



Michael Schuller, BSc

**Untersuchung von
Zweiseitigkeiten und Trocknungsspannungen auf das
Wölbungsverhalten von Kopierpapieren**

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

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das Wölbungsverhalten von Kopierpapieren wird durch unterschiedliche Ursachen bestimmt und kann durch unterschiedliche Theorien erklärt werden. In dieser Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf den strukturellen Aufbau des Papiers und den Einfluss von Trocknungsspannungen auf das Wölbungsverhalten gelegt. Dazu werden mehrere Untersuchungen zum Aufbau des zu untersuchenden Papiers in Z-Richtung durchgeführt. Neben der Füllstoffzweiseitigkeit wird auch die Stärkezweiseitigkeit und die Faserorientierungszweiseitigkeit in der Anisotropie und dem Winkel bei unterschiedlichen Strahl-Sieb-Verhältnissen ermittelt. Durch die Variation des Strahl-Sieb-Verhältnisses erreicht man starke Unterschiede in der Faserorientierungszweiseitigkeit und somit kann dieser Einfluss auf das Wölbungsverhalten untersucht werden. Die Analyseergebnisse der Füllstoff- und Stärkezweiseitigkeit zeigen bei den einzelnen Staupunkten keine relevanten Unterschiede in den Z-Profilen, wodurch dieser Einfluss auf den strukturellen Curl nicht ermittelt werden konnte. Die tatsächliche Wölbung der Proben nach dem Kopierprozess zeigt eine gute Korrelation zu dem mathematischen Modell, welches in dieser Arbeit verwendet wird, um den strukturellen Curl über die Faserorientierung zu beschreiben. Bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,51$ sind noch andere Parameter für den Curl verantwortlich, welche in den Untersuchungen der Trocknungsspannungen und des viskoelastischen Curls vermutet werden.

Die Trocknungsspannungen, welche während des Produktionsprozesses im Papier entstehen, besitzen ein bestimmtes Wölbungspotenzial, welches in dieser Arbeit untersucht wird. Dafür werden die Proben mehreren Befeuchtungs- und Trocknungszyklen ausgesetzt, wodurch die Trocknungsspannungen gelöst werden und die Wölbung zunimmt. Die Untersuchungen zeigen ein starkes Wölbungspotential durch die zyklische Klimatisierung. Zusätzlich wird auch der strukturelle Curl, welcher nach dem Befreien der Trocknungsspannungen wirkt, erkennbar. Dabei zeigt sich eine Umkehr der Wölbungsrichtung nach dem ersten Befeuchtungszyklus, welche momentan nicht erklärbar ist.

Wegen des wichtigen Einflusses der Faserorientierungszweiseitigkeit auf das Wölbungsverhalten des strukturellen Curl, wird im Zuge der Arbeit auch die Evaluierung des „dual sided online fibre orientation sensor“ durchgeführt. Das optische Messprinzip mit polarisiertem Laserlicht zeigt jedoch Schwächen in der Messgenauigkeit. Das Messsystem misst sehr oberflächlich wodurch eine Aussage über die Faserorientierung erschwert wird. Zusätzlich können keine relevanten Unterschiede zwischen den einzelnen Strahl-Sieb-Verhältnissen dargestellt werden, welche erwartet werden und durch andere Messmethoden ersichtlich sind.

Abstract

The curl behaviour of copy paper is caused by different factors, which are explained by several theories. Curl mechanisms are structural curl, the irreversible curl and the visco-elastic curl. In this master thesis the different curl theories will be investigated. Reversible structural curl is investigated with respect to two-sidednesses of fibre orientation. For these investigations several machine trials were carried out, where the jet-wire speed difference was varied in a rather large range. Also the two-sidednesses in filler and starch content is analysed to describe the sheet structure in z-direction. The result of the investigation reveals fibre orientation as the main influence parameter. The two-sidedness in filler and starch content does not change in the different jet to wire ratios, thus no influence of these factor on curl could be found in this investigation. The comparison of the measured curl values with the mathematical model used to describe the fibre orientation two-sidedness, shows a considerable correlation ($r^2=0,51$). However, this result also suggests that there are other reasons for the observed curl, like irreversible curl descending from the drying process.

Also an investigation on irreversible curl was done. For this trials the samples are submitted to several cycles of humidity changes, from 20% RH to 80% and back. During the first moistening step the dried-in strains are released and the curl increases. The result of this investigation shows the curl potential of the dried-in strains and also the reversible curl which becomes visible after the first moistening step.

Because of the importance of the fibre orientation on the structural curl the “dual sided online fibre orientation sensor“ has also been evaluated in this work. The online measurement system uses polarized laser optics. The system was shown to have incorrect measurement results. Changes in jet to wire ratio did not show the expected outcome in sensor results, however the expected changes could be detected with other measurement systems. One reason might be that only the very surface layers of the paper are measured with the online sensor.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I Theorie - Grundlagen aus der Papierphysik	2
1 Papierstruktur - Faserorientierung	3
1.1 Definition und Charakterisierung der Faserorientierung	3
1.2 Einflussparameter auf die Anisotropie im Blatt	6
1.2.1 Strahl-Sieb-Verhältnis	6
1.2.2 Strahlkontraktion in der Stoffauflaufdüse	7
1.2.3 Hydrodynamische Turbulenzen im Strahl	8
1.3 Einflussparameter auf den Orientierungswinkel im Blatt	9
1.3.1 Strömungswinkelabweichungen zur Maschinenrichtung des Strahls .	9
1.3.2 Strahl-Sieb-Verhältnis	9
1.4 Auswirkungen der Faserorientierung auf die Papiereigenschaften	10
2 Dimensionsstabilität	11
2.1 Klimatische Einflüsse auf die Papiereigenschaften	11
2.1.1 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit	11
2.1.2 Adsorption und Desorption	12
2.2 Hygroexpansion	13
2.2.1 Definition und Beschreibung	13
2.2.2 Einflussparameter	14
2.2.3 Trocknungsspannungen	15

2.3	Wölbungsverhalten von Feinpapieren	15
2.3.1	Definition und Charakterisierung	15
2.4	Wölbungstheorien	17
2.4.1	Viskoelastischer Curl	17
2.4.2	Irreversibler Curl	19
2.4.3	Struktureller Curl	20
2.4.4	Roll-Set Curl	22

II Praktische Untersuchung - Durchführung und Methoden 23

3 Messmethoden 24

3.1	Bestimmung der Faserorientierung	24
3.1.1	Dual Sided Online FO Sensor von ABB	25
3.1.2	TSO-Tester von L&W	26
3.1.3	Bildanalytische Messung mit Sheet-Splitting Methode	27
3.2	Bestimmung der Wölbung	29
3.3	Bestimmung der Füllstoffzweiseitigkeiten	31
3.4	Bestimmung der Stärkezweiseitigkeiten	31
3.5	Bestimmung der Feuchtezweiseitigkeiten	31
3.6	Bestimmung des irreversiblen Curls	33
3.7	Bestimmung des strukturellen Curls	34

4 Versuchsplanung und Ausführung 36

4.1	Maschinenbeschreibung - Papiermaschine 5	36
4.2	Versuchsaufbau und Ziele	39
4.2.1	Validierung des „dual sided online FO-Sensors“ von ABB	40
4.2.2	Irreversibler und struktureller Curl	41
4.3	Versuchsdurchführung	43
4.3.1	Vorversuch	44
4.3.2	Staukurve	44
4.3.3	Hauptversuche	45

4.4	Musternahme	47
III	Praktische Untersuchung - Ergebnisse	49
5	Evaluierung „dual-sided online FO-Sensor“	50
5.1	Evaluierung mit dem TSO-Tester	51
5.2	Evaluierung mit der Sheet-Splitting Methode	57
5.3	Zusammenfassung der Evaluierung	61
6	Ergebnisse - Irreversibler Curl	62
7	Ergebnisse - Struktureller Curl	65
7.1	Füllstoff- und Stärkezweiseitigkeit	66
7.2	Faserorientierungszweiseitigkeit	68
7.2.1	Anisotropie	68
7.2.2	Faserorientierungswinkel	74
7.2.3	Zusammenfassung des strukturellen Curls	78
8	Ausblick	79

Einleitung

Moderne Office-Papiere müssen heutzutage die unterschiedlichsten Anforderungen erfüllen, damit mit den diversen Drucktechnologien die gewünschten Druckqualitäten erreicht werden können. Weiters sollen diese Papier auch ein multifunktionales Produkt sein, damit dieses in allen Druckverfahren (Inkjet, Xerographie und Offset) funktioniert.

Um den Druckprozess reibungsfrei durchführen zu können, müssen die verwendeten Papiere hervorragende Kopiereigenschaften, wie zum Beispiel gute Planlage und hohe Dimensionsstabilität mit sich bringen. In den Kopieraggregaten werden die Blätter über unterschiedliche Transportsysteme durch den Drucker gefördert, wobei die Planlage eine entscheidende Rolle in Bezug auf Staus besitzt. Es werden in dieser Masterarbeit einige Ursachen für das Wölben von Papieren im Kopierprozess untersucht. Dazu ist die Arbeit folgendermaßen aufgebaut:

Im Kapitel 1 wird die Papierstruktur und der Blattaufbau erklärt. Die Faserorientierung, der Füllstoffgehalt und der Stärkegehalt auf den unterschiedlichen Papierseiten haben einen besonderen Einfluss und werden hier im Detail beschrieben.

Das nachfolgende Kapitel 2 behandelt die Dimensionsstabilität von Papieren. Die Auswirkungen der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit sowie der Trocknungsvorgeschichte werden genau beschrieben. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Ursachen und deren Theorie für das Wölbungsverhalten von Papieren diskutiert.

Die Messmethoden, welche in der Arbeit angewandt werden, werden im Kapitel 3 vorgestellt.

Im Kapitel 4 werden die Versuche beschrieben. Es wird der Versuchsaufbau sowie der Versuchsplan der einzelnen Teilversuche anschaulich dargestellt.

In den nachfolgenden drei Kapiteln werden die Ergebnisse der Untersuchungen gezeigt und interpretiert. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Evaluierung des online Faserorientierungssensors von ABB erläutert. Danach folgt im Kapitel 6 das Resultat der Untersuchungen zum irreversiblen Curl. Darauf folgend werden im Kapitel 7 die Analyseergebnisse des strukturellen Curls behandelt.

Zum Abschluss folgt im letzten Kapitel 8 eine Schlussfolgerung sowie der Ausblick.

Teil I

Theorie - Grundlagen aus der Papierphysik

Kapitel 1

Papierstruktur - Faserorientierung

Die Eigenschaften eines maschinell hergestellten Papierblattes werden durch die innere Struktur beeinflusst. Wichtig dafür ist ein gleichmäßiger Aufbau in der Papierstruktur in Z-Richtung bezüglich Füllstoffgehalt, Feinstoffgehalt, Faserorientierung und Hilfsmitteln, um eine Wölbung des Papierblattes zu verhindern.

1.1 Definition und Charakterisierung der Faserorientierung

Als Faserorientierung wird die statistische Verteilung der Fasern in einem Papierblatt bezeichnet. Das in der Abbildung 1 dargestellte Fasernetzwerk kann somit durch die Faserorientierung charakterisiert werden. Um die Faserverteilung beschreiben zu können, werden die zwei Parameter Orientierungsausmaß oder Anisotropie und der Abweichungswinkel (Faserorientierungswinkel) zu Hilfe genommen.

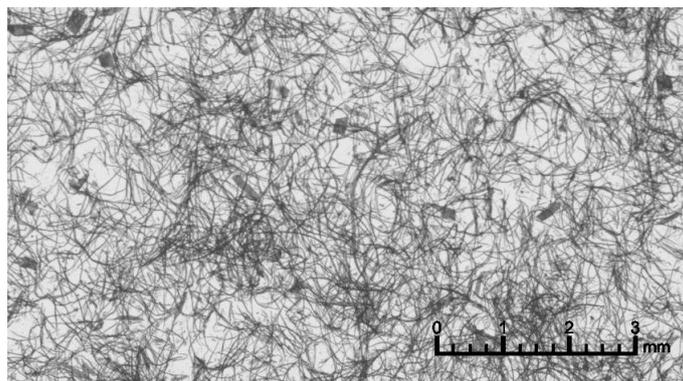


Abbildung 1: Darstellung eines Papierfasernetzwerk.

Die Verteilung wird üblicherweise in einem Polardiagramm dargestellt, wie es in der folgenden Abbildung 2 zu sehen ist. Das Polardiagramm beschreibt die Lage der einzelnen Fasern in den jeweiligen Richtungen und deren Häufigkeit wird mit dem Abstand zum Ursprung (Radius) des Diagramms dargestellt. Das Messergebnis dieser Verteilun-

gen erscheint üblicherweise in einer erdnussförmigen Kurve, wie es in der Abbildung 2 ersichtlich ist. Um die Messwerte auswerten zu können, wird eine Ellipse gefittet, mit welcher die Faserorientierungsanisotropie und der Faserorientierungswinkel ermittelt werden können. [Odell und Pakarinen, 2001]

Im Diagramm der Abbildung 2 ist die gefittete Ellipse (schwarze Kurve) dargestellt, welche mit dem Faserorientierungswinkel α aus der Maschinenrichtung dreht und somit die Hauptausrichtung der Fasern beschreibt. Weiters sind aus der Ellipse die beiden Achsen a als Hauptachse und b als Nebenachse erkennbar, welche für die Ermittlung der Faserorientierungsanisotropie herangezogen werden.

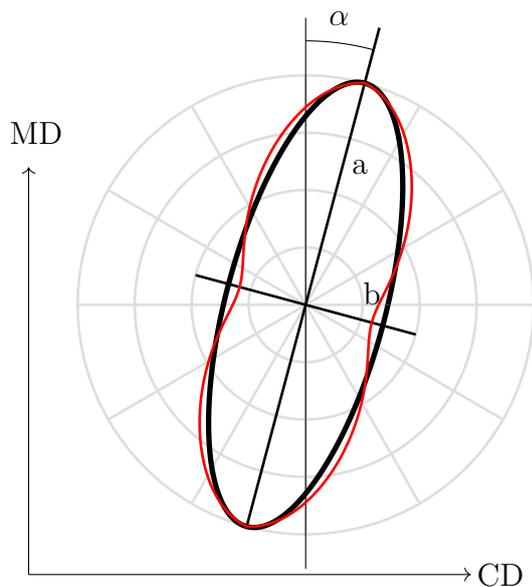


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Faserorientierung in einem Polardiagramm. Die rote Kurve zeigt die typische erdnussförmige Form der tatsächlichen Messergebnisse. Die schwarze Ellipse zeigt eine zu den Messdaten gefittete Kurve, woraus sich der Faserorientierungswinkel α und die Anisotropie mit dem Verhältnis der Hauptachse a und der Nebenachse b ermitteln lässt.

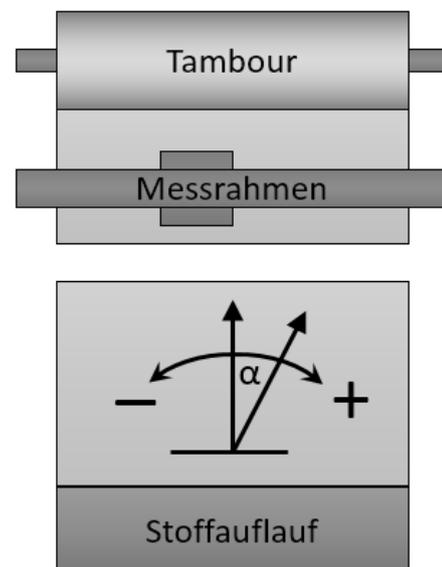


Abbildung 3: Winkeldefinition: Der positive Faserorientierungswinkel α zeigt in Richtung des Uhrzeigersinnes ausgehend vom Stoffauflauf.

Die Faserorientierungsanisotropie ergibt sich aus dem Verhältnis, wie viele Fasern in Hauptrichtung (Halbachse a der gefitteten Ellipse) orientiert sind, zur Anzahl der Fasern, welche normal zur Hauptrichtung (Halbachse b der Ellipse) liegen.

Um die Faserorientierung komplett zu charakterisieren, muss zusätzlich eine Winkeldefinition angegeben werden. In dieser Arbeit wird, wie in Abbildung 3 dargestellt, eine Winkelabweichung des Faserorientierungswinkels α in den Uhrzeigersinn ausgehend vom Stoffauflauf als positiven Winkel definiert.

In weiterer Folge muss man die Faserorientierung nicht nur in der Ebene betrachten, weil sich diese auch in Z-Richtung ändert. Die Faserorientierung in Z-Richtung hängt vom Papiermaschinenkonzept, aber auch von der Betriebsweise (Strahl-Sieb-Verhältnis siehe Kapitel 1.2.1) ab. Die folgende Abbildung 4 zeigt diese Einflüsse auf den Faserorientierungsindex (Anisotropie).

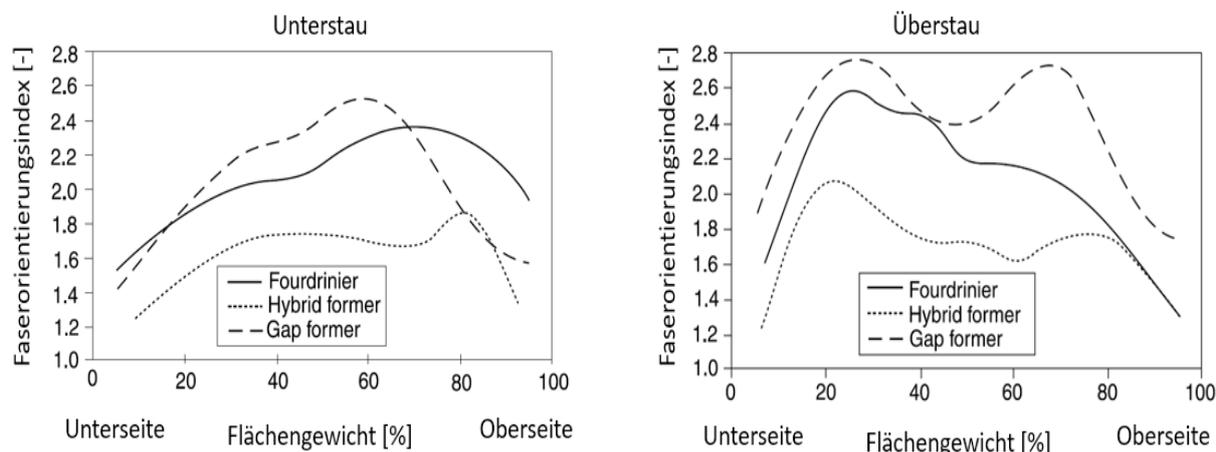


Abbildung 4: Einfluss des Papiermaschinenkonzepts auf den Faserorientierungsindex im Unterstau (links) und Überstau (rechts). Ein Gapformer erzeugt durch die beidseitige Bespannung ein relativ isotropes Blatt an der Ober- und Unterseite. In den mittleren Schichten wird eine höhere Anisotropie erreicht. Im Gegensatz dazu entsteht an einem Hybridformer eine gleichmäßigere Anisotropie über die Z-Richtung. Eine Langsiebpapiermaschine (Fourdrinier) erzeugt eine gewisse Zweiseitigkeit im Faserorientierungsindex zwischen Ober- und Unterseite. [Niskanen und Pakarinen, 2008]

Ein Papierblatt, welches auf einen Hybridformer gebildet wird, zeigt dabei einen relativ gleichmäßigen Faserorientierungsindex über die gesamte Z-Richtung. Der Peak im Orientierungsindex ist beim Überstau an der Blattunterseite und im Unterstau auf der Blattoberseite ersichtlich. Im Gegensatz dazu weist ein Produkt von einer Langsiebpapiermaschine (Fourdrinier) eine starke Zweiseitigkeit in beiden Staupunkten auf. Die Gapformertechnologie im Unterstau ergibt in den mittleren Schichten einen hohen Orientierungsindex, wobei jedoch die Ober- und Unterseite relativ ähnlich niedrige Werte erreichen. Im Überstau sind zwei Maxima ersichtlich, jedoch ist der Faserorientierungsindex zu den Außenseiten hin auf sehr ähnlichem Niveau. [Niskanen und Pakarinen, 2008]

1.2 Einflussparameter auf die Anisotropie im Blatt

Die Faserorientierungsanisotropie wird durch unterschiedliche Maschinen- und Stoffparameter beeinflusst. Die wichtigsten Einflussgrößen sind Strahl-Sieb-Verhältnis, Strahlkontraktion in der Stoffauflaufdüse und hydrodynamische Turbulenzen im Strahl, welche in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

1.2.1 Strahl-Sieb-Verhältnis

Als Strahl-Sieb-Verhältnis wird das Verhältnis der Geschwindigkeit des Stoffstrahls aus dem Stoffauflauf zur Geschwindigkeit des Formiersiebes bezeichnet. Oft wird auch die Differenz zwischen den beiden Geschwindigkeiten angegeben, um den Unterschied zu beschreiben. Der Papiermacher unterscheidet nun die drei Fälle Unterstau (Nacheilung des Strahls), Nullpunkt und Überstau (Voreilung des Strahls) im Strahl-Sieb-Verhältnis. Je nach Betriebsfahrweise wird ein bestimmtes Geschwindigkeitsprofil am Strahlauftreffpunkt erzeugt, welches zu einer unterschiedlichen Ausrichtung der Fasern in der Formierzone führt (siehe Abbildung 5). [Blechsmidt, 2013]

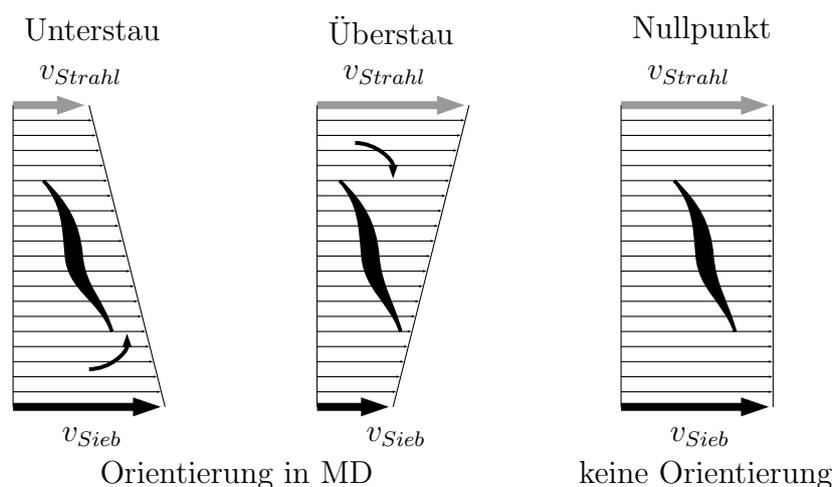


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen Strahl (v_{Strahl}) und Sieb (v_{Sieb}). Links ist der Fall des Unterstaus dargestellt. In diesem Fall eilt das Sieb dem Strahl vor und es ergibt sich ein Geschwindigkeitsprofil mit einem hohen Gradienten, welcher eine Ausrichtung der Fasern in Strömungsrichtung bewirkt. Das mittlere Bild zeigt den Fall des Überstaus. Auch in diesem Fall stellt sich ein Geschwindigkeitsgradient zwischen Strahl- und Siebgeschwindigkeit ein, welcher die Orientierung erhöht. Der Strahlnullpunkt, welcher aufgrund des gleichmäßigen Geschwindigkeitsprofils ohne Gradienten keine Orientierung erzeugt, ist rechts dargestellt.

Im Überstau und im Unterstau zeigen die Geschwindigkeitsprofile einen Gradienten in Z-Richtung, wodurch die Fasern durch eine Rotationsbewegung in Strömungsrichtung ausgerichtet werden. Im Staunullpunkt wird keine Rotation hervorgerufen und es kommt

zu einer zufälligen Orientierung der Fasern. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile in den einzelnen Betriebspunkten ergibt sich ein starker Einfluss auf die Anisotropie, wie in der folgenden Abbildung 6 durch das Tensile Stiffness Index Ratio (TSI Ratio) bestätigt wird. Das TSI Ratio ist durch das Verhältnis der Elastizitätsmodule des Papiers in Maschinenrichtung zur Querrichtung definiert. Die Elastizitätsmodule in den unterschiedlichen Richtungen hängen stark von der Ausrichtung der Fasern ab, wodurch sich eine Korrelation zwischen der Anisotropie und dem TSI Ratio ergibt.

Im Strahlnullpunkt ($v_{Sieb}=v_{Strahl}$) wird aufgrund des gleichmäßigen Geschwindigkeitsprofils keine Längsorientierung hervorgerufen und somit ein isotropes Blatt gebildet. Im Gegensatz dazu wird im Überstau und Unterstau durch die höheren Differenzgeschwindigkeiten zwischen Strahl und Sieb immer eine Längsausrichtung der Fasern erreicht, wodurch eine höhere Anisotropie entsteht. [Holik, 2006]

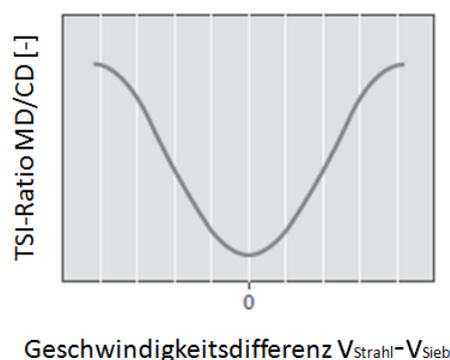


Abbildung 6: Tensile Stiffness Index Ratio (TSI-Ratio) MD/CD in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit von Strahl und Sieb. Im Unterstau und Überstau wird ein höheres TSI-Ratio erreicht infolge der stärkeren Längsorientierung der Fasern. Bei einer Differenzgeschwindigkeit von Null nimmt der Wert ein Minimum ein. [Holik, 2006]

1.2.2 Strahlkontraktion in der Stoffauflaufdüse

Ein weiterer Einflussparameter auf die Verteilung der Fasern im Blattgefüge ist die Strahlkontraktion in der Stoffauflaufdüse. In der Düse wird der Stoffstrahl auf die erforderliche Geschwindigkeit gebracht. Durch die zunehmende Beschleunigung der Suspension im konvergierenden Strömungskanal kommt es zu einer Ausrichtung der Fasern in Strömungsrichtung. Diese Ausrichtung der Fasern erzeugt eine gewisse Anisotropie, welche unabhängig von anderen Einflussfaktoren immer vorhanden und nicht vermeidbar ist. Deshalb nimmt die Anisotropie immer Werte größer eins an.

Der Einfluss der Strahlkontraktion ist in der Abbildung 7 zu sehen. Durch einen kleinen Auslaufspalt kommt es zu einer höheren Beschleunigung, wodurch die Fasern stärker in Längsrichtung ausgerichtet werden. Dieser Effekt spielt hauptsächlich im Strahlnullpunkt eine Rolle, da hier das Strahl-Sieb-Verhältnis keine wesentliche Orientierung bewirkt. [Odell und Pakarinen, 2001]

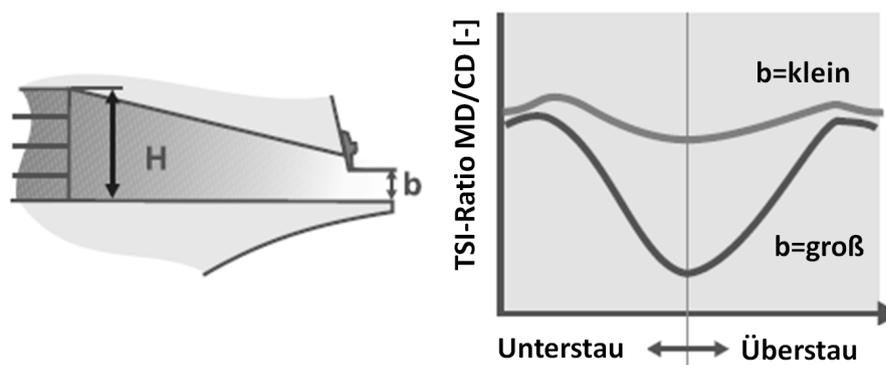


Abbildung 7: Auswirkung der Strahlkontraktion auf die Anisotropie im Papierblatt. Durch einen kleinen Auslassspalt (b) wird die Suspension stärker beschleunigt, wodurch es zu einer stärkeren Ausrichtung der Fasern kommt. [Odell und Pakarinen, 2001]

1.2.3 Hydrodynamische Turbulenzen im Strahl

Turbulenzen sind ungerichtete Strömungen in der Suspension, welche einen Vergleichmäßigungseffekt besitzen, wodurch die Fasern statistisch verteilt werden. Wichtig dabei ist, dass die Turbulenzen im richtigen Größenmaßstab vorhanden sind, um auch auf die Fasern wirken zu können. Durch die Turbulenzen im Strömungsmuster kommt es zu einer geringeren Ausrichtung der einzelnen Fasern in Längsrichtung, jedoch zu einer stärkeren zufälligen Orientierung, wodurch die Anisotropie reduziert wird. Durch die Nutzung von Lamellen im Stoffauflauf kann mehr Turbulenz erzeugt werden. Wie die Abbildung 8 zeigt, kann über Verkürzung der Lamellen auch die Turbulenz erhöht und somit die Anisotropie vor allem im Staunullpunkt reduziert werden. [Odell und Pakarinen, 2001]

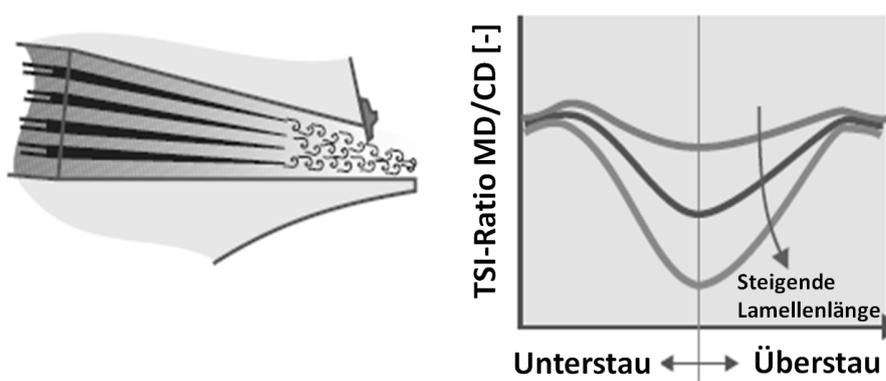


Abbildung 8: Auswirkung der hydrodynamischen Turbulenzen auf die Anisotropie. Durch das Einbringen höherer Turbulenzen über Lamellen usw. kann die Anisotropie reduziert werden. [Odell und Pakarinen, 2001]

1.3 Einflussparameter auf den Orientierungswinkel im Blatt

Der Faserorientierungswinkel wird von mehreren Maschineneinstellungen beeinflusst. Dabei ist die Ursache für die Winkelausrichtung immer in einer Querströmung der Fasersuspension im Stoffauflauf oder in der Formierzone zu finden (siehe Kapitel 1.3.1). Die Richtung und das Ausmaß dieser Strömungen in CD-Richtung werden durch unterschiedliche Einstellungen und Fehler, wie das Strahl-Sieb-Verhältnis, Schrägstellung des Stoffauflaufes, Verspannungen der Blende usw., hervorgerufen. [Lindblad und Fuerst, 2007]

1.3.1 Strömungswinkelabweichungen zur Maschinenrichtung des Strahls

Die Ausrichtung der Fasern wird durch die Strömung am Sieb hervorgerufen (siehe Kapitel 1.2.1), wobei jedoch immer wieder Strömungswinkelabweichungen vorkommen. Diese Abweichungen können zum einen am Sieb selbst infolge von Strömungsfehlern durch Blendenverspannungen, aber auch im Stoffauflauf durch Druckdifferenzen zwischen Triebseite und Führerseite verursacht werden. Heutzutage werden moderne Verdünnungswasserstoffaufläufe verwendet, um die Beeinflussung der Faserorientierung während der Steuerung des lokalen Flächengewichts zu entkoppeln. Zusätzlich werden an den Rändern Strömungsmodule verwendet, um in diesen Bereichen die Strömung positiv zu beeinflussen.

