



Thomas Harter, BSc

**Einflüsse und Ursachen für reversible und irreversible Wölbung  
von Kopierpapier**

**MASTERARBEIT**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Verfahrenstechnik

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ulrich Hirn

Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik

Dipl.-Ing. Michael Schuller, BSc

Mondi AG

Graz, Januar 2018

*Salvo errore calcoli*

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, \_\_\_\_\_  
Date Signature

## Eidesstattliche Erklärung<sup>1</sup>

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am \_\_\_\_\_  
Datum Unterschrift

---

<sup>1</sup>Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## Kurzfassung

Das Verhalten von Kopierpapier beim Bedrucken, wird vom Aufbau des Papiers und der Trocknung im Herstellungsprozess bestimmt. Eine gute Erklärung dafür, dass sich Kopierpapier im Druckprozess wölbt sind Zweiseitigkeiten in der Struktur. Eine Arbeit die sich schon intensiv mit der Wölbung aufgrund von Zweiseitigkeiten beschäftigt hat, ist jene von [Schuller, 2016]. In seiner Arbeit beschreibt er strukturelle Ursachen für die Wölbungsphänomene beim Vorgang des xerografischen Bedruckens. An den Punkt der Zweiseitigkeiten knüpft diese Arbeit an und untersucht weitere Ursachen die den Aufbau des Papiers bestimmen. Die Analyse von Prozessdaten aus drei Jahren zeigen, dass bei unterschiedlichsten Einstellungen der Papiermaschine das Wölbungsverhalten sehr ähnlich ist. Ein DIN A4 Blatt wölbt sich auf der untersuchten Maschine fast immer zur Siebseite nachdem beide Seiten bedruckt wurden. Die gesamte Untersuchung des Kopierprozesses legt nahe, dass strukturelle Mechanismen, nämlich die FO-Anisotropiezweiseitigkeit, für das Wölbungsverhalten verantwortlich sind.

Die Papierstruktur, also die Art wie die Fasern im Papier verteilt sind, wird in der Siebpartie definiert. Ein wesentlicher Einfluss auf die Ausrichtung der Fasern ist der Stoffstrahl der auf das Langsieb trifft. Ein weiterer Einfluss wird in einer Siebschüttelung gefunden. TSO-Messungen zeigen dass die Siebschüttelung die Orientierung der Fasern beeinflusst. Der TSO-Winkel folgt bei aktiver Siebschüttelung einem Sinusverlauf mit der Periodendauer der Siebschüttelung in Maschinenrichtung. Die Vergleichbarkeit der Faserorientierung die durch die Laminatspaltung bestimmt wurde und den Ergebnissen der TSO-Messung ist nicht gut.

Die z-Profile der Anisotropie zeigen ein sehr ähnliches Aussehen für Papiere die mit Siebschüttelung produziert wurden. Die periodische Wiederholung des Einflusses der Siebschüttelung wird in den Profilen des Faserorientierungswinkels in z-Richtung beobachtet. Diese wiederholen ihr Aussehen innerhalb der Periodendauer der Siebschüttelung.

Versuche bei denen die Proben Klimazyklen ausgesetzt werden, lösen im Papier enthaltene Trockenspannungen und führen zu Wölbung zur Siebseite hin. Es konnte damit gezeigt werden, dass erhebliche Trocknungsspannungen im Papier existieren. Das Auftreten dieses Effekts bei verschiedene Einstellungen der Papiermaschine erlaubt den Rückschluss, dass die unterschiedliche Trocknung der beiden Papierseiten (Bias) für diesen Effekt verantwortlich ist.

## Abstract

Copying paper is a process composed of different kind of treatments involving heat and water. These treatments can cause curl. The level of curl is depending on the paper structure and the drying process in the paper machine. The structure of the paper can be defined by different kind of two-sidednesses, like e.g. fibre orientation two-sidedness. The comparison of structural two-sidedness and paper curl as a result of xerographic printing was already discussed by [Schuller, 2016]. This work is continuing these investigations and introduces the wire shaking as a new parameter that influences the paper structure.

The first investigation was an analysis of process online data from a paper machine over an interval of three years. The result was that after one prints both sides in a xerographic printer the paper shows a similar curl behaviour, mostly to the wire side. These results are confirming structural reasons for the wire side curl, namely the fibre orientation anisotropy two-sidedness.

Next to the ratio between the velocity of the wire and the suspension jet, the wire shake has an influence on the way the fibres orient in the sheet. TSO measurement revealed that the TSO angle in machine direction follows a sine with the frequency of the wire shake. The fibre measurement via laminat splitting was compared to the TSO results. Only a very low correlation was found.

The anisotropy z-profiles provided by the laminat splitting method showed that samples produced with wire shake have a similar fibre orientation over the sheet thickness. The fibre orientation z-profiles look different, but repeat their appearance with the wire shake period.

The investigation via climatic cycles give an overview of the effect of paper drying. After releasing these strains the paper shows irreversible wire side curl. Thus it was shown that the investigated paper exhibits considerable inner tensions after drying. This happens with different machine settings. Thus the different drying between top side and bottom side can be named as the reason for the curl.

## **Abkürzungen**

<b>CD</b>	Querrichtung (engl. cross direction)
<b>FO</b>	Faserorientierung
<b>MD</b>	Maschinenrichtung (engl. machine direction)
<b>OS</b>	Oberseite
<b>PM</b>	Papiermaschine
<b>SS</b>	Siebseite
<b>TS</b>	Top side (Oberseite)
<b>TSO</b>	Orientierung der Steifigkeit, Messwert (engl. tensile stiffness orientation)
<b>WS</b>	Wire side (Siebseite)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Grundlegendes</b>	<b>10</b>
1.1	Hygroskopie . . . . .	11
1.1.1	Wasser und Fasern . . . . .	11
1.1.2	Wasser und Papier . . . . .	12
1.2	Merkmale von Papier . . . . .	14
1.2.1	Faserorientierung . . . . .	14
1.3	Dimensionsstabilität . . . . .	17
1.3.1	Struktureller Curl . . . . .	18
1.3.2	Viskoelastischer Curl . . . . .	19
1.3.3	Irreversibler Curl . . . . .	20
1.3.4	Roll-Set Curl . . . . .	21
1.3.5	Xerographie Curl . . . . .	21
1.4	Papiermaschine . . . . .	24
1.4.1	Siebpartie . . . . .	24
1.4.2	Stoffauflauf . . . . .	24
1.4.3	Siebschüttelung . . . . .	26
1.4.4	Trockenpartie einer modernen Papiermaschine . . . . .	27
1.5	Maßnahmen gegen Curl . . . . .	29

<b>2</b>	<b>Methodik</b>	<b>31</b>
2.1	Auswertung vorhandener Daten . . . . .	32
2.1.1	Daten aus dem Prozessleitsystem . . . . .	32
2.1.2	Daten aus der Qualitätssicherung - Kopiertest . . . . .	32
2.1.3	MATLAB®-Auswertung . . . . .	33
2.2	Versuchsplanung . . . . .	34
2.2.1	Versuchsplan . . . . .	34
2.2.2	Probennahme . . . . .	34
2.2.3	Verwahrung der Proben . . . . .	35
2.3	Messmethoden - Struktureller Curl . . . . .	36
2.3.1	TSO - Faserorientierung in Maschinenrichtung . . . . .	36
2.3.2	Laminatspaltung - Zweiseitigkeiten . . . . .	38
2.4	Messmethoden - Irreversibler Curl . . . . .	41
2.4.1	Wölbungsschablonen - Curlradien . . . . .	42
2.4.2	Klimazyklen Hausmening - irreversibler Curl . . . . .	43
2.4.3	Klimazyklen Graz - irreversibler Curl . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>48</b>
3.1	Systematische Einflüsse . . . . .	49
3.2	Faserorientierungswinkel in Maschinenrichtung . . . . .	54
3.3	Struktureller Curl - Zweiseitigkeiten . . . . .	62
3.3.1	Anisotropiezweiseitigkeit . . . . .	62
3.3.2	Faserorientierungswinkel . . . . .	67
3.4	Irreversibler Curl . . . . .	73
3.4.1	Vergleich Messmethoden . . . . .	76
3.4.2	Diagonalcurl . . . . .	79
<b>4</b>	<b>Conclusio</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Appendix</b>	<b>89</b>

# Kopierpapier

Wie der Name schon vermuten lässt, hat dieses Produkt hauptsächlich eine Aufgabe. Bedruckt zu werden. Die Vorgänge des Druckens bestehen aus einer vielfältigen Abfolge von Prozessen die Wärmeübergänge verursachen und Kontakt mit Wasser beinhalten. Die Beanspruchung von Papier durch Wasser und Wärme beeinflusst dieses und resultiert in einer Wölbung des Papiers nach dem Druckvorgang. Mit den Einflüssen auf die verschiedenen Mechanismen, die zur Wölbung führen, beschäftigt sich diese Arbeit.

Im Kapitel 1 werden wesentliche Begriffe erläutert und Beschreibungen der wesentlichen Mechanismen der Wölbung bereitgestellt. Der grundsätzliche Aufbau einer Papiermaschine mit ihren Einflüssen auf den Papieraufbau wird dargestellt.

Die Untersuchungen die durchgeführt werden sind im Kapitel 2 aufgelistet. Der angewandte Versuchsplan wird vorgestellt und die Probennahme beschrieben. Weiters werden alle verwendeten Messmethoden beschrieben. Den Abschluss in Kapitel 2 bildet die Vorstellung der Verfahren zur Messung von Klimazyklen, für die eine neue Methode entwickelt wurde.

Kapitel 3 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen dar. Als erstes wird die Analyse der Prozessdaten beschrieben, bevor über die Ergebnisse der TSO-Messungen und ihren Vergleich mit anderen FO-Winkelmessungen diskutiert wird. Mit dieser anderen Messung ist die Laminatspaltung gemeint, deren Ergebnisse ebenfalls ausführlich analysiert werden. Die Ergebnisse der Klimazyklen, die Trockenspannungen im Papier offenlegen sollen, werden betrachtet und diskutiert.

Das Ende der Arbeit bildet die Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Ergebnissen der einzelnen Messungen.

---

# **1 Grundlegendes**

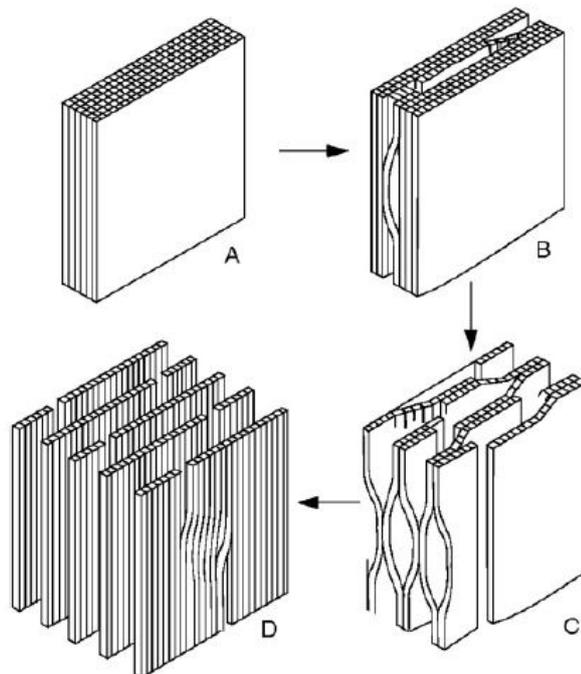
---

## 1.1 Hygroskopie

Wasser hat einen enormen Einfluss im gesamten Herstellungsprozess von Papier. Auch das fertige Produkt steht im stetigen Einfluss davon. Wesentlich ist das Verhalten von Papier und seinen Fasern wenn sie mit Wasser in Kontakt kommen und dadurch ihre Form ändern. Hygroskopie beschreibt die Fähigkeit von Papier Wasser aus der Luft aufzunehmen.

### 1.1.1 Wasser und Fasern

Wenn Fasern in Kontakt mit Wasser kommen, egal ob als Flüssigkeit oder Bestandteil der Luft, nehmen sie dieses auf. Das Wasser wird dabei in die Faserwand aufgenommen, die Faser quillt und wird größer. Die Größenänderung erfolgt ungleichmäßig, da die transversale Ausdehnung um ein vielfaches höher ist als die longitudinale.



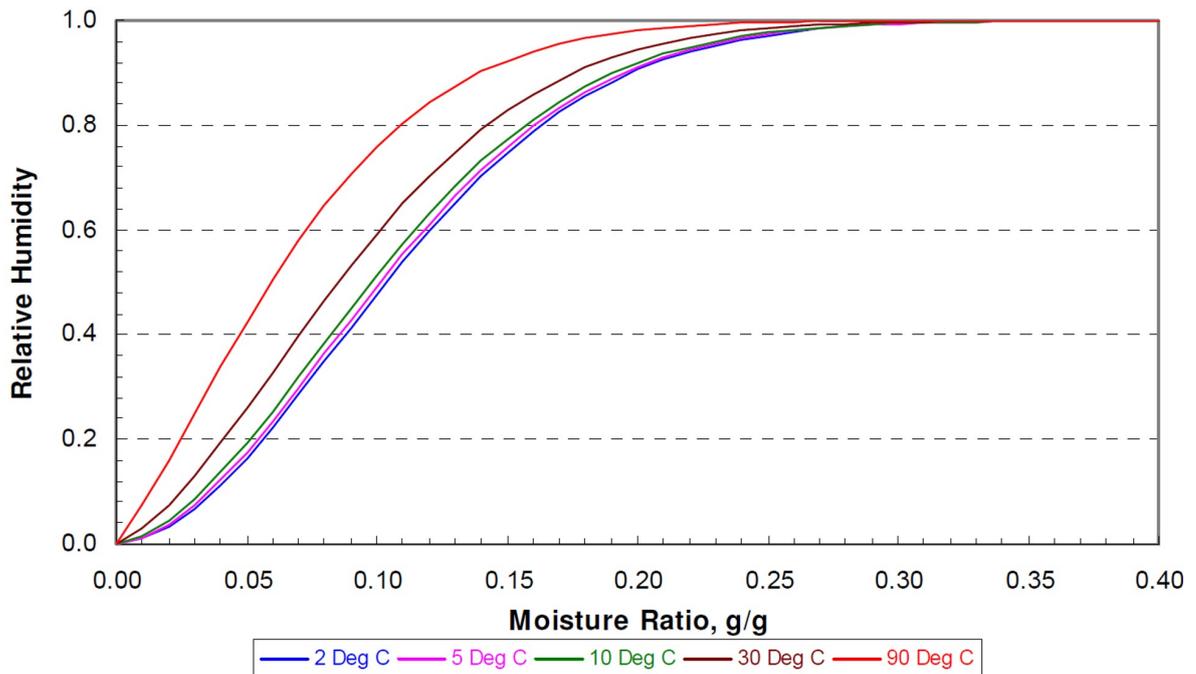
**Abbildung 1:** Aufbau der Faserwand aus Fibrillen. Die Vorgänge A-D zeigen, wie Wasser zwischen diesen Fibrillen aufgenommen wird. Vergleich von A und D verdeutlicht die Größenänderung durch Wasseraufnahme. Bild aus [Kajanto und Niskanen, 1998].

[Tydeman und Wembridge et al., 1966] geben an, dass in transversaler Richtung eine

Schrumpfung (Wasserabgabe) von 30% möglich sein kann. Der Grund dafür liegt im Aufbau der Faser. Wie Abb. 1 zeigt, besteht die Faserwand aus Bündel von Fibrillen die an der Faser axial angeordnet sind. Wenn die Faser mit Wasser in Berührung kommt, dringt dieses in das Lumen der Faser, aber auch zwischen die Fibrillen ein. Dadurch verändert sich der Querschnitt der Faser stark, aber die Länge nur wenig. Die Anordnung der Fibrillen in der Faser sind somit der Grund, dass eine Faser sich in ihrer Breite sehr viel mehr verändert als in ihrer Länge, wenn sie mit Wasser in Berührung kommt.

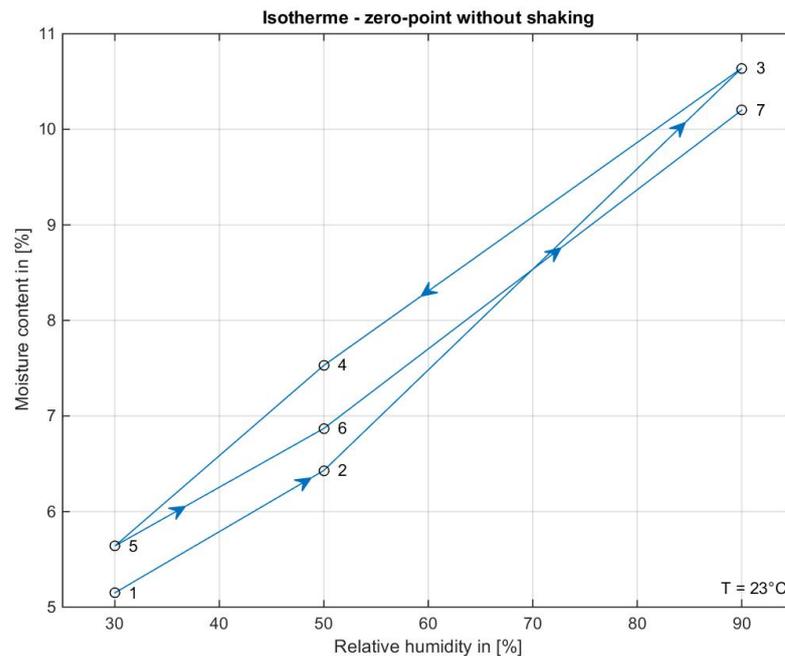
### **1.1.2 Wasser und Papier**

Ein wichtiger Punkt im System Papier-Wasser sind auch die physikalischen Vorgänge die dazu führen, dass Papier Wasser aufnimmt. Wichtig hierfür sind die Penetration und die Diffusion welche beide direkt und indirekt von der Temperatur abhängig sind. Dadurch sind auch die hygroskopischen Eigenschaften von Papier von der Temperatur abhängig. Eine Sorptionsisotherme gibt bei gegebener Temperatur einen solchen Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Feuchtigkeitsgehalt im Papier an. In der Abbildung 2 sind solche Isothermen für verschiedene Temperaturen gegeben. Es ist gut zu sehen, dass bei gleicher Luftfeuchtigkeit Papier unterschiedlich viel Wasser bei verschiedenen Temperaturen aufnimmt. Die Isothermen in Abb. 2 aus [Ghosh, 2011] wurden für Papiere aus Holzstoff erstellt. Bei gleicher Luftfeuchtigkeit stellt sich je nach Temperatur eine unterschiedliche Gleichgewichtsfeuchte im Papier ein. Je höher die Temperatur desto weniger Wasser wird, bei gleicher relativer Luftfeuchte, aufgenommen.



**Abbildung 2:** Für verschiedene Temperaturen wurden die Sorptionsisothermen erstellt. Sie geben den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit dem ein Papier ausgesetzt ist zur Gleichgewichtsfeuchte in diesem wieder. Das sich dieser Zusammenhang bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich verhält, ist ein Indiz für die Temperaturabhängigkeit der Prozesse die für den Einzug von Wasser ins Papier verantwortlich sind. Bild aus [Ghosh, 2011].

Wie in vielen natürlichen Vorgängen gibt es auch hier eine Hysterese der Isothermen, wobei der Unterschied hierbei davon abhängt ob der Feuchtegehalt, bei gegebener Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, durch Befeuchtung oder Trocknung erreicht wurde. Die dadurch auftretende Hysterese ist in Abbildung 3 zu sehen. Punkt 2 in Abb. 3 entspricht, bei gegebener Luftfeuchte und Temperatur, den Feuchtegehalt der Papierprobe wenn Wasser absorbiert wurde. Punkt 4 repräsentiert den Feuchtegehalt, bei gleicher relativer Luftfeuchte und Temperatur, nur das dieser Zustand durch Wasserabgabe erreicht wurde. Obwohl die äußeren Bedingungen gleich sind, ist der Feuchtegehalt in Punkt 4 höher als in Punkt 2. Wird die Probe weiter getrocknet und wieder befeuchtet (Punkt 5 und 6) stellt sich wieder eine niedrigere Papierfeuchte ein.



**Abbildung 3:** Der Feuchtigkeitsgehalt in einer Papierprobe (80 g/m<sup>2</sup>, Kopierpapier, ungestrichen) ist über relative Luftfeuchtigkeit aufgetragen. Die Feuchtigkeitsgeschichte des Blattes ist wichtig für den Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt (GGF).

## 1.2 Merkmale von Papier

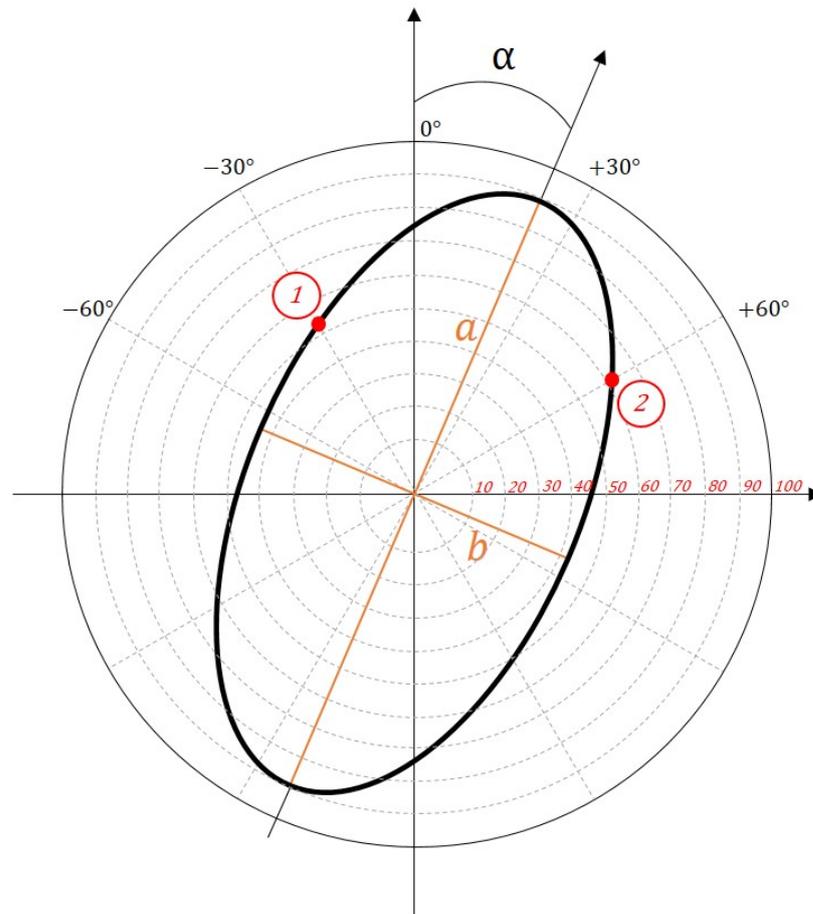
Papier ist in seinem Dasein unikal. Die Tatsache, dass es ein Produkt aus dem Zusammenschluss vieler einzelner Fasern ist, gestaltet Papier zu einem sehr inhomogenen Material. Die statistische Beschreibung seiner Eigenschaften ist für die Auswertung unerlässlich. Nachfolgend werden einige Eigenschaften von Papier vorgestellt, die für diese Arbeit Bedeutung haben.

### 1.2.1 Faserorientierung

Faserorientierung (FO) bezeichnet die Anordnung der einzelnen Fasern im Papier. Für die Charakterisierung wird die Ausrichtung der Fasern beobachtet und in ein Polardiagramm, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, eingetragen. Zu sehen sind Kreise mit größer werdenden Radien und Geraden die vom Kreisursprung weg in verschiedene Richtungen zeigen (z.B. +30°). Das Diagramm zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Fasern und ist zur besseren Verständlichkeit mit Zahlenwerten für Winkel (-60°

bis  $+60^\circ$ ) und Häufigkeiten versehen (0-100). So zeigt Punkt 1 in Abb. 4, dass etwas mehr als 50 Fasern in Richtung  $-30^\circ$  ausgerichtet sind. Das gleiche Schema auf Punkt 2 angewendet würde bedeuten, dass 60 Fasern im Winkel  $+60^\circ$  angeordnet sind.

Sind alle Fasern im Diagramm eingezeichnet, kann eine Ellipse um die Punkte gezeichnet werden. Die Ellipse entsteht aus einem Kurvenfit.



**Abbildung 4:** Polardiagramm der Faserorientierung. Die vertikale Achse bezeichnet die Maschinenrichtung, die Horizontale die Querrichtung. Die grauen, strichlierten Kreise geben Häufigkeiten wieder. Je größer der Durchmesser des Kreises, desto mehr Fasern sind im Betrachtungsraum mit diesem Winkel ausgerichtet. Die schwarze, gefittete Ellipse ist die Häufigkeitsverteilung der Winkel der Fasern. Die Ellipse besitzt Hauptachse (a) und Nebenachse (b).

Die Ellipse gibt die Parameter der Faserorientierung wieder. Der Winkel  $\alpha$  zwischen der vertikalen Diagrammachse und der Ellipsenhauptachse  $a$  wird als Faserorien-

tierungswinkel bezeichnet. Er gibt den mittleren, bevorzugten Ausrichtungswinkel der Fasern im Papier wieder. Das Verhältnis von Haupt- zu Nebenachse ( $a/b$ ) ergibt die Anisotropie.

Polardiagramme von verschiedenen Untersuchungen besitzen ein breites Spektrum an Darstellungen. Die gefitteten Ellipsen können sehr unterschiedlich aussehen. Bei gleichem Winkel können die Ellipsen unterschiedliche Anisotropien besitzen. Die Ellipse aus Abbildung 4 könnte den gleichen Winkel  $\alpha$  bei unterschiedlichen Anisotropien besitzen. So könnte beispielhaft, die Hauptachse  $a$  kleiner werden, während die Nebenachse  $b$  breiter wird. Der Winkel würde gleich bleiben und die Anisotropie ( $a/b$ ) würde sinken.

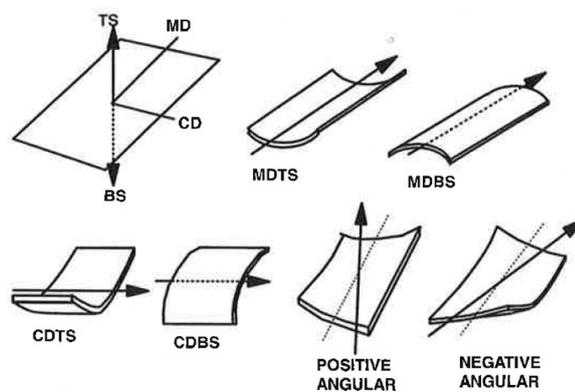
Die vertikale Achse gibt die Maschinenrichtung vor. Für die Erstellung des Polardiagramms ist es wichtig, dass man eine Richtung definiert in welche die Fasern zeigen. Die unter Hälfte der Ellipse ist eine Spiegelung der oberen.

