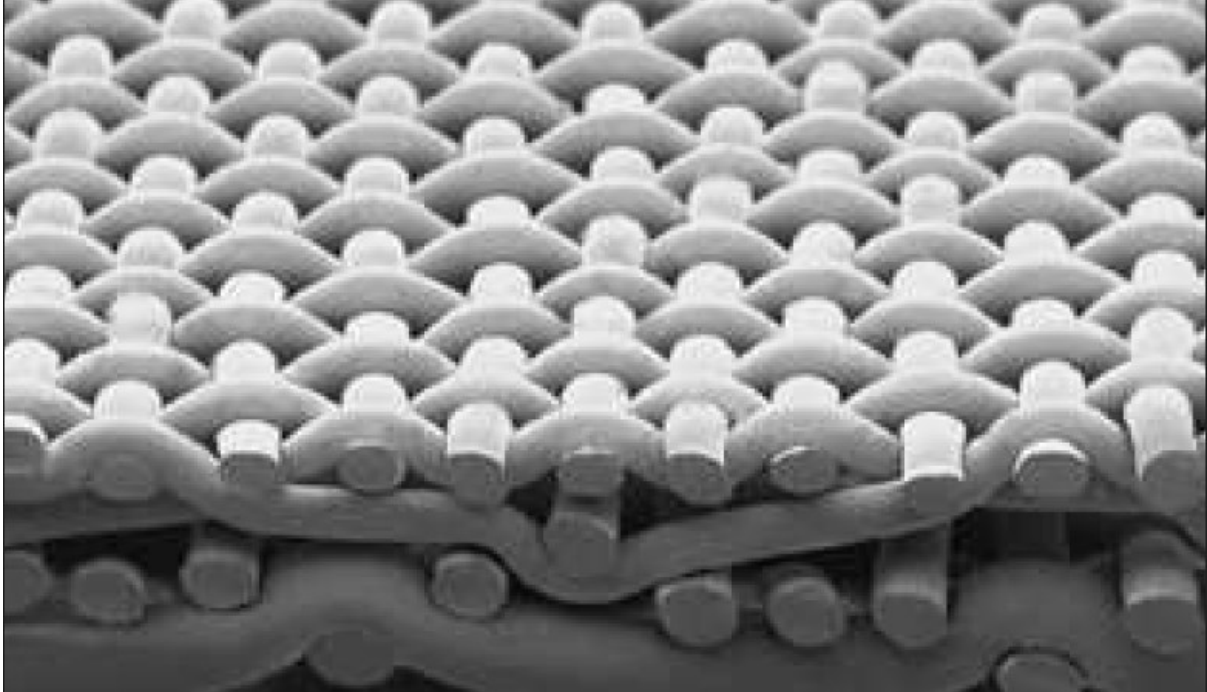


Abb. 3: Querschnitt durch eine dreilagige Gewebestruktur [7]

Die meisten modernen Papiermaschinen für graphische Papiere entwässern bei der Blattbildung von beiden Seiten, so dass das Faservlies zwischen zwei Sieben entsteht. Ober- und Untersieb Siebe sind in der Regel identisch aufgebaut. Im Papierblatt kommt es zur Überlagerung von zwei topographischen und zwei hydraulischen Markierungen.

2.1.2 Bildanalytische Vorverarbeitung

Die bei der Blattbildung ins Papier eingprägten und im Bild enthaltenen Siebmarkierungen sind als deterministisches Signal mit stochastischen Anteilen durch ungleichmäßige Faserverteilung (Flocken, Wolkigkeit) und weiteren deterministischen Anteilen wie z. B. Filzmarkierungen überlagert. Die deterministischen Signale von Siebmarkierungen aus dem Bild zu extrahieren, ist Ziel der Bildvorverarbeitung. Deterministische Anteile lassen sich mittels einer diskreten zweidimensionalen Fouriertransformation darstellen. Dazu wird das Bild vom Ortsbereich in den Frequenzbereich überführt. Die mathematischen Grundlagen dieser Transformation [8] und ihre Anwendung zur Analyse periodischer Strukturen in Papier sind in der Literatur ausführlich beschrieben [9,10]. Deshalb soll hier nur kurz auf die wesentlichen Eigenschaften eingegangen werden. **Abb. 4** soll die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieses Werkzeuges verdeutlichen.

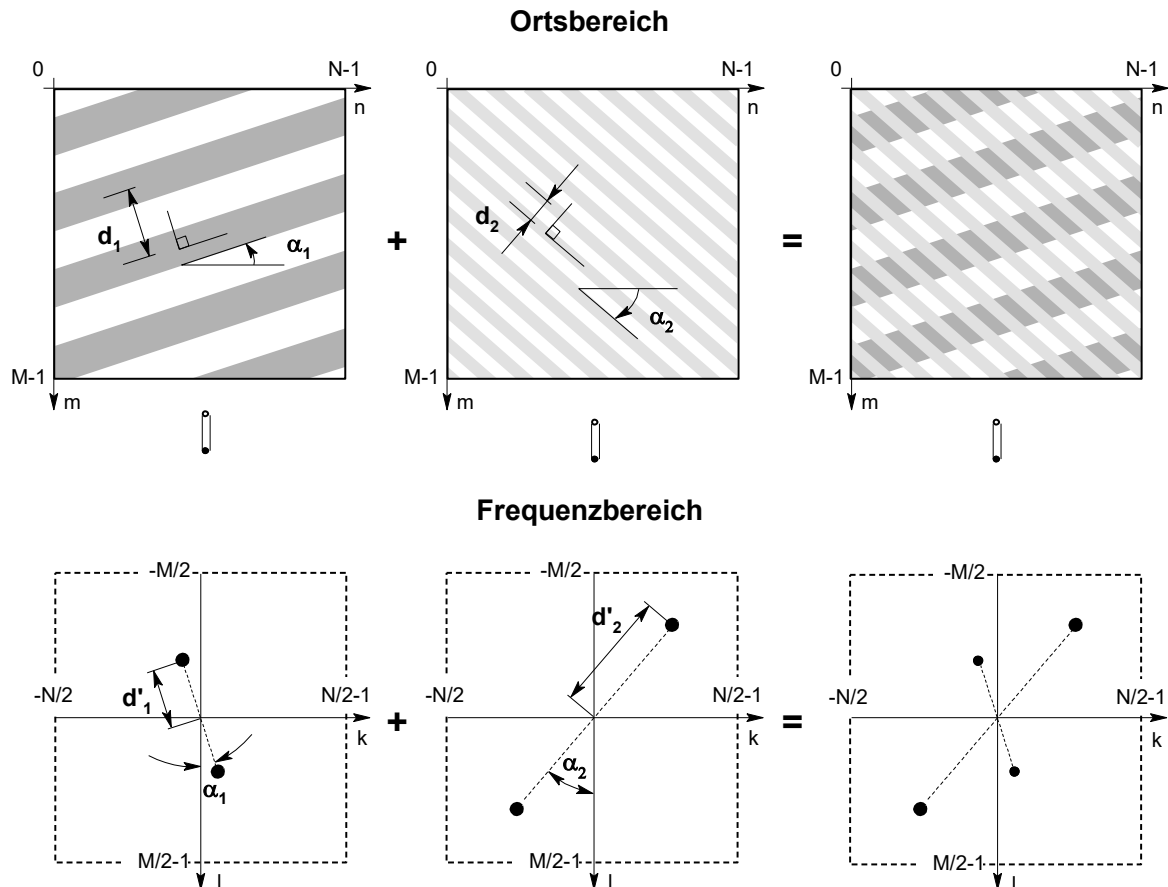


Abb. 4: Fouriertransformation überlagerter deterministischer Signale

Ein im Ortsbereich schräg über die Ebene verlaufendes Linienraster bzw. ein Wellenzug stellt sich im Frequenzbereich in Form zweier diskreter Peaks dar. Langwellige Strukturen im Ortsbereich werden durch Wellenfunktionen größerer Periode repräsentiert und liegen im Frequenzbereich näher am Ursprung als kurzwellige Strukturen, wie in **Abb. 4** dargestellt. Bis auf $k = -N/2$ und $l = -M/2$ sind die aus den konjugierten komplexen Fourierkoeffizienten berechneten Amplituden ursprungssymmetrisch. Die eher niederfrequenten stochastischen Anteile im Papier verteilen sich im Frequenzbereich um den Ursprung.

Der Orientierungswinkel α_i im Frequenzbereich, der neben dem Periodenabstand zur Beschreibung eines deterministischen Signals notwendig ist, steht orthogonal zu dem der Linien des Wellenzuges im Ortsbereich. **Abb. 4** verdeutlicht, dass ein Peak in Richtung des Wellenzugs weist. Diese Information über den Orientierungswinkel liefert die eindimensionale diskrete Fouriertransformation nicht, weshalb eine genaue Trennung mehrerer sich unter bestimmten Winkeln kreuzender periodischer Schwankungen nur im zweidimensionalen Spektrum möglich ist [8].

Aus den Koordinaten k_i und l_i eines Peaks im Frequenzbereich bzw. aus seinem Abstand zum Koordinatenursprung $d'_i = \sqrt{k_i^2 + l_i^2}$ lässt sich der Periodenabstand d_i im Ortsbereich berechnen

$$d_i = \sqrt{\left(\frac{k_i}{N}\right)^2 + \left(\frac{l_i}{M}\right)^2}^{-1} \quad (2.1)$$

mit: Anzahl der äquidistanten Bildpunkte in n-Richtung N
 Anzahl der äquidistanten Bildpunkte in m-Richtung M

Für $M = N$ vereinfacht sich die Berechnung des Periodenabstands d_i zu

$$d_i = \frac{N}{\sqrt{k_i^2 + l_i^2}} = \frac{N}{d'_i} \quad (2.2).$$

Für die Berechnung des tatsächlichen Abstands in Millimetern ist d_i mit dem Abstand zwischen den Bildpunkten, d. h. der Ortsauflösung Δx , zu multiplizieren.

Zur Detektion von Siebmarkierungen eignen sich Aufnahmen im Durchlicht. Mit der hochauflösenden Kamera Teli CS 3910 (1.300 Pixel * 1.030 Pixel) werden die im Durchlicht beleuchteten Papierproben mit einem Bildausschnitt von 102 mm * 102 mm aufgenommen. Die Ortsauflösung beträgt 100 μm , so dass sich Gewebemarkierungen bis 50 Drähte pro cm ohne Aliasingeffekte erfassen lassen. Typische Markierungen der papierzugewandten Siebseite liegen üblicherweise zwischen 20 cm^{-1} und 30 cm^{-1} . In Einzelfällen können hydraulische Markierungen mehrlagiger Siebe im Bereich bis 60 cm^{-1} und höher auftreten. Dies ist bei der Identifikation von Markierungen zu berücksichtigen. Für eine bessere Grauwertauflösung wurde in der Vorverarbeitung mit der Bildanalysesoftware Heurisko das Signal-Rauschverhältnis durch Mittelung über 16 Einzelbilder um 12 dB auf 70 dB erhöht. Dieser Schritt ist erforderlich, da die Proben nur einen geringen Grauwertumfang aufweisen. Die weitere Verarbeitung der Bildinformation erfolgt aufgrund des besseren Funktionsumfangs mit Matlab.

Abb. 5 zeigt das Originalbild und dessen Filterung im Ortsbereich. Ein „von Hann“-Filter macht das Bild für die nachfolgende Fourier-Transformation periodisch, so dass Peaks schärfer abgebildet werden.

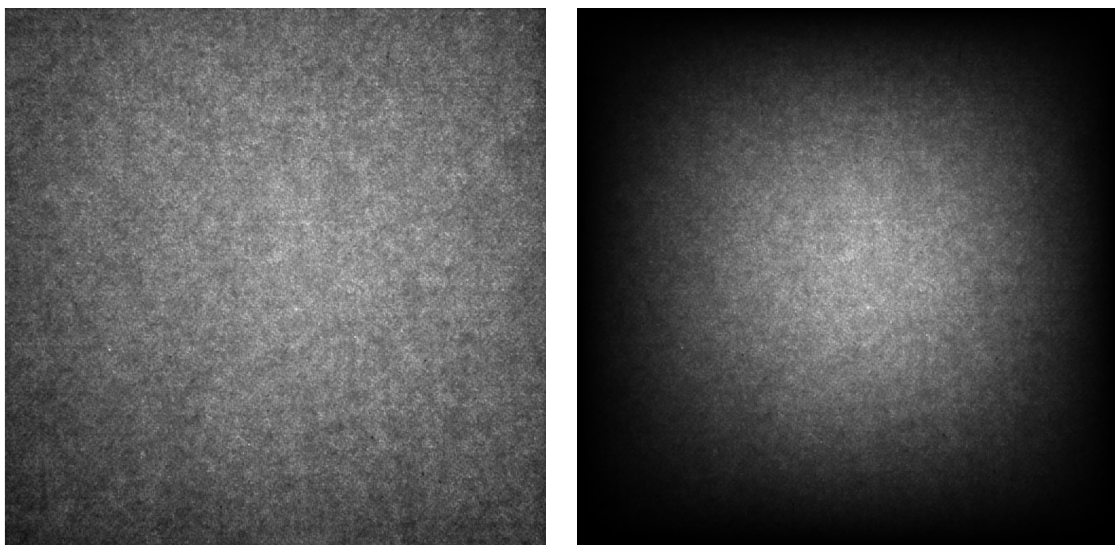


Abb. 5: Original und „von Hann“-gefiltertes Durchlichtbild im Ortsbereich

Die Fouriertransformierte liegt bei Matlab in komplexer Schreibweise in Form einer 1024 x 1024 Matrix vor. Die mit dem Faktor $1/\sqrt{M \cdot N}$ skalierten Beträge der Fourierkoeffizienten

$$|F(k,l)| = \sqrt{[\operatorname{Re}(F(k,l))]^2 + [\operatorname{Im}(F(k,l))]^2} \quad (2.3)$$

sind im Amplitudenspektrum über die beiden Ordnungszahlen k und l aufgetragen, wobei

$$-\frac{N}{2} \leq k \leq \frac{N}{2} - 1 \quad \text{und} \quad -\frac{M}{2} \leq l \leq \frac{M}{2} - 1 \quad \text{gilt.}$$

Das Amplitudenspektrum wird in zentrierter Form dargestellt, so dass der Nullpunkt bei den Ordnungszahlen $k = 0$ und $l = 0$ im Bildmittelpunkt liegt, wie in **Abb. 6a** dargestellt.

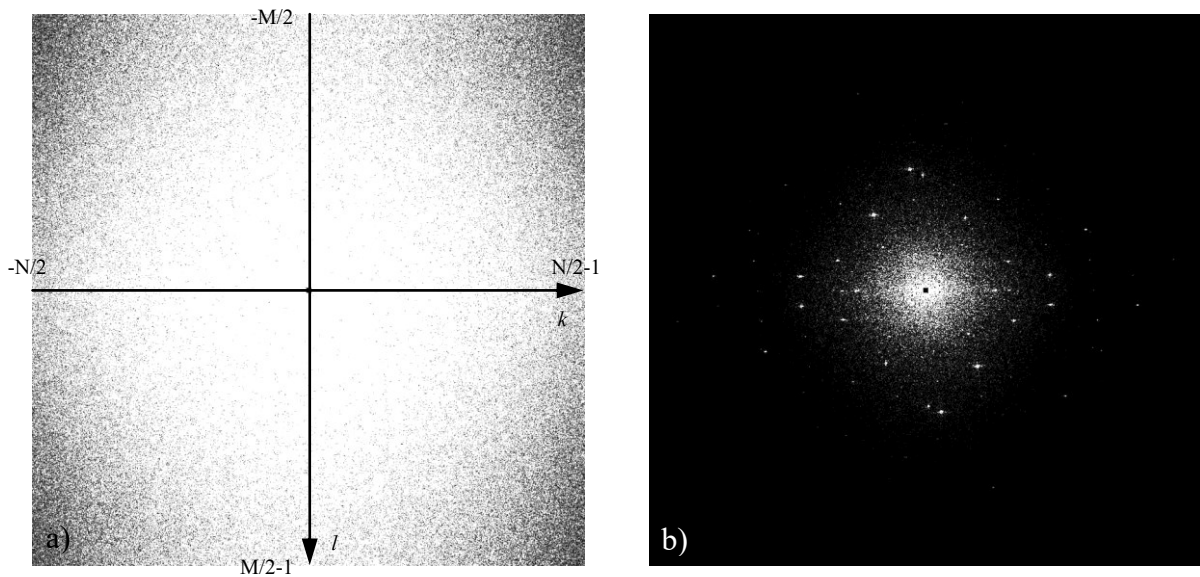


Abb. 6: Zentriertes zweidimensionales a) Amplituden- und b) Powerspektrum

Das individuelle Leistungsdichtespektrum (**Abb. 6b**), auch als Powerspektrum bezeichnet, wird analog zum zentrierten zweidimensionalen Amplitudenspektrum über k und l aufgetragen. Dazu werden die auf die Anzahl der Bildpunkte normierten Amplituden des zentrierten zweidimensionalen Amplitudenspektrums nach dem Satz von Parseval quadriert und durch die Anzahl der Bildpunkte N dividiert. Somit findet eine Aufteilung der Gesamtvarianz oder der Schwankungsintensität auf die einzelnen Ordnungszahlen bzw. die zugeordneten Frequenzen statt. Die Peaks einer intensiveren Markierung werden somit stärker hervorgehoben als die einer schwächeren Markierung. Die energiereichen Grundfrequenzen einer Markierung sind dadurch besser im Powerspektrum zu erkennen als deren harmonische Oberwellen.

Bei der klassischen Siebmarkierungsanalyse interessieren nur die Grundfrequenzen. Daher wird vorzugsweise das Powerspektrum genutzt, um die Ordnungszahl von Peaks zu ermitteln.

Die Genauigkeit der Abstandsmessung lässt sich deutlich verbessern, wenn man statt der Ordnungszahl des lokalen Maximums eines Peaks, seinen Schwerpunkt berechnet. Die Energie eines Peaks verteilt sich auf mehrere Punkte der unmittelbaren Umgebung. Um diese einzelnen Punkte besser erkennen und isolieren zu können, wird an dieser Stelle nicht mit dem Powerspektrum sondern mit dem Amplitudenspektrum gearbeitet.

Um Siebmarkierungen in **Abb. 7** erkennen zu können, muss das dargestellte Amplitudenspektrum erst mit einem Hochpass gefiltert werden. Es blendet die störenden stochastischen Anteile aus. Es handelt sich dabei um einen Filter mit endlicher Impulsantwort. Diese Finite-Impulse-Response-Filter (FIR-Filter) sind immer stabil und besitzen eine lineare Phase. Wichtig für diese Anwendung ist, dass es Impulse d. h. Peaks nicht verzerrt.

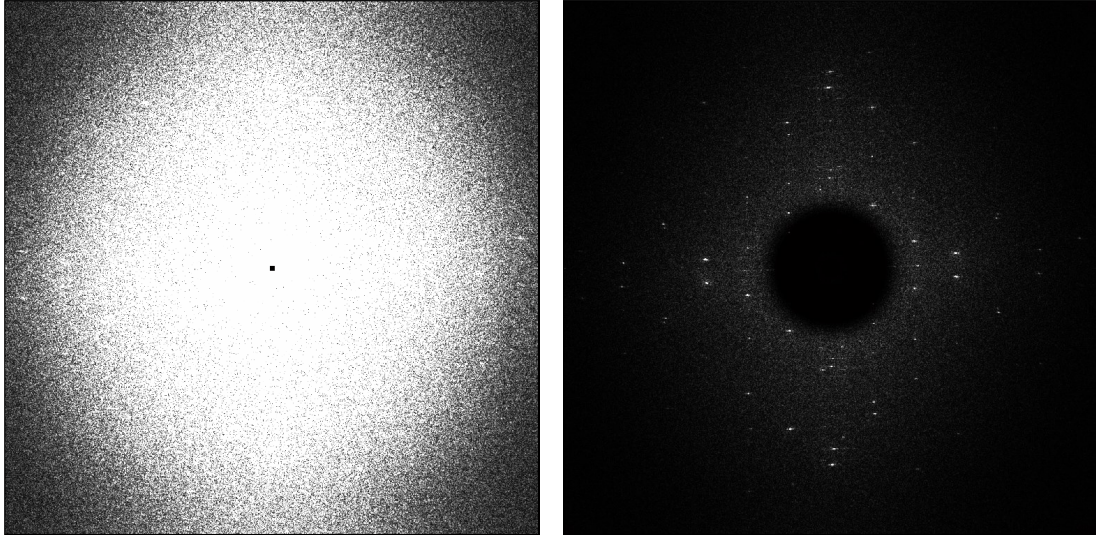


Abb. 7: Ungefiltertes und mit einem Hochpassfilter aufbereitetes Amplitudenspektrum

Das FIR-Filter ist auf gängige Siebmarkierungen abgestimmt. Zwischen den normalisierten Eckfrequenzen von 0,2 und 0,3 steigt die Amplitude der Filterkurve von 0 auf 0,5 und erreicht für hohe Frequenzen 1,0. Damit werden niedrige Frequenzen ausgeblendet, die Amplituden im Bereich der Grundfrequenzen von Siebmarkierungen halbiert und deren Oberwellen durchgelassen. Eine ausgewogene Filtercharakteristik mit einer ausreichenden Trennschärfe wurde mit ein FIR-Filter 40-ster Ordnung erreicht. Die Berechnung der Filterkoeffizienten erfolgt mit der Matlabfunktion „remez“, die auf dem Parks-McClellan Algorithmus beruht.

Im nächsten Schritt werden die Peaks vom Hintergrund getrennt, deren Amplitude größer oder gleich einem gewählten Schwellenwert ist. Um Willkür auszuschließen, wird der Schwellenwert solange gesenkt, bis die gewünschte Anzahl von Peaks erreicht ist. Unter dem Eingabeparameter „thres_level“ beim Start des Programms lassen sich entweder der Startschwellenwert oder die gewünschte Anzahl der Peaks festlegen. Bei Eingabe des Startschwellenwertes werden mindestens 20 Peaks gesucht. Jeder Peak wird in dieser Schleife um einen Bildpunkt ausgedehnt (Dilatation) und durch anschließendes Schrumpfen (Erosion) an den Ecken gerundet.

Nachdem iterativ die zur Markierungsanalyse notwendige Anzahl an Peaks erreicht ist, werden ihr Schwerpunkt und ihre Intensität aus dem unverfälschten Leistungsspektrum ermittelt, um ungefilterte Werte zu erhalten. Die Aufgabe der Bildanalyse ist mit der Ausgabe einer Liste mit den Koordinaten der Peaks und deren Anteil an der Gesamtvarianz abgeschlossen.

2.1.3 Siebmarkierungsgeometrie im Frequenzbereich

Die Erfahrung zeigt, dass Peaks, die im Frequenzraum auf einer gemeinsamen Gerade liegen und untereinander gleiche Abstände aufweisen, mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Sieb gehören. Der Aufbau eines Siebes ist für diesen geometrischen Zusammenhang verantwort-

lich. Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle der Aufbau eines Siebes im Orts- und Frequenzbereich näher beleuchtet.

Das Gewebe eines Siebes besteht aus Kett- und Schussfäden, wobei sich die Kettfäden parallel zur Laufrichtung der Papiermaschine und die Schussfäden in Querrichtung erstrecken. Um auf die Stabilität, Laufzeit und das Entwässerungsverhalten des Siebes sowie auf seine Markierungsgeometrie und -intensität Einfluss zu nehmen, wird eine große Vielfalt an Siebdesigns angeboten. Je nach Lagenanzahl der Schussfäden spricht man von ein-, zwei- oder dreilagigen Sieben. **Abb. 8** zeigt beispielhaft Siebstrukturen im Querschnitt.

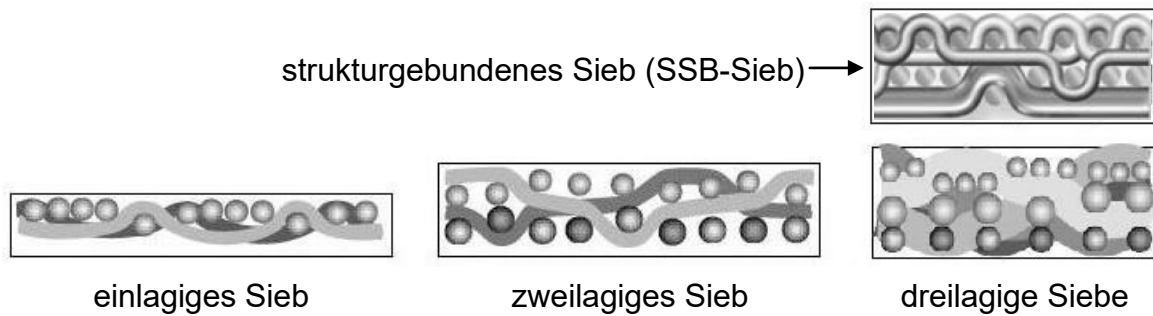


Abb. 8: Ein- und mehrlagige Siebe [7,11]

Das einfachste Design ist die so genannte Leinenbindung mit zwei Schäften in einlagiger Ausführung, wie in **Abb. 9** dargestellt. Solche Siebe erzeugen eine geringe Siebmarkierung, weisen aber geringe Stabilität und einen schnellen Verschleiß auf. Der Einsatz dickerer Drähte und weiterer Bindungsarten wirkt diesen Nachteilen entgegen, so dass einlagige 3- bis 5-Schaftsieve in vielen Tissue- und Papiermaschinen Verwendung finden. Die einlagigen Siebe genügen jedoch den höheren Ansprüchen der Herstellung graphischer Papiere nicht. Demzufolge werden hier zweilagige und zunehmend dreilagige Siebe eingesetzt [12].

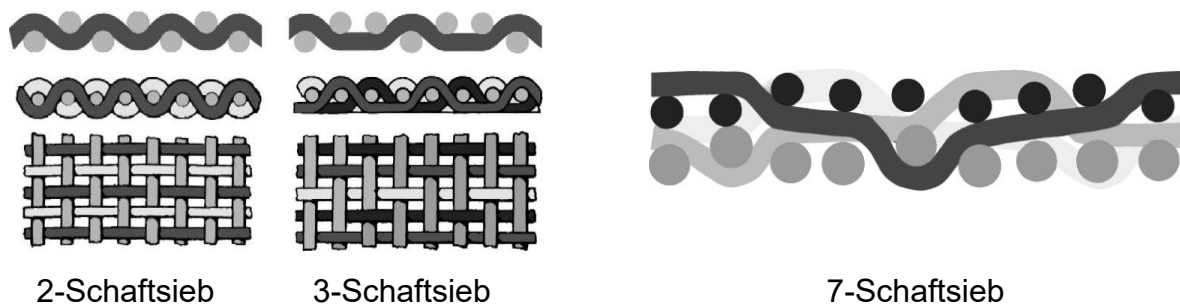


Abb. 9: Verschiedene Bindungsarten [13]

Unter den zweilagigen sind Bindungen mit 7-, 8-, 14- und 16-Schäften üblich [13], während bei den dreilagigen Sieben eine feine markierungsarme Leinenbindung auf der Papierseite und eine grobe abriebfeste höhere Schaftbindung auf der Laufseite bevorzugt werden [11,14]. Für graphische Papier sind dies die strukturgebundenen Siebe (SSB-Siebe) in 20-/5-Schaft- und zunehmend in 24-/6-Schaft-Bindung [7].

Neben der Lagenanzahl und der Bindungsart wird nach DIN 61101 ein Sieb durch den Bindungsrapport und die Steigungszahl charakterisiert [8], die für die Siebmarkierungsanalyse besonders wichtig sind. Der Bindungsrapport beschreibt die Bindungsgrundeinheit, also die kleinste Anzahl von Kett- und Schussfäden, die für ein Bindungsmuster, das ein Gewebe auf-

baut, benötigt wird. In **Abb. 10** ist bei einem zweilagigen 8-Schaftsweb ein solcher Rapport weiß umrahmt. Er besteht bei diesem Web aus 8 eng aneinander liegenden Kettfäden und 8 gleichmäßig entfernten Schussfäden. Durch eine waagerechte oder senkrechte Verschiebung des Rapportes um je weitere 8 Schuss- oder Kettfäden lässt sich das ganze Web darstellen.

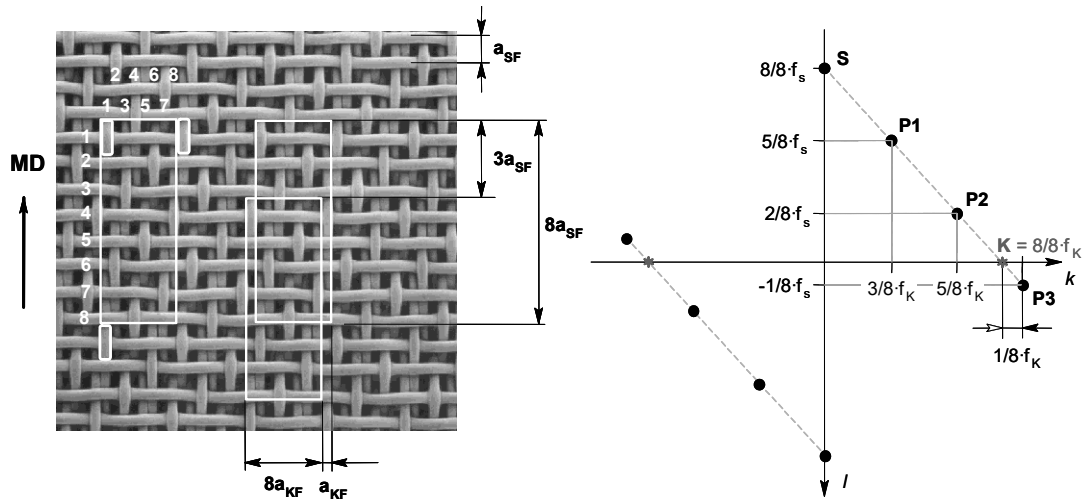


Abb. 10: Bindungsrapport und Steigungszahl im Orts- und Frequenzbereich

Wird der Rapport um einen Kettfaden nach rechts verschoben (beide Rahmen in **Abb. 10**), so findet sich das Muster erst 3 weitere Schussfäden nach oben wieder. Die Zahl 3 entspricht der Steigungszahl für dieses 8-Schaftsweb. Die Steigungszahl oder Versatzzahl ist die kleinste Anzahl an Verschiebungen in Schuss- oder Ketttrichtung, die nötig ist, um den Rapport zu wiederholen.

Im Frequenzbereich erscheint die Steigungszahl im Verhältnis zur Anzahl der Rapportfäden. Dieses Verhältnis sei in dieser Arbeit Rapportverhältnis V genannt. Für das in **Abb. 10** dargestellte Amplitudenspektrum mit den vier charakteristischen Peaks S, P1, P2 und P3 (sowie ihren zum Ursprung punktsymmetrischen Gegenstücke) beträgt das Rapportverhältnis $V = 3/8$, da das Web die Steigungszahl 3 und acht Rapportfäden aufweist. In diesem Verhältnis steht auch der Abstand zwischen benachbarten Peaks $|\overline{BP}|$ zum Gesamtabstand $|\overline{SK}|$ zwischen dem Peak S und dem Punkt K. Bei der Projektion dieser Abstände auf die Achsen ist ebenfalls dieses Rapportverhältnis zu finden, da die Peaks äquidistant sind.

$$\text{Es gilt: } \frac{|\overline{BP}|}{|\overline{SK}|} = \frac{3}{8} \quad \text{für } \overline{BP} = \{ \overline{S P1}; \overline{P1 P2}; \overline{P2 P3} \} \quad (2.4)$$

Das Rapportverhältnis V ist der gemeinsame Teiler einer Siebmarkierung im Frequenzbereich. Die Frequenzen von Schuss- und Kettfadenmarkierung bilden den Ausgangspunkt für alle Peaks einer Markierung. Für das Rapportverhältnis $V = 3/8$ sind in **Abb. 10** die daraus folgenden Koordinaten der Grundfrequenzen im Amplitudenspektrum ausgewiesen. Bei Webmustern mit ungeradem Rapportverhältnis tritt die Schuss- oder in der Regel die Kettfadenmarkierung nicht in Erscheinung.

Der Grund dafür wird beim Betrachten der Siebmarkierung in **Abb. 11** deutlich. In Kettfadenrichtung ($\beta_K = 90^\circ$) erscheint nur ein Bindungspunkt pro Rapport, während unter den Winkeln β_{P1} bis β_{P2} acht Bindungspunkte pro Rapport auftreten. Der höhere Abstand der Bindungs-

punkte und die damit verbundene geringere Intensität führen dazu, dass im Amplitudenspektrum ein Kettfadenpeak im Schnittpunkt mit der k-Achse fehlt.