1.3.2 Strahl-Sieb-Verhältnis

Wie in der Abbildung 9 zu erkennen ist, ist die Richtung der Relativgeschwindigkeit (v_{rel}) zwischen Strahl und Sieb vom Strahl-Sieb-Verhältnis abhängig. Die Richtung der Relativgeschwindigkeit ist maßgeblich für den Orientierungswinkel verantwortlich. Wie die Abbildung 9 zeigt, ändert sich dieser Winkel zwischen Unterstau und Überstau drastisch. Im Beispiel der Abbildung würde es bedeuten, dass im Unterstau ein positiver und im Überstau ein negativer Faserorientierungswinkel aufgrund der Relativgeschwindigkeit erzwungen wird. Der Grad des Faserorientierungswinkels ist auch stark von der Größe des Strahl-Sieb-Verhältnisses abhängig. Bei geringen, beziehungsweise auch bei hohen Strahl-Sieb-Verhältnissen wirken sich die Querströmungen, welche im Kapitel 1.3.1 erwähnt werden, viel schwächer aus, wodurch ein geringer Faserorientierungswinkel entsteht. Durch die Fahrweise mit einem Strahl-Sieb-Verhältnis von nahe 1 wirkt die Querströmung sehr stark und der Winkel erreicht somit sehr hohe Werte. Daraus lässt sich der Einfluss des Strahl-Sieb-Verhältnisses auf den Faserorientierungswinkel ableiten. [Lindblad und Fuerst, 2007]

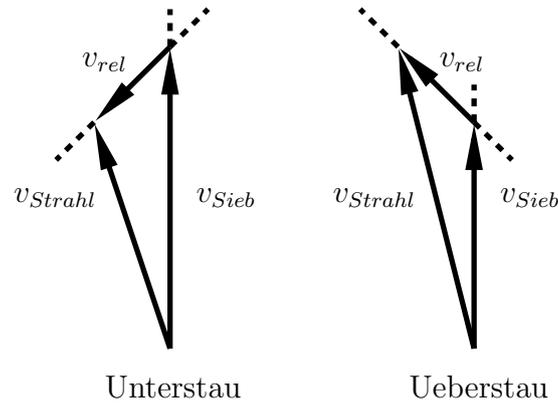


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen Strahl (v_{Strahl}) und Sieb (v_{Sieb}). Links ist der Fall des Unterstaus dargestellt. In diesem Fall eilt der Strahl dem Sieb nach und es ergibt sich eine Relativgeschwindigkeit (v_{rel}), welche sich in der Richtung und in der Größe vom Überstau im rechten Bild stark unterscheidet. Die aus dem Strahl-Sieb-Verhältnis resultierende Relativgeschwindigkeit ist nun verantwortlich für die charakteristische Orientierung der Fasern in den unterschiedlichen Betriebsweisen. [Blechschmidt, 2013]

1.4 Auswirkungen der Faserorientierung auf die Papiereigenschaften

Die Faserorientierung wirkt sich auf viele Papiereigenschaften aus. Dabei spielen die Festigkeiten in Maschinenrichtung und Querrichtung eine wesentliche Rolle. Durch eine stärkere Längsorientierung werden die Festigkeiten in der Maschinenrichtung gesteigert, wobei jedoch auch eine Festigkeitsabnahme in die Querrichtung auftritt. Durch die Steuerung der Faserorientierung können die Festigkeiten während der Produktion im Hinblick auf das Einsatzgebiet des fertigen Produktes optimiert werden. Durch das spezielle Schrumpfungsverhalten einer einzelnen Faser (siehe im nachfolgenden Kapitel 2) kann über die Faserorientierung zusätzlich auch auf das Wölbungsverhalten eines Papierblattes Einfluss genommen werden. Dafür ist die Orientierung in Z-Richtung über die Blattdicke des Papiers auch von entscheidender Bedeutung. Aufgrund einer ungleichmäßigen Orientierung zwischen Oberseite und Unterseite (Faserorientierungszweiseitigkeit) kann es zu Krümmungen kommen, welche zu Problemen in der Weiterverarbeitung führen. Der Grund dafür liegt im unterschiedlichen Schrumpfungsverhalten der beiden Papierseiten, welches durch die Faserorientierung beeinflusst wird. Eine genauere Erklärung über die Einflüsse der Faserorientierung auf das Wölbungsverhalten ist im Kapitel 2.4.3 nachzulesen.

Kapitel 2

Dimensionsstabilität

Unter der Dimensionsstabilität versteht man die Eigenschaft eines Papierblattes die Dimensionen bei einer Änderung des Feuchtegehaltes bestmöglich beizubehalten. Dies ist vor allem notwendig für Papiere, welche in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zum Einsatz kommen oder in ihrer Nutzung und Weiterverarbeitung einen Trocknungs- oder Befeuchtungsvorgang erfahren. Gerade deswegen bekommt die Dimensionsstabilität bei Office-Papieren durch den Kopier- oder Druckprozess einen besonderen Stellenwert. [Jukka, 2008a]

2.1 Klimatische Einflüsse auf die Papiereigenschaften

Papier ist ein hygroskopisches Material, was dazu führt, dass der Feuchtegehalt im Blatt von den klimatischen Bedingungen abhängt. Je nach Klima stellt sich aufgrund der Thermodynamik eine Gleichgewichtsfeuchte im Papier ein, welche von der Trocknungsvorgeschichte, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig ist. Diese Gleichgewichtsfeuchte ist in weiterer Folge für mehrere Papiereigenschaften, wie zum Beispiel Dimensionsstabilität, Festigkeiten, usw., verantwortlich. Die Einflüsse auf die Gleichgewichtsfeuchte werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert. [Fellers, 2009]

2.1.1 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit beschreiben einen klimatischen Zustand. Dabei ist die relative Luftfeuchtigkeit von der Temperatur abhängig. Diese Abhängigkeit kann in einem Mollier-Diagramm dargestellt werden (siehe Abbildung 10). Bei geringerer Temperatur steigt bei gleichbleibendem Wassergehalt der Luft die relative Luftfeuchtigkeit an und es stellt sich eine höhere Gleichgewichtsfeuchte im Papier ein, wodurch sich das Blatt ausdehnt.

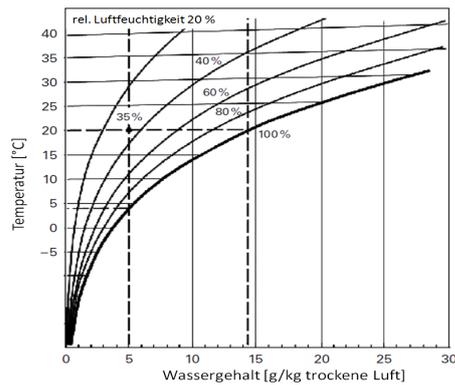


Abbildung 10: Darstellung eines Mollier-Diagramms für Luft. Es zeigt die Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur. [Fellers, 2009]

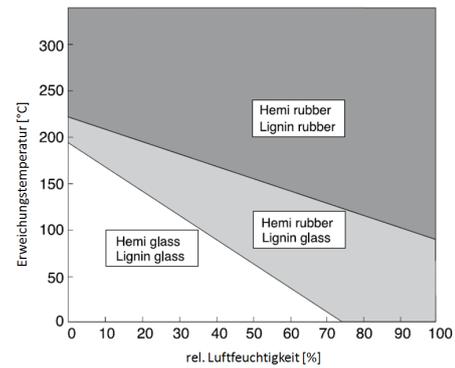


Abbildung 11: Die Abbildung zeigt die Erweichungsbereiche von Hemizellulose und Lignin in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. [Jukka, 2008b]

Des Weiteren haben die Temperatur und die Feuchtigkeit einen Einfluss auf die Erweichung des Lignins und der Hemizellulosen, welche sich auf die Viskoelastizität des Papiers auswirkt. Eine höhere Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit reduzieren den Elastizitätsmodul, wodurch die Festigkeiten abnehmen. Dies kann in weiterer Folge auch zu Verformungen führen, wenn Spannungen - wie Trocknungsspannungen (siehe Kapitel 2.2.3) - im Papier gespeichert sind. [Uesaka, 2001]

2.1.2 Adsorption und Desorption

Papier versucht durch Aufnahme oder Abgabe von Wasser immer ein Feuchtgleichgewicht mit seiner Umgebung zu erreichen. Der Vorgang der Wasseraufnahme wird auch als Adsorption bezeichnet. Der umgekehrte Prozess der Desorption ist ein Trocknungsprozess. Die beiden Prozesse sind zum einen abhängig vom Faserstoff selbst aber auch vom Herstellungsprozess und der Vorbehandlung des Stoffes durch eine Bleiche, Mahlung oder Ähnliches.

Die folgende Abbildung 12 zeigt den Einfluss des Faserstoffes auf den Sorptionsprozess bei 23°C. Gut zu erkennen ist, dass ein Papier aus mechanischem Holzstoff mehr Wasser bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit aufnimmt als Papiere aus Kraftzellstoff, Halbzellstoff (NSSC) oder Baumwolle. Der Grund dafür liegt im höheren Anteil an Hemizellulosen und den amorphen Strukturen der Zellulose, welche mehr Wasser aufnehmen können als kristalline Strukturen. [Uesaka, 2001]

Ein weiterer Einflussparameter auf die Gleichgewichtsfeuchte ist die Trocknungsvorgeschichte. Dabei unterscheidet man Stoffe, die noch nie oder schon mehrmals getrocknet wurden. In der Abbildung 13 zeigt sich dieses Hystereseverhalten. Die Linie 1 beschreibt den ersten Trocknungsprozess, welcher auf einem höheren Feuchtigkeitsniveau liegt als die nachfolgenden Befeuchtungs- und Trocknungsprozesse (Linie 2 und 3). Diese Eigenschaft

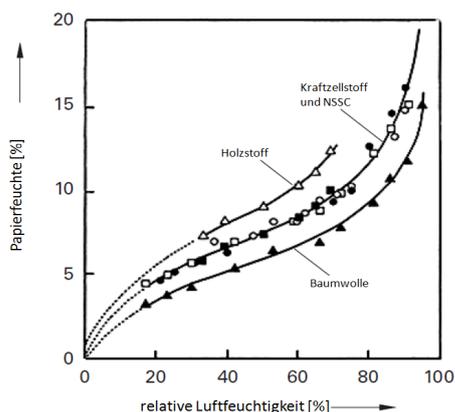


Abbildung 12: Darstellung der unterschiedlichen Sorptionsisothermen für die einzelnen Faserstoffe bei 23°C. Dabei zeigt sich, dass ein Produkt aus mechanischem Holzstoff bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit einen höheren Feuchtegehalt besitzt als ein Papier aus Baumwolle, Kraftzellstoff oder Halbzellstoff (NSSC). [Uesaka, 2001]

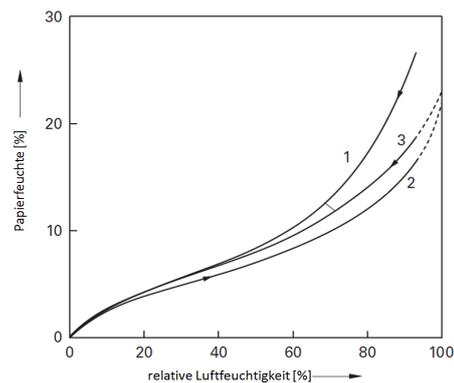


Abbildung 13: Hystereseverhalten eines Papiers bei der Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit. Die Linie 1 zeigt das Verhalten eines noch nie getrockneten Faserstoffes. Danach zeigt die Linie 2 den ersten Befeuchtungsschritt mit dem anschließenden Trocknungsprozess, welcher durch die Linie 3 dargestellt wird. [Uesaka, 2001]

ist zum Teil auf Verhornungseffekte zurückzuführen. Dabei kommt es beim ersten Trocknungsvorgang zu einer Verhornung der Fasern, welche irreversibel ist und diese Stoffe können nicht mehr so viel Wasser aufnehmen. Zusätzlich zeigen diese auch ein besseres Entwässerungsverhalten bei der Papierproduktion. In der Abbildung 13 ist auch zu erkennen, dass weitere Trocknungszyklen zu weiterer Verhornung führen.

2.2 Hygroexpansion

Wie in den vorherigen Kapiteln schon erwähnt, kommt es durch die Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes im Papier zu einer Änderung der Dimensionen. Dieser Vorgang kann durch die Hygroexpansion beschrieben werden.

2.2.1 Definition und Beschreibung

Unter der Hygroexpansion versteht man das Ausmaß der Ausdehnung oder Schrumpfung eines Papierblattes aufgrund einer definierten Feuchtigkeitsänderung im Papier. Somit ermöglicht die Hygroexpansion eine mathematische Beschreibung der Dimensionsänderung. Diese hygroexpansive Ausdehnung ist vergleichbar mit der thermischen Ausdehnung, welche aus der Mechanik bekannt ist. [Kulachenko, 2012]

Im Falle des Papierblattes unterscheiden wir die Ausdehnung in den beiden Richtungen MD und CD. Die Ausdehnung ε wird als Verhältnis der Länge nach der Feuchtigkeitsänderung zur Länge davor definiert. Für die Querrichtung wird die hygroexpansive

Ausdehnung $\varepsilon_{hygro\ cd}$ und für die Maschinenrichtung $\varepsilon_{hygro\ md}$ verwendet. Aus der Ausdehnung lässt sich die Hygroexpansion ermitteln, welche sich aus dem Verhältnis der hygroexpansiven Ausdehnung ε_{hygro} und der Feuchteänderung Δmc zusammensetzt (siehe nachfolgend Formel).

$$\beta = \frac{\varepsilon_{hygro}}{\Delta mc} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Die Hygroexpansion β ist für die beiden Richtungen MD und CD aufgrund der strukturellen Papiereigenschaften unterschiedlich. Laut [Jukka, 2008a] ist die Hygroexpansion in Querrichtung β_{cd} um etwa 3-5 mal höher als in der Maschinenrichtung β_{md} .

2.2.2 Einflussparameter

Die Hygroexpansion wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Wie schon in der Dimensionsstabilität beschrieben, spielt auch hier die Faserorientierung eine entscheidende Rolle, welche in der Abbildung 14 gut zu erkennen ist. Bei einer Steigerung der Anisotropie steigt die Hygroexpansion in der Querrichtung an, wobei zugleich diese in Maschinenrichtung abfällt. Dieses Verhalten verstärkt sich mit zunehmender Dichte des Blattes (siehe Abbildung 14). Der Idealfall eines isotropen Blattes unterscheidet hier nicht zwischen den beiden Richtungen.

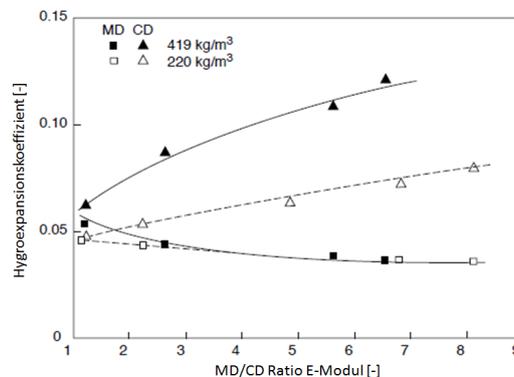


Abbildung 14: Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Hygroexpansion in Querrichtung und Maschinenrichtung von der Anisotropie. Durch eine höhere Anisotropie kommt es zu einer höheren Querschrumpfung oder Querdehnung. Zusätzlich ist der Unterschied zwischen zwei verschiedenen Zellstoffarten mit unterschiedlicher Dichte dargestellt. [Jukka, 2008a]

Der Faserrohstoff sowie das Herstellungs- und Aufbereitungsverfahren haben auch Einfluss auf die Hygroexpansion (siehe Abbildung 14). Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen Anteilen an Hemizellulosen, Lignin und amorphen und kristallinen Strukturen der Zellulosen zwischen den einzelnen Faserstoffen.

2.2.3 Trocknungsspannungen

In der Trockenpartie einer Papiermaschine kommt es immer wieder zu einer ungleichmäßigen Schrumpfung zwischen den beiden Papierseiten. Diese unterschiedliche Behandlung erzeugt ein Biegemoment, welches zu einer Wölbung des Papierblattes führen kann. Dies ist jedoch nicht immer der Fall, weil die Papierbahn durch die Trockensiebe und den Bahnzug gespannt wird, wodurch dem Schrumpf ein Widerstand entgegengebracht wird. Dadurch baut sich eine Spannung im Blattgefüge auf, welche vorerst keine Wölbung des Blattes verursacht. Diese Spannungen werden vom Papiertechniker als Trocknungsspannungen bezeichnet und treten nur in Blättern auf welche nicht frei getrocknet worden sind. Das Ausmaß dieser Spannungen hängt stark von der hygroexpansiven Ausdehnung ab, da Papiere mit hoher Hygroexpansion ein stärkeres Schrumpfungsverhalten aufweisen. Die Trocknungsspannungen werden nur solange im Papierblatt gespeichert, solange der Feuchtigkeitsgehalt die Endfeuchte nach der Produktion nicht übersteigt. Durch einen Befuchtungsvorgang, bei dem die Feuchte über die Produktionsfeuchte hinausgeht, werden diese Spannungen gelöst und es kommt zu einer Wölbung des Papierbogens.

2.3 Wölbungsverhalten von Feinpapieren

Das Wölbungsverhalten von Office-Papieren ist ein entscheidendes Qualitätskriterium, da dieses zu Problemen im Druck- und Kopierprozess führen kann. Ein Papierblatt, welches eine schlechte Planlage aufweist, kann beim Druckprozess zu Staus oder schlechter Druckqualität führen. Das Charakterisieren und die Ursachen der Wölbung werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt.

2.3.1 Definition und Charakterisierung

Die Wölbung eines Papiers ist eine spezielle Art der Dimensionsinstabilität. Dabei wird die Wölbung auch als Curl bezeichnet und durch ein induziertes Biegemoment im Blatt hervorgerufen. Dieses Moment kann unterschiedlicher Herkunft sein und dessen Ursachen werden im Kapitel 2.4 beschrieben. Um die Wölbung zu charakterisieren, wird der Grad der Abweichung von der Planlage herangezogen. In der Praxis werden die folgenden drei unterschiedlichen Curlphänomene, wie in der Abbildung 15 zu erkennen ist, unterschieden. Die Unterscheidung der Wölbung wird nach der Wölbungsachse durchgeführt (siehe Abbildung 15). Wie man erkennen kann, werden die drei Wölbungstypen CD (rollig), MD (schüsseln), und Diagonal unterschieden. Bei Papieren mit geringen Abmessungen (Format A4) ist im Normalfall der Fall des rolligen oder schüsseligen Curls dominant, wobei immer nur einer dieser beiden auftritt. Weiters ist die Richtung der Wölbung wichtig. Aus der Abbildung 15 ist zu erkennen, dass die MD-Wölbung (schüsseln) und CD-Wölbung (rollig) zur Filzseite (FS) oder zur Siebseite (SS) auftreten kann. Um Missverständnisse zu

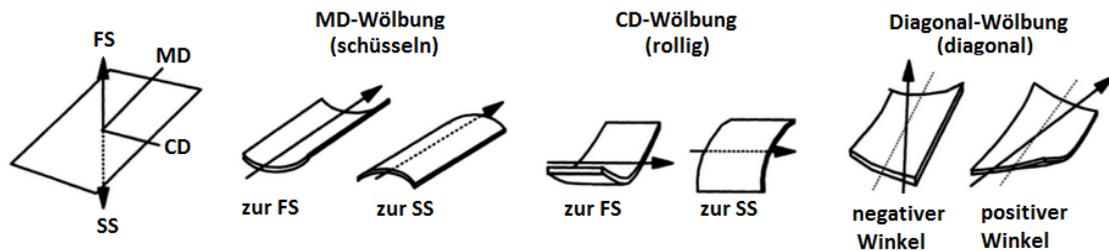


Abbildung 15: Darstellung der einzelnen Wölbungsphänomene schüsseln, rollig und diagonal in den jeweiligen Richtungen zur Siebseite (SS) und zur Filzseite (FS). [Uesaka, 2001]

vermeiden, wird in dieser Arbeit eine positive Wölbung immer in Richtung der Siebseite definiert. Für die Diagonal-Wölbung wird grundsätzlich zwischen positivem und negativem Winkel unterschieden, welcher gleich wie für die Faserorientierung definiert ist. Somit bedeutet ein negativer Winkel eine Ausdrehung gegen den Uhrzeigersinn und ein positiver in Richtung des Uhrzeigersinnes.

Mathematische Beschreibung des Curlverhaltens

Um ein Curlverhalten mathematisch zu beschreiben, sind immer wieder Modelle entwickelt worden. Dabei beschreiben [Carlsson et al., 1980] die Abweichung aus der Planlage in Z-Richtung mit $w(x,y)$ über die folgende Gleichung:

$$w(x, y) = \frac{1}{2}K_x x^2 + \frac{1}{2}K_y y^2 + \frac{1}{2}K_{xy} x y \quad (\text{Eq. 3.2})$$

In der Gleichung sind die beiden Variablen x und y die Dimensionen der Probe. Dabei ist x die Laufvariable in Maschinenrichtung und y in Querrichtung. Die Parameter K_x , K_y und K_{xy} werden als Krümmungs- oder Wölbungsparameter bezeichnet, wobei die Parameter K_x für den CD-Curl, K_y für MD-Curl und K_{xy} für den Diagonal-Curl verantwortlich sind und die Einheit $[1/m]$ besitzen.

2.4 Wölbungstheorien

Die Wölbung von Kopierpapieren kann unterschiedliche Ursprünge besitzen. [Uesaka, 2001] unterscheidet die folgenden vier Planlagestörungen:

1. Viskoelastischer Curl:

Dieses Wölbungsverhalten wird durch einen einseitigen Trocknungs- oder Befeuchtungsschritt hervorgerufen und ist mit dem irreversiblen Curl stark verwandt.

2. Irreversibler Curl:

Der irreversible Curl wird erst durch die Freilegung der im Blatt gespeicherten Trocknungsspannungen verursacht, wobei die Trocknungsspannungen aufgrund des strukturellen Blattaufbaus beziehungsweise durch einseitige Trocknung im Papierblatt aufgebaut werden.

3. Struktureller Curl:

Dieses Curlphänomen wird durch unterschiedliche Zweiseitigkeiten, wie zum Beispiel Faserorientierung oder Füllstoffgehalt, hervorgerufen und ist ein reversibler Prozess.

4. Roll-Set Curl:

Der Roll-Set Curl wird durch eine mechanische Biegung über eine Kante oder kleine Rolle verursacht.

2.4.1 Viskoelastischer Curl

Der viskoelastische Curl wird durch unterschiedliche Trocknungs- oder Befeuchtungsvorgängen zwischen den beiden Papierseiten hervorgerufen. Dabei wölbt sich das Papier nach der Klimatisierung gegen die beheizte Seite. Eine einseitige Befeuchtung führt dazu, dass das Blatt nach Einstellen der Gleichgewichtsfeuchte sich zu der befeuchteten Seite hin wölbt. Diese Phänomene beruhen auf einer irreversiblen viskoelastischen Verformung einer der beiden Papierseiten. Die Abbildung 16 zeigt als Beispiel eine einseitige Befeuchtung der Oberseite (Abbildung 16 b), wodurch nach Erreichen der Ausgangsfeuchte (Abbildung 16 d) ein Curl zur befeuchteten Seite hervorgeht.

Der Grund hierfür liegt in einer viskoelastischen Verformung. Durch die einseitige Befeuchtung kommt es an dieser Seite aufgrund der Hygroexpansion zu einer Ausdehnung. Die gegenüberliegende Seite erfährt keine Befeuchtung und will somit die Dimension halten, wodurch es zu einer Stauchung der befeuchteten Seite und zu einer irreversiblen Überdehnung an der anderen Seite kommt. Nach dem Trocknungsvorgang erreicht die zuvor befeuchtete Seite annähernd ihre ursprüngliche Dimension wieder, wodurch ein Biegemoment induziert wird, welches sich in einer Wölbung in Richtung dieser Seite auszeichnet. Dasselbe Prinzip gilt für eine einseitige Trocknung, jedoch wird dabei die gegenüberliegende Seite nicht überdehnt, sondern irreversibel gestaucht. Dies führt nach

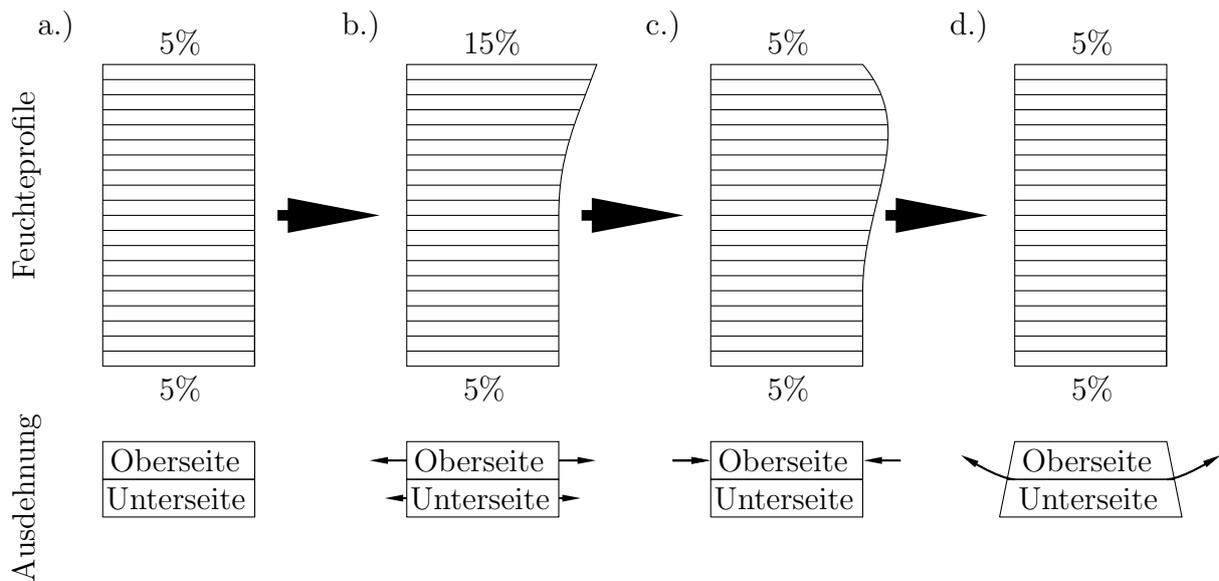


Abbildung 16: Darstellung der Theorie des Viskoelastischen Curls. Durch eine einseitige Befeuchtung an der Oberseite (b) kommt es an dieser aufgrund der Hygroexpansion zu einer Ausdehnung. Die Unterseite wird aufgrund der gestreckten Oberseite überdehnt. Während des Trocknungsvorganges (c) schrumpft die Oberseite bis zur Ausgangslänge, wobei jedoch die Unterseite durch die Überdehnung nicht in ihre Ausgangslänge schrumpfen kann, da diese Überdehnung irreversibel ist. Am Ende des Prozesses (d) wirkt ein Curl zur Oberseite, da die überdehnte Unterseite ein Biegemoment hervorruft. (geänderte Abbildung von [Uesaka, 2001])

der Klimatisierung zu einer Wölbung gegen die beheizte Seite. Dieser Effekt wird in der letzten Trockenzone einer Papiermaschine auch zum Steuern des Curls verwendet (siehe Abbildung 17).

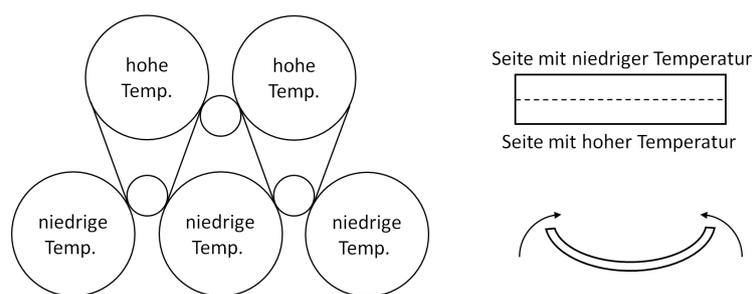


Abbildung 17: Die Abbildung zeigt die Steuermöglichkeit eines Viskoelastischen Curls in der Trockenpartie einer Papiermaschine. Durch die höhere Temperatur an den oberen Trockenzylindern wird die Papierunterseite stärker getrocknet, wodurch diese mehr schrumpft. Infolge der hohen Schrumpfung an der Unterseite wird die Papieroberseite viskoelastisch deformiert (gestaucht). Während der Klimatisierung des Papiers nimmt es Feuchtigkeit auf und die Unterseite dehnt sich aus. Die Oberseite kann sich nicht so weit ausdehnen, da diese zuvor gestaucht wurde und es kommt zu einer Wölbung zur Papieroberseite. [Uesaka, 2001]

Durch eine unterschiedliche Beheizung der oberen und unteren Trockenzylinder wird be-

wusst eine einseitige Trocknung der Papierbahn hervorgerufen, wodurch eine geringe Vorwölbung des Papiers erreicht wird. Die Abbildung 17 zeigt diesen Vorgang. Durch eine höhere Temperatur an den oberen Trockenzylinder wird die Papierunterseite stärker getrocknet. Die Unterseite erfährt eine starke Schrumpfung, welche die Oberseite viskoelastisch deformiert. Nach dem Produktionsprozess nimmt das Papier wiederum Feuchtigkeit aus der Luft auf, wodurch sich die Unterseite ausdehnt. Die Oberseite kann sich nicht so stark ausdehnen, weil diese zuvor irreversible deformiert wurde. Dieser Prozess führt somit zu einer Wölbung zur Papieroberseite.

2.4.2 Irreversibler Curl

Der irreversible Curl wird durch Freilegung der Trocknungsspannungen (siehe Kapitel 2.2.3) hervorgerufen. Dabei werden durch eine Befeuchtung die Spannungen, welche im Papier aufgrund der verhinderten Schrumpfung gespeichert sind, befreit.

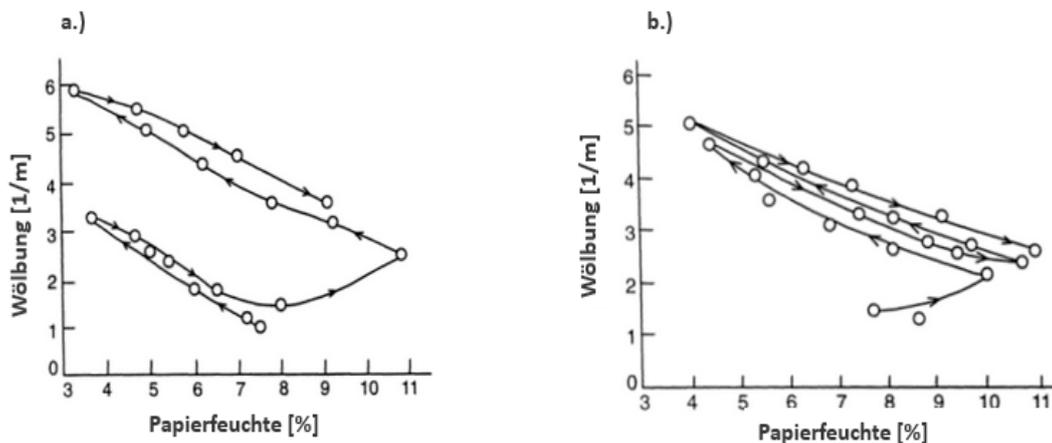


Abbildung 18: Darstellung des Irreversiblen Curls. a.): Beginnend mit einem Trocknungsschritt wird zuerst die Wölbung verstärkt. Durch den anschließenden Befeuchtungsschritt bis zur Ausgangsfeuchte wird der Curl wieder reduziert. Durch eine weitere Befeuchtung auf einen noch höheren Wasseranteil steigt der Wölbungswert an. Dies ist auf die Trocknungsspannungen zurückzuführen. Die nachfolgenden Trocknungs- und Befeuchtungszyklen zeigen ein reversibles Verhalten, welches auf einen strukturellen Curl zurückzuführen ist (siehe Abbildung 2.4.3).

b.): Durch einen Befeuchtungsvorgang am Beginn werden die Trockenspannungen freigelegt, wodurch sich der Curl erhöht. Danach ist wieder der reversible strukturelle Curl zu erkennen. [Uesaka, 2001]

Die freigelegten Spannungen induzieren ein Biegemoment, welches die Wölbung hervorruft (siehe Abbildung 18). Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass dies erst ab einer Papierfeuchte, welche höher als die Produktionsfeuchte ist, in Gang gesetzt wird. Die grundlegende Ursache der Trocknungsspannungen liegt auch hier in einer einseitigen Trocknung, wie es auch für den viskoelastischen Curl beschrieben wird. Deswegen wird in mancher Literatur, wie zum Beispiel [Jukka, 2008a], keine Unterscheidung zwischen diesen beiden gemacht.