### 1.3 Dimensionsstabilität

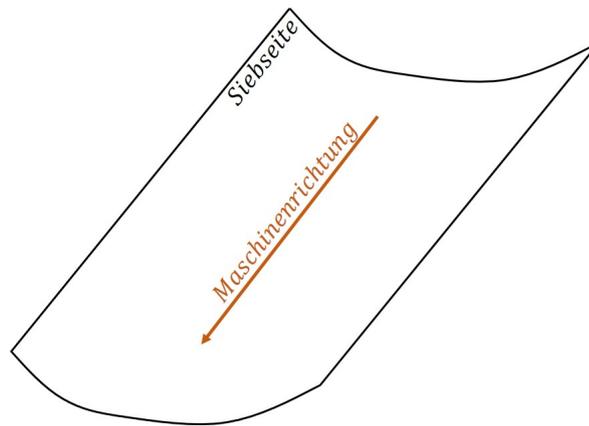
Wölbung ist eine symmetrische Verformung eines Papierblattes. Verschieden Arten von Wölbung werden unterschieden, wobei sich diese aufgrund der Richtung der Wölbungsachse (CD oder MD) oder aufgrund der Wölbungsneigung (in Richtung Unterseite oder in Richtung Oberseite) ergeben. Wie in Abb. 5 zu sehen ist, würde ein Curl, dessen Wölbungsachse sich in Maschinenrichtung befindet und der sich zur Oberseite hindreht, als MDTS-Curl bezeichnet werden. (MD machine direction, Maschinenrichtung; TS top side, Oberseite)

Somit würde CDBS (CD cross direction, Querrichtung; BS bottom side, Unterseite oder Siebseite) bedeuten, dass die Wölbungsachse in Querrichtung liegt und die Wölbung zur Unterseite zeigt.

Beim Diagonalcurl (Abb. 5 positive/negative angular) liegt die Wölbungsachse nicht in einer der beiden Maschinenhaupttrichtungen. In diesem Fall verläuft die Achse, im vermessenen Blatt, von einer Ecke zur anderen und die beiden anderen Ecken drehen sich auf.



**Abbildung 5:** Definition der unterschiedlichen Arten des Curls. Die einzelnen Blätter zeigen die am häufigsten vorkommenden Curls. Bild aus [Uesaka, 2002].

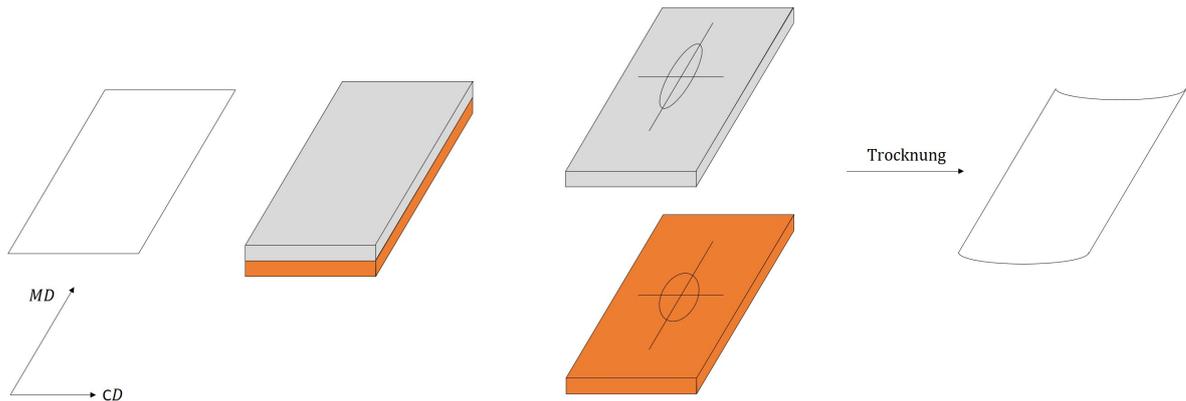


**Abbildung 6:** Wenn in dieser Arbeit von Siebseitencurl die Rede ist, handelt es sich meistens um den oben dargestellten Fall. Die Achse der Wölbung verläuft in Maschinenrichtung, die Siebseite ist in der Wölbung. Im deutschsprachigen Raum wird diese Art des Curls auch Schüsseln genannt, vgl. Abb. 5 MDBS.

Es gibt verschiedene Ursachen die zu Curl führen können. Aufgrund von ähnlichen/gleichen Effekten lassen sich diese in Gruppen einteilen. [Uesaka, 2002] teilt die Curlmechanismen in mehrere Gruppen ein, die nachfolgend näher beschrieben werden.

### 1.3.1 Struktureller Curl

Wie der Name schon andeutet ist für den strukturellen Curl eben die Struktur des Papiers, also dessen Aufbau verantwortlich. Die z-Richtung spielt hier eine wichtige Rolle. Zweiseitigkeiten im Blatt von Faserorientierung (FO), Füllstoff und Stärke beeinflussen hierbei das Curlverhalten. Abbildung 7 zeigt wie sich eine Zweiseitigkeit der Faserorientierungsanisotropie auf das Papier auswirken kann. Vereinfacht wird ein Blatt Papier hier als zweischichtiges System betrachtet. Die untere Hälfte besitzt eine höhere Anisotropie, es zeigen also mehr Fasern in Richtung Maschinenrichtung. Wenn das Papier nun getrocknet wird, verursacht der in Kapitel 1.1 vorgestellte höhere Querschrumpf der Fasern eine größere Schrumpfung des Blattes in Querrichtung. Die untere Hälfte wird also stärker zusammengezogen und das Blatt wölbt sich nach unten.

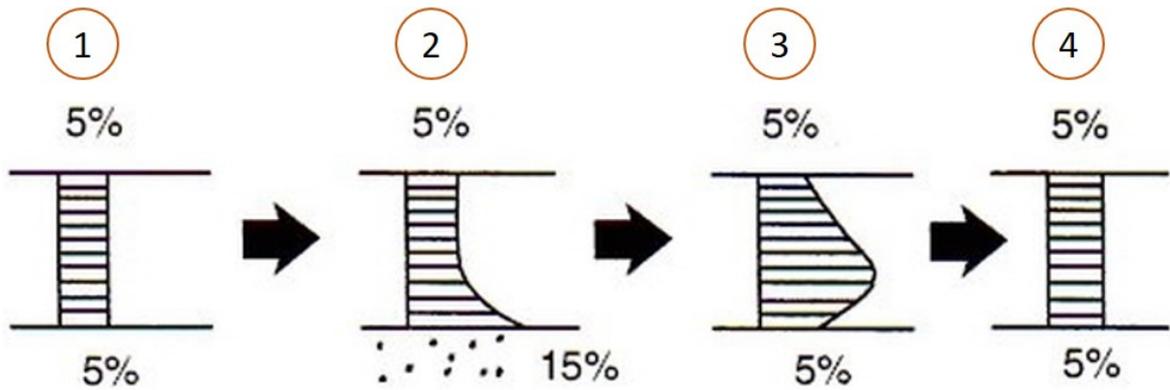


**Abbildung 7:** Struktureller Curl. Ein Blatt Papier wird vereinfacht als System mit zwei Schichten dargestellt. Betrachtet man diese Seiten getrennt voneinander können beide eine unterschiedliche Anisotropie besitzen. Da Fasern in ihren Dimensionen unterschiedlich quellen und schrumpfen ist Lage der Fasern in der Ebene wichtig für die Schrumpfung. Die untere Schicht schrumpft beim Trocknen in Querrichtung mehr als die andere, was zu MDDBS-Curl führt.

In gleicher Art und Weise wirkt auch eine Zweiseitigkeit des Faserorientierungswinkels. Die Wölbungsachse liegt aber nicht mehr in Maschinenrichtung oder Querrichtung, sondern diagonal. Bei einem Blatt mit einer diagonalen Wölbungsachse biegen sich zwei gegenüberliegende Ecken auf.

### 1.3.2 Viskoelastischer Curl

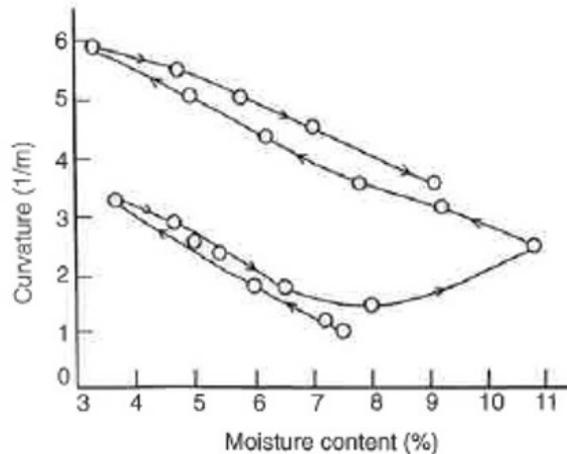
Bei der Vorstellung des viskoelastischen Curls geht man davon aus, dass eine Seite des Papiers anders (mehr) befeuchtet wird. Abbildung 8 zeigt einen solchen Vorgang. Eine Papierprobe besitzt in ihrer ursprünglichen Umgebung einen gleichmäßige Feuchtegehalt von 5%. Die Unterseite erfährt eine höhere Luftfeuchtigkeit bis ihr Feuchtegehalt 15% erreicht, danach wird sie für 15 Sekunden fixiert. Die Fixierung wird gelöst und die Probe wird ihrem ursprünglichen Klima ausgesetzt. Der höhere Wassergehalt an der Unterseite führt zuerst zu einer Wölbung nach oben (Abb. 8 Punkt 2 und 3). Erst während des Feuchteausgleichs im Papier (Trocknung) reduziert sich der Oberseitencurl und die Probe wölbt sich zur Unterseite.



**Abbildung 8:** Eine Papierprobe mit einem Feuchtegehalt von 5% wird an der Unterseite einer höheren Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, bis der Feuchtegehalt an der Unterseite 15% beträgt. Die Probe wird für 15 Sekunden fixiert und danach unfixiert dem ursprünglichen Klima ausgesetzt. Grafik aus [Uesaka, 2002]

### 1.3.3 Irreversibler Curl

Die Effekte des strukturellen Curls können auch noch andere Auswirkungen, als die oben beschriebenen, haben. Strukturelle Zweiseitigkeiten können während der Trocknung des Papiers in der Trockenpartie zu Spannungen führen. Der Grund dafür ist, dass, wie bereits erwähnt, zwei unterschiedlich aufgebaute Seiten eines Papiers sich bei Wasserzugabe oder Wasserabgabe verformen. In der Trockenpartie wird diese Verformung durch das Trockensieb aber nicht zugelassen, was dazu führt, dass diese als Trockenspannung im Papier gespeichert wird. [Uesaka, 2002] bezeichnet den irreversiblen Curl daher auch als latenten Anteil des strukturellen Curls. Gleiches gilt auch, wenn ein gleichmäßig aufgebautes Papier eine unterschiedliche Trocknung an Oberseite und Unterseite erfährt. Der MDBS-Curl, der in Abbildung 1.3.1 durch die Anisotropiezweiseitigkeit hervorgeht, könnte in einem Blatt ohne Zweiseitigkeit durch eine stärkere Trocknung der Unterseite entstehen. Man kann die unterschiedliche Behandlung der beiden Seiten auch als externe Zweiseitigkeit betrachten. Entscheidender Faktor für die Entstehung der Trockenspannungen ist auch die Verformungsbehinderung.



**Abbildung 9:** Klimazyklus einer Papierprobe. Nur durch ändern der Luftfeuchtigkeit kann es zur Verformung der Probe kommen. Die Wölbung der Probe ist über den Feuchtegehalt derselben aufgetragen. Beim ersten Erhöhen der Luftfeuchte, über einen bestimmten Punkt hinaus, kommt es zur Befreiung der Trockenspannungen und zum irreversiblen Curl. Grafik aus [Uesaka, 2002]

Abbildung 9 zeigt die Auswirkungen der Trockenspannungen. Diese werden nämlich durch Erhöhung der Luftfeuchtigkeit gelöst und führen zur irreversiblen Verformung des Papiers. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass ein gewisser Feuchtegehalt notwendig ist um diese Spannungen zu lösen. Zwischen 3% und 7% entsteht keine unwiederrufliche Verformung. Erst eine Steigerung des Feuchtegehalts über 8% führt zur Befreiung der Trockenspannungen und zum irreversiblen Curl.

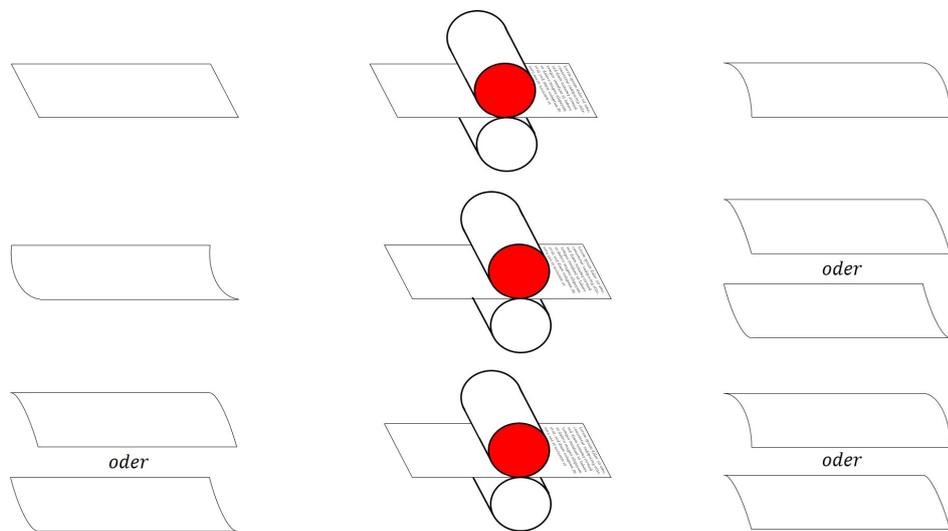
#### 1.3.4 Roll-Set Curl

Roll-Set Curl entsteht durch die mechanische Beanspruchung des Papiers, indem es über eine Kante oder ein kleine Rolle gebogen wird. Dieser Effekt kann auch als Gegenmaßnahme zum Curl eingesetzt werden. Dafür wird der Effekt des Roll-Set Curls ausgenutzt und das Papier entgegen des ursprünglichen Curls verformt (Kantenbrecher).

#### 1.3.5 Xerographie Curl

Das Xerographieverfahren basiert darauf, dass eine heiße Fixierwalze das aufgebraute Tonerbild auf dem Papier fixiert. Die einseitige Behandlung des Papiers mit

Wärme führt dazu, dass sich das Papier wölbt. Die Effekte die in den Kapiteln 1.3.2 *Viskoelastischer Curl* auf Seite 19 und 1.3.1 *Struktureller Curl* auf Seite 18 vorgestellt wurden, sind die treibenden Mechanismen die zur Wölbung des Papiers nach dem Kopieren führen. [Uesaka, 2002] geht davon aus, dass sich die Vorgänge die zum Xerographie Curl führen aus den überlagerten Effekten des viskoelastischen und strukturellen Curls zusammensetzen. In diesem Fall sorgt der viskoelastische Mechanismus dafür, dass sich das Blatt von der bedruckten Seite wegwölbt. Dieses Verhalten wird in Abbildung 10 dargestellt.



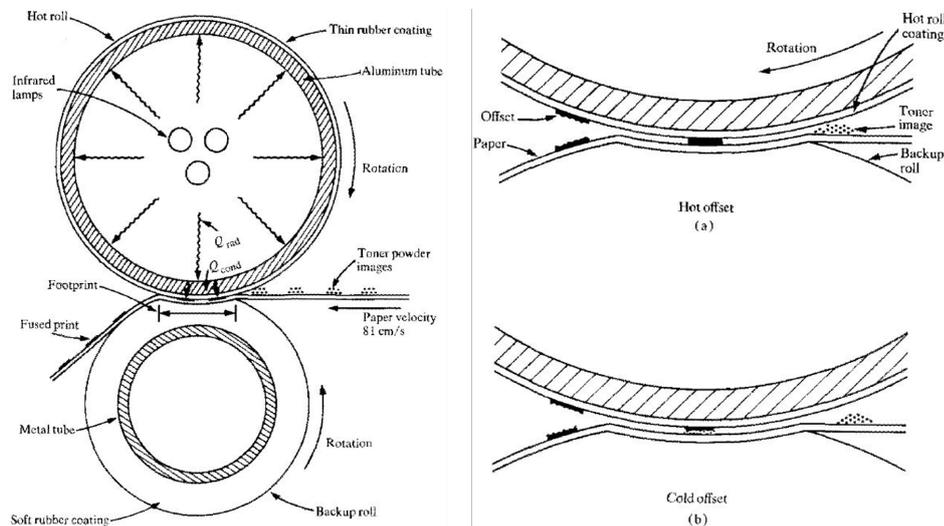
**Abbildung 10:** Hier dargestellt sind die verschiedenen Szenarien, welche bei der Xerografie nach [Uesaka, 2002] eintreten können. Drei Fälle werden hier unterschieden. Die obere Rolle ist die Fixierwalze und die unter die Gegenwalze. Im ersten Fall wird ein wölbungsfreies Blatt bedruckt. Nach dem Druck zeigt das Blatt eine Wölbung von der bedruckten Seite weg. Im nächsten wird ein Blatt bedruckt, welches sich nach oben hin wölbt. Dem gleichen Prinzip wie im ersten Teil folgend, wölbt sich das Blatt von der bedruckten Seite weg. Die verbleibende Wölbung ist entweder geringer oder wechselt sogar die Richtung. Der letzte Fall zeigt ein schwach gewölbtes Blatt wie es zum Beispiel nach dem Drucken im zweiten Fall aussieht. Wird das schwach gewölbte Blatt nun nochmal bedruckt, zeigt der Curl nur mehr in eine Richtung.

[Suontausta, 1999] beschreibt ein gegenteiliges Verhalten. Er spricht davon, dass sich beim einseitigen Xerographiedruck das Papier immer zu der heißen Fixierwalze hinwölbt. Beim Bedrucken der zweiten Seite soll es dabei nur zu einem

(schwächerem) Entgegenwirken des ersten Curls kommen.

[Oohara und Hayama et al., 2013] gehen davon aus, dass die im Xerographiedrucker verursachten Gründe für die Wölbung des Papiers der Temperaturunterschied zwischen Papierober- und Unterseite, aber auch die mechanische Beanspruchung durch die Rollen sind. Vor allem die mechanische Beanspruchung könnte eine Erklärung für die Unterschiede in [Uesaka, 2002] und [Suontausta, 1999] sein. Wenn man Abbildung 11 betrachtet, sieht man diese mechanische Beanspruchung des Blattes. Wie im Kapitel 1.3.4 beschrieben führen Biegungen von Papier über Rollen mit kleinen Durchmessern oder Kanten zu Curl.

Beim Xerographie Curl überlagern sich strukturelle, viskoelastische und mechanische (Roll-Set) Curlmechanismen. Die Beobachtungen von [Uesaka, 2002] und [Suontausta, 1999] sind beide nachvollziehbar und möglich. Die Einflüsse auf das Ergebnis hängen von der Intensität der einzelnen Mechanismen und dem verwendeten Gerät (Drucker) ab.



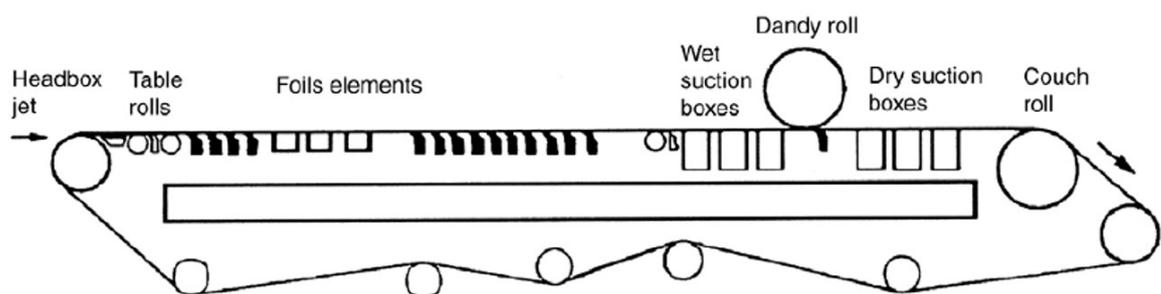
**Abbildung 11:** Mechanische Beanspruchung eines Blattes im Kopierer. Das Papier wird hier wie in ein Schuhpresse über zwei Kanten geführt. Bild aus [Brooms, 1978]

## 1.4 Papiermaschine

Der gesamte Herstellungsprozess von Papier beruht darauf, aus einer Suspension mit nur einem geringen Fasergehalt von 1 % den Großteil des Wassers wieder zu entfernen. In der Siebpartie wird das meiste Wasser entfernt. Die Trockenpartie entfernt den Teil des im Papier enthaltenen Wassers, der sich mechanisch nicht mehr entfernen lässt.

### 1.4.1 Siebpartie

Die Siebpartie bildet den ersten Teil der Papiermaschine und besitzt verschiedene Ausführungsformen. In Abbildung 12 ist eine Langsiebpartie dargestellt. Die dargestellte Version besitzt Registerwalzen, Entwässerungsleisten, Saugkästen und einen Egoutteur. Alle diese Elemente dienen zur Regelung von Entwässerung und Formation. Bis zur Wasserlinie, wo die Fasern immobil werden, kann auch die Faseranordnung in der Papierstruktur beeinflusst werden.



**Abbildung 12:** Schema einer Siebpartie mit Langsieb und Egoutteur. Grafik aus [Norman, 2007].

### 1.4.2 Stoffauflauf

In seinen verschiedenen Ausführungsformen bringt der Stoffauflauf die Fasersuspension auf das Sieb. Die Hauptaufgabe liegt hierin die Suspension gleichmäßig über die gesamte Bahnbreite aufzutragen. Das Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnis wird hauptsächlich über den Stoffauflauf geregelt. Drei Zustände werden hierbei unterschieden:

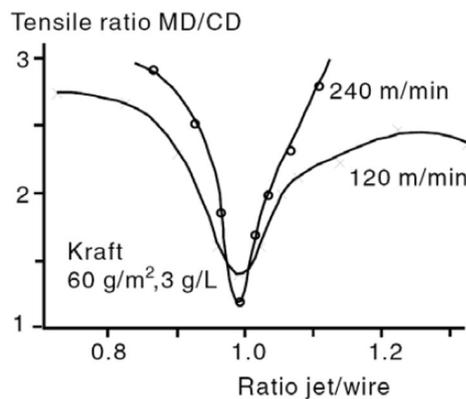
1. Staunullpunkt (engl. zero-point). Der Suspensionsstrahl und das Sieb bewegen

sich gleich schnell.

2. Unterstau (engl. drag). Der Strahl ist langsamer als das Sieb. Das Verhältnis ist kleiner eins.
3. Überstau (engl. rush). Der Strahl ist schneller als das Sieb und das Verhältnis der beiden ist größer eins.

### **Einfluss auf die Faserorientierung**

Sowohl Unterstau, als auch Überstau führen dazu, dass sich die Fasern in Maschinenrichtung ausrichten. Abb. 13 sieht man, dass für Strahl-Sieb-Verhältnisse die ungleich 1 sind, der Wert der Anisotropie steigt. Im Staunullpunkt liegt der Anisotropiewert nur knapp über 1, was einem isotropen Blatt entspricht. Die Differenz der Strahlgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit des Siebes bewirkt eine gerichtete Scherströmung der Suspension auf dem Sieb. Diese richtet die Fasern in Maschinenrichtung aus. Im Staunullpunkt fehlt diese Differenz, oder ist sehr gering und auch die Scherströmung tritt nicht oder nur in sehr kleinem Ausmaß auf. Die Orientierung der Fasern erfolgt daher in alle Richtungen gleichmäßig.

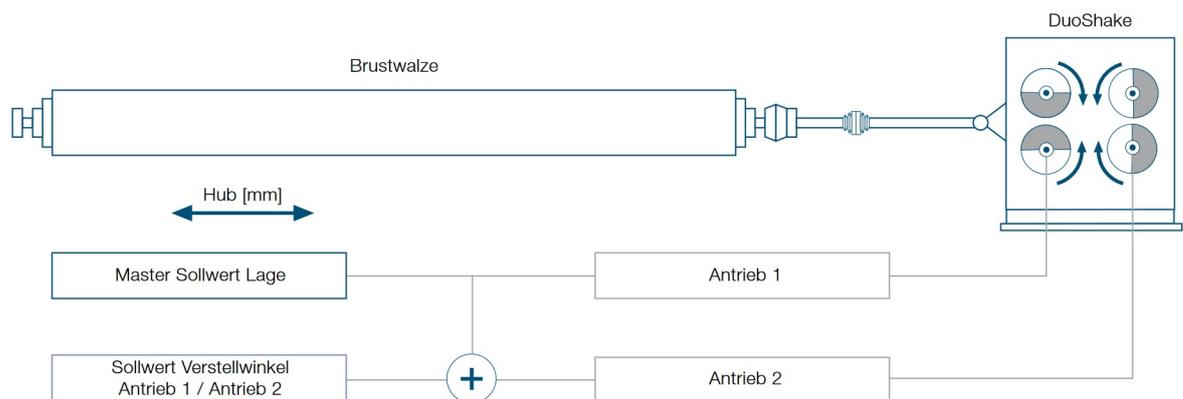


**Abbildung 13:** Staukurve. Die Faserorientierungsanisotropie (hier als Festigkeitsverhältnis MD/CD) ist über unterschiedliche Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnisse aufgetragen. Grafik aus [Norman, 2007].

Die Überlegungen betreffen nur das Strahl-Sieb-Verhältnis und dessen Einfluss auf die Faserorientierung. In der Siebpartie bestimmen viele Parameter die Ausrichtung der Fasern im Blatt. Eine weitere ist zum Beispiel die Siebschüttelung.

### 1.4.3 Siebschüttelung

Unter Siebschüttelung versteht man eine quer zur Maschinenrichtung stehende Bewegung des Langsiebes. Realisiert wird diese durch einen Schüttelbock der eine solche Bewegung an die Brustwalze überträgt. Abb. 14 zeigt das Schema eines Aggregats mit Brustwalze und der zugehörigen Regelung. Der Sinn der vier Schwungmassen liegt darin, alle vertikalen Kräfte durch die gegengleiche Anordnung aufzunehmen, und nur die horizontale Bewegung zuzulassen.

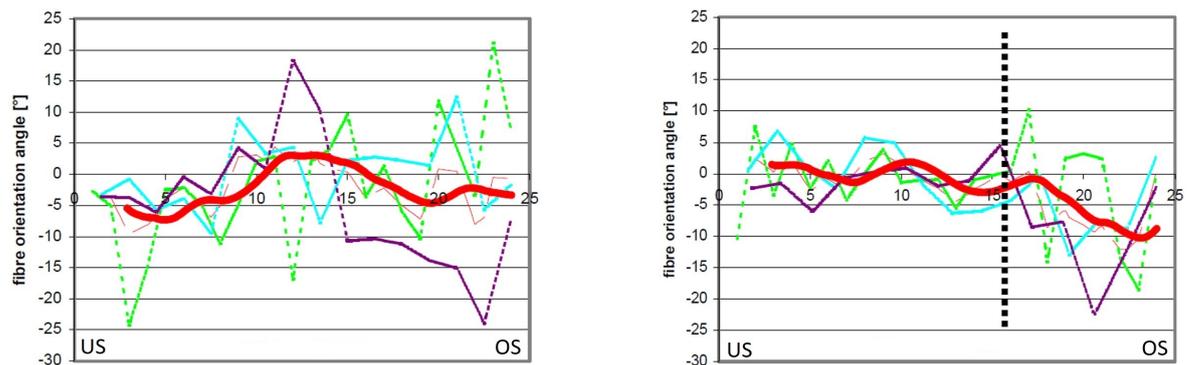


**Abbildung 14:** Schema Duoshake mit Regelung. Quelle: Voith.

[Knotzer und Widauer, 2005] beschreiben den Effekt der Siebschüttelung, als Verbesserung der Formation durch Zerstörung von Faserflocken. Die Siebschüttelung bringt ein gerichtetes Scherfeld in Querrichtung ein was dazu führt, dass sich Fasern in diese Richtung anordnen.