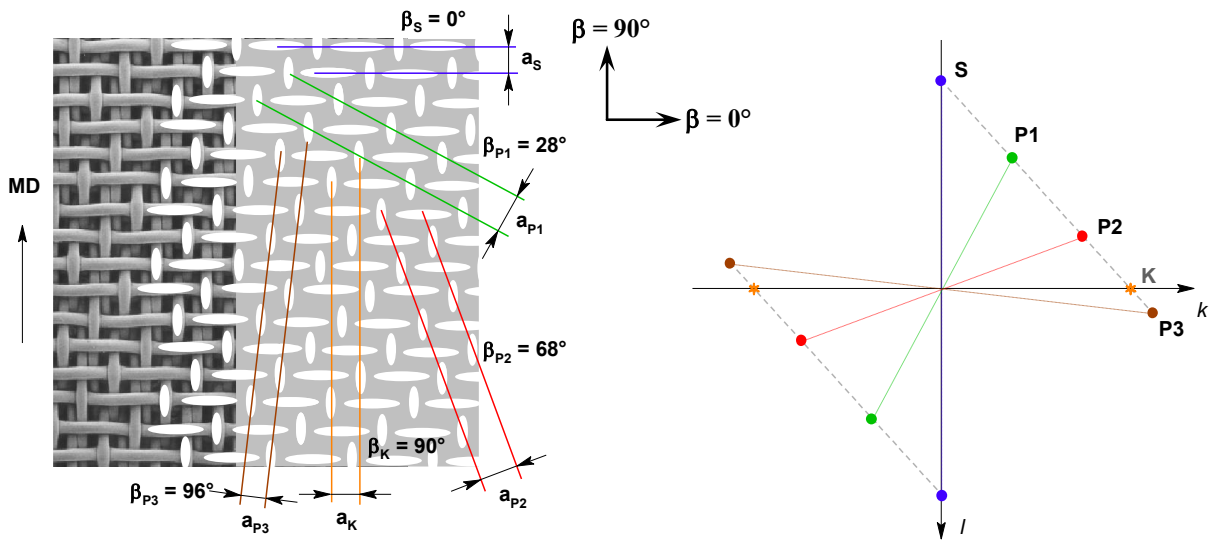


Abb. 11: Siebmarkierungen eines zweilagigen 8-Schaftsieves im Orts- und Frequenzbereich

Trotz der großen Vielfalt an Siebdesigns ist die Anzahl der Rapportverhältnisse begrenzt, was die Analyse im Frequenzbereich stark erleichtert. Die gängigsten Rapportverhältnisse sind für zweilagige Siebe $V = 3/7$ und $3/8$ sowie $V = 4/8 = 1/2$ für dreilagige Siebe mit Leinwandbindung auf der Papierseite.

Abb. 12 zeigt die charakteristischen Peaks eines zweilagigen 7-Schaftsieves mit $V = 3/7$ und die eines dreilagigen Siebes mit Leinwandbindung auf der Papierseite mit $V = 1/2$. Bei den Kettfadenpeaks dreilagiger Siebe mit $V = 1/2$ handelt es sich um tatsächlich existierende Peaks, im Gegensatz zu denen der zweilagigen Siebe mit $V = 3/7$ sowie $V = 3/8$, die im Amplitudenspektrum nicht erscheinen.

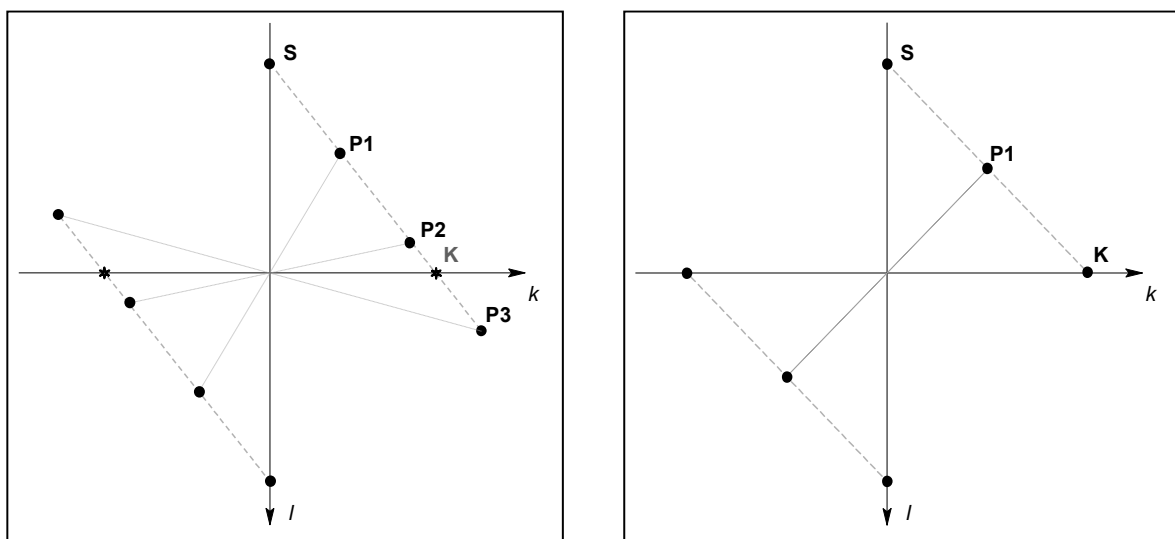


Abb. 12: Markierungen eines a) zweilagigen 7-Schaftsieves und b) dreilagigen Siebes mit Leinwandbindung

Für alle Rapportverhältnisse gilt, dass die Winkel und die Frequenz von Symmetrielinien im Webmuster direkt mit Peaks im Frequenzbereich korrespondieren. Sie bilden die Grundstruktur, wie in **Abb. 11** und **Abb. 12** dargestellt. Der Peak S repräsentiert die Ausrichtung und die Frequenz der Schussdrähte, die im Ortsbereich horizontal verlaufen. Die vertikal verlaufenden Kettfäden treten bei einigen Webmustern nicht in Erscheinung. Dennoch lässt sich die Position des Kettfadenpeaks K rechnerisch ermitteln. Da die Kettfäden in der Papiermaschine grundsätzlich in Laufrichtung ausgerichtet sind, ist damit die Ausrichtung der Papierprobe bestimmt.

Zur Beschreibung einer Siebmarkierung im Frequenzbereich genügen zwei Vektoren: der Vektor $\vec{P_1S}$, der mit $\vec{P_2P_1}$ und $\vec{P_3P_2}$ identisch ist, und der dazugehörige Ortsvektor $\vec{P_1}$. Diese Vektoren werden in dieser Arbeit als Rapportvektor \vec{R} bzw. Rapportortsvektor \vec{RO} bezeichnet. Die Addition ganzzahliger Vielfache dieser Vektoren führt zu den Peaks der Grundfrequenzen sowie deren Oberwellen. **Abb. 13** zeigt das Amplitudenspektrum eines Zeitungsdrukspapiers, das auf einer Doppelsiebmaschine hergestellt wurde. Die Anzahl der Peaks wurde so gewählt, dass auch die harmonischen Oberwellen erfasst werden. Aus den Peaks S, P1, P2 und P3 ergibt sich das Rapportverhältnis V , der Rapportvektor \vec{R} sowie der Rapportortsvektor \vec{RO} . Aber auch alle anderen Peaks einer Markierung lassen sich in die Berechnung einbeziehen, um die Genauigkeit des Verfahrens zu erhöhen. Der Zusammenhang lässt sich mathematisch definieren:

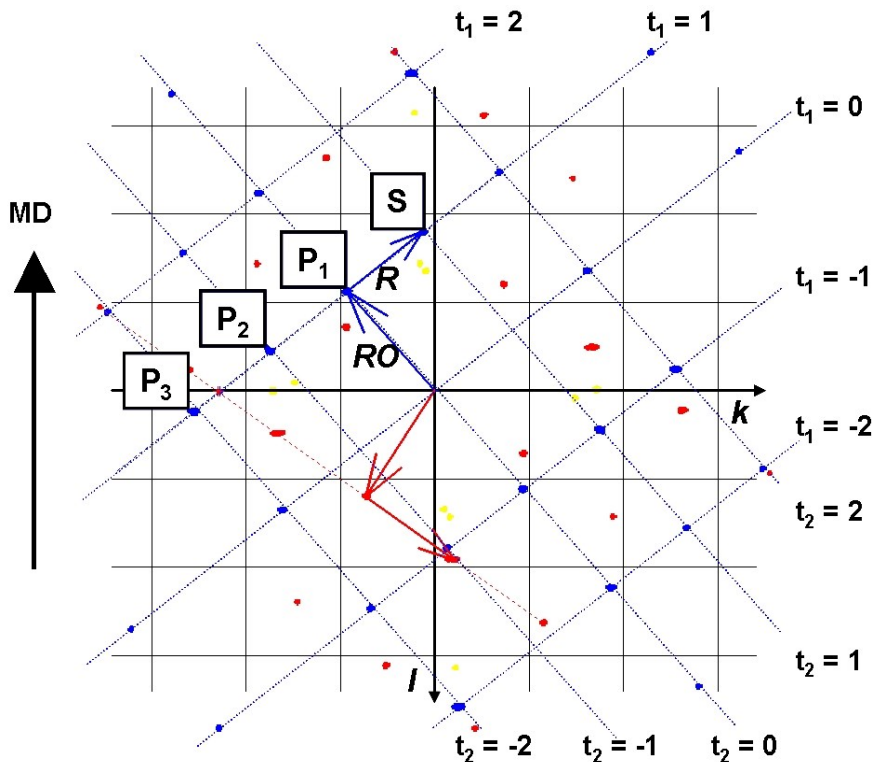


Abb. 13: Markierungen des Obersiebs eines Doppelsiebformers

Die Menge W von Peaks einer Siebmarkierung kann als Abbildung von t_j aus der Menge der ganzen Zahlen \mathbb{Z}^2 mit der Matrix a_{ij} auf y_i in \mathbb{R}^2 , d. h. als Transformation $\mathbb{Z}^2 \xrightarrow{a_{ij}} \mathbb{R}^2$

$$W = \{y \in \mathbb{R}^2 : y_i = a_{ij} t_j : t_j \in \mathbb{Z}^2\} \quad (2.5)$$

beschrieben werden. Für eine der beiden Siebmarkierung sind in **Abb. 13** und **Abb. 14** Hilfslinien im Intervall $t = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix}$ bis $t = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$ eingezeichnet.

2.1.4 Überlagerung von Siebmarkierungen

Bei der Analyse graphischer Papiere findet man in der Regel topographische Markierungen auf beiden Seiten der Papierprobe. Im Durchlicht überlagern sich die beiden Markierungen. In **Abb. 13** sind die Peaks des Obersiebs und in **Abb. 14** die des Untersiebs markiert.

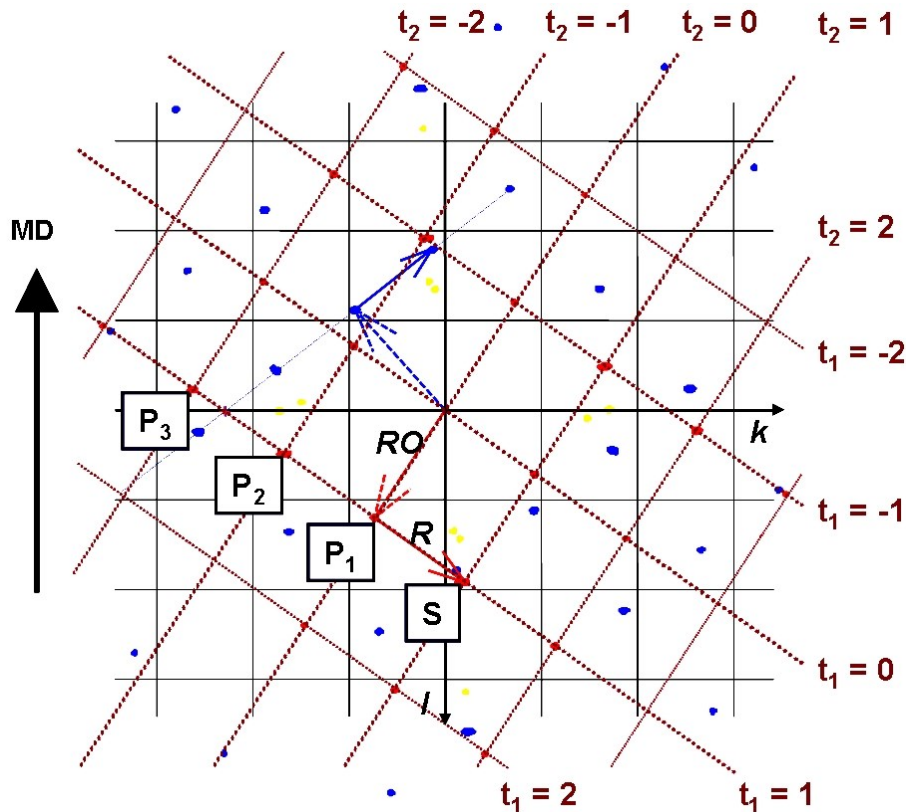


Abb. 14: Markierungen des Untersiebs eines Doppelsiebformers

Im dargestellten Fall stehen die Markierungen von Ober- und Untersieb spiegelbildlich zueinander. Obwohl beide Siebe vom Webmuster nahezu identisch sind, überlagern sich nur wenige Peaks, was der Markierungsfreiheit des Papiers zugute kommt. Oftmals berühren sich die Schussfadenpeaks. Ermittelt die Bildanalyse dann ein gemeinsames Zentrum, so führt dies in der klassischen Siebmarkierungsanalyse zu unvorhersehbaren Fehlern.

In einzelnen Fällen kommt es vor, dass Siebe kombiniert werden, die sich im Amplitudenspektrum weitgehend überlagern und die Markierungsintensität im Papier erhöhen.

Durch die Glättung der Papieroberfläche oder durch Auftragen einer Deckschicht (Coating) können topografische Markierungen so stark gedämpft werden, dass sie sich im Amplitudenspektrum nicht mehr isolieren lassen.

2.2 Clusteranalyse periodischer Strukturen

Clusteralgorithmen gehören zu den wichtigen Methoden der Datenanalyse. Im Allgemeinen treten Strukturen und funktionale Zusammenhänge in Form von Häufungspunkten auf, die mit Clustermethoden gefunden werden können. Das Ziel der Clustermethoden in der Siebmarkierungsanalyse ist es, die Koordinaten der Amplitudenspitzen im Frequenzbereich (Peaks) zu untersuchen und auszuwerten.

Das Problem bei der Auswertung dieser Peaks liegt darin, dass sie keine Häufungspunkte besitzen, sondern sich wie in **Abb. 14** dargestellt, in ihrer geometrischen Anordnung durchdringen. Die den Clustermethoden zugrundeliegenden Ähnlichkeits- oder Distanzmaße müssen an das Problem angepasst werden, um sie anwenden zu können. Alternativ lässt sich der zu klassifizierende Datensatz mit Hilfe der Transformationsvorschrift in **Gl. 2.5** auf ein gemeinsames t normieren, so dass zusammengehörige, aber räumlich getrennte Datenpunkte zusammengeführt werden. Damit eröffnen sich alle Möglichkeiten der Ähnlichkeitsermittlung bei metrischer Variablenstruktur [15].

2.2.1 Bestimmung der Distanzwerte

Betrachtet man eine einzelne Siebmarkierung, so stellen alle y der Menge W nach Gl. 2.5 Prototypen ihrer Peaks dar. Maßgeblich für die Zugehörigkeit eines Punkts x_k des zu klassifizierenden Datensatz $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ ist die Euklidische Distanz (L_2 -Norm) zum nächstliegenden Prototyp in $W = \{y \in \mathbf{R}^2 : y_i = a_{ij} t_j : t \in \mathbf{Z}^2\}$

$$d(x_k, a_{ij}) = \|x_k - a_{ij} t_j\| \quad (2.6).$$

Im Bereich $d(x_k, a_{ij}) < \frac{1}{2} \|a_{ij}\|$ kann mit der Funktion floor, die auf ganze Zahlen abrundet, t_j bestimmt werden

$$t_j = \text{floor}(a_{kj}^{-1} x_k + 0,5) \quad (2.7).$$

Die Distanz $d(x_k, a_{ij})$ zum nächstliegenden Prototyp wächst mit t , so dass äußere Punkte trotz identischer Zugehörigkeit größere Abstände aufweisen. Es besteht zudem die Gefahr, dass der Bereich $d(x_k, a_{ij}) < \frac{1}{2} \|a_{ij}\|$ überschritten wird. Die Lösung liegt in der Berechnung des Distanzwertes über den relativen Abstand des Datenpunktes zum nächstliegenden Prototyp. Mit **Gl. 3.2** berechnet sich $d(x_k, a_{ij})$ zu

$$d(x_k, a_{ij}) = \left\| \frac{x_k}{a_{ij} t_j} - 1 \right\| \quad (2.8).$$

2.2.2 Fuzzy-Clustering

Eine Motivation für die Anwendung von Fuzzy-Clustermethoden liegt in dem Konzept der Zugehörigkeitsgrade. Die variablen Zugehörigkeitsgrade erlauben einen effizienten Umgang mit überlagerten oder überzähligen Datenpunkten. In der Siebmarkierungsanalyse tritt relativ häufig der Fall auf, dass sich Peaks unterschiedlicher Markierungen mehr oder weniger überlagern. Die Bildanalyse ermittelt den gemeinsamen Schwerpunkt und integriert die Markierungsintensität über die Fläche. Die harte Klassifizierung würde diesen Punkt zu 100 % einem der Cluster zuordnen. In der Folge geht dieser Punkt mit ungenauen Koordinaten und übergroßer Intensität in die Berechnungen ein.

Im Fall des Fuzzy-Clustering wird der überlagerte Datenpunkt anteilig den Clustern zugeordnet. Während eindeutige Peaks Zugehörigkeitsgrade von mehr als 0,99 erreichen, liegen sie bei überlagerten Punkten deutlich niedriger. Dass der Zugehörigkeitsgrad bei der Berechnung der Clusterausrichtung berücksichtigt wird, reduziert den Fehler der Markierungsanalyse. Dieser Zugehörigkeitsgrad wird ebenfalls genutzt, um Markierungsintensitäten überlagerter Peaks zuzuordnen.

Wie bereits dargestellt, wird eine Siebmarkierung nach Gl. 2.5 durch die Transformationsmatrix b_{ij} eindeutig festgelegt. Um eine Siebmarkierung zu repräsentieren, sind mit dem Clusterzentrum 4 Freiheitsgrade verbunden, die einzeln oder in Gruppen optimiert werden müssen.

Der Vergleich unterschiedlicher Fuzzy-Clustermethoden bringt Aufschluss hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und der erreichbaren Freiheitsgrade [16]. Die Clusterzentren des einfachsten und zugleich am weitesten verbreiteten Verfahrens, der Fuzzy c-Means-Methode (FCM) [17], besitzen im zweidimensionalen Raum 2 Freiheitsgrade, so dass 2 Zentren nötig wären, um eine Siebmarkierung abzubilden. Mit den im Folgenden kurz vorgestellten Verallgemeinerungen und Erweiterungen des FCM-Verfahrens lassen sich höhere Freiheitsgrade realisieren.

Ein Fuzzy-Clusterverfahren, das einen Datensatz nicht in kugelförmige Cluster aufteilt, ist der Fuzzy-C-Varieties-Algorithmus (FCV). Er eignet sich zur Erkennung von Linien, Ebenen und Hyperebenen. Jeder Cluster wird als r -dimensionale lineare Mannigfaltigkeit dargestellt [16]. $r \in \{0, \dots, p-1\}$, p ist die Dimension des Vektorraums, hier R^2 . Der Prototyp eines Clusters $b_i = (z_i, \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ir}\})$ besteht aus einem Punkt z_i sowie r linear unabhängige Richtungsvektoren der Länge 1, die einen unendlich ausgedehnten linearen Unterraum aufspannen. Das Distanzmaß ergibt sich aus dem Abstand zu diesem Unterraum. Für den Datensatz $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ und den Vektor $B = \{b_1, \dots, b_c\}$ von Prototypen ist der Abstand $d^2(x_k, b_i)$ definiert als

$$d(x_k, b_i) = \|x_k - z_i\|^2 - \sum_{j=1}^r \left((x_k - z_i)^T e_{ij} \right)^2 \quad (2.9).$$

Für $r = 1$ besteht der Unterraum aus einer Geraden. Man spricht von der Fuzzy c-Lines Methode (FCL). Die FCL-Methode besitzt $r+2$ Freiheitsgrade. Zwei entfallen auf die Position des Clusterzentrums und eine auf den Richtungsvektor. Die Steigung der Geraden kann mit der Principal Component Analyse (PCA) oder der Minor Component Analyse (MCA) aus den Eigenwerten der Fuzzy-Kovarianzmatrix berechnet werden [18].

Kombiniert man die FCM-Methode mit der FCV-Methode, so entsteht das Fuzzy c-Elliptotypes Clustering (FCE). Es erweitert das FCV-Modell um einen Gewichtungsfaktor α , der in die Berechnung des Abstands eingeht zu

$$d(x_k, b_i) = \|x_k - z_i\|^2 - \alpha \sum_{j=1}^r \left((x_k - z_i)^T e_{ij} \right)^2 \quad (2.10).$$

Für kleine α dominiert der kugelförmige Einfluss des FCM-Anteils. Da α eine Konstante ist, wird die Zahl der Freiheitsgrade nicht erhöht. Die Berechnungsgrundlagen unterscheiden sich nicht vom FCV-Algorithmus [19].

Um die notwendige Zahl der Freiheitsgrade zu erreichen, bietet sich eine modifizierte FCL-Methode an. Wählt man die Dimension des Vektorraums zu $r = 2$, so besteht der Prototyp eines Clusters $b_i = (z_i, \{e_{i1}, e_{i2}\})$ aus einem Punkt z_i sowie 2 linear unabhängigen Richtungsvektoren der Länge 1. Führt man die Längenfaktoren l_i ein, so lassen sich die Clusterzentren z_i als Vektorsumme mit insgesamt 4 Freiheitsgraden darstellen:

$$z_i = l_{i1} e_{i1} + l_{i2} e_{i2} \quad (2.11).$$

Aus **Gl. 2.11** ergibt sich die zu $b_i = (z_i, \{e_{i1}, e_{i2}\})$ äquivalente Darstellung des Prototyps eines Clusters als Matrix

$$b_i = l_{i1}e_{i1} + l_{i2}e_{i2} = a_{ijk} \quad (2.12),$$

so dass der Abstand $d(x_k, a_{ij})$ nach **Gl. 2.8** berechnet werden kann. Die Richtungsvektoren werden in zwei Schritten aus den Eigenwerten von Fuzzy-Kovarianzmatrizen ermittelt, wobei der Datensatz $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ zunächst auf die Ursprungsgerade $t_1 = 0$ abgebildet wird. Durch die Punktsymmetrie des Amplitudenspektrums gruppieren sich die Punkte eines Clusters entlang dieser Ursprungsgeraden, so dass deren Ausrichtung für einen Richtungsvektor bestimmt werden kann. Im zweiten Schritt wird der Datensatz auf die Ursprungsgerade $t_2 = 0$ projiziert und der Eigenvektor berechnet. Die Abbildung des Datensatzes auf den Punkt $t = \{1, 1\}$ ermöglicht es, die Clustercenter z_i , die Zielfunktion und die Zugehörigkeiten analog der FCL-Methode zu ermitteln.

2.2.3 Initialisierung der Clusterprototypen

Jede Siebmarkierung lässt sich nach **Gl. 2.5** durch eine Transformationsmatrix $\mathbf{b} = (b_{ij})$ darstellen. Es ist die Aufgabe der Initialisierung, alle möglichen \mathbf{b} aus dem Datensatz $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ zu extrahieren, zu bewerten und auf Redundanz zu prüfen. Da Siebmarkierungen sehr dicht nebeneinander liegen können, sollen die Clusterprototypen mit einer optimalen Ausrichtung initialisiert werden. Durch die Auswahlkriterien werden die einzelnen Siebmarkierungen erkannt und Artefakte im Datensatz ausgeschlossen.

Die systematische Suche erzeugt alle möglichen Matrizen $\mathbf{a}_k = (a_{kij}) = (x_k - x_i, x_k - x_j)^{-1}$ die Vektoren $\mathbf{F} = x_k - x_i$ und $\mathbf{G} = x_k - x_j$ für $k = 1 \dots n-2$, $i = k \dots n-1$ und $j = i \dots n$. Deren Beträge $|\mathbf{F}|$ und $|\mathbf{G}|$ müssen sich im Fangbereich befinden. Der Winkelbereich wird mit der Bedingung

$$\left| \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{G}}{|\mathbf{F}| |\mathbf{G}|} \right| \leq 0,5 \text{ auf } 90^\circ \pm 30^\circ \text{ eingeschränkt. Als Auswahlkriterien bei redundanten Matrizen wird}$$

zunächst ihre L_1 -Norm (City-Block-Metrik), dann die Intensität der von \mathbf{a}_k tangierten Peaks herangezogen. Das Ergebnis ist ein Vektor von Transformations-Matrizen $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_c\}$ als Clusterprototypen.

2.3 Analyse der Siebmarkierungsgeometrie

Die vorangestellten Stufen erzeugen ein präzises Abbild der Siebmarkierung. Nun gilt es die gewonnenen geometrischen Daten auszuwerten. Dazu werden folgende Schritte durchlaufen:

1. Rapportverhältnisse bestimmen,
2. Maschinenrichtung im Papier berechnen,
3. Markierungen in Maschinenrichtung ausrichten,
4. Scherwinkel der Schussfadenmarkierungen auslesen,
5. Schuss- und Kettfadendichte ermitteln und
6. Längsdehnung, Querschrumpfung und Siebverformung iterativ entkoppeln.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge dargestellt und die Berechnungsgrundlagen erläutert.

2.3.1 Zusammenhänge im Orts- und Frequenzbereich

Im Rapportverhältnis V teilt der Rapportvektor \vec{R} den Vektor \vec{KS} , der Kett- und Schussfadenpeak verbindet. Es gilt

$$V = \frac{\vec{R}}{\vec{KS}} \quad (2.13).$$

In der Regel ist der Kettfadenpeak K und damit der Vektor \vec{KS} unbekannt. Um V aus einer Liste möglicher Rapportverhältnisse auszuwählen, bestimmt

$$V \approx \frac{\vec{S}}{\vec{R}} \quad (2.14)$$

das Rapportverhältnis V näherungsweise.

Bei der bisherigen Betrachtung verlaufen die Kett- bzw. Schussfäden genau in MD bzw. CD und stehen somit jeweils senkrecht zur k - bzw. l -Koordinatenachse des Amplitudenspektrums. In der Praxis ist das Papier bei der Messung nie exakt in Laufrichtung ausgerichtet sondern ist, wie in **Abb. 15** dargestellt, um einen unbekanntem Winkel α gedreht. Eine Bestimmung der Kett- und Schussmarkierungsabstände ohne Korrektur des Bezugssystems würde falsche Ergebnisse liefern. Daher ist es notwendig, die Maschinenrichtung im Papier zu bestimmen und die Markierungen in Maschinenrichtung auszurichten. Der Winkel α ergibt sich direkt aus den Polarkoordinaten des Kettfadenpeaks, da Kettfäden grundsätzlich in Maschinenrichtung zeigen. Aus der Schussmarkierung S , dem Rapportvektor \vec{R} und dem Rapportverhältnis V ergibt sich die Kettfadenmarkierung

$$\vec{K} = \vec{S} - \frac{\vec{R}}{V} \quad (2.15).$$

Identische Winkel α müssen sich aus den Markierungen von Ober- und Untersieb ergeben.

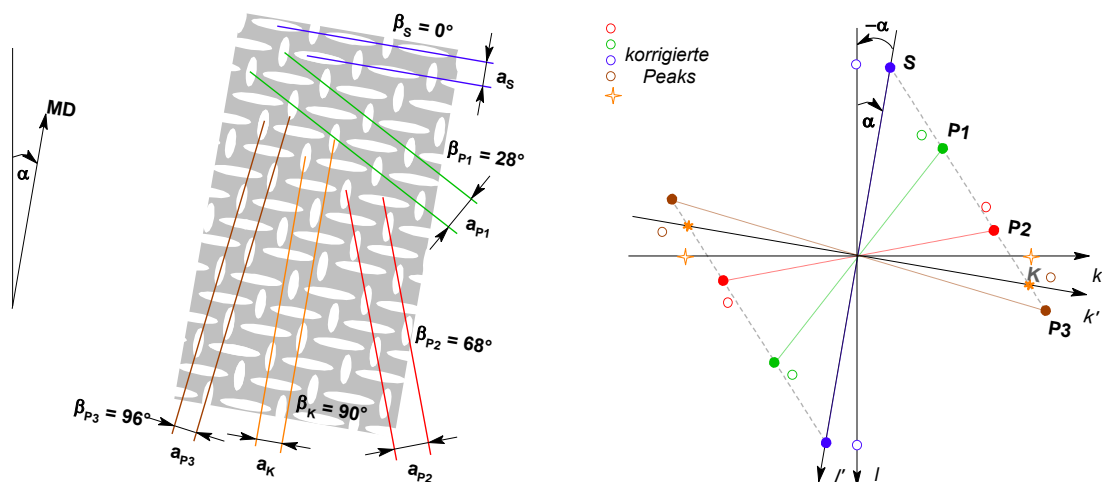


Abb. 15: Drehung einer Siebmarkierungen im Orts- und Frequenzbereich

Erst nach der Ausrichtung des Koordinatensystems in Maschinenrichtung lassen sich Abweichungen des Schussfadenwinkels eindeutig erkennen. Besonders bei Doppelsiebformern verziehen sich Gewebe unter der Kraft des auftreffenden Suspensionsstrahls. Die gekröpften Bindungen der Kett- und Schussfäden bilden dabei die Gelenke. Wie aus **Abb. 16** ersichtlich,

bleiben die Kettfäden in Maschinenrichtung ausgerichtet, während die Schussfäden um den Winkel β_S von der Querrichtung abweichen. Durch die Scherung schrumpft das Sieb in der Breite. Dabei rücken die Kettfäden näher zusammen, d. h. der Kettfadenabstand a_K verringert sich. Aber auch die Schussdrähte nähern sich mit steigendem Scherwinkel an. Mit kleinerem Schussfadenabstand a_S reduziert sich die offene Fläche des Siebs, wodurch die Entwässerung leidet.

Da die Länge des Siebs durch die Papiermaschine bestimmt wird und sich durch den Verzug nicht ändert und auch die Anzahl der Schussdrähte konstant bleibt, kann sich die Schussfadendichte in Maschinenrichtung nicht ändern. Das bedeutet im Frequenzbereich, dass der Siebverzug, wie in **Abb. 16** dargestellt, Peaks nur horizontal verschieben kann. Dieser Feststellung ist von grundlegender Bedeutung für die Dehnungsmessung.

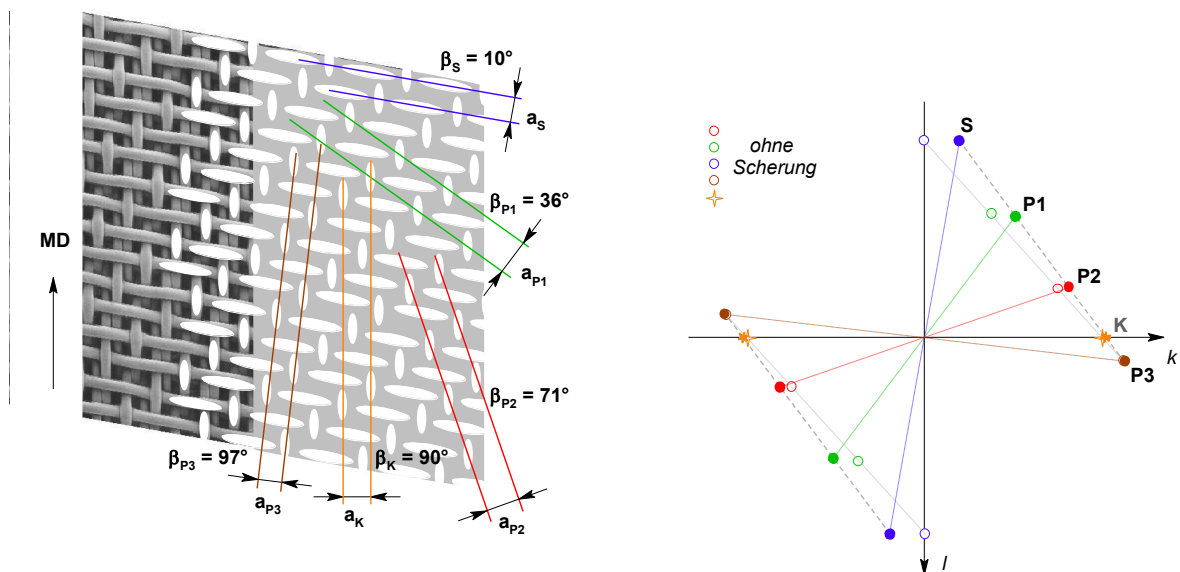


Abb. 16: Scherung einer Siebmarkierung

Durch die Dehnung des Papiers in Maschinenrichtung wird auch die Markierungsgeometrie in diese Richtung gelängt. Die Längsdehnung verändert im Frequenzbereich nur die l -Koordinate der Peaks. Sie rücken näher an die k -Achse, wie **Abb. 17** verdeutlicht.