2.4.3 Struktureller Curl

Der strukturelle Curl ist ein reversibles Wölbungsverhalten, welches aufgrund des strukturellen Aufbaus des Papierblattes hervorgerufen wird. Verantwortlich hierfür ist die unterschiedliche Hygroexpansion auf beiden Papierseiten. Wie in den zuvor erwähnten Kapiteln spielen hierbei die Faserorientierungs-, Füllstoff-, und andere Zweiseitigkeiten die Hauptrolle.

Durch eine hohe Füllstoffzweiseitigkeit kommt es an der füllstoffreichen Papierseite zu einer geringeren Hygroexpansion, wodurch der Curl nach einem Trocknungsprozess in die Richtung der füllstoffarmen Seite weist.

Das strukturelle Wölbungsverhalten infolge der Faserorientierung ist in der Ursache der unterschiedlichen Hygroexpansivität zwischen den Papierseiten wie folgt zu finden: Die spezielle Art der Dimensionsinstabilität, welche zum reversiblen Curl führt, ist stark vom eingesetzten Rohstoff abhängig, da alle Faserrohstoffe unterschiedliche Schrumpfungs- und Quellungsverhalten besitzen. Während der Trocknung von Faserstoffen kommt es zu einer Schrumpfung der einzelnen Fasern in Querrichtung, welche bis zu 20 Prozent der Ausgangsdicke betragen kann. In Längsrichtung der Faser ist der Schrumpfungseffekt vernachlässigbar klein. [Wahlstroem, 2009]

Dieses spezielle Schrumpfungsverhalten der Fasern bewirkt bei einem Trocknungsvorgang je nach Faserorientierung eine unterschiedliche Veränderung der Dimensionen im Papierblatt in den einzelnen Richtungen. Im extremsten Falle einer Anisotropie von 1 (gleichmäßige Ausrichtung der Fasern in alle Richtungen) kommt es zu einer gleichmäßigen Schrumpfung in Maschinenrichtung und Querrichtung. Mit steigender Anisotropie kommt es zu einem stärkeren Querschrumpf der Papierbahn, da die Fasern stärker in der Maschinenrichtung orientiert sind und hauptsächlich in ihrer Dicke schrumpfen.

In weiterer Folge führt nun eine Zweiseitigkeit in der Anisotropie während eines Trocknungsprozesses zu einem unterschiedlichen Schrumpf (Hygroexpansion) zwischen oberer und unterer Papierseite, welcher somit ein Biegemoment im Blatt erzeugt. Dieses Biegemoment kann nun eine Wölbung des Papierblatts hervorrufen. Der umgekehrte Vorgang der Befeuchtung führt zu einer Faserquellung, wodurch es zu einer Expansion kommt, welche an den beiden Papierseiten aufgrund einer Faserorientierungszweiseitigkeit unterschiedlich ist. Wiederum entsteht ein Biegemoment, welches einen Curl hervorrufen kann. In der Abbildung 19 ist ein Beispiel für den strukturellen Curl aufgrund der Faserorientierung dargestellt. Die linke Seite zeigt ein schüsseliges Wölbungsverhalten infolge einer Anisotropiezweiseitigkeit. Die Papierunterseite (durchgezogene Ellipse) besitzt eine geringere Anisotropie (Verhältnis der Hauptachse zur Nebenachse der Ellipse) als die Papieroberseite (strichlierte Ellipse), wodurch unterschiedliche Hygroexpansionen in Maschinenrichtung und Querrichtung zwischen den beiden Papierseiten zustande kommen. Während eines Trocknungsvorganges wird nun die Oberseite in Querrichtung viel stärker schrumpfen als die Papierunterseite und somit entsteht eine Wölbung zur Oberseite.

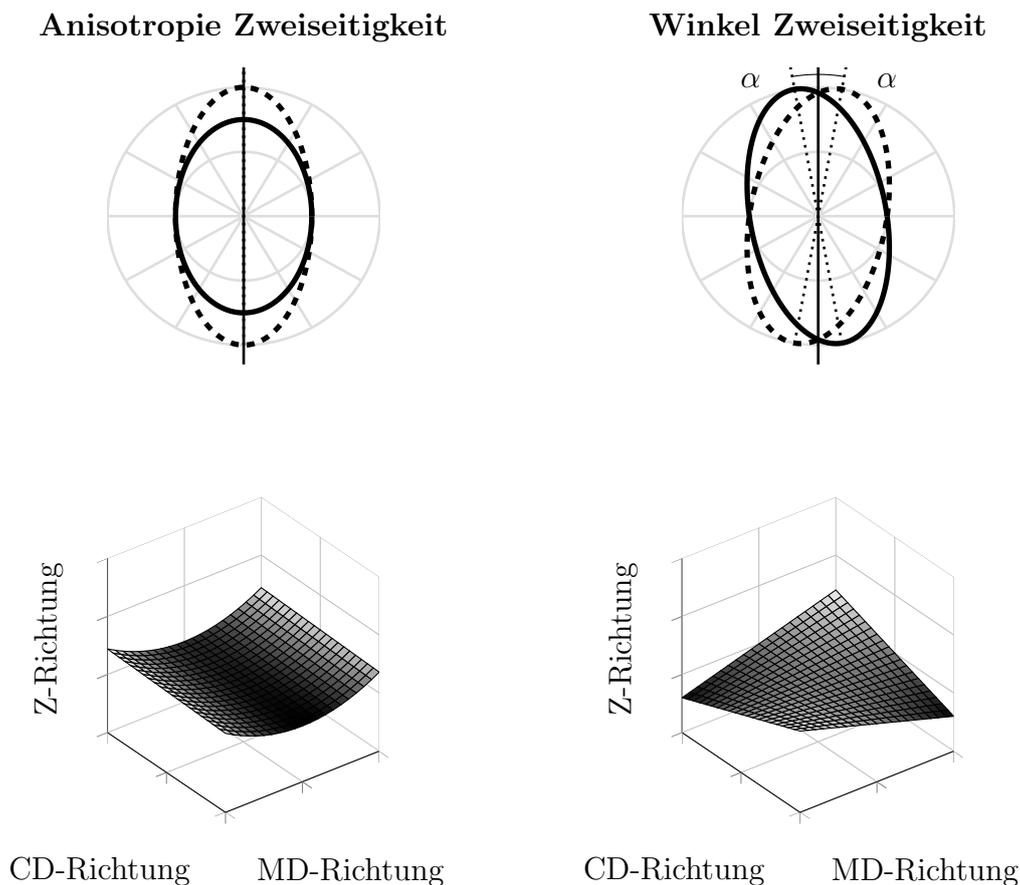


Abbildung 19: Darstellung der Auswirkungen von Faserorientierungszweiseitigkeiten auf das Wölbungsverhalten. Links: Durch Anisotropieunterschiede zwischen der Ober- und Unterseite des Papierblattes entsteht beim Trocknen ein MD-Curl zur Seite mit höherer Anisotropie, weil die Seite mit höherer Anisotropie einen höheren Querschrumpf aufweist. Rechts: Die Winkel Zweiseitigkeit führt zu einer unterschiedlichen Hauptschrumpfungsrichtung welche von der Maschinenrichtung abweicht. Dadurch entsteht der Diagonal-Curl, welcher sich durch das Aufstehen der gegenüberliegenden Ecken zeigt.

Die rechte Abbildung zeigt die Ursache für einen Diagonal-Curl. Durch eine Faserorientierungswinkelzweiseitigkeit kommt es zu einer unterschiedlichen Schrumpfung der beiden Papierseiten bezüglich der Richtung. Da die Papieroberseite (strichlierte Ellipse) einen positiven Faserorientierungswinkel aufweist, schrumpft diese insbesondere normal zu diesem Winkel. Die Papierunterseite (durchgezogene Ellipse) besitzt einen negativen Winkel und schrumpft hauptsächlich normal zu dieser Hauptausrichtung. Diese unterschiedliche Schrumpfrichtung bewirkt ein diagonales Wölbungsverhalten, wodurch die Ecken des Papierblattes aus der Planlage kommen.

Das reversible Wölbungsverhalten des strukturellen Curls kann mathematisch auf den Grundlagen der mechanischen Biegung, wie im Kapitel 2.3.1 erwähnt, beschrieben werden. [Hirn und Bauer, 2006] haben für den Wölbungsparameter K_y das folgende vereinfachte Modell vorgestellt, welches für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet wird:

$$K_y [1/m] = \frac{2 \beta_{cd} (A_{BS} - A_{TS})}{t} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Aus der Gleichung lässt sich erkennen, dass die Wölbung in CD-Richtung eine Funktion der Hygroexpansion, der Anisotropiedifferenz zwischen der Unter- und Oberseite und der Papierblattdicke ist. Für die Ermittlung der Hygroexpansion β_{cd} wird die Korrelation der Hygroexpansion in Querrichtung und dem Tensile Stiffness Index in Querrichtung von [Lindblad und Fuerst, 2007] für Kopierpapieren verwendet. Die folgende Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang:

$$\beta_{cd} [\%] = \frac{3,3}{TSI_{CD} - 0,04} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Die Differenz der Anisotropie ($A_{BS}-A_{TS}$) wird für die gesamte Arbeit zwischen Unterseite minus Oberseite gewählt, damit ein positiver Curl-Wert einer Wölbung zur Siebseite entspricht. Die Anisotropie der beiden Seiten wird über die Sheet-Splitting Methode ermittelt und die Dicke t des Papierblattes wird direkt vermessen, bevor der Krümmungsparameter berechnet wird.

Für den Diagonalwölbungsparameter wird die folgende Gleichung nach [Niskanen, 1993] verwendet:

$$K_{xy} = \frac{2 (\alpha_{BS} - \alpha_{TS}) (\beta_{md} + \beta_{cd})}{t} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

In dieser Gleichung wird die Differenz der Faserorientierungswinkel ($\alpha_{TS}-\alpha_{BS}$) zwischen oberer und unterer Papierseite mithilfe der Sheet-Splitting Methode ermittelt. Zusätzlich werden die Hygroexpansionskoeffizienten β_{md} und β_{cd} verwendet, welche wie zuvor mit der Korrelation von [Lindblad und Fuerst, 2007] ermittelt werden.

2.4.4 Roll-Set Curl

Der Roll-Set Curl wird durch eine mechanische Biegung des Papierblattes um eine kleine Walze oder Kante hervorgerufen. Bei diesem Curl handelt es sich ausschließlich um eine Wölbung in Maschinenrichtung (rollig). In modernen Kopier- und Druckaggregaten wird ein Decurl-System, welches auf diesem Prinzip beruht, genutzt. Dabei wird der Bogen über einen kleinen Durchmesser geführt um einem Curl, welcher aufgrund anderer Ursachen entsteht, entgegenzuwirken.

Durch eine Lagerung des Papiers als Rolle, besitzt das Papier am Kern der Rolle ebenfalls einen Curl in Maschinenrichtung. Beim Schneiden dieser Rollen auf Formatpapieren wird versucht diese Vorwölbung mithilfe einer Brechstange, über welche die Bahn geführt wird, auszugleichen.

Teil II

Praktische Untersuchung - Durchführung und Methoden

Kapitel 3

Messmethoden

In diesem Kapitel werden die angewandten Messmethoden vorgestellt. Dazu werden die Messprinzipien genauer erklärt und der Unterschied zu anderen Messmethoden dargestellt. In der nachfolgenden Grafik 20 ist ein Überblick über die angewandten Messmethoden bildlich dargestellt.



Abbildung 20: Darstellung der Messparameter (links) und den angewandten Messmethoden (rechts). Für die Bestimmung der Faserorientierung werden die Methoden optisch-online, akustisch und die Sheet-Splitting Methode durchgeführt. Die Wölbung wird visuell mit Vergleichskurven bewertet und die Asche und Stärkeverteilungen werden ebenfalls mit einer Splitting-Methode analysiert.

3.1 Bestimmung der Faserorientierung

Zur Bestimmung der Faserorientierung gibt es viele unterschiedliche Messmethoden, welche auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen. Die Hauptunterteilung erfolgt in mechanisch, optisch und akustisch. In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Methoden mit dem dahinterstehenden physikalischen Prinzip dargestellt.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden die optischen Methoden mithilfe der Laserreflexion und der bildanalytischen Auswertung angewandt. Zusätzlich wird die akusti-

Prinzipien	Methoden
mechanisch	Nullreißlänge (Zero-Span) Bruchlastverhältnis längs/quer (R30-Methode) Erhitzungsschrumpfungen
optisch	Reflexion mit IR-Laser Transmission (Lippke) Auszählen eingefärbter Fasern
akustisch	TSO-Tester von Lorentzen und Wettre

Tabelle 3.1: Übersicht über Faserorientierungsmessmethoden

sche Methode mit dem TSO-Tester von Lorentzen & Wettre verwendet. Die eingesetzten Methoden mit Ihren Stärken und Schwächen werden in den nächsten Kapiteln näher beschrieben.

3.1.1 Dual Sided Online FO Sensor von ABB

Der Dual Sided Online FO Sensor von ABB ist eine optische Messmethode und verwendet zur Bestimmung der Faserorientierung die Reflexion eines polarisierten Laserstrahles an den Faseroberflächen. Dabei handelt es sich um eine indirekte Messung, weil aufgrund der reflektierten Lichtmenge auf die Faserverteilung geschlossen wird. In der Abbildung 21 ist der Aufbau des Messkopfes dargestellt.

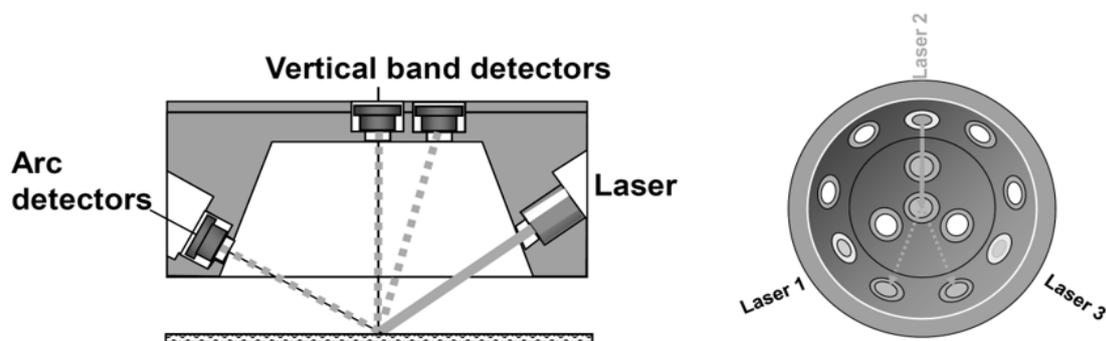


Abbildung 21: Aufbau des Messkopfes mit den einzelnen Lasern und Detektoren. Es sind 3 Laser im Winkel von 120 Grad versetzt angeordnet. Jeder Laser besitzt zwei Arc Detektoren und zwei Vertical-band Detektoren um die Orientierung der Fasern zu bestimmen. [ABB, 2008]

Der Messkopf besteht aus drei Lasern, welche im Winkel von 120 Grad angeordnet sind. Das Laserlicht wird an den Faseroberflächen reflektiert und mit den unterschiedlichen Detektoren (siehe Abbildung 22 Vertical-band und Arc Detektoren) wird die Streuung des Lichtes ermittelt, welche von der Lage der einzelnen Fasern abhängig ist. Für jeden Laser werden 4 Detektoren eingesetzt, wobei der zentrale Detektor im Messkopf für alle drei Laser genützt wird. Je nachdem, welche Menge an Laserlicht an den unterschiedlichen Detektoren gemessen wird, kann die Ausrichtung der Fasern ermittelt werden. Wie die

Abbildung 22 beispielhaft darstellt, würde eine Faser, die in Richtung des Laserstrahles liegt, dieses in Richtung der Arc Detektoren streuen und eine Faser, die quer dazu liegt, reflektiert das Licht zu den Vertical-band Detektoren.

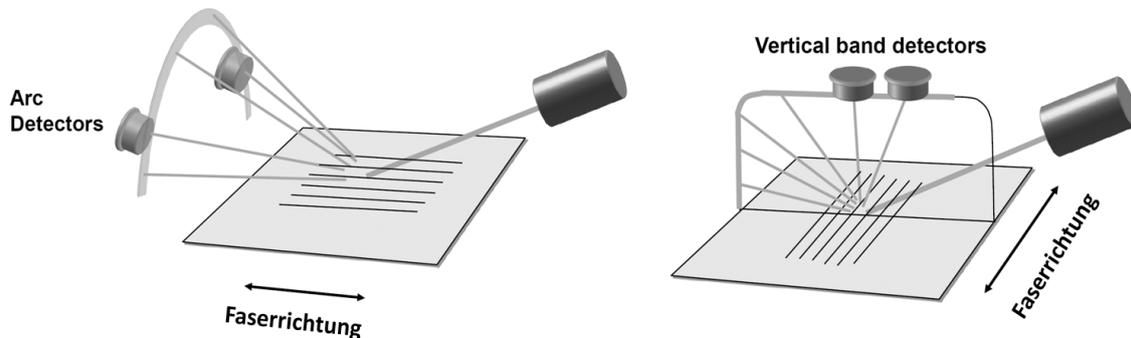


Abbildung 22: Darstellung der unterschiedlichen Reflexionen des Laserlichts aufgrund der Faserlage. Durch eine Lage in Richtung des Laserstrahles wird das Licht zu den Arc-Detektoren reflektiert (links). Wenn die Fasern quer zur Laserstrahlrichtung liegen wird das Licht zu den Vertical-band Detektoren reflektiert. [ABB, 2008]

Aufgrund der dreifachen Anordnung kann so die genaue Faserorientierung bestimmt werden. Das Messprinzip ist berührungsfrei, weshalb es auch online einsetzbar ist. Aufgrund der reflektierten Laserlichtmenge, welche gemessen wird, kann dieser Sensor die Faserorientierung bis zu einer gewissen Eindringtiefe bestimmen. Um die Zweiseitigkeit der Orientierung in einem Blatt Papier zu ermitteln, wird das Messsystem an beiden Seiten installiert. Ein Nachteil in der Messmethode besteht darin, dass diese sensitiv auf die Oberflächeneigenschaften der vermessenen Fasern und das Schrumpfungsverhalten der Papierbahn ist.

3.1.2 TSO-Tester von L&W

Die akustische Messmethode von L&W wird verwendet, um den Zugsteifigkeitsindex im Papierblatt zu messen. Der Zugsteifigkeitsindex (Tensile Stiffness Index - TSI) ist durch das Verhältnis des Elastizitätsmodules mit der Dichte definiert und besitzt die Einheit kNm/g . Durch die akustische Ausbreitung von Ultraschallwellen im Papier kann über die folgende mathematische Beziehung mithilfe der dimensionslosen Konstante c und der Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit v in $[\text{m/s}]$ auf den TSI rückgeschlossen werden.

$$TSI = c v^2 \quad (\text{Eq. 1.1})$$

$$\left[\frac{\text{kNm}}{\text{g}} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{s}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Der TSO-Tester von L&W misst nun, wie in der Abbildung 23 zu erkennen, die Zeit, welche eine Ultraschallwelle mit einer Frequenz von 60kHz benötigt, um eine Strecke von 100mm im Blatt zurückzulegen. Somit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt.

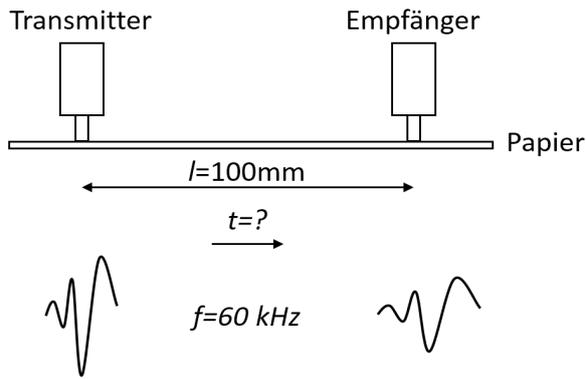


Abbildung 23: Darstellung des TSO-Tester Messprinzips. Gemessen wird die Zeit, die eine Ultraschallwelle mit 60kHz für eine Strecke von 100mm benötigt. Aus diesem Messwert wird die Geschwindigkeit und in weiterer Folge der TSI berechnet. [Lindblad und Fuerst, 2007]

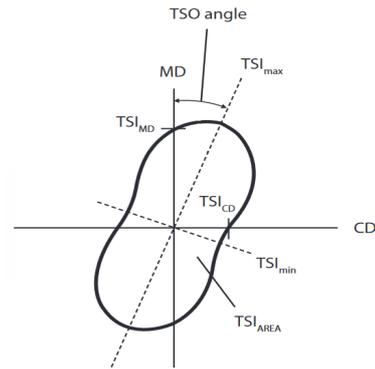


Abbildung 24: Darstellung der Messergebnisse des TSO-Testers in einem Polardiagramm mit allen Parametern, wie TSO_{Angle} , TSI_{MD} , TSI_{CD} , TSI_{Max} , TSI_{Min} und TSI_{Area} . [Lindblad und Fuerst, 2007]

Durch eine kreisförmige Anordnung von 8 Transmitter- und Empfängerpaaren im Winkel von 22,5 Grad wird der Tensile Stiffness Index in den unterschiedlichen Richtungen ermittelt. Die Ergebnisse werden in einem Polardiagramm dargestellt und eine passende Kurve gefittet (siehe Abbildung 24). Aus dem Polardiagramm lassen sich die Parameter TSO_{Angle} , TSI_{MD} , TSI_{CD} , TSI_{Max} , TSI_{Min} und TSI_{Area} ablesen. Für uns sind dabei der TSO_{Angle} und die beiden Parameter TSI_{Max} und TSI_{Min} am wichtigsten, da diese stark mit der Faserorientierung korrelieren. Dabei korreliert der TSO_{Angle} mit dem Faserorientierungswinkel und das Verhältnis von TSI_{Max} zu TSI_{Min} ist korreliert zur Faserorientierungsanisotropie.

Ein weiterer wichtiger Wert ist der TSI_{CD} , weil dieser laut [Lindblad und Fuerst, 2007] mit der Hygroexpansion in Querrichtung korreliert und somit lässt sich die Hygroexpansion über den Wert annähern (siehe Kapitel 2.4.3).

Ein Nachteil dieser Messmethode ist die indirekte Messung der Faserorientierung. Dazu kommt noch, dass der Tensile Stiffness Index stark von der Schrumpfung in der Papiermaschine abhängig ist, wodurch gerade im Randbereich das TSI Ratio max zu min höhere Werte annimmt, weil hier die höchsten Schrumpfungen auftreten.

3.1.3 Bildanalytische Messung mit Sheet-Splitting Methode

Für die Bildanalytische Messung der Faserorientierung muss das Blatt Papier in einzelne Faserlagen gespalten werden, um die einzelnen Fasern zu erkennen. Danach werden die Bilder der einzelnen Faserlagen ausgewertet. [Hirn und Bauer, 2007]

Zur Ermittlung der Faserorientierung werden aus der Papierprobe einzelne Proben mit den Abmessungen 9 cm x 4 cm exakt in Maschinenrichtung herausgeschnitten. Um einen aus-

reichenden Kontrast in den Bildern zu erhalten, wird die Probe beim nächsten Vorbereitungsschritt mit einer 0,1%igen Cartasol Schwarzlösung für 24h eingefärbt. Anschließend wird das Muster in einer dafür vorgesehenen Presse für 2 Tage zwischen Löschpapieren getrocknet. Im nächsten Schritt wird die Probe in einzelne Lagen gespalten. Dafür wird eine handelsübliche Laminatfolie verwendet. Die Probe wird zuerst mit der Unterseite (Siebseite) auf eine Laminatfolie der Größe 10,5 cm x 5,5 cm gelegt. Im nächsten Schritt wird rund um das Muster eine hitzebeständige Kunststoffolie angebracht. Danach wird eine zweite Laminierfolie darüber gelegt. Das gesamte Sandwich wird nun mit einem Laminieraggregat eingeschweißt. Sobald dieses das Gerät wieder verlässt, wird die noch warme verklebte Probe mit den Laminierfolien auf beiden Seiten auseinander gezogen und man erhält zwei Lagen welche auf jeweils einer Folie kleben. Die beiden Seiten werden richtig beschriftet und danach wird jede dieser Seiten nach derselben Vorgehensweise weiter gespalten, bis auf den Folien nur mehr einzelne Fasern erkennbar sind. In unserem Fall erhalten wir für 80 g/m² zwischen 20 und 24 Lagen. Die gespaltenen Lagen werden dann komplett einlaminieren, um die Proben zu schützen. Der Ablauf ist in der folgenden Abbildung 25 zu sehen.

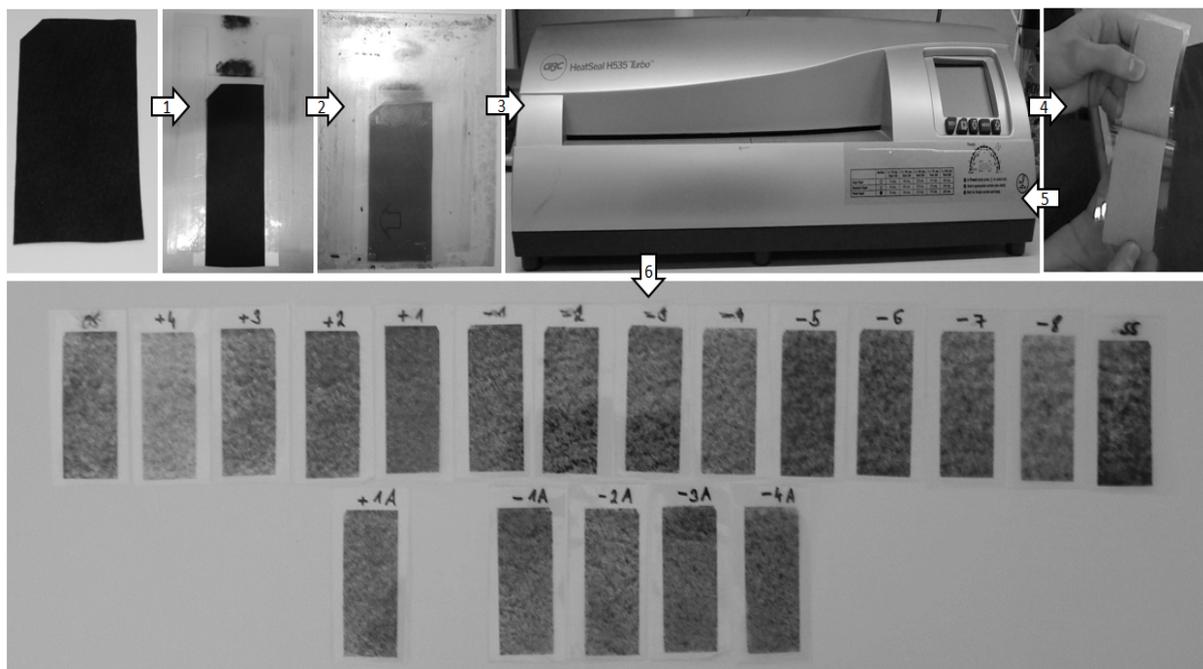


Abbildung 25: Die Abbildung zeigt das Vorgehen beim Sheet-Splitting für die Messung der Faserorientierung in Z-Richtung. Zu Beginn wird die schwarz eingefärbte Probe in zugeschnittene Laminatfolien gelegt. Zusätzlich wird eine hitzebeständige Kunststoffolie an den Rändern der Probe platziert. Dieses Sandwich wird einlaminieren und gespalten und die einzelnen Lagen werden zusätzlich einlaminieren. Die einzelnen Proben werden solange gespalten bis man zirka 20 bis 25 Lagen erhält.

Als nächster Schritt folgt der Scanprozess. Die einzelnen Lagen werden beginnend mit der Oberseite nacheinander mit einem hochauflösenden Scanner der Marke Nikon eingescannt.

Die Abbildung 26 zeigt ein Bild des Fasernetzwerkes einer Lage, wie es für die Auswertung herangezogen wird.

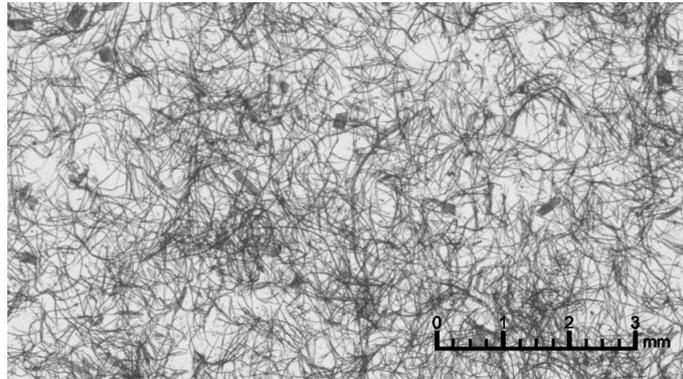


Abbildung 26: *Fasernetzwerk einer Lage von der Sheet-Splitting Methode.*

Um die Bilder richtig auszuwerten, muss zunächst noch ein Rahmen um das Bild gesetzt werden, damit die Richtungen MD und CD genau definiert sind. Abschließend wird durch eine Matlab-Routine jedes einzelne Bild auf seine Faserorientierung ausgewertet. Als Ergebnis erhalten wir eine Z-Verteilung des Faserorientierungswinkels und der Faserorientierungsanisotropie. Der Vorteil dieser Methode ist, dass es sich dabei um eine direkte Messung der statistischen Verteilung der Fasern handelt. Nachteilig zu sehen ist jedoch der hohe Zeitaufwand und die Zerstörung der Proben durch das Analyseverfahren.

3.2 Bestimmung der Wölbung

Für die Bestimmung des Wölbungsgrades spielt die Probengröße eine sehr wichtige Rolle. Die Wölbung eines Blattes ist grundsätzlich ein Zusammenspiel der Wölbungen in den einzelnen Richtungen, wie Maschinenrichtung, Querrichtung und diagonal. Dabei ist im Normalfall eine dominante Wölbungsrichtung vorhanden, welche mit unterschiedlichen Methoden bestimmt und auch angegeben wird.

Die einfachste Methode, welche auch in dieser Arbeit angewandt wird, ist dabei die Bestimmung der Wölbung in Querrichtung (schüsseln) oder Maschinenrichtung (rollig) eines Blattes mithilfe eines Curvature Charts. Auf diesem Chart sind mehrere Linien, welche unterschiedliche Radien besitzen (siehe Abbildung 27), aufgezeichnet.