## Einfluss auf die Faserorientierung

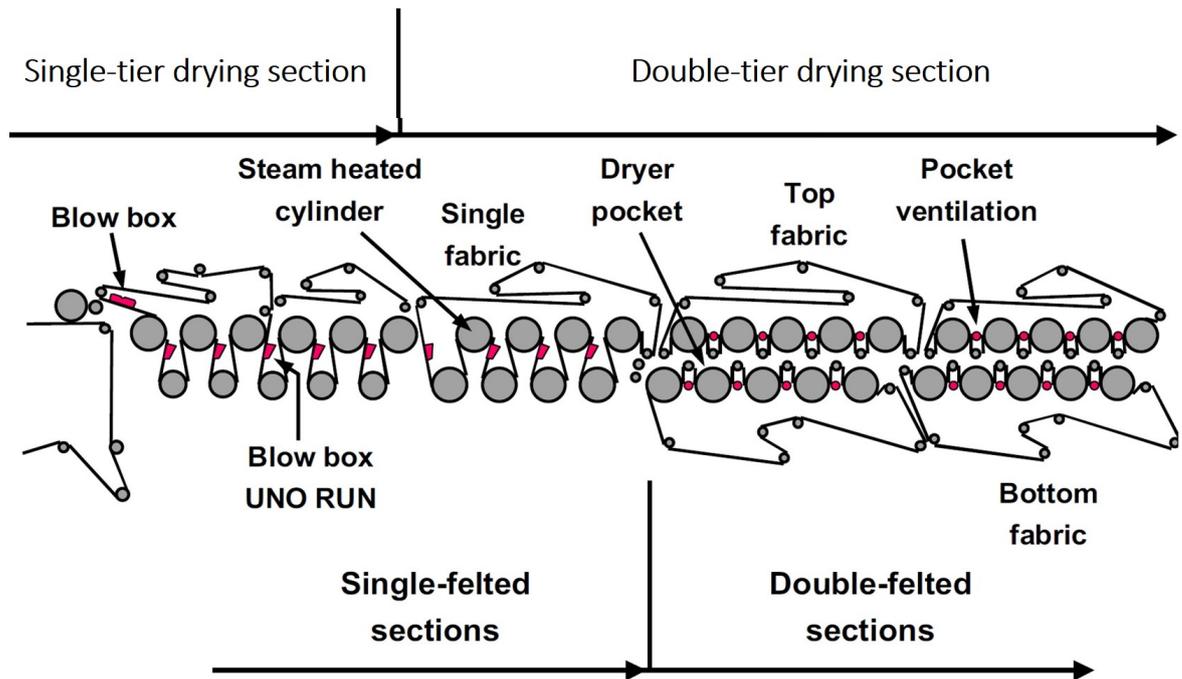
Abbildung 15 zeigt links Ergebnisse von Laminatspaltung von Papier welches ohne Siebschüttelung produziert wurde. Rechts wurde der Versuch mit Siebschüttelung wiederholt. Die roten, fetten Linien repräsentieren das Durchschnittsprofil der Messungen. [Knotzer und Widauer, 2005] beschreibt, dass der Einfluss der Siebschüttelung nicht im durchschnittlichen Profil, aber in den einzelnen Ergebnissen (dünn/strichliert) zu sehen ist. Die Einzelmessungen sind bei den Versuchen ohne Siebschüttelung sehr unterschiedlich. Grund hierfür kann auch sein, dass die Versuche im Staunullpunkt durchgeführt wurden. Bei den Ergebnissen mit aktivierter Siebschüttelung sind die Profile gleichmäßiger, wobei der Effekt nur die unteren Schichten betrifft (links der schwarz-punktierten Linie). Der Effekt der Siebschüttelung kann somit als Vergleichmäßigung der Struktur zusammengefasst werden.



**Abbildung 15:** Faserorientierungs-z-Profile für Kraftpapier. Die y-Achse bezeichnet den Faserorientierungswinkel. Dieser wurde für die einzelnen Schichten des Papiers gemessen, welche auf der x-Achse aufgetragen sind. Die linke Abbildung zeigt Versuche ohne Siebschüttelung, die rechte mit. Grafik aus [Knotzer und Widauer, 2005]

### 1.4.4 Trockenpartie einer modernen Papiermaschine

Die Trockenpartie ist neben der Sieb- und der Pressenpartie einer der drei wesentlichen Bestandteile einer Papiermaschine. Heutzutage findet man drei Konzepte vor: einreihig-einfach-befilzt, zweireihig-einfach-befilzt und zweireihig-zweifach-befilzt. In Abbildung 16 sind alle Konzepte in der genannten Reihenfolge dargestellt.



**Abbildung 16:** Aufbau einer Trockenpartie. Im linken Teil der Abbildung ist das einfach-befilzte, im rechten Teil das doppelt-befilzte Konzept dargestellt. Beim einfach-befilzten Konzept ist zuerst die einreihige Variante, bei der die unteren (kleineren) Zylinder unbeheizt sind, dargestellt. Bild aus [Pikulik und Poirier, 2003].

Bei einreihigen Trockenpartien sind (meist) nur die oberen Zylinder beheizt, während die unteren Zylinder als Saugwalzen ausgeführt sind. Einreihige Trockenpartien haben den Vorteil der sicheren Bahnführung, da die Papierbahn während sie die Trockenpartie durchläuft immer vom Trockensieb geführt wird. Der Nachteil von diesem Konzept ist, dass immer die gleiche Seite des Papiers getrocknet wird, was der Planlage negativ entgegen wirkt (Curl). Die Richtung des Curls geht dabei immer entgegen der Richtung der Seite von der die Feuchtigkeit das Blatt zuletzt verlassen hat [Glynn und Jones et al., 1961]. Im Vergleich zur zweireihigen Trockenpartie werden die unteren Zylinder nicht beheizt, was bei gleicher Länge zu einer geringeren Trocknung führt. Da Sicherheit und Verfügbarkeit sehr wichtige Faktoren sind, hat sich die einreihige Trockenpartie, vor allem bei schnelllaufenden Maschinen, als Standard etabliert.

Zweireihige Trockenpartien werden entweder einfach- oder doppelt-befilzt aus-

geführt. Trockenpartien mit zwei Trockensieben weisen die geringste Zweiseitigkeit, aber auch die höchste Bahnbeanspruchung auf, da im Vergleich zu den Konzepten mit nur einem Trockensieb die Bahn immer einem freien Zug unterliegt wenn sie von einer Reihe auf die andere wechselt. Dies führt zu einer verschlechterten Verfügbarkeit (engl. Runnability).

### **Bias**

Bias bezeichnet in der Trockenpartie den Wert um welchen der Dampfdruck der einen Trockenzylinderreihe, sich von dem der anderen unterscheidet. Er wird in der Einheit des Drucks, meist in Bar, angegeben. Die genaue Definition, ob zum Beispiel ein positiver Biaswert bedeutet, dass der Dampfdruck der oberen Reihe höher als der, der unteren ist, ist firmenabhängig. Ein höherer Dampfdruck bedeutet eine höhere Oberflächentemperatur der Zylinder. Wie im Kapitel 1.3.3 beschrieben führt eine unterschiedliche Wärmebehandlung der beiden Papierseiten zu (irreversiblen) Curl. Bei genauer Kenntnis des Prozesses, kann Bias auch dazu verwendet werden den Curl im endgültigen Produkt zu steuern.

### **Einfluss auf die Faserorientierung**

Die Trockenpartie ist für die unter Kapitel 1.3.3 verursachten Wölbungsphänomene verantwortlich. Die Trocknung des Papiers unter Verformungsbehinderung führt zum Einfrieren von Spannungen. Erfährt das Papier eine höhere Luftfeuchtigkeit führen diese Trockenspannungen zu Verformung des Papiers. Wasserbasierte Druckverfahren wie Offset oder Inkjet können hier ebenfalls zu Problemen führen.

## **1.5 Maßnahmen gegen Curl**

Wie im Kapitel 1.4.4 bereits erwähnt, sind die Trockengruppen in den meisten Papiermaschinen einreihig ausgeführt. Dieses Konzept hat den Nachteil dass immer nur eine der beiden Papierseiten in Kontakt mit den beheizten Zylindern kommt. Diese einseitige Trocknung führt wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben, dazu, dass Trockenspannungen in das Papier eingebracht werden, die zu Curl führen können. Wie im Kapitel 1.4.4 bereits erwähnt biegt sich das Papier von der beheizten Seite weg.

Bei Papiermaschinen mit einreihiger Trockenpartie gibt es nun mehrere Möglichkeiten das Wölbungsverhalten des Papiers zu steuern bzw. diesem entgegenzuwirken.

1. Die letzte Trockengruppe zweireihig, eventuell mit zwei Sieben, ausführen.
2. Vertauschen der beheizten Zylinder mit den Saugwalzen in der letzten Gruppe.
3. Befeuchtung einer Seite in der letzten Trockengruppe.

Bei den ersten beiden Methoden handelt es sich um regelungstechnisch sehr aufwendige Lösungen, während der Einbau und die Steuerung einer Befeuchtungseinheit (z.B. Düsenbefeuchter) nur geringen apparativen Aufwand bedeutet, aber etwas höhere Energiekosten nach sich zieht.

---

## **2 Methodik**

---

## **2.1 Auswertung vorhandener Daten**

Prozessparameter werden in einem modernen Unternehmen ständig aufgezeichnet. Meist dienen sie der Überwachung der Produktion oder als Anhaltspunkt für latent auftretendes Versagen von Maschinen und Maschinenteilen. Nachfolgend wird aufgezeigt wie aus diesen Daten Informationen über die Ursachen des Wölbungsverhaltens von Kopierpapier generiert werden können.

### **2.1.1 Daten aus dem Prozessleitsystem**

Das Prozessleitsystem der PM5 zeichnet die wichtigsten Parameter alle 15 Minuten auf und speichert diese. Folgende Größen werden in diesem Zeitintervall ausgewertet:

- Differenz der Strahlgeschwindigkeit zur Siebgeschwindigkeit in Meter pro Minute
- Papiermaschinengeschwindigkeit
- Bias

Dazu werden ebenfalls die dazugehörenden, produzierten Sorten eingetragen.

### **2.1.2 Daten aus der Qualitätssicherung - Kopiertest**

Zusätzlich zu den Aufzeichnungen des Prozessleitsystems wird in regelmäßigen Abständen auch das produzierte Papier auf seine Wölbung hin untersucht. Von jedem zweiten bis dritten Tambour werden an sechs verschiedenen Positionen in Querrichtung Proben genommen. Diese Proben umfassen zwischen 25 und 50 Blätter Papier die für den Kopiertest verwendet werden. Beim Kopiertest wird zuerst die Wölbung eines Papierstapels als Ganzes gemessen. Der Stapel wird anschließend mit einem Xerografiekopierer auf der Siebseite bedruckt und es wird erneut die Wölbung des Stapels gemessen. Der Vorgang wird abschließend auch für die Oberseite (nun sind beide Seiten bedruckt) wiederholt.

Die Messwerte dieses Tests werden ebenfalls mit Datum, Uhrzeit und Sortennummer gespeichert.

### **2.1.3 MATLAB®-Auswertung**

Für die Auswertung standen die oben genannten Daten von den Jahren 2014 bis 2016 zur Verfügung. Mit MATLAB® wurde ein Programm entwickelt welches aus diesen Daten die relevanten Information filtert und zusammenträgt. Im wesentlichen durchläuft die Routine folgende Schritte:

Zuerst werden beide Datensätze nach der zu gewünschten Sorte durchsucht. Redundante und nicht-verwendete Daten werden verworfen.

Im nächsten Schritt werden die Daten aus dem Prozessleitsystem und aus der Qualitätssicherung zusammengefügt. Der verbindende Faktor ist hierbei die Zeit zu welcher die einzelnen Werte gespeichert wurden. Da die Zeitintervalle bei beiden Datensammlungen unterschiedlich sind, werden 15 Minuten als Kriterium genommen, welche maximal zwischen den Werten aus den unterschiedlichen Tabellen liegen dürfen.

## 2.2 Versuchsplanung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss verschiedener Produktionsparameter auf das Wölbungsverhalten von Kopierpapier. Dazu müssen verschiedene Parameter ausgewählt werden die einen solchen möglichen Einfluss haben könnten. Die Versuchsplanung muss außerdem darauf ausgelegt sein die Auswirkungen auch speziell den einzelnen Parametern zuzuordnen.

### 2.2.1 Versuchsplan

Systematische Analyse von Einflussfaktoren erfordert eine genaue Planung und Betrachtung aller relevanter Parameter. Für die Untersuchung von Wölbungsverhalten von Feinpapieren kommen die Faktoren Bias, JWR und Siebschüttelung zur Betrachtung.

	Schüttelung	Unterstau	Staunullpunkt
Versuch 1	+	+	-
Versuch 2	+	-	+
Versuch 3	-	+	-
Versuch 4	-	-	+

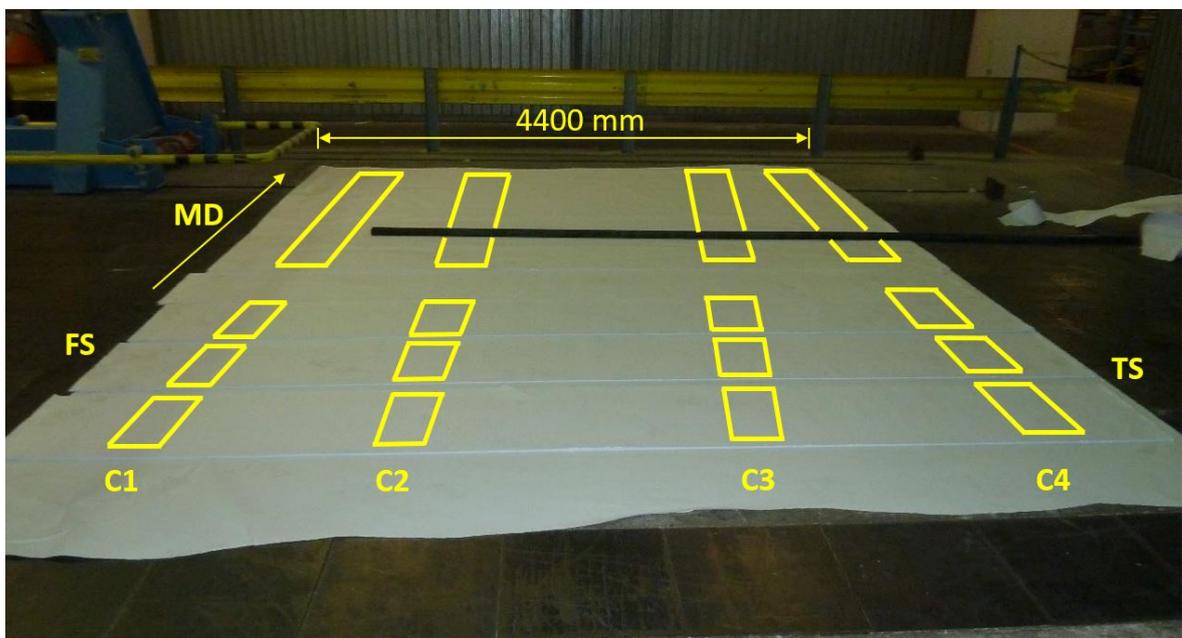
**Abbildung 17:** Übersicht über die gestalteten Versuche. Zu sehen sind die eingestellten PM-Parameter. Schüttelung gibt an ob die an der Brustwalze installierte Siebschüttelung aktiviert ("+") war oder nicht. Die Einstellung des Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnis variiert zwischen Unterstau und Staunullpunkt.

Die Einstellung des Unterschieds der Temperaturen der beiden Trockenzyylinderreihen (Bias) beträgt in allen Versuchen 1 bar.

### 2.2.2 Probennahme

Der oben vorgestellte Versuchsplan wurde in den Produktionsbetrieb integriert was dazu führte, dass innerhalb eines Tages alle vier Versuchspunkte durchgeführt werden konnten. Jeder Versuch wurde auf einen eigenen Tambour gefertigt. Für die Probennahme wurden die obersten 25 bis 40 Umfänge vom Tambour geschnitten

und, nun mit der Siebseite nach oben blickend, am Boden ausgelegt. Wie in Abbildung 18 eingezeichnet ist wurden an vier verschiedenen Positionen in Querrichtung Proben entnommen. Für die Untersuchung der Trocknungsspannungen wurden hintereinander Proben im Format A4 ausgeschnitten. Um einen Eindruck über den Einfluss der Siebschüttelung auf die Faserorientierung zu gewinnen wurde ein zwei Meter langer Streifen entnommen. Die TSO-Vermessung der Streifen soll zeigen ob der Sinusverlauf der Schüttelung vorhanden ist um danach an geeigneten Stellen Proben für die Laminatspaltungsmessung aus dem Streifen zu entnehmen.



**Abbildung 18:** Probennahme. Am Boden liegen 25 bis 40 Umfänge eines Tambour. An vier Positionen in Querrichtung (C1-C4) wurde viermal hintereinander Proben im Format A4 genommen. In Maschinenrichtung dahinter wurde ein zwei Meter langer Streifen entnommen.

### 2.2.3 Verwahrung der Proben

Um den Feuchtegehalt des Papiers bei der Produktion so lange wie möglich erhalten zu können, wurden die Papierproben in Kunststoffbehältern luftdicht verpackt. Damit sollte eine Wölbung des Papiers durch eine Luftfeuchteänderung am Lagerplatz verhindert werden.

## 2.3 Messmethoden - Struktureller Curl

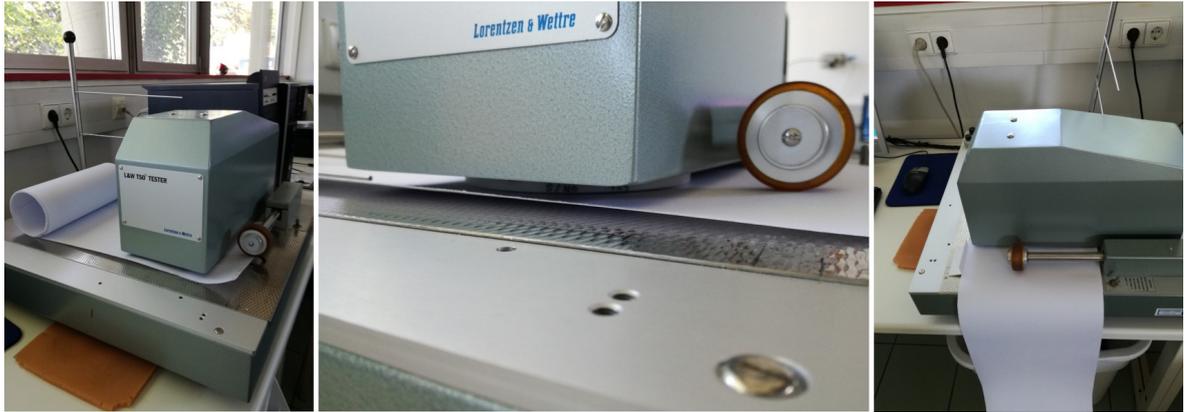
### 2.3.1 TSO - Faserorientierung in Maschinenrichtung

Die Zeit, die Ultraschallwellen benötigen um einen definierten Abstand in einem Medium wie Papier zurückzulegen, erlaubt einen Rückschluss auf die Steifigkeit des Papiers. [Loewen und Foulger, 2002] beschreiben, dass sich Schall schneller in die Richtungen ausbreitet in denen das Papier steifer ist. Die Steifigkeit in eine bestimmte Richtung korreliert mit der Anzahl an Fasern die in diese Richtung zeigen.

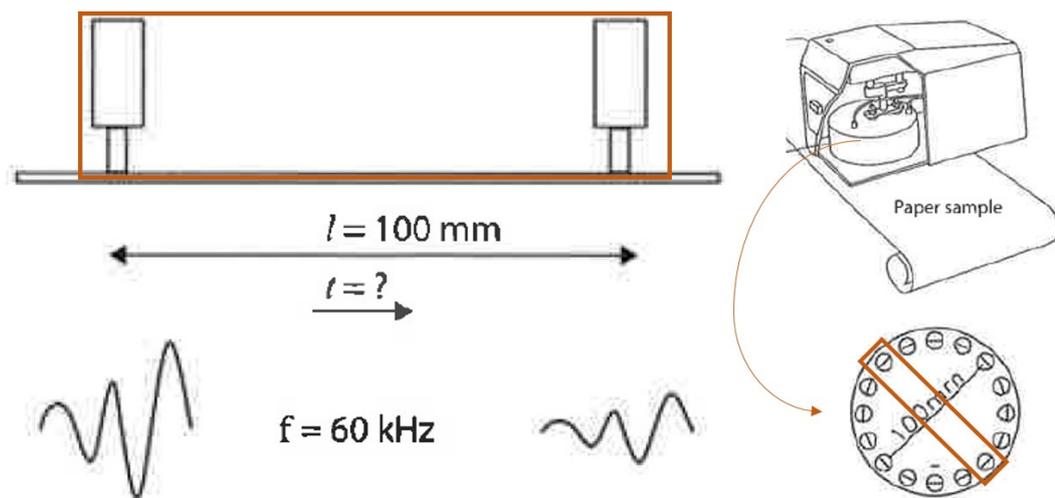
Um den Einfluss der Siebschüttelung auf die Faserorientierung in Maschinenrichtung untersuchen zu können wird die Orientierung der Zugsteifigkeit (engl. Tensile Stiffness Orientation, kurz TSO) gemessen. Dieser ist zwar nur bedingt mit dem Faserorientierungswinkel vergleichbar, gibt aber qualitativ den Verlauf wieder. Laut [Lindblad und Fürst, 2007] gibt der TSO-Winkel nur dann den Faserorientierungswinkel wieder, wenn ein ungestrichenes Papier frei trocknen kann. Trocknungsspannungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Steifigkeiten im Papier und auf den TSO-Winkel.

Abbildung 19 zeigt das von Lorentzen und Wettre verwendete Messgerät und wie die in Abbildung 18 gezeigten, zwei Meter langen, Probestreifen vermessen wurden. Die Probe wird einmal eingespannt und ein automatischer Einzug führt die Probe durch das Messgerät. Alle 50 mm wird eine Messung durchgeführt, wobei das Messprinzip in Abbildung 20 gezeigt wird.

Der Messkopf des TSO-Messgeräts besteht aus acht Sendern mit dazugehörigen Empfängern, welche in einem Kreis angeordnet sind (Abb. 20). Durch die Anordnung ergibt sich, dass zwischen den einzelnen Paaren immer  $22,5^\circ$  liegen. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger beträgt immer 100 mm. Die Zeit die ein definiertes Signal benötigt um diese Strecke zurückzulegen wird gemessen. Von dieser Zeit wird auf die Steifigkeit in diese Richtung geschlossen.



**Abbildung 19:** Ablauf Messung TSO. Der in Maschinenrichtung entnommene Probestreifen wird in das TSO-Messgerät der Firma Lorentzen und Wettre eingespannt. Ein automatischer Vorlauf zieht die Probe ein, wobei alle 50 mm eine Messung erfolgt.



**Abbildung 20:** Messprinzip TSO. Empfänger und Sender liegen 100 mm voneinander entfernt. Der Impuls der den Sender verlässt liegt im Kilohertzbereich. Gemessen wird die Zeit die das Signal braucht um die 100 mm zurückzulegen. Acht solcher Sender-Empfänger-Paare sind in Maschinenrichtung und Querrichtung angebracht sowie in Winkel die zwischen diesen beiden Richtungen liegen. Insgesamt ist alle  $22,5^\circ$  ein solches Sender-Empfänger-Paar angeordnet. Grafik aus [Lindblad und Fürst, 2007].

### 2.3.2 Laminatspaltung - Zweiseitigkeiten

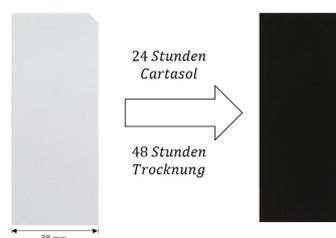
Diese Methode basiert darauf die einzelnen Schichten eines Papiers zu isolieren und in den Schichten die Faserorientierung zu messen. Die Vorgehensweise wie es zur Betrachtung einzelnen Schichten kommt wird hier erklärt. Die Methode wurde vorgestellt in [Hirn und Bauer, 2007].

#### Zuschneiden der Probe

Aus dem zu untersuchenden Papier wird mit einer Stanze ein 40 mm x 90 mm großes Blatt herausgeschnitten. Um die Lage des Blattes (Maschinenrichtung, Siebseite, etc.) bestimmen zu können wird eine Ecke abgeschnitten. An jeder zu untersuchenden Stelle werden in Querrichtung im Abstand von 70 mm drei Proben herausgeschnitten um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu prüfen.

#### Einfärben

Ein hoher Kontrast verbessert die Analyse der Fasern weshalb die Blätter mit dem schwarzen, kationischen Farbstoff Cartasol gefärbt werden. Im volumetrischen Verhältnis 1:100 wird Cartasol mit deionisiertem Wasser vermischt. Die Probe wird zwischen zwei Siebe in die Lösung gelegt und bleibt dort für 24 Stunden. Im Anschluss darauf wird die Probe zwischen zwei Löschkartons gebettet und von zwei Platten zusammengepresst. In diesem Zustand werden die Proben für weitere 48 Stunden gelagert ehe die eigentliche Verarbeitung beginnen kann. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist in Abbildung 21 zu sehen.



**Abbildung 21:** Einfärbung der Probe mit Cartasol. Links: Ausgeschnittene Probe mit abgeschnittener Ecke zur Orientierung. Rechts: Die Probe wurde 24 Stunden in Cartasol eingelegt und danach 48 Stunden getrocknet.

## Spaltung

Die eingefärbte Probe wird gemeinsam mit einem Rahmen zwischen zwei Laminatfolien gelegt. Durch Erhitzung der Folie wird der Klebstoff aktiviert. Das Spalten im eigentlichen Sinne funktioniert weil sich die klebende Folie wieder leicht vom Rahmen lösen lässt, die Bindung zwischen Folie und Papier aber sehr groß ist. Abbildung 22 zeigt wie eine eingefärbte Probe in 24 einzelne Schichten gespalten wird. Die einzelnen Schichten werden anschließend einlamiert. Eine geeignete Nummerierung stellt sicher, dass die einzelnen, laminierten Schichten in der richtigen Reihenfolge abgelegt werden.



**Abbildung 22:** Die eingefärbte Probe wird in 20-30 einzelne Schichten gespalten. Diese einzelnen Schichten werden zwischen zwei Folien einlaminiert.

## Einscannen

Die einzelnen Schichten werden mit einem Durchlichtscanner bei 3000 dpi digitalisiert. Die zuvor abgeschnittene Ecke dient der Orientierung.

## Auswertung

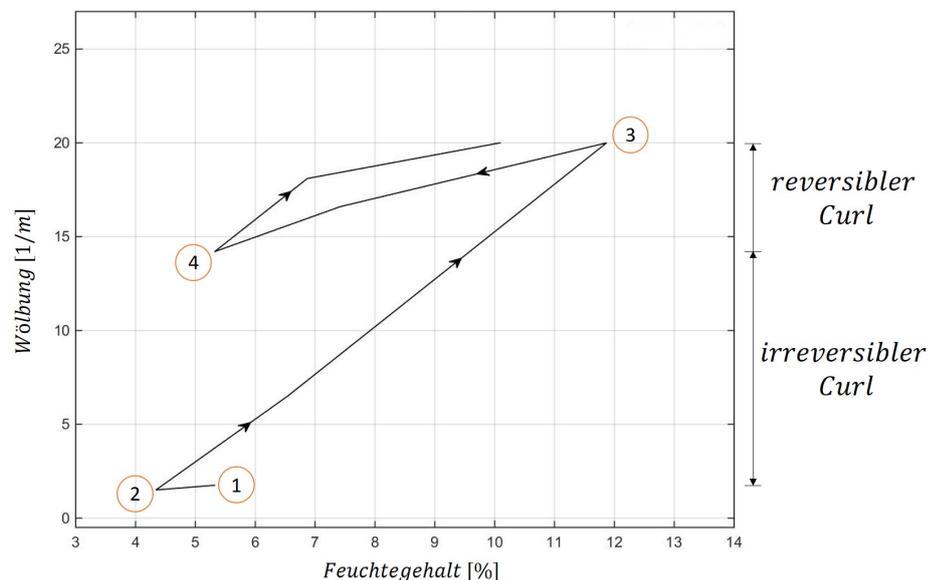
Mit MATLAB® werden die einzelnen Schichten auf ihre Faserorientierung hin untersucht. Auf den Schichten sollten dafür nach Möglichkeit nur mehr einzelne Faserschichten zu sehen sein.