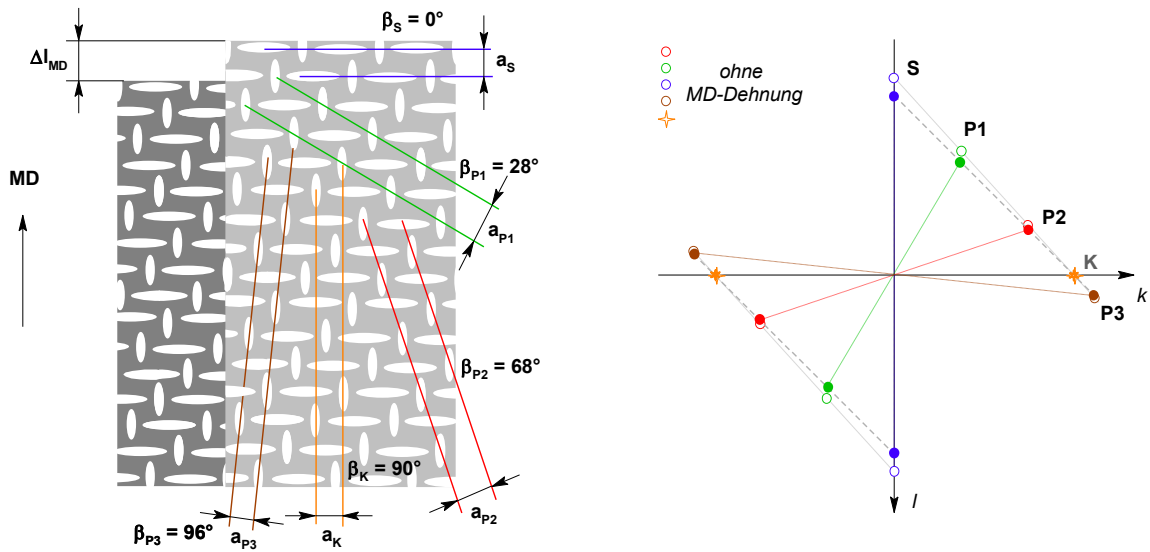


Abb. 17: Siebmarkierung eines in MD gedehnten Papiers

Mit der Querschrumpfung des Papiers schrumpft auch die Markierungsgeometrie im Ortsbereich. Im Frequenzbereich verändert sich nur die k -Koordinate der Peaks. Sie entfernen sich von der l -Achse. Den einfachsten Fall, wenn kein Siebverzug vorliegt, verdeutlicht **Abb. 18**.

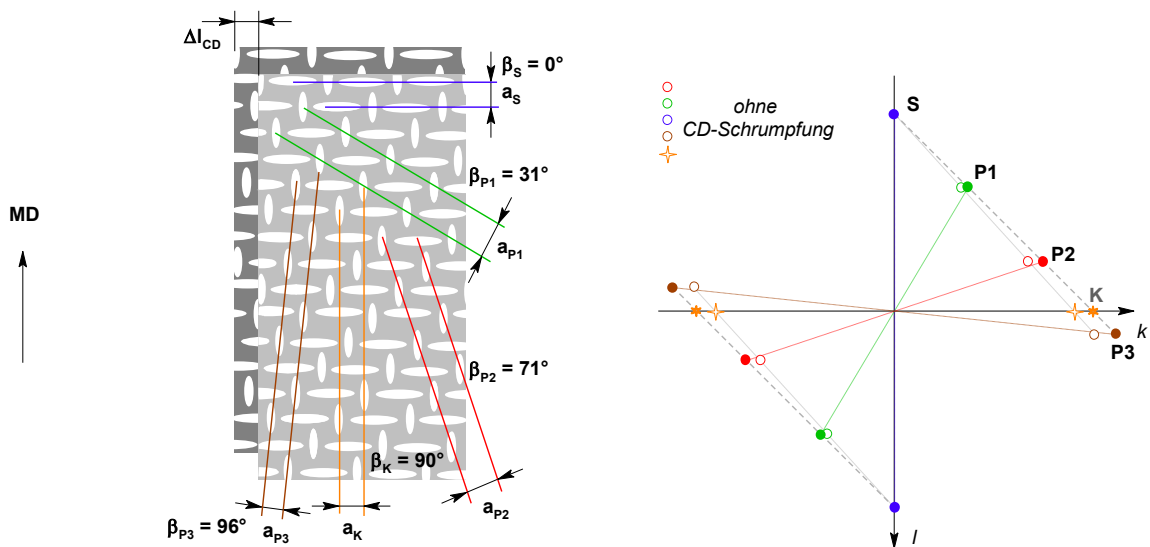


Abb. 18: Siebmarkierung eines in CD geschrumpften Papiers

Ein messtechnisches Problem tritt dann auf, wenn eine durch Siebverzug veränderte Markierungsgeometrie durch Querschrumpfung verzerrt wird. **Abb. 19** skizziert den Scherwinkel β_s , der um β_{QS} größer ist als der tatsächliche Winkel des Siebverzugs.

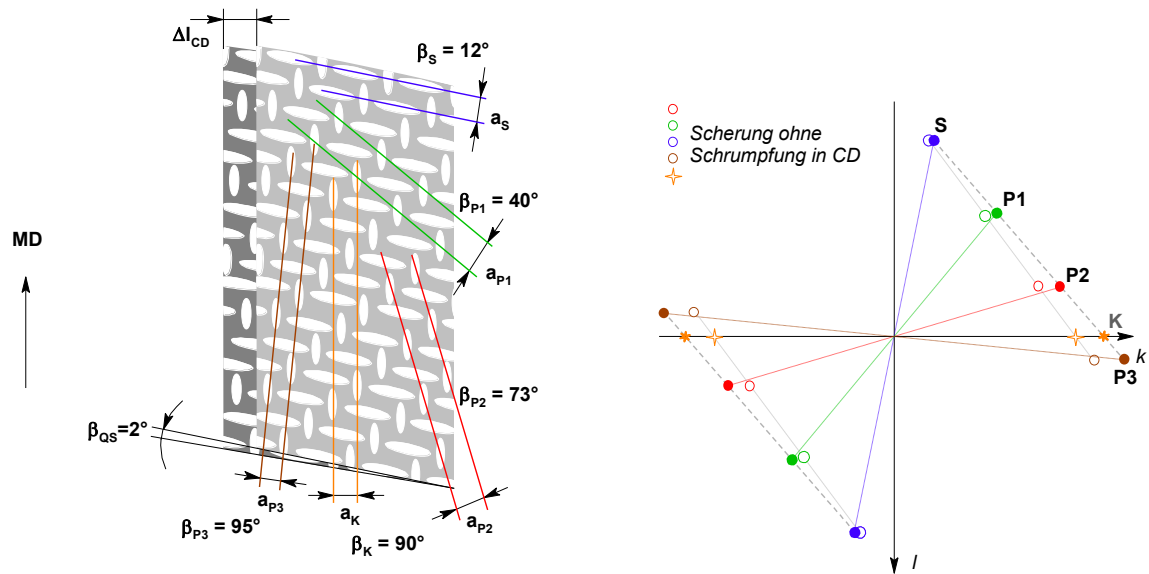


Abb. 19: Überlagerung von Scherung und Schrumpfung

2.3.2 Berechnung des Längsdehnungsprofils

Die lokale Längsdehnung ε_{MDj} ergibt sich aus dem Schussfadenabstand a_{MDj} im Verhältnis zum ursprünglichen Schussfadenabstand a'_{MDj} an der Messstelle j zu

$$\varepsilon_{MDj} = \frac{a_{MDj}}{a'_{MDj}} - 1 \quad (2.16).$$

Ist der ursprüngliche lokale Schussfadenabstand a'_{MDj} unbekannt, so tritt an seine Stelle der mittlere Markierungsabstand \bar{a}'_{MD} , der sich aus der Gesamtdehnung, d. h. aus den Zügen längs der Papierbahn, berechnen lässt. Im Fall der Papiermaschine ist diese Vorgehensweise sinnvoll, da die Bahn bei der Blattbildung auf dem Sieb weder in Längs- noch in Querrichtung verformt ist. Lediglich Unregelmäßigkeiten im Sieb können die Messung beeinflussen.

Problematisch ist die Dehnungsmessung in der Papierverarbeitung und in Druckmaschinen, da die Papierbahnen bereits plastisch verformt sind. Für eine exakte Messung müssen a'_{MDj} und a_{MDj} an der gleichen Stelle erfasst werden, sonst verfälschen Schwankungen in der Längsrichtung der Bahn die Messung. Als Offline-Verfahren erfüllt die Messung an der gleichen Probe, wie z. B. die in Kapitel 2.4 vorgestellte Methode zur Bestimmung der reversiblen und irreversiblen Bahnverformung, diese Anforderung. Als Online-Verfahren sollte der Zeitversatz zwischen den Messstellen kompensiert und die Messung ausreichend gedämpft werden, um Dehnungsschwankungen auszugleichen.

Die Markierungsdichte in Maschinenrichtung d_{GiMDj} der Gruppe i an der Messstelle j und die Geschwindigkeiten am Tambour $V_{Tambour}$ und am Sieb V_{Sieb} dienen als Grundlage zur Bestimmung der lokalen Längsdehnung ε_{MDj} . Sie berechnet sich zu

$$\varepsilon_{MDj} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \varepsilon_{GiMDj} \quad (2.17)$$

mit: Anzahl der erfassten Gruppen c ,

$$\varepsilon_{GiMDj} = \frac{a_{GiMDj}}{\bar{a}'_{GiMD}} - 1 \quad (2.18),$$

lokale Längsdehnung der Gruppe ε_{GiMDj} ,

lokaler Markierungsabstand in MD der Messung a_{GiMDj} ,

mittlerer Markierungsabstand in MD vor der Dehnung \bar{a}'_{GiMD} ,

$$a_{GiMDj} = \frac{1}{d_{GiMDj} \cdot \cos \beta_{Gi j}} \quad (2.19),$$

lokaler Schussfadenwinkel $\beta_{Gi j}$,

lokale Markierungsdichte des Schussfadens d_{GiMDj} ,

$$\bar{a}'_{GiMD} = \bar{a}_{GiMD} \cdot (1 - \varepsilon_{MD}) \quad (2.20),$$

mittlerer Markierungsabstand in MD der Messung \bar{a}_{GiMD} ,

$$\bar{a}_{GiMD} = \sum_{j=1}^n \frac{a_{GiMDj}}{n} \quad (2.21),$$

Anzahl der Messungen n über der Bahnbreite,

$$\varepsilon_{MD} = \frac{V_{Tambour} - V_{Sieb}}{V_{Sieb}} \cdot 100 \quad (2.22)$$

Längsdehnung an der Papiermaschine ε_{MD} ,

Geschwindigkeit am Tambour $V_{Tambour}$ und

Geschwindigkeit am Sieb V_{Sieb} .

2.3.3 Berechnung des Querschrumpfungsprofils

Analog zur Längsdehnung ergibt sich die lokale Querschrumpfung ε_{QSj} aus dem Kettfadenabstand a_{CDj} im Verhältnis zum ursprünglichen Kettfadenabstand a'_{CDj} an der Messstelle j zu

$$\varepsilon_{QSj} = 1 - \frac{a_{CDj}}{a'_{CDj}} \quad (2.23).$$

Der ursprüngliche Kettfadenabstand hängt vom lokalen Schussfadenwinkel β_j' des Siebes ab und kann nicht durch eine Konstante ersetzt werden. Entweder wird a'_{CDj} in der Siebpartie gemessen, was schwerlich möglich ist, oder der Kettfadenabstand a'_{CDj} des Siebs muss aus der Markierungsgeometrie rekonstruiert werden. Letzteres ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

Mit den lokalen Markierungsdichten der Gruppen i in Querrichtung d_{GiCDj} ergibt sich die lokale Querschrumpfung ε_{QSj} zu

$$\varepsilon_{QSj} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \varepsilon_{GiQSj} \quad (2.24)$$

mit: Anzahl der erfassten Gruppen c

$$\varepsilon_{GiQSj} = 1 - \frac{a_{GiCDj}}{a'_{GiCDj}} \quad (2.25),$$

lokale Querschrumpfung der Gruppe ε_{GiQSj} ,

lokaler Markierungsabstand in CD vor der Schrumpfung a'_{GiCDj} ,

lokaler Markierungsabstand in CD der Messung a_{GiCDj} ,

$$a_{GiCDj} = \frac{1}{d_{GiCDj}} \quad (2.26)$$

und lokaler Markierungsdichte des Kettfadens d_{GiCDj} .

2.3.4 Berechnung des Schussfadenwinkels

Die lokalen Markierungsabstände a'_{GiCD} bilden die Basis der Querschrumpfungsberechnung. Sie ergeben sich aus dem nominellen Kettfadenabstand a'_{0GiCD} und den lokalen Schussfadenwinkeln β'_{Gij} zu

$$a'_{GiCDj} = a'_{0GiCD} \cos \beta'_{Gij} \quad (2.27).$$

Der Schussfadenwinkel β' beschreibt den Verzug des Siebes in der Papiermaschine durch Scherung. Das Gewebe verdichtet sich in Querrichtung um den Faktor $\cos \beta'$. Dies ist nicht nur ein technologisches Problem, es verändert auch die Grundlage zur Berechnung der Querschrumpfung. In der Regel sind der nominelle Kettfadenabstand a'_{0GiCD} und die lokalen Schussfadenwinkel β'_{Gij} unbekannt.

Die ursprünglichen Kettfadenabstände und Schussfadenwinkel werden aus der gemessenen Markierungsgeometrie schrittweise rekonstruiert. Wie Längsdehnung und Querschrumpfung den anfänglichen Schussfadenwinkel β' verändern, zeigt **Abb. 20**.

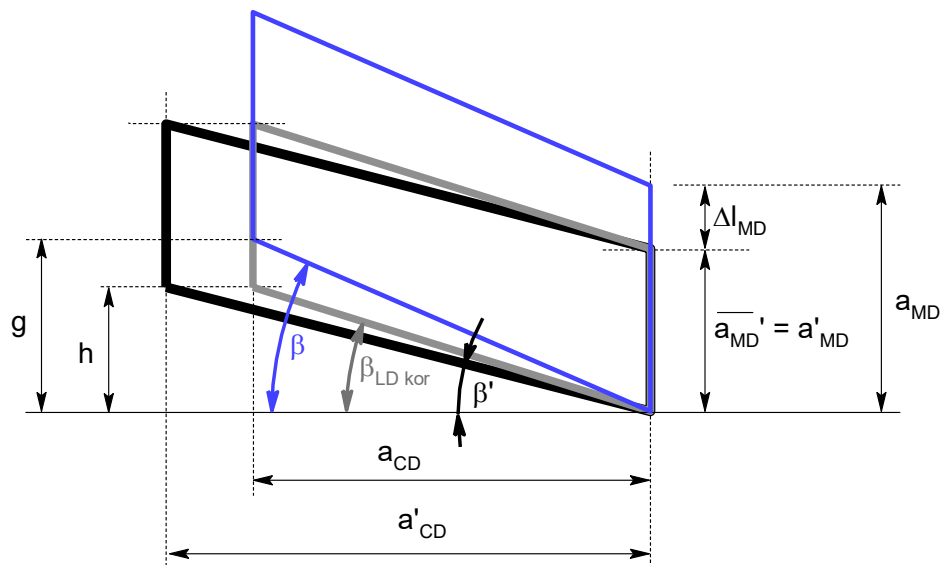


Abb. 20: Entkopplung von Längsdehnung, Querschrumpfung und Siebverformung

In einem ersten Schritt erfolgt die Korrektur der Längsdehnung. Aus der gemessenen Markierungsgeometrie mit den bekannten lokalen Schussfadenwinkel $\beta_{Gi j}$ und der mit Gl. 2.18 berechneten lokalen Längsdehnung $\varepsilon_{MD j}$ ergibt sich der korrigierte Schussfadenwinkel $\beta_{Gi LD kor j}$ zu

$$\beta_{Gi LD kor j} = \arctan\left(\left(1 - \varepsilon_{MD j}\right)\tan\left(\beta_{Gi j}\right)\right) \quad (2.28).$$

Die Annahme $\beta'_{Gi j} \approx \beta_{Gi LD kor j}$ bildet den Ausgangspunkt für die weiteren Schritte, da zu diesem Zeitpunkt die Querschrumpfung zur weiteren Korrektur noch nicht zur Verfügung steht.

Im zweiten Schritt berechnet sich mit Hilfe des mittleren Markierungsabstands in Querrichtung $\bar{a}_{Gi CD}$, den (angenäherten) Schussfadenwinkeln $\beta'_{Gi j}$ und der Änderung der Bahnbreite zwischen Siebpartie und Messstelle der nominellen Kettfadenabstand $a'_{0Gi CD}$ zu

$$a'_{0Gi CD} = \frac{\bar{a}'_{Gi CD}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos \beta'_{Gi j}} \quad (2.29)$$

mit: Anzahl n der Messungen über der Bahnbreite,

ursprünglicher mittlerer Markierungsabstand in Querrichtung $\bar{a}_{Gi CD}$,

$$\bar{a}'_{Gi CD} = \frac{B_{pickup}}{B} \bar{a}_{Gi CD} \quad (2.30),$$

Bahnbreite an der Pick-up-Walze B_{pickup} ,

Bahnbreite während der Messung B und

mittlerer Markierungsabstand in CD der Messung $\bar{a}_{Gi CD}$.

Mit Gl. 2.27 und Gl. 2.24 lässt sich die lokale Querschrumpfung $\varepsilon_{QS j}$ näherungsweise bestimmen.

Der dritte Schritt kompensiert die lokale Querschrumpfung, um den ursprünglichen lokalen Schussfadenwinkel $\beta'_{Gi j}$ zu erhalten. Aus der Geometrie in **Abb. 20** ergibt sich die Beziehung

$$\frac{a_{Gi CD j}}{a'_{Gi CD j}} = \frac{\tan \beta'_{Gi j}}{\tan \beta_{Gi LD kor j}} \quad (2.31).$$

Mit Gl. 2.25 und der lokalen Querschrumpfung $\varepsilon_{QS j}$ erhält man den Winkel $\beta'_{Gi j}$ aus

$$\tan \beta'_{Gi CD} = \left(1 - \varepsilon_{QS j}\right)\tan \beta_{Gi LD kor j} \quad (2.32).$$

Mit dem angenäherten Schussfadenwinkel $\beta'_{Gi j}$ in Gl. 2.29 erhält man genauere Werte für die Querschrumpfung. Das Verfahren konvergiert sehr schnell. In wenigen Durchläufen sind stabile Werte erreicht.

2.4 Reversible und irreversible Bahnverformung und ihre Messung

Bei der Herstellung und Trocknung einer Papierbahn wirken mechanisch und thermisch induzierte Spannungen [20]. Während ein Teil dieser Kräfte irreversible Verformungen des Papiers verursacht, wird ein anderer Teil vom Fasernetzwerk aufgenommen und gespeichert.

Abhängig vom Feuchtegehalt sind Verformungen des Papiers teilweise reversibel. Besonders diese reversiblen Bahnverformungen und Spannungen rufen Dimensionsstabilitätsprobleme bei der Weiterverarbeitung hervor.

Die Dimensionsstabilität von Papier in Abhängigkeit des Feuchtegehalts wurde oft untersucht [21 - 30] und es gibt einige Methoden, um Dehnungen zu erfassen, wie die Feuchtdehnung (DIN 53 130) und die Nassdehnungsmessung mit dem WSD-Analyzer (Wet Stretch Dynamics Analyzer). Bei beiden Methoden wirken äußere Kräfte, die die Verformung mit beeinflussen. Zur Beurteilung und Quantifizierung der beim Befeuchten einer Papierprobe freiwerdenden Kräfte sowie ihrer Auswirkung auf die Verformung der Probe ist bislang keine Messmethode ohne Einwirkung äußerer Kräfte bekannt. Bedingt durch die berührungslose Bestimmung der Papierverformungen eignet sich die Siebmarkierungsanalyse besonders gut, um diese messtechnische Lücke zu schließen. Es lässt sich somit folgende Messmethode vorschlagen:

- Messung und Auswertung der Längsdehnung, Querschrumpfung und des Schussfadewinkels an einer trockenen Probe.
- Befeuchten oder Wässern der Probe.
- Messung und Auswertung der Längsdehnung, Querschrumpfung und des Schussfadewinkels an der nassen Probe.

2.5 Zusammenfassung zur Siebmarkierungsanalyse

Mit Hilfe von Fuzzy-Clustermethoden ist eine weitgehend automatische Analyse von Siebmarkierungsgeometrien möglich. Die optimierte Markierungsanalyse bietet folgende Vorteile:

- Die Methode ist rotationsinvariant. Die Proben müssen nicht ausgerichtet werden, was den Aufwand deutlich reduziert und Winkelfehler vermeidet.
- Mit der automatischen Siebmarkierungsanalyse entfällt das zeitraubende und fehlerträchtige manuelle Selektieren von Peaks am Bildschirm.
- Verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse ergeben sich aus der Doppelbestimmung über die Markierungen von Ober- und Untersieb. Die lokale Dehnung im Papier lässt sich aus zwei unterschiedlichen Markierungen unabhängig voneinander bestimmen und zur Fehleranalyse vergleichen.
- Optimierte, subpixelgenaue Auflösung. Die Genauigkeit wird maßgeblich durch externe Einflüsse begrenzt. Dazu zählen Schwankungen beim Siebherstellungsprozess wie z. B. die Gleichlaufschwankungen von Webstühlen und die Siebschrumpfung bei der Thermofixierung.

Mit Hilfe der neuen Auswertalgorithmen ist es möglich, bei der Auswertung von Querprofilen die Einflüsse aus Siebverzug und Querschrumpfung iterativ zu kompensieren und so den Anteil der reinen Schrumpfung an der Verformung der Siebmarkierung zu extrahieren.

3 Messung von Längsdehnungsprofilen

Die Messungen erfolgten an Papierproben unterschiedlicher Herkunft. Fünf repräsentative Zeitungsdruckpapiere und zwei SC-Papiere wurden ausgewählt, um das Messverfahren zu überprüfen und zu bewerten. Diese Messungen bilden gleichzeitig den Ausgangspunkt, um den Zusammenhang zwischen Längsdehnung und Prozessparametern zu untersuchen.

3.1 Probenvorbereitung und Messung

Um konstante Ausgangsbedingungen für die Entwicklung des Messverfahrens zu schaffen, wurden klimatisierte Querstreifen ausgewählter Papiere im Durchlicht digitalisiert. Die Messfläche betrug $102,4 \text{ mm} \times 102,4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ bei einer Auflösung von 10 Pixel/mm, d. h. rund 2500 dpi. Die Aufzeichnung erfolgte im Abstand von 100 mm über die gesamte Bahnbreite. Da das entwickelte Messverfahren rotationsinvariant ist, müssen die Proben nicht exakt in Maschinenrichtung ausgerichtet werden. Die Auswertung von Längsdehnung und Querschrumpfung wurden nach der im Kapitel 2.3 beschriebenen Methode durchgeführt.

3.2 Prüfparameter

Neben der bildanalytischen Untersuchung wurden die Proben hinsichtlich zahlreicher Prüfparameter, wie z. B. Bruchdehnung, breitenbezogene Bruchkraft, Nassdehnung (Emtec), Rauheit (PPS), Luftdurchlässigkeit (Bendtsen), flächenbezogene Masse (Tapio), Zugsteifigkeitsindex und -orientierung (TSO) bewertet. Die nachstehenden papierphysikalischen Eigenschaften wurden zur Darstellung der Zusammenhänge in die Arbeit aufgenommen. Alle Proben wurden vor ihrer Messung mindestens 24 h klimatisiert. Die Klimatisierung und die Messung erfolgten unter Normklima (DIN EN 20187).

3.2.1 Flächenbezogenen Masse

Die Messung der flächenbezogenen Masse erfolgte nach dem Durchstrahlverfahren an einer TAPIO-PMA-Messanlage. Sie besteht aus einer Ab- und Aufwickelvorrichtung und zwei Messeinheiten, um Querprofile offline zu vermessen. Die Querprofile zeigen den gleichen Trend wie die Kurven der Online-Messung. Das Qualitätsleitsystem regelt auf einen möglichst gleichmäßigen, horizontalen Verlauf.

3.2.2 Feuchte- und Füllstoffgehalt

Im Qualitätsleitsystem der Papiermaschinen werden online Querprofile von Feuchte- und Füllstoffgehalt gemessen. Die Profile liegen als Fotokopien des Bildschirmausdrucks vor und wurden in die Betrachtung der Zusammenhänge einbezogen. Bei annähernd gleicher Retention über die Bahnbreite folgt das Profil des Füllstoffgehalts dem der flächenbezogenen Masse.

3.2.3 Nassdehnung

Der „Wet Stretch Dynamics Analyzer“ (WSD) von Emtec misst dynamisch die Hygroexpansion. Die Methode basiert auf der Messung der Dehnung vom Papier bei der einseitigen Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit. Die Probe wird bei einer einstellbaren Vorspannkraft

von 1 N bis 5 N mit einer Prüfflüssigkeit einseitig benetzt. Die Dehnung der Papierprobe wird über 60 Messungen pro Sekunde ausgewertet. Die Genauigkeit liegt bei ca. $\pm 5\%$ vom Messwert.

3.2.4 Faserorientierung und Zugsteifigkeitsindex

Zur Bestimmung der Faserorientierung hat die Messung der Ultraschallausbreitung in der Papierprobe eine weite Verbreitung gefunden. Der hier verwendete TSO-Tester von Lorentzen & Wettre basiert auf diesem Messverfahren. Gemessen wird der Zugsteifigkeitsindex TSI (Tensile Stiffness Index) in Maschinen- und Querrichtung. Die Orientierung des TSI beschreibt als TSO-Wert (Tensile Stiffness Orientation) den Faserorientierungswinkel α .

Der Querstreifen wurde bündig an der Führung des TSO-Testers in das Gerät eingelegt. Die anschließende Messung verläuft vollautomatisch. Der Messabstand beträgt für alle Messungen 100 mm.

3.2.5 Bahnspannung

Lediglich die Papiermaschine der Probe B besitzt das Bahnspannungsprofilmessgerät IQ Tension von Metso. **Abb. 21** zeigt das Bahnspannungsprofil als Bildschirmausdruck.

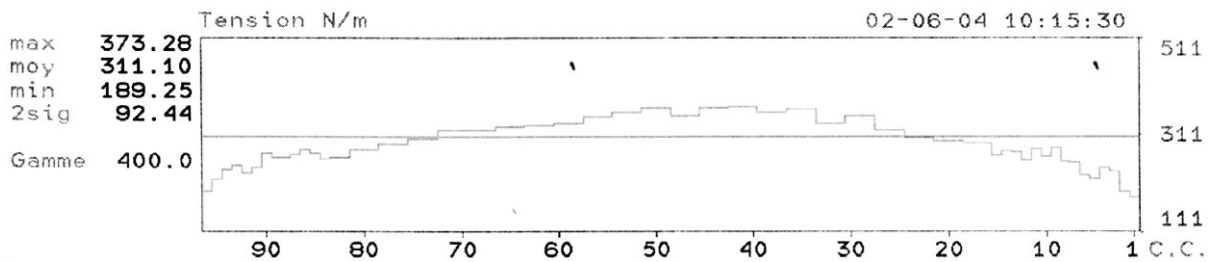


Abb. 21: Online-Messung des Bahnspannungsprofils zu Probe B

Das Profil weist den typischen Verlauf der Bahnspannung auf, wie er aus Offline-Messungen an zahlreichen Papiermaschinen bekannt ist. Die Zugspannung erreicht in der Bahnmitte die höchsten Werte und fällt zu Rändern hin stark ab.

3.2.6 Cocklingindex

Der am Institut für Papierfabrikation entwickelte Cockling-Tester beurteilt Planlagestörungen im Schräglichtverfahren. [31]. Über ein Spiegelsystem wird die am Rand leicht niedergehaltene Papierprobe zur Unterdrückung des Curls unter einem Winkel von etwa 5° in Querrichtung beleuchtet, so dass Berge und Täler als helle bzw. dunkle Stellen hervortreten. Das kontrastreiche Bild von etwa 180 mm * 180 mm wird mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgenommen, in 512*512 Bildpunkte digitalisiert und anschließend ausgewertet. Der Variationskoeffizient des Schräglichtbildes beschreibt als Cockling-Index den visuellen Eindruck der Planlage.

Große Probleme bereitet die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Eine Ursache hierfür ist die Änderung der Cocklingstrukturen durch den Klimaeinfluss. Aber auch die Handhabung sowie der Transport und die Lagerung der Proben verursachen Planlagestörungen. Es treten starke

Schwankungen im Profil auf sowie höhere Werte zum enger gewickelten Bahnende. Variationskoeffizienten von rund 20 % verhindern eine gesicherte Auswertung.

3.3 Messergebnisse

Im Folgenden werden Längsdehnungs- und Querschrumpfungsprofile mit ausgewählten Prüfparametern dargestellt. Die Auswahl wurde hinsichtlich der Frage von Einflüssen auf das Längsdehnungsprofil getroffen. Deutliche Zusammenhänge zwischen Prüfparametern und Querschrumpfungsprofil werden zur Vollständigkeit ebenfalls gezeigt.

3.3.1 Zeitungsdruckpapier A

Die Probe A ist ein Standard-Zeitungsdruckpapier aus Sekundärfaserstoff mit einem Zusatz von Primärfaserstoff. Die Faserstoffmischung liegt bei 70 % Deinkingstoff (DIP) und 30 % TMP. Die Trockenpartie ist zu 2/3 einreihig bestückt.

Tab. 1: Messwerte für Probe A				
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung des Profils	Standardabweichung der Messung
Flächenbezogene Masse	g/m ²	46,39	0,42	
Feuchtegehalt	%	8,41	0,33	
Füllstoffgehalt	%	9,87	0,20	
TSI MD	kNm/g	9,91	0,34	
TSI CD	kNm/g	2,60	0,23	
TSI CD / TSI MD		3,84	0,31	
Längsdehnung	%	5,42	0,10	0,09
irreversibler Anteil	%	4,52	0,11	0,12
Querschrumpfung	%	3,16	1,58	0,20
irreversibler Anteil	%	0,27	0,76	0,36

Die Analyse der Siebmarkierung weist auf zwei 8-Schaft-Gewebe als Ober- und Untersieb. **Abb. 22** zeigt die Markierungsgeometrie im Frequenzbereich. Die Peaks der Grundfrequenz und deren Oberwellen sind deutlich zu erkennen. Zwei Probestreifen wurden unabhängig voneinander vermessen und hinsichtlich Längsdehnung und Querschrumpfung ausgewertet.

Der mittlere absolute Fehler innerhalb der beiden Probestreifen lag bei 0,13 % und 0,05 % für die Längsdehnung sowie 0,21 % und 0,19 % für die Querschrumpfung.