Aus diesen Kurven lässt sich der Krümmungswert mit der Einheit m^{-1} aus den Radien errechnen. Zur Bestimmung wird die Wölbung der Probe mit den Linien auf dem Chart verglichen und der am besten zur Probenkrümmung passende Krümmungswert abgelesen. Die mathematische Beziehung zwischen den Wölbungswerten am Chart und dem Wölbungsradius in [m] lautet wie folgt:

$$W\oelbung = \frac{10}{r[m]} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

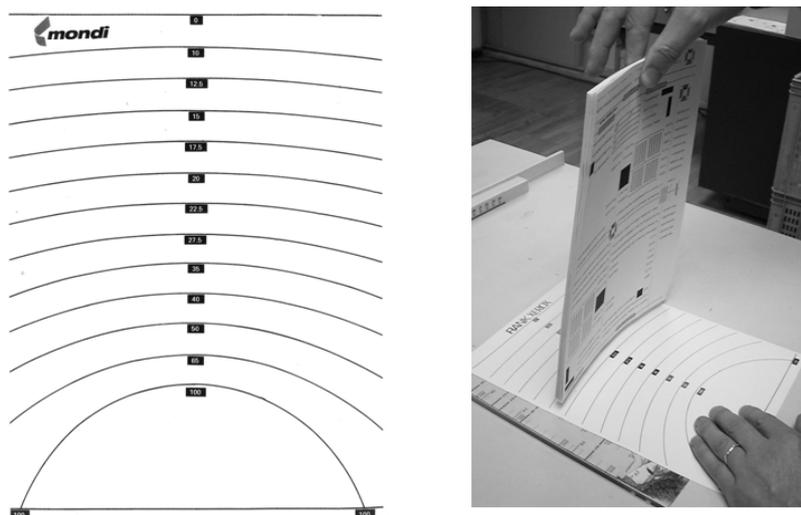


Abbildung 27: Darstellung der Bestimmung der Wölbung eines Papierstapels. Auf der linken Seite ist das Wölbungs-Chart mit den Vergleichskurven dargestellt. Rechts ist die Bestimmung der Wölbung mit dem Chart zu sehen.

Aus dem Wölbungswert lässt sich somit der Radius mit 10 dividiert durch den Wölbungswert berechnen und in weiterer Folge kann der Wölbungsparameter mit 1 durch den Radius mit der Einheit [1/m] ermittelt werden. Eine weitere einfache Methode ist das Messen der Höhe der abgehobenen Ecken eines Blattes, welches auf einer ebenen Fläche liegt. Aus diesem Wert lässt sich wiederum der Krümmungswert ermitteln. [Uesaka, 2001]

Die Bestimmung der Diagonal-Wölbung kann nicht mit dem Chart erfolgen. Um den twist Curl zu beurteilen, wird eine visuelle Beurteilung mit einem Notensystem von 0 bis 3 durchgeführt.

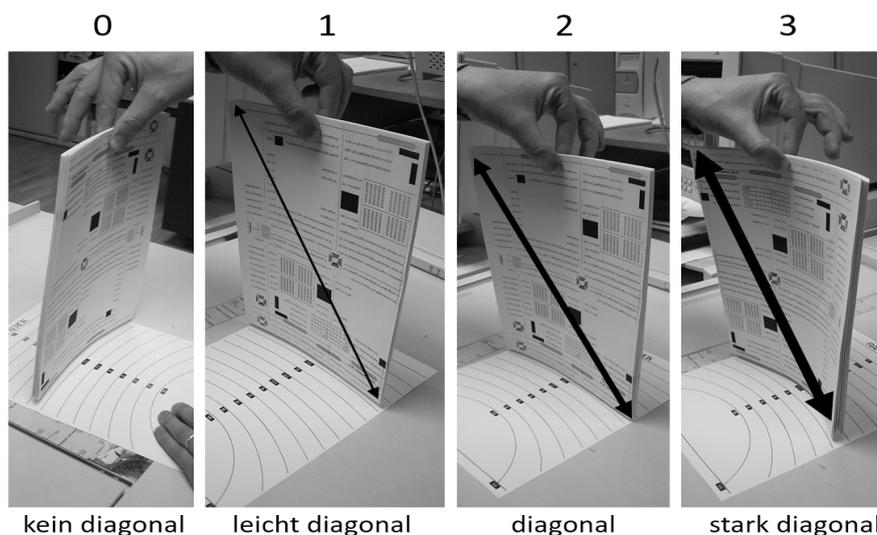


Abbildung 28: Darstellung der Bestimmung des twist Curls mit der Beurteilung der Wölbung über das Benotungssystem 0 bis 3.

3.3 Bestimmung der Füllstoffzweiseitigkeiten

Für die Messung der Füllstoffzweiseitigkeit ist es ebenfalls notwendig, die Proben in einzelne Lagen zu spalten. Diese Untersuchungen werden direkt bei der Firma Mondi in Hausmening durchgeführt. Die Bestimmungsmethode der Füllstoff Z-Verteilung wird nach der internen Durchführungsvorschrift der Firma Mondi abgehandelt.

Für die Messung der Füllstoffzweiseitigkeit wird eine ca. 60cm^2 große Probe mittels Klebeband in ca. $10\mu\text{m}$ dicke Lagen gespalten. Von jeder Lage wird das Papiergewicht bestimmt. Der Füllstoff wird mit Salzsäure vom Klebeband gelöst und das dabei frei gewordene Calcium wird komplexometrisch bestimmt.

Dieser Vorgang wird für alle Lagen durchgeführt und als Ergebnis erhalten wir den Füllstoffgehalt in Abhängigkeit der Z-Position über die Blattdicke. [Mondi, 2014]

3.4 Bestimmung der Stärkezweiseitigkeiten

Zur Bestimmung der Stärkezweiseitigkeit wird ebenfalls eine Z-Verteilung ermittelt. Für diese Messung wird das Papier, wie zuvor im Kapitel 3.3 beschrieben, mit Klebeband in ca. $10\mu\text{m}$ dicke Lagen gespalten. Die Stärke wird mit Wasser vom Klebestreifen gelöst, enzymatisch in Glucose umgewandelt und der Gehalt mittels Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) quantitativ bestimmt.

Wiederum erhalten wir als Ergebnis eine Verteilung der Stärke in Abhängigkeit der Z-Position, woraufhin wir einen Einblick in die Zweiseitigkeit erhalten. [Mondi, 2014]

3.5 Bestimmung der Feuchtezweiseitigkeiten

Zur Bestimmung der Feuchtezweiseitigkeit wird die Probe an beiden Seiten mit der ATR-Spektroskopie vermessen. Dabei erreichen wir eine Eindringtiefe von ca. $5\mu\text{m}$. Durch die Spektroskopie erhalten wir die anteilmäßige Intensität der absorbierten IR-Strahlung für unterschiedliche Inhaltstoffe wie Zellulose, Calciumcarbonat und Wasser. Unser Ziel ist es nun das Mengenverhältnis zwischen Wasser und Zellulose an den beiden Papierseiten zu bestimmen, um eine Feuchtezweiseitigkeit bestimmen zu können. Dabei können wir keine absoluten Feuchtwerte darstellen, da dies wegen einer aufwendigen Kalibration zu zeitintensiv ist. Für die Auswertung wird über eine numerische Integration die Fläche zwischen den Wellennummern von 920 bis 1186 für die Zellulose und 2997 bis 3656 für Wasser herangezogen.

Als Maß für die Oberflächenfeuchtigkeit des Papiers wird an jeder Seite das Verhältnis der Fläche von Wasser zu Zellulose herangezogen, wodurch eine Zweiseitigkeitsbestimmung der Feuchte ermöglicht wird.

Vorversuch

Das Ergebnis des Vorversuchs der ATR-Spektroskopie ist im folgenden Diagramm 1 dargestellt:

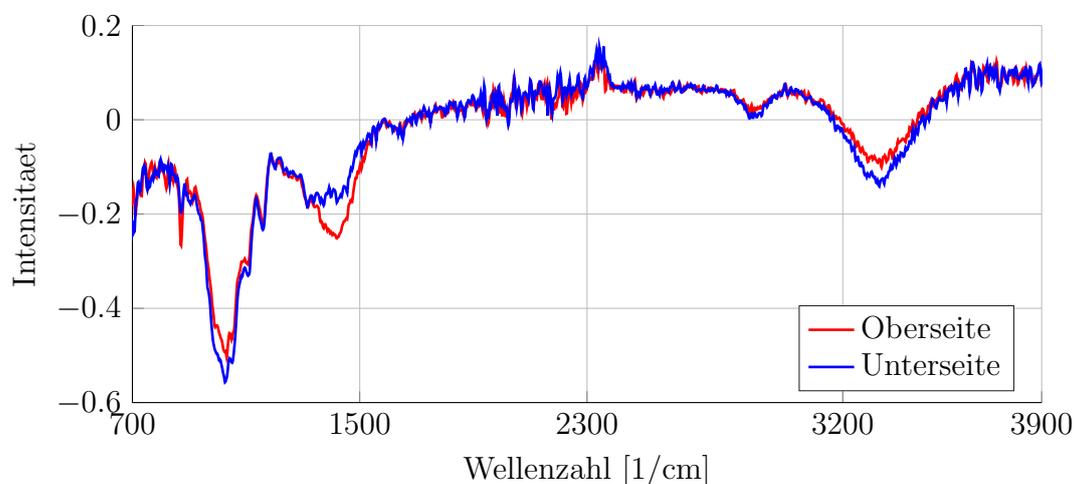


Diagramm 1: Das Diagramm zeigt das Resultat der ATR-IR Spektroskopie für beide Papierseiten. Die charakteristischen Peaks sind den unterschiedlichen elementarischen Verbindungen zuzuordnen. Dabei wird der Zellulosepeak zwischen einer Wellenzahl von 920 bis 1186 und der Wasserpeak zwischen 2997 bis 3656 ausgewertet. Zusätzlich ist noch CaCO_3 Peak im Bereich 1400 ersichtlich. Das Ergebnis zeigt auch ein unterschiedliches Spektrum zwischen den Papierseiten, wobei die bekannte Füllstoffweiseitigkeit, aber auch geringe Zweiseitigkeiten im Wasser- und Zelluloseanteil gut erkennbar sind.

Aus dem IR-Spektrum wird der Anteil an Wasser und Zellulose über die Flächen der Peaks in den zuvor erwähnten Wellenzahlenbereichen ermittelt. Das Ergebnis ist in der nachfolgenden Tabelle zu sehen.

Seite	Fläche Zellulose	Fläche Wasser	Verhältnis
Papieroberseite	50,189	60,627	1,208
Papierunterseite	57,73	70,521	1,2216

Tabelle 3.2: Die Tabelle zeigt das Ergebnis der Feuchte-zweiseitigkeit. Wie aus den Daten gut ersichtlich ist, befindet sich an der Papieroberseite ein geringerer Anteil an Zellulose und Wasser als an der Siebseite. Durch das Verhältnis zwischen Wasser und Zellulose zeigt sich, dass an der Papieroberseite um zirka 1,4% weniger Wasser als an der Unterseite gemessen wird.

Das Resultat der Untersuchung zeigt eine geringe Zweiseitigkeit im Verhältnis Wasser zu Zellulose, welches ein Maß für die Feuchte-zweiseitigkeit ist. In der Tabelle ist ein Verhältnis von 1,208 an der Filzseite und 1,2216 an der Siebseite zu sehen. Dies bedeutet, dass an der Oberseite des Blattes weniger Wasser bezogen auf die an dieser Seite vorhandenen Zellulosemenge gegenüber der Siebseite vorhanden ist. Das Resultat dieser Messmethode zeigt im ersten Versuch ein vielversprechendes Ergebnis, jedoch wurde die Methode im Laufe der Arbeit nicht fertig entwickelt.

3.6 Bestimmung des irreversiblen Curls

Zur Bestimmung des irreversiblen Curls werden über mehrere Befeuchtungs- und Trocknungsschritte die Trockenspannungen, welche diesen Curl hervorrufen, befreit. Der dafür vorgesehene Versuchsablauf ist in der Abbildung 29 dargestellt.

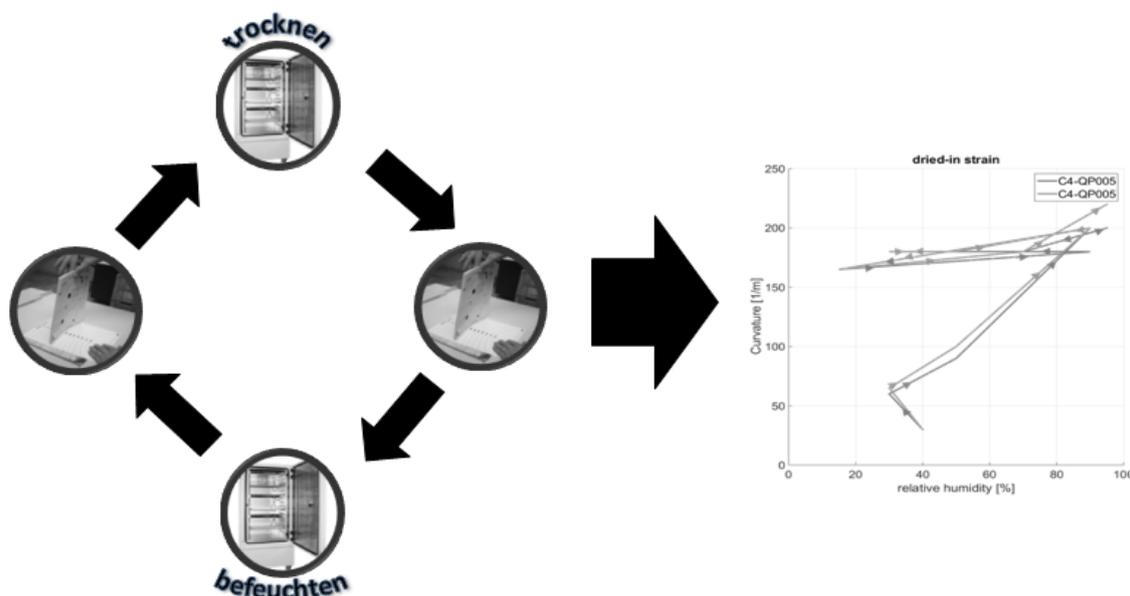


Abbildung 29: Versuchsaufbau zur Analyse des irreversiblen Curls. Dazu wird vor Beginn der Untersuchung die Wölbung der Probe ermittelt und es folgen mehrere Klimatisierungsprozesse bei 23°C. Als erster Klimatisierungsschritt wird ein Trocknungsprozess für 8 Stunden durchgeführt und danach die Planlage bestimmt. Weiters folgt ein mehrstufiger Befeuchtungsvorgang zuerst bei 50% und dann bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit für jeweils 8 Stunden, wobei nach jeder Stufe die Probe vermessen wird. Anschließend erfolgt ein zweistufiger Trocknungsvorgang bei 50% und bei 30% relativer Luftfeuchtigkeit, wiederum für 8 Stunden. Diese Zyklen werden mehrmals durchgeführt und als Ergebnis erhalten wir das Diagramm rechts, wo die Abhängigkeit des Curls von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft dargestellt wird.

Vor dem Versuchsbeginn wird die Wölbung der luftdicht gelagerten Proben nach der Methode des Kapitels 3.2 bestimmt. Danach werden die Proben im Format A4 (297mm x 210mm) bei 23 Grad Celsius in einem Klimaschrank mehrfach getrocknet und befeuchtet. Zu Beginn werden die Blätter bei 30% relativer Luftfeuchte für 8 Stunden getrocknet und der Curl bestimmt. Danach startet ein zweistufiger Befeuchtungszyklus zuerst bei 50% und dann bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit für jeweils 8 Stunden. Nach jeder Stufe wird die Wölbung der Papierprobe bestimmt. Nach dem Befeuchtungsprozess folgt ein Trocknungszyklus welcher ebenfalls zweistufig beginnend bei 50% und dann bei 30% relativer Luftfeuchte für jeweils 8 Stunden durchgeführt wird. Wiederum wird der Curl der Proben bestimmt. Anschließend folgen 4 bis 5 zusätzliche zweistufige Befeuchtungs- und Trocknungszyklen, wie zuvor beschrieben. Als Ergebnis erhalten wir die Wölbung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit. Daraus ist das Wölbungspotenzial

der Trocknungsspannungen und die Richtung (zur Siebseite oder zur Filzseite) des irreversiblen Curls erkennbar. Zusätzlich wird das reversible Verhalten des strukturellen Curls ebenfalls dargestellt. Wie im Kapitel 2.4.2 erwähnt, zeigt sich nach der Befreiung der Trocknungsspannungen der reversible Curl, welcher struktureller Natur ist. In den Ergebnissen ist somit die Richtung und der Grad des strukturellen Wölbungsverhaltens sichtbar.

3.7 Bestimmung des strukturellen Curls

Bei der Bestimmung des strukturellen Curls wird versucht das strukturelle Wölbungsverhalten nach dem Kopierprozess mit einem mathematischen Modell zu beschreiben. Wie im Kapitel 2.4.3 erwähnt, werden für die mathematischen Modelle der Wölbungsparameter einige Papiereigenschaften benötigt. Nach dem folgenden vereinfachten Modell von [Hirn und Bauer, 2006] wird für den Wölbungsparameter K_y die Anisotropiedifferenz zwischen den beiden Papierseiten ($A_{TS}-A_{BS}$), die Hygroexpansion in Querrichtung β_{cd} und die Blattdicke t benötigt (siehe nachfolgende Gleichung).

$$K_y [1/m] = \frac{2 \beta_{cd} (A_{BS} - A_{TS})}{t} \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Zur Ermittlung der Anisotropie an den beiden Papierseiten wird die Sheet-Splitting Methode aus dem Abschnitt 3.1.3 verwendet. Das Resultat der Faserorientierungsmessung ist ein Z-Profil der Anisotropie mit 20 bis 25 Messwerten (ein Messwert pro Lage).

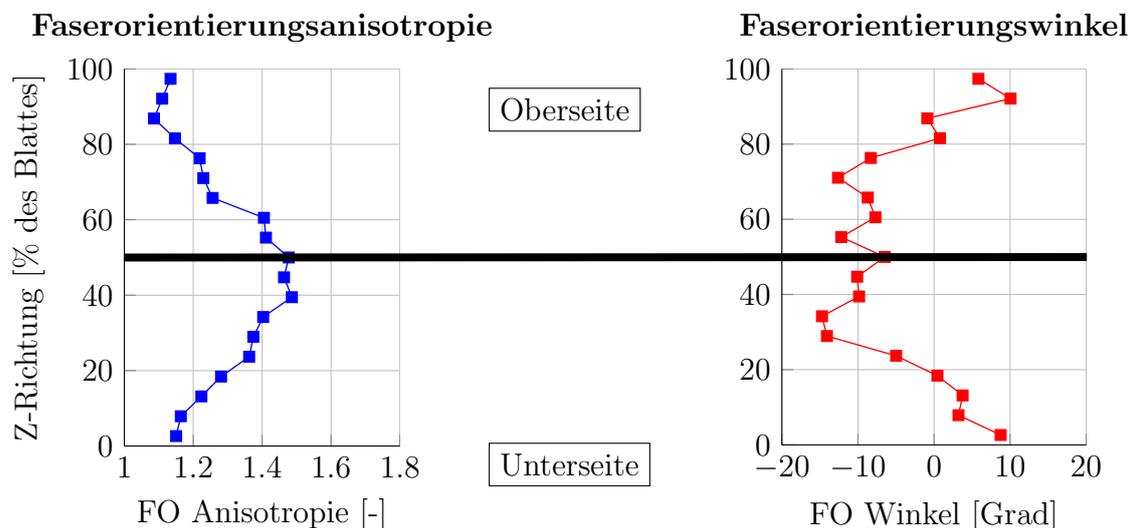


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Ermittlung der Faserorientierungszweiseitigkeit. Links ist die Berechnung der Zweiseitigkeit für die Anisotropie zu sehen. Es werden jeweils die oberen und unteren 50% der Messwerte zu einem arithmetischen Mittelwert zusammengefasst, um die Zweiseitigkeit zu beschreiben. Die rechte Abbildung zeigt dasselbe Schema für den Faserorientierungswinkel.

Um nun die Anisotropie für Ober- und Unterseite zu ermitteln, wird jeweils ein arithmetischer Mittelwert mit 50% der Messwerte (entspricht 40 g/m²) an jeder Seite gebildet (siehe folgende Abbildung 30). Für die Abschätzung der Hygroexpansion in Querrichtung β_{cd} wird die Gleichung Eq. 4.4 in Abschnitt 2.4.3 verwendet. Die Blattdicke wird direkt an der Probe vermessen und anschließend der Wölbungsparameter berechnet.

Für die Beurteilung des Diagonal-Curls wird der Wölbungsparameter K_{xy} berechnet. Das dafür vorgesehene Modell, welches in dieser Arbeit verwendet wird, wurde von [Niskanen, 1993] vorgestellt.

$$K_{xy} = \frac{2 (\alpha_{BS} - \alpha_{TS}) (\beta_{md} + \beta_{cd})}{t} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

Für dieses Modell wird der Faserorientierungswinkel α_{TS} und α_{BS} auf beiden Papierseiten benötigt. Diese Werte werden wiederum über die Sheet-Splitting Methode, gleich wie zuvor die Anisotropie ermittelt (siehe Abbildung 30). Dabei werden, wie in Abbildung 30 zu sehen ist, die Mittelwerte der oberen und unteren 50% der Messwerte herangezogen und die Differenz zwischen Papieroberseite und Unterseite gebildet. Die Hygroexpansion und die Blattdicke werden, gleich wie zuvor für K_y , ermittelt. Abschließend werden die berechneten Werte mit den Messwerten verglichen.

Kapitel 4

Versuchsplanung und Ausführung

Im folgenden Kapitel 4 werden die Ziele, der Versuchsplan und die Durchführung vorgestellt. Dabei gliedert sich die Masterarbeit in zwei große Schwerpunkte. Zum einen soll der online Faserorientierungssensor von ABB, welcher an der Papiermaschine 5 der Mondi Neusiedler installiert ist, evaluiert werden. Der zweite Schwerpunkt beschäftigt sich mit dem Wölbungsverhalten von Kopierpapieren, wobei unterschiedliche Ursachen, welche einen Einfluss auf den Curl besitzen (siehe Kapitel 2), untersucht werden.

Für die Wölbungsuntersuchungen wird ein Standard-Kopierpapier mit 80 g/m^2 , wiederum von der Papiermaschine 5 (Details siehe Kapitel 4.1), verwendet. Während der gesamten Versuchsreihen wird die Siebschüttelung an der Papiermaschine deaktiviert, um deren Einfluss auf die Qualitätsschwankungen in der Maschinenrichtung auszuschalten.

4.1 Maschinenbeschreibung - Papiermaschine 5

Die Papiermaschine 5 (siehe Abbildung 31) der Firma Mondi Neusiedler in Hausmening ist eine Langsiebpapiermaschine mit aufgesetztem Egoutteur, welche für die Produktion von holzfreiem weißen Druck- und Schreibpapieren eingesetzt wird. Die Papiermaschine wurde 1971 in Betrieb genommen. Nach einigen Umbauten erreicht die Papiermaschine heute Geschwindigkeiten von bis zu 700 m/min .



Abbildung 31: *Papiermaschine 5 der Firma Mondi Neusiedler.*

Die durchschnittliche Produktionsrate der Papiermaschine beträgt etwa 14 Tonnen pro Stunde bei einer Arbeitsbreite von 4400mm. Weiters wird ein Flächengewichtsspektrum von 70 g/m² bis 250 g/m² abgedeckt. In den folgenden Punkten werden die technischen Details der Papiermaschine vorgestellt.

Stoffaufbereitung

Die Stoffaufbereitung besitzt zwei Faserlinien, welche beide mit Kurzfasierzellstoffen betrieben werden. Jede Linie ist mit einem Dickstoffsorierer und einem Mahlaggregat (Optifiner Pro 2) ausgestattet. Danach wird der Faserstoff in der Stoffzentrale zusammengesamt und in der Maschinenbütte für die Papierproduktion vorgelegt.

Konstantteil

Der Konstantteil der Papiermaschine besteht aus einer mehrstufigen Cleaneranlage, einem Wuchtschüttler, einem Drucksortierer und einem Pulsationsdämpfer vor dem Querstromverteiler.

Stoffauflauf

Der Stoffauflauf vom Typ Master Jet II der Firma Voith wurde 2006 an der Maschine installiert. Bei diesem Stoffauflauf handelt es sich um einen geschlossenen Verdünnungswasserstoffauflauf mit 74 Verdünnungswassermodulen zum Regeln der flächenbezogenen Masse in Querrichtung. Zusätzlich sind die Ränder mit Edgemodulen versehen, um die Randeffekte der Strömungen, welche die Papierqualität beeinflussen, auszugleichen.

Siebpartie

Die Siebpartie besitzt zur Blattbildung und Entwässerung einen Brusttisch mit zwei integrierten Foils. Nachstehend werden mehrere Foilkästen zur weiteren Entwässerung eingesetzt. Am Ende der Siebpartie befinden sich noch zwei Saugerkästen, der Egoutteur und die Siebsaugwalze. Zur Verbesserung der Formation und Entwässerung wird zusätzlich als Siebschüttelung ein TurboShaker der Firma Bellmer eingesetzt.

Pressenpartie

Über die Pick-Up Walze wird die Papierbahn von der Siebpartie in die Pressenpartie geleitet, wo in den drei nachfolgenden Nips das Papier weiter entwässert wird. Dabei werden die ersten 2 Nips über die Zentralpresswalze gebildet. Der 3. Nip ist ein eigenständiger einfach befalzter Pressnip.

Trockenpartie

Zur Trocknung der Papierbahn wird eine zweireihige Trockenpartie verwendet. Zu Beginn wird eine Vortrockenpartie, welche in 4 Gruppen unterteilt ist, eingesetzt. Danach ist eine Leimpresse installiert. Abschließend folgt eine Nachtrockenpartie mit 2 Gruppen. In der Nachtrockenpartie ist zusätzlich eine unterschiedliche Beheizung der oberen und unteren Trockenzylinder möglich, um den Curl des Papiers zu beeinflussen.

Leimpresse

Die Leimpresse dient zum Auftragen der Oberflächenstärke, wodurch die Papierqualität erhöht wird. Über einen Stärkesumpf der zwischen den beiden Leimpreswalzen aufgestaut wird, wird die trockene Papierbahn durchgeführt, wobei das Papier die Stärke aufnimmt.

Glättwerk

Am Ende der Papiermaschine befindet sich noch ein Stahlwalzenglättwerk zur Veredelung der Papieroberflächen.

4.2 Versuchsaufbau und Ziele

Für die Masterarbeit sind die folgenden drei Grundziele festgelegt worden, welche im Detail untersucht werden sollen:

- Validierung des „dual sided online FO-Sensors“ von ABB
- Untersuchung der Ursachen für den irreversiblen Curl
- Untersuchung der Ursachen für den reversiblen Curl (struktureller Curl)

Im ersten Abschnitt liegt das Hauptaugenmerk auf dem Ziel der Evaluierung des „dual sided online FO-Sensors“ von ABB, um diesen eventuell für die weiteren Untersuchungen des strukturellen Curls zu nutzen. Die folgende Grafik 32 des Versuchsaufbaus zeigt schematisch die Ziele, die Methoden und Durchführung.

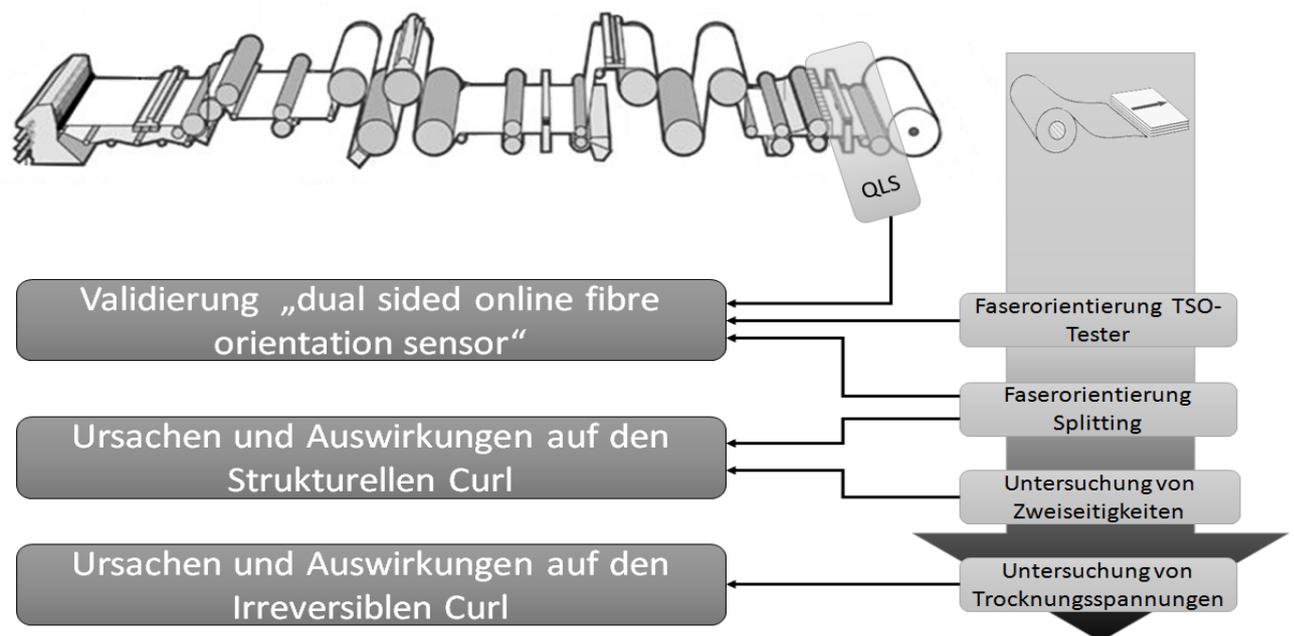


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der praktischen Arbeiten, der Ziele und der Untersuchungsparameter. Die drei Ziele gliedern sich zum einen in die Validierung des "dual sided online fibre orientation sensors-von ABB und zum anderen in die Untersuchung der Ursachen und Auswirkungen für den strukturellen und den irreversiblen Curl. Für das Erreichen der Ziele werden unterschiedliche Messmethoden für die Faserorientierung (optisch, bildanalytisch und akustisch) angewandt. Des Weiteren werden mehrere Zweiseitigkeiten der Papierstruktur (wie Faserorientierung, Ascheverteilung, Feuchte-zweiseitigkeit), sowie die Trockenspannungen im fertigen Papier ermittelt und deren Auswirkungen auf das Wölbungsverhalten analysiert.

Über das Qualitätsleitsystem (QLS) werden die online Daten der Faserorientierung, Feuchte, Flächengewicht, usw. ermittelt. Diese Daten werden zur Evaluierung des online Sensors, aber auch für die Wölbungsuntersuchungen herangezogen. Im nächsten Schritt werden vom produzierten Papier Proben entnommen, um weitere Untersuchungen, wie zum

Beispiel Faserorientierung mit dem TSO-Tester, Faserorientierung über das Sheet-Splitting, Füllstoff und Stärkeverteilungen, Trockenspannungen und Wölbungsverhalten, durchzuführen.

4.2.1 Validierung des „dual sided online FO-Sensors“ von ABB

Für die Evaluierung des online Sensors werden die im Kapitel 3.1 beschriebenen Messmethoden verwendet. Dabei ist das Ziel zu validieren, was das online System misst. Dafür wird die Zweiseitigkeitsmessung des online Sensors mit der Sheet-Splitting Methode überprüft. Zusätzlich werden die online Ergebnisse mit den Ergebnissen vom TSO-Tester von Lorentzen & Wettre auf ihre Richtigkeit überprüft. Die folgende Abbildung 33 zeigt das Schema der Durchführung.