Das Analyseverfahren untersucht die Helligkeitsverläufe im zu untersuchenden Bild. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, sind die eingefärbten Fasern schwarz und die faserlosen Bereiche weiß. Die Übergänge zwischen diesen Bereichen gestalten sich als Graustufen. Die pixelweise Untersuchung in vertikaler und horizontaler Richtung ergibt einen Gradientenvektor der in die Richtung der maximalen Helligkeitsänderung zeigt. Damit kann die Lage der Faser und in weiterer Folge ihr Ausrichtungswinkel genau bestimmt werden.

Wenn diese Analyse für alle Schichten in richtiger Reihenfolge wiederholt wird, kann ein Faserorientierungsprofil (Winkel und Anisotropie) über die z-Richtung des Papiers erstellt werden.

## 2.4 Messmethoden - Irreversibler Curl

Im Kapitel 1.3.3 wurde bereits erklärt welche Rolle der irreversible Curl in der Gesamtwölbung eines Papiers einnimmt. Ein wesentliches Merkmal sind hierbei die schon oft erwähnten Trocknungsspannungen welche sich lösen wenn das Papier einer Befeuchtung ausgesetzt wird. Dieser Effekt wird verwendet um den Einfluss des irreversiblen Curls zu messen. Eine Papierprobe wird dabei in bestimmter Reihenfolge verschiedenen relativen Luftfeuchten ausgesetzt, wobei nach jeder Änderung die Wölbung der Probe mit Hilfe der Wölbungsschablonen ermittelt wird. Abbildung 23 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung.



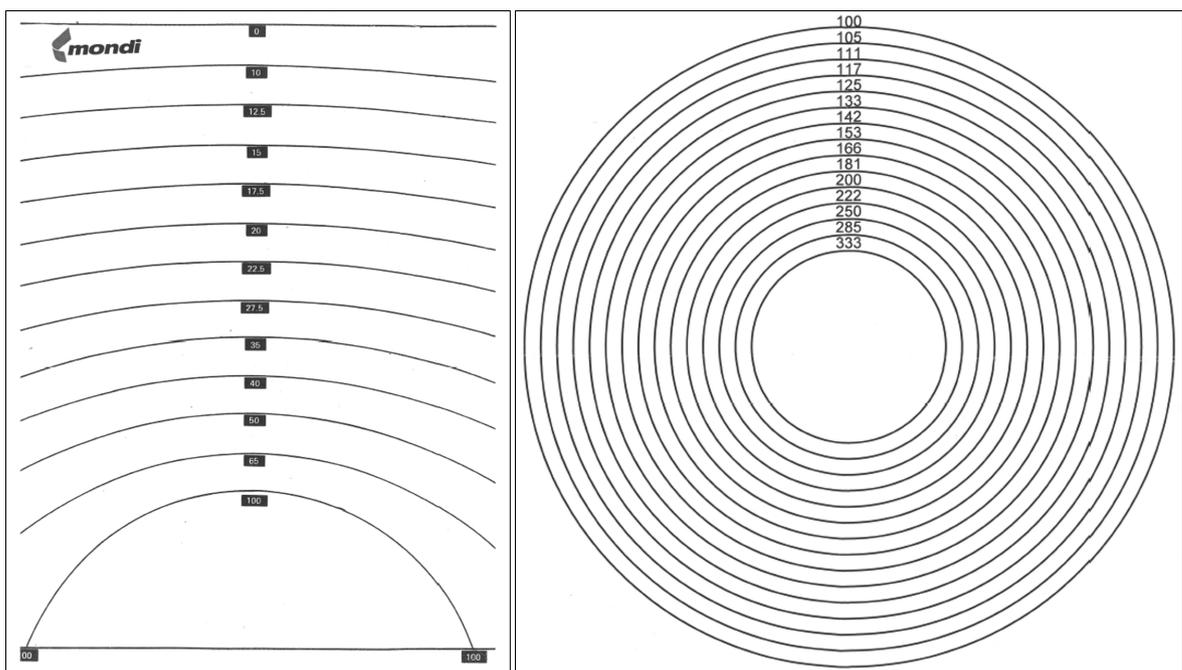
**Abbildung 23:** Die Wölbung einer Papierprobe wird über den Feuchtegehalt der Probe bei gleichbleibender Raumtemperatur aufgetragen. Punkt 1 zeigt den Ausgangszustand der Probe bei Produktionsfeuchte. Von Punkt 1 nach 2 wird die Probe getrocknet. Im nächsten Schritt wird die Luftfeuchtigkeit erhöht bis zum Punkt 3 der einer Luftfeuchtigkeit von fast 90% entspricht. Danach wird die Probe wieder getrocknet. Die Strecken 1-2 und 3-4 repräsentieren den reversiblen Curl und sollten daher auch eine ähnliche Steigung haben.

In der Grafik lässt sich sehr gut erkennen wie groß die Einflüsse des reversiblen und des irreversiblen Curls sind. Nach der Trocknung der Probe, wurde danach schrittweise die Luftfeuchtigkeit bis auf 90% erhöht (Strecke 2-3). Dieser Abschnitt

ist nicht mehr umkehrbar. Auch wenn die Probe erneut auf den gleichen Feuchtegehalt gebracht wird wie im Punkt 2 bleibt die Wölbung der Probe höher als im Punkt 2. Der Unterschied zwischen den Punkten 2 und 4 kann als irreversibler Curl betrachtet werden. Nachdem die Probe einmal einer hohen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt war können die Schritte Trocknung und Befeuchtung beliebig oft wiederholt werden und der Verlauf der Wölbung wird immer ähnlich aussehen wie die Strecke 3-4. Wichtig ist vor allem das die Steigung der Strecke 1-2 und 3-4 und alle Wiederholungen dieser immer ein ähnliches Aussehen haben. Sie beschreiben die reversible Dimensionsinstabilität.

#### 2.4.1 Wölbungsschablonen - Curlradien

Mit dem hier vorgestellten Verfahren können nur Wölbungen gemessen werden deren Wölbungsachsen entweder in Maschinenrichtung oder in Querrichtung liegen.



**Abbildung 24:** Schablonen zur Messung der Wölbung von Papier. Die zu vermessende Papierprobe wird auf die Schablone aufgesetzt um sie mit den aufgedruckten Radien zu vergleichen. Die Werte auf der Schablone durch 10 geteilt ergeben den Radius der Wölbung in 1/m. Grafiken zur Verfügung gestellt von der Fa. Mondi AG.

Über einen möglichen Diagonalcurl (Wölbungsachse zeigt von einer Ecke zur ge-

genüberliegenden, siehe Abb. 5 auf Seite 17, rechts unten) kann mit dieser Messmethode keine Aussage getroffen werden. Somit können nur Wölbungen detektiert werden die ihren Ursprung in einer Zweiseitigkeit (Anisotropie, Füllstoff, Leimung, etc.) haben. Die Schablonen können für alle Probengrößen verwendet werden.

#### 2.4.2 Klimazyklen Hausmening - irreversibler Curl

Für die praktische Durchführung der Klimazyklen standen zwei Messapparate zur Verfügung. Eine Klimabox und ein Klimaschrank.

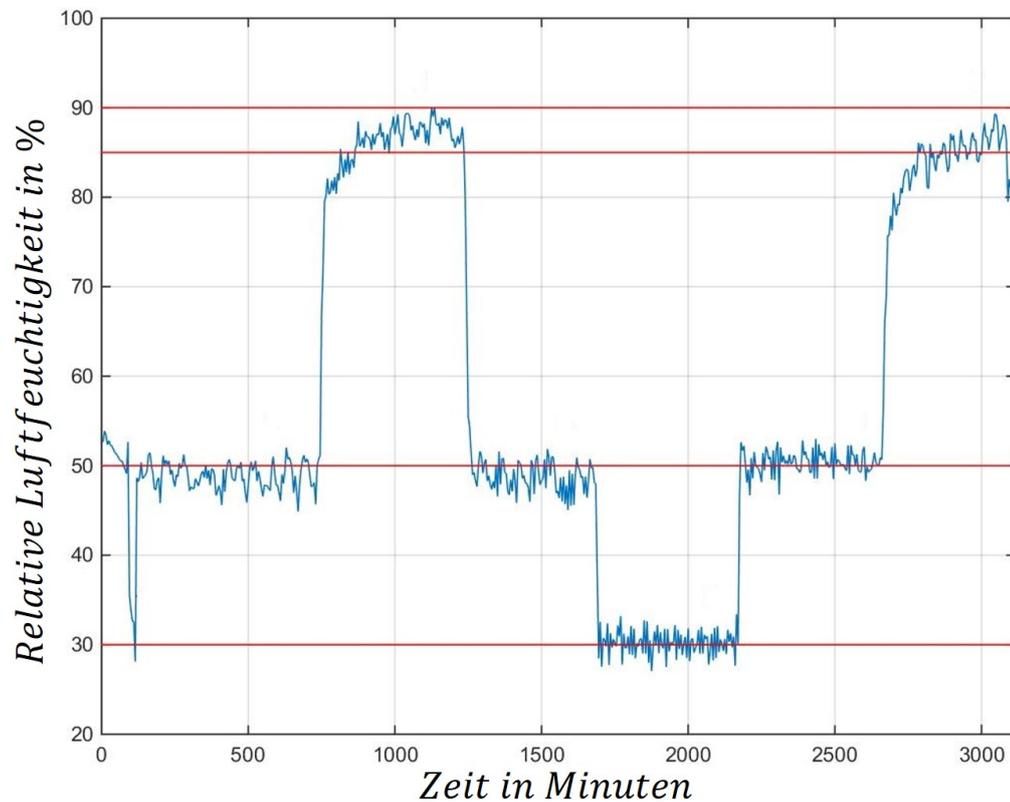
Die Klimabox ist ein begehbare Raum mit einer Grundfläche von 1500 mm x 2000 mm und einer Höhe von 2000 mm. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist wurden Proben im Format DIN A4 an der Decke aufgehängt. Durch die Größe des Raums ist es möglich bis zu 50 Proben gleichzeitig zu untersuchen. [Green, 1984] beschreibt die Verwendung dieser Probengröße als eine von drei Möglichkeiten zur Messung von klimatischen Einflüssen auf das Wölbungsverhalten von Feinpapier.



**Abbildung 25:** Klimabox. Die linke Abbildung zeigt die Anbringung der A4-Proben an der Decke des begehbaren, klimatisierbaren Raums. In der Mitte sind die Proben abgebildet nachdem der höchste Wert der Luftfeuchtigkeit (90%) erreicht war. Die Proben zeigen eine sehr starke Wölbung. Die Messung der Wölbung erfolgt über die bereits vorgestellten Schablonen, wie im rechten Bild zu sehen ist.

Nach Anbringung der Proben kann die Luftfeuchtigkeit des gesamten Raums bei konstanter Temperatur verändert werden. Die Änderung der Luftfeuchte erfolgt sehr

schnell, was auch Abbildung 26 zeigt. Zu sehen ist, dass innerhalb weniger Minuten die neu eingestellte Zielfeuchte erreicht wird. Nachdem die Proben 8 Stunden Zeit hatten sich zu akklimatisieren, wurde die Wölbung der Blätter gemessen ehe die Luftfeuchtigkeit geändert wurde.



**Abbildung 26:** Änderung der Luftfeuchte. Die Grafik zeigt den Ablauf der Messung. Die relative Luftfeuchtigkeit ist über die Zeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Proben jeweils acht Stunden lang einer eingestellten Luftfeuchtigkeit ausgesetzt waren.

### 2.4.3 Klimazyklen Graz - irreversibler Curl

Die zweite Möglichkeit zur Durchführung der Klimaversuche bietet ein Klimaschrank. Die Grundfläche des Schrankes beträgt 400 mm x 600 mm bei einer Höhe von 600 mm. Im Gegensatz zur Klimabox kann man diesen Schrank nicht betreten. Im rechten Bild in Abb. 27 ist ein Einbau zu sehen der benötigt wird um den Wind den der Lüfter an der Rückwand des Schrankes verursacht zu dämpfen. Zwei Wände und der Deckel des Einbaus bestehen aus Filzen, welche die Luftfeuchtigkeit durchlassen aber mechanische Beeinträchtigung durch die Luftströmung der Proben verhindern.



**Abbildung 27:** Klimaschrank. Links ist der Klimaschrank zu sehen in welchem Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingestellt werden kann. Der Einbau der benötigt wird um die Probe vor Luftzügen zu schützen besteht aus einem Aluminiumrahmen und drei Seiten sind mit Filzen verkleidet. Die Rückwand und die vordere Seite sind mit einer Plexiglasscheibe versehen.

Die Größe der verwendeten Proben im Vergleich zur Klimabox ist viel geringer. [Green, 1984] empfiehlt für Messungen bei hohen Luftfeuchtigkeiten kleine Streifen mit einer Höhe von 3 bis 6 mm und einer Breite die 60 mm nicht übersteigt. Der Vorteil von Proben in Größe A4 ist, dass sie dem endgültigen Produkt (Kopierpapier) eher entsprechen. Links in Abbildung 28 sieht man, wie Proben in A4-Größe innerhalb des Einbaus im Klimaschrank aufgehängt werden. Bei hoher Luftfeuch-

tigkeit kann es zu einer starken Verformung der Proben kommen, wie Abbildung 25 auf Seite 43 zeigt. Bei Senkung der Luftfeuchte, wenn die Probe in ihrer Wölbung wieder zurückgehen würde kann es nun dazu kommen, dass das Gewicht der nach vorne gebogenen Ecken dem Rückgang der Wölbung entgegenwirkt. Damit wird das Ergebnis verfälscht da das Curlverhalten nicht mehr nur von den Trockenspannungen abhängt.

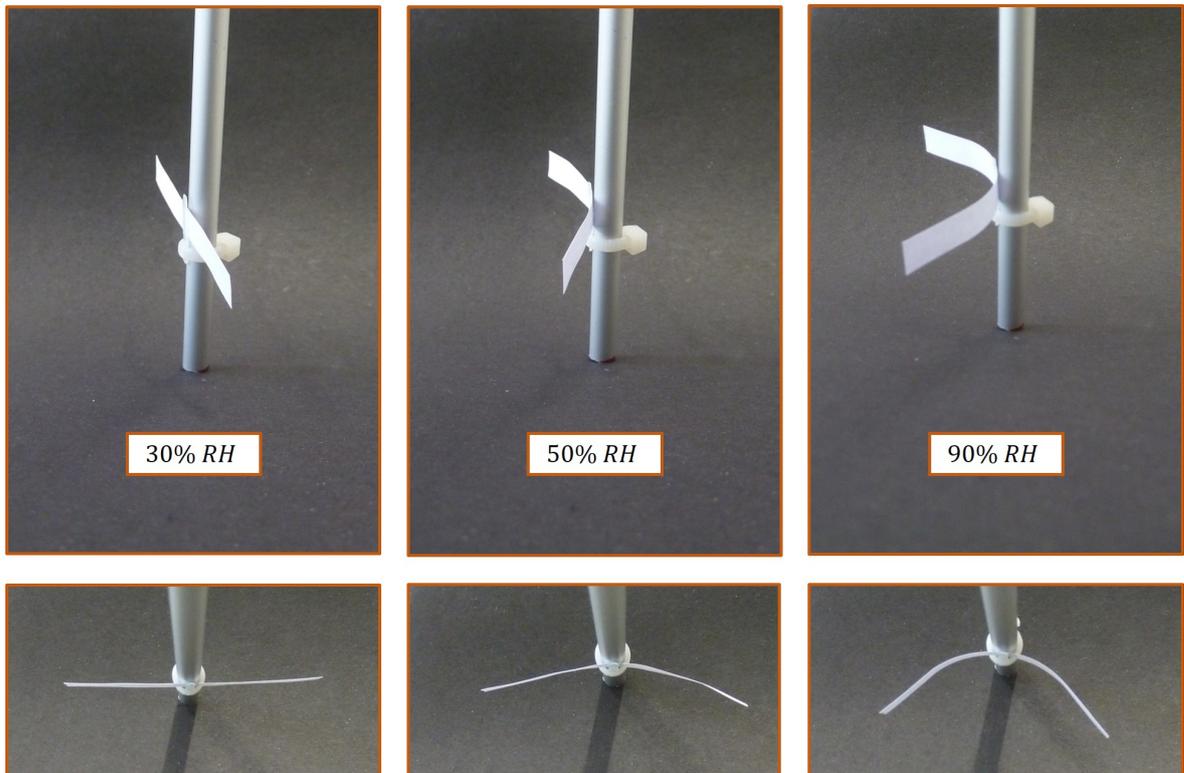
Um kleinere Proben werden die Halterungen aus Abbildung 28 verwendet. Dabei kommt entweder ein rechteckiges Kunststoffprofil oder ein rundes Aluminiumprofil zum Einsatz. Beide Materialien sind gegenüber Wasser inert.



**Abbildung 28:** Drei Möglichkeiten zur Anbringung der Proben im Klimaschrank. Links: Aufhängung von A4-Proben an der Decke des Einbaus. Mitte: Anbringung von Proben der Größe 6 x 60 mm an einem rechteckigem Kunststoffprofil. Ein Gummiband dient der Fixierung der Proben. Rechts: Die Proben werden mit Kunststoffhalterungen auf einem runden Aluminiumprofil angebracht.

Der Nachteil des rechteckigen Profils ist, dass bei einer negativen Wölbung die Proben sich um die Kanten des Profils biegen. Das gibt den Proben eine U-förmige Verformung was die Messung der Wölbung erschwert. Dieses Problem haben runde Profile nicht. Die Proben können sich in jede Richtung frei verformen und nur eine dünne Kunststoffhalterung hält die Proben am gewünschten Platz. in Abbildung 29 zeigt wie sich Proben bei verschiedenen relativen Luftfechtigkeiten verformen und

dass es keine Verformungshinderung der Proben durch die Anbringung gibt.



**Abbildung 29:** Streifen aus Kopierpapier bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten.

Im Einbau sind Aluminiumrohre (DM 5 mm) angebracht auf denen insgesamt 40 Halterungen montiert sind. Die 6 x 60 mm Papierstreifen werden in diesen Halterungen befestigt. Bei jeder Änderung der Luftfeuchtigkeit wird die Wölbung der Proben gemessen. Dafür wird der Schrank geöffnet, die Streifen aus den Halterungen genommen und mit den Wölbungsschablonen vermessen, ehe die Proben wieder in den Halterungen platziert werden.

---

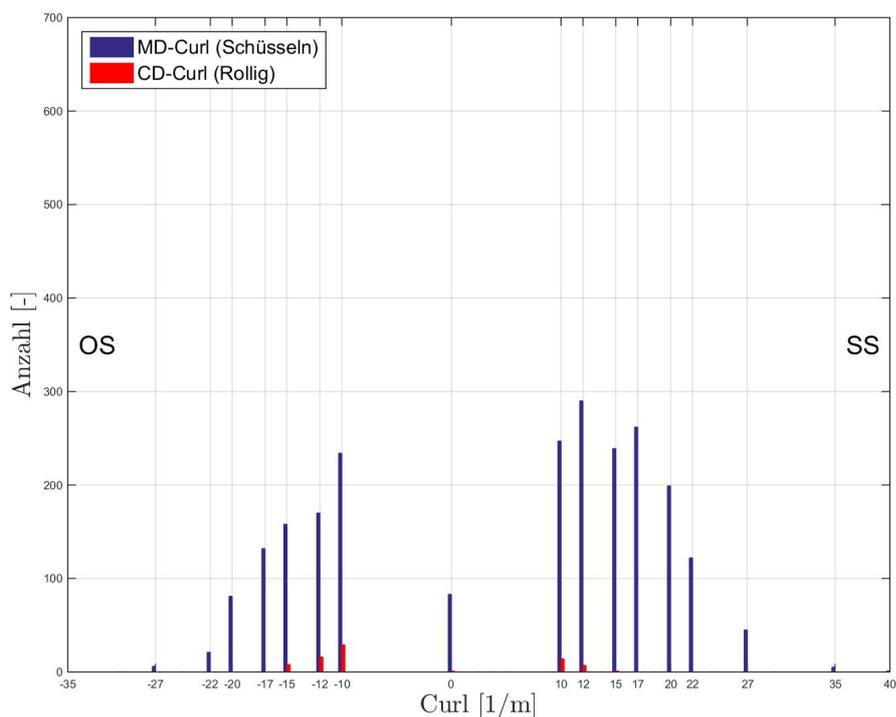
### **3 Ergebnisse**

---

### 3.1 Systematische Einflüsse

Die Arbeit von [Schuller, 2016] hat eine Abweichung der idealen Planlage auf einer Papiermaschine festgestellt und bewiesen. In allen Versuchen aus dieser Arbeit zeigt die Wölbung der untersuchten Papiere zur Siebseite. Für diese Versuche wurde die Siebschüttelung der Papiermaschine deaktiviert. Die Betrachtung über einen längeren Zeitraum soll zeigen, ob die Wölbung zur Siebseite nur während der Versuche von [Schuller, 2016] auftrat, oder dieses Verhalten immer vorhanden ist.

Um zu untersuchen, ob es einen systematischen Curl zur Siebseite gibt, werden wie im Kapitel 2.1.3 auf Seite 33 die Daten von den Kopiertests der Qualitätssicherung und den Aufzeichnungen des Prozessleitsystems kombiniert und untersucht. Die Ergebnisse werden nachstehend gezeigt und untersucht.



**Abbildung 30:** Ergebnisse Kopiertest unbedruckt. Auf der Abszisse sind die verschiedenen Wölbungsradien aufgetragen. Die Ordinate zeigt an, wie oft ein bestimmter Wölbungswert innerhalb der drei Jahre 2014 bis 2016, bei angegebenen Einstellungen, auftritt.

Auf der Abszisse sind die verschiedenen Wölbungsradien aufgetragen. Positive Werte bedeuten, dass die Ränder der Papierproben sich zur Siebseite hin wölben. Bei negativen Werten zeigt Wölbung zur Oberseite. Sowohl bei den positiven als auch bei den negativen Werten verläuft die Achse der Wölbung in Maschinenrichtung (vgl. CD-Curl, Schüsseln). Die Messung der Wölbungsradien wurde bei den Papierproben gemessen, bevor diese im Kopierer bedruckt werden.

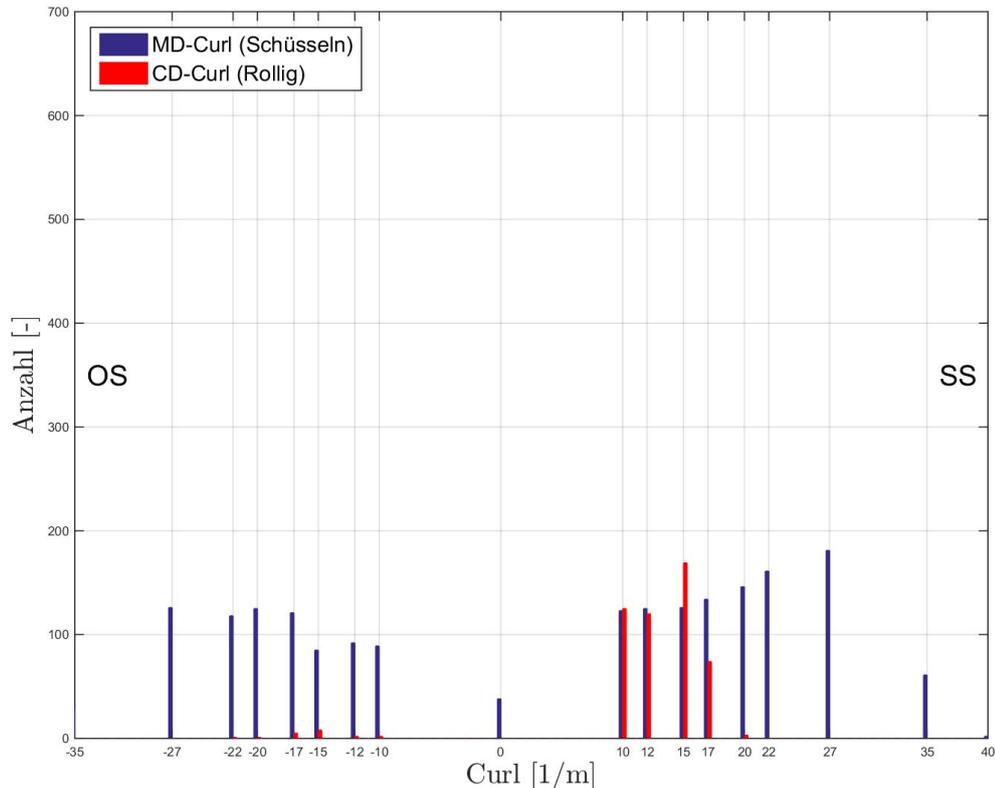
Wie im Kapitel 2.1.2 auf Seite 32 beschreiben, wird beim Kopiertest die Wölbung eines Stapels Papier dreimal gemessen. Je einmal der unbedruckte, der einseitig und der zweiseitig bedruckte Stapel. Die Wölbungswerte für die Messung der unbedruckten Proben zeigt Abbildung 30 auf Seite 49. Eine leichte Tendenz zeigt, dass sich das Papier in Richtung Siebseite wölbt.

Als nächstes wird der Papierstapel auf der Siebseite bedruckt. Wie Abbildung 31 zeigt, ist hier keine klare Tendenz der Wölbungsrichtung zu erkennen. Im Vergleich zu Abbildung 30 fällt auf, dass zum einen die große Anzahl der Curlwerte im Bereich -15 bis +17 verschwindet aber der Anteil an hohen Curlwerten steigt und zum anderen mehr CD-Curl auftritt. Der Grund könnte sein, dass die große Anzahl bei den Werten -12, -10, 10 und 12 dem in Abbildung 10 im Kapitel 1.3.5 auf Seite 21 gezeigten Mechanismus folgt und von der bedruckten (Sieb-)Seite wegwölbt. Nach diesem Schema würde das erklären, dass Papiere die vor dem Kopieren einen Wölbungsradius von -10 oder -12 1/m besaßen, danach einen Wölbungswert von -27 haben.

Dieser Logik folgend hätten die Papiere mit kleinen positiven Radien (10 und 12) nun einen Wert 0 bis -15. Optisch ergibt sich der Eindruck, dass sich die Verteilung nach links verschiebt. Die Ausnahme in dieser Überlegung bildet die Zunahme der hohen positiven Curlwerte (27 und 35 1/m).

Die zweite Auffälligkeit ist, dass durch den Kopierprozess die Anzahl an CD-Curl zunimmt, sprich sich die Achse des Curls ändert. Grund hierfür könnte laut [Ooha-

ra und Hayama et al., 2013] der Effekt des Roll-Set Curls (vgl. Kapitel 1.3.4, S. 21) sein, der durch die Biegung des Papiers beim Transport über die Walzen im Drucker hervorgerufen wird.



**Abbildung 31:** Ergebnisse Kopiertest Siebseite bedruckt. Wie oben beschrieben zeigt auch dieses Diagramm wie oft in den Jahren 2014 bis 2016, für eine gegebene Einstellung, die verschiedenen Wölbungswerte auftraten. Hier treten Wölbungen zur Oberseite öfter auf als bei den unbedruckten Proben.