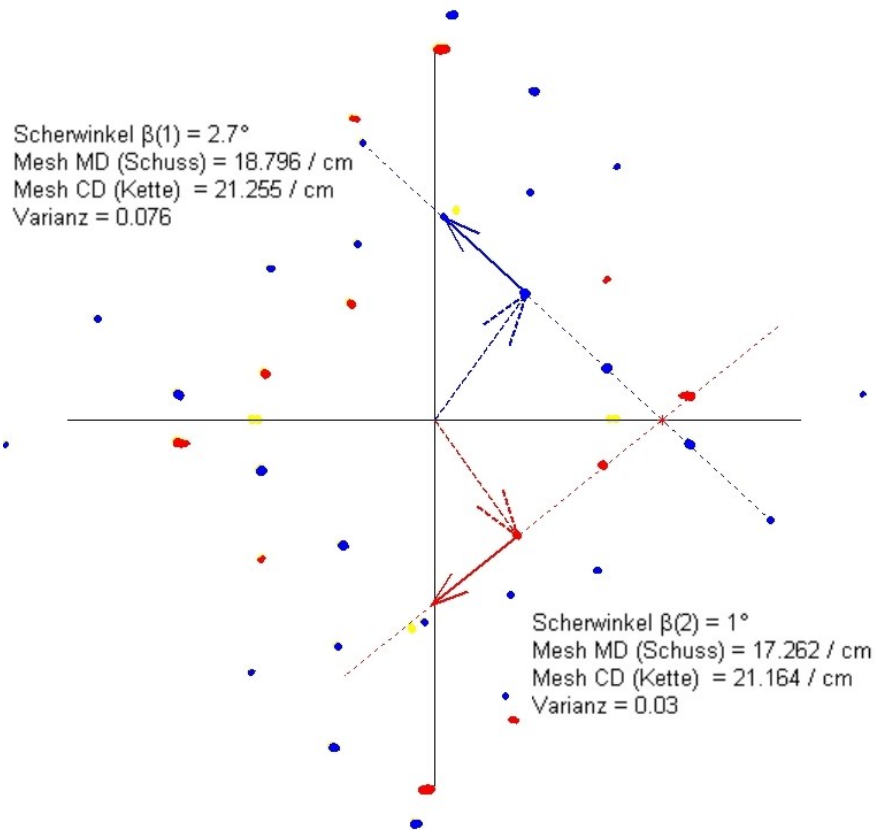


Abb. 22: Siebmarkierungen der Probe A in der Bahnmitte

Aus den Markierungen von Ober- und Untersieb über die Bahnbreite kann ein Dehnungsprofil erzeugt werden. In **Abb. 23** sind die Profile aus den beiden Messreihen und ihr Mittelwert dargestellt. Die Standardabweichung von 0,09 % ist als Fehlerbalken eingezeichnet

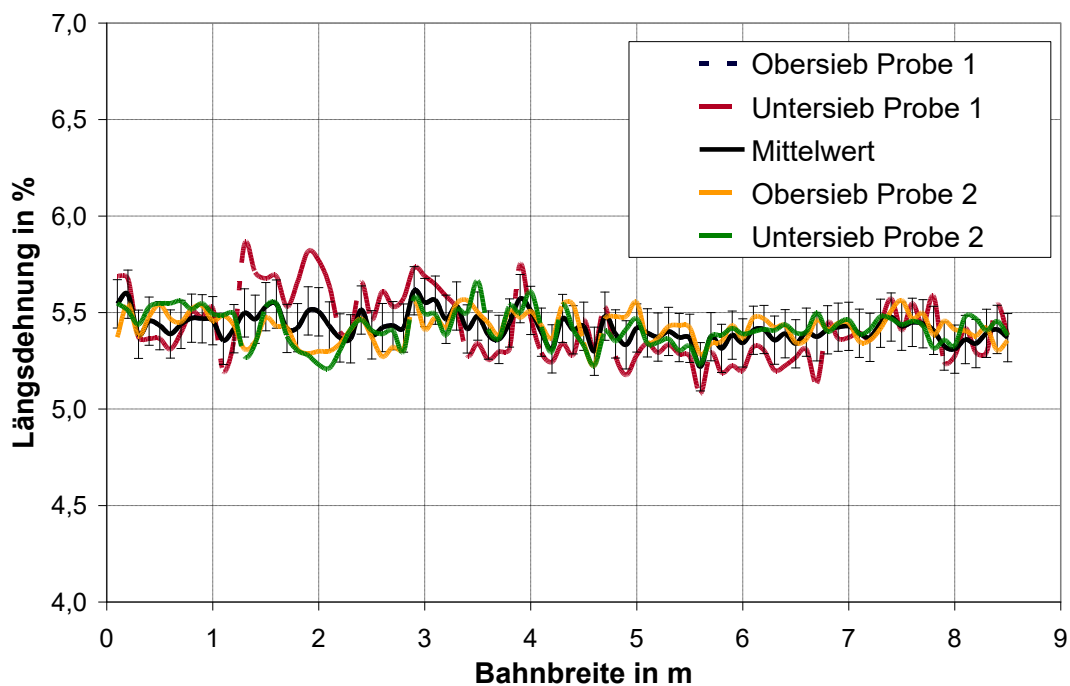


Abb. 23: Längsdehnungsprofil der Probe A

Analog dazu zeigt **Abb. 24** die vier Querschrumpfungsprofile mit ihrem typischen Verlauf.

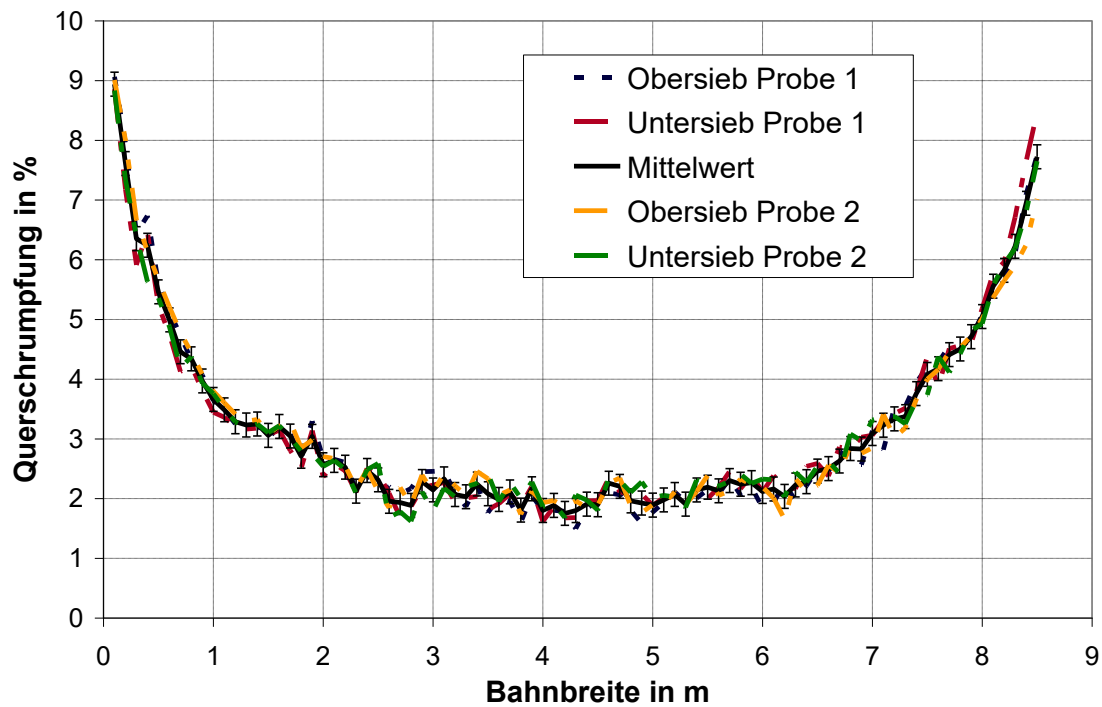


Abb. 24: Querschrumpfungsprofil der Probe A

Das Qualitätsleitsystem regelt die flächenbezogene Masse auf ein konstantes Querprofil, wie in **Abb. 25** zu sehen ist.

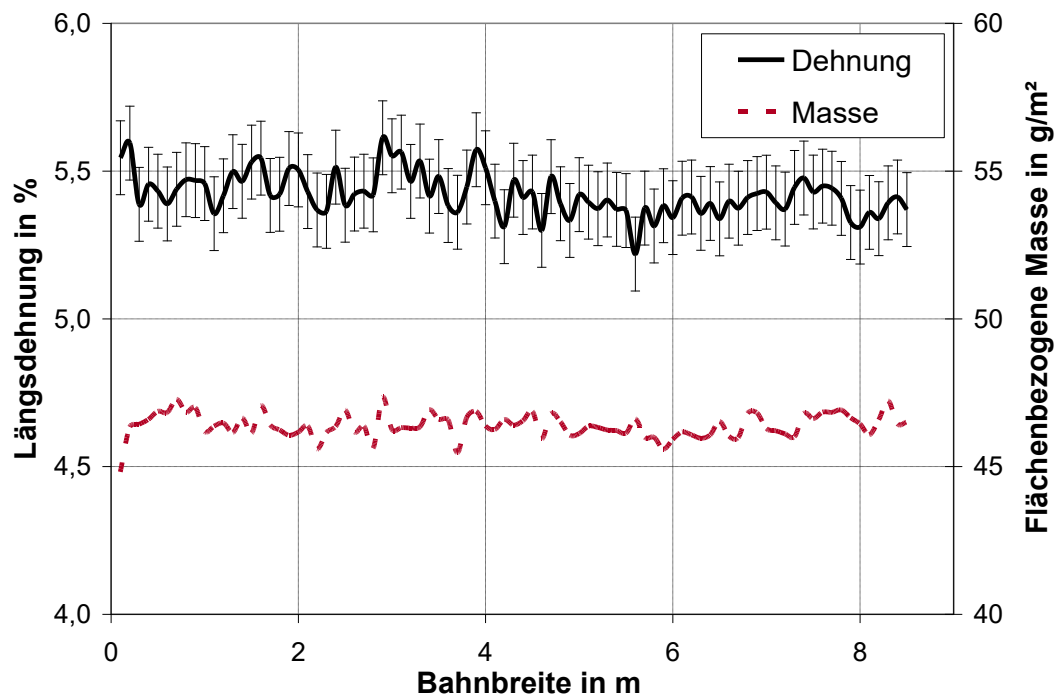


Abb. 25: Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe A

Der Zugsteifigkeitsindex ist in **Abb. 26** im proportional gleichen Maßstab zur Längsdehnung aufgetragen. Die Kurven zeigen keine Korrelation.

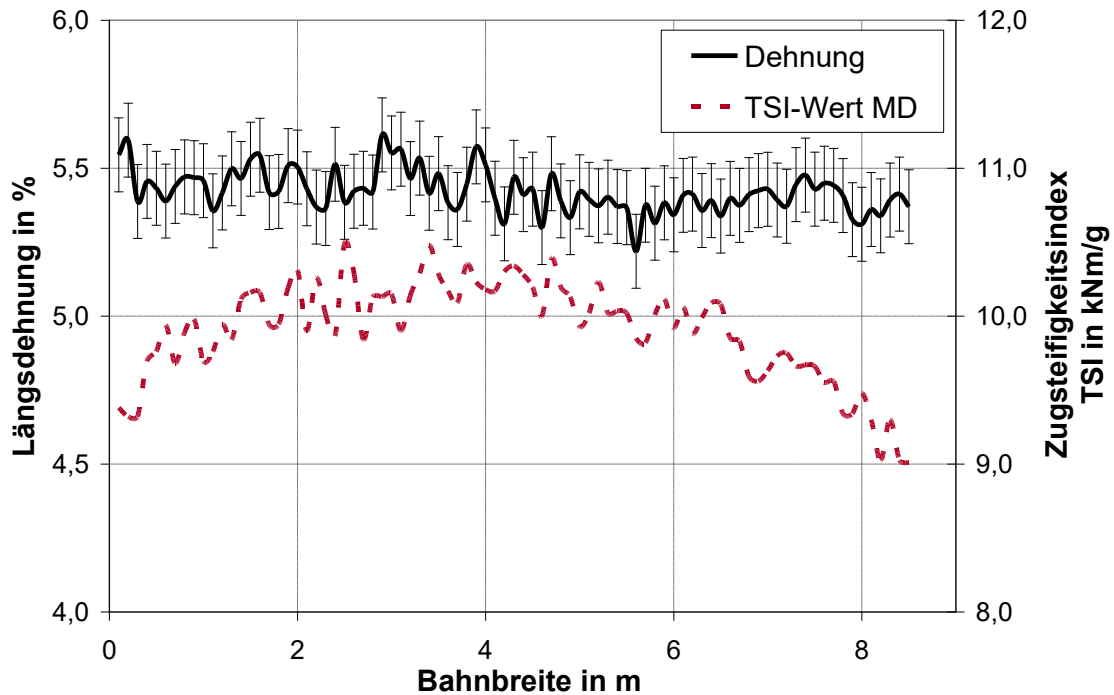


Abb. 26: Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe A

Vergleicht man dagegen das Verhältnis der Zugsteifigkeit in Längs- und Querrichtung mit dem Querschrumpfungsprofil, so zeigt sich der in **Abb. 27** dargestellte Zusammenhang.

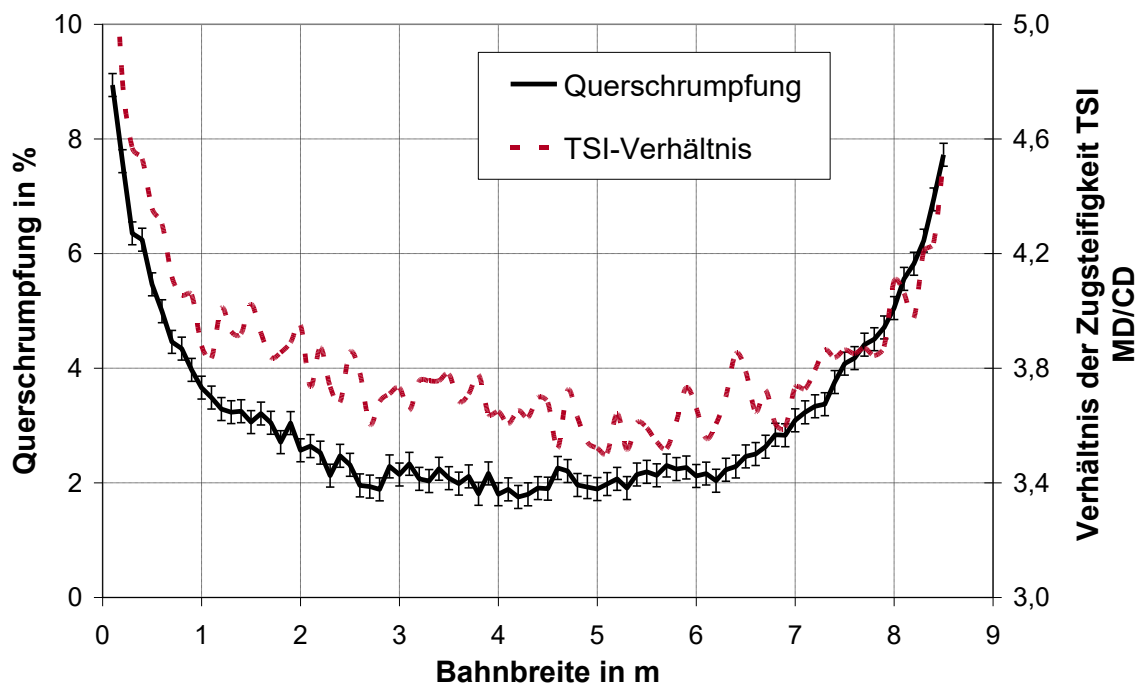


Abb. 27: Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe A

Einen vergleichbaren Zusammenhang zeigt in **Abb. 28** die Nassdehnung. Am Rand fallen die Kurven fast aufeinander, während in der Bahnmitte die Nassdehnung deutlich höher ausfällt.

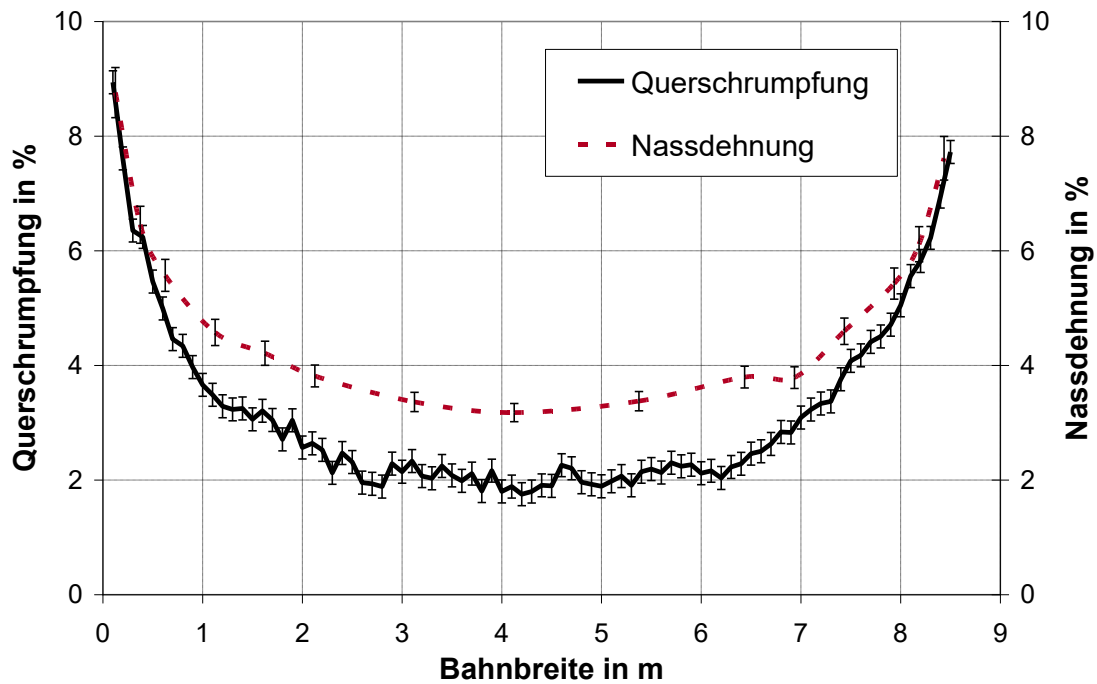


Abb. 28: Nassdehnungs- und Querschrumpfungsprofil der Probe A

Zur näheren Analyse zeigt **Abb. 29** den irreversiblen Anteil der Querschrumpfung.

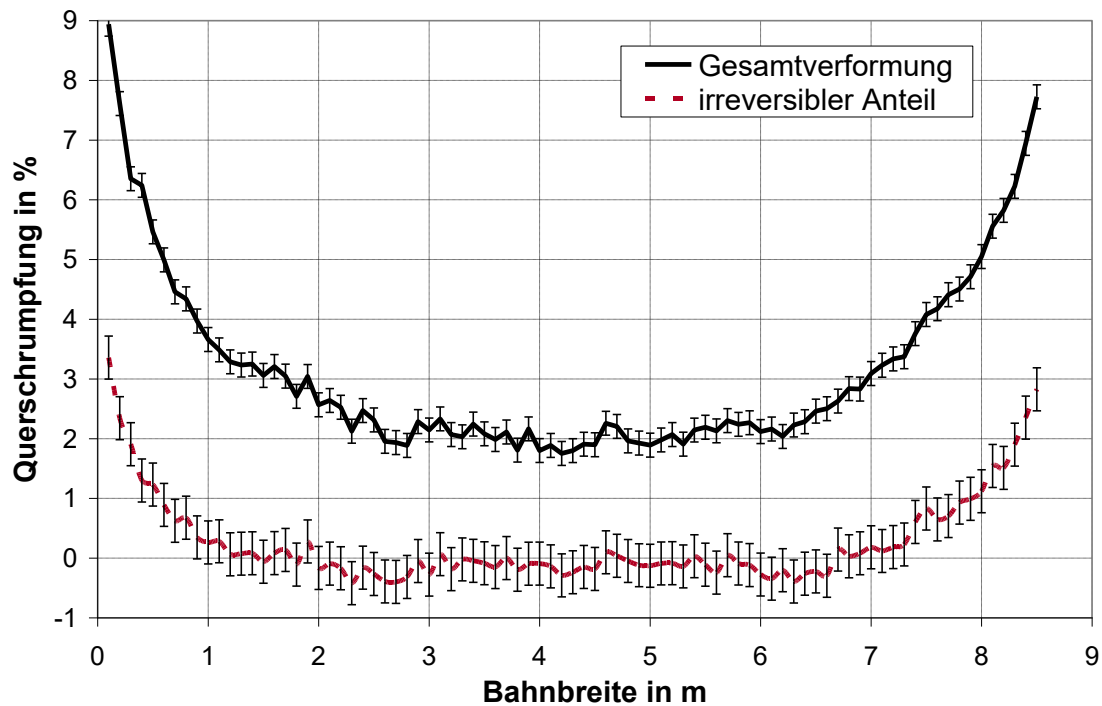


Abb. 29: Irreversibler Anteil des Querschrumpfungsprofils von Probe A

Bereinigt man die Querschrumpfung um den irreversiblen Anteil, so erhält man den reversiblen Anteil der Querschrumpfung. Bei der Messung der Nassdehnung wird die Probe über den reversiblen Bereich hinaus gedehnt, wie in **Abb. 30** dargestellt.

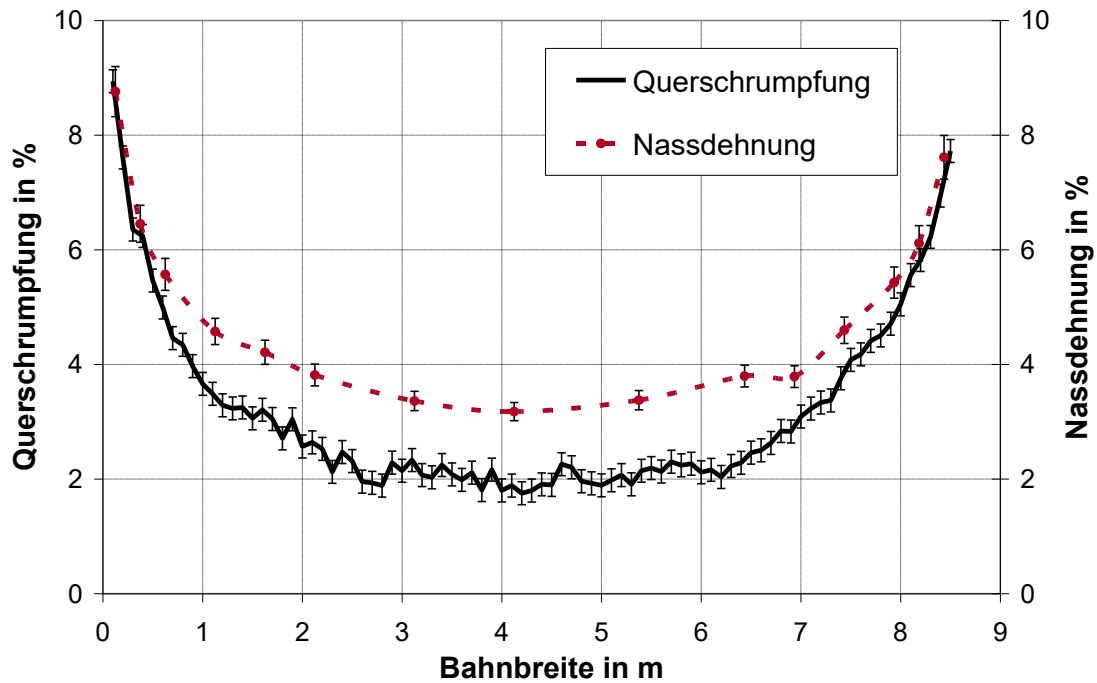


Abb. 30: Nassdehnung und reversible Querschrumpfung von Probe A

Die Beziehung zwischen Nassdehnung und reversiblen Schrumpf verdeutlicht die **Abb. 31**.

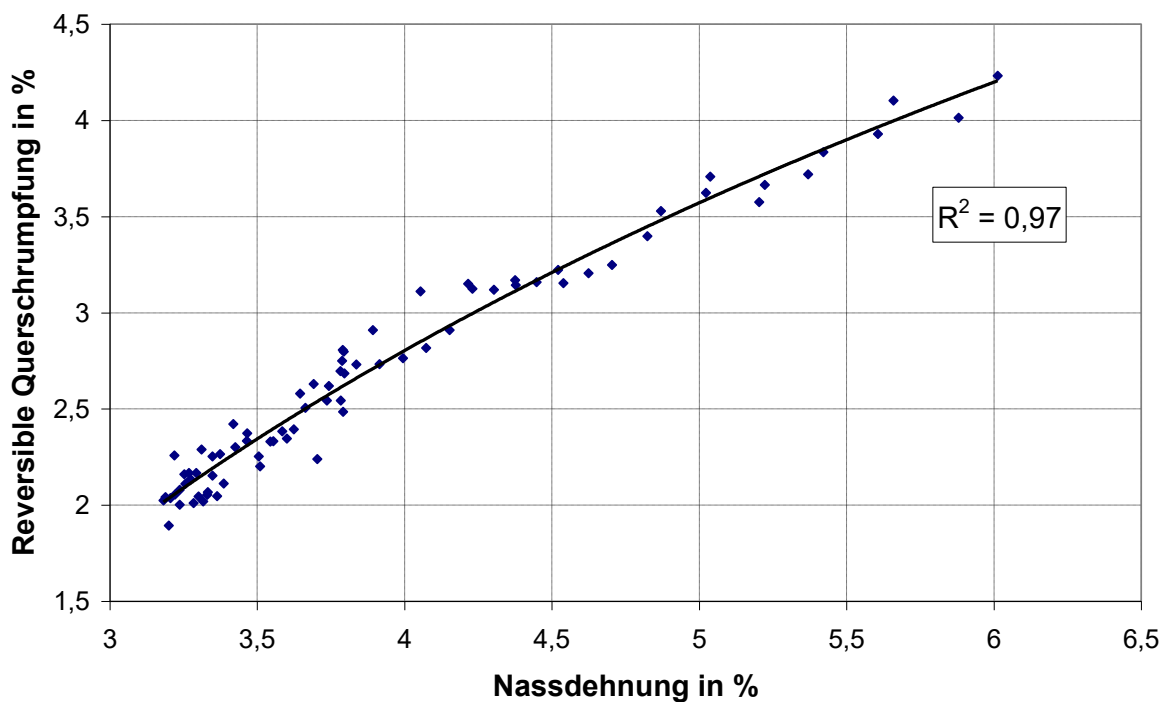


Abb. 31: Funktioneller Zusammenhang zum Wet Stretch Dynamics Analyzer (WSD)

Zwischen der Nassdehnungsmessung mit dem Wet Stretch Dynamics Analyzer (WSD) und der vorgestellten Methode zur Messung reversibler und irreversibler Bahnverformung besteht ein enger funktioneller Zusammenhang. Der Vorteil gegenüber der Messung mit dem WSD liegt in dem geringen Mehraufwand für das Benetzen der Proben bei der Aufnahme der Siebmarkierung.

Beim Benetzen werden „eingefrorene“ Spannungen freigesetzt, die Probe dehnt sich in Querrichtung aus und schrumpft in Längsrichtung. Die Siebmarkierungsanalyse erfasst die Verformung des Papiers in beiden Richtungen gleichzeitig und ohne diese zu behindern. Die einstellbare Vorspannkraft des WSD unterstützt die Dehnung und behindert die Schrumpfung der Probe. In Maschinenrichtung zeigen Nassdehnungsmessungen mit dem WSD im Vergleich zur bildanalytischen Methode etwa 5-fach niedrigere Dehnungswerte.

Während bei der Querschrumpfung der irreversible Anteil nur am Rand in Erscheinung tritt, macht er bei der Längsdehnung den überwiegenden Anteil aus. Nur etwa 20 % der Längsdehnung sind reversibel, wie in **Abb. 32** dargestellt.

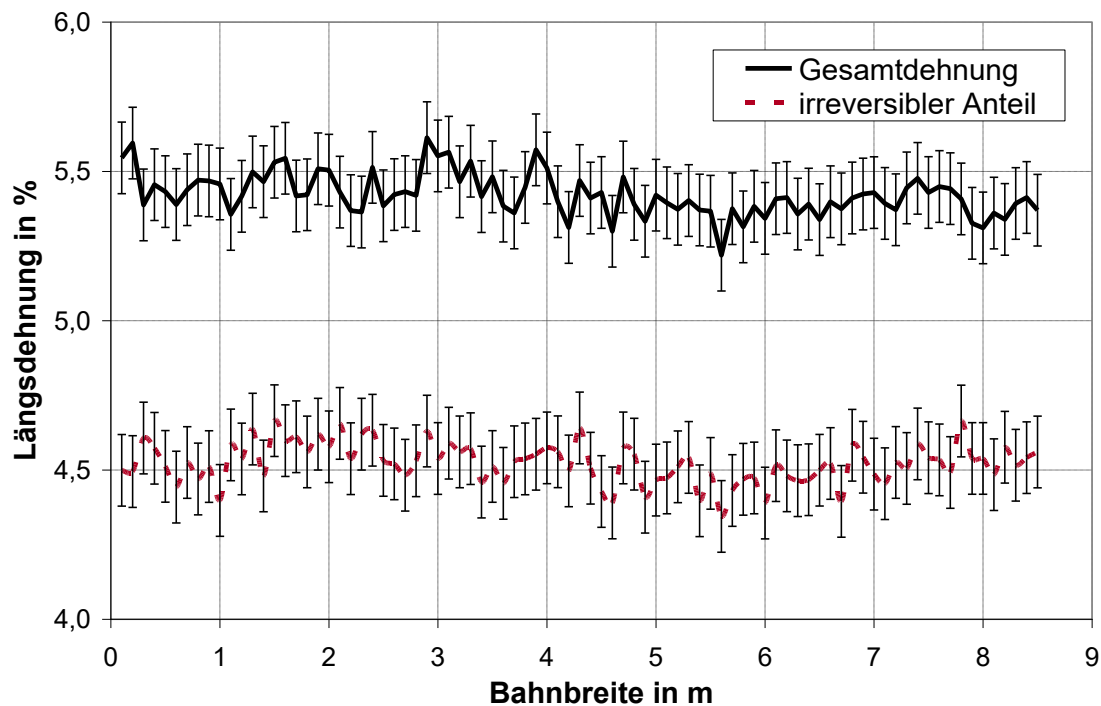


Abb. 32: Irreversibler Anteil im Längsdehnungsprofil der Probe A

Eine eindeutige Abhängigkeit der Längsdehnung von der Bahnbreite lässt sich in **Abb. 32** nicht erkennen.

3.3.2 Zeitungsdruckpapier B

Die Probe B ist ein Standard-Zeitungsdruckpapier. Die Faserstoffmischung ist vergleichbar mit Probe A und besteht aus rund 70 % Deinkingstoff (DIP) und 30 % TMP. Die Trockenpartie ist jedoch vollständig einreihig bestückt.

Tab. 2: Messwerte für Probe B				
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung des Profils	Standardabweichung der Messung
Flächenbezogene Masse	g/m ²	48,31	0,47	
Feuchtegehalt	%	8,93	0,68	
Füllstoffgehalt	%	11,2		
TSI MD	kNm/g	9,11	0,13	
TSI CD	kNm/g	2,77	0,16	
TSI CD / TSI MD		3,40	0,21	
Längsdehnung	%	5,08	0,10	0,13
Querschrumpfung	%	1,31	0,89	0,23

Die Analyse der Siebmarkierung weist auf zwei 8-Schaft-Gewebe als Ober- und Untersieb. **Abb. 33** zeigt die Markierungsgeometrie im Frequenzbereich. Das Untersieb ist einem Scherwinkel von 8,2° deutlich verzogen.

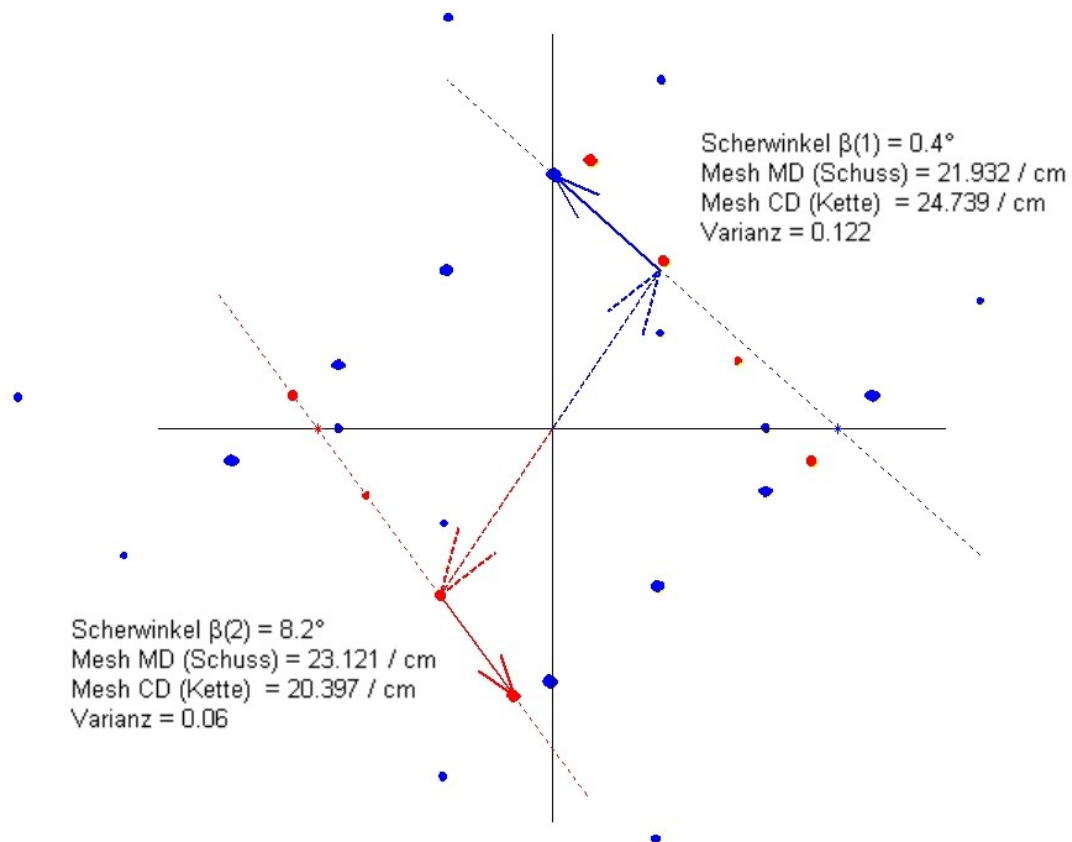


Abb. 33: Siebmarkierungen der Probe B in der Bahnmitte

Im Vergleich zur **Abb. 23** zeigt **Abb. 34** einen Trend im Dehnungsprofil der Probe B.