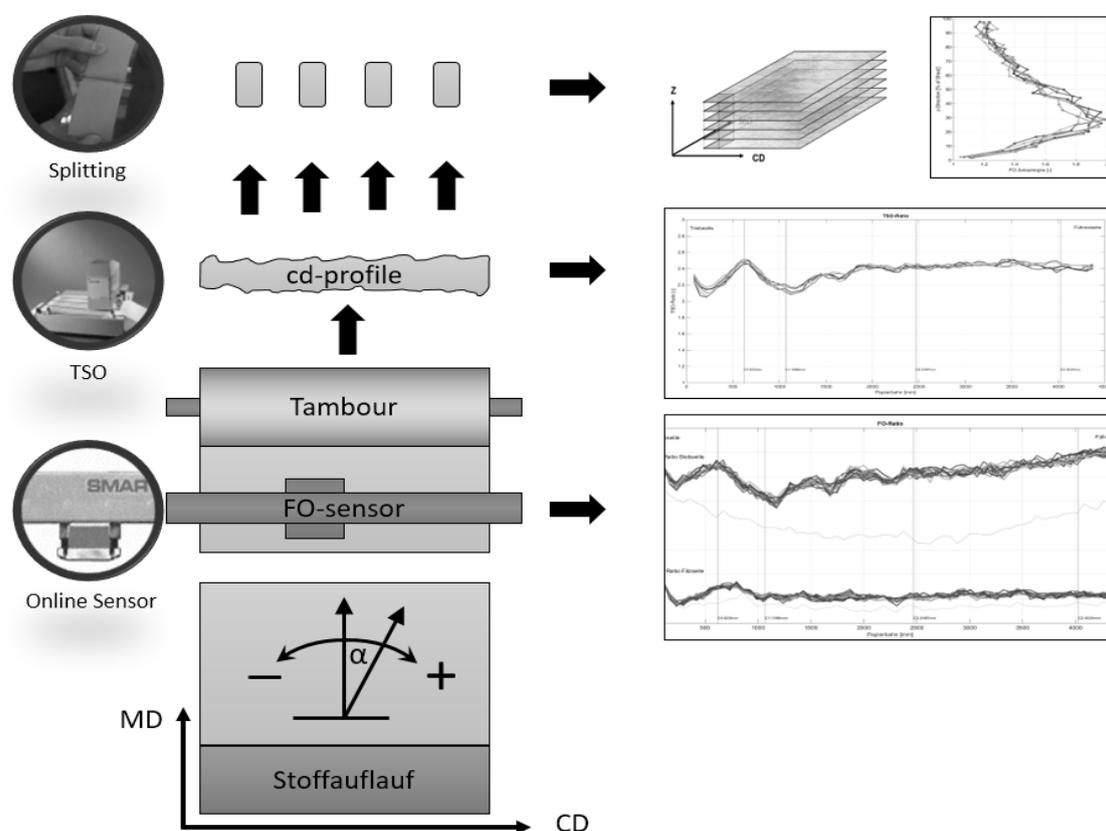


Abbildung 33: Darstellung der Versuchsdurchführung zur Evaluierung des online Sensors. Durch Messen der laufenden Papierproduktion liefert der online Sensor die Faserorientierungsquerprofile für beide Papierseiten. Aus derselben Produktion werden Querprofilmuster entnommen, welche mit dem TSO-Tester vermessen werden. Das Resultat ist wiederum ein Querprofil, welches mit den online Messungen verglichen werden kann. Zuletzt werden aus den Querprofilstreifen an 4 definierten Positionen zusätzlich die Muster für die Splitting Auswertung entnommen. Hierbei erhält man die Z-Verteilung der beiden Faserorientierungsparameter, wodurch man die Zweiseitigkeitsmessung des online Sensors überprüfen kann.

Über den online Sensor werden die Daten der Faserorientierung erfasst, wodurch man als

Ergebnis die Querprofildaten für beide Papierseiten erhält. Danach werden vom produzierten Papier Querprofilmuster entnommen, welche mit dem TSO-Tester vermessen werden. Hierbei erhält man wiederum ein Querprofil, welches mit den online Daten verglichen werden kann. Als letzten Schritt werden zur Überprüfung der Zweiseitigkeitsmessung an 4 definierten Querprofilpositionen Muster für die Sheet-Splitting Methode entnommen. Aus dieser Messung erhalten wir eine Z-Verteilung der Faserorientierungsanisotropie und des Faserorientierungswinkels, wodurch man Rückschlüsse auf die Zweiseitigkeit ziehen kann.

4.2.2 Irreversibler und struktureller Curl

Für die Analyse des strukturellen und irreversiblen Curls wird der Untersuchungsablauf, wie in der Abbildung 34 gezeigt, durchgeführt.

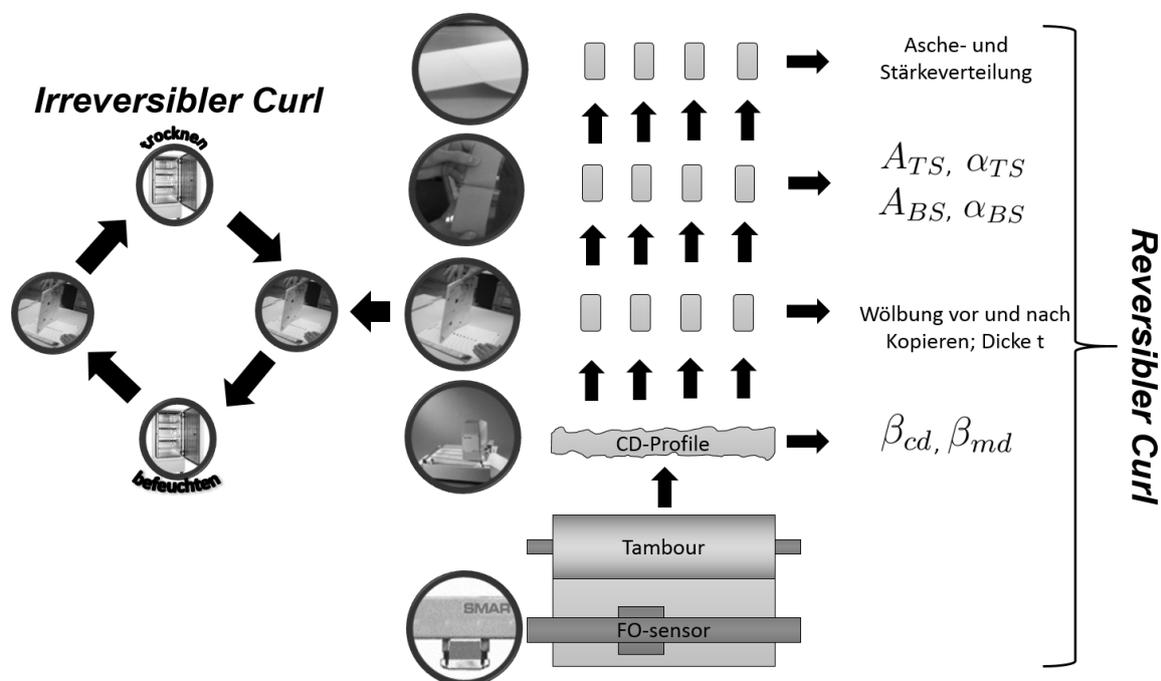


Abbildung 34: Ablauf der Untersuchungen zum irreversiblen und strukturellen Curl. Zu Beginn werden Querprofilstreifen entnommen, um diese mit dem TSO-Tester zu vermessen. Als nächstes werden vom fertigen Papier Proben an 4 definierten CD-Positionen (jeweils von der Bedienerseite: C1-46cm, C2-170cm, C3-296cm, C4-381cm) für die Versuchsanordnung des irreversiblen Curls, die Wölbungsbestimmung, das Sheet-Splitting, die Asche- und Stärkeverteilung entnommen. Für den irreversiblen Curl erfahren die Proben mehrere Trocknungs- und Befeuchtungszyklen, wodurch die Trocknungsspannungen gelöst werden und die Wölbung zunimmt (siehe Kapitel 3.6). Für die Untersuchung des reversiblen Curls sind die strukturellen Papiereigenschaften wie Hygroexpansion, Faserorientierung, Asche und Stärke von Bedeutung, welche vermessen werden und so mit dem Wölbungsmesswerten verglichen werden.

Nach der Papierproduktion werden vom fertigen Tambour die Proben entnommen. Im ersten Schritt werden, wie auch schon zuvor für die Evaluierung des online Sensors, einige

Querprofilstreifen entnommen, um diese mit dem TSO-Tester zu analysieren. Weiters werden an den vier ausgewählten Positionen C1 bis C4 Muster im Format A4 (297mm x 210mm) entnommen, um die nachfolgenden Untersuchungen durchführen zu können. Die Musterposition sind in der nachstehenden Tabelle 4.1 ausgehend von der Führerseite der Papiermaschine angeführt.

C1	C2	C3	C4
46cm	170cm	296cm	381cm

Tabelle 4.1: Die Tabelle zeigt die vier Untersuchungspositionen ausgehend von der Führerseite.

4.3 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wurde ein Versuchsplan aufgestellt. Bevor die Hauptversuche durchgeführt wurden, mussten einige Vorversuche abgehandelt werden. Dazu zählt zum einen die Untersuchung der Auswirkung der Siebschüttelung auf das Kopierverhalten, aber auch die Bestimmung der Staukurve. Danach erfolgen die ersten Hauptversuche, wobei diese in den unterschiedlichen Staupunkten (Versuch 1 bis 4) erfolgen. Als letzter Versuchsschritt wird ein Reproduzierbarkeitsversuch an allen Staupunkten (Versuch 5 bis 7) durchgeführt.

	Stau versuche	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7
Sieb- schüttelung	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus
Auslauf- verhältnis	Unterstau bis Überstau	Unterstau -6 m/min	Unterstau -6 m/min	Überstau +6 m/min	1	Unterstau -6 m/min	Überstau +6 m/min	1
Siebgeschw.	600m/min	600m/min	600m/min	600m/min	600m/min	600m/min	600m/min	600m/min
Lippen- öffnung	12,5mm	12,5mm	12,5mm	12,5mm	12,5mm	12,5mm	12,5mm	12,5mm
Strahl auftreff winkel	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
bias	1	1	1	1	1	1	1	1

Abbildung 35: Planmäßige Darstellung der einzelnen Versuche. Als Vorversuch wird ein Stauversuch durchgeführt, um die Bereiche zwischen Unterstau und Überstau zu ermitteln. Danach werden zwei Versuche im Unterstau (Versuch 1 und 2), einer im Überstau (Versuch 3) und einer im Staunullpunkt (Versuch 4) durchgeführt. Diese 4 Versuche entsprechen den Hauptversuchen. Zum Abschluss werden noch die Versuche 5,6 und 7 als Reproduzierbarkeitsversuch durchgeführt.

Die Abbildung 35 zeigt den Ablauf und die wichtigsten Einstellparameter an der Papiermaschine während der gesamten Untersuchungsreihe. Zwischen den einzelnen Versuchen sind alle Maschineneinstellungen bis auf das Auslaufverhältnis (Strahl-Sieb-Verhältnis) konstant geblieben. Wie schon zuvor erwähnt, ist die Siebschüttelung deaktiviert, weil diese eine Schwankung in der Maschinenrichtung verursacht. Die Siebgeschwindigkeit von 600 m/min entspricht der Standardgeschwindigkeit für ein 80 g/m² Office-Papier an der Papiermaschine 5. Die Lippenöffnung sowie der Strahlauftreffpunkt werden ebenfalls auf den Standardwerten gelassen. Der Bias beschreibt die Dampfdruckdifferenz zwischen den oberen und unteren Trockenzylindern in der letzten Trockenpartie der Papiermaschine und wird während der Versuche auf ein bar gestellt. Das bedeutet, dass der Dampfdruck an den unteren Trockenzylindern um ein bar höher ist als an den oberen Zylindern. Diese Druckdifferenz bewirkt einen Temperaturunterschied von etwa 20°C, wodurch eine höhere

Trocknung an der Papieroberseite erreicht wird (siehe Kapitel 2.4.2).

4.3.1 Vorversuch

Bevor die ersten Untersuchungen starten, wird ein Vorversuch durchgeführt, um den reibungsfreien Ablauf der Hauptversuche zu gewährleisten. Dafür wird die Siebschüttelung in der Siebpartie deaktiviert, um den Papiermaschinenlauf zu kontrollieren. Es wird darauf geachtet, dass ein abrissfreier Betrieb der Papiermaschine mit den gewünschten Einstellungen möglich ist.

4.3.2 Staukurve

Der nächste Versuchsschritt ist der Stauversuch, um die Anzeigen des Prozessleitsystems (PLS) zu überprüfen. Dafür wird in diesem Versuch der Staunullpunkt ermittelt. Wie im Kapitel 1 erwähnt, hat das Strahl-Sieb-Verhältnis einen wesentlichen Einfluss auf die Faserorientierung. Aus der Literatur wissen wir, dass die Anisotropie ein Minimum im Staunullpunkt besitzt, wodurch der geringste Querschrumpf auftreten muss. Dies muss somit bedeuten, dass die Bahnbreite ein Maximum einnimmt, weshalb diese als Überprüfungsparameter herangezogen werden kann.

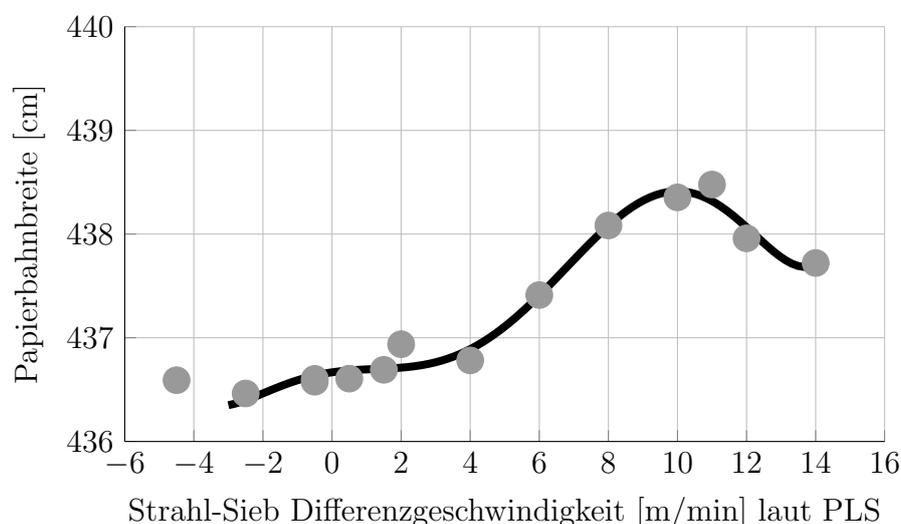


Diagramm 2: Das Diagramm zeigt die Papierbahnbreite in Abhängigkeit der Strahl-Sieb Differenzgeschwindigkeit. Wie wir erkennen können besitzt die Staukurve ein Maximum bei einer Differenzgeschwindigkeit von etwa +10 m/min. Dies bedeutet, dass hier der Strahlnullpunkt erreicht ist.

Für die Durchführung dieses Versuchs werden unterschiedliche Staupunkte angefahren, während die Papierbahnbreite laufend kontrolliert wird. Wie das Ergebnis des Versuchs zeigt (siehe Abbildung 2), besitzt die Papierbahn die maximale Breite bei einer Differenzgeschwindigkeit zwischen Strahl-Sieb laut PLS von +10 m/min. An diesem Punkt

befindet sich somit der Staunullpunkt, weil in diesem Punkt die geringste Faserorientierungsanisotropie vorhanden sein muss (siehe Abschnitt 1.2.1) und somit auch der geringste Querschrumpf auftritt. Durch die Ermittlung des Staunullpunktes können die Hauptversuche im Unterstau und Überstau korrekt durchgeführt werden.

4.3.3 Hauptversuche

Das Ziel der Hauptversuche ist es, den Einfluss des Strahl-Sieb-Verhältnisses auf die Faserorientierung darzustellen und in weiterer Folge die Auswirkungen auf das Wölbungsverhalten zu analysieren. Dabei werden alle Produktionsparameter bis auf das Auslaufverhältnis während der Versuchsreihe konstant gehalten.

Die extremen Faserorientierungswerte zwischen den Staupunkten, welche erwartet werden, erleichtern die Evaluierung des online Faserorientierungssensors. Ausgehend vom ermittelten Strahlnullpunkt (+10 m/min) werden nun die Versuche durchgeführt. Dazu wird im Versuch 1 und 2 der Unterstau bei -6 m/min Differenzgeschwindigkeit angesteuert. Nach einer Einlaufzeit von etwa 10 Minuten werden die Proben entnommen. Zusätzlich werden die Daten aus dem Prozessleit- und Qualitätsleitsystem der gesamten 10 Minuten aus dem System abgespeichert. Dadurch erhalten wir die Bestätigung, dass das System nach der Umstellung des Auslaufverhältnisses eingeschwungen ist. Nachdem die Proben entnommen sind, wird als nächster Staupunkt der Überstau (Versuch 3) mit +6 m/min Differenzgeschwindigkeit angefahren und dieselbe Prozedur startet von vorne. Als letzter Schritt wird der Staunullpunkt (Versuch 4) eingestellt.

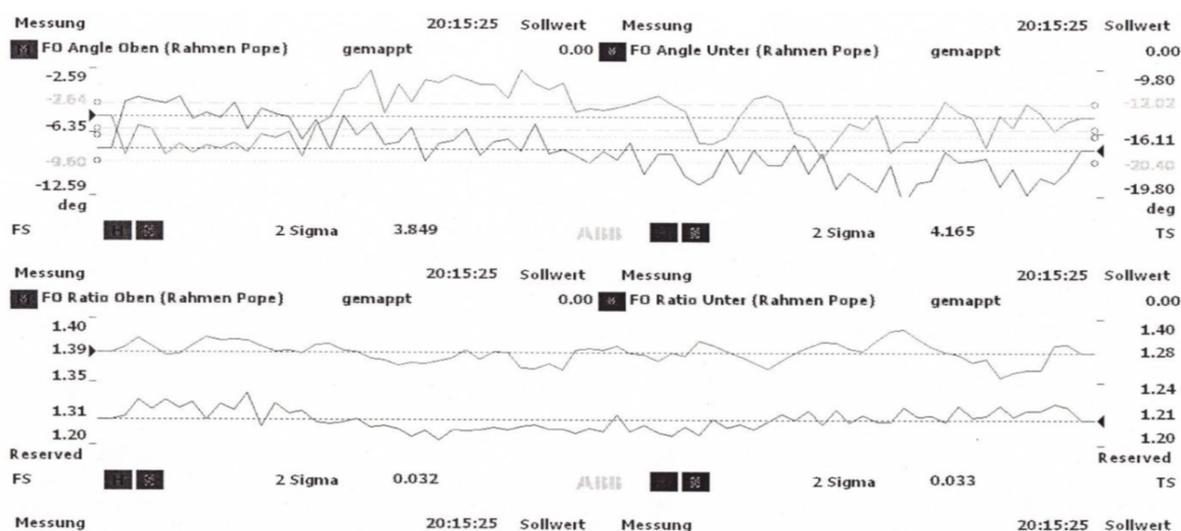


Abbildung 36: Bedienerbildschirm des Qualitätsleitsystems von ABB für die Faserorientierung. Die oberen Querprofile zeigt den Faserorientierungswinkel für die beiden Papierseiten. Die unteren Profile beschreiben die Anisotropie an der Ober- und Unterseite.

Um die Reproduzierbarkeit zu kontrollieren, wird zu einem späteren Zeitpunkt der Versuch nochmals wiederholt (Versuch 5 bis 7).

Während des ersten Versuches im Unterstau wird zusätzlich entschieden, an welchen Positionen die Muster zur Evaluierung des Sensors bzw. für die Wölbungsanalysen entnommen werden. Dafür werden anhand der Onlinemessdaten (siehe Abbildung 36) die Positionen mit der größten und kleinsten Faserorientierungszweiseitigkeit herausgefiltert, welche über die weiteren Versuche nicht abgeändert werden.

4.4 Musternahme

Die Musterentnahme wird selbst durchgeführt. Dazu werden vom produzierten Papier direkt an der Papiermaschine die Proben entnommen. Nachdem die Versuchseinstellungen über einige Minuten lang stabil an der Papiermaschine gelaufen sind, wird ein Tambourwechsel vollzogen. Anschließend wird eine Bahn mit ca. 25 bis 30 Lagen Papier vom Tambour gezogen und auf dem Boden aufgelegt.

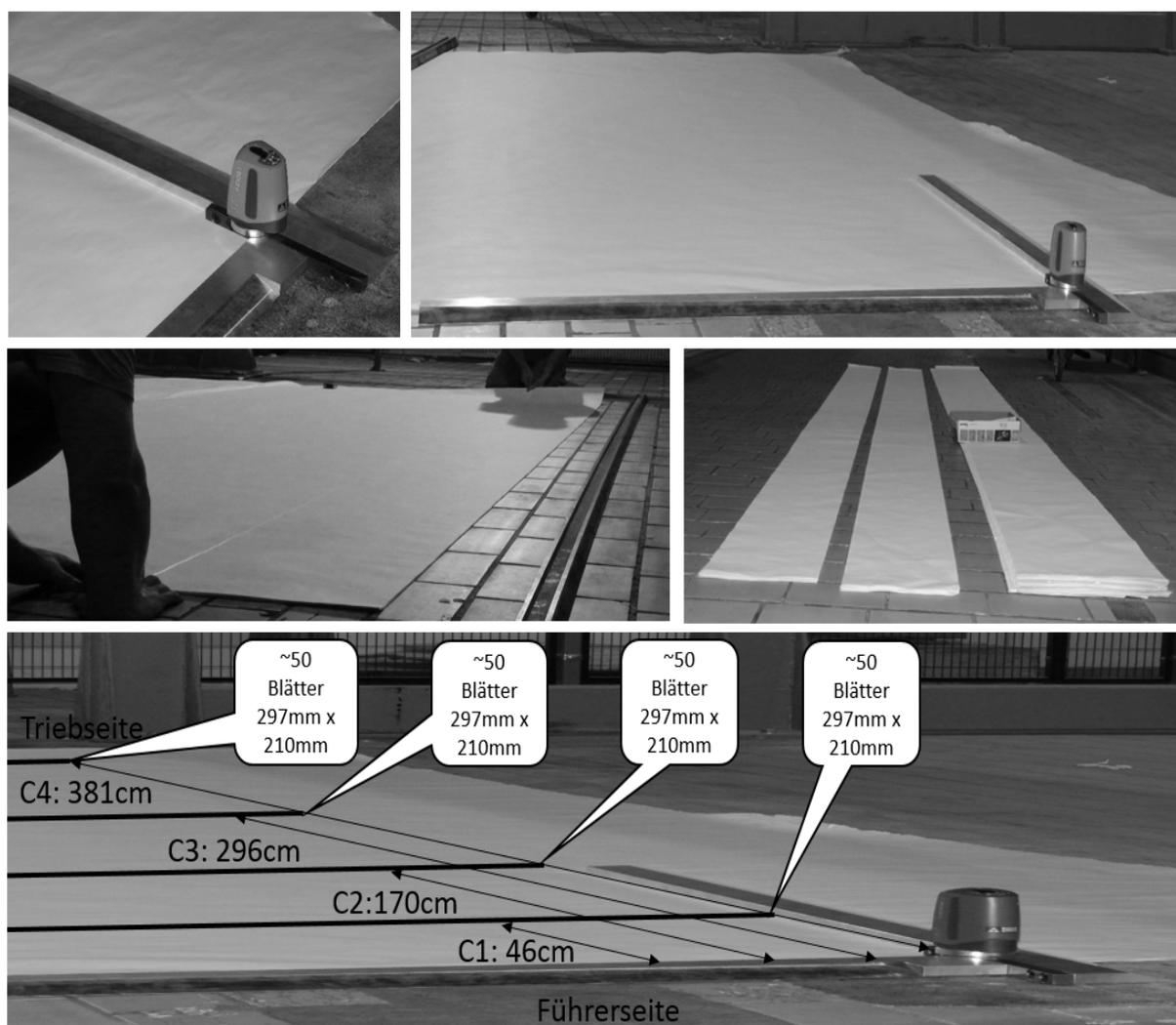


Abbildung 37: Ablauf der Musternahme. Die 25 bis 30 Lagen der Papierbahn werden am Boden aufgelegt. Mit einem Kreuzlinienlaser und einem Alu-Winkel wird auf der Bahn die Maschinenrichtung und die Querrichtung aufgezeichnet. Zuerst werden Querprofilstreifen für die Untersuchung mit dem TSO-Tester genommen. Danach werden die Muster im Format A4 im Umfang von etwa 50 Blatt für die Untersuchungen des irreversiblen und strukturellen Curls mit den vier Positionen C1, C2, C3 und C4 exakt aus der Bahn geschnitten und für die weiteren Untersuchungen in einem luftdicht verschließbaren Kunststoffbehälter zwischengelagert.

Mit einem speziell angefertigten Winkel und einem Kreuzlinienlaser werden nun die Proben der Querprofilstreifen, Kopiermuster im Format A4 und Rückstellmuster genau im

Winkel der Maschinenrichtung und Querrichtung angezeichnet und anschließend entnommen. Der Ablauf ist in der Abbildung 37 dargestellt. Die Querpositionen für die A4-Muster sind in der Abbildung dargestellt und werden mit C1, C2, C3 und C4 bezeichnet. Die Positionen werden ausgehend von der Führerseite bei 46cm, 170cm, 296cm und 381cm entnommen und in einem luftdicht verschließbaren Behälter zwischengelagert, um für die weiteren Untersuchungen die klimatischen Bedingungen vorerst konstant zu halten.

Teil III

**Praktische Untersuchung -
Ergebnisse**

Kapitel 5

Evaluierung „dual-sided online FO-Sensor“

Für die Evaluierung des „dual-sided online FO-Sensor“ wird, wie im Kapitel 4.2.1 erklärt, die online Messung mit der Sheet-Splitting Methode und dem TSO-Tester gegenübergestellt. Für die anschauliche Darstellung der Ergebnisse wird zu Beginn die Faserorientierungsanisotropie des online Sensors mit dem Tensile Stiffness Index des TSO-Testers verglichen. Danach wird der Faserorientierungswinkel im Detail betrachtet. Als letzter Schritt wird die Zweiseitigkeit des Winkels und der Anisotropie mit der Splitting-Methode evaluiert.

5.1 Evaluierung mit dem TSO-Tester

Faserorientierungsanisotropie

Die Messergebnisse der Faserorientierungsanisotropie aus der online Messung werden im nachfolgenden Diagramm 3 für alle Versuche (siehe Kapitel 4.3.3) dargestellt.

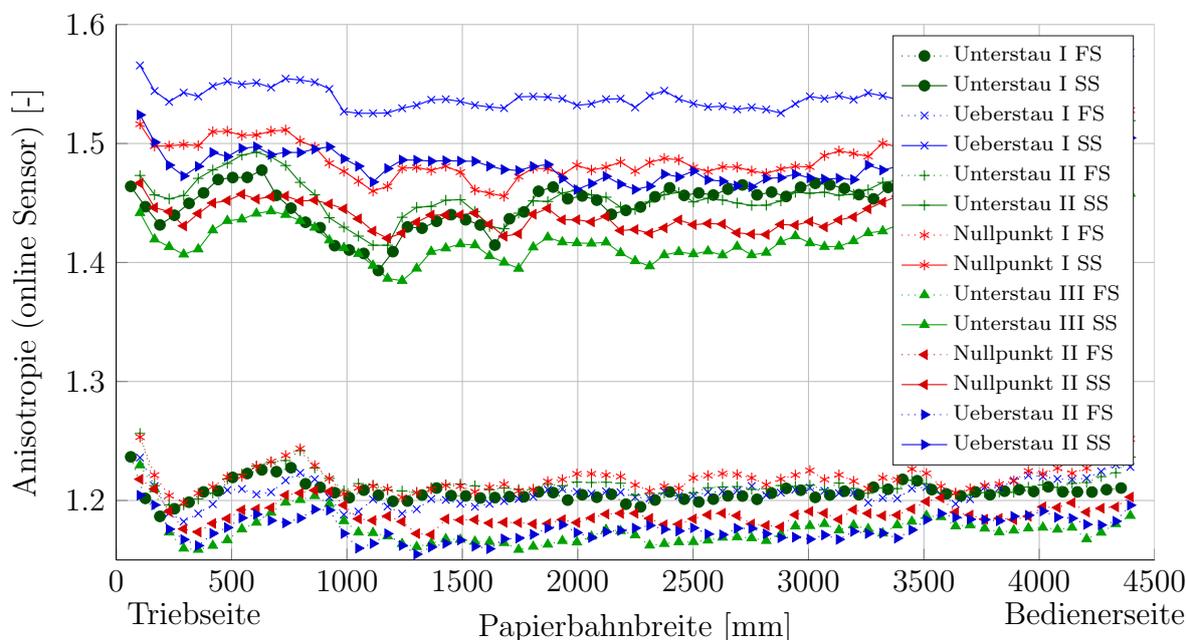


Diagramm 3: Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Anisotropiemessung des online Faserorientierungssensors. Dabei stellen die durchgezogenen Linien die Querprofile der unterschiedlichen Versuche an der Papierunterseite dar. Die strichlierten Linien zeigen die Anisotropie an der Papieroberseite, welche einen geringeren Wert als an der Filzseite aufweisen und nur geringe Unterschiede zwischen den Versuchen besitzen.

Anhand des Diagramms ist ersichtlich, dass die Anisotropiequerprofile an der Papierunterseite oder Siebseite (durchgezogene Linien) auf höheren Niveau liegen als an der Filzseite (strichlierte Linien). An der Papieroberseite erkennt man nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen, im Gegensatz zur Siebseite. Die beiden Versuche im Unterstau (Unterstau I & Unterstau II) liegen sehr nahe beisammen. Im Vergleich zum Unterstau III sieht man in den zuvor erwähnten Versuchen ein höheres Niveau. Der Unterschied ist jedoch auch bei den beiden Überstau- und Nullpunktversuchen zu sehen, weshalb von einer Abdriftung der Messung auszugehen ist. Des Weiteren gibt es einen Widerspruch mit den Erkenntnissen aus der Literatur wie zum Beispiel im Buch Handbook of Paper and Board von [Holik, 2006], welche ein Minimum in der Anisotropie im Strahlnullpunkt beschreibt. Dies ist in den Messungen mit der online Methode nicht ersichtlich. Der Grund hierfür kann eine sehr oberflächliche Messung sein, während die Anisotropie im Blattinneren eventuell geringere Werte aufweist (siehe Kapitel 5.2). Zusätzlich könnte eine unterschiedliche Füllstoffverteilung die Messergebnisse beeinflussen, da die kleinen Füllstoffpartikel aufgrund ihrer Form eine andere Laserlichtstreuung als Fasern verursa-

chen.

In Diagramm 4 wird nun das Ergebnis des TSO-Testers aller Versuche dargestellt. Gut zu erkennen ist das zuvor erwähnte Minimum in der Anisotropie (korreliert mit dem Tensile Stiffness Index) im Staunullpunkt (Nullpunkt I & II).

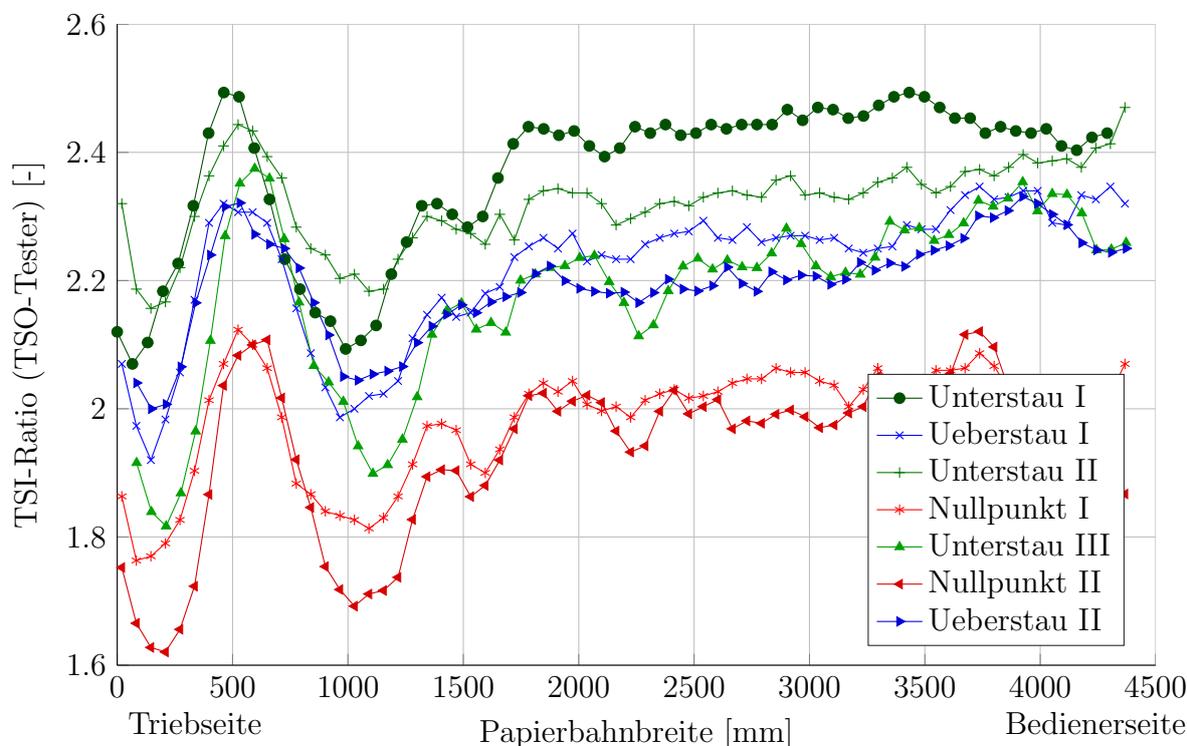


Diagramm 4: Dieses Diagramm zeigt die Ergebnisse der Versuche für das TSI-Ratio über die Papierbahnbreite. Wie aus der Literatur bekannt ist, zeigt sich das Minimum im TSI-Ratio im Staunullpunkt. Im Überstau und Unterstau steigt der Wert des TSI-Ratio wieder an.