Wie in Abbildung 11 auf Seite 23 zu sehen ist, erfolgt beim Kopieren eine mechanische Beanspruchung. In der Detailansicht ist sehr gut zu sehen, dass die bedruckte (Sieb-) Seite um die Walze gebogen wird. Das erklärt den CD-Curl zur Siebseite hin, die in den Ergebnissen in Abb. 31 zu sehen sind. Im Kopierprozess kommen mehrere Umrundungen des Papiers um Walzen und Rollen vor. Dafür, dass der eigentlich Kopiernip den Roll-Set Curl verursacht, könnte daran liegen, dass dieser Effekt durch Wärme verstärkt wird.

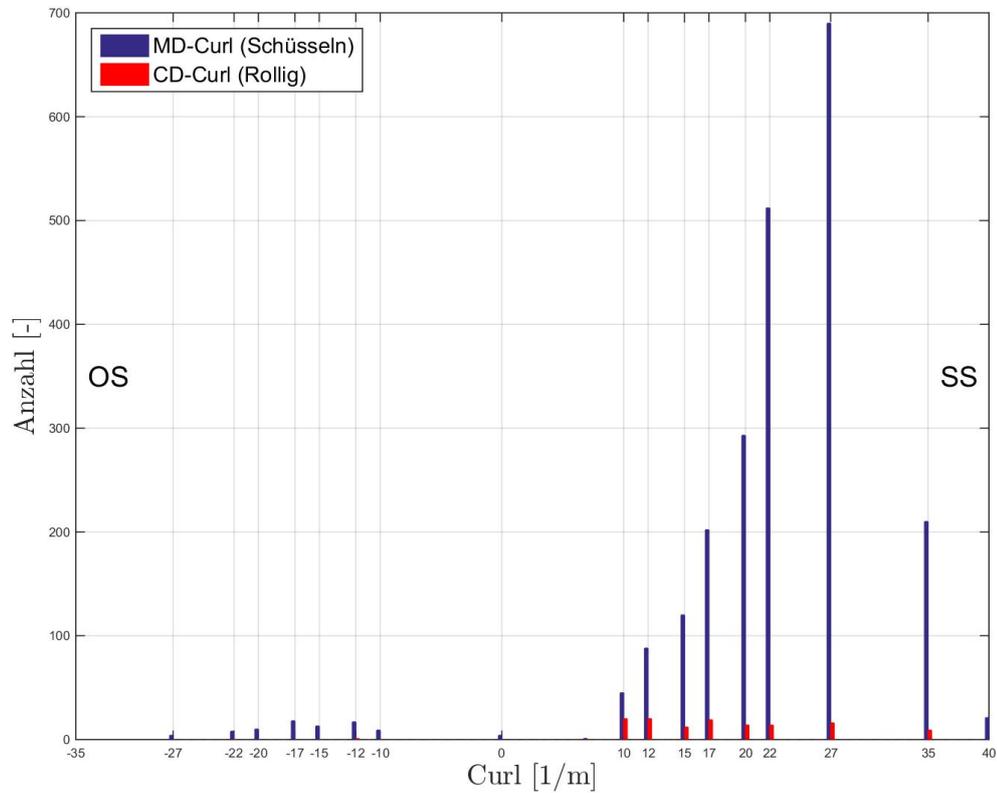
Der Hintergrund hinter dieser uneindeutigen Beobachtung zwischen den Ergebnissen *Vor kopieren* (Abb. 30) und *Siebseite kopiert* (Abb. 31) könnte in der Wechselwirkung zwischen den Mechanismen des Xerografiecurls liegen. Das viskoelastische Verhalten durch den Wärmeübergang zeigt von der bedruckten Siebseite weg, während der vermutete strukturelle Curl dazu führen würde, dass sich das Blatt zur Siebseite hinwölbt. Die Zunahme an CD-Curl könnte daran liegen, dass der Effekt des Roll-Set Curls erst dadurch sichtbar wird, dass die Effekte des Xerografiecurls gegeneinander wirken.

Nach dem Bedrucken der zweiten Seiten kommt es fast ausschließlich zum siebseitigen MD-Curl. Abbildung 10 auf Seite 21 könnte hierfür eine Erklärung abgeben. Die Wölbung beugt sich von der bedruckten Seite, in diesem Fall die Papieroberseite, weg. Das bedeutet, dass Papiere die sich vor dem Kopieren zur Siebseite wölben nun noch mehr zur Siebseite wölben. Papier mit einem geringen Oberseitencurl würden nun auch einen geringen Siebseitencurl ausbilden, während starke Oberseitenwölbung sich reduzieren würden. Dass sich die Anzahl an CD-Curls so stark verringert, könnte an der Umkehr des oben beschriebenen Roll-Set Curl-Effekts liegen oder an der Dominanz des MD-Curls.

[Uesaka, 2002] geht davon aus, dass die treibenden Mechanismen für die Wölbung von Papier beim Kopiervorgang diejenigen sind, die als struktureller Curl und viskoelastischer Curl vorgestellt wurden. Der viskoelastische Anteil sorgt in der Xerographie dafür, dass sich das Blatt von der bedruckten Seite wegwölbt. Je nachdem welche Seite bedruckt wird, kann der viskoelastische Mechanismus dem strukturellen Effekt entgegenwirken, oder ihn unterstützen. In Abbildung 32 sieht man wie die zwei Effekte, nachdem beide Seiten bedruckt wurden, zusammenwirken und die Wölbung nur mehr zur Siebseite zeigt.

Diese Untersuchung legt damit nahe, dass der strukturelle Aufbau im Papier eine Wölbung zur Siebseite hervorbringt. Dies legt weiters nahe, dass die Zweiseitig-

keit der Faserorientierungsanisotropie, wie sie von [Schuller, 2016] gefunden wurde, tatsächlich für den MD-Curl zur Siebseite beim Kopieren verantwortlich ist.



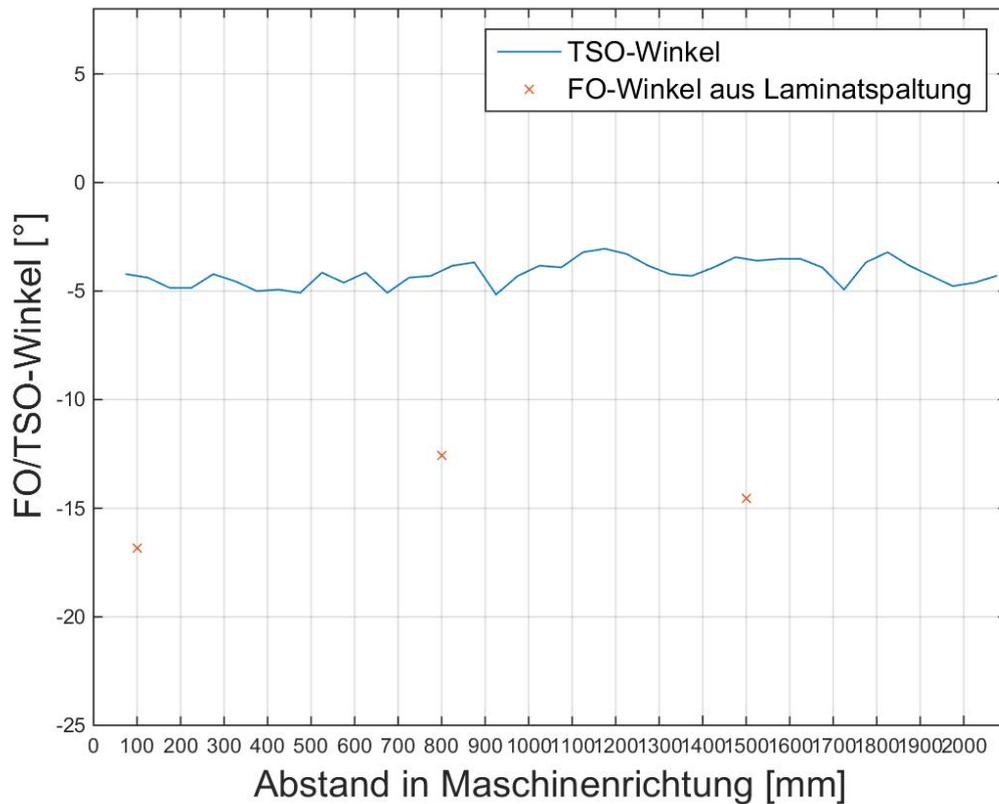
**Abbildung 32:** Ergebnisse Koptertest wenn auch die zweite Seite bedruckt wird. Die Abbildung ist gleich aufgebaut wie die Abbildungen 30 und 31. Die Anzahl der verschiedenen Wölbungsradien sind aufgetragen.

## 3.2 Faserorientierungswinkel in Maschinenrichtung

[Schuller, 2016] zeigt in seinen Versuchen, wie Anisotropiezweiseitigkeit zu Siebseitencurl führen kann. Wie bereits erwähnt wurden die Untersuchungen ohne aktivierter Brustwalzenschüttelung durchgeführt. Die Ergebnisse aus Kapitel 3.1 zeigen, unter Miteinbeziehung der Siebschüttelung, dass strukturelle Gründe für die Wölbung zur Siebseite vorliegen müssen. Welchen Einfluss die Siebschüttelung auf die Faserorientierung hat, zeigt dieses Kapitel.

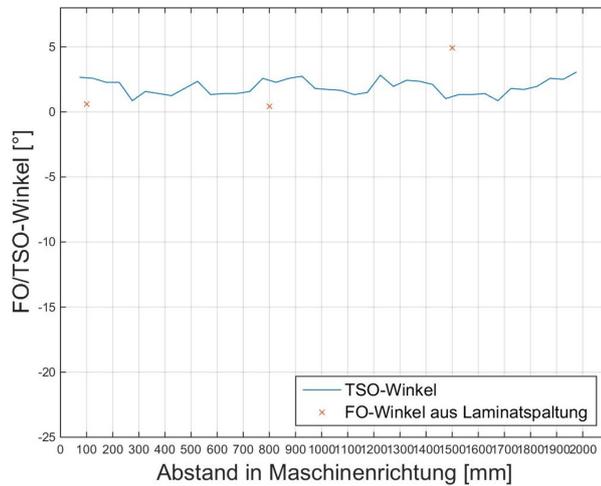
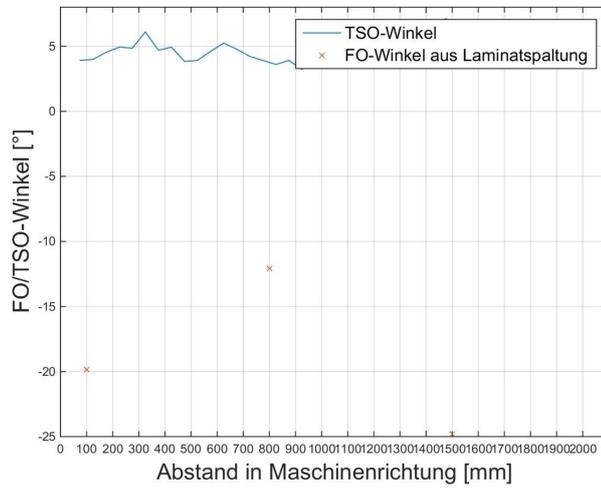
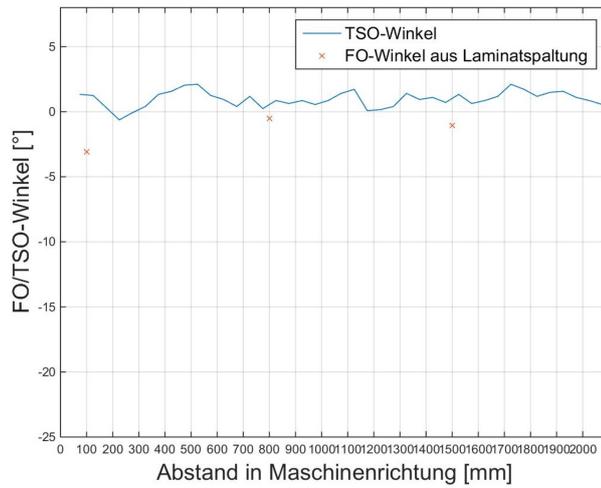
Wie in Bild 18 auf Seite 35 zu sehen ist, wurden neben den A4-großen Proben auch noch 2 Meter lange Streifen an den verschiedenen Querrichtungspositionen entnommen. Mittels TSO wurde nun der Faserorientierungswinkel entlang der Maschinenrichtung untersucht. Abbildung 33 zeigt ein Probe (Unterstau/Bahnmitte) ohne aktivierter Siebschüttelung. Es fällt auf, dass der TSO-Winkel einen Wert um den relativ konstanten Winkel  $4^\circ$  besitzt. Es gibt leichte Schwankungen, aber im Mittel ändert sich der Winkel in Maschinenrichtung nicht.

Wie im Kapitel 2.3.1 bereits erwähnt, entspricht der TSO-Winkel bei industriell gefertigten Blättern nicht dem echten Faserorientierungswinkel. Um den Faserorientierungswinkel zu bestimmen kommt die Methode der Laminatspaltung zum Einsatz. Abbildung 33 zeigt diese Unterschiede sehr gut. Die blaue Kurve zeigt die TSO-Messung. Die orangen Kreuze zeigen das Ergebnis der Laminatspaltung an den gegebenen Stellen. Für die Proben ohne aktiver Siebschüttelung wurde an den Stellen 100 mm, 800 mm und 1500 mm in Maschinenrichtung eine Probe für die Laminatspaltung entnommen. Der FO-Winkel der Laminatspaltung weicht von der TSO-Messung ab. Beide Ergebnisse ergeben für den Punkt *Bahnmitte im Unterstau* negative Werte welche in Maschinenrichtung konstant sind.



**Abbildung 33:** Faserorientierungswinkel gemessen mit TSO. Auf der Ordinate aufgetragen, ist der Faserorientierungswinkel im positiven und negativen Bereich. Die Abszisse stellt die Maschinenrichtung dar. Bei einer in Maschinenrichtung ausgeschnittenen Probe wurde immer nach 50 mm eine Messung durchgeführt. Wenn man vom Messrauschen absieht, beträgt der Winkel den Wert von  $-4^\circ$ .

Für alle Versuchspunkte wurden die Vergleiche wiederholt. Abbildung 34 zeigt von oben nach unten folgende Versuchspunkte: Bahnrand im Unterstau, Bahnmitte im Staunullpunkt und Bahnrand im Staunullpunkt. Die Ergebnisse aus den Laminatspaltungen befinden sich für die Bahnrandproben in guter Nähe der TSO-Messung, während der Vergleich für die Probe *Bahnmitte im Staunullpunkt* am schlechtesten abschneidet. Die Wert der TSO-Messung sind positiv im Bereich des Winkels  $5^\circ$  und die Winkel der Laminatspaltung sind deutlich negativ, was nicht sein sollte und so gegen einen Vergleich der Methoden spricht.



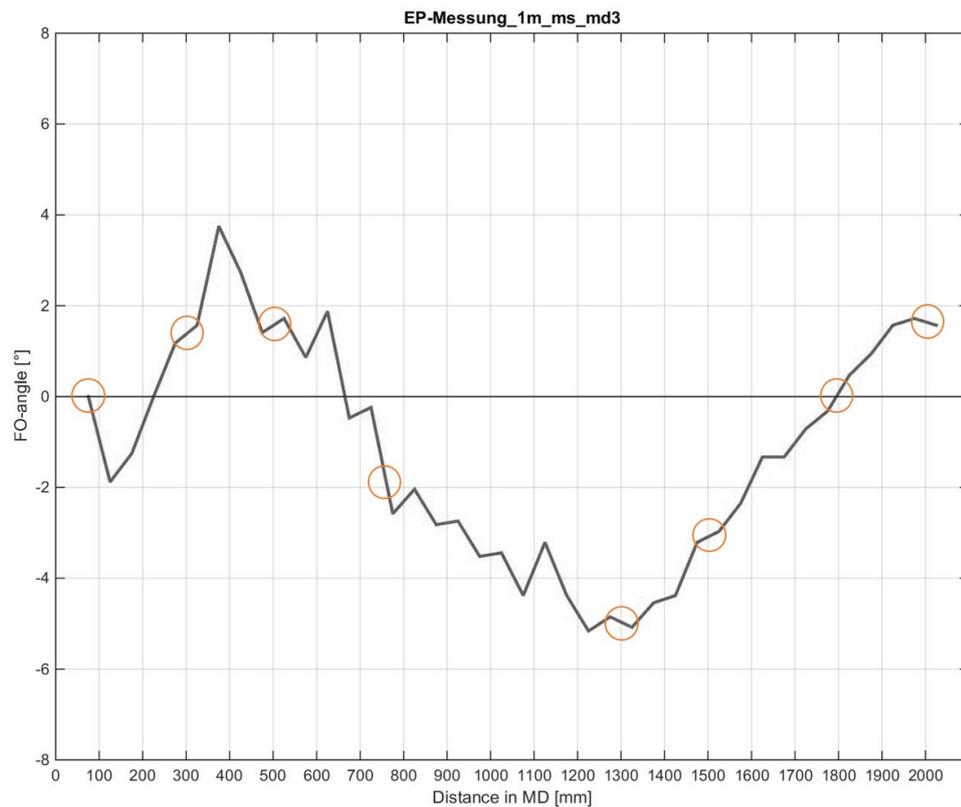
**Abbildung 34:** TSO-Winkel für verschiedene Papiermaschineneinstellungen. Oben: Bahnrand im Unterstau. Mitte: Bahnmitte bei Staunullpunkt. Unten: Bahnrand im Staunullpunkt.

Die Werte der beiden Messungen sind vergleichbar für Proben die vom Rand der Papiermaschinen entnommen wurden, auch wenn der Zusammenhang nicht linear ist. In der Mitte der Papiermaschine ist die Bahn komplett schrumpfungsbehindert, was zu internen Spannungen im Papier führt. Wie im Kapitel 2.3.1 *TSO - Faserorientierung in Maschinenrichtung* auf Seite 36 bereits erwähnt wurde beeinflussen diese Spannungen die Steifigkeit des Papiers, weshalb der Vergleich von FO-Winkel und TSO-Winkel schwieriger wird. Alle Ergebnisse zeigen konstante Werte entlang der Maschinenrichtung.

Die Messungen wurden nun für die Proben wiederholt, bei denen die Siebschüttelung aktiv war.

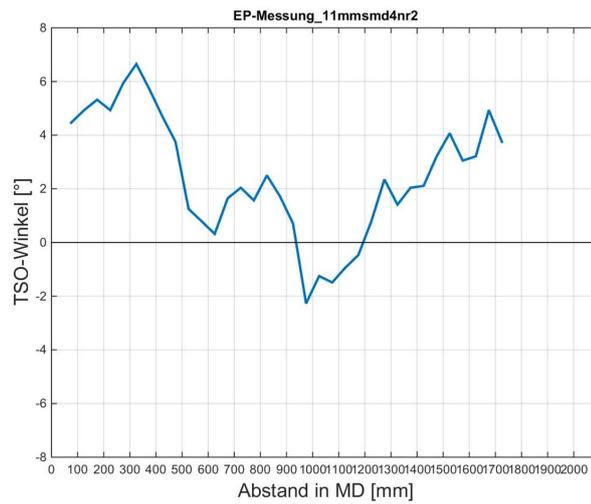
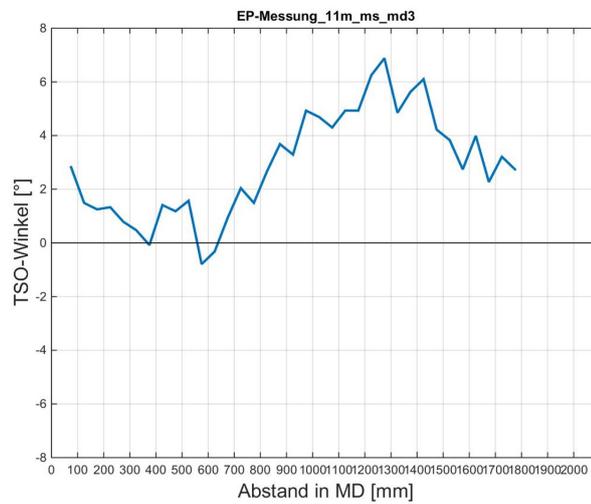
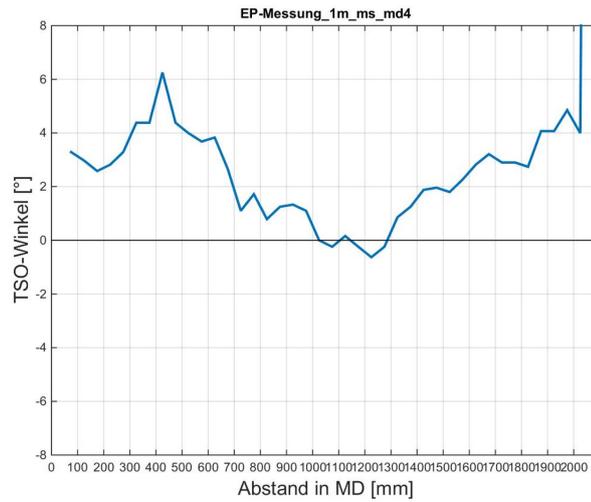
Mittels TSO-Verfahren wurde der TSO-Winkel entlang der Maschinenrichtung gemessen. Für die Probe *Bahnrand im Unterstau* zeigt Abbildung 35 das Ergebnis. Der Verlauf unterscheidet sich von den Ergebnissen ohne Siebschüttelung stark. Statt um einen Wert zu pendeln, folgt der Verlauf einer Sinuskurve und umfasst dabei Werte von  $+4^\circ$  bis  $+6^\circ$ . Die orangen Kreise repräsentieren die Entnahmestellen für die Laminatspaltung. Anders als bei den Proben ohne Siebschüttelung wurden an jeder Stelle 3 Proben nebeneinander entnommen. Für die Probe *Bahmitte im Unterstau* bedeutet das, dass an 8 Stellen in Maschinenrichtung insgesamt 24 Proben für die Laminatspaltung entnommen wurden. Die Vergleich zwischen TSO-Winkel und Laminatspaltungs-FO-Winkel zeigt keine optische Ähnlichkeit weshalb an späterer Stelle eine Regressionsanalyse beschrieben wird.

Wenn man die Sinuskurve aus Abbildung 35 betrachtet ergibt sich eine Periodendauer von 1500 mm. Diese lässt sich aus der Geschwindigkeit der Papiermaschine (600 m/min) und der Schüttelfrequenz (400 Hübe/min) berechnen.



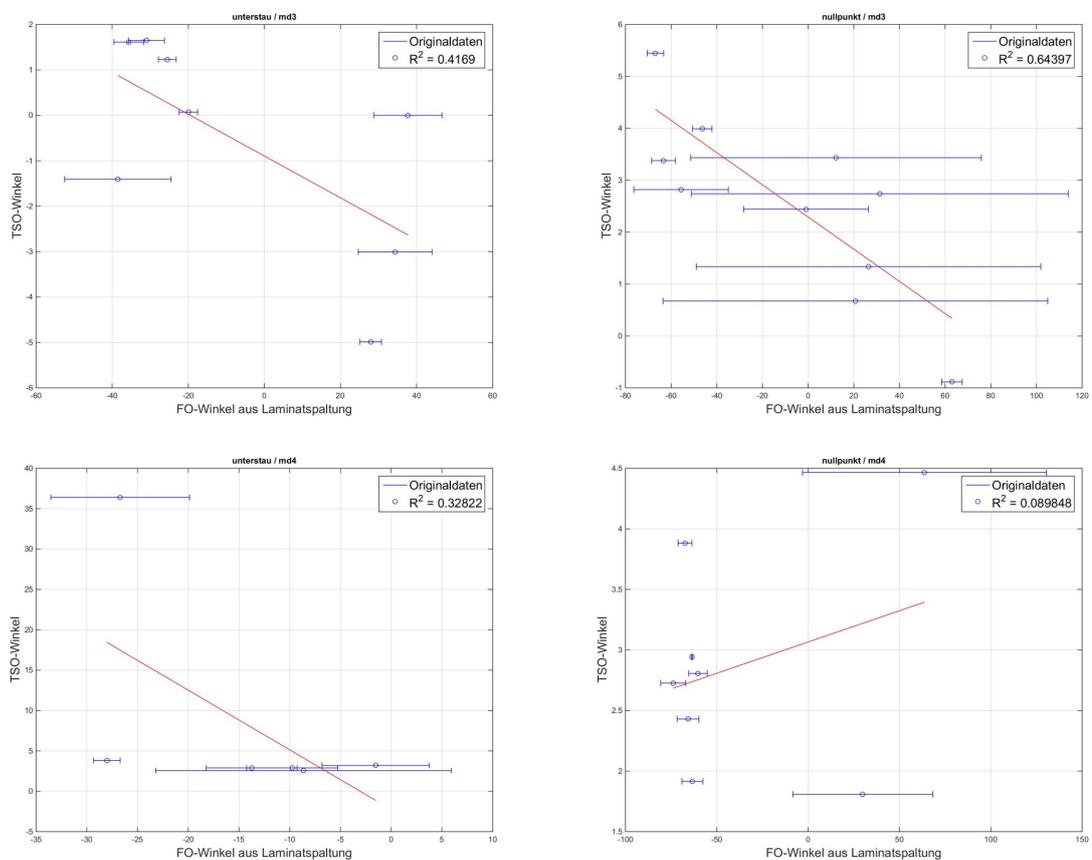
**Abbildung 35:** Die Grafik zeigt den Faserorientierungswinkel über die Maschinenrichtung. Deutlich ist hier der, in der Literatur ebenfalls beschriebene, Sinusverlauf des Winkels zu sehen. Mit orangen Kreisen eingezeichnet sind die Probenahmestellen für die Laminatspaltung.

Wie für die Proben der Versuche ohne Siebschüttelung, wurde die Messung für die Proben mit aktivierter Schüttelung für die gleichen Maschineneinstellungen wiederholt. Wie oben sind in Abbildung 36 in gleicher Reihenfolge zu sehen: Unterstau/Bahnrand, Staunullpunkt/Bahnmitte und Staunullpunkt/Bahnrand. Die Periodendauer von 1500 mm bleibt ist auch in diesen Grafiken zu sehen, wobei der Verlauf des TSO-Winkel, abseits des Sinusverlaufs, stark schwankt.



**Abbildung 36:** TSO-Winkel für verschiedene Papiermaschineneinstellungen bei aktiver Siebschüttelung. Oben: Bahnrand im Unterstau. Mitte: Bahnmitte bei Staunullpunkt. Unten: Bahnrand im Staunullpunkt.

Die Abbildungen 33 bis 36 zeigen, dass die Siebschüttelung einen Effekt auf die Faserorientierung hat. Die Siebschüttelung bringt einen Sinusverlauf in den Faserorientierungswinkel ein, was für verschiedene Maschineneinstellungen wiederholt gesehen werden konnte. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Laminatspaltung gestaltet sich hier herausfordernder. Abbildung 37 zeigt, wie die Ergebnisse der TSO-Messung über denen der Laminatspaltung aufgetragen wurde. Eine Ausgleichsgerade soll hier Auskunft über einen möglichen Zusammenhang zwischen den Messwerten geben.



**Abbildung 37:** Der TSO-Winkel aufgetragen über den FO-Winkel aus der Laminatspaltung. Die blauen Kreise geben die Messwerte an, durch die eine Regressionsgerade gezogen wurde. Das Bestimmtheitsmaß für die einzelnen Versuchspunkte ist in der Legende eingetragen.