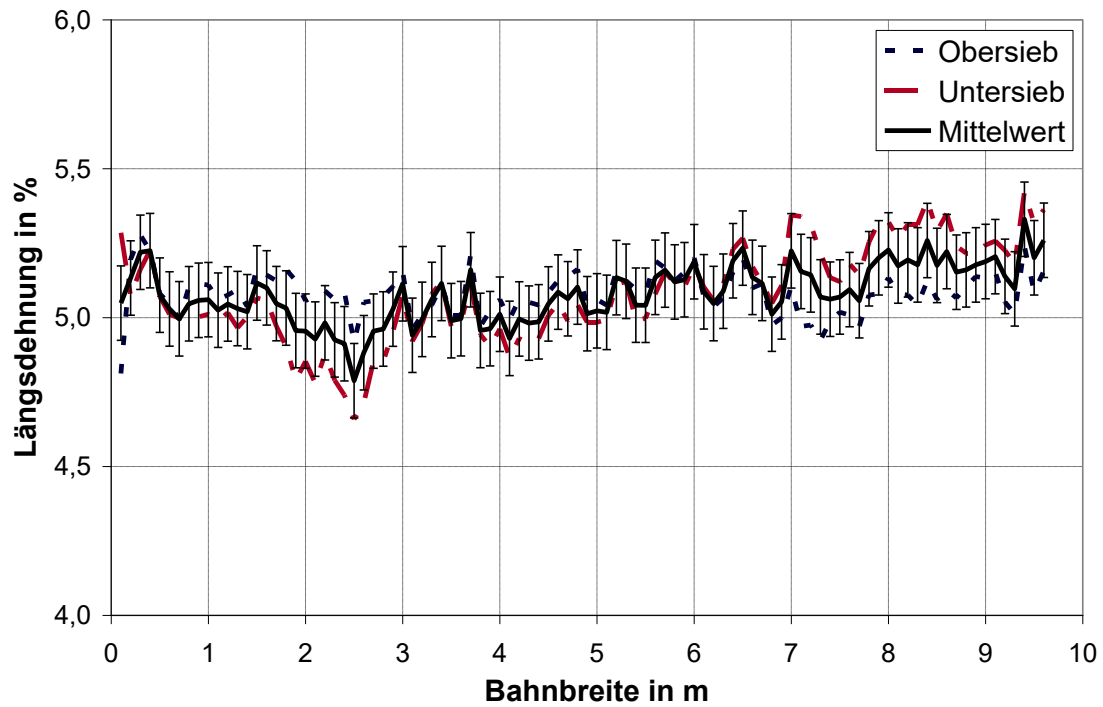


Abb. 34: Längsdehnungsprofil der Probe B

Die plastische Längsdehnung steigt ab der Bahnmitte sichtbar an, während das Querschrumpfungprofil in **Abb. 35** gleichmäßiger verläuft als bei Probe A.

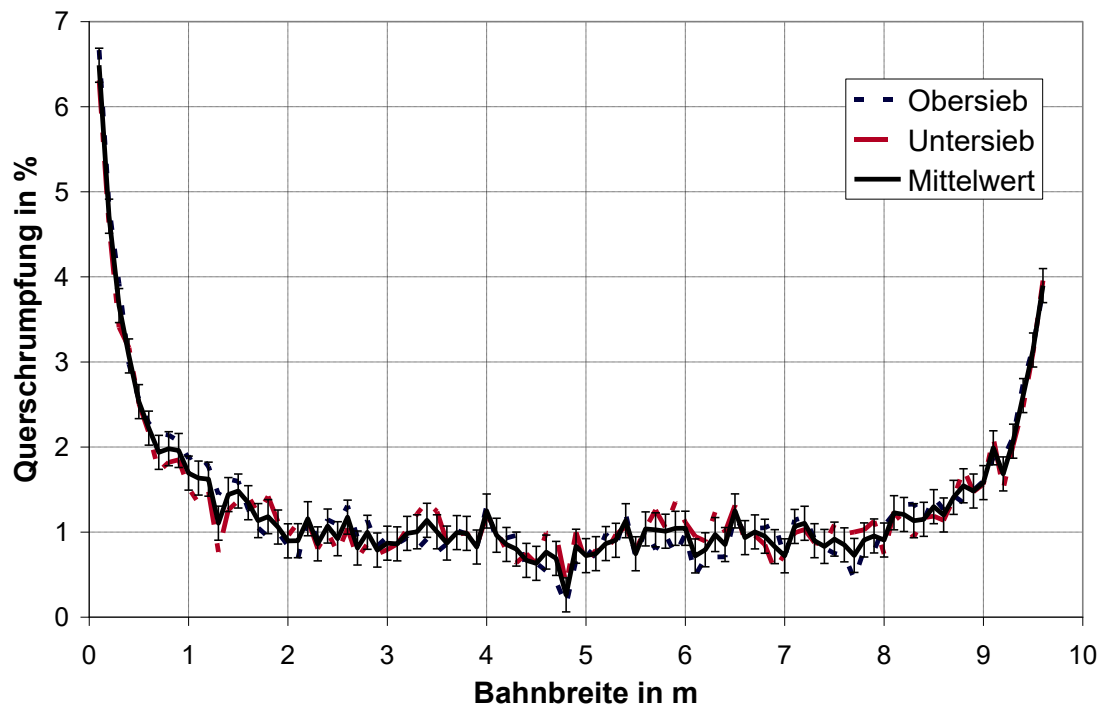


Abb. 35: Querschrumpfungprofil der Probe B

Die verkürzten freien Züge der einreihigen Trockenpartie und der Verzicht auf die Slalomführung senken das Niveau und die Form des Querschrumpfungspröfils. Fehler in der Ausrich-

tung von Walzen können in Verbindung mit einer starken Fixierung des Bahnlaufs zu einseitiger Dehnung führen. Das trockene Papier kann Dehnungsdifferenzen nur bis etwa 0,2 % elastisch ausgleichen.

Ein Zusammenhang zwischen dem einseitig erhöhten Längsdehnungsprofil und dem Profil der flächenbezogenen Masse kann in **Abb. 36** nicht beobachtet werden. Es muss jedoch der geschlossene Regelkreis berücksichtigt werden, der die flächenbezogene Masse konstant hält.

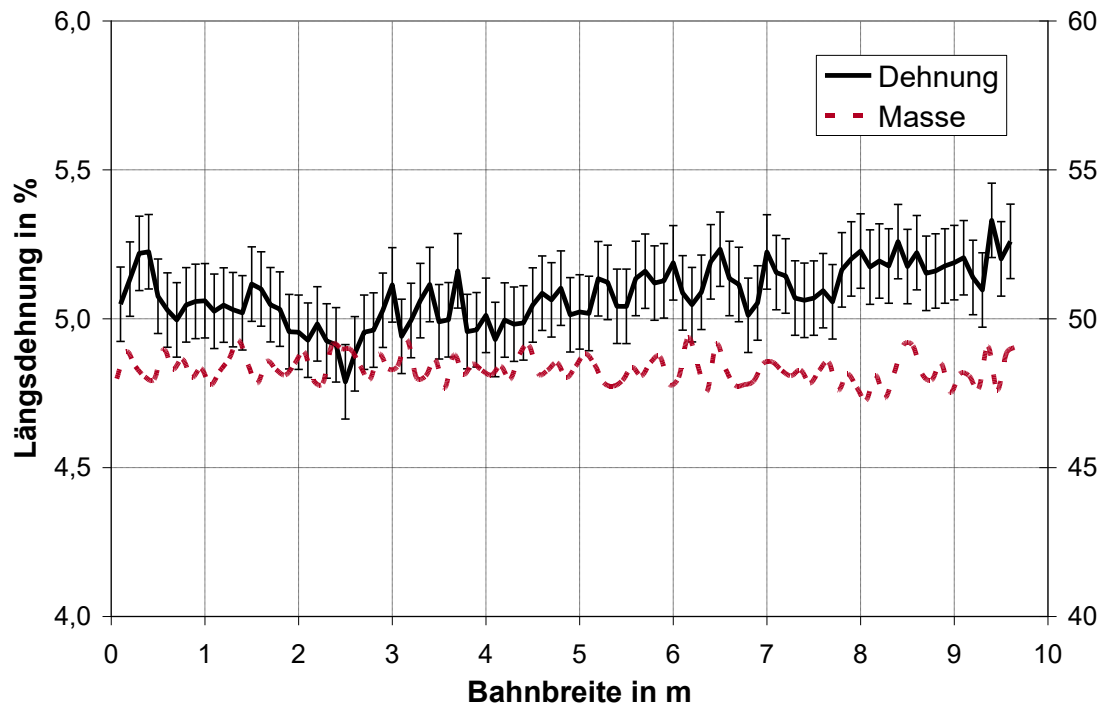


Abb. 36: Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe B

Der Verlauf des Zugsteifigkeitsindex TSI in Maschinenrichtung deutet nicht auf eine Beziehung zur Längsdehnung hin. Er deckt sich mit den Messergebnissen von Probe A. Der Abfall der TSI-Werte im Randbereich zeigt sich in **Abb. 37** nicht so stark ausgeprägt wie in **Abb. 26**. Der etwas flachere Verlauf der TSI-Kurve steht in Verbindung mit dem in **Abb. 35** gezeigten Profil der Querschrumpfung. Der Zusammenhang lässt sich durch den das Längs-Querverhältnis des TSI untermauern.

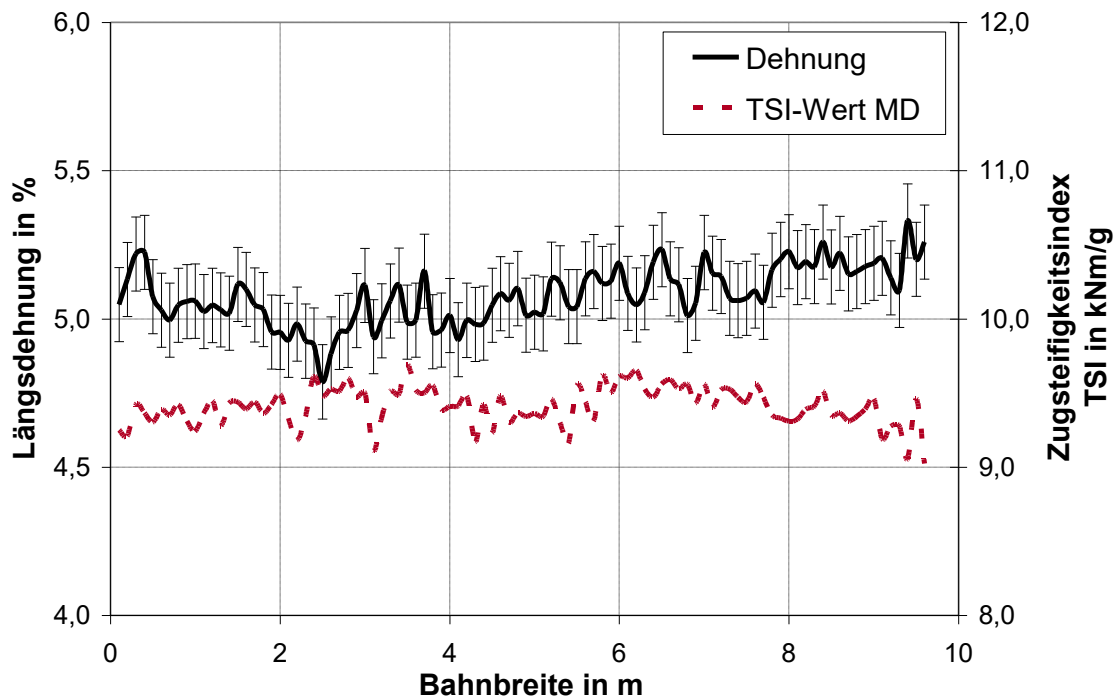


Abb. 37: Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe B

Tatsächlich folgt das Verhältnis von Zugsteifigkeitsindex in Längsrichtung zum Zugsteifigkeitsindex in Querrichtung dem Querschrumpfungsprofil, wie in **Abb. 38** dargestellt.

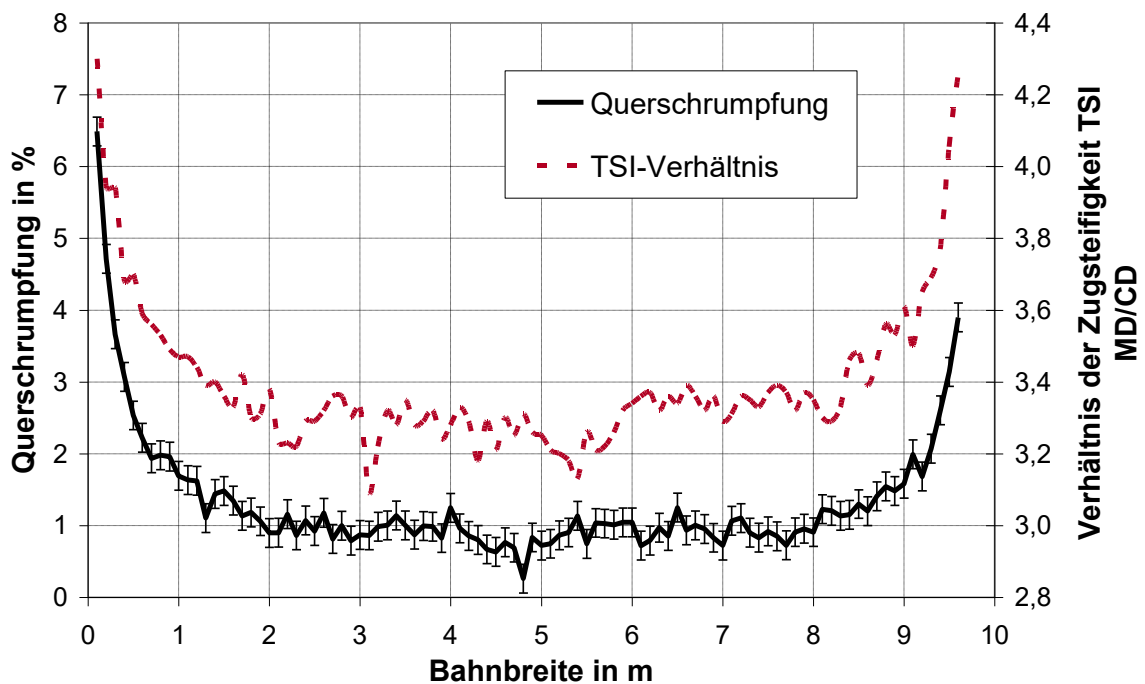


Abb. 38: Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe B

Vergleicht man das Längsdehnungsprofil mit den Prüfparametern hinsichtlich charakteristischer Merkmale, so fällt eine Gemeinsamkeit mit der Nassverformung in Maschinenrichtung

nach der WSD-Methode auf. Im Bereich von 2,5 m Bahnbreite zeigt das Dehnungsprofil ein absolutes und die WSD-Werte ein auffälliges, lokales Minimum, wie in **Abb. 39** markiert.

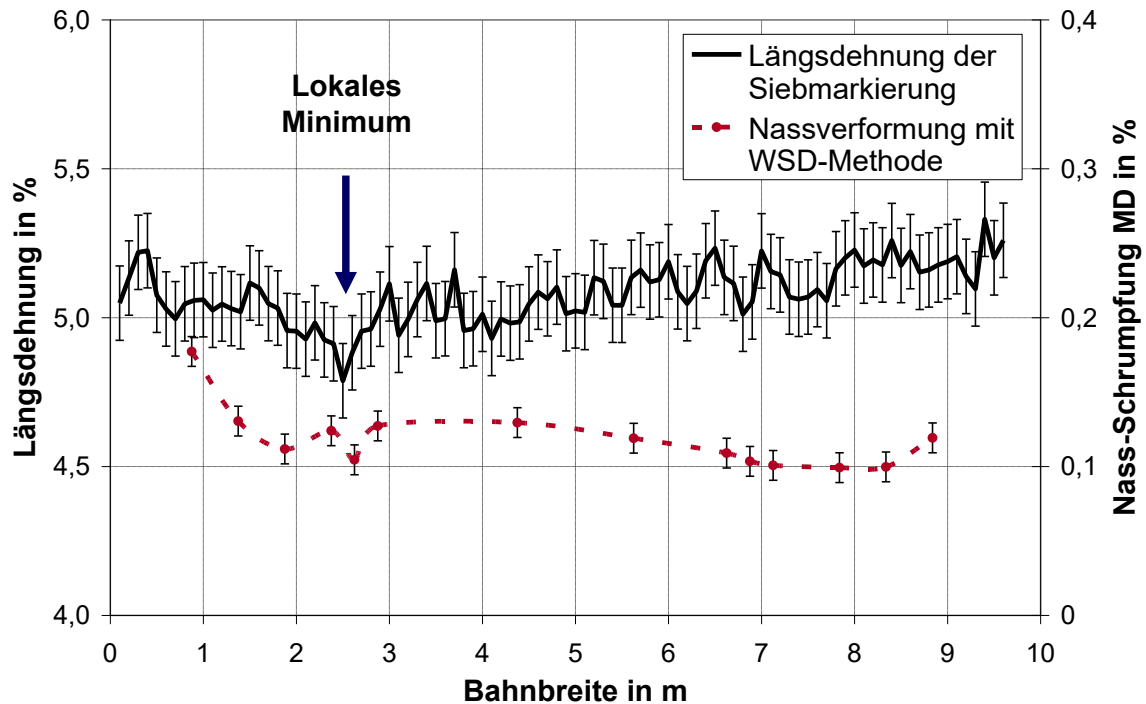


Abb. 39: Profile von Dehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung

Für die Probe B kann zusammenfassend folgendes festgestellt werden:

- Das Längsdehnungsprofil weist eine signifikante Differenz von mindesten 0,2 % auf.
- Der ausgeprägte Trend des Längsdehnungsprofils bildet sich in keinem der untersuchten Parametern ab.
- Das lokale Minimum im Längsdehnungsprofil bei 2,5 m findet sich als klarer Einschnitt im Profil der Nassdehnung in Maschinenrichtung wieder. Das Bahnspannungsprofil des IQ Tension in **Abb. 21** zeigt keinen Hinweis auf ein Problem im Bahnlauf.
- Es besteht keine Ähnlichkeit zwischen dem Profil der plastischen Längsdehnung und dem Bahnspannungsprofil des IQ Tension. Vergleicht man die Profile aus **Abb. 38** mit dem Bahnspannungsprofil in **Abb. 21**, deutet alles auf eine Abhängigkeit zwischen der Bahnspannung und der Querschrumpfung bzw. dem TSI-Verhältnis.

Die Untersuchung der Probe B beleuchtet die diagnostischen Möglichkeiten der Siebmarkierungsanalyse. Verformungen in Längs- und Querrichtung können mit einer bis dato nicht erreichten Genauigkeit und ohne großen Aufwand erfasst werden.

3.3.3 Zeitungsdruckpapier C

Die Probe C ist ein Standard-Zeitungsdruckpapier mit überwiegendem Sekundärfaseranteil. Die Faserstoffmischung besteht aus rund 95 % Deinkingstoff (DIP) und 5 % Holzschliff. Die Trockenpartie ist zur Hälfte einreihig ausgeführt.

Tab. 3: Messwerte für Probe C				
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung des Profils	Standardabweichung der Messung
Flächenbezogene Masse	g/m ²	46,53	0,38	
Feuchtegehalt	%	7,67	0,53	
TSI MD	kNm/g	9,64	0,18	
TSI CD	kNm/g	3,23	0,22	
TSI CD / TSI MD		2,99	0,19	
Längsdehnung	%	4,80	0,09	0,07
Querschrumpfung	%	3,92	1,30	0,13

Die Siebmarkierungsanalyse zeigt in Abb. 40 die starken Markierungen eines doppellagigen Siebes in 8-Schaft und die zahlreichen Peaks eines dreilagigen SSB-Siebes in 20-/5-Schaft.

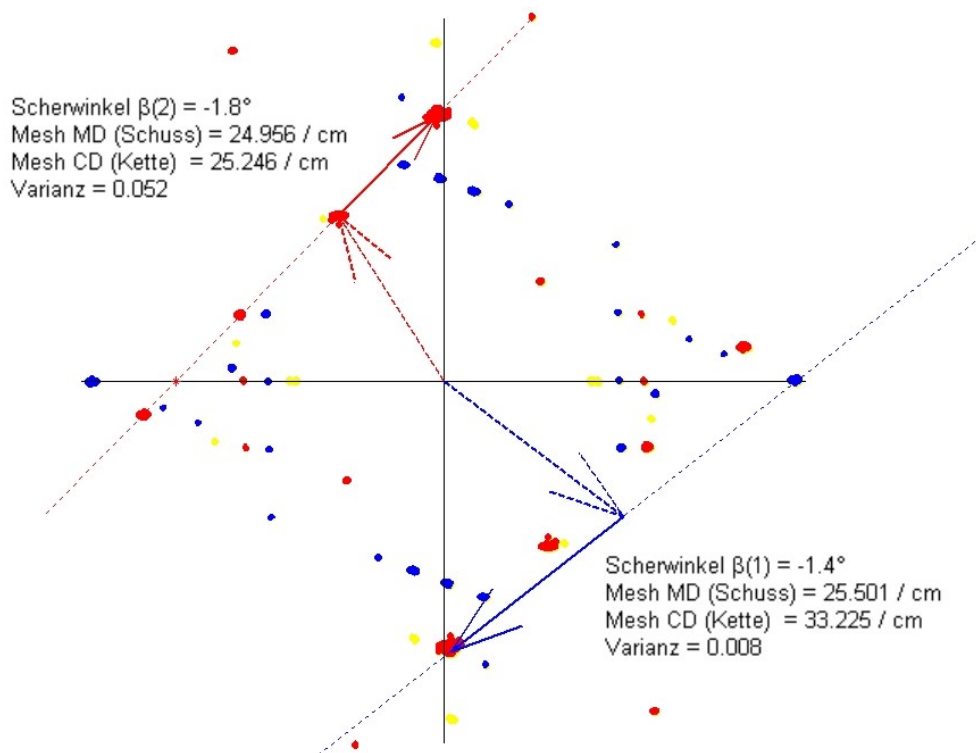


Abb. 40: Siebmarkierungen der Probe C in der Bahnmitte

Das Längsdehnungsprofil verläuft horizontal ohne erkennbaren Trend über die Bahnbreite. Augenfällig sind starke Dehnungsschwankungen im Bereich von 1,9 m, 2,8 m, bei 4 m sowie zwischen 5,3 m und 6,2 m Bahnbreite. Die Spitzen liegen deutlich über 0,2 % Dehnung, wie aus **Abb. 41** ersichtlich.

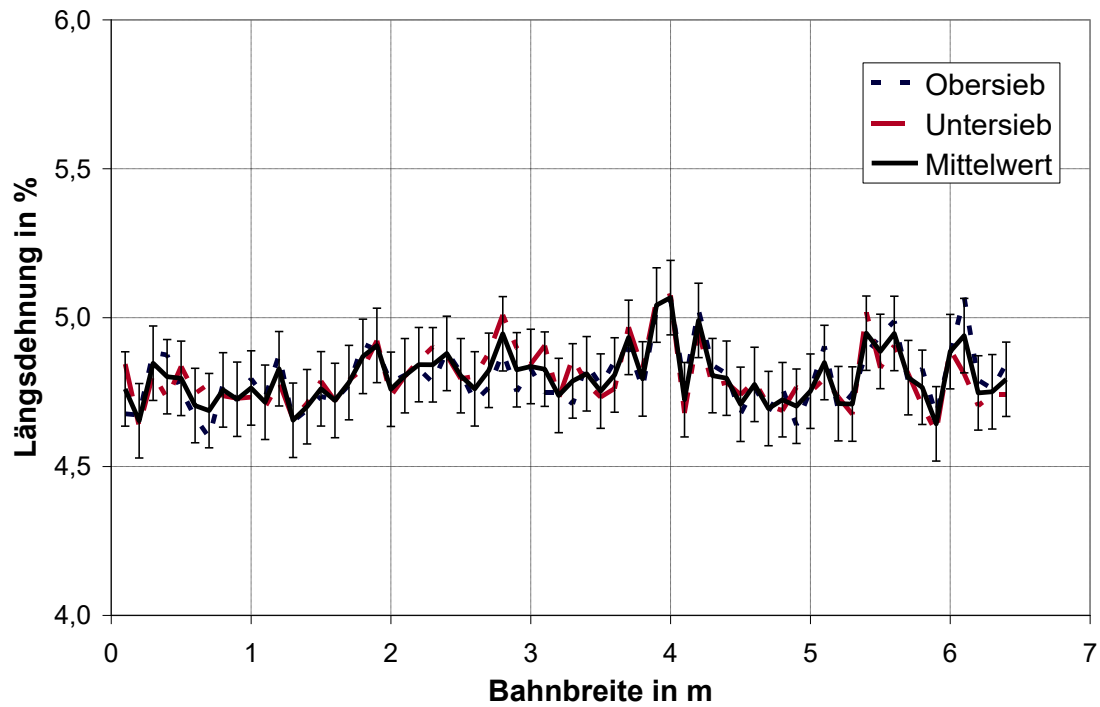


Abb. 41: Längsdehnungsprofil der Probe C

Das Querschrumpfungsprofil zeigt eine ausgeprägte Wannenform, die auf eine geringe Schrumpfungsbehinderung in der Trockenpartie schließen lässt. Trotz der großen Schwankungsbreite zeigen **Abb. 41** und **Abb. 42** nur sehr geringe Differenzen zwischen Ober- und Untersieb. Offensichtlich weisen die Siebe kaum Dehnungsschwankungen auf.

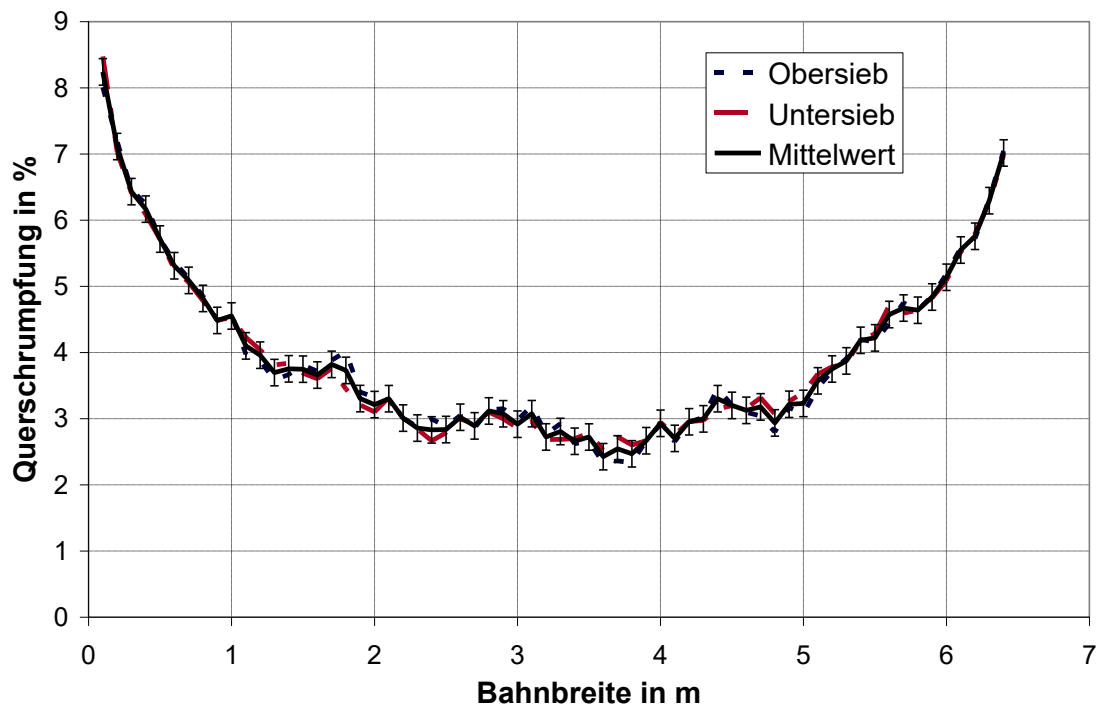


Abb. 42: Querschrumpfungsprofil der Probe C

Die postulierte umgekehrt proportionale Beziehung zwischen der flächenbezogenen Masse und der Dehnung zeigt sich in **Abb. 43** lediglich in einzelnen Bereichen.

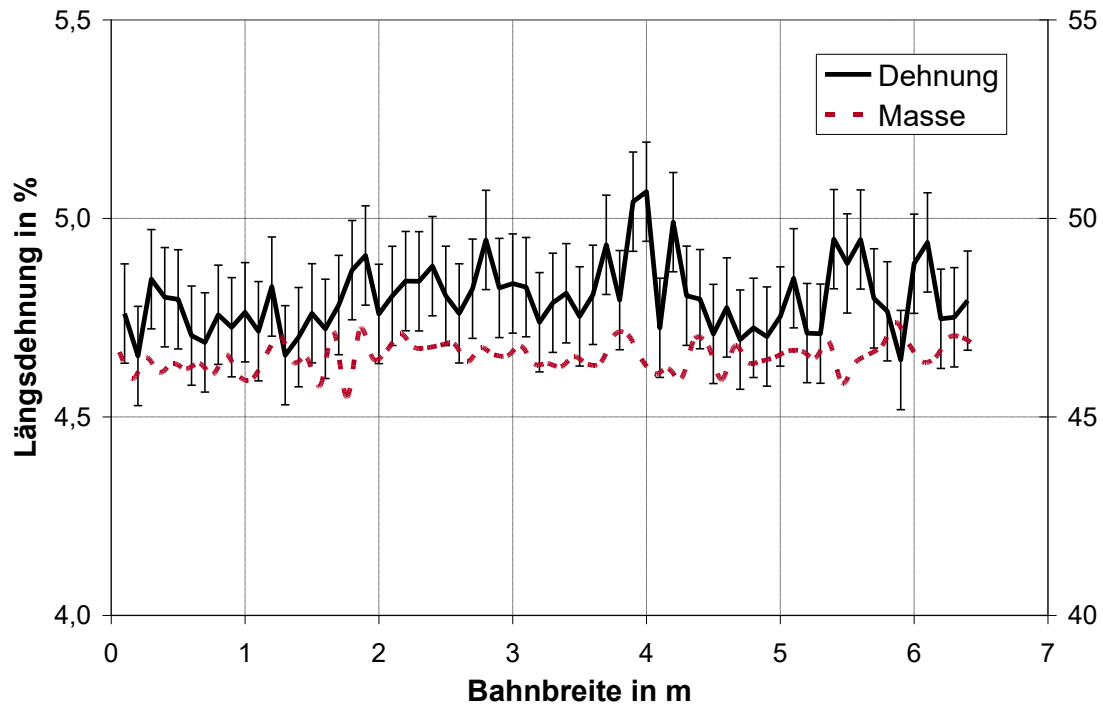


Abb. 43: Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe C

Auch **Abb. 44** liefert nur Hinweise auf einen lokalen Einfluss der Zugsteifigkeit.