Der auffällige Peak im Bereich der Triebseite ist in allen Profilen zu erkennen. Die Ursache hierfür könnten Strömungsfehler im Stoffauflauf oder am Beginn der Formierzone sein. Dieser ungewöhnliche Peak ist ebenfalls bei den online Messwerten in einem geringen Ausmaß zu erkennen (siehe Diagramm 3).

Um die beiden Messsysteme nun zu vergleichen, wird im folgenden Diagramm 5 das Tensile Stiffnes Ratio des TSO-Testers gegenüber dem Mittelwert der beiden online Querprofile von Papieroberseite und -unterseite dargestellt.

Zusätzlich wird eine lineare Regression zwischen den einzelnen Versuchsdaten durchgeführt und im Diagramm 5 werden die Daten mit den jeweiligen 95%igen Konfidenzintervallen eingezeichnet. In diesem Diagramm beschreibt jeder Punkt, welcher mit dem TSO-Tester und dem online Sensor vermessen wurde, eine Position eines Querprofils der unterschiedlichen Versuche. Sehr gut ersichtlich ist, dass die Daten innerhalb eines Versuches zum Teil sehr gut korrelieren, jedoch ist das für die gesamten Daten nicht zu erkennen (siehe Bestimmtheitsmaße in Tabelle 5.1).

Die beiden Versuche im Unterstau (Unterstau I & Unterstau II) befinden sich in der

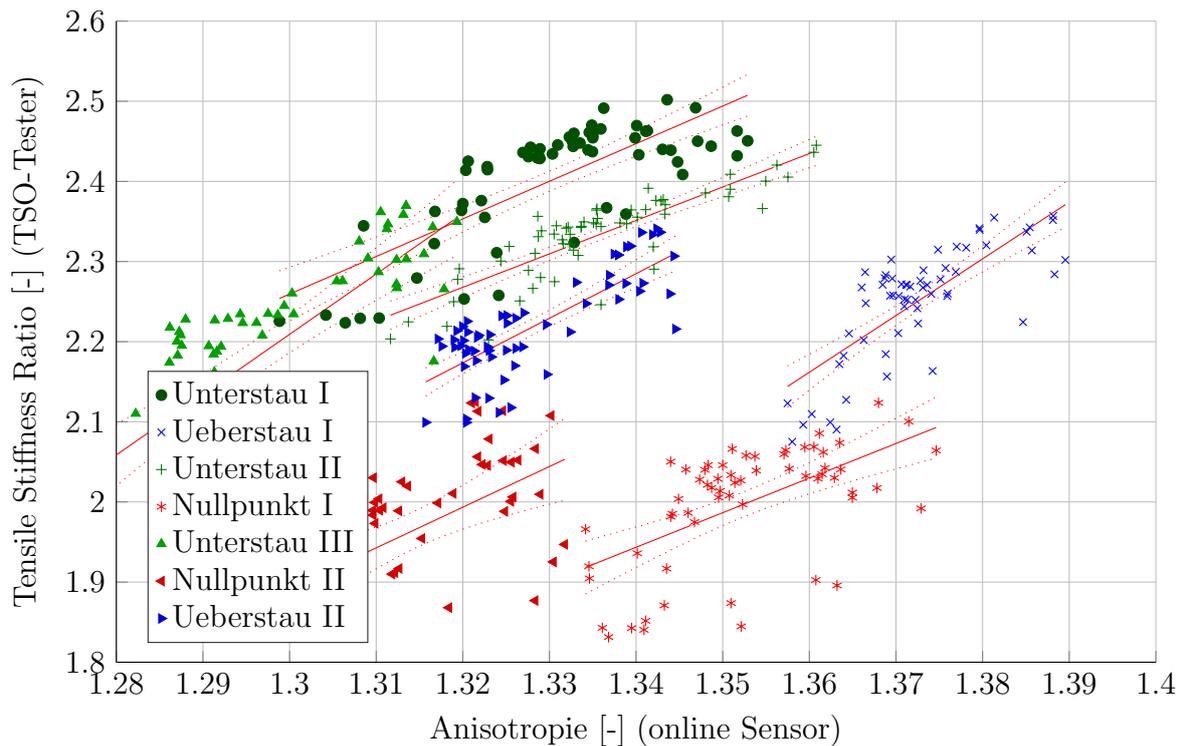


Diagramm 5: Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen den Messwerten des online Sensors und des TSO-Testers. Jedes Symbol zeigt eine Position eines Querprofils der einzelnen Versuche, welche mit den unterschiedlichen Messmethoden analysiert wird. Bei den einzelnen Untersuchungen zeigt sich ein mehr oder weniger guter linearer Zusammenhang zwischen den Messmethoden. Bei Betrachtung der gesamten Daten ist jedoch nur ein sehr geringer Zusammenhang erkennbar. Weiters ist das erwartete Minimum im Strahlnullpunkt gut sichtbar, welches das online System nicht zeigt.

	Unterstau I	Unterstau II	Unterstau III	Nullpunkt I
R^2	0,59	0,73	0,53	0,34
	Nullpunkt II	Überstau I	Überstau II	Gesamt
R^2	0,2	0,59	0,6	0,05

Tabelle 5.1: Die Tabelle zeigt die Bestimmtheitsmaße aller Regressionen der einzelnen Versuche und der gesamten Messdaten der Faserorientierungsanisotropie.

gleichen Region, im Gegensatz zum Unterstau III, welcher in der letzten Versuchsreihe durchgeführt wurde. Bei dieser Versuchsreihe sehen wir eine Abdriftung der online Messung, weil alle drei Staupunkte dieser Reihe gleichmäßig nach links verschoben sind. Weiters ist nochmals zu erwähnen, dass die online Daten nicht mit dem zu erwarteten Ergebnis zusammen passen, da der Strahlnullpunkt (Nullpunkt I & II) höhere Werte als der Unterstau und Überstau aufweist.

Faserorientierungswinkel

Wie auch schon zuvor bei der Anisotropie, werden jetzt die Ergebnisse des Faserorientierungswinkels der beiden Messmethoden gegenübergestellt. Das nachfolgende Diagramm 6 zeigt zuerst die Ergebnisse der online Messmethode.

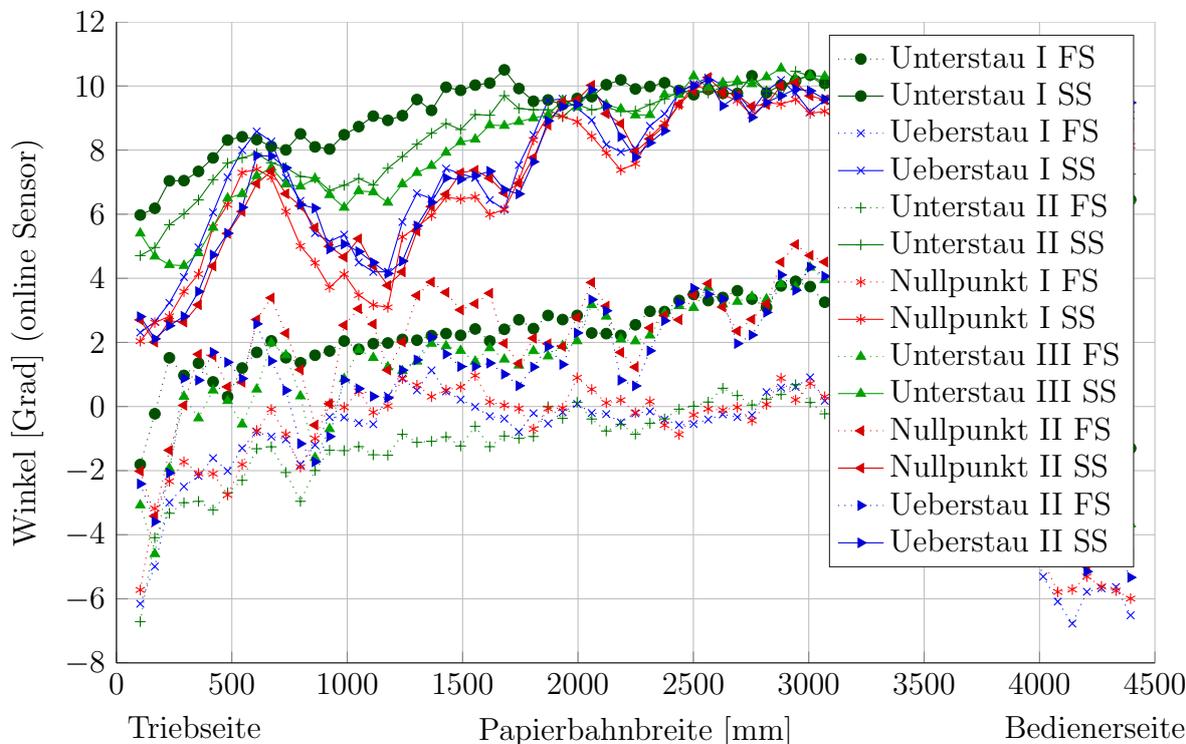


Diagramm 6: Das Diagramm zeigt die Ergebnisse des Faserorientierungswinkels der online Messung. Dabei stellen die durchgezogenen Linien die Querprofile der unterschiedlichen Versuche an der Papierunterseite dar. Die strichlierten Linien zeigen den Winkel an der Papieroberseite, welche einen geringeren Wert als an der Filzseite besitzen. An der Siebseite liegen die beiden Querprofile der Unterstauversuche nahe beisammen. Dies ist in den Messungen der Papieroberseite nicht zu erkennen und zusätzlich weist diese Seite einen vorwiegend negativen Winkel auf, was in diesem Fall eine Ausrichtung zur Triebseite bedeutet.

Die Winkelquerprofile der online Messung zeigen einen relativ großen Unterschied zwischen den beiden Papierseiten Filzseite und Siebseite. Die Werte an der Filzseite (strichlierte Linien) weisen einen geringeren Winkel als die an der Papierunterseite (durchgezogene Linien) auf. Weiters liegen die Messwerte der Papieroberseite, bis auf den ersten Versuch im Unterstau (Unterstau I), auf sehr ähnlichem Niveau. Der Grund hierfür ist uns nicht bekannt.

Laut Kapitel 1 würde man einen Vorzeichenwechsel des Faserorientierungswinkels zwischen den Versuchen im Unterstau (Unterstau I, II & III) und Überstau (Überstau I & II) erwarten, welcher aber an den Messergebnissen des online Systems nicht ersichtlich ist. Zusätzlich ist auch eine stärkere Winkelabweichung im Nullpunkt aufgrund der geringen Anisotropie zu erwarten, welche wiederum nicht durch den online Sensor dargestellt wird.

Wie auch schon bei den Anisotropie-Ergebnissen könnte hier wiederum eine oberflächliche Messung die Ursache sein. Im nächsten Diagramm 7 ist die Tensile Stiffness Orientation (korreliert mit dem Faserorientierungswinkel) des TSO-Testers dargestellt. Die Querprofile zeigen ein typisches Verhalten, welches aufgrund der Theorie (siehe Kapitel 1.2.1) auch erwartet wird.

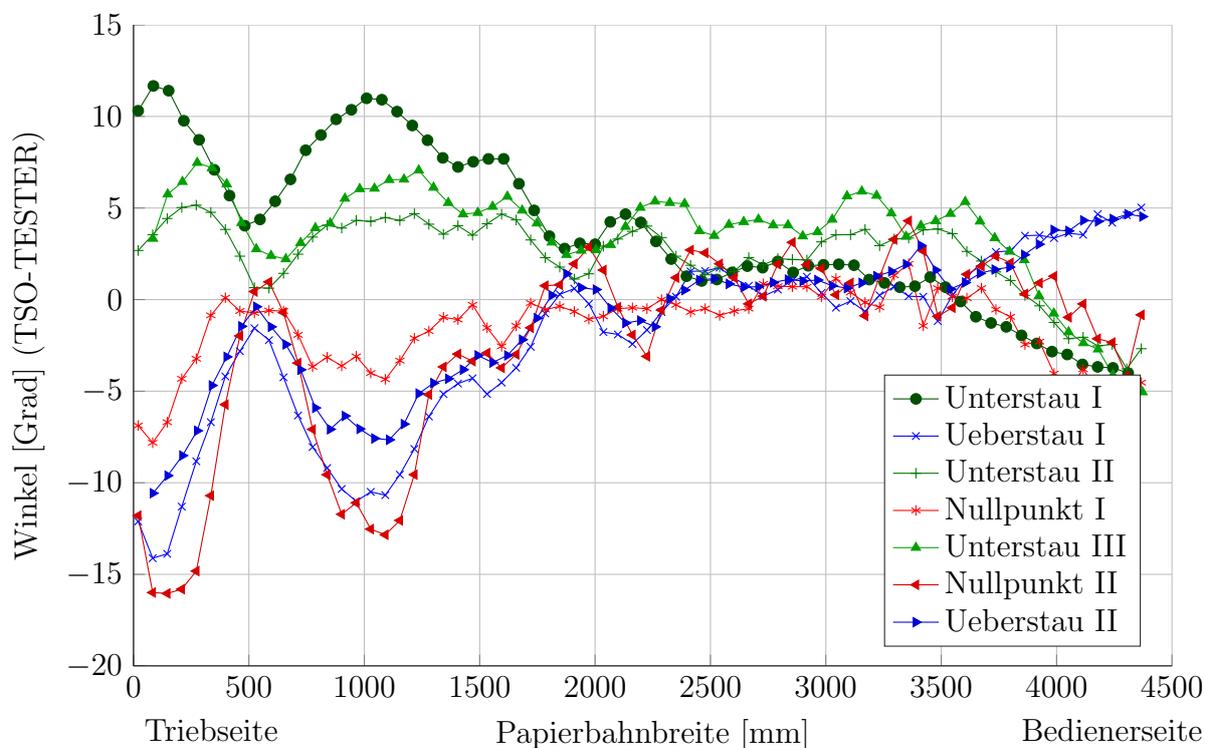


Diagramm 7: Dieses Diagramm zeigt die Ergebnisse der Versuche für den Orientierungswinkel des TSO-Testers. Dabei sind die ermittelten Querprofile charakteristisch für die einzelnen Staupunkte. Im Unterstau werden die Fasern zur Bahnmitte ausgerichtet. Dies ist durch den positiven Winkel an der Triebseite und den negativen Winkel an der Bedienerseite zu erkennen. Beim Wechsel in den Überstau wechselt die Hauptausrichtung der Fasern in Richtung der Ränder.

Im Unterstau (Unterstau I, II & III) besitzt der Winkel auf der Triebseite einen positiven Wert, welcher zur Bedienerseite hin abnimmt und negativ wird. Das Querprofil zeigt somit eine Hauptausrichtung der Fasern in die Mitte der Papiermaschine. Dieser Betriebszustand wird laut [Lindblad und Fuerst, 2007] als „toe-in“ Betrieb bezeichnet und bewirkt höhere Festigkeiten in der Papierbahn. Beim Wechsel des Staupunktes in den Überstau (Ueberstau I & II) ändert der Orientierungswinkel das Vorzeichen und es entsteht ein gespiegeltes Profil. Somit richten sich die Fasern bei einem hohen Strahl-Sieb-Verhältnis von der Mitte zu den Bahnrändern hin aus und es stellt sich der „toe-out“ Betrieb ein. [Lindblad und Fuerst, 2007] schreibt, dass in diesem Betriebszustand eine bessere Formation erreicht wird.

Um die Winkelergebnisse zu evaluieren, werden die Messergebnisse des online Systems mit

denen des TSO-Testers im Diagramm 8 gegenübergestellt. Dafür werden die Ergebnisse der beiden Systeme für jede Position eines Querprofils der einzelnen Versuche verglichen.

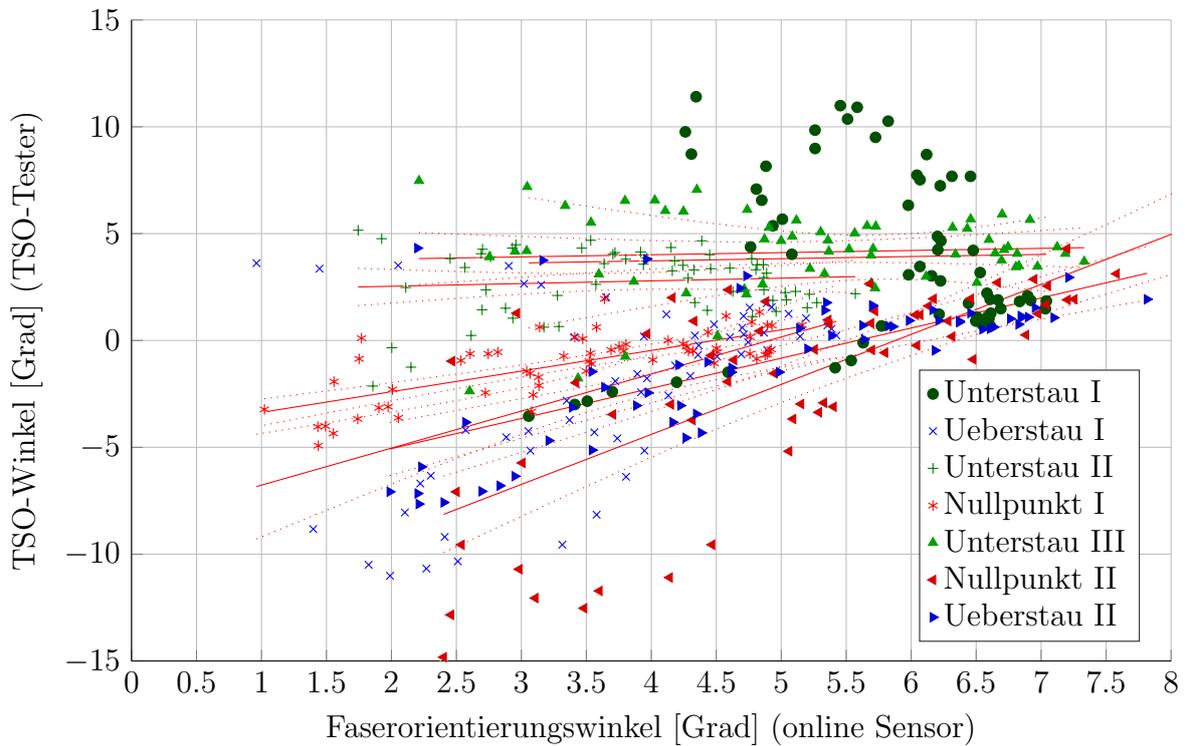


Diagramm 8: Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen den Messwerten des online Sensors und des TSO-Testers. Jedes Symbol zeigt eine Position eines Querprofils der einzelnen Versuche, welche mit den unterschiedlichen Messmethoden analysiert wird. Gut zu sehen ist, dass für die einzelnen Versuche kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Analysemethoden vorhanden ist. Über die gesamten Messdaten hinweg erkennt man jedoch eine schwache Korrelation, welche aber nicht aussagekräftig ist.

Im Diagramm 8 ist gut ersichtlich, dass es nur einen geringen Zusammenhang zwischen der online Messmethode und dem TSO-Tester innerhalb der Versuchsreihen gibt. Die Korrelation der beiden Systeme für die gesamten Messdaten besitzt ein höheres Bestimmtheitsmaß als bei der Anisotropie (Diagramm 5), jedoch ist dieses nicht hoch genug, um eine akzeptable Vergleichbarkeit zwischen den Messmethoden zu haben (siehe Tabelle 5.2).

	Unterstau I	Unterstau II	Unterstau III	Nullpunkt I
R^2	0	0	0	0,54
	Nullpunkt II	Überstau I	Überstau II	Gesamt
R^2	0,52	0,23	0,48	0,2

Tabelle 5.2: Die Tabelle zeigt die Bestimmtheitsmaße aller Regressionen der einzelnen Versuche und der gesamten Messdaten des Faserorientierungswinkels.

5.2 Evaluierung mit der Sheet-Splitting Methode

Faserorientierungsanisotropie

Als nächster Schritt wird die Zweiseitigkeitsmessung des „dual-sided online FO-Sensor“ der Sheet-Splitting Methode gegenübergestellt.

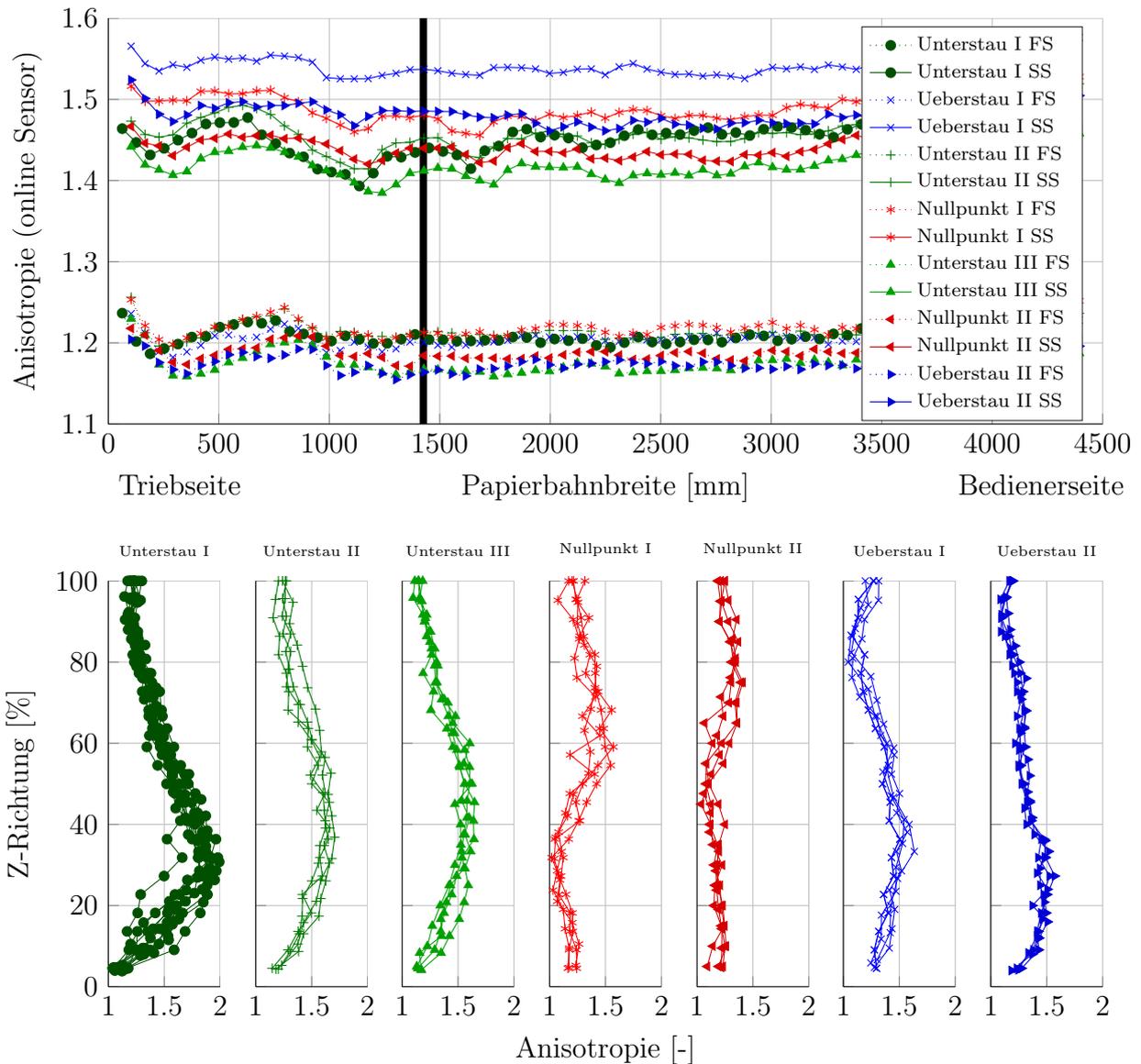


Diagramm 9: Die Diagramme zeigen die Ergebnisse der online Messung und der Sheet-Splitting Methode an einer mittleren Querprofilposition (1,45m von Triebseite) für die vier Versuche (siehe schwarze Linie im oberen Diagramm). Gut zu erkennen ist die hohe Reproduzierbarkeit der einzelnen Splitting Proben. Die Versuche Unterstau I, II & III zeigen ebenfalls ein sehr ähnliches Verhalten. An der Papieroberseite (100% Z-Richtung) sehen wir eine sehr einheitliche Anisotropie über die gesamten Versuche. Dies ist auch in der online Messung zu erkennen. Die Papierunterseite (Siebseite) weist Unterschiede zwischen den Versuchen auf und zeigt grundsätzlich für die ersten Lagen (5-10% Z-Richtung) einen gewissen Zusammenhang zwischen den beiden Methoden.

Durch das Sheet-Splitting erhalten wir ein gesamtes Z-Profil der Anisotropie und des Faserorientierungswinkels, wodurch eine Zweiseitigkeit in den Parametern ersichtlich wird. Das Diagramm 9 zeigt die Ergebnisse der online Messung aller Versuche mit den dazugehörigen Z-Profilen an einer bestimmten Untersuchungsposition. Die einzelnen unteren Diagramme zeigen nun die Faserorientierungsanisotropie über die Papierbahndicke der einzelnen Versuche an derselben Querprofilposition (1,45m von der Triebseite). Gut zu erkennen sind dabei die charakteristischen Z-Profile für die einzelnen Versuche. Im Unterstau zeigt sich das Profil, welches an der Siebseite die geringste Anisotropie besitzt. Bis zu einer Dicke von zirka 40% nimmt die Anisotropie dann stark zu und erreicht ein Maximum. Zur Oberseite hin nimmt diese aber dann wieder ab. Im Überstau (Ueberstau I & II) zeigt sich ein ähnliches Verhalten, nur besitzen die Profile bei ca. 80% der Blattdicke ein Minimum, welches annähernd bei einer kompletten Isotropie liegt. Im Strahlnullpunkt (Nullpunkt I & II) verhält sich das Anisotropie Z-Profil relativ konstant, besitzt aber über das Profil gesehen die geringste Anisotropie, wie es auch aus der Literatur bekannt ist. Auch gut ersichtlich ist, dass es kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen an der Papieroberseite gibt, welche beide Systeme detektieren. Die Messwerte der beiden Messmethoden liegen bei der Papieroberseite auf sehr ähnlichem Niveau von ca. 1,2. An der Papierunterseite sind jedoch größere Abweichungen zu erkennen. Während der online Sensor Anisotropiewerte von bis zu 1,55 ausgibt, wird bei der Sheet-Splitting Methode in den untersten Schichten eine erheblich geringere Anisotropie gemessen.

Faserorientierungswinkel

Um die Winkelzweiseitigkeitsmessung nun zu überprüfen, sind die Analyseergebnisse der online Messung und der Sheet-Splitting Methode im Diagramm 10 dargestellt.

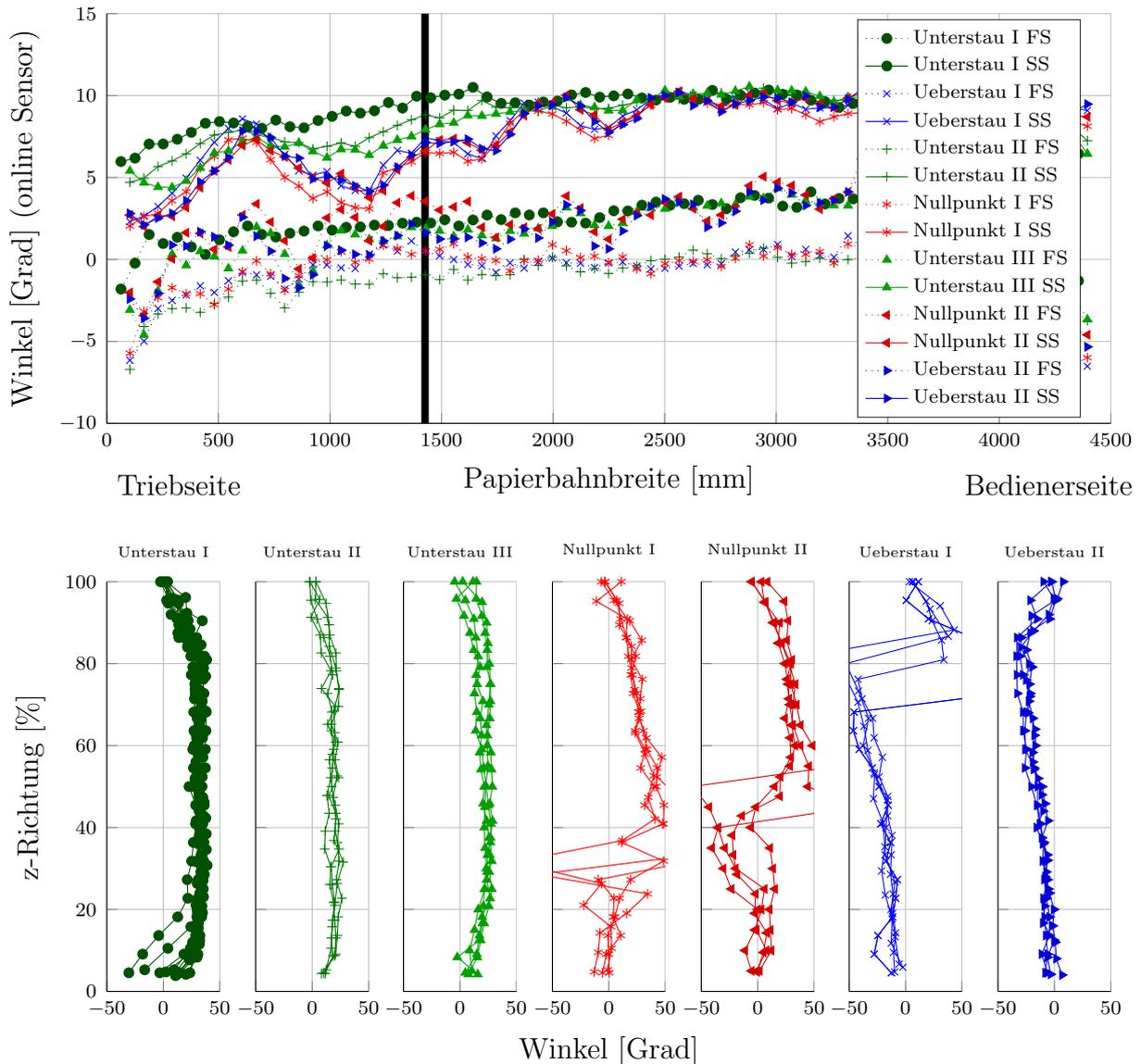


Diagramm 10: Die Diagramme zeigen die Ergebnisse der Splitting-Methode (unten) und des online Systems (oben) über alle Versuche an der CD-Position 1,45m von der Triebseite (schwarze Linie) entfernt. Der Faserorientierungswinkel an der Blattunterseite ist laut der online Messung immer positiv und besitzt höhere Werte als an der Papieroberseite. Die Splittingprofile zeigen die zu erwartende Form. Im Unterstau (Unterstau I & Unterstau II) erhalten wir an dieser CD-Position einen positiven und im Überstau einen durchwegs negativen Winkel (Vorzeichenwechsel wie in der Theorie beschrieben). Im Strahlnullpunkt und im Überstau erkennen wir zusätzlich starke Schwankungen des Winkels, welche auf die extrem geringe Anisotropie an diesen Z-Positionen zurückzuführen ist.