Der Vergleich der beiden Methoden scheitert an zwei Umständen. Zum einen ist die Steigung der Gerade negativ, was bedeutet das die Vorzeichen der verglichenen Wer-

te unterschiedlich sein können. Die Unterschiede in den Messverfahren die bereits diskutiert wurden, liefern keine Erklärung für den Vorzeichenwechsel. Das zweite Problem sind die großen Konfidenzintervalle der Winkel der Laminatspaltung die einen Vergleich sehr schwer machen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass Änderungen im TSO-Winkel in der Laminatspaltung erkennbar sind, aber kein Vergleich der beiden Werte möglich ist. Die Möglichkeit die Ergebnisse der Laminatspaltung mit der TSO-Messung zu überprüfen ist somit nicht gegeben.

Die Änderung des Faserorientierungswinkels in Maschinenrichtung ist keine Erklärung für das beobachtete Curlverhalten aus dem vorherigen Kapitel. Um zu sehen ob die Siebschüttelung auch die Faserorientierung in der z-Richtung des Papiers verändert, werden die Proben mittels Laminatspaltung untersucht. Durch dieses Verfahren kann eine etwaige Zweiseitigkeit der Faserorientierung untersucht und dargestellt werden.

### 3.3 Struktureller Curl - Zweiseitigkeiten

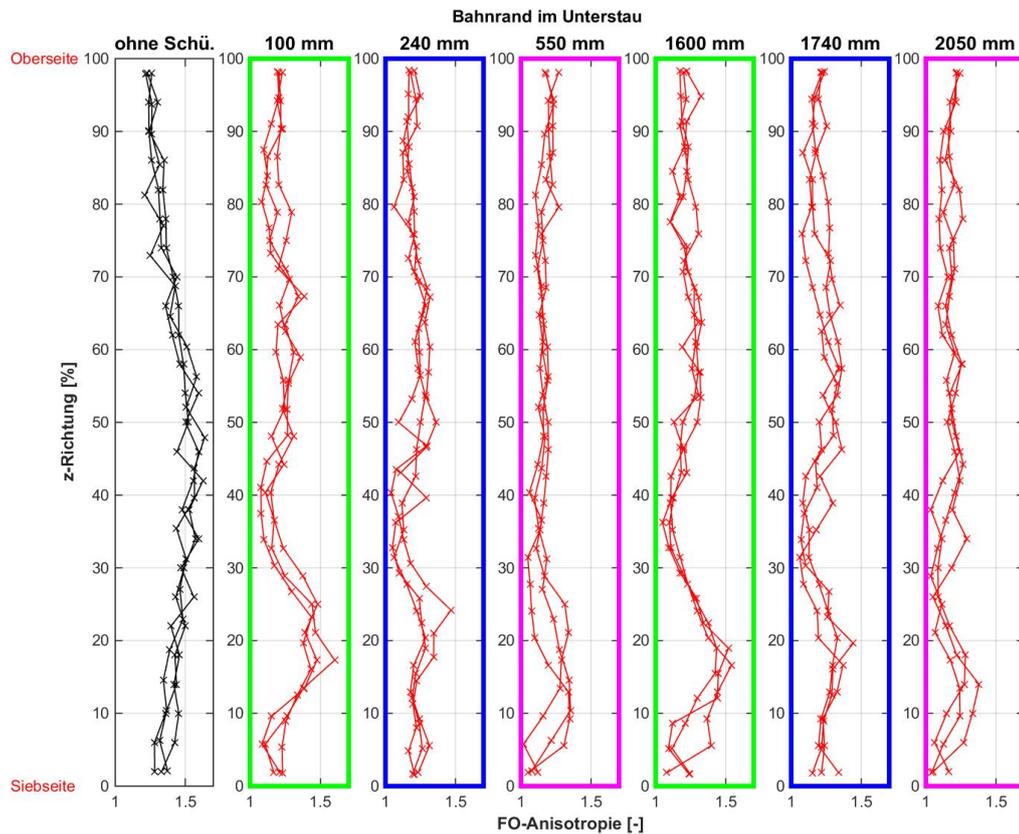
Dass Anisotropiezweiseitigkeiten zu Curl führen können, zeigt [Schuller, 2016] in seiner Arbeit. Wie bereits erwähnt, wurden diese Untersuchungen ohne Siebschüttelung durchgeführt. In Kapitel 3.2 *Faserorientierungswinkel in Maschinenrichtung* auf Seite 54 wurde ersichtlich, dass die Siebschüttelung einen Einfluss auf die Faserorientierung besitzt. Im folgenden Kapitel wird ergründet, welchen Effekt diese Siebschüttelung auf die Faserorientierung in z-Richtung besitzt. Dafür werden Proben untersucht bei denen alle Papiermaschineneinstellungen konstant sind, außer dass die Siebschüttelung aktiviert und deaktiviert wird. Die Proben werden mittels Laminatspaltung auf ihre Faserorientierung hin untersucht.

#### 3.3.1 Anisotropiezweiseitigkeit

Eine Erklärung für Siebseitencurl, dessen Wölbungsachse in Maschinenrichtung zeigt, kann die Anisotropiezweiseitigkeit sein. Vereinfacht gesagt bedeutet das, dass in einer Papierhälfte, in z-Richtung betrachtet, mehr Fasern (genau) in Maschinenrichtung zeigen als in der anderen Hälfte. Wichtig ist, dass die Hauptrichtung der Faserorientierung in beiden Hälften trotzdem gleich ist. Zeigt diese Hauptrichtung in den beiden Papierhälften in unterschiedliche Richtungen (FO-Winkelzweiseitigkeit), würde es zum Diagonalcurl kommen (vgl. Abb. 5 auf Seite 17).

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Laminatspaltung dargestellt. Die einzelnen Graphen repräsentieren z-Profile des untersuchten Kopierpapiers. Die schwarzen Kurven ganz links zeigen Profile für Proben ohne aktiver Siebschüttelung. Im Kapitel 3.2 *Faserorientierungswinkel in Maschinenrichtung* wurden die 2-Meter Streifen vorgestellt mit denen die der TSO-Winkel in Maschinenrichtung ermittelt wurde (vgl. Abb. 18, S. 35). Nach der Vermessung mittels TSO wurden aus diesen Streifen die Proben für die Laminatspaltungen entnommen. In den Abbildungen in Kapitel 3.2 sind diese Stellen mit orangen Kreisen eingezeichnet. Es wurde darauf geachtet, dass die Proben einen unterschiedlichen TSO-Winkel besitzen und dass zwei Entnahmestellen immer 1500 mm auseinander liegen. Der Abstand von 1500 mm dient zur Beobachtung, ob der Einfluss der Siebschüttelung sich nach jeder vergangen Pe-

riodendauer wiederholt. In Abbildung 38 sind zwei so zusammengehörende Proben immer mit einem gleichfarbigen Rahmen versehen. Diese sind grün, blau und pink. Über den Rahmen ist auch der Abstand in Maschinenrichtung, an denen die Proben entnommen wurden, notiert.

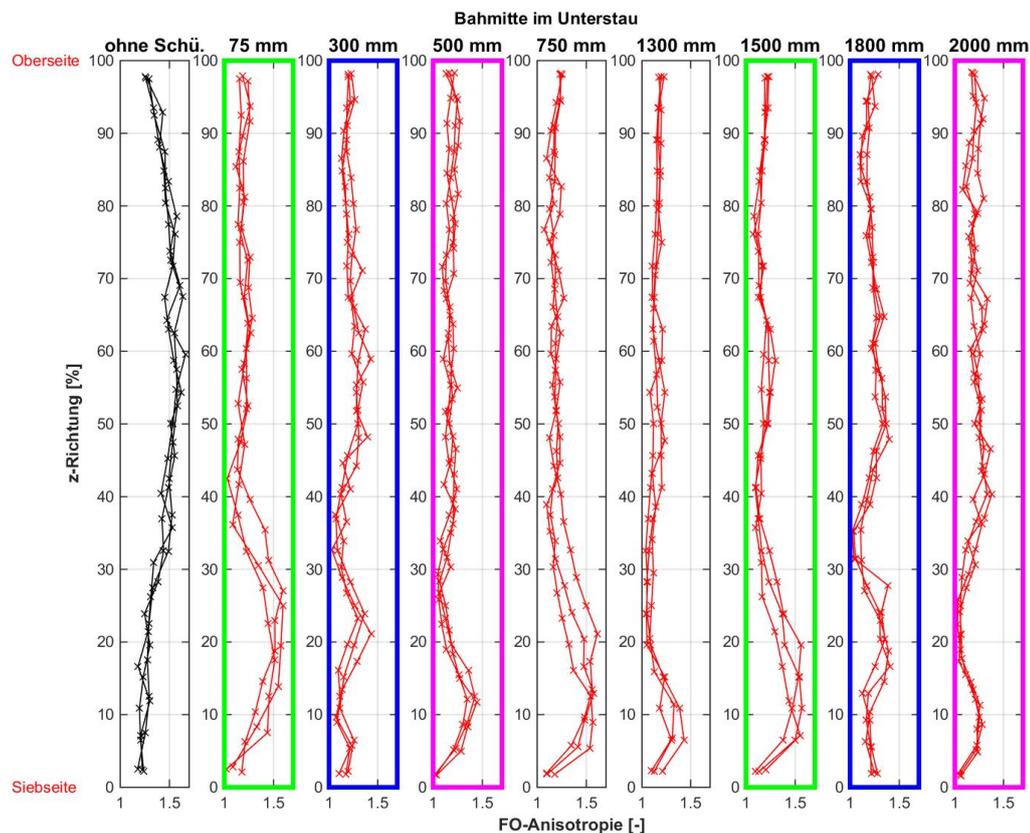


**Abbildung 38:** Ergebnisse der Blattspaltung für die Proben Bahnrand im Unterstau. Auf der Ordinate ist von unten nach oben die z-Richtung, also die Dicke des Papiers, aufgetragen. Die Abszissen zeigen die Faserorientierungsanisotropie an. Der Wert 1 bedeutet, dass gleich viele Fasern in Quer- und Maschinenrichtung liegen. Die schwarzen Graphen im linken Bild repräsentieren bei gleichen PM-Einstellungen die Proben ohne aktivierte Siebschüttelung. Die weiteren Diagramme zeigen Proben mit Schüttelung an verschiedenen Stellen in Maschinenrichtung. Der Abstand vom Anfang der Probe bis zum Vermessungspunkt ist in Millimeter oberhalb der Diagramme angegeben.

Die roten Kurven, die mit aktivierter Siebschüttelung produzierten Kopierpapier-

ren entsprechen, besitzen ein sehr ähnliches Aussehen. Der Anisotropiewert in z-Richtung ist nahe bei 1, bis auf eine kurze Ausbuchtung nahe der Siebseite. Auch wenn alle roten Verläufe sehr ähnlich aussehen, fällt auf, dass die Graphen zwischen denen 1500 mm liegen, eine noch größere Ähnlichkeit besitzen. Dieser Effekt lässt auf den Einfluss der Siebschüttelung und der Wiederholung dieses Effekts nach 1500 mm schließen.

Abbildung 39 zeigt die Untersuchung für Proben vom Bahnrand der Papiermaschine im Unterstau. Auch hier haben die Proben, welche 1500 mm in Maschinenrichtung auseinander liegen, einen Rahmen gleicher Farbe.

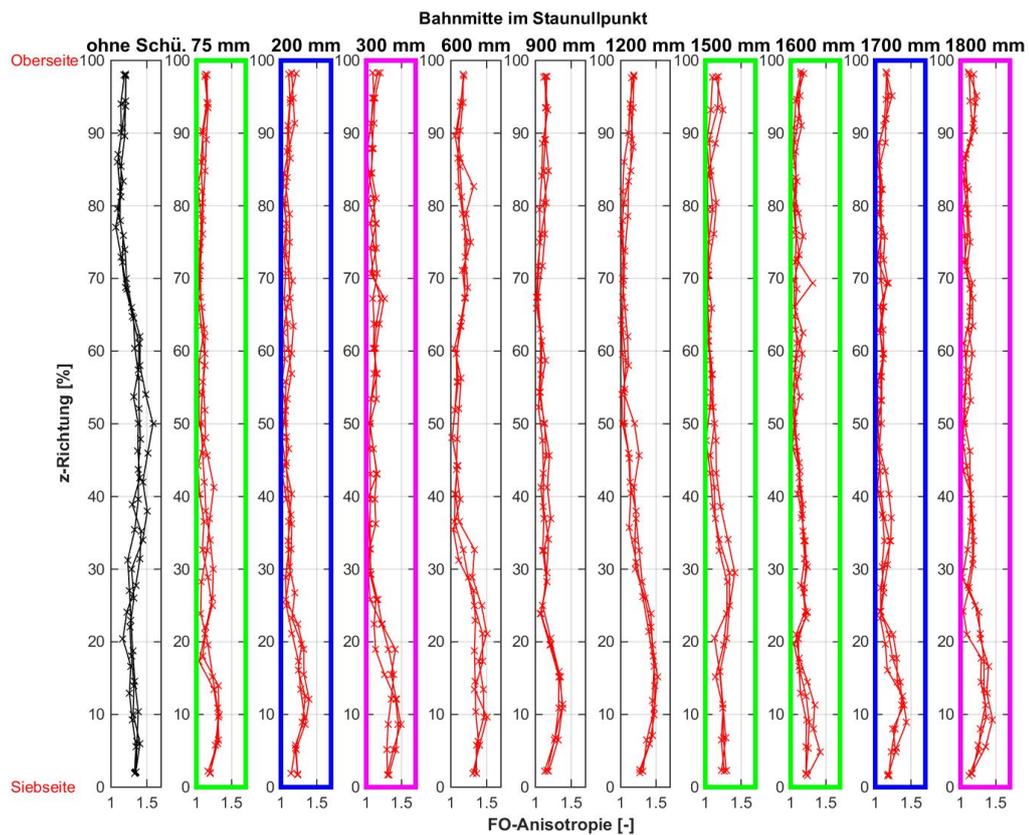


**Abbildung 39:** Anisotropie-z-Profile Bahnmitte im Unterstau.

Die optische Ähnlichkeit ist auch hier unter den gleichfarbig gerahmten Proben höher als unter allen Proben gesamt. Trotzdem haben die roten Graphen der Proben mit Siebschüttelung wieder ein sehr ähnliches Aussehen. Vergleicht man Abbildung

39 mit Abbildung 38, fällt auf, dass trotzdem die schwarzen Kurven unterschiedlich aussehen, aber die roten Kurven in beiden Abbildungen sich stark ähneln. Würde man ein Blatt mit einer solchen Anisotropiezweiseitigkeit trocknen, wie es beim Xerographiedruck vorkommt, würde die Unterseite stärker schrumpfen, was zum Siebseitencurl führt. Grund hierfür ist, dass in der unteren Hälfte mehr Fasern in Maschinenrichtung liegen welche wiederum im Querrichtung mehr schrumpfen.

Die Messungen wurden für die Proben im Staunullpunkt wiederholt, um herauszufinden ob der Stoffauflauf einen Einfluss auf die Faserorientierung in z-Richtung besitzt. Abbildung 40 zeigt die bekannten z-Profile für den Versuchspunkt *Bahnmitte im Staunullpunkt*.

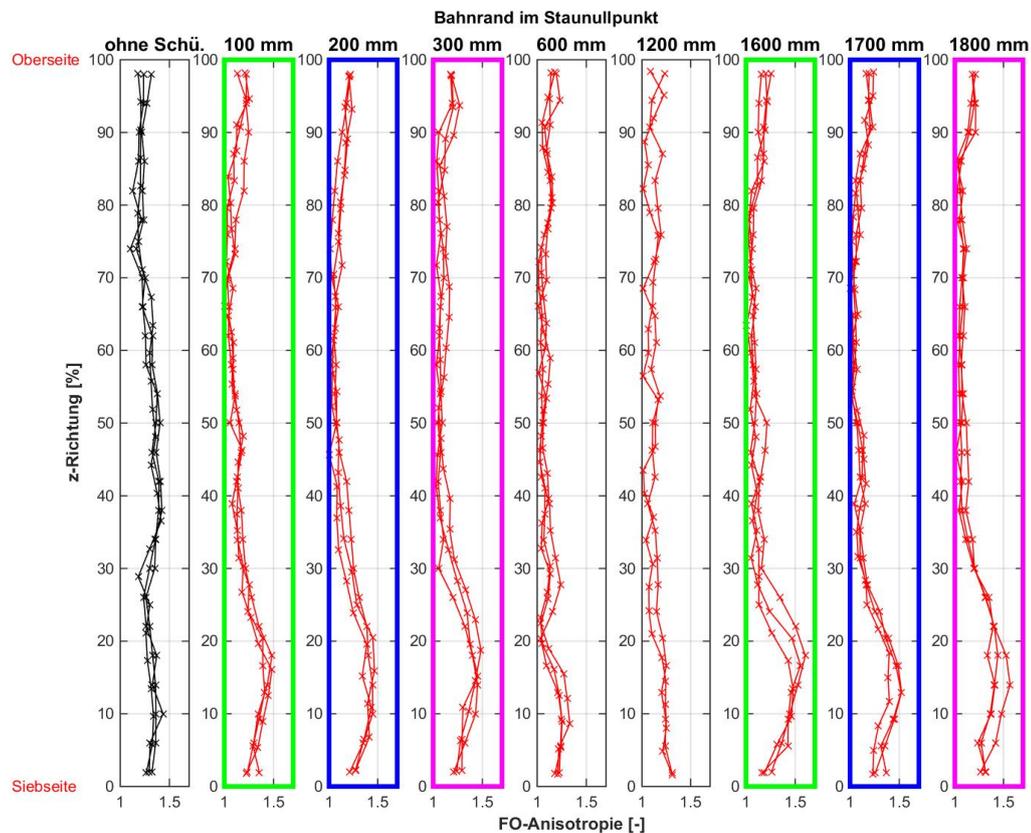


**Abbildung 40:** Anisotropie-z-Profile Bahnmitte im Staunullpunkt.

Betrachtet man erneut die schwarzen Kurven der Proben ohne Siebschüttelung unterscheiden sich diese stark zu denen aus den Abbildungen 38 und 39. In allen drei

Abbildungen (38, 39 und 40) sehen die roten Kurven sehr ähnlich aus. Es lassen sich nur geringe Unterschiede in den gleich gefärbten Graphen ausmachen.

Trotz des unterschiedlichen Aussehens der Kurven ohne Siebschüttelung bei verschiedenen Strahl-Sieb-Verhältnissen im Stoffauflauf, sehen verschiedenst Proben bei aktiver Siebschüttelung nahezu gleich aus. Der Einfluss der Siebschüttelung auf die Anisotropie ist deutlich höher als das Strahl-Sieb-Verhältnis. Die Messung wurde im Staunullpunkt auch noch für den Bahnrand durchgeführt, wie Abbildung 41 zeigt.



**Abbildung 41:** Anisotropie-z-Profile Bahnrand im Staunullpunkt.

Wie zuvor, ist das Ergebnis gleich. Bei aktiver Siebschüttelung nehmen die z-Profile die bekannte Form an.

### 3.3.2 Faserorientierungswinkel

Die Unterschiede in den Anisotropie-z-Profilen in Maschinenrichtung ist minimal. Die Ergebnisse der TSO-Messungen aus Kapitel 3.2 zeigen, dass sich der TSO-Winkel, respektive der FO-Winkel, entlang der Maschinenrichtung durch die Siebschüttelung ändert. Da die Anisotropie keine Unterschiede in Maschinenrichtung zeigt, soll die Betrachtung des Faserorientierungswinkels Aufschluss über einen periodischen Effekt der Siebschüttelung bringen. Abbildung 42 zeigt FO-Winkel-z-Profile des Versuchspunktes *Bahnmitte im Unterstau*.

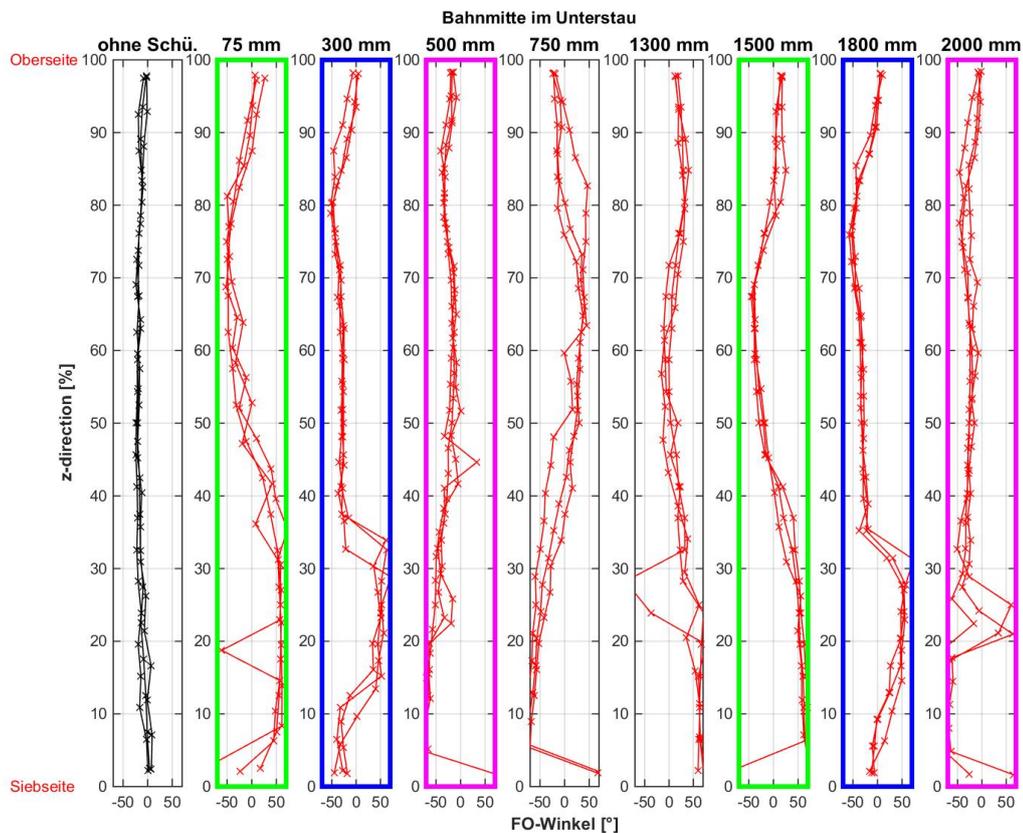
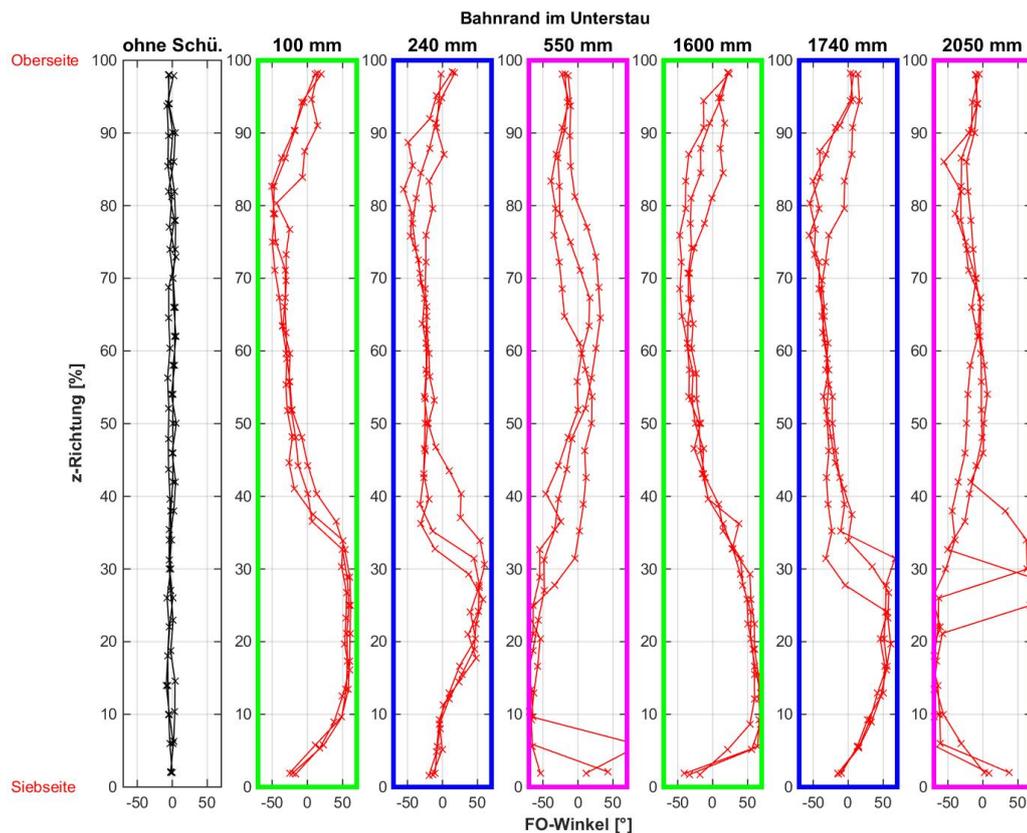


Abbildung 42: FO-Winkel Spaltung Unterstau Bahnmitte

Wie in den Kurven der Anisotropieprofile repräsentieren die schwarzen Kurven die Proben ohne Siebschüttelung. Die grünen, blauen und pinken Rahmen zeigen an, dass zwei Proben die bekannte Periodendauer von 1500 mm voneinander entfernt sind. Die schwarzen Kurven der Proben ohne Siebschüttelung besitzen über die gesamte z-Richtung einen Wert für den FO-Winkel. Bei aktiver Siebschüttelung bilden

die z-Profile des Winkels annähernd einen Sinusverlauf. Bemerkenswert ist, dass sich die roten Profile deutlicher voneinander unterscheiden als die Anisotropieprofile. Betrachtet man die Kurven bei 75 mm und bei 1500 mm (grün) fällt eine optische Ähnlichkeit auf. Das Gleiche gilt für die Kurven bei 300 mm verglichen mit 1800 mm (blau). Die Graphen bei 75 mm (grün) und 300 mm (blau) weisen in ihrem Aussehen Unterschiede auf. Die Proben bei 750 mm und 1300 mm unterscheiden sich am deutlichsten von den restlichen Kurven. Im Vergleich zu den Anisotropieprofilen, die alle sehr ähnlich aussahen, zeigt dies, dass ein unterschiedliches Aussehen möglich ist.

Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse für den *Bahnrand im Unterstau* der wieder dem gewohnten Schema folgt.

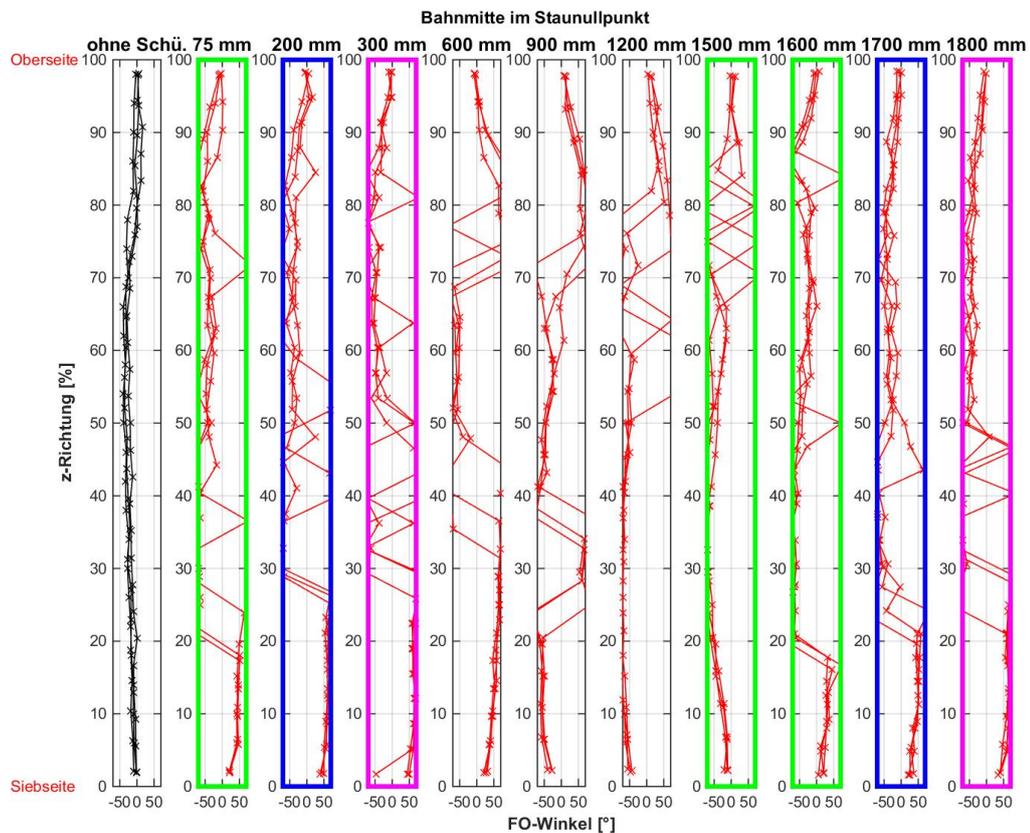


**Abbildung 43:** FO-Winkel Spaltung Unterstau Bahnrand

Auffallend sind hier die Proben bei 100 mm und 1600 mm (grün). Der Bereich 40%

- 100 % in z-Richtung sieht nahezu ident aus. Die pink-umrahmten Proben unterschieden sich von den restlichen am deutlichsten und haben einen angenähert gespiegelten Verlauf im Vergleich zu den restlichen Kurven.