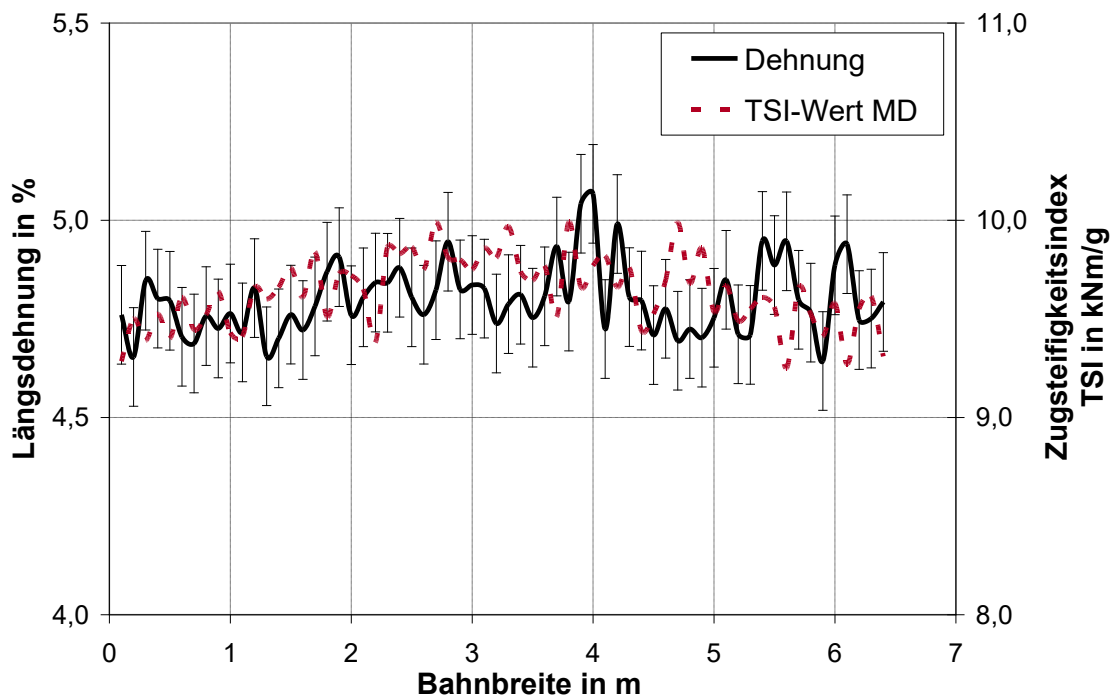


Abb. 44: Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe C

Die Längsdehnung kann nicht unabhängig von der viel stärkeren Querschrumpfung gesehen werden. Die Beziehung des TSI-Verhältnisses zur Schrumpfung spiegelt sich in Abb. 45 wider.

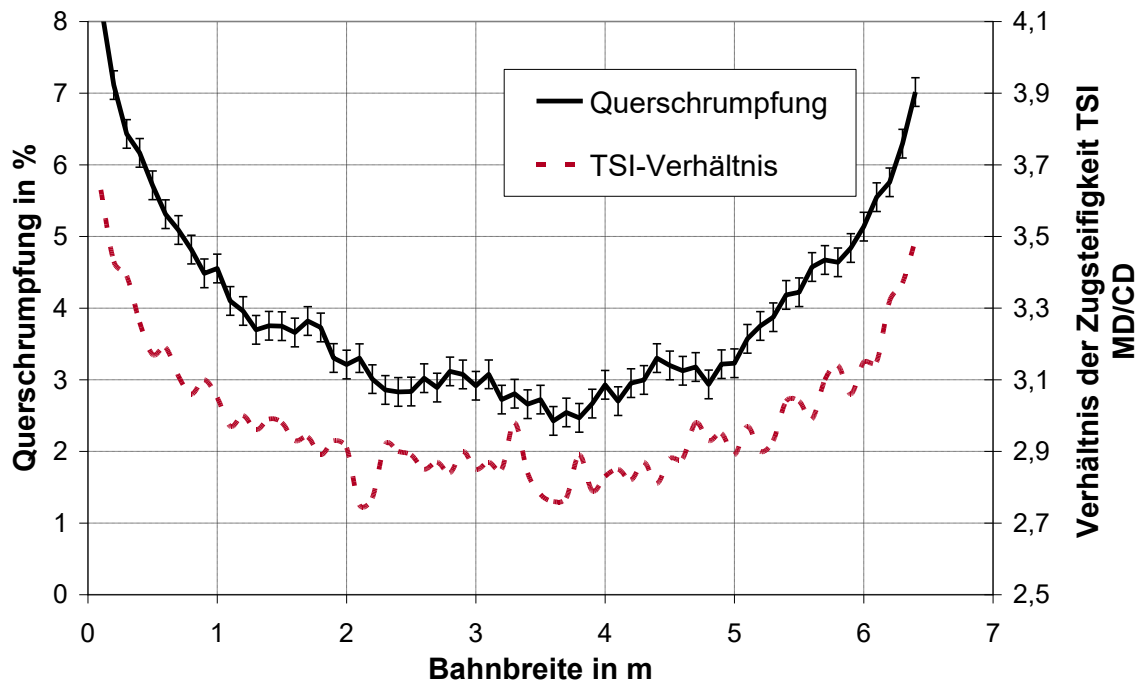


Abb. 45: Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe C

Die lokalen Schwankungen der TSI-Werte zeigen sich weder im Querschrumpfungs- noch im Nassdehnungsprofil, wie **Abb. 46** zeigt.

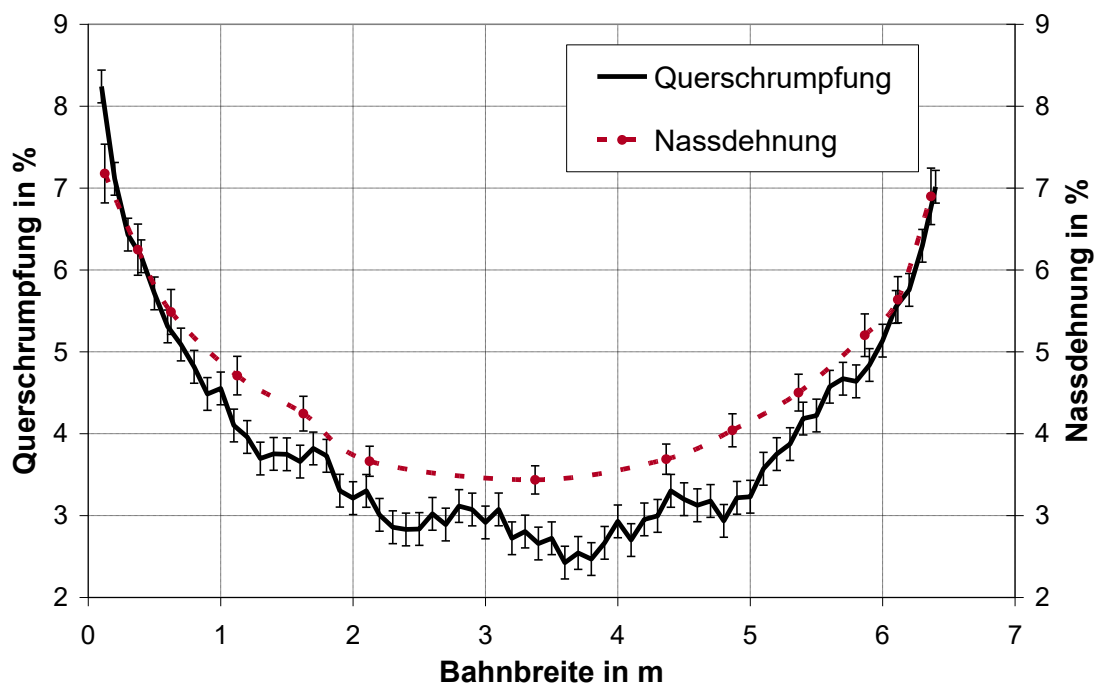


Abb. 46: Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung

Einzelne markante Stellen im Längsdehnungsprofil spiegeln sich in den Nassdehnungsprofilen nach der WSD-Methode wider. **Abb. 47** zeigt die lokalen Maxima der Nassdehnung und die entsprechenden Stellen im Profil der Siebmarkierungsanalyse.

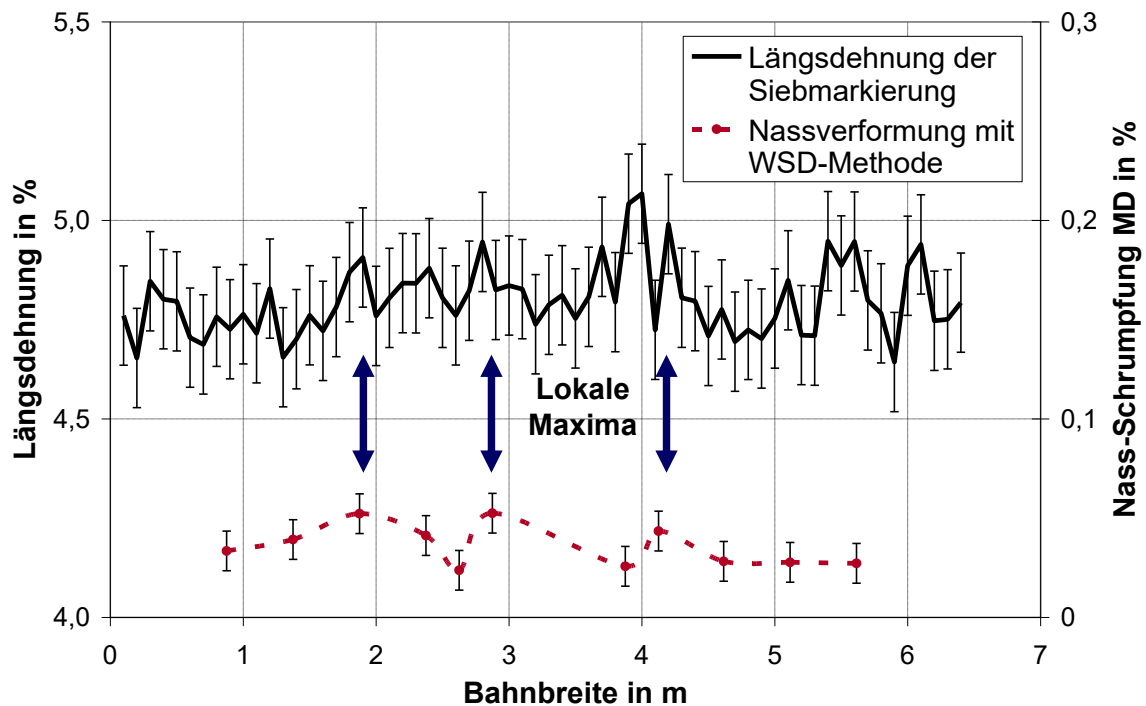


Abb. 47: Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung

Die Ursachen für diese hohen lokalen Dehnungen liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit in ungleichmäßigen Zügen in der Papiermaschine, da sich auch aus den Querprofilen des Qualitätsleitsystems kein anderer Hinweis ergibt. Auf Nachfrage erscheint ein bekanntes Problem mit der Saugpresse als vermutliche Ursache. Klarheit in dieser Frage wird die Dehnungsmessung nach dem anstehenden Umbau der Saugpresse bringen.

3.3.4 Zeitungsdrukpapier D

Das Standard-Zeitungsdruckpapier D wird ausschließlich aus Deinkingstoff (DIP) hergestellt. Die Trockenpartie ist zu 80 % einreihig ausgeführt.

Tab. 4: Messwerte für Probe D				
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung des Profils	Standardabweichung der Messung
Flächenbezogene Masse	g/m ²	46,12	0,45	
Feuchtegehalt	%	8,5		
TSI MD	kNm/g	10,54	0,34	
TSI CD	kNm/g	3,36	0,29	
TSI CD / TSI MD		3,14	0,23	
Längsdehnung	%	6,52	0,12	0,12
Querschrumpfung	%	2,91	1,31	0,16

In Abb. 48 zeigen sich klare Siebmarkierungen eines doppellagigen 8-Schaft-Siebes und die eines dreilagigen SSB-Siebes in 24-/6-Schaft.

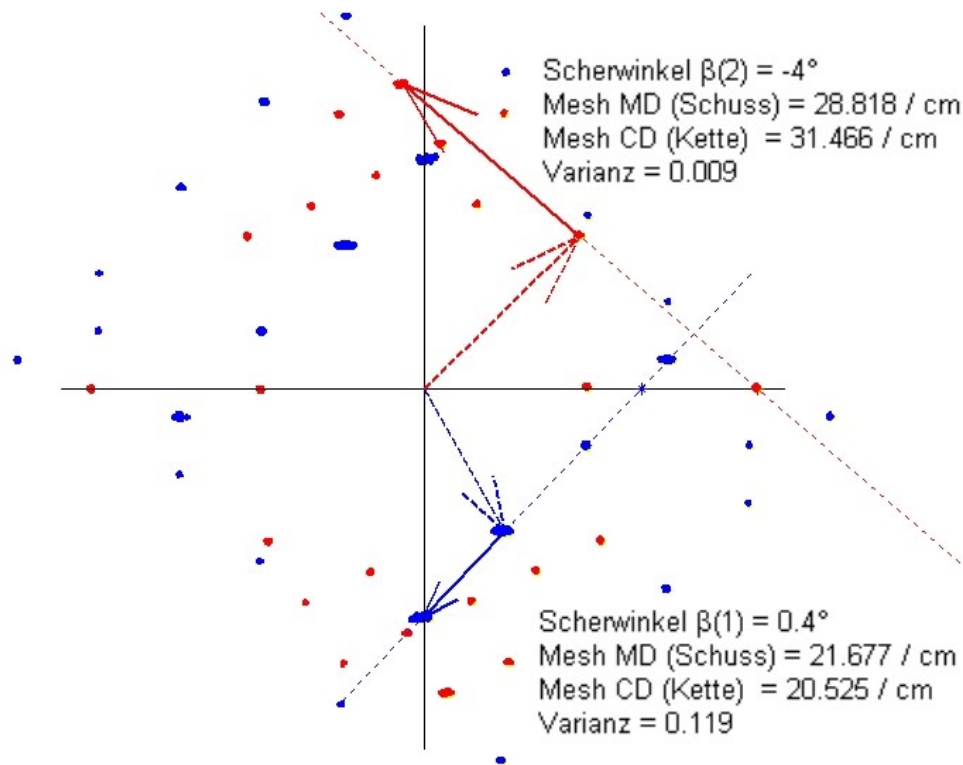


Abb. 48: Siebmarkierungen der Probe D in der Bahnmitte

In **Abb. 49** fällt das wechselhafte Profil der Längsdehnung auf. Die gleichmäßigen Abschnitte zeichnen sich durch relativ hohe Differenzen zwischen Ober- und Untersieb-Messung aus. Es wäre zu prüfen, in wieweit lokale Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den beiden Sieben, asymmetrische Strömungsverhältnisse im Suspensionsstrahl oder Verformungen im Sieb vorliegen.

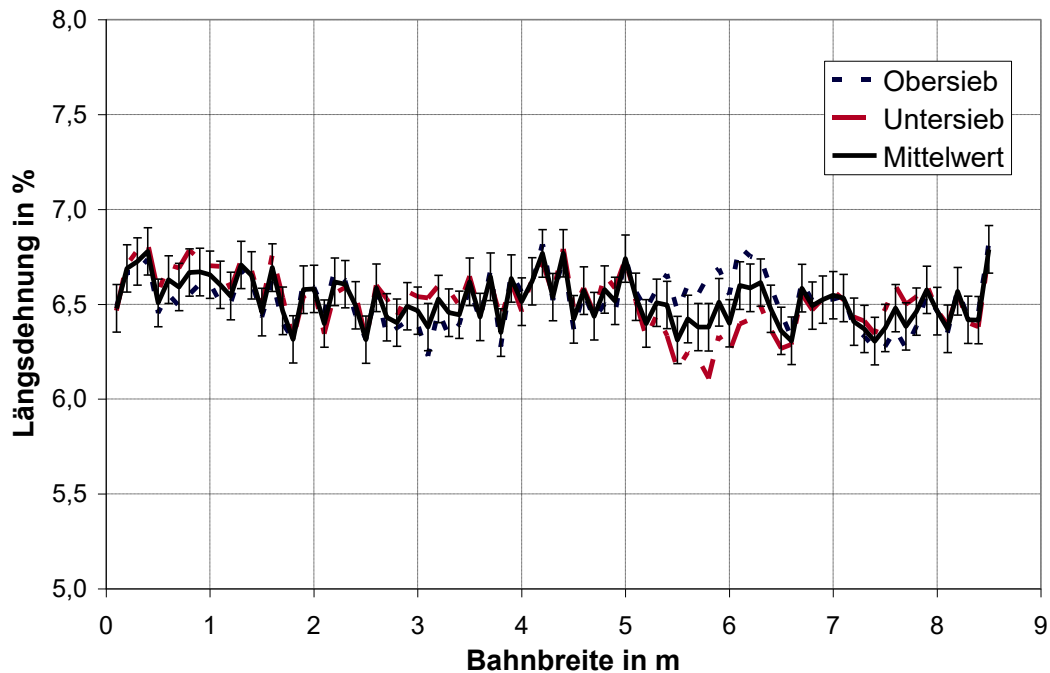


Abb. 49: Längsdehnungsprofil der Probe D

Ein Hinweis auf ein Problem in der Siebpartie ergibt sich aus den in Abb. 50 dargestellten relativ großen Änderungen der Schussfadenwinkel. Sie werden in der Regel durch lokale Schubkräfte verursacht. Durch die gelenkigen Bindungen können schon geringe einseitige Kräfte ein Sieb verformen. In Frage kommen z. B. die Ausrichtung des Stoffauflaufs, der Auftreffpunkt bzw. der Auftreffwinkel des Suspensionsstrahls, die Fehlstellung eines Entwässerungselements, ein Vakuumgefälle im Saugkasten oder einseitiger Schlupf im Siebantrieb.

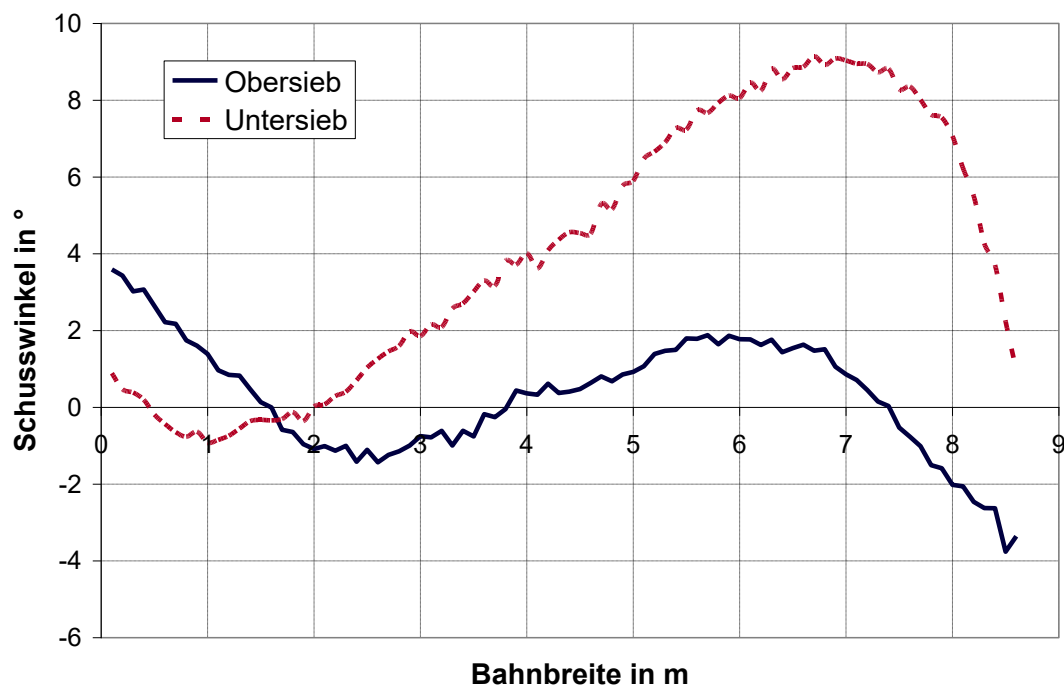


Abb. 50: Winkel der Schussmarkierung der Probe D

Das Querschrumpfungprofil in **Abb. 51** zeigt keine vergleichbaren Differenzen zwischen Ober- und Untersieb und keine Beziehung zum Längsdehnungsprofil.

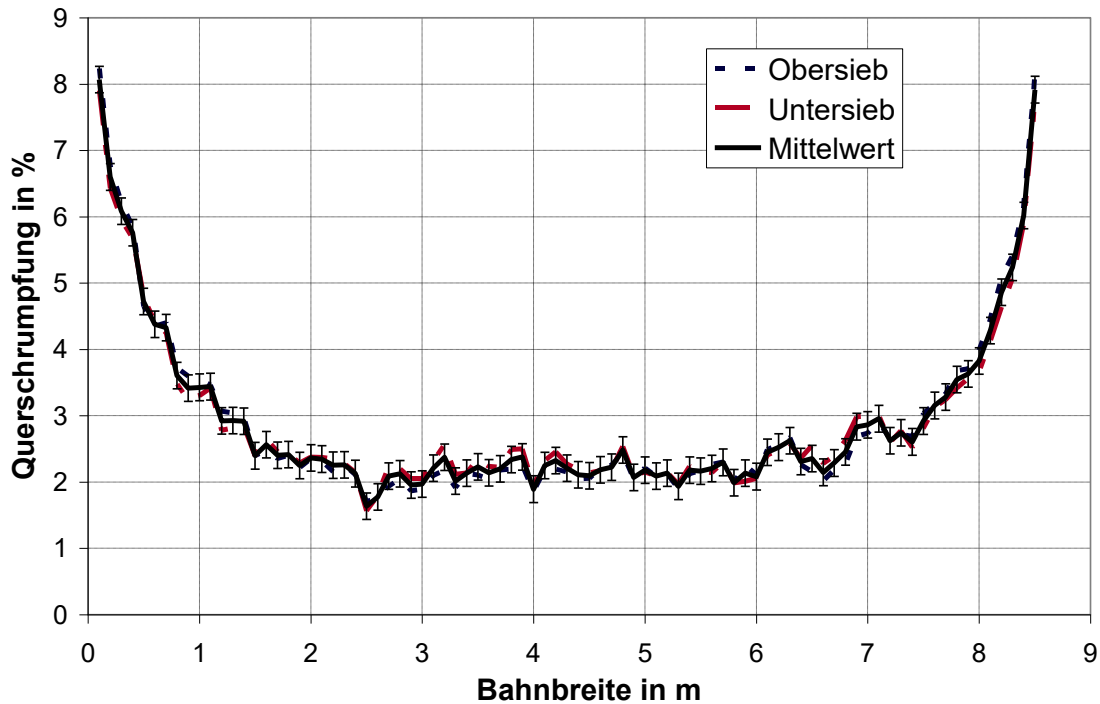


Abb. 51: Querschrumpfungprofil der Probe D

Aus dem Profil der flächenbezogenen Masse in **Abb. 52** lassen sich keine Rückschlüsse auf das Dehnungsprofil ziehen.

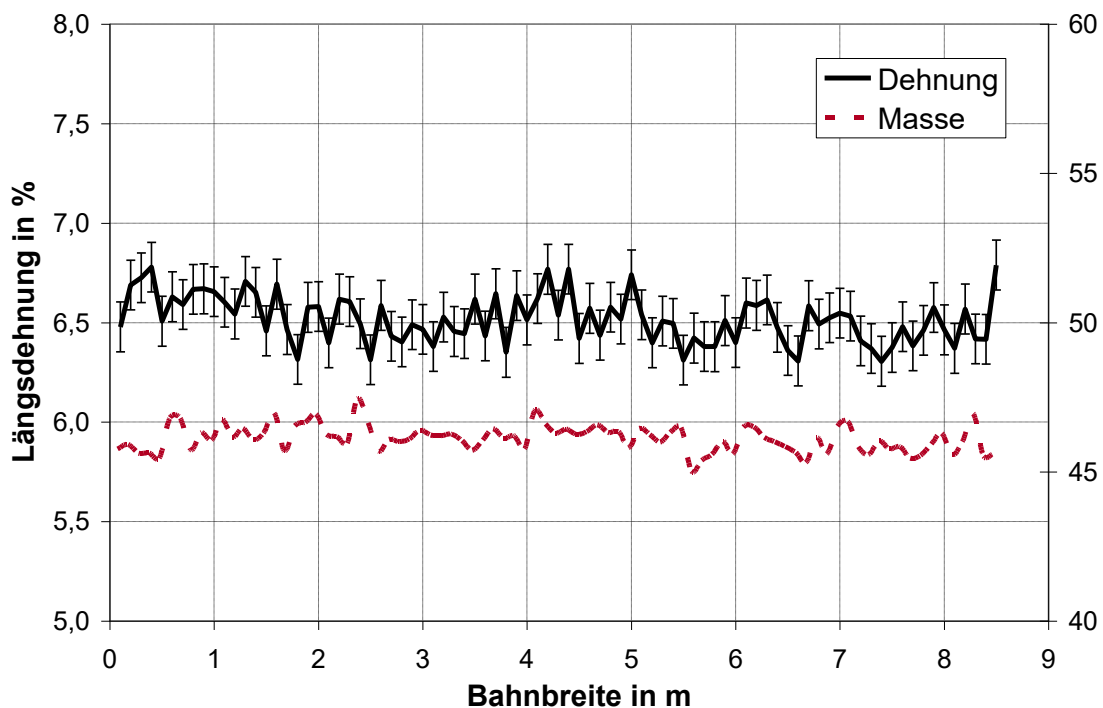


Abb. 52: Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe D

Die aus **Abb. 53** ersichtlichen Schwankungen von Längsdehnung und Zugsteifigkeit passen weder im Trend noch in örtlichen Bereichen zueinander.

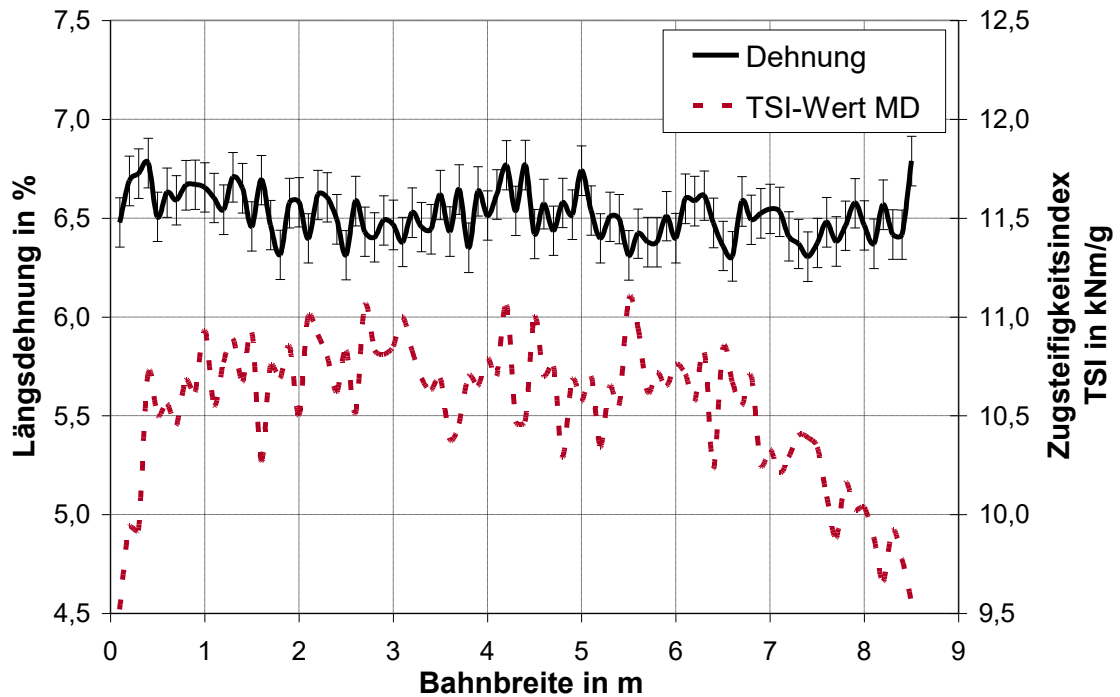


Abb. 53: Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe D

Beim Vergleich der Kurven in **Abb. 54** erkennt man einen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Zugsteifigkeiten in Längs- und Querrichtung und der Querschrumpfung.

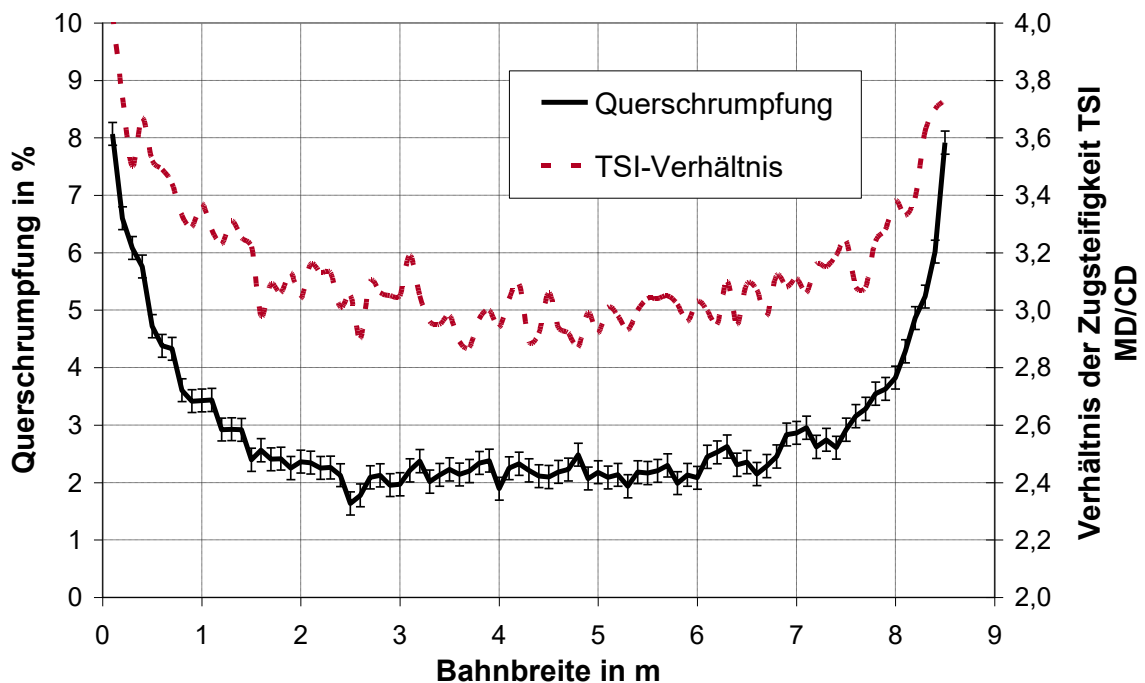


Abb. 54: Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe E

Ein gemeinsamer Trend zeigt sich in **Abb. 55** für die Nassdehnung und die Querschrumpfung.

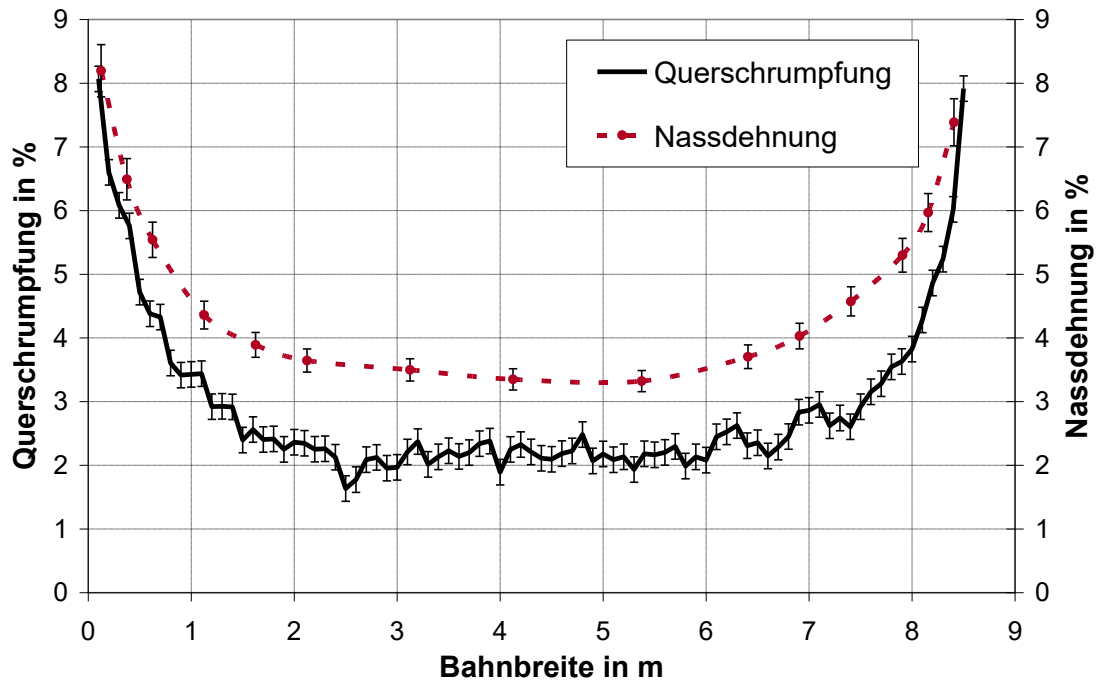


Abb. 55: Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung

Keine Gemeinsamkeiten ergeben sich aus **Abb. 56** für die Verformungen in Längsrichtung.