Wiederum sehen wir im oberen Diagramm den Faserorientierungswinkel über das gesamte Querprofil und in den unteren Diagrammen die Z-Verteilung des Winkels für die

einzelnen Versuche. In den beiden Unterstauversuchen (Unterstau I, II & III) erhalten wir einen positiven Winkel an der CD-Position 1,45m von der Triebseite (siehe schwarze Linie am oberen Diagramm) entfernt. Dies bedeutet, dass die Fasern hier in Richtung der Bahnmitte zeigen. Dieses Ergebnis haben wir auch schon zuvor im Kapitel 5.1 an den Messwerten des TSO-Testers gesehen. Im Überstauversuch (Ueberstau I & II) ist von der Papierunterseite (0% Z-Richtung) bis etwa zu 80% zur Oberseite hin ein negativer Winkel zu erkennen. Bei zirka 80% ist eine starke Abweichung im Ueberstau I zu erkennen, welche mit der sehr geringen Anisotropie in diesem Punkt erklärbar wird (siehe Diagramm 9). Bei einer Anisotropie von 1 gibt es grundsätzlich keinen Faserorientierungswinkel, da keine Hauptausrichtung vorhanden ist. Die Änderung des Vorzeichens zwischen Unterstau und Überstau bestätigt wiederum die Theorie. Im Strahlnullpunkt (Nullpunkt I & II) besitzt der Faserorientierungswinkel ebenfalls eine starke Unregelmäßigkeit, welche auch wieder an der sehr geringen Anisotropie (Diagramm 9) liegt. Im Vergleich der Splitting Ergebnisse des Winkels mit den Online Messwerten sehen wir keinen guten Zusammenhang. Betrachten wir die Versuche des Unterstaus, so sehen wir an der Papierunterseite einen positiven Winkel, welcher zur Mitte hin zunimmt. An der Papieroberseite reduziert sich der Winkel annähernd bis Null. Diesen Effekt kann man auch in der online Messung erkennen. Im Überstau und im Staunullpunkt zeigt sich nach der Splitting-Methode ein negativer Winkel an der Blattunterseite und ein positiver Winkel an der Blattoberseite, welcher am online System nicht ersichtlich ist.

5.3 Zusammenfassung der Evaluierung

Zusammenfassend kann man erkennen, dass die online Messung der Faserorientierung mit dem „dual-sided online FO-Sensor“ nur bedingt funktioniert. Die Formen der Anisotropie-Querprofile sind bei den beiden Messmethoden des Online Sensors und des TSO-Testers ähnlich. Das Problem ist jedoch, dass die Daten des Online Sensors zwischen den Versuchen nicht korrekt sind, da wir kein Anisotropie-Minimum im Staunullpunkt, wie es die Literatur beschreibt, finden können, welches jedoch mit dem TSO-Tester von Lorentzen & Wettre zu sehen ist. Die Ergebnisse der Zweiseitigkeitsevaluierung in der Anisotropie sind ebenfalls nicht mit der Sheet-Splitting Methode zu erklären, wobei auch diese durch die vorhandene Literatur und die Ergebnisse des TSO-Testers bestätigt wird. In den Analysen des Faserorientierungswinkels finden wir ebenfalls keine Korrelation des Online Systems mit einer der beiden Messmethoden des Sheet-Splittings und des akustischen Messprinzips. Wir erkennen jedoch an den Ergebnissen der Vergleichsmethoden die gleichen Phänomene. Im Unterstau stellt sich an der Triebseite ein positiver und an der Führerseite ein negativer Winkel ein. Durch das Wechseln in den Überstau kommt es zu einer Änderung des Vorzeichen und es kommt zu einem Querprofil, welches ein gespiegeltes Verhalten aufweist. Dies ist ebenfalls in der Sheet-Splitting Auswertung erkennbar und wird durch die Literatur bestätigt.

Das Problem liegt meiner Meinung nach hauptsächlich in einer sehr oberflächlichen Messung. Dadurch werden nur die äußersten Lagen der beiden Papierseiten analysiert, welche nicht für das gesamte Blatt repräsentativ sind. Ebenfalls ein Grund für die schlechte Vergleichbarkeit könnte die relativ starke Füllstoffzweiseitigkeit zwischen den beiden Papierseiten sein. Die kleinen Füllstoffpartikel erzeugen eine ungerichtete Streuung des Laserlichtes, welches die Messung beeinflussen könnte.

Kapitel 6

Ergebnisse - Irreversibler Curl

Um die Trocknungsspannungen, welche durch den Produktionsprozess an der Papiermaschine entstehen, zu untersuchen, wird der im Kapitel 3.6 vorgestellte Prozess durchgeführt. Dafür werden die Papiermuster mehreren Klimazyklen ausgesetzt und immer wieder der Wölbungswert der Proben ermittelt.

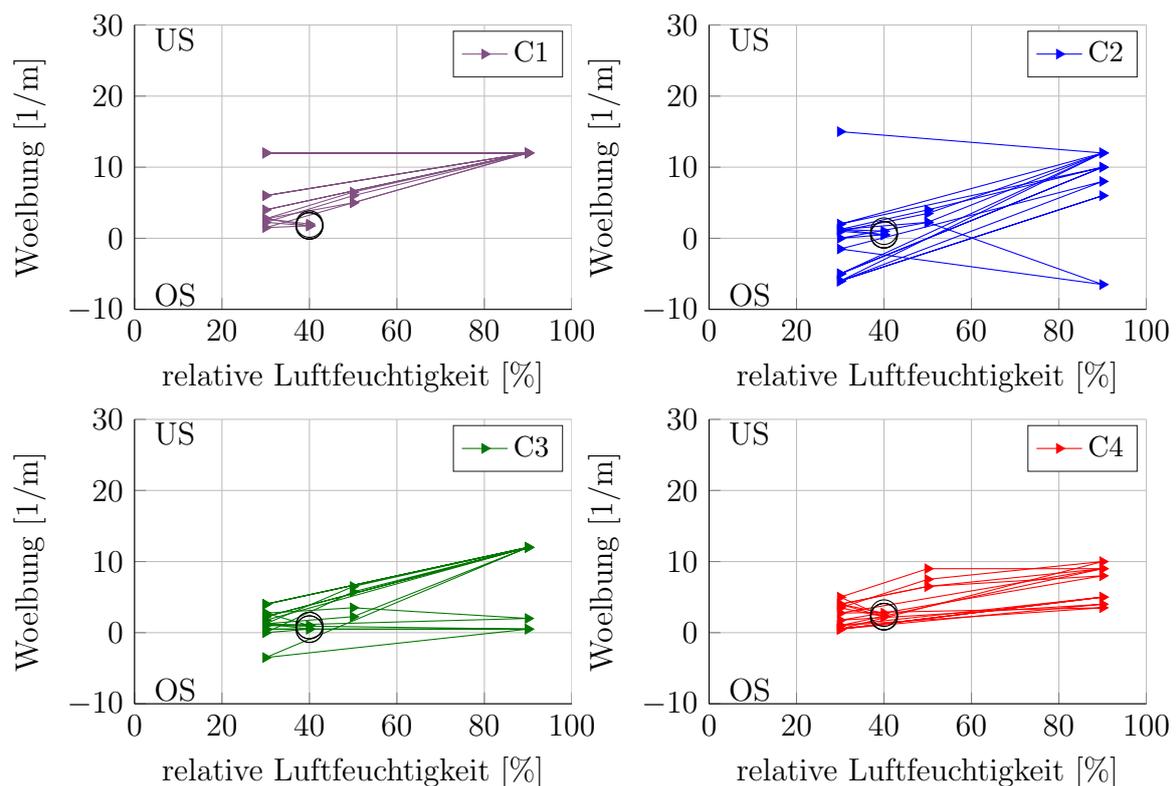


Diagramm 11: Die Abbildung zeigt das Ergebnis der ersten Untersuchungen für den irreversiblen Curl an den vier Untersuchungspositionen. Dabei ist dieser Versuch im Unterstau bei aktivierter Siebschüttelung durchgeführt worden. Gut zu erkennen ist der Anstieg der Wölbung zur Siebseite (Richtung US) während des ersten Trocknungsprozesses. Durch den nachfolgenden Befeuchtungsprozess steigt der Curl noch weiter zur Unterseite (US) hin an. Danach folgt ein reversibler Prozess, welcher beim Trocknen zur Oberseite (OS) wirkt.

Für die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wird die Temperatur konstant auf 23°C gehalten und die relative Luftfeuchtigkeit variiert. In den Untersuchungen bedeutet eine positive Wölbung eine Wölbung zur Papierunterseite (US) hin und eine negative Wölbung beziehungsweise abnehmende Wölbung eine zur Papieroberseite (OS) hin. Die Ergebnisse zur ersten Untersuchung, welche im Unterstau bei aktiver Siebschüttelung durchgeführt wurde, sind im Diagramm 11 dargestellt. Dabei werden die vier Untersuchungspositionen, wie schon in den vorherigen Kapiteln erwähnt, herangezogen. Bei einem geschätzten Startwert von 40% relativer Luftfeuchtigkeit wird der erste Trocknungsvorgang mit 30% relativer Luftfeuchte gestartet. Wie in den Diagrammen ersichtlich, nimmt die Wölbung der Papierproben immer zu. Dies bedeutet, die Wölbung wirkt in die Richtung der Siebseite. Während des ersten Befeuchtungsprozesses nimmt der Curl noch stärker zur Siebseite hin zu. Anschließend ist an den meisten Proben ein reversibler Curlvorgang zu erkennen. Das Problem dieser Untersuchungen besteht darin, dass der strukturelle Curl, welcher grundsätzlich beim ersten Trocknungsprozess zur Siebseite hin wirkt, nach dem Befreien der Trocknungsspannungen die Richtung ändert. Dies stimmt nicht mit der Literatur überein. Ein Grund hierfür liegt in der etwas kleinen Ausführung des Klimaschranks, wodurch eine sehr hohe Luftzirkulation zustande kommt und sich bei einer hohen Anzahl der Proben diese gegenseitig beeinflussen. Weiters ist der Startwert mit 40% relativer Luftfeuchtigkeit ein Schätzwert. Aus diesem Grund wurde eine zweite Versuchsreihe mit weniger Proben an den zwei Positionen C2 und C4 durchgeführt. Das Resultat ist im Diagramm 12 zu sehen.

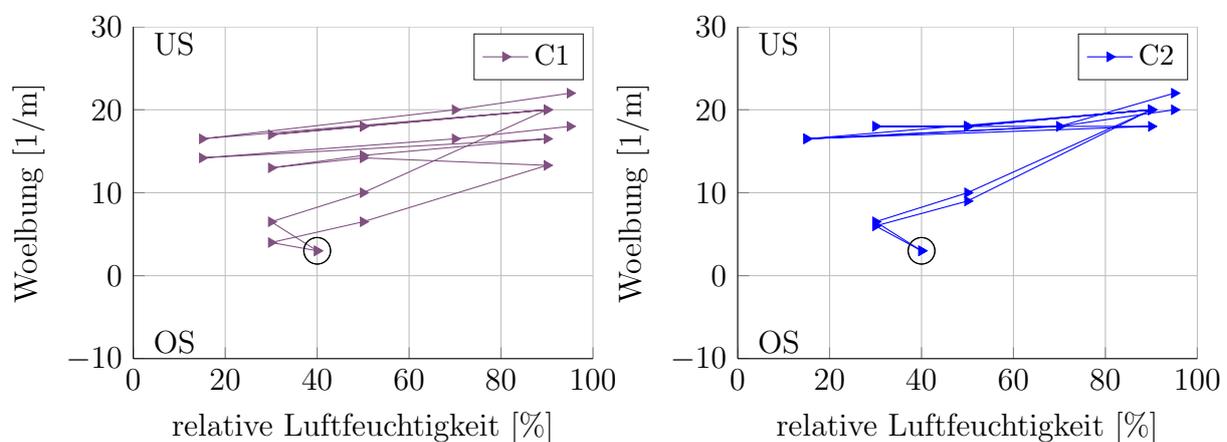


Diagramm 12: Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Untersuchungen zum irreversiblen Curl für den Unterstau II Versuch. Durch einen beginnenden Trocknungsprozess erhöht sich die Wölbung zur Unterseite. Im anschließenden Befeuchtungsvorgang wird der Curl weiter in dieselbe Richtung verstärkt. Der Grund hierfür liegt in der Freilegung der Trocknungsspannungen. Die nachfolgenden Trocknungs- und Befeuchtungszyklen stellen einen reversiblen Prozess dar.

Wie auch schon bei den Vorversuchen, sieht man den Anstieg der Wölbung in Richtung der Siebseite im ersten Trocknungsschritt, jedoch erkennt man nun sehr gut die Befrei-

ung der Trocknungsspannungen und den anschließenden reversiblen Prozess durch die Papierstruktur. Auch hier wirkt der strukturelle Curl nach dem ersten Befeuchtungsvorgang zur Papieroberseite hin. Dies stimmt wiederum nicht mit der Literatur und unseren Resultaten des strukturellen Curls überein. Die Untersuchungen zum strukturellen Curl zeigen, dass die Zweiseitigkeiten in der Struktur der Papiere durch einen Trocknungsprozess grundsätzlich einen Curl zur Siebseite hervorrufen sollten (siehe Kapitel 7). Um bessere Aussagen treffen zu können, müssen weitere Untersuchungen gemacht werden. Als nächster Schritt muss auch der genaue Startwert der relativen Luftfeuchtigkeit ermittelt werden. Weiters muss für die Versuche ein geeigneter Klimaschrank oder Klimaraum verwendet werden, um die Genauigkeit der Untersuchung zu steigern. Ebenfalls müssen weitere Parameter, wie die Geschwindigkeit der Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit sowie die Dauer für die Erreichung der Gleichgewichtsfeuchte, berücksichtigt werden, da die Dynamik ebenfalls einen Einfluss auf die Wölbung besitzt.

Kapitel 7

Ergebnisse - Struktureller Curl

Für die Untersuchung des strukturellen Curls wird der Papieraufbau der einzelnen Versuche untersucht und analysiert. Im Detail wird die Zweiseitigkeit in Bezug auf Faserorientierung, Füllstoffgehalt und Stärkegehalt genauer analysiert. Diese Zweiseitigkeiten zwischen Papieroberseite und -unterseite werden im Anschluss mit dem Wölbungsverhalten vor und nach dem Kopierprozess in Relation gebracht. Zu Beginn wird aus den Proben, wie im Kapitel 3 erklärt, die Füllstoff- und Stärkeverteilung in Z-Richtung ermittelt. Zusätzlich werden Proben über das Sheet-Splitting Verfahren auf ihre Faserorientierungszweiseitigkeit analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

7.1 Füllstoff- und Stärkezeuigkeit

Für diese Untersuchung werden die Methoden, wie in Kapitel 3.5 und 3.3 erklärt, verwendet. Das Ergebnis der Aschezweuigkeit ist im nachfolgenden Diagramm 13 dargestellt.

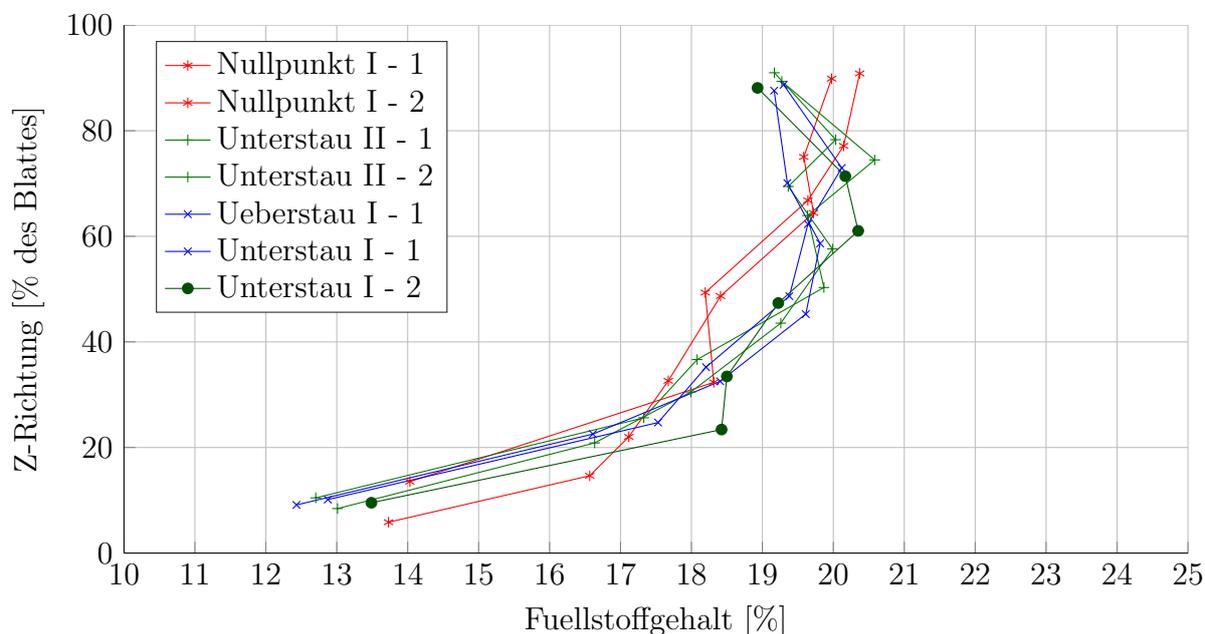


Diagramm 13: Darstellung der Ergebnisse der Füllstoffzweuigkeitsanalyse für die einzelnen Versuche Unterstau I & II, Nullpunkt I und Überstau I. Gut ersichtlich ist die Füllstoffzweuigkeit, welche durch das Papiermaschinenkonzept (Langsiebpapiermaschine) vorgegeben wird. Durch die einseitige Entwässerung kommt es zu einer Art Auswaschung an der Papierunterseite. An der Oberseite jedoch wird der Füllstoff größtenteils zurückgehalten. Ein weiteres erkennbares Resultat ist die Stabilität zwischen den einzelnen Ergebnissen. Dies bedeutet, dass das Strahl-Sieb-Verhältnis keinen Einfluss auf die Füllstoff Z-Verteilung besitzt.

Das Diagramm zeigt die Z-Verteilungen des Füllstoffgehalts für die unterschiedlichen Versuche Unterstau I & II, Nullpunkt I und Überstau I. Es ist ein konstantes Füllstoffprofil über alle Versuche hinweg zu erkennen. Dabei sieht man sehr gut die für eine Langsiebpapiermaschine typische Z-Verteilung mit einem hohen Füllstoffanteil an der Oberseite und einem geringen Anteil an der Papierunterseite. Der Grund hierfür liegt in der einseitigen Entwässerung auf der Siebseite. Durch die spezielle Entwässerung und dem Einsatz von Foilleisten kommt es zu einer Auswaschung des Füllstoffes an der Unterseite. Bei fortschreitender Entwässerung entsteht eine Fasermatte, welche viele Fein- und Füllstoffe zurückhält, wodurch der Gehalt an Füllstoff in Richtung der Papieroberseite zunimmt. Deshalb entsteht durch dieses Maschinenkonzept eine unumgängliche Füllstoffzweuigkeit. Durch einen unterschiedlichen Füllstoffgehalt an den beiden Seiten kommt es zu einer unterschiedlichen Hygroexpansion, welche eine Wölbung verursachen kann. Die Abhängigkeit der Hygroexpansion und des $CaCO_3$ -Gehalts wurde von [Uesaka, 2001] untersucht. Das

Ergebnis ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

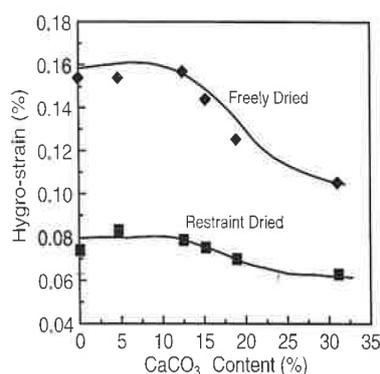


Abbildung 38: Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen dem Füllstoffgehalt (CaCO_3) und der Hygroexpansion für ein frei getrocknetes und ein nicht frei getrocknetes Papierblatt. Zu erkennen ist, dass im Bereich von 13% und 20% CaCO_3 die stärksten Änderungen in der Hygroexpansion auftreten. [Uesaka, 2001]

Da [Uesaka, 2001] einen starken Einfluss des CaCO_3 im Bereich von 13% bis 20% festgestellt hat, kann man davon ausgehen, dass ein relevanter Einfluss auf den strukturellen Curl durch die Füllstoffzweiseitigkeit vorhanden ist. Durch den geringeren Füllstoffgehalt an der Papierunterseite wird eine stärkere Hygroexpansion an dieser Seite erwartet, welche bei Befeuchtung einen Curl zur Oberseite beziehungsweise bei Trocknung einen Curl zur Unterseite hervorrufen wird.

Aus dem Diagramm 13 erkennt man aber auch, dass zwischen den einzelnen Versuchen mit unterschiedlichem Strahl-Sieb-Verhältnis keine relevanten Unterschiede in der Füllstoffzweiseitigkeit erkennbar sind. Deshalb kann man aufgrund der konstanten Füllstoff Z-Verteilung keinen Einfluss auf das Wölbungsverhalten der untersuchten Kopierpapiere erkennen, da diese strukturelle Eigenschaft alle Proben im gleichen Ausmaß beeinflusst. Im nächsten Diagramm 14 wird das Ergebnis der Stärkeanalysen in Z-Richtung gezeigt. Wie auch schon zuvor sind die Ergebnisse der einzelnen Versuche von Unterstau bis Überstau dargestellt. Dabei zeigt sich ebenfalls eine konstante Z-Verteilung der Stärke. An den Papieraußenseiten ist ein sehr hoher Anteil von bis zu 55 kg/to zu erkennen. In der Mitte des Papierblattes zwischen 20 und 80 Prozent der Z-Richtung besitzen die Proben einen gleichmäßigen Stärkeanteil. Der hohe Gehalt an den beiden Papierseiten ist auf den Einsatz von Oberflächenstärke, welche über die Leimpresse aufgetragen wird, zurückzuführen. Der Anteil in der Mitte wird durch den Einsatz von kationischer Masstärke hervorgerufen. Wie auch schon bei den Füllstoffanalysen ist hier auch kein Einfluss des Strahl-Sieb-Verhältnisses zu erkennen. Durch die geringe Zweiseitigkeit ist nicht zu erwarten, dass die Z-Verteilung der Stärke einen Curl verursacht.

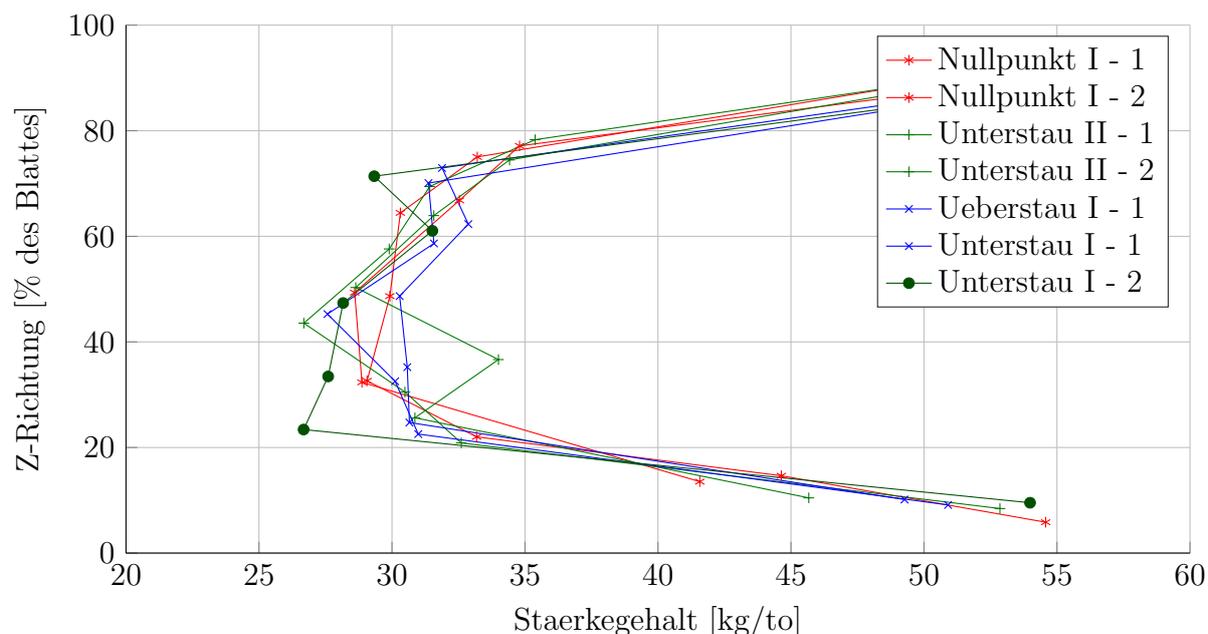


Diagramm 14: Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Stärkeuntersuchungen. Dabei erkennt man ein konstantes Ergebnis über alle Versuche hinweg. Auch eine Zweiseitigkeit ist nicht zu sehen. An den Papieraußenseiten jedoch steigt der Gehalt an Stärke stark an, was auf dem Stärkeauftrag in der Leimpresse zurückzuführen ist. Der Stärkeanteil in der Papiermitte wird von der kationischen Massestärke hervorgerufen.

7.2 Faserorientierungszweiseitigkeit

Die Faserorientierungszweiseitigkeit ist, wie im Kapitel 1 erklärt, ein Haupteinflussparameter auf den strukturellen Curl. Dabei unterscheiden wir zwischen der Anisotropiezweiseitigkeit und der Winkelzweiseitigkeit. Die Unterschiede der Anisotropie verursachen einen Curl in Querrichtung (Schüsseln) und die Winkeldifferenzen einen twist Curl (diagonal). Um die Auswirkungen der Faserorientierung auf das Wölbungsverhalten darzustellen, wird die Wölbung, welche durch den Kopiervorgang hervorgerufen wird, mit der Anisotropie- und der Winkelzweiseitigkeit verglichen. Die Untersuchungen wurden für alle 7 Versuche in den diversen Staupunkten durchgeführt, um starke Unterschiede in der Faserorientierung zu erhalten und so die Auswirkung der Faserorientierung auf das Wölbungsverhalten besser zu erkennen. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt.

7.2.1 Anisotropie

Die Anisotropiezweiseitigkeit bewirkt eine Wölbung in Querrichtung aufgrund der unterschiedlichen Hygroexpansion in Quer- und Maschinenrichtung. Wie im Kapitel 3.7 erklärt, werden die Proben zuerst auf ihre Wölbung untersucht. Anschließend wird die Wölbung nach dem Kopierprozess ermittelt. Zuletzt wird auch an diesen Querpositionen

die Faserorientierungszweiseitigkeit ermittelt, und die Wölbung mit der Gleichung Eq. 7.3 berechnet.

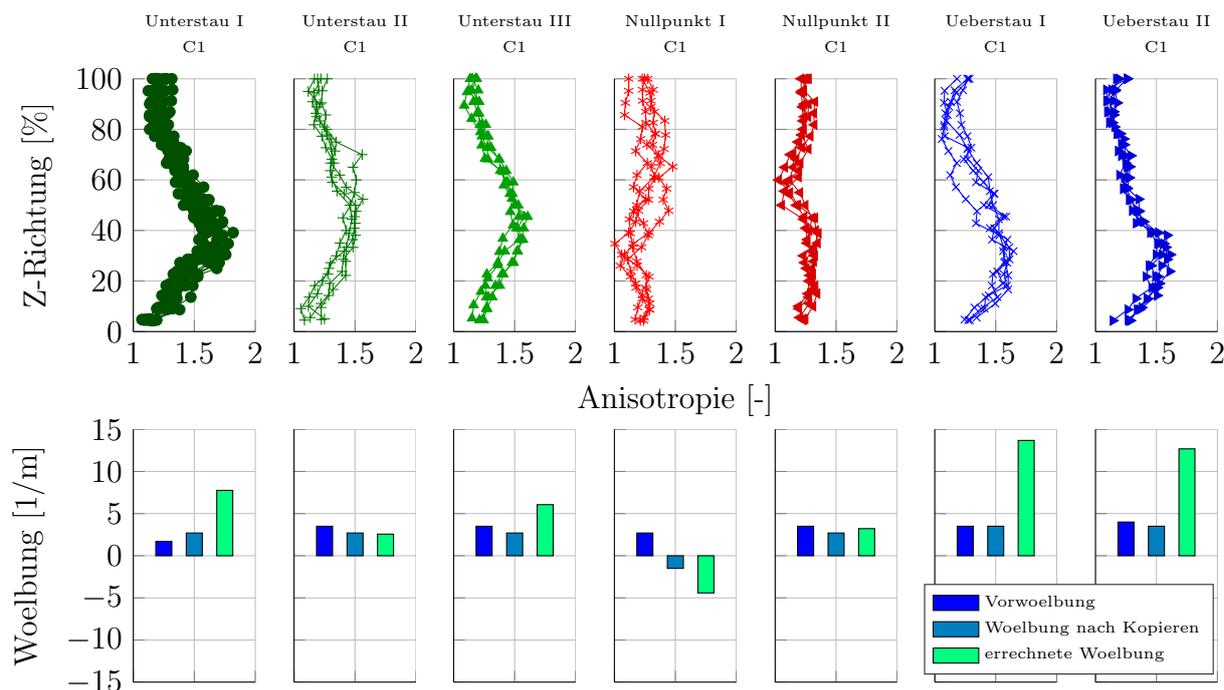


Diagramm 15: Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C1. Oben sind die Z-Profile der einzelnen Staupunkte dargestellt. Anhand dieser lässt sich die Zweiseitigkeit erkennen. Unten sind die Wölbungswerte, die gemessen beziehungsweise berechnet wurden.

Im Diagramm 15 ist das Resultat aller Versuche an der Position C1 (46cm von der Führerseite) dargestellt. Die obigen Z-Profile zeigen die Anisotropie der Proben für die einzelnen Staupunkte. Es ist gut zu erkennen, dass im Unterstau ein Maximum der Anisotropie bei zirka 40% der Blattdicke auftritt. Die geringste Anisotropie über die Z-Richtung tritt im Staunullpunkt auf. Im Überstau erhalten wir ein Maximum im unteren Bereich des Blattes und ein Minimum an der Blattoberseite. Wenn nun die Zweiseitigkeit der Anisotropie mit jeweils 40g/m^2 ermittelt wird (siehe Kapitel 2.4.3), erkennt man eine positive Zweiseitigkeit (Unterseite - Oberseite) für fast alle Versuche. Der Versuch Nullpunkt I besitzt eine negative Zweiseitigkeit, woraus bei Trocknung ein Wölbungsverhalten (zur Filzseite) resultieren sollte, was auch in der Wölbungsmessung nach dem Kopierprozess eintrat (Balkendiagramme). Die unteren Balkendiagramme zeigen nun die ermittelten Wölbungswerte durch die Bestimmungsmethode aus Abschnitt 3.2 und durch die Berechnung. Der erste Balken in den einzelnen Diagrammen zeigt die Wölbung vor dem Kopierprozess direkt nach der Papiermaschine. Der zweite Balken beschreibt das Wölbungsverhalten nach dem Kopierprozess und der dritte Balken drückt die durch die Faserorientierungszweiseitigkeit berechnete Wölbung aus. Wie man aus dem Balkendiagrammen erkennen kann, besitzen alle Proben eine positive Vorwölbung (Wölbung nach

der Papiermaschine zur Siebseite). Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Trocknung in der letzten Trockengruppe zwischen Papieroberseite und Unterseite. Die gesamten Versuche wurden bei einem Bias von 1 bar durchgeführt. Das bedeutet, dass die unteren Trockenzyylinder der letzten Trockengruppe mit einem höheren Dampfdruck beaufschlagt werden, wodurch die Papieroberseite stärker getrocknet wird und die Papierunterseite viskoelastisch gestaucht wird. Die Folge dieser einseitigen Trocknung ist eine Wölbung zur Papierunterseite (siehe Abschnitt 2.4.1). Während des Kopierprozesses (Xerographie) kommt es zu einem Trocknungsprozess, welcher die Wölbung der Probe ändert. Diese Änderung ist vom strukturellen Aufbau stark beeinflusst. Wie das Ergebnis zeigt, stimmt der strukturelle Curl, welcher berechnet worden ist, mit der gemessenen Wölbung zu meist in der Richtung überein. Jedoch erkennt man auch, dass zusätzlich ein anderes Curlphänomen vorhanden sein muss, da die Stärke des Curls und manchmal auch die Richtung abweicht (siehe Diagramm 19 bis 21). Diese Abweichungen sind auf einen eventuellen viskoelastischen Curl (siehe Abschnitt 2.4.1) zurückzuführen. Die Ursache für das viskoelastische Wölbungsverhalten kann durch die einseitige Hitzeeinwirkung beim Kopieren erklärt werden. Während des Kopierprozesses steht die bedruckte Seite mit der heißen Fixierwalze (ca. 180°C) in Kontakt, wodurch diese Seite stark getrocknet wird. Durch die kurze Kontaktzeit mit der heißen Walze wird ein viskoelastischer Curl gegen die beheizte Seite hervorgerufen, welcher sich nun mit dem strukturellen Curl überlagert und so die Wölbung mit beeinflusst.