Die Kurven der Proben im Staunullpunkt sind schwieriger zu analysieren. Wie bereits im Kapitel 1.4.2 Stoffauflauf beschrieben wurde, bewegen sich der Stoffstrahl und das Langsieb der Papiermaschine gleich schnell. Diese Einstellung führt zu einer regellosen Ablage der Fasern am Sieb ohne einer bestimmten Ausrichtung. Betrachtet man Abbildung 44 fällt auf, dass die roten Kurven ungleichmäßiger sind.

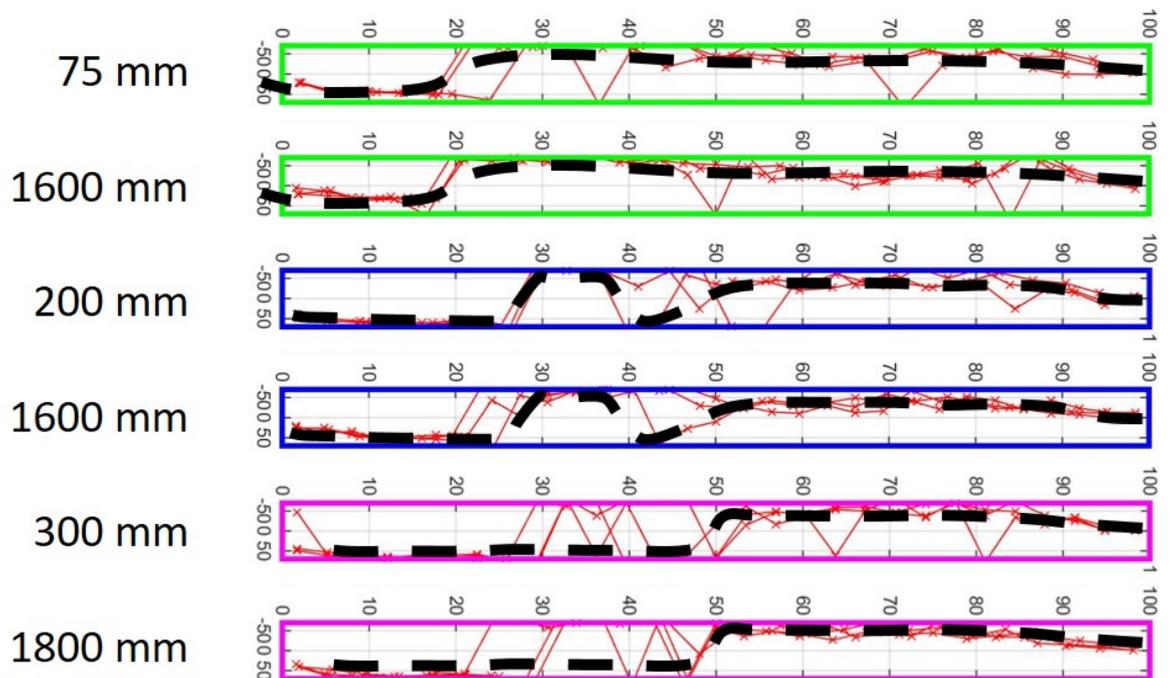


**Abbildung 44:** FO-Winkel Spaltung Nullpunkt Bahnmitte

Die Abszissen umfassen einen großen Bereich der Faserorientierungswinkel von  $+70^\circ$  bis  $-70^\circ$ . Im Bereich wo die Fasern annähernd oder ganz in Querrichtung ausgerichtet sind ist die die Unterscheidung zwischen einem großen positiven Winkel und einem großen negativen Winkel nicht immer eindeutig. Der Extremfall wäre

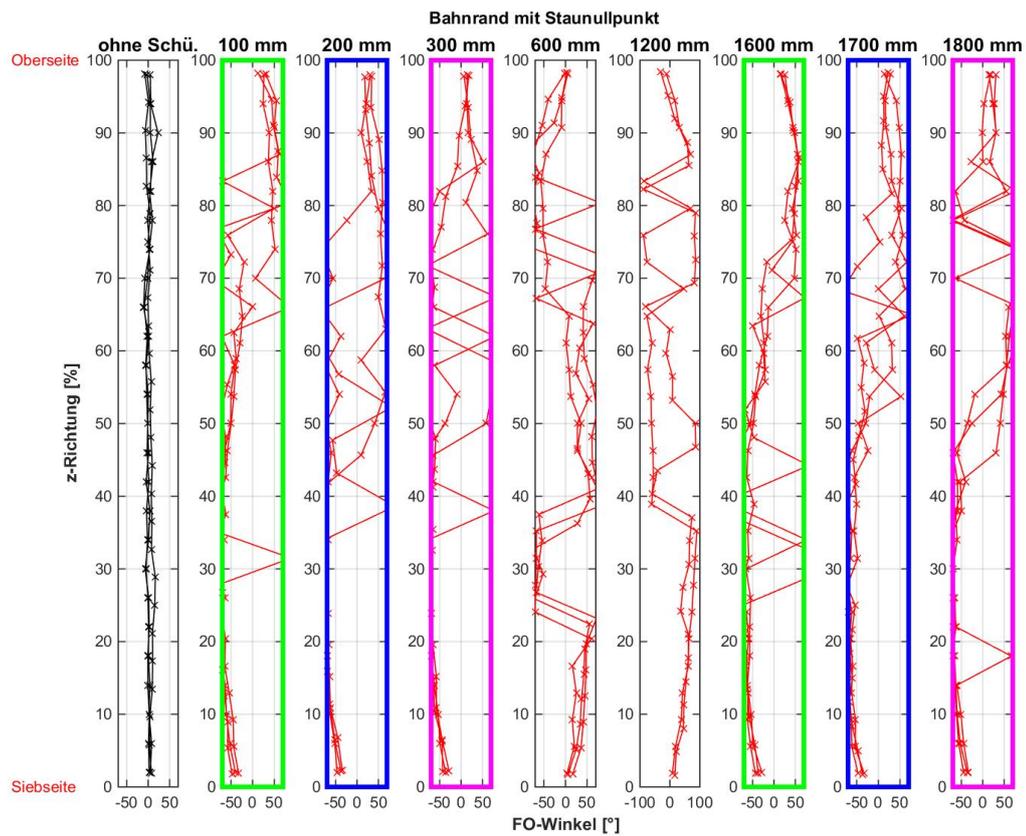
eine Ausrichtung direkt in Querrichtung. Ob in diesem Fall der Faserorientierungswinkel  $+90^\circ$  oder  $-90^\circ$  beträgt ist nicht mehr beantwortbar. Das erklärt warum die Kurven einzelne Ausreißer besitzen und ungleichmäßig aussehen.

Um Ähnlichkeiten zwischen den Kurven auszumachen, werden Hilfslinien eingezeichnet, die echten Verläufe repräsentieren. Abbildung 45 zeigt diesen Vorgang für die Kurven aus 44.



**Abbildung 45:** FO-Winkelprofile für Bahnmitte im Staunullpunkt mit eingezeichneten Hilfslinien.

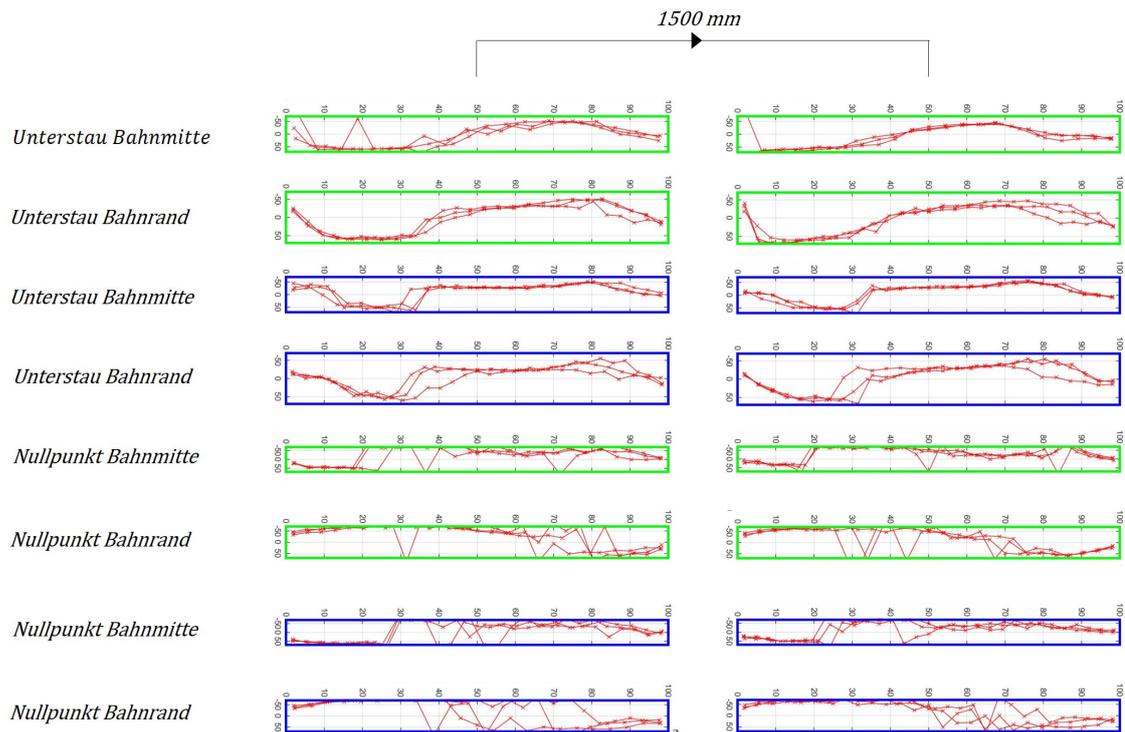
Die erwähnten Überlegungen ergeben sich auch für die Proben *Bahnrand im Staunullpunkt* und sind in Abbildung 46 gezeigt. Die Ungleichmäßigkeit der Verläufe ist auch hier zu sehen.



**Abbildung 46: FO-Winkel Spaltung Nullpunkt Bahnrand**

Die Faserorientierungswinkelprofile geben Erkenntnis über die Wiederholbarkeit des Effekts der Siebschüttelung alle 1500 mm. Die Profilverläufe weisen nach diesem Abstand eine Ähnlichkeit in ihrem Aussehen auf und unterscheiden sich trotzdem von den restlichen Kurven.

Um den Effekt der Siebschüttelung und seine Wiederholung nach 1500 mm zu zeigen, sind in Abbildung 47 exemplarische Kurven aus den einzelnen Versuchspunkten noch einmal zusammengefasst.



**Abbildung 47:** Proben bei unterschiedlichen Maschinenparametern jeweils 1500 mm voneinander entfernt an einer Position in Querrichtung.

Betrachtet man die Kurven aus Abbildung 47 fällt auch hier eine Zweiseitigkeit auf. Wie bereits erwähnt wurde, hat eine solche FO-Winkelzweiseitigkeit einen Diagonalcurl als Folge. Dieser zeigte sich in den Wölbungsmessungen nicht. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Anisotropiezweiseitigkeiten eine dominantere Rolle einnehmen und somit auch nur ein Siebseitencurl gemessen wurde.

Die Siebschüttelung hat einen Einfluss auf die Faserorientierung. Dieser konnte einmal als Effekt in Maschinenrichtung und einmal als Effekt in z-Richtung dargestellt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen in z-Richtung können der beobachteten Curlart zugewiesen werden.

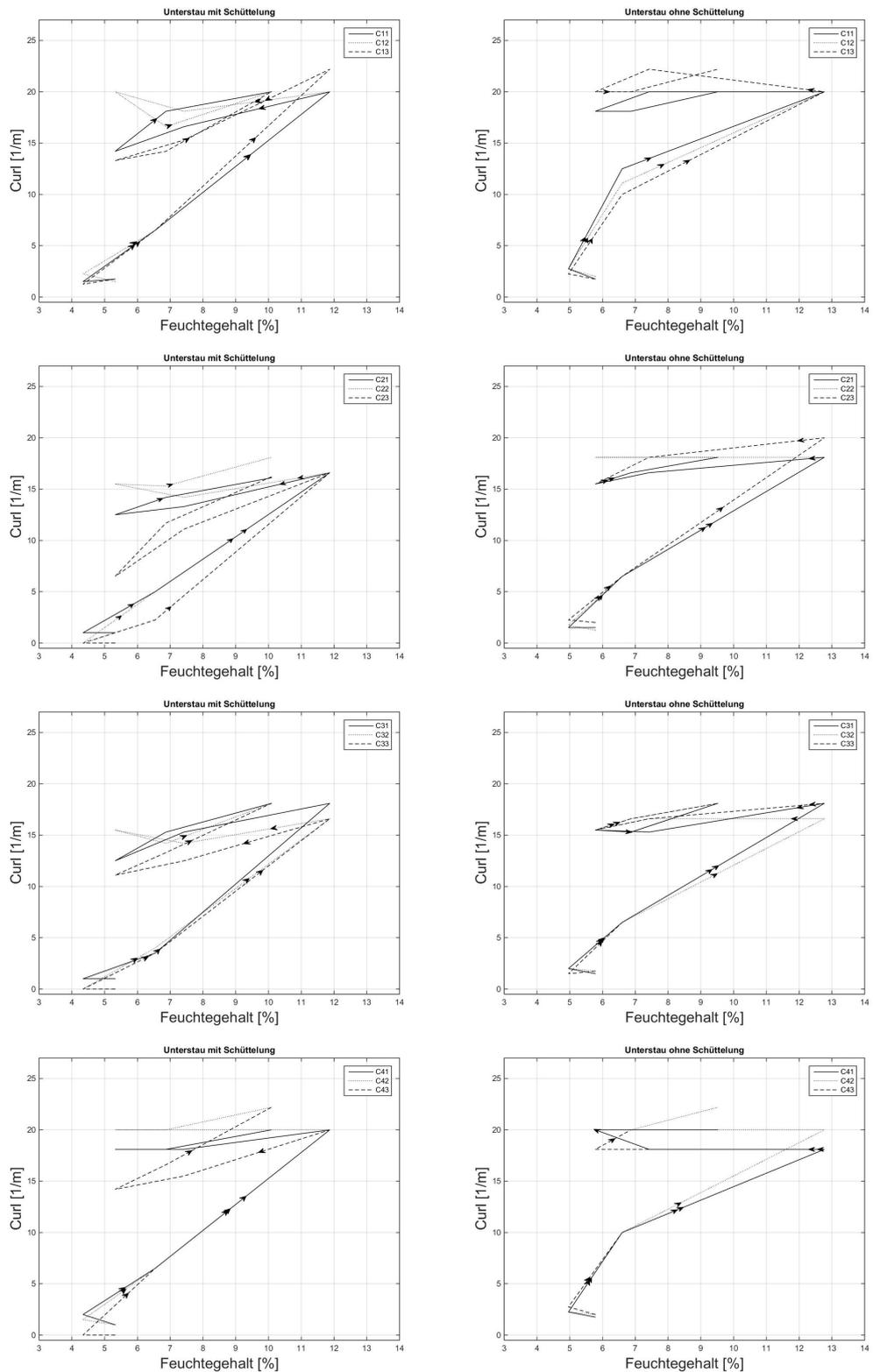
### 3.4 Irreversibler Curl

Im Kapitel 1.3.3 *Irreversibler Curl* wurde das Auftreten irreversibler Curlphänomene, als latenter Anteil struktureller Mechanismen vorgestellt. Die Untersuchungen von Kopierpapier in z-Richtung zeigte Faserorientierungszweiseitigkeiten, die durch die Siebschüttelung generiert werden. Diese Zweiseitigkeiten können bei verformungsbehinderter Trocknung zu Trocknungsspannungen führen. Bei Kontakt mit Wasser (Druckverfahren) oder hoher Luftfeuchtigkeit (Transport) werden diese Spannungen gelöst und es kommt zur bleibenden Verformung des Papiers.

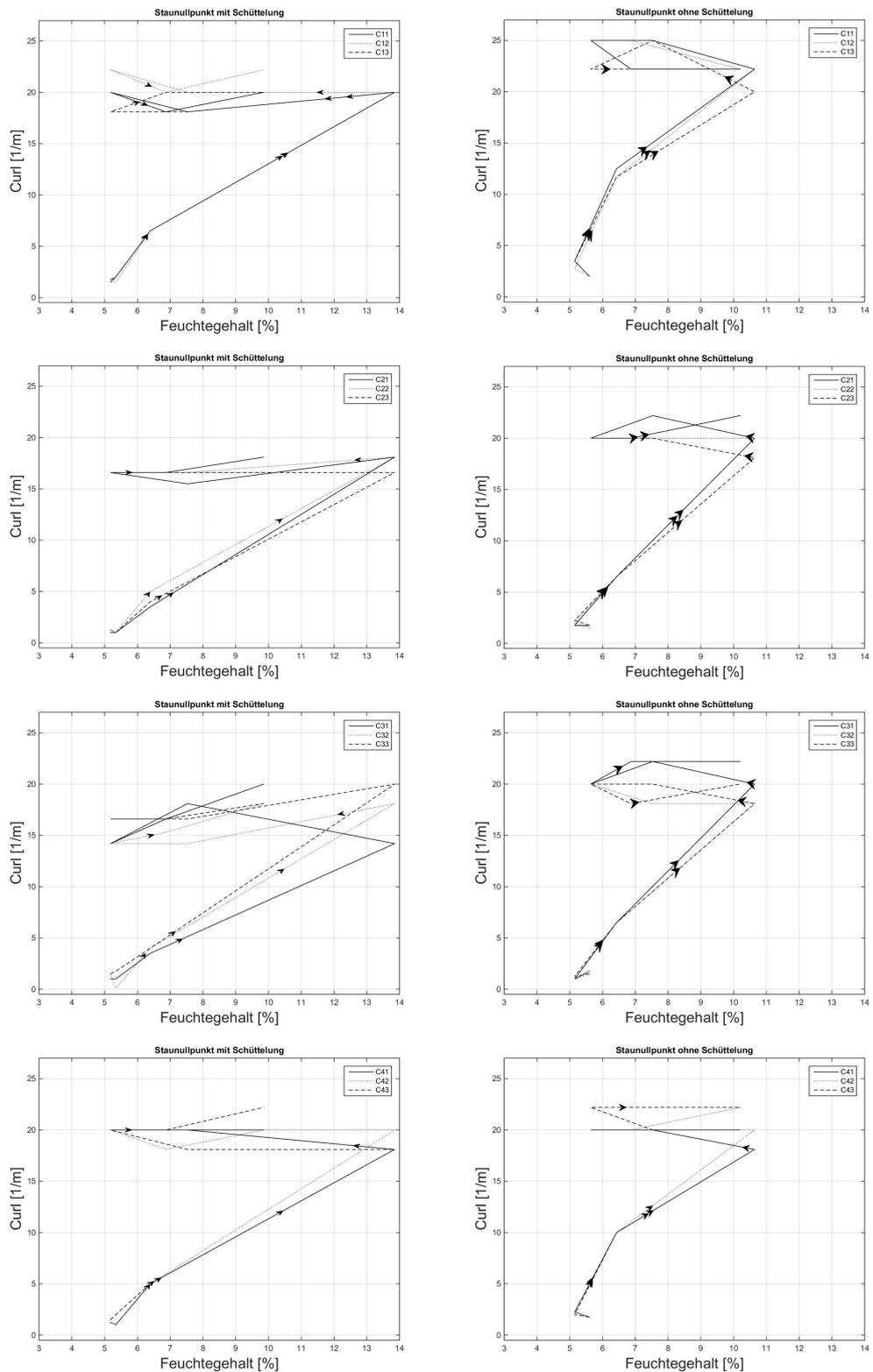
Zur Darstellung des irreversiblen Curls werden die Methoden aus Kapitel 2.4 *Messmethoden - Irreversibler Curl* verwendet. Dabei werden die Proben aus den Probenpunkten (vgl. Abb. 17, S. 17) Klimazyklen ausgesetzt.

Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse für die A4-Proben die im Unterstau produziert wurden. Die Diagramme sind immer gleich aufgebaut. Die Ordinate zeigt den gemessenen MD-Curl und auf der Abszisse ist der Feuchtigkeitsgehalt der Proben aufgetragen. Links sind die Proben ohne Siebschüttelung für alle vier vermessenen Positionen in Querrichtung zu sehen. Die Proben an den gleichen Positionen aber mit aktiver Siebschüttelung sind rechts abgebildet. Die drei Kurven die in jedem Diagramm zu sehen sind, stehen für drei verschiedenen A4-Blätter die vermessen wurden.

Die Diagramme in Abbildung 48 zeigen, dass an allen Positionen und bei aktivierter und deaktivierter Siebschüttelung irreversible Wölbung auftreten. Der Feuchtigkeitsgehalt von 12% beschreibt die Umgebung mit der höchsten relativen Luftfeuchtigkeit (90%). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Trockenspannungen an diesem Punkt vollkommen gelöst sind. Wenn die Probe danach wieder getrocknet wird ändert sich der Curl nur mehr gering. Vergleichbar ist dieser Punkt in den Diagrammen mit dem endgültigen Curlwert eines Papiers, welches mit einem wasserbasierten Druckverfahren (Offset, Inkjet) bedruckt und danach getrocknet wurde. Dieser Curlwert ist bei den Proben mit Schüttelung etwas niedriger. Dieser Zustand ist auch in den Ergebnissen für den Staunullpunkt zu sehen (Abb. 49).



**Abbildung 48:** Ergebnisse der MD-Curl-Klimaversuche in Hausmening für DIN-A4-Proben welche im Unterstau produziert wurden, an verschiedenen MD-Positionen. Links sind die Proben mit Siebschüttelung, recht diejenigen ohne dargestellt.

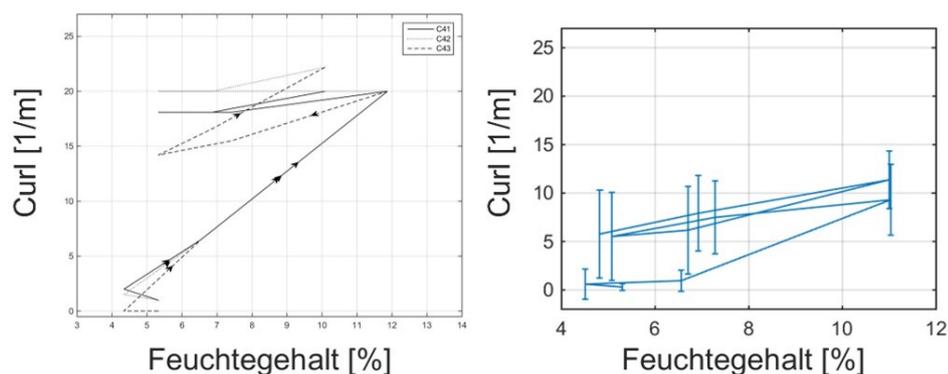


**Abbildung 49:** Klimazyklen für die Proben im Staunullpunkt mit (rechts) und ohne Siebschüttelung (links). Gemessen wurde der MD-Curl von DIN A4 Proben in Hausmening

### 3.4.1 Vergleich Messmethoden

Im Kapitel 2.4 *Messmethoden - Irreversibler Curl* wurde bereits auf die Möglichkeit eingegangen, dass die Probengröße einen Einfluss auf das Ergebnis haben könnte. Die Messung wurde daher in einem anderen Klimaschrank mit einer anderen Probengröße wiederholt. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Abbildung 50 dargestellt. Links sieht man das bekannte Diagramm der A4-Proben aus dem vorherigen Kapitel. Rechts ist nun das Ergebnis für den gleichen Versuch mit einer Papierprobengröße von 6 mm x 60 mm zu sehen. Der Probenumfang belief sich auf 10 Proben pro Messung. Die großen Konfidenzintervalle ergeben sich daraus, dass die Proben aus verschiedenen Blättern geschnitten wurden. Wie diese Arbeit bisher gezeigt hat, bedeutet das für Proben mit aktivierter Siebschüttelung, eine hohe Inhomogenität. Bei der Beobachtung von Effekten der Siebschüttelung ist diese Inhomogenität nicht vermeidbar.

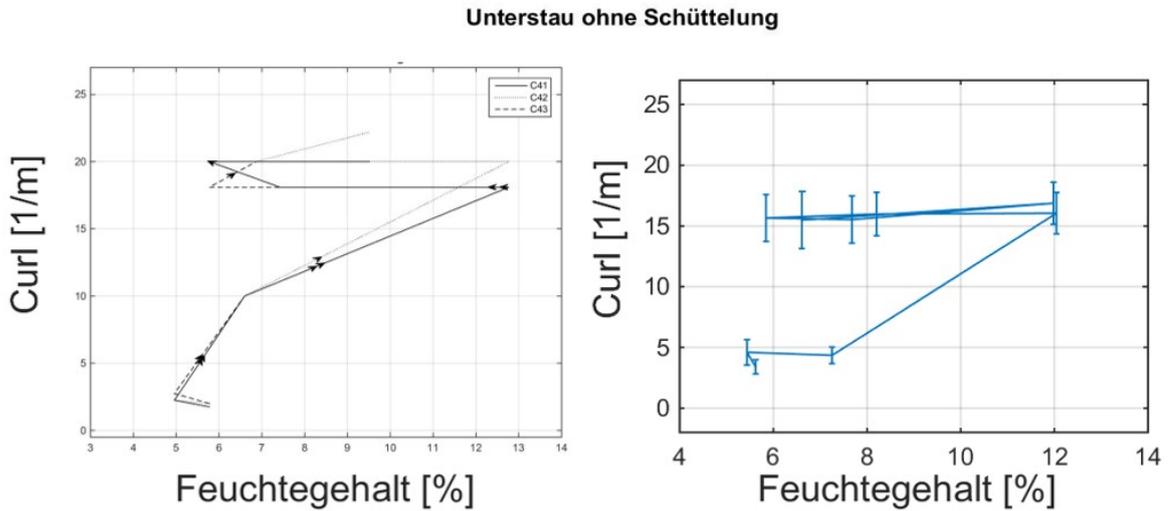
Die Ergebnisse der Untersuchung mit den 6 mm x 60 mm Proben unterscheiden sich von den bisherigen Ergebnissen. Das Vorhandensein von irreversiblen Curl kann trotzdem bestätigt werden wie Abbildung 50 zeigt. Das Ausmaß des irreversiblen Curls fällt in diesen Diagramme niedriger aus.