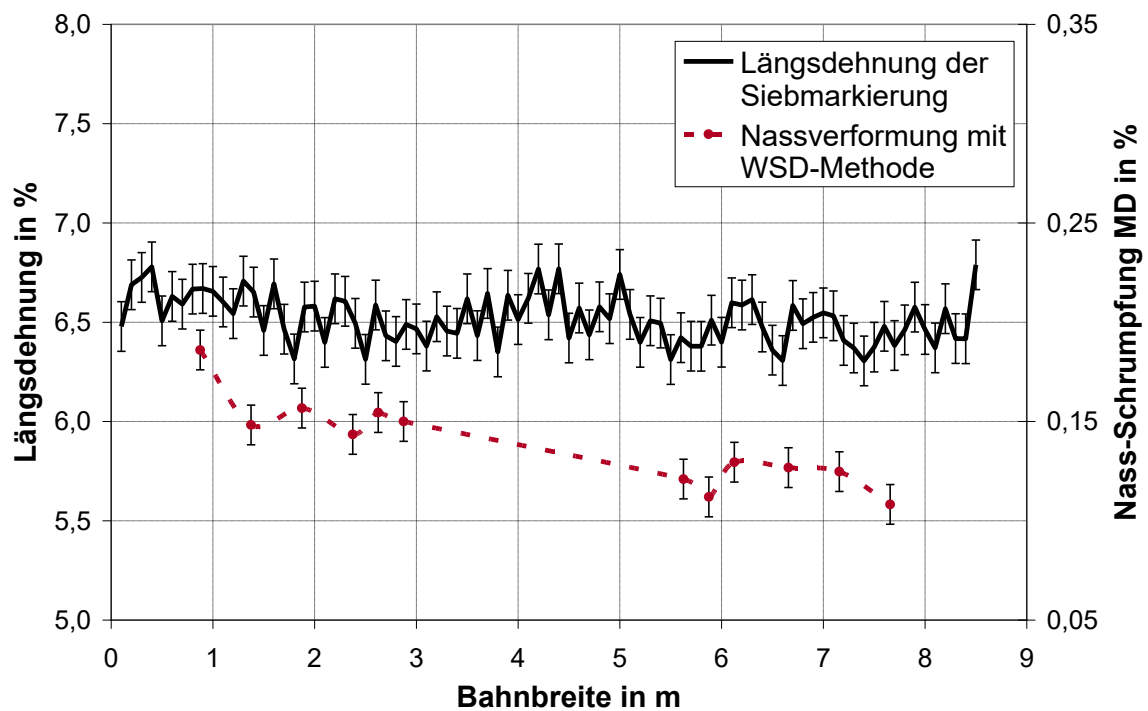


Abb. 56: Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung

Offensichtlich sind die lokalen Schwankungen nicht groß genug, um sich in der Nassdehnung bemerkbar zu machen.

3.3.5 Zeitungsdruckpapier E

Im Standard-Zeitungsdruckpapier E überwiegt der Primärfaserstoff. Die Faserstoffmischung besteht aus rund 55 % thermo-mechanischen Holzstoff (TMP) und 45 % Deinkingstoff (DIP). Die Trockenpartie ist zu 69 % einreihig ausgeführt.

Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung des Profils	Standardabweichung der Messung
Flächenbezogene Masse	g/m ²	48,07	0,45	
Feuchtegehalt	%	9,3		
TSI MD	kNm/g	9,52	0,21	
TSI CD	kNm/g	2,10	0,17	
TSI CD / TSI MD		4,54	0,33	
Längsdehnung	%	4,55	0,10	0,11
irreversibler Anteil	%	3,83	0,10	0,13
Querschrumpfung	%	2,50	1,00	0,21
irreversibler Anteil	%	0,20	0,36	0,22

Die Siebmarkierungen in **Abb. 57** zeigen zwei doppelagige 8-Schaft-Siebe.

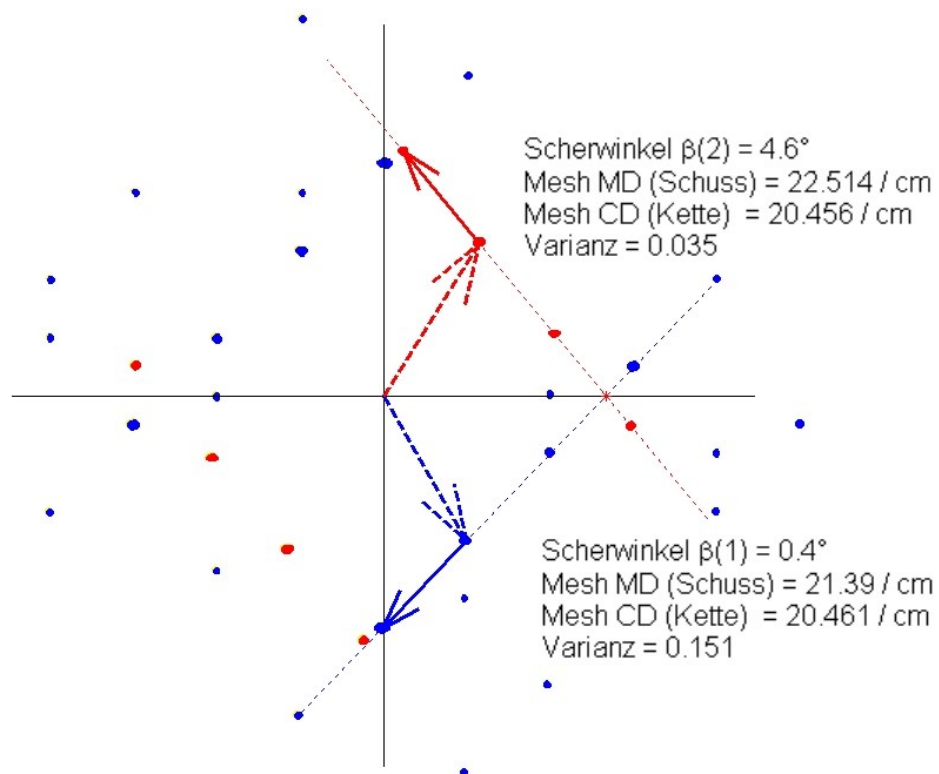


Abb. 57: Siebmarkierungen der Probe E in der Bahnmitte

Bei Probe E wurden reversible und irreversible Längsdehnungen gemessen. **Abb. 58** zeigt den annähernd parallelen Verlauf mit etwas höheren Dehnungen in der Bahnmitte.

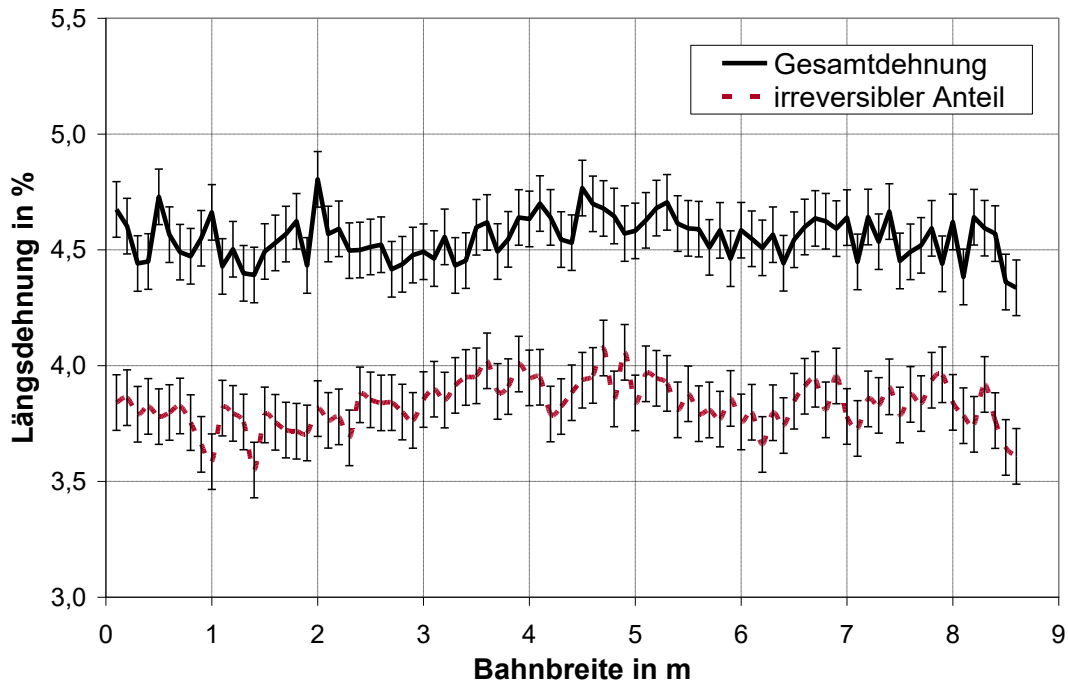


Abb. 58: Längsdehnungsprofil der Probe E

Im Gegensatz dazu finden sich die Verformungsspitzen der Querschrumpfung im irreversiblen Anteil wieder, während sich das Profil bis auf die Randbereiche weitgehend egalisiert.

Abb. 59 zeigt, wie sich die lokalen Schwankungen im irreversiblen Anteil niederschlagen.

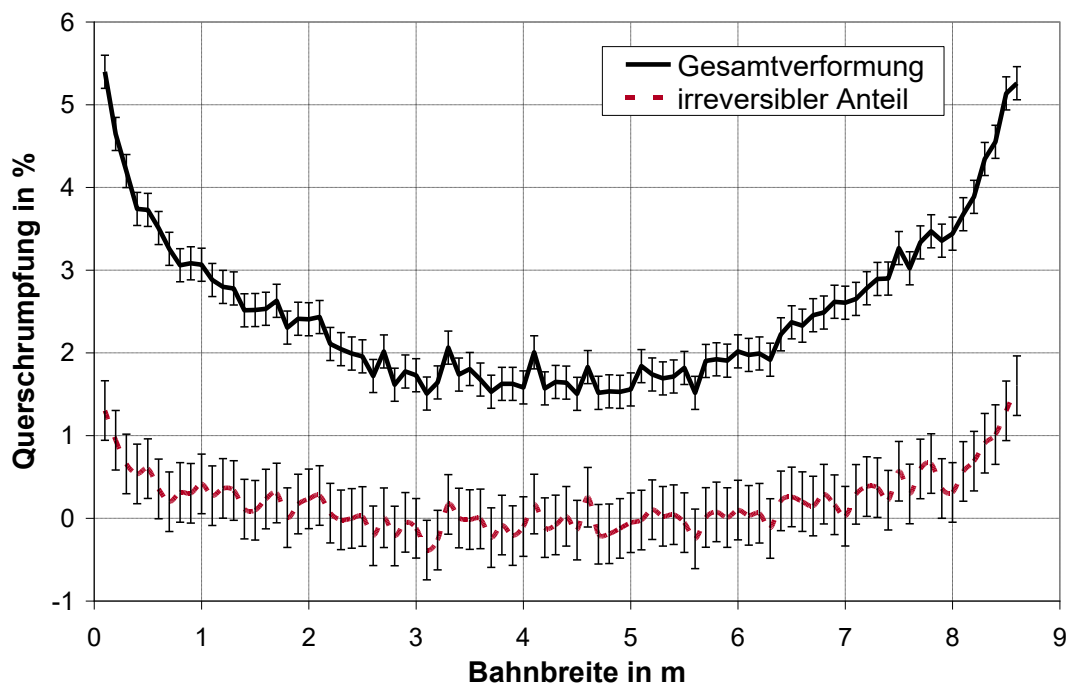


Abb. 59: Querschrumpfungprofil der Probe E

Das Längsdehnungsprofil weist keine erkennbaren Gemeinsamkeiten mit dem sehr ausgeglichenen Profil der flächenbezogenen Masse auf, wie **Abb. 60** verdeutlicht.

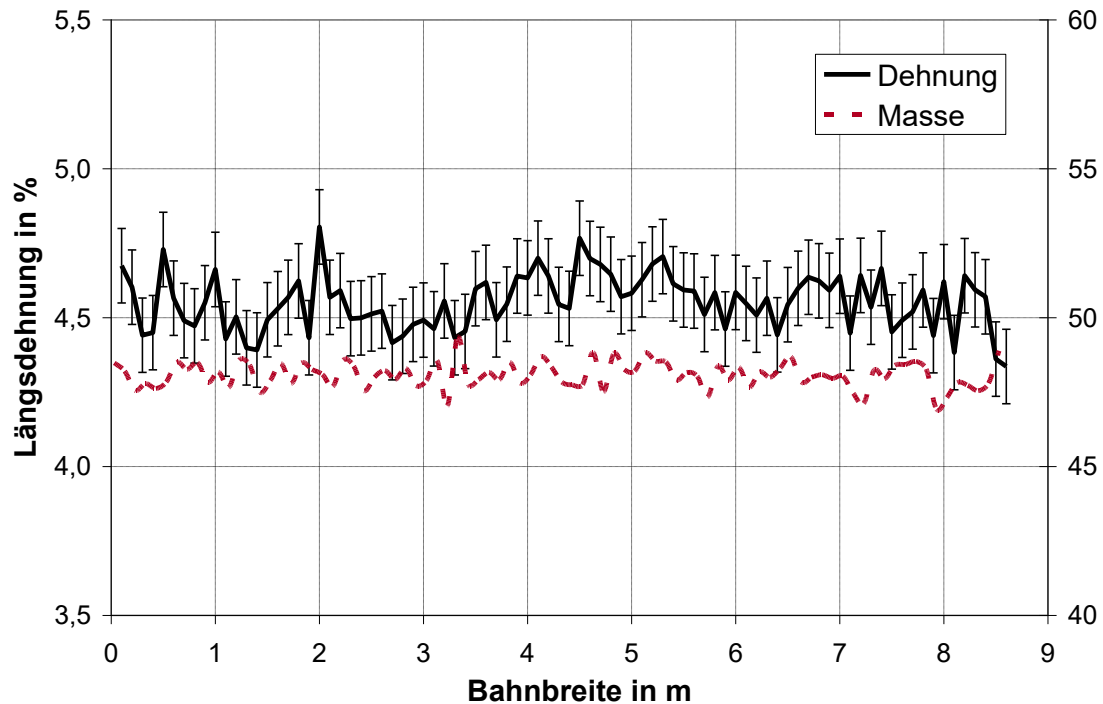


Abb. 60: Vergleich von Längsdehnung und Masseschwankungen der Probe E

Die Zugsteifigkeit TSI in **Abb. 61** weist nicht die Wechselbeziehung mit der Längsdehnung auf, wie sie z. B. das TSI-Verhältnis mit der Querschrumpfung in **Abb. 62** zeigt.

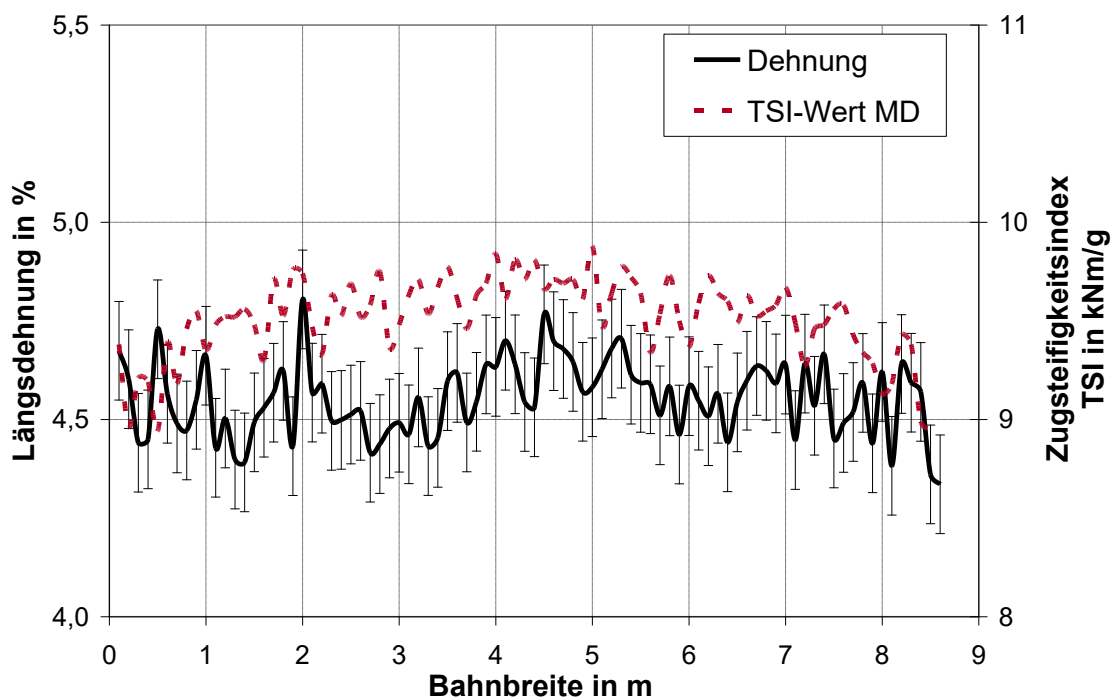


Abb. 61: Vergleich von Längsdehnung und Zugsteifigkeit der Probe E

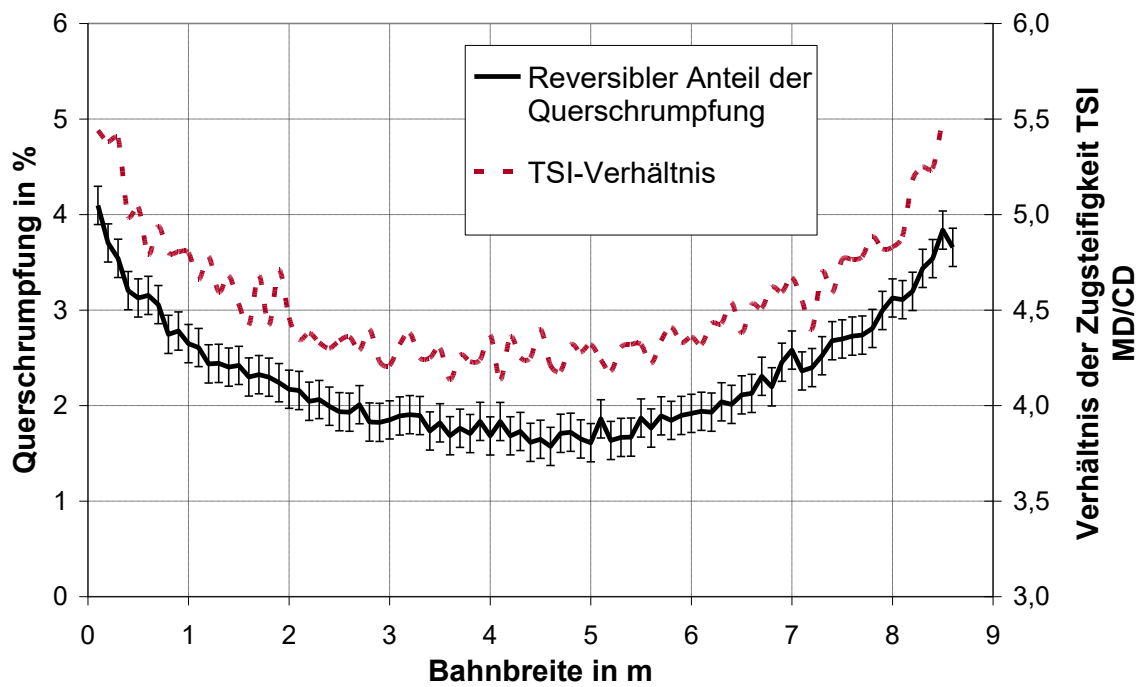


Abb. 62: Zugsteifigkeitsverhältnis und Querschrumpfung der Probe E

Wie reversibel die Schrumpfung in Querrichtung ist, lässt sich auch mit der WSD-Methode ermitteln und wie in **Abb. 63** als Profil darstellen.

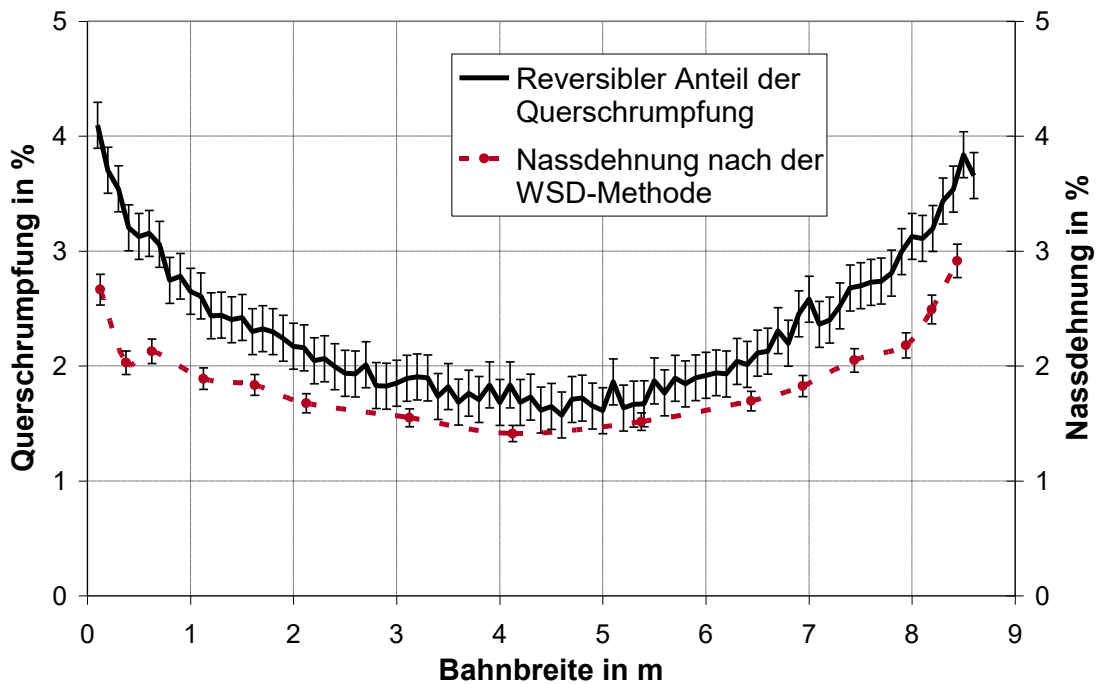


Abb. 63: Bahnschrumpfung und Nassdehnung in Querrichtung

Wegen der Vorspannkraft kann sich eine Längsdehnung in der Probe bei der WSD-Methode nur bedingt zurückbilden. **Abb. 64** zeigt den Unterschied zur Siebmarkierungsanalyse.

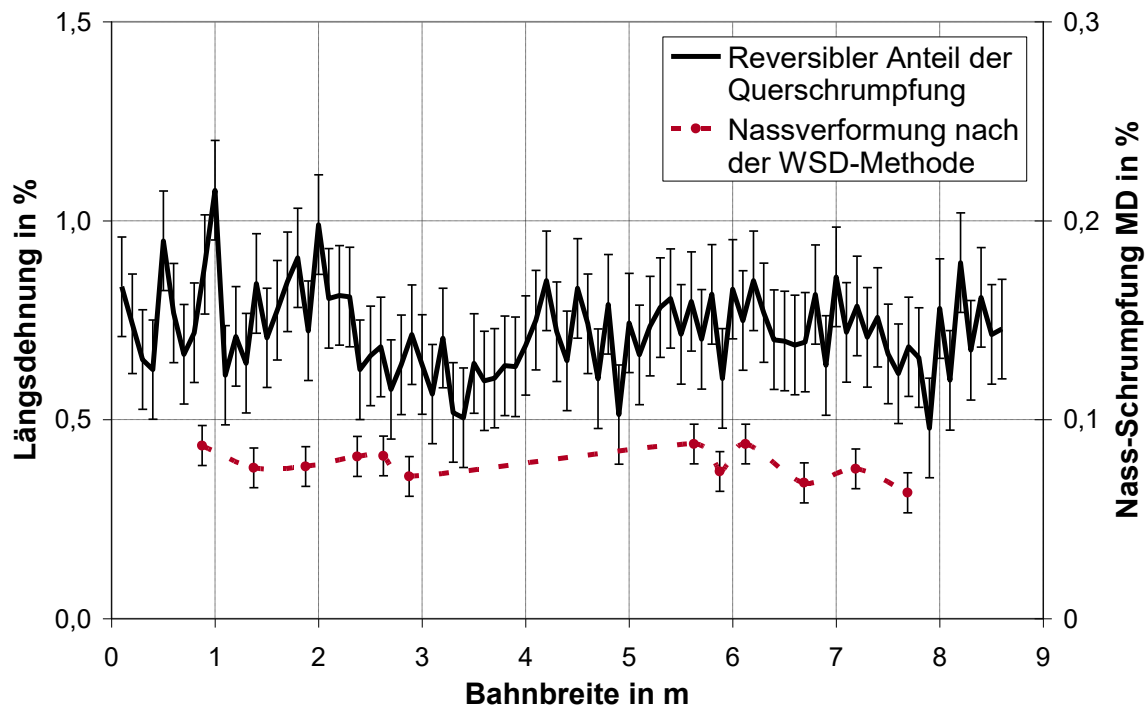


Abb. 64: Bahndehnung und Nassverformung in Maschinenrichtung

3.4 Messung plastischer Verformung bei der Papierverarbeitung

Es gibt zwei wichtige Bereiche der Papierveredelung, die man als Extremfälle der Papierverarbeitung betrachten kann. Es handelt sich einerseits um das Streichen und andererseits um das Satinieren im Superkalender. Möglichkeiten und Grenzen der Siebmarkierungsanalyse beim Satinieren werden im Folgenden dargestellt.

3.4.1 Messungen an SC-Papier

Für die Untersuchung wurden zwei SC-Papiere unterschiedlicher Herkunft herangezogen. Das Problem bei SC-Papieren liegt in der geringen Intensität der Siebmarkierung nach der Satinage. Die Oberfläche des Papiers wird eingeebnet und damit verschwindet ein Gutteil der topographischen Siebmarkierung. Die Stärke deterministischer Signale im Spektrum sinkt.

Die starke Verdichtung des Blatts führt zu niedriger Opazität bis hin zu transparenten Stellen. Die so genannte Schwarzsatinage verstärkt den Anteil der stochastischen Signale. Das Rauschen im Spektrum wächst.

Im SC-Rohpapier sind die Markierungen von Ober- und Untersieb klar zu erkennen. Die beiden Siebmarkierung in **Abb. 65** weisen Anteile von 5 % und 1,5 % an der Gesamtvarianz auf. Die rund 84 Peaks sind nahezu gleichmäßig verteilt. Der Signal-Rausch-Abstand ist ausreichend hoch.

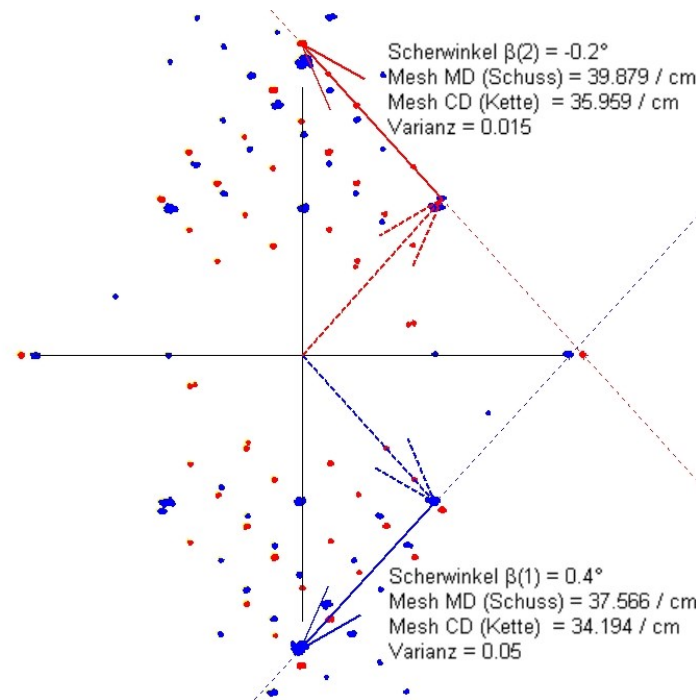


Abb. 65: Siebmarkierungsgeometrie des SC-Rohpapiers der Probe F

Abb. 66 zeigt die Markierungen der entsprechenden Probe des satinierten Papiers. Die Anzahl der Peaks beträgt 114, um die schwächere Markierung mit 20 Peaks noch sicher zu erkennen. Mit einem Varianzanteil von 0,3 % liegt die Markierung an der Grenze der Auflösung.

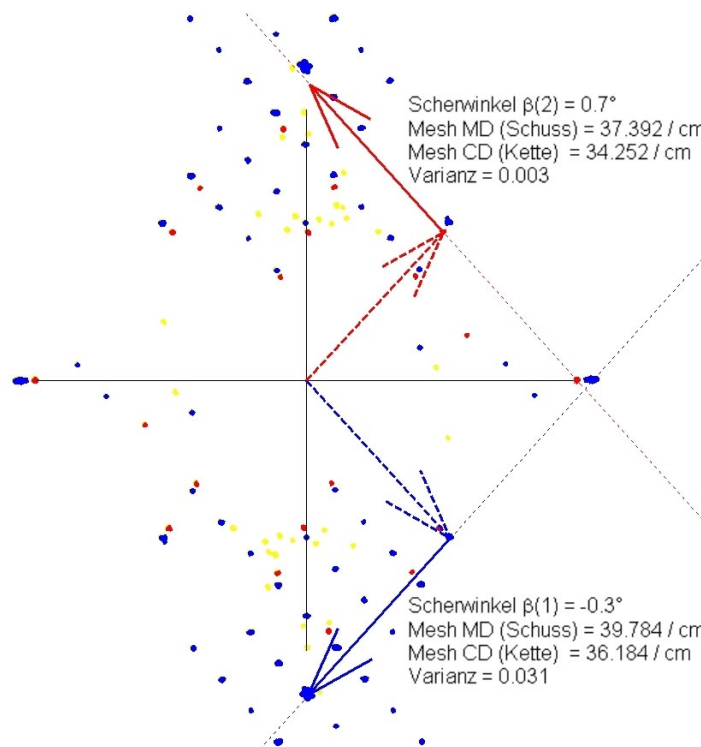


Abb. 66: Siebmarkierungsgeometrie der SC-Papiers der Probe F

Die daraus berechneten Querschrumpfungsprofile entsprechen den Erwartungen. Das SC-Rohpapier hat eine annähernd konstante Querschrumpfung bis etwa 1,2 m an den Rand, wie

aus **Abb. 67** ersichtlich. Die Messung der Bahnbreiten ergibt einen mittleren Schrumpfung um 1,3 %. Das Profil zeigt eine hohe Schrumpfung in einem 2 m breiten Randbereich.

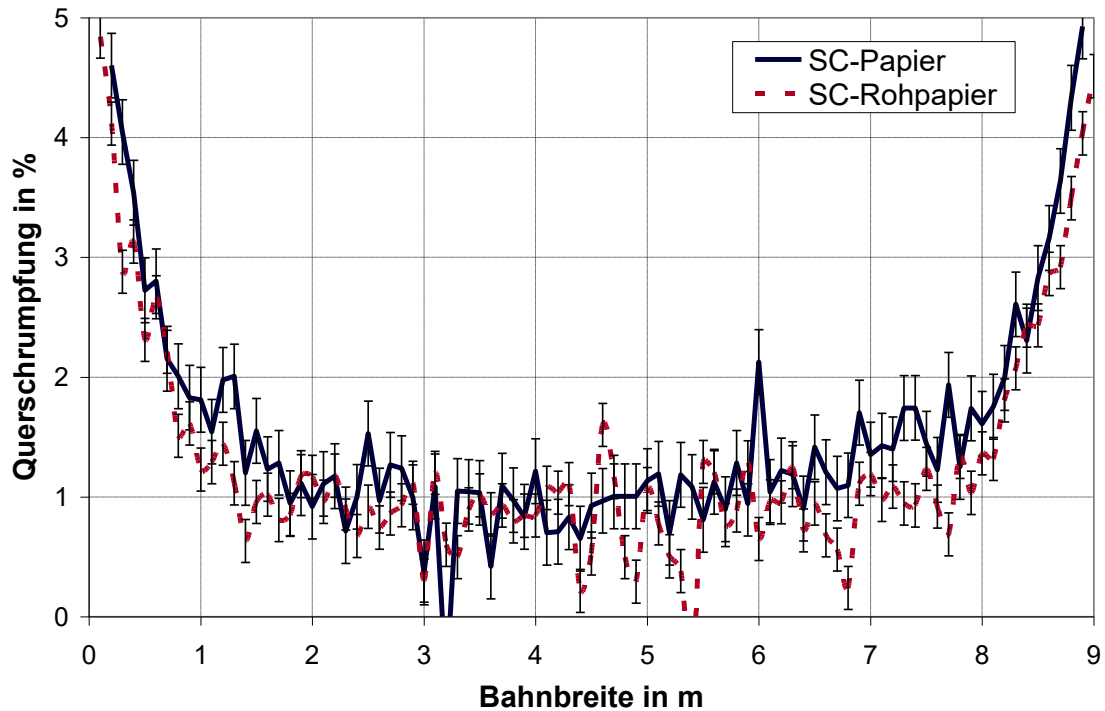


Abb. 67: Querschrumpfungprofile der Probe F vor und nach der Satinage

Die Längsdehnungsprofile in **Abb. 68** sind besonders interessant. Die Profile zeigen eine auffallend hohe Differenz im Bereich bis etwa 2,5 m Bahnbreite.