**Abbildung 50:** Klimazyklus Unterstau mit Siebschüttelung Bahnrand

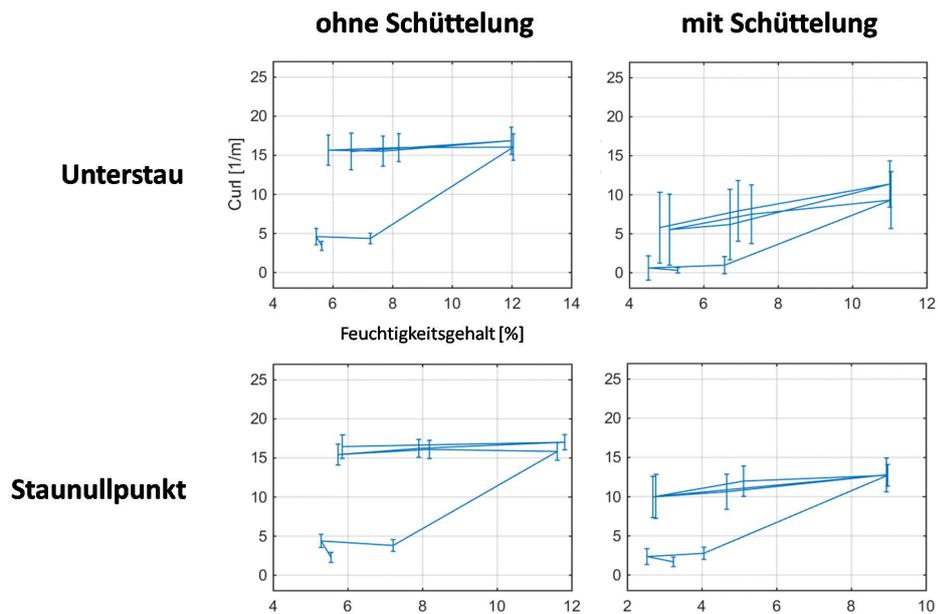
Irreversible Verformung tritt auch bei Proben auf, bei denen die Siebschüttelung deaktiviert war (Abb. 51). Die untersuchten, latenten Anteile, struktureller Zwei-seitigkeiten müssen also nicht der ausschlaggebende Grund für den irreversiblen

Curl sein. Eine unterschiedliche Trocknung der beiden Papierseiten (Bias) kann hier einen Einfluss haben und/oder die Effekte der Zweiseitigkeit verstärken bzw. abschwächen.



**Abbildung 51:** Klimazyklus Unterstau ohne Siebschüttelung Bahnmitte

Die Ergebnisse für die Proben im Staunullpunkt geben ein ähnliches Bild. Die zusammengefassten Proben der Klimamessungen mit den 6 mm x 60 mm Proben sind in Abbildung 52 erfasst.



**Abbildung 52:** Zusammenfassung der Klimaversuche für die 6 mm x 60 mm Proben.

Nebeneinandergestellt ergibt sich der Eindruck, dass die Proben mit aktivierter Siebschüttelung einen geringeren irreversiblen Curl aufweisen. Greift man das Beispiel von vorhin, mit dem wasserbasierten Druck und anschließender Trocknung, noch einmal auf, würde sich für die Proben mit Siebschüttelung nach dem Druckprozess eine geringere Wölbung einstellen.

### **Unterschiede Messverfahren**

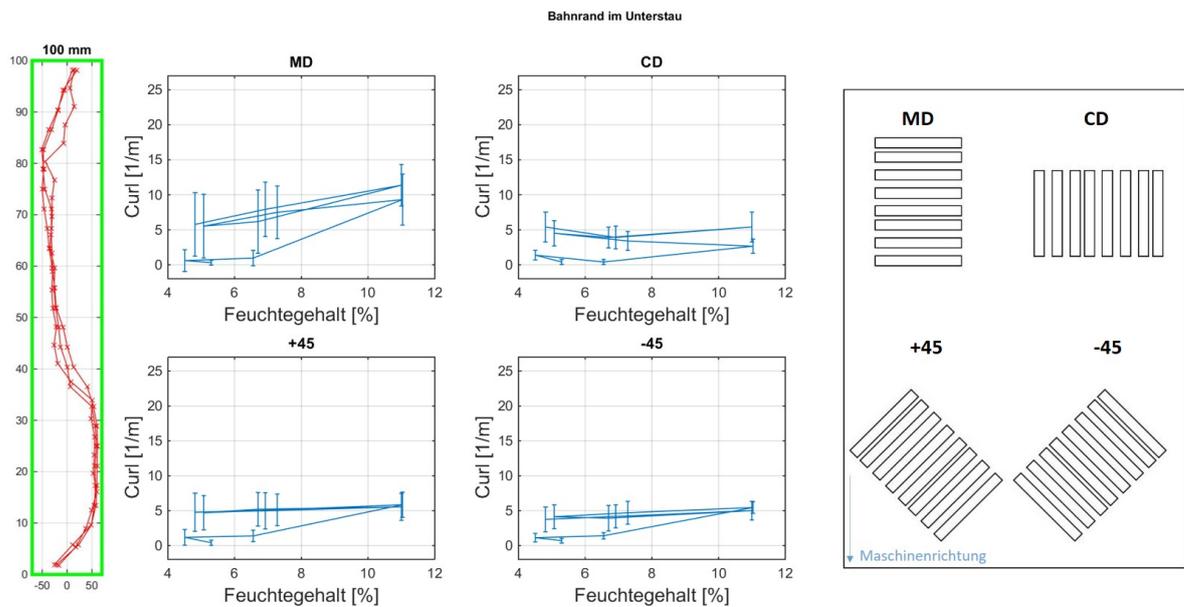
Die beiden Verfahren die für die Messung des irreversiblen Curls zur Verfügung standen, weisen einige Unterschiede auf. Alle wesentlichen Unterschiede, abseits der Probengröße, sind untenstehend aufgelistet.

- Während der Messung der Wölbung bleiben die Proben in der Klimabox bei der eingestellten Luftfeuchtigkeit.
- Beim Klimaschrank wird während der Wölbungsmessung die Probe aus der eingestellten Luftfeuchtigkeit herausgeholt und vermessen.
- Während der Messung ist die Probe dem Klima des Laborraums im dem der Klimaschrank steht ausgesetzt. Dieses Klima ist nicht einstellbar.

Es konnten keine Unterschiede in den Messergebnissen festgestellt werden, die den aufgelisteten Umständen zuzuordnen wären. Die Unterschiede sollten aber trotzdem erwähnt sein.

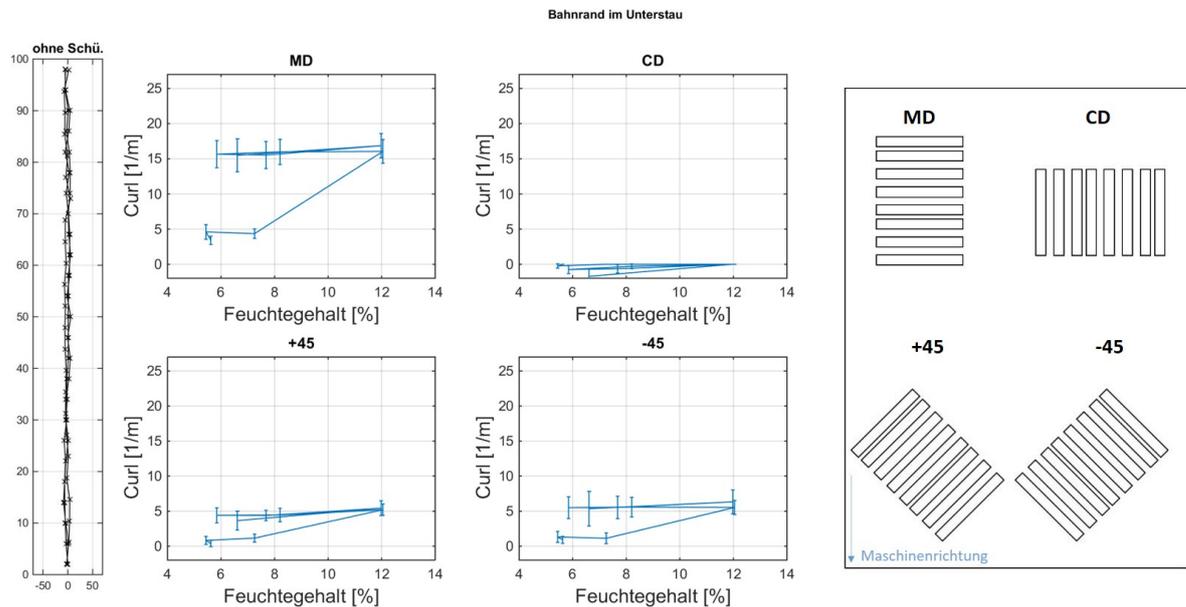
### 3.4.2 Diagonalcurl

Wie bereits erwähnt wurde, sind die Ergebnisse aus den FO-Winkelprofile ein Indiz für einen möglichen Diagonalcurl. Da dieser in den bisherigen Messungen nicht entdeckt wurde, sollen die Klimaversuche hier neue Erkenntnisse bringen. Diese Messungen geschahen im Rahmen der Klimaversuche. Einziger Unterschied war, dass die Proben in verschiedenen Richtungen ausgeschnitten wurden. Abbildung 53 verdeutlicht diese Vorgänge. Rechts sieht man schematisch ein DIN A4-Probenblatt aus den Versuchen. In diesem Blatt ist links oben (MD) gezeigt, wie die Proben für die bisherigen Untersuchungen ausgeschnitten wurden. Während die mit CD markierten Stellen einen möglichen CD-Curl ersichtlich machen sollen, sind die Ausschnitte mir  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  für etwaige Diagonalwölbungen gedacht.



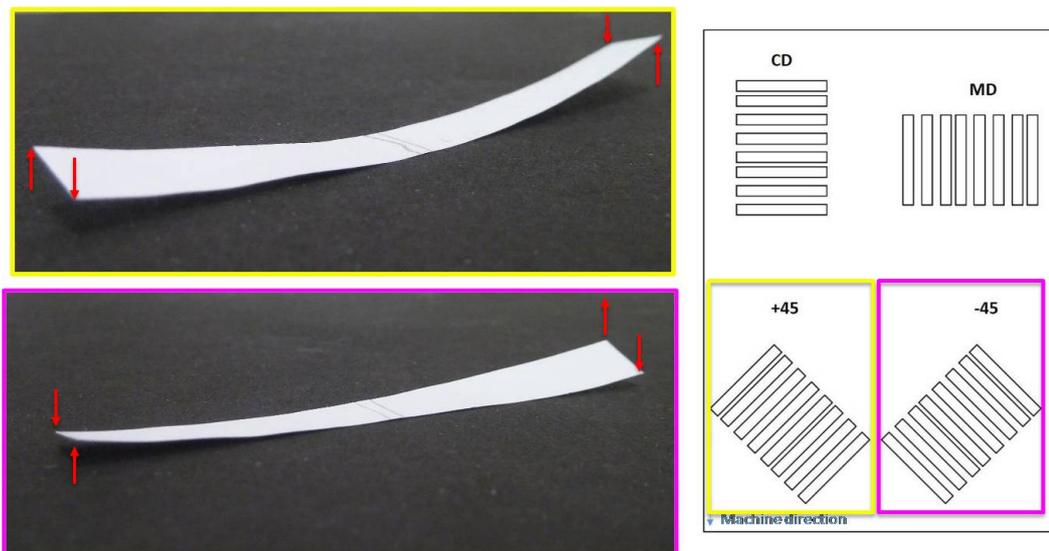
**Abbildung 53:** Klimazyklus Unterstau mit Schüttelung, Bahnrand. Die Proben der einzelnen Diagramme wurden wie in der rechten Abbildung zu sehen ist geschnitten. Der Graph links zeigt die vorhandene Winkelzweiseitigkeit an. In der Mitte ist das Ergebnis des Klimazyklus zu sehen. Die Proben welche bei  $-45^\circ$  genommen wurde zeigt vorhandene Trockenspannungen, während Proben aus dem gleichen Blatt aber bei  $+45^\circ$  herausgenommen keine Wölbung unter Einfluss der Luftfeuchtigkeit erkennen lässt.

Die Kurven zeigen nur geringen irreversiblen Curl. Vergleicht man die Ergebnisse der Proben mit Schüttelung aus Abbildung 54 ist auch hier kein diagonaler, irreversibler Curl zu entdecken.



**Abbildung 54:** Klimazyklus Unterstau ohne Schüttelung, Bahnrand.

Curleffekte in Diagonalrichtung konnten für keinen Versuchspunkt festgestellt werden. Eine Erklärung könnte Abbildung 55 bringen. Es zeigt das endgültige Aussehen der Proben nach dem Klimaversuch. Bei den diagonal-ausgeschnittenen Proben sollten sich, wie bei den anderen Proben die schmälere Seiten bewegen, falls das Blatt einen Diagonalcurl besitzt.



**Abbildung 55:** Diagonalausgeschnittene Proben wölben sich entlang einer Achse die in Maschinenrichtung liegt.

Die erwartete Wölbungsachse würde im Winkel  $+45^\circ$  bzw.  $-45^\circ$  liegen und die Proben würden sich gleichmäßig verformen. Wie Abbildung 55 zeigt, bilden die diagonal ausgeschnittenen Proben jeweils eine diagonale Verformung. Die tatsächliche Wölbungsachse liegt daher in der Maschinenrichtung.

Die Proben die im Winkel  $+45^\circ$  bzw.  $-45^\circ$  ausgeschnitten wurden haben, die gleiche Wölbungsachse wie Proben die so ausgeschnitten wurden wie in der Abbildung MD eingezeichnet ist. Diese Phänomen spricht für eine Dominanz des MD-Siebseitencurls und bestätigt, dass kein Diagonalcurl auftritt.

---

## **4 Conclusio**

---

Die vorgestellten Untersuchungen sollten versuchen den Einfluss der Siebschüttelung auf das Wölbungsverhalten zu klären oder zumindest Ideen zu geben, wie die Curl-mechanismen von dieser beeinflusst werden.

Ausgehend von der Arbeit von [Schuller, 2016], der MDDBS-Curl aufgrund von Zweiseitigkeiten nachwies, ohne die Einflüsse der Siebschüttelung miteinzubeziehen, wurden diese schrittweise untersucht. Um alle Einflüsse getrennt von einander beurteilen zu können, wurde ein Versuchsplan entwickelt. Vier Versuchspunkte umfassten die Parameter Siebschüttelung (EIN und AUS) und Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnis (Unterstau oder Staunullpunkt).

Im Kapitel 3.1 *Systematische Einflüsse* wurde gezeigt dass MDDBS-Curl ein Phänomen ist, dass (zumindest) über die letzten drei Jahre vorhanden war. In diesem Zeitraum wurden Papiere sowohl mit, als auch ohne aktiver Siebschüttelung produziert und geprüft. Es ist plausibel, dass die Ergebnisse von [Schuller, 2016] bei den FO-Anisotropiezweiseitigkeiten die Ursache dafür zeigen.

Dass die Siebschüttelung einen Einfluss auf die Anordnung der Fasern im Papier hat, zeigt Kapitel 3.2 *Faserorientierungswinkel in Maschinenrichtung*. Die Vermessung von 2-Meter-Probestreifen mit dem TSO-Messgerät demonstrierte, dass sich die Faserorientierung entlang der Maschinenrichtung ändert. Der Verlauf des FO-Winkels folgt einer Sinuskurve und besitzt eine Periodendauer von 1500 mm. Durch die TSO-Messung konnte die Änderung des FO-Winkels entlang der Maschinenrichtung gezeigt werden.

Der Vergleich des TSO-Winkels mit den FO-Winkeln die aus der Laminatspaltung berechnet wurden zeigt keinen Zusammenhang. Die falsche Richtung der Regressionsgeraden und die großen Konfidenzintervalle lassen keinen Zusammenhang zwischen den Methoden zu. Die Validierung der Laminatspaltung durch die TSO-Messung konnte nicht erbracht werden.

Die Laminatspaltung in Kapitel 3.3 *Struktureller Curl - Zweiseitigkeiten* gab Einblicke in die z-Richtung der Proben und somit in den Aufbau des Papiers. Durch die Betrachtung der Faserorientierung in den einzelnen Schichten des Kopierpapiers wurde sichtbar, dass die Siebschüttelung, was die Anisotropie betrifft, einen ähnlichen Aufbau verursacht. Dieser Aufbau war auch für unterschiedliche Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnisse immer sehr ähnlich. Die Anisotropie-z-Profile bei aktiver Siebschüttelung hatten Anisotropiewerte von 1.2 - 1.6 im Bereich der Siebseite bis hin zu 40% der Blattdicke. Ab 40% bis zur Papieroberseite war die Faserorientierung in den Lagen sehr isotrop. Diese Anisotropiezweiseitigkeit dient als Erklärung für den MDBS-Curl in Xerographiedruckverfahren.

Die Winkelprofile in z-Richtung waren deutlich inhomogener. Es wurden auch Unterschiede zwischen *Unterstau* und *Staunullpunkt* gefunden. Diagonalcurl, der eine Folge von Winkelzweiseitigkeiten ist, wurde in keiner Untersuchung festgestellt.

Den Abschluss bildeten Klimaversuche im Kapitel 3.4 *Irreversibler Curl* um irreversiblen Curl zu messen. Beide vorgestellten Messverfahren zeigten irreversiblen Curl an. Unterschiede in den Versuchspunkten konnten nur in geringem Ausmaß entdeckt werden. Dies würde dazu passen, dass die ungleiche Trocknung des Papiers (Bias) für den irreversiblen Curl verantwortlich ist. Durch Vermessung diagonal-ausgeschnittener Proben sollte der bereits erwähnte Diagonalcurl erfassbar gemacht werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung war nur die entdeckte Dominanz des MDBS-Curl.

## **Fazit**

Die Siebschüttelung beeinflusst den Aufbau des Papiers und verursacht Zweiseitigkeiten. Da MDBS-Curl auch bei nicht aktivierter Siebschüttelung auftritt, muss diese nicht allein für die Curlphänomene auf der PM5 verantwortlich sein. Andere Zweiseitigkeiten wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Das Bedrucken der Papiere mit wasserbasierten Verfahren kann zu Planlageproblemen führen, wie die Ergebnisse der irreversiblen Curlmessungen zeigten.

## Literatur

- [Brooms, 1978] BROOMS, K. D. (1978). *Design of the fusing system for an electrophotographic laser printer*. In: IBM Journal of Research and Development, 22. Jg., Nr. 1, S. 26-33.
- [Ghosh, 2011] GHOSH, A. K. (2011). *Fundamentals of Paper Drying-Theory and Application from Industrial Perspective*. In: Evaporation, Condensation and Heat transfer, Dr. Amimul Ahsan (Hrsg.) INTECH Open Access Publisher.
- [Glynn und Jones et al., 1961] GLYNN, P., JONES, H. W. H. und GALLAY, W. (1961). *Drying Stresses and Curl in Paper*. In: Pulp and Paper Magazine of Canada 62(1), S. T39-T48.
- [Green, 1984] GREEN, C. J. (1984). *Curl, expansivity, and dimensional stability*. In: Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard, Marcel Dekker Inc..
- [Hirn und Bauer, 2007] HIRN, U., BAUER, W. (2007). *Evaluating an improved method to determine layered fibre orientation by sheet splitting*. In: 61st Appita Annual Conference and Exhibition: Proceedings, S. 71, Appita Inc..
- [Kajanto und Niskanen, 1998] KAJANTO, I., NISKANEN, K. (1998). *Dimensional stability*. In: Paper Physics (Papermaking Science and Technology 16), S. 222-259, Fapet Oy.
- [Knotzer und Widauer, 2005] KNOTZER, U., WIDAUER, H. (2005) *Wire shake without reaction forces*. In: 91st Annual Meeting PAPTAC, 1. Jg., S. A169-A173.

- [Lindblad und Fürst, 2007] LINDBLAD, G., FÜRST, T. (2007). *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board: A Handbook*. Lorentzen and Wettre.
- [Loewen und Foulger, 2002] LOEWEN, S., FOULGER, M. (2002). *TSO and fibre orientation: an introduction: Understanding such parameters is important for improved papermaking*. In: *Pulp and Paper Canada*, 103. Jg., Nr. 5, S. 42-45.
- [Norman, 2007] NORMAN, B. (2007). *Web forming*. In: *Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End (Papermaking Science and Technology 8)*, S. 216-288, Fapet Oy.
- [Oohara und Hayama et al., 2013] OOHARA, S., HAYAMA, Y., TANIGAWA, H., TSURUTA, T. (2013). *Prediction of Paper Curl Generated by Fusing Process*. In: *Nihon Gazo Gakkaishi (Journal of the Imaging Society of Japan)*, 52. Jg., Nr. 6, S. 567-574.
- [Pikulik und Poirier, 2003] PIKULIK, I. I.; POIRIER, N. A. (2003). *New developments in paper and board drying*. In: *Proceedings of the International Conference on the Chemical Technology of Wood, Pulp and Paper*, Slovak Technical University, Bratislava. S. 56-65.
- [Schuller, 2016] SCHULLER, M. (2016) *Untersuchung von Zweiseitigkeiten und Trocknungsspannungen auf das Wölbungsverhalten von Kopierpapieren*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2016.
- [Suontausta, 1999] SUONTAUSTA, O. (1999). *End-use properties of printing papers*. In: *Pulp and Paper Testing, Papermaking Science and Technology 17*, S. 183-215, Fapet Oy.
- [Tydeman und Wembridge et al., 1966] TYDEMAN, P. A.; WEMBRIDGE, D. R.; PAGE, D. H. (1966). *Transverse shrinkage of individual fibres by micro-radiography*. In: *Consolidation of the Paper Web*, S. 119-144.
- [Uesaka, 2002] UESAKA, T. (2002). *Dimensional stability and environmental effects on paper properties*. In: *Handbook of physical testing of paper*, S. 115-171, Marcel Dekker Inc..

## 5 Verzeichnisse

### Abbildungen

1	Fibrillenstruktur . . . . .	11
2	Sorptionsisothermen . . . . .	13
3	Hysterese . . . . .	14
4	Faserorientierung . . . . .	15
5	Unterschiedliche Arten des Curls . . . . .	17
6	Curldefinition . . . . .	18
7	Mechanismus struktureller Curl . . . . .	19
8	Vorgang viskoelastischer Curl . . . . .	20
9	Irreversibler Curl lt. Uesaka . . . . .	21
10	Vorgänge beim Xerographiecurl . . . . .	22
11	Nip beim Kopierer . . . . .	23
12	Schema Siebpartie . . . . .	24
13	Staukurve . . . . .	25
14	Schema Duoshake mit Regelung . . . . .	26
15	Anisotropie-z-Profil Duoshake . . . . .	27
16	Schema Trockenpartie . . . . .	28
17	Versuchsplan . . . . .	34
18	Probennahme . . . . .	35
19	Messablauf TSO . . . . .	37
20	Messprinzip TSO . . . . .	37
21	Spaltung Einfärben . . . . .	38
22	Einzelne Spaltungen . . . . .	39
23	Messprinzip irreversibler Curl . . . . .	41
24	Woelbungsschablonen . . . . .	42
25	Klimakammer in Hausmening . . . . .	43
26	Verlauf Luftfeuchte . . . . .	44
27	Klimaschrank in Graz . . . . .	45
28	Aufhängung der Proben im Klimaschrank . . . . .	46

29	Verformung der Proben im Klimaschrank . . . . .	47
30	Kopiertest vor kopieren . . . . .	49
31	Kopiertest Siebseite kopiert . . . . .	51
32	Kopiertest zweite Seite kopiert . . . . .	53
33	FO-Winkel Unterstau in MD os . . . . .	55
34	FO-Winkel in MD os . . . . .	56
35	FO-Winkel in MD ms . . . . .	58
36	FO-Winkel in MD ms . . . . .	59
37	Regression TSO/FO Winkel . . . . .	60
38	Anisotropie ZS Unterstau Bahnrand . . . . .	63
39	Anisotropie ZS Unterstau Bahnmitte . . . . .	64
40	Anisotropie ZS Nullpunkt Bahnmitte . . . . .	65
41	Anisotropie ZS Nullpunkt Bahnmitte . . . . .	66
42	FO-Winkel ZS Unterstau Bahnmitte . . . . .	67
43	FO-Winkel ZS Unterstau Bahnmitte . . . . .	68
44	FO-Winkel ZS Unterstau Bahnmitte . . . . .	69
45	Hilfslinien Ang Nullpunkt MD3 . . . . .	70
46	FO-Winkel ZS Unterstau Bahnmitte . . . . .	71
47	Spaltung Winkel Zusammenfassung . . . . .	72
48	Versuche Hausmening Klimabox Unterstau . . . . .	74
49	Versuche Hausmening Klimabox Nullpunkt . . . . .	75
50	Unterstau mit Siebschüttelung MD3 . . . . .	76
51	Unterstau ohne Siebschüttelung MD3 . . . . .	77
52	Zusammenfassung Klimazyklen Graz . . . . .	77
53	Unterstau mit Siebschüttelung MD4 . . . . .	79
54	Diagonalcurl . . . . .	80
55	Dominanz MD Curl . . . . .	81

## 6 Appendix

Übersicht über die Proben die für die Untersuchung der Zweiseitigkeiten durch Laminatspaltung analysiert wurden.

Probennummer	JWR	Schüttelung	Position CD	Position MD
1	Unterstau	ohne	MD3	100 mm
2	Unterstau	ohne	MD3	800 mm
3	Unterstau	ohne	MD3	1500 mm
4	Unterstau	mit	MD3	75 mm
5	Unterstau	mit	MD3	300 mm
6	Unterstau	mit	MD3	500 mm
7	Unterstau	mit	MD3	750 mm
8	Unterstau	mit	MD3	1300 mm
9	Unterstau	mit	MD3	1500 mm
10	Unterstau	mit	MD3	1800 mm
11	Unterstau	mit	MD3	2000 mm
12	Nullpunkt	ohne	MD3	100 mm
13	Nullpunkt	ohne	MD3	800 mm
14	Nullpunkt	ohne	MD3	1500 mm
15	Nullpunkt	mit	MD3	75 mm
16	Nullpunkt	mit	MD3	200 mm
17	Nullpunkt	mit	MD3	300 mm
18	Nullpunkt	mit	MD3	600 mm
19	Nullpunkt	mit	MD3	900 mm
20	Nullpunkt	mit	MD3	1200 mm
21	Nullpunkt	mit	MD3	1500 mm
22	Nullpunkt	mit	MD3	1600 mm
23	Nullpunkt	mit	MD3	1700 mm
24	Nullpunkt	mit	MD3	1800 mm
25	Unterstau	ohne	MD4	100 mm
26	Unterstau	ohne	MD4	800 mm
27	Unterstau	ohne	MD4	1500 mm
28	Unterstau	mit	MD4	100 mm
29	Unterstau	mit	MD4	240 mm
30	Unterstau	mit	MD4	550 mm
31	Unterstau	mit	MD4	1600 mm
32	Unterstau	mit	MD4	1740 mm
33	Unterstau	mit	MD4	2050 mm
34	Nullpunkt	ohne	MD4	100 mm
35	Nullpunkt	ohne	MD4	800 mm
36	Nullpunkt	ohne	MD4	1500 mm
37	Nullpunkt	mit	MD4	100 mm
38	Nullpunkt	mit	MD4	200 mm
39	Nullpunkt	mit	MD4	300 mm
40	Nullpunkt	mit	MD4	600 mm
41	Nullpunkt	mit	MD4	1200 mm
42	Nullpunkt	mit	MD4	1600 mm
43	Nullpunkt	mit	MD4	1700 mm
44	Nullpunkt	mit	MD4	1800 mm