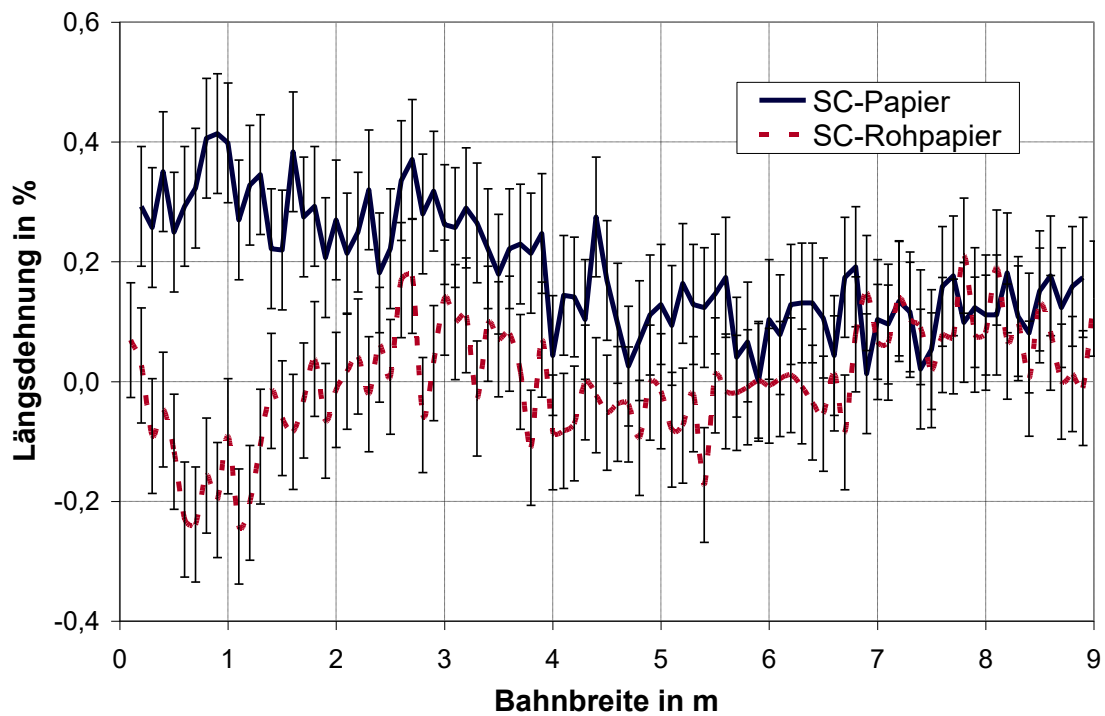


Abb. 68: Längsdehnungsprofile der Probe F vor und nach der Satinage

Bestätigt sich dieses asymmetrische Profil in weiteren Mustern, so sind die Walzen des Kalenders und deren Ausrichtung zu überprüfen. Die mittlere Längsdehnung im Kalender beträgt 0,19 % bei einer Standardabweichung von 0,10 %.

Die SC-Probe G zeigt in **Abb. 69** einen geringeren Trend über die Bahnbreite. Bei vergleichbarer Standardabweichung ist die Längsdehnung im Kalender mit 0,29 % deutlich höher als die von Probe F.

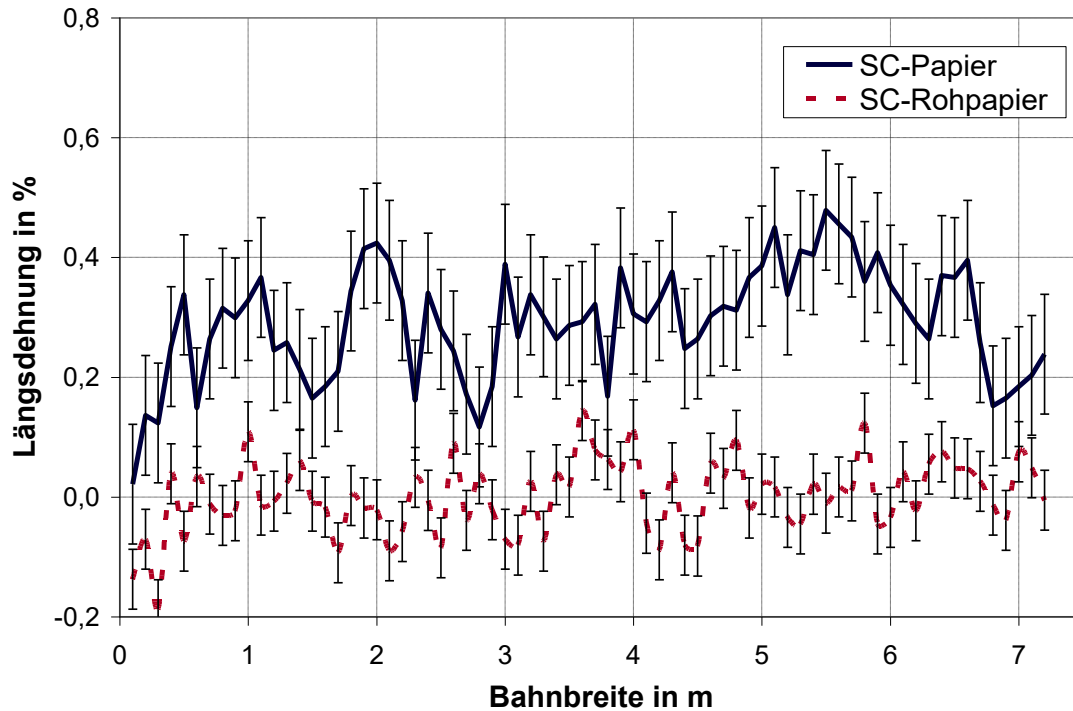


Abb. 69: Längsdehnungsprofile der Probe G vor und nach der Satinage

3.4.2 Messungen an LWC-Papier

LWC-Papier gehört zur Gruppe der gestrichenen holzhaltigen Druck- und Pressepapiere. Sie zeichnen sich durch ihre sehr gute Bedruckbarkeit aus. Ihr hohes Niveau von Glanz und Glätte verdanken sie einem zweiseitigen Strich und einer nachfolgenden Satinage. Die Herausforderung der Siebmarkierungsanalyse liegt in dem geringen Signal-Rausch-Verhältnis, das sich aus der Abdeckung des Rohpapiers ergibt.

Abb. 70 zeigt das aufbereitete Amplitudenspektrum einer noch unsatinierten Probe eines LWC-Papiers. Von 116 detektierten Peaks entfallen lediglich 38 auf Siebmarkierungen. Die stärkere von beiden kann mit 28 Peaks und einem Anteil von 1 % an der Gesamtvarianz einem dreilagigen 24-/6-Schaft-SSB-Gewebe zugeordnet werden. Die zweite Siebmarkierung liegt mit 10 Peaks und einem Varianzanteil von 0,1 % nicht mehr im engen Toleranzbereich für eine sichere Doppelbestimmung. Die Maschinenrichtung der zweiten Siebmarkierung weist einen Winkelfehler von 1,2° auf.

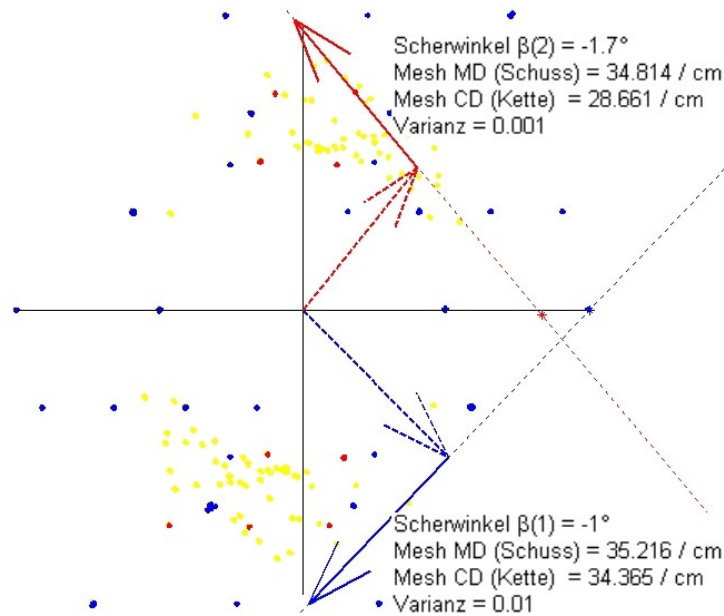


Abb. 70: Siebmarkierungsgeometrie einer unsatinierten LWC-Probe

Die satinierte Probe konnte mit dem aktuellen Stand der bildanalytischen Vorverarbeitung nicht untersucht werden. Das deterministische Signal ist so stark von stochastischen Signalen überlagert, dass der Cluster-Algorithmus keine eindeutige Zuordnung mehr treffen kann. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, sollten in der Vorverarbeitung adaptive Filter eingesetzt werden, wie sie in der Nachrichtentechnik zur Rauschunterdrückung üblich sind.

3.4.3 Messung plastischer Dehnung an Kalandern

Die Analyse von Siebmarkierungen unsatiniertes und satiniertes Querprofile erfasst plastische Verformungen in Längs- und Querrichtung. Die Schrumpfung der Bahn in Querrichtung betrifft im Wesentlichen den Randbereich. Die schon vorhandene Querschrumpfung wird nicht wesentlich erhöht. Die Längsdehnung schwankt nominell geringer als die Querschrumpfung. Die lokalen Schwankungen sind jedoch über die ganze Bahnbreite verteilt. Ganz offensichtlich sind in **Abb. 71** unterschiedliche Trends zu erkennen. Dieser ausgeprägte Unterschied in den Trends kann nicht papiertechnologisch erklärt werden. Die Ursachen sind vielmehr auf der maschinentechnischen Seite zu suchen.

Damit erweist sich die Siebmarkierungsanalyse als hilfreiches Werkzeug, um Änderungen von Längsdehnung und Querschrumpfung zu beobachten. Dies ist die Voraussetzung für die Optimierung papiertechnologischer Parameter wie Faserstoffzusammensetzung und Papierfeuchte und Prozessparametern wie Bahnspannung, Temperatur und Linienkraft.

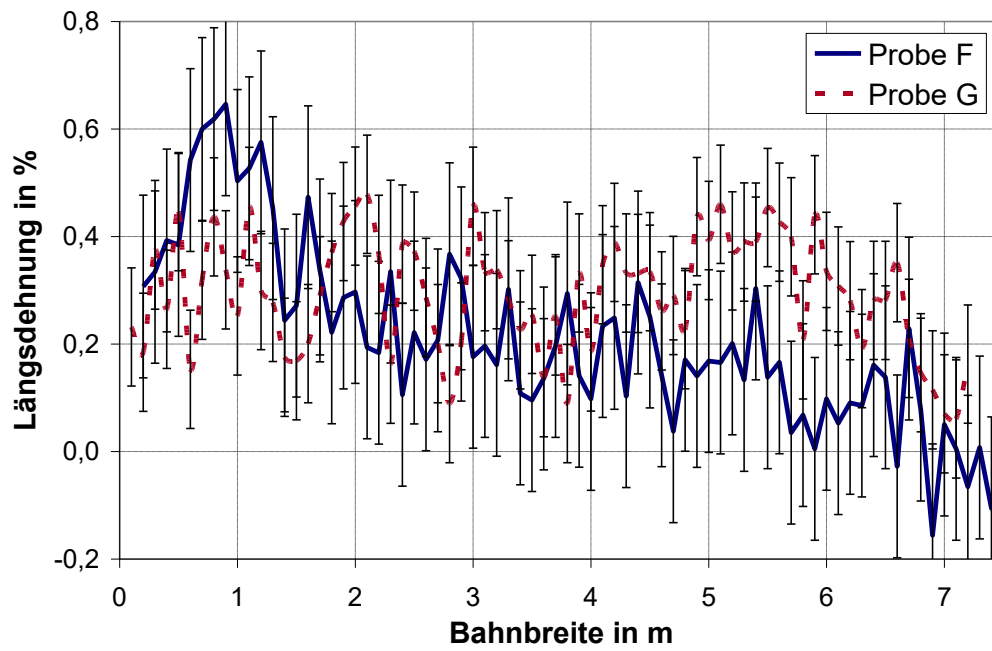


Abb. 71: Plastische Dehnung im Kalandrier

4 Interpretation der Ergebnisse

Im letzten Kapitel wurden die Proben und ihre Messwerte einzeln dargestellt. Im folgenden Kapitel werden die Messergebnisse zusammengefasst und hinsichtlich der Aufgabenstellung bewertet. Ziel des Projekts ist es, die Frage abzuklären, in wieweit Zusammenhänge zwischen Längsdehnungsprofil und andere Querprofile bestehen. Ebenso ist die dazu entwickelte Siebmarkierungsanalyse zur Längsdehnungsmessung zu bewerten.

4.1 Bewertung der Längsdehnungs- und Querschrumpfungsmessung

Die Genauigkeit der Siebmarkierungsanalyse liegt im Bereich von 0,05 % Dehnung absolut. Bezieht man die Inhomogenität des Markierungsmusters d. h. des Siebs mit ein, so ist eine Genauigkeit von 0,1 % absolut für die Längsdehnungsmessung realistisch. Im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren bedeutet dies eine Steigerung der Genauigkeit um den Faktor 5 bis 10. Mit einer Mehrfachbestimmung, wie sie sich als Online-Messung anbieten würde, kann die Genauigkeit noch weiter verbessert werden.

Die Grenze elastischer Verformung bewegt sich bei 0,2 % Dehnung. Damit liegt das aktuelle Messverfahren in dem Bereich, der notwendig ist, plastische Dehnungen hinreichend genau zu bestimmen. Die Genauigkeit ist so gut, dass Abweichungen zwischen den Markierungen von Ober- und Untersieb zu erkennen sind, wie in **Abb. 49** dargestellt. Mit der Siebmarkierungsanalyse lassen sich Abweichung im Profil bis in die Siebpartie zurückverfolgen.

Auch die Querschrumpfungsmessung profitiert von der vielfach höheren Genauigkeit. Damit sinkt die Gefahr von Fehlinterpretationen und deren Folgen bei der Optimierung von Prozessparametern. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Profilen von Längsdehnung und Querschrumpfung besteht nicht.

4.2 Dehnungsprofil und flächenbezogene Masse sowie Feuchte- und Füllstoffgehalt

Ein Zusammenhang zwischen den Profilen von Längsdehnung und flächenbezogener Masse konnte nicht gefunden werden. Ein Grund dafür liegt im Qualitätsleitsystem, das Querprofil-schwankungen der Masse, der Feuchte und des Füllstoffgehalts ermittelt, die direkt über geschlossene Regelkreise oder indirekt über das Bedienpersonal zu Korrekturen an den Einstellungen von Stoff- und Maschinenparametern führen. Die Untersuchung zeigt, dass in der Praxis das Profil der Längsdehnung ein eigenständiger Parameter ist und als solcher auch zur Diagnose und zur Optimierung des Bahnlaufs herangezogen werden kann.

4.3 Dehnungsprofil und Bahnspannungsprofil

Die Bahnspannungsmessung der Probe B zeigt in **Abb. 21** den charakteristischen bogenförmigen Verlauf, wie er aus der Literatur bekannt ist. Eine Ähnlichkeit zu den aufgenommenen Längsdehnungsprofilen besteht nicht. Gestützt von der Vorstellung, dass sich Unterschiede in der Dehnung über die Trocknung egalalisieren und letztendlich alleine die Papiermaschine die Längsdehnung der Bahn bestimmt, muss ein Einfluss der Bahnspannung auf die Längsdehnung verneint werden. Vielmehr ist die Bahnspannung eine Folge von Veränderungen durch Querschrumpfung und Längsdehnung.

4.4 Dehnungsprofil und Zugsteifigkeit

Die Veränderungen in der Papierbahn durch Längsdehnung und Querschrumpfung schlagen sich in der Zugsteifigkeit bzw. im E-Modul nieder. Das Profil der TSI-Werte in Längsrichtung zeigt in **Abb. 53** einen ähnlichen Verlauf wie Bahnspannungsprofile. Die TSI-Werte in Längs- und in Querrichtung werden gleichermaßen, jedoch unterschiedlich stark beeinflusst. Das Zugsteifigkeitsverhältnis $TSI_{MD/CD}$ spiegelt den Einfluss der Querschrumpfung wider. Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass die Zugsteifigkeit die Längsdehnung nicht beeinflusst.

4.5 Dehnungsprofil und Nassdehnungsmessung

Die Nassdehnung nach der WSD-Methode findet ihre Entsprechung in der Methode zur Messung reversibler und irreversibler Verformungen. Letztere misst rückwirkungsfrei die Siebmarkierung der gewässerten Probe. **Abb. 72** zeigt die hohe Übereinstimmung zwischen beiden Messmethoden.

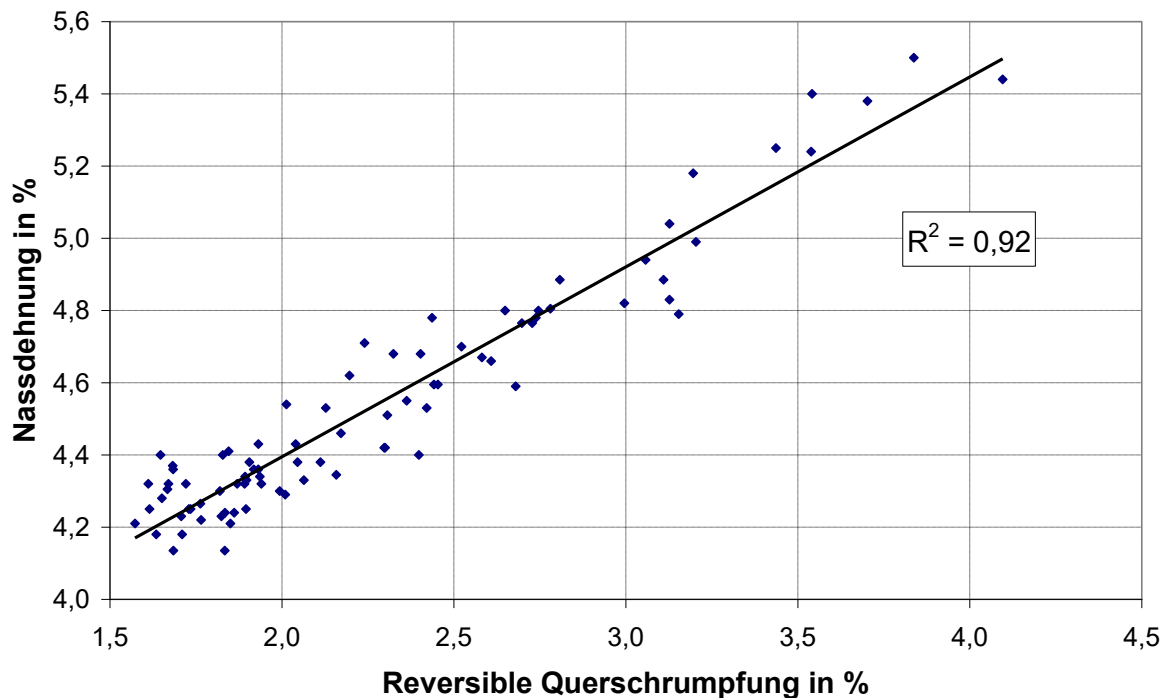


Abb. 72: Zusammenhang zwischen Nassdehnung und reversibler Querschrumpfung

Die Vorspannkraft bei der WSD-Methode wirkt sich negativ auf die Messung der Nassverformung in Längsrichtung aus. Hier zeigt die Messung des reversiblen Längsdehnungsanteils eine bessere Auflösung und bietet den Vorteil des geringeren Aufwands.

5 Schlussbetrachtung

Die neue Siebmarkierungsanalyse hat Licht in das Dunkel der Längsdehnungsmessung gebracht. Die Vorstellung eines Längsdehnungsprofils, das von Eigenschaften der Papierbahn bestimmt wird, ist in der Praxis nicht zutreffend. Mit Hilfe des neu entwickelten Verfahrens zur Siebmarkierungsanalyse steht eine verlässliche Methode zur Bestimmung lokaler Längsdehnungen in Papierbahnen zur Verfügung. Erste Ergebnisse zeigen, dass die existierenden Vorstellungen vom Zusammenhang zwischen Bahneigenschaften und Längsdehnungsprofil überprüft werden müssen. Die Resultate lassen darauf schließen, dass entgegen bisheriger Modellvorstellungen die Querschrumpfung und die Längsdehnung zusammen mit Stoffeigenschaften die Zugsteifigkeit bestimmen. Das Längsdehnungsprofil der Bahn wird durch die Papiermaschine bestimmt.

In der Regel kann man von einer nahezu konstanten Längsdehnung über der Bahnbreite vor der Aufwicklung ausgehen. Ein ungleichmäßiges Bahnspannungsprofil vor der Aufrollung indiziert ein ungleichmäßiges Zugsteifigkeitsprofil. Aus der Literatur und einer früheren Arbeit [20] sind solche ungleichmäßigen Profile des E-Moduls bzw. Zugsteifigkeitsindex in Maschinenrichtung bekannt, die ein ungleichmäßiges Bahnspannungsprofil erklären.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen von Wahlström, der den Einfluss von Schrumpfung und Dehnung bei der Trocknung auf Papiereigenschaften untersuchte [26]. Die im Labor gefundenen Zusammenhänge lassen sich mit Hilfe der Siebmarkierungsanalyse auf Querprofile anwenden, um die Zugsteifigkeiten in Längs- und Querrichtung durch die Dehnung in den einzelnen freien Zügen zu optimieren.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so wird die Zugsteifigkeit als wesentliche Festigkeitseigenschaften des Papiers maßgeblich durch folgende Faktoren bestimmt:

- Faserstoffeigenschaften und –zusammensetzung,
- Flächenbezogene Masse,
- Trocknungsverlauf und Endfeuchte,
- Verlauf der Dehnungen in den freien Zügen sowie
- Entwicklung der Querschrumpfungprofile in den Trockengruppen.

Geht man von konstanten Faserstoffeigenschaften, geregelter Massenprofil und konstanten Temperaturen in den Trockengruppen aus, so lassen sich mit der Siebmarkierungsanalyse Festigkeitseigenschaften vorhersagen.

Zur Überwachung des Profils im Labor bieten sich die folgenden Messungen an:

- Längsdehnungsprofil mit reversiblen und irreversiblen Anteilen,
- Querschrumpfungprofil mit reversiblen und irreversiblen Anteilen,
- Profil des Zugsteifigkeitsindex TSI in Längsrichtung sowie
- Profil des Zugsteifigkeitsindex TSI in Querrichtung.

Die Kombination aus plastischer Verformung und Zugsteifigkeit ermöglicht Rückschlüsse auf die Spannungen unter denen die Bahn bei der Herstellung stand. Lokale Unterschiede weisen auf Störungen im Prozess und auf Probleme des Bahnlaufs hin.

Im Einzelnen zeigen 3 von 5 untersuchten Zeitungsdruckpapieren markante Abweichungen im Querprofil. Bei Probe B weist die Längsdehnung einen v-förmigen Verlauf auf, jedoch nicht die Zugsteifigkeit. Das deutet auf ein Problem in der Sieb- oder Pressenpartie, wo sich der E-Modul noch nicht ausgebildet hat. Analog ergibt sich aus der lokalen Störung bei 4 m Bahnbreite der Probe C ein Hinweis auf das Problem mit der Saugpresse. Die Bahn wird offensichtlich beim Ablösen lokal überdehnt. Bei Probe D kennzeichnet die lokal unterschiedliche Längsdehnung zwischen Ober – und Untersiebmarkierung, in Verbindung mit dem starken Verzug der Siebe, einen suboptimalen Lauf der Siebpartie.

Im Längsdehnungsprofil schlagen sich alle Störungen des Papiermaschinenlaufs nieder, während sich die Querschrumpfung und die Zugsteifigkeit im Wesentlichen erst ab einem Trockengehalt von 60 % ausbilden. Daher eignet sich die Untersuchung des Längsdehnungsprofils zur Prozessüberwachung und zur Diagnose.

Aber auch in Papierverarbeitung können mit der Siebmarkierungsanalyse Fehler im Bahnlauf entdeckt werden. So zeigt in **Abb. 71** die Probe F eine deutliche Schiefelage im plastischen Dehnungsprofil, die in nachfolgenden Verarbeitungsschritten, wie z. B. beim Bedrucken zu Problemen führen kann.

Geplant ist die Verbreitung der Siebmarkierungsanalyse als eigenständiges Modul. Papierhersteller und Zulieferer insbesondere Messgerätehersteller haben bereits ihr Interesse bekundet. Von Seiten der Projektbegleiter kam die Anregung, die Siebmarkierungsanalyse im Bereich von Verpackungspapieren einzusetzen. Proben für die Untersuchung von Kartonagen sind bereits eingetroffen. Im Bereich der Dekorpapiere konnte in einem konkreten Fall eine Breitstreckwalze als Ursache für Qualitätsprobleme identifiziert werden.

Der Einsatz des Algorithmus auch in anderen Industriebereichen, wie z. B. der Textilindustrie, ist denkbar. Als Beitrag zum 14. Workshop "Fuzzy-Systeme und Computational Intelligence" des Fachausschusses 5.22 „Fuzzy Control“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) wurde der Fuzzy-Cluster-Algorithmus im November 2004 der Öffentlichkeit vorgestellt [32].

Abschließend lässt sich sagen, dass die Entwicklung des Fuzzy-Cluster-Algorithmus für periodische Strukturen einen Quantensprung in der Siebmarkierungsanalyse darstellt. Einerseits konnte damit die Genauigkeit des Verfahrens um den Faktor 5 bis 10 gesteigert werden, andererseits erfolgt eine automatische Zuordnung überlagerter Markierungen. Es lassen damit hunderte von Einzelpeaks in die Messung einbeziehen, was im Einzelfall auch Messungen an gestrichenen Papieren ermöglicht. Die komplexen Webmuster lassen sich in dieser Auflösung visuell nicht mehr zuordnen. Die Möglichkeiten, das Verfahren offline oder online anzuwenden, sind vielfältig. Der zu erwartende Nutzen für die Forschung und die Entwicklung ist groß, lässt sich aber zurzeit nicht quantifizieren. Konkrete Anwendungen sind bereits abzusehen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Wadhams, K.; I'Anson, S.; James, D.:
The measurement of differential CD shrinkage.
Paper Technology 32 (1991) 1, S. 36 – 38
- [2] Viitaharju, P. H.; Niskanen, K. K. J.:
Dried-in shrinkage profiles of paper webs.
Tappi Journal 76 (1993) 8, S. 129 - 134
- [3] Guesalaga, A. R. ; Foessel, A. D. ; Kropholler, H. W.:
On-line measurement of paper shrinkage for monitoring and quality control.
Pulp Paper Can. 95 (1994) 7, S. T282 - T286
- [4] Hoole, S. M.; I'Anson, S. J.; Ora, M.; Ashworth, T. N.; Briggs, D.; Phillips, B.;
Hoyland, R. W.:
CD Shrinkage Profiles of Paper Experiments on a Commercial Paper Machine.
Paper Technology 40 (1999) 10, S. 63 - 70
- [5] Phillips, B. R.; I'Anson, S. J.; Hoole, S. M.:
CD Shrinkage Profile of Paper - Curve Fitting and Quantitative Analysis.
Appita 55 (2002) 3, S. 235-239, 243
- [6] Gullichsen, J.; Paulapuro, H.:
Papermaking Science and Technology. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet
End.
Fapet Oy, Helsinki; 1998
- [7] Westwood, G.; Kershaw, C.:
Die INTEGRA-Familie - Steigerung des Effizienzwertes von Formationssieben.
Wochenbl. f. Papierf. 132 (2004) 16 - S. 954 - 957
- [8] Praast, H.:
Deterministische und stochastische Papierstrukturen – ihre bildanalytische
Quantifizierung.
Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Papierfabrikation, 1990
- [9] I'Anson, S. J.:
Identification of periodic marks in paper and board by image analysis using two-
dimensional fast Fourier transforms - Part 1: The basics.
Tappi Journal 78 (1995) 3, S. 113 - 119
- [10] I'Anson, S. J.:
Identification of periodic marks in paper and board by image analysis using two-
dimensional fast Fourier transforms - Part 2: Forming and press section marks.
Tappi Journal 78 (1995) 7, S. 97 - 106
- [11] Kilpeläinen, R.; Taipale, S.; Marin, A.; Kortelainen, P; Simo Metsäranta, S.:
Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End.
Papermaking Science and Technology Band 8, Kapitel 7. Fapet Oy, Finnland, 1999
- [12] Praast, H. Göttching, L.:
Lokale Querschrumpfung von Papierbahnen.
Das Papier 49 (1995) 4, S. 151 – 161

- [13] Villforth, P.:
Designs von Papiermaschinensieben.
Vortrag der Firma Villforth Siebtechnik GmbH, Reutlingen, 2004
- [14] Götttsching, L.; Katz, C.:
Papier-Lexikon, Band 1-3.
Deutscher Betriebswirte-Verlag GmbH, Gernsbach 1999
- [15] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.:
Multivariate Analysemethoden.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; 2003
- [16] Timm, H.:
Fuzzy-Clusteranalyse: Methoden zur Exploration von Daten mit fehlenden Werten sowie klassifizierten Daten.
Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2002
- [17] Bezdek, J. C.:
Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms.
Plenum, New York; 1981
- [18] Honda, K.; Togo, N.; Fujii, T.; Ichihashi, H.:
Linear Fuzzy Clustering Based on Least Absolute Deviations.
Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Fuzzy Syst.; 2002
- [19] Hanss, M.:
Identifikation von Fuzzy-Modellen und ihre Anwendung zur Regelung nichtlinearer Prozesse.
Dissertation, Universität Stuttgart; 1998
- [20] Menschig-Rivas, C.:
Untersuchung der Einflussparameter auf das Querschrumpfungsverhalten von Zeitungsdruckpapier.
Studienarbeit Nr. 3 am Fachgebiet Papierfabrikation und mechanische Verfahrenstechnik der TU Darmstadt, 2003
- [21] Brecht, W.; Gerspach, A. und Hildenbrand, W.:
Trocknungsspannungen in ihrem Einfluß auf einige Papiereigenschaften.
Das Papier 10 (1956) 19/20, S. 454 – 458
- [22] Brecht, W.; Wanka, R.:
Neue Beiträge zur Kenntnis der Dimensionsstabilität von Papieren.
Das Papier 21 (1967) 7, S. 354 – 360
- [23] Kniililä, J.:
Optimization of machine direction tension profile using multiple CD actuator systems in a papermaking process.
Proceedings, Control Systems Conference, Stockholm 2002, S. 128 - 132
- [24] Brecht, W.:
Verhalten von Papieren bei Änderung ihres Feuchtigkeitsgehaltes.
Das Papier 13 (1959) 9/10, S. 201 – 207
- [25] Page, D. H.; Tydeman, P. A.:
A new theory of the shrinkage, structure and properties of paper.
The Formation and Structure of Paper, F. Bolam, ed., British Paper and Board Makers Assoc., London, 1961, S. 397 – 413

- [26] Wahlström, T.:
Influence of shrinkage and stretch during drying on paper properties.
Paper Technologie, Juli 2000, S. 39 – 46
- [27] Kajanto, I.; Niskanen, K.:
Papermaking Science and Technology. Paper Physics.
Fapet Oy, Finnland, 1999, Band 16, Kapitel 7.2.
- [28] Kiiskinen, H.; Paltakari, J.; Pakarinen, P.:
Papermaking Science and Technology. Papermaking Part 2, Drying.
Fapet Oy, Finnland, 1999, Band 9, Kapitel 10.
- [29] Nanko, H.; Wu, J.:
Mechanisms of Paper Shrinkage During Drying.
International Paper Physics Conference, Niagara-on-the-Lake, CPPA, 1995, S. 103 – 113
- [30] Nanko, H.; Ohsawa, O.:
Mechanisms of Fibre Bond Formation.
9th Fundamental Research Symposium, Pira, Leatherhead, 1989, S. 783 – 830
- [31] Göttsching, L:
Lehre und Forschung am IfP im Jahre 1996.
Wochenbl. f. Papierf. 125 (1997) 2, S. 52 – 59
- [32] Mikut, R. (Hrsg.); Reischl, M. (Hrsg.):
Proceedings - 14. Workshop Fuzzy-Systeme und Computational Intelligence :
Dortmund, 10. - 12. November 2004.
Universitätsverlag Karlsruhe, 2004, ISBN 3-937300-20-1
<http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2004/24/>

7 Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF Nr. 13365 N wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt. Unser Dank gilt weiterhin den Projektbegleitern aus der Papierindustrie für deren Unterstützung.