Um nun einen Überblick über die gesamten Messdaten zu bekommen, werden in den folgenden Diagrammen die gemessenen Wölbungswerte vor und nach dem Kopieren mit den berechneten Werten gegenübergestellt.

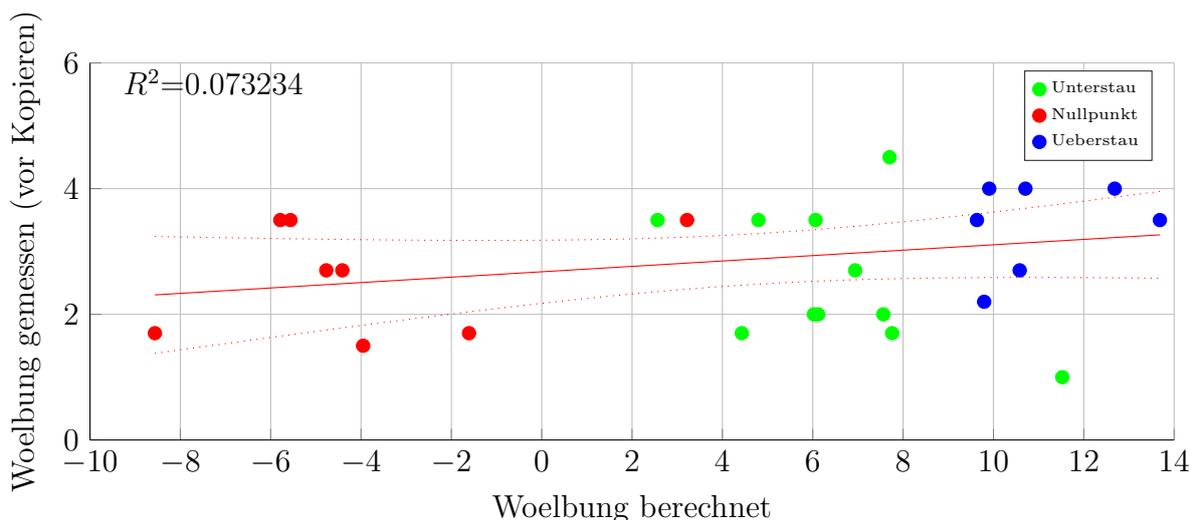


Diagramm 16: Gegenüberstellung aller Wölbungsmesswerte vor dem Kopieren mit den kalkulierten Wölbungswerten. Jeder Punkt beschreibt den tatsächlichen Messwert und den berechneten. Es ist kein linearer Zusammenhang bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,07$ erkennbar.

Das Diagramm 16 zeigt keinen Zusammenhang zwischen dem Wölbungsverhalten vor dem Kopieren und der Berechnung. Daraus lässt sich ableiten, dass das Wölbungsverhalten vor dem Kopierprozess nicht durch einen strukturellen Curl hervorgerufen wird. Vor dem Kopierprozess wird das Wölbungsverhalten durch andere Faktoren, wie eine viskoelastische Verformung und Trocknungsspannungen (siehe Kapitel 2.4.1 und 2.2.3), beeinflusst.

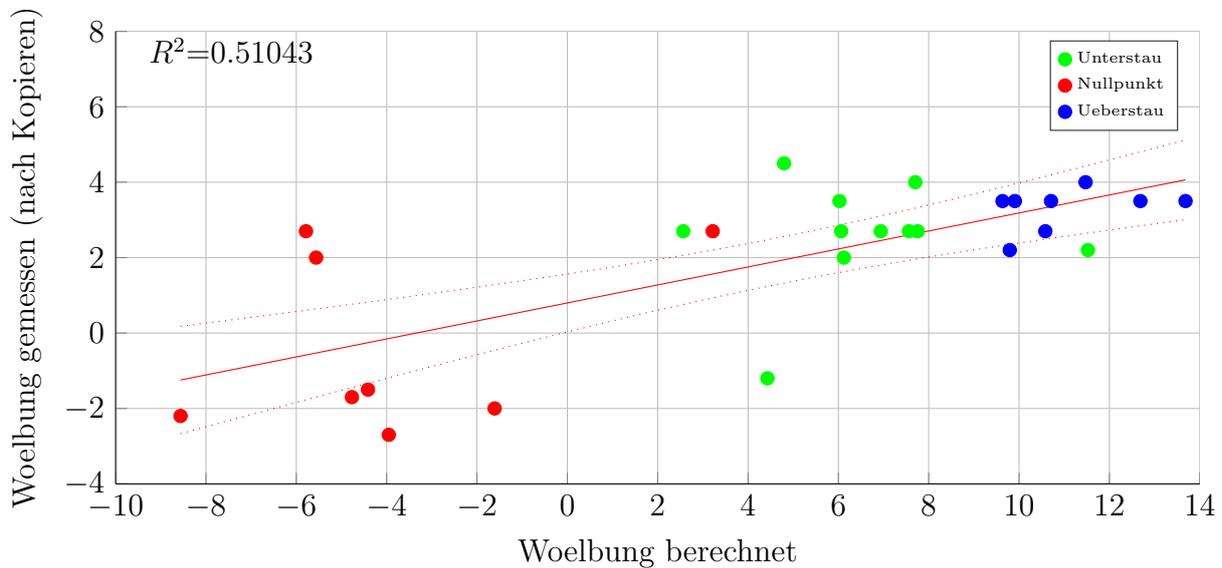


Diagramm 17: Gegenüberstellung aller Wölbungsmesswerte nach dem Kopieren mit den kalkulierten Wölbungswerten. Jeder Punkt beschreibt den tatsächlichen Messwert und den berechneten. Es ist ein annähernd linearer Zusammenhang bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,51$ erkennbar.

Im Diagramm 17 zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Berechnungsmodell und den tatsächlichen Messwerten nach dem Kopieren bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,51$. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Kopierprozess stark vom strukturellen Aufbau des Papiers beeinflusst wird. In dieser Regression wird jedoch nicht die Vorwölbung berücksichtigt. Deswegen wird ein weiteres lineares Regressionsmodell, welches zusätzlich die Vorwölbung miteinbezieht, dargestellt (siehe Tabelle 7.1).

Linear regression model:
 Wölbung_nach_Kopieren ~ 1 + Berechnung + Vorwölbung

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-1.692	0.72943	-2.3197	0.029186
Berechnung	0.19868	0.039345	5.0498	3.6644e-05
Vorwölbung	0.92998	0.24798	3.7502	0.00098795

Number of observations: 27, Error degrees of freedom: 24
 Root Mean Squared Error: 1.26
 R-squared: 0.691, Adjusted R-Squared 0.666
 F-statistic vs. constant model: 26.9, p-value = 7.48e-07

Tabelle 7.1: Die Tabelle zeigt das Ergebnis des erweiterten linearen Regressionsmodells.

Es ist ein stärkerer linearer Zusammenhang bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,69$ erkennbar. Weiters zeigt die Varianzanalyse, dass beide Variablen einen signifikanten Einfluss (p-Wert kleiner 10^{-4}) auf die Wölbung nach dem Kopieren besitzen (siehe Tabelle 7.1)

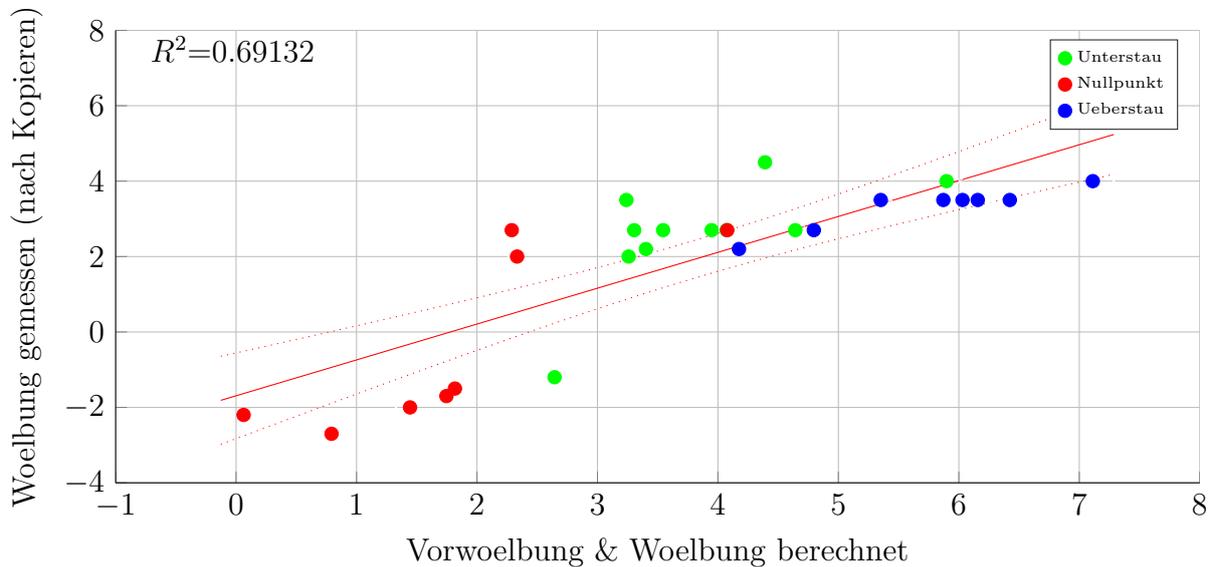


Diagramm 18: Darstellung des erweiterten linearen Regressionsmodells zur Beschreibung der Wölbung nach dem Kopieren mit den Prediktorvariablen Vorwölbung und struktureller Curl durch die Berechnung.

Da die Papierdicke für die Berechnung des strukturellen Curls eine wesentliche Rolle spielt, wird zusätzlich die Berechnung des Curls mit unterschiedlicher Lagenanzahl durchgeführt. Neben der Berechnung der mittleren Anisotropie für die Ober- und Unterseite mit jeweils 50% der Messwerte wird auch eine zweite Berechnung des strukturellen Curls mit 30% von der jeweiligen Papierseite durchgeführt. Wiederum werden die Regressionen durchgeführt und die Bestimmtheitsmaße in der Tabelle 7.2 dargestellt. Wie aus der Tabelle ersichtlich, zeigt die Berechnung mit 50% der Lagen eine genauere Beschreibung der Messwerte (höheres R^2).

	R^2 (50% der Lagen)	(R^2 30% der Lagen)
Wölbung nach Kopieren (lineare Regression)	0,51	0,46
Wölbung nach Kopieren (erweitertes Modell)	0,69	0,63

Tabelle 7.2: Die Tabelle zeigt die Bestimmtheitsmaße für die beiden Regressionsmodelle der Wölbungsberechnung bei unterschiedlicher Anzahl der Lagen für die Berechnung. Die Berechnung mit 50% der Messwerte zeigt ein besseres Ergebnis.

Die nachfolgenden Diagramme 19 bis 21 zeigen die Resultate der Sheet-Splitting Untersuchung und der Wölbungsmessung an den Positionen C2, C3 und C4.

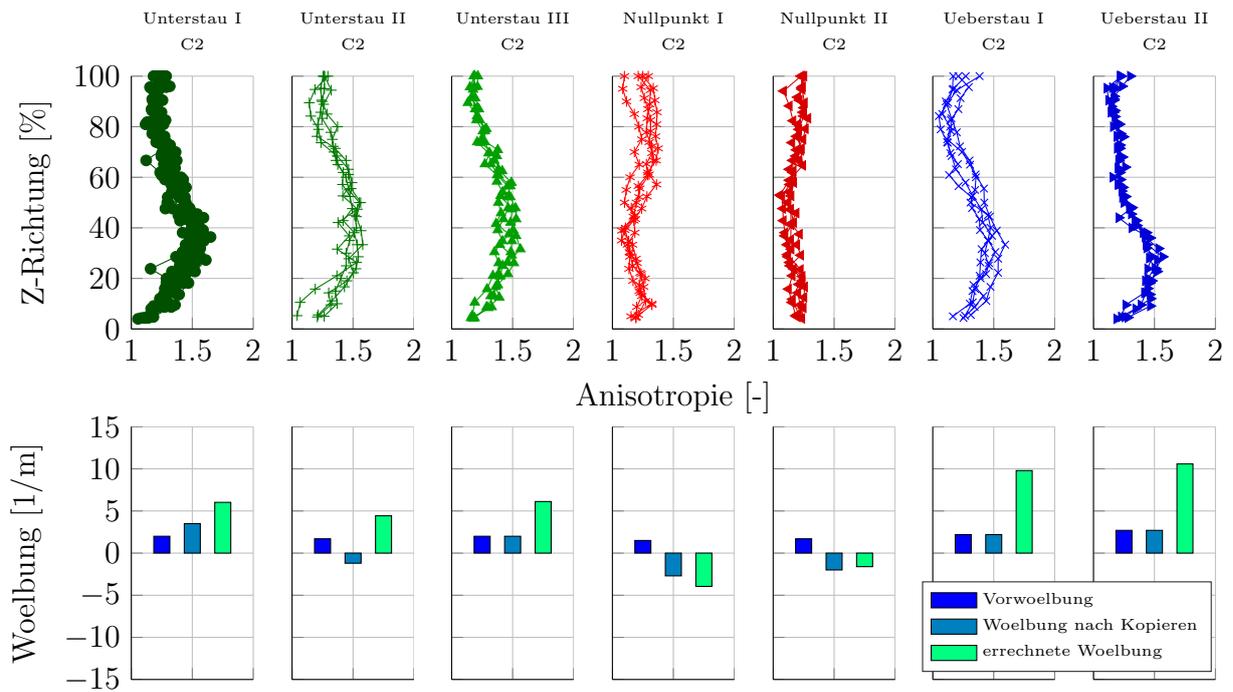


Diagramm 19: Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C2.

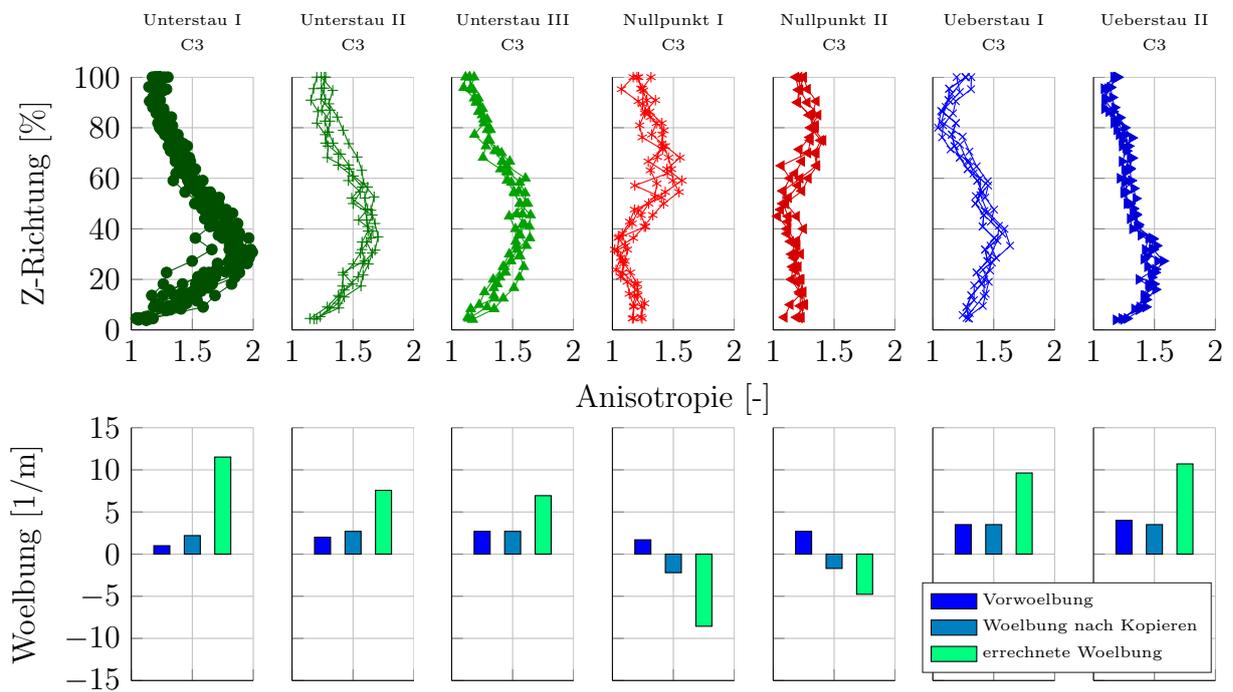


Diagramm 20: Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C3.

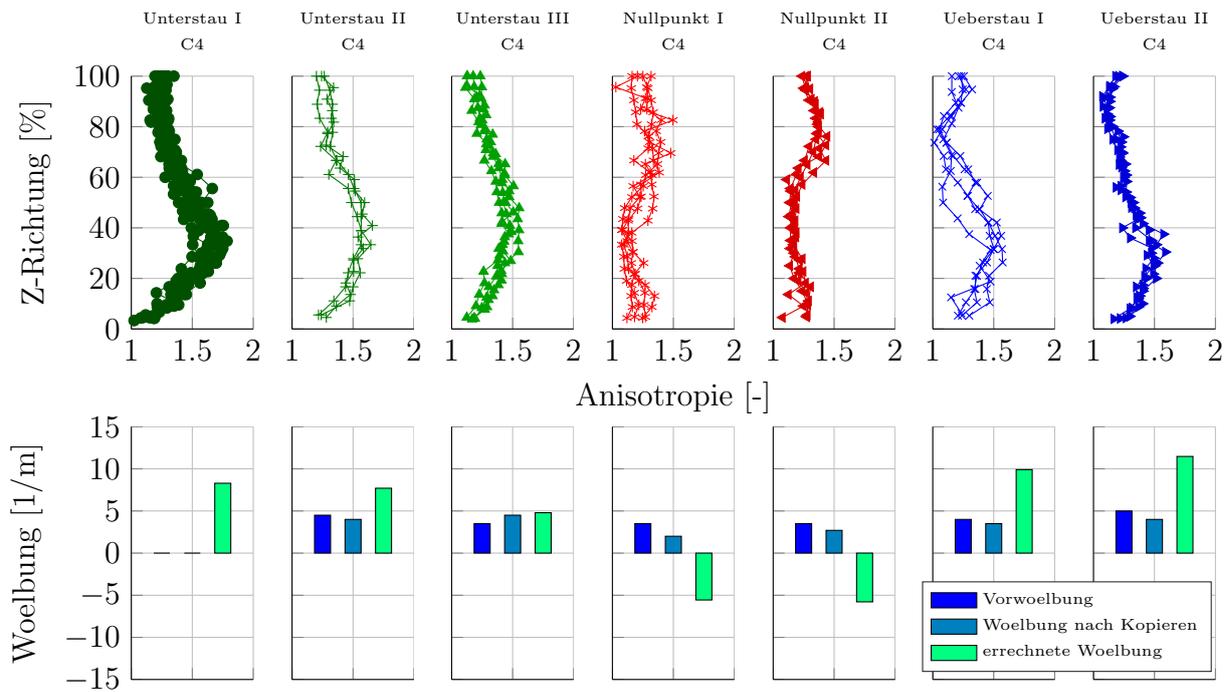


Diagramm 21: Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C4. Für die Position C4 im Unterstau I wurden keine Wölbungsmessungen durchgeführt.

7.2.2 Faserorientierungswinkel

Abschließend wird noch die Faserorientierungswinkelweiseitigkeit betrachtet und mit dem Diagonal-Curl gegenübergestellt. In den nachfolgenden Diagrammen 22 bis 26 sind die Ergebnisse der Untersuchungen für die Positionen C1 bis C4 dargestellt. Die obigen Diagramme zeigen das Z-Profil des Faserorientierungswinkels der einzelnen Staupunkte, aus welchen die Winkelweiseitigkeiten, wie im Abschnitt 3.7 erklärt, ermittelt werden. Weiters zeigen die Balkendiagramme wiederum die ermittelten Diagonal-Curl-Werte, welche mit dem errechneten verglichen werden. Für die Berechnung des Diagonal-Curls wird die Formel Eq. 7.4 angewandt. Da bei der Messmethode nicht zwischen positiv und negativem twist Curl unterschieden wird, wird bei der Berechnung das Vorzeichen nicht berücksichtigt und stattdessen der Absolutbetrag verwendet.

Wie aus den Z-Profilen zu erkennen ist, kommt es in den Versuchen des Nullpunktes und des Überstaus mehrfach vor, dass sehr starke Winkelabweichungen auftreten. Der Grund hierfür liegt in der sehr geringen Anisotropie in diesen Bereichen, da es bei einer Anisotropie von 1 keine Hauptausrichtung der Fasern gibt. Um nun vernünftige Ergebnisse in der Berechnung zu erhalten, wird für die Berechnung des mittleren Winkels an der jeweiligen Seite nicht der arithmetische Mittelwert, wie in Kapitel 3.7 dargestellt, verwendet, sondern ein durch die Anisotropie gewichteter Mittelwert, wie in der folgenden Gleichung Eq. 2.1 dargestellt, verwendet.

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i (A_i - 1)}{n} \tag{Eq. 2.1}$$

Durch diese spezielle Mittelung des Winkels für die jeweiligen Seiten erhalten wir einen mittleren Winkel, welcher die großen Winkelabweichungen durch die geringe Anisotropie mithilfe des Ausdrucks (A_i-1) dämpft.

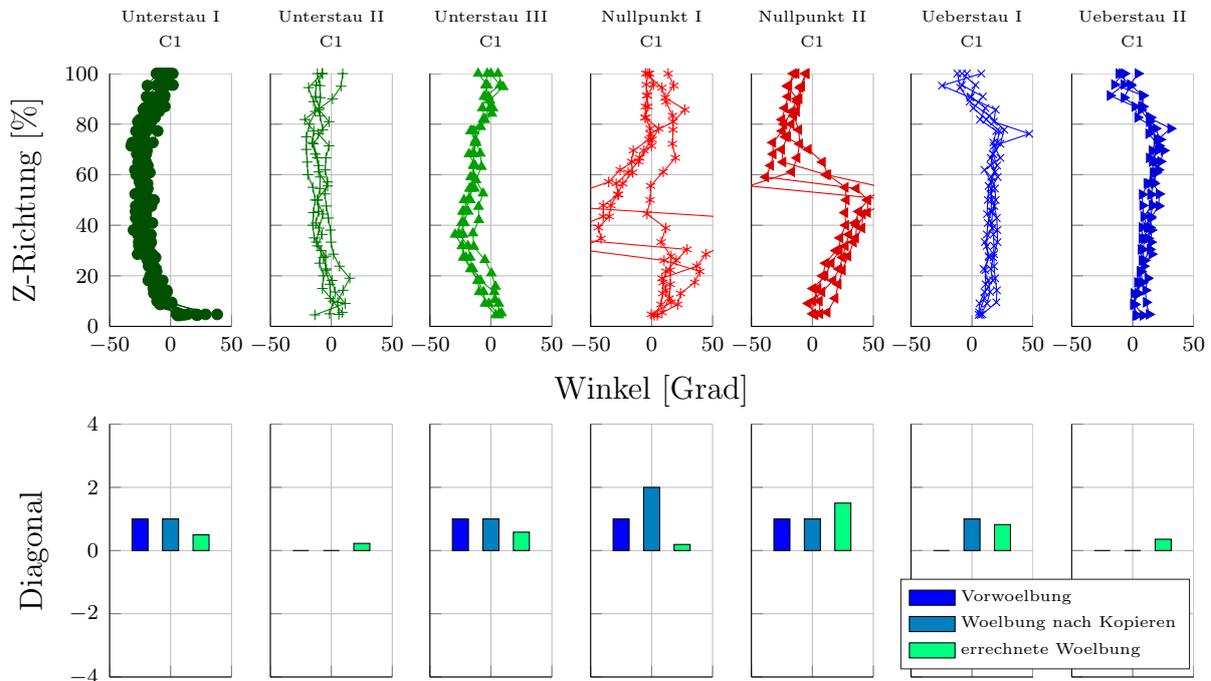


Diagramm 22: Ergebnis der Winkelzweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C1.

Anhand der Ergebnisse zeigt sich nun ein weitaus realistischeres Resultat. Trotzdem ist eine relativ schlechte Korrelation zwischen den Messergebnissen und der Berechnung zu sehen (Bestimmtheitsmaß $R^2= 0,07$ siehe Diagramm 23). Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der Messmethode des Diagonal-Curls, da hier nicht der tatsächliche Wölbungsparameter ermittelt wird. Für die Beurteilung dieser speziellen Wölbung wird das Benotungssystem mit der Abstufung 0 bis 3 verwendet (siehe Kapitel 3.2). Wie das Diagramm 23 auch zeigt, ist die Beurteilung in der Messmethode zu grob, wodurch kein Zusammenhang zwischen der Messung und der Berechnung zu erkennen ist. Weiters ist es auch nicht sinnvoll ein Regressionsmodell mit mehreren Prediktorvariablen anzuwenden, da auch hier das Problem der geringen Auflösung in der Messmethode vorhanden ist.

	R^2 (50% der Lagen)	$(R^2$ 30% der Lagen)
Wölbung nach Kopieren (lineare Regression)	0,07	0,04

Tabelle 7.3: Die Tabelle zeigt die Bestimmtheitsmaße für die beiden Regressionsmodelle des twist Curls bei unterschiedlicher Anzahl der Lagen für die Berechnung.

Wiederum wird auch hier die Berechnung mit unterschiedlicher Lagenanzahl durchgeführt (siehe Tabelle 7.3) und es zeigt sich das gleiche Bild wie zuvor im Kapitel 7.2.1.

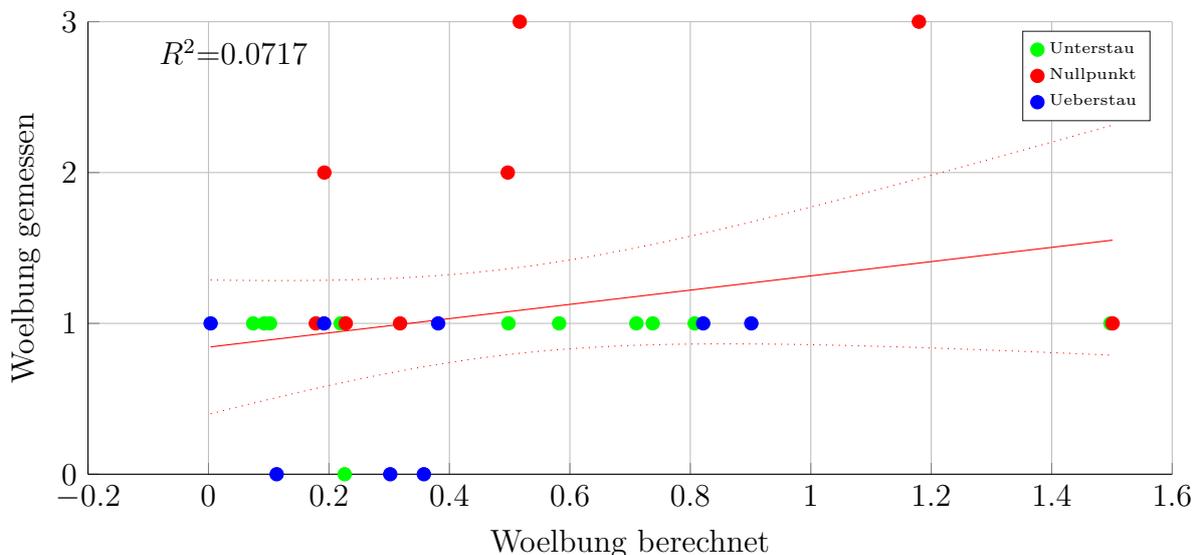


Diagramm 23: Gegenüberstellung aller diagonal Wölbungsmesswerte nach dem Kopieren und der kalkulierten Wölbungswerte. Jeder Punkt beschreibt den tatsächlichen Messwert und den berechneten. Zu erkennen ist der sehr schlechte Zusammenhang ($R^2=0,07$) welcher auf die grobe Benotung bei der Messung zurückzuführen ist.

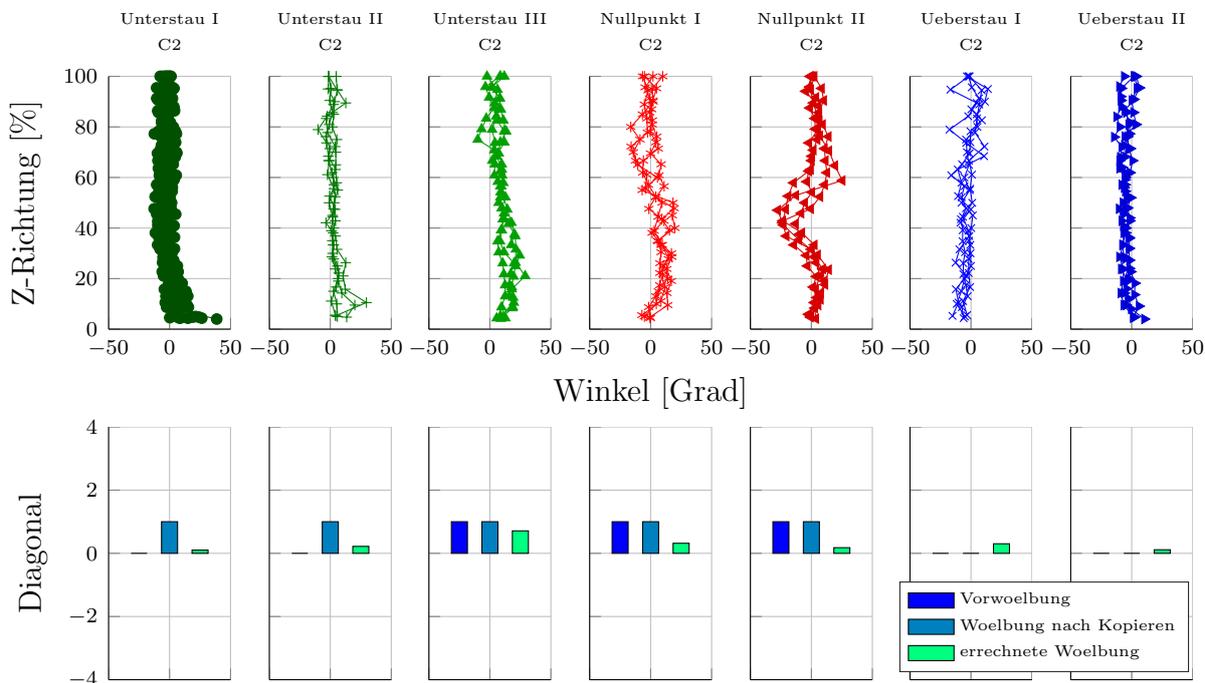


Diagramm 24: Ergebnis der Winkelweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C2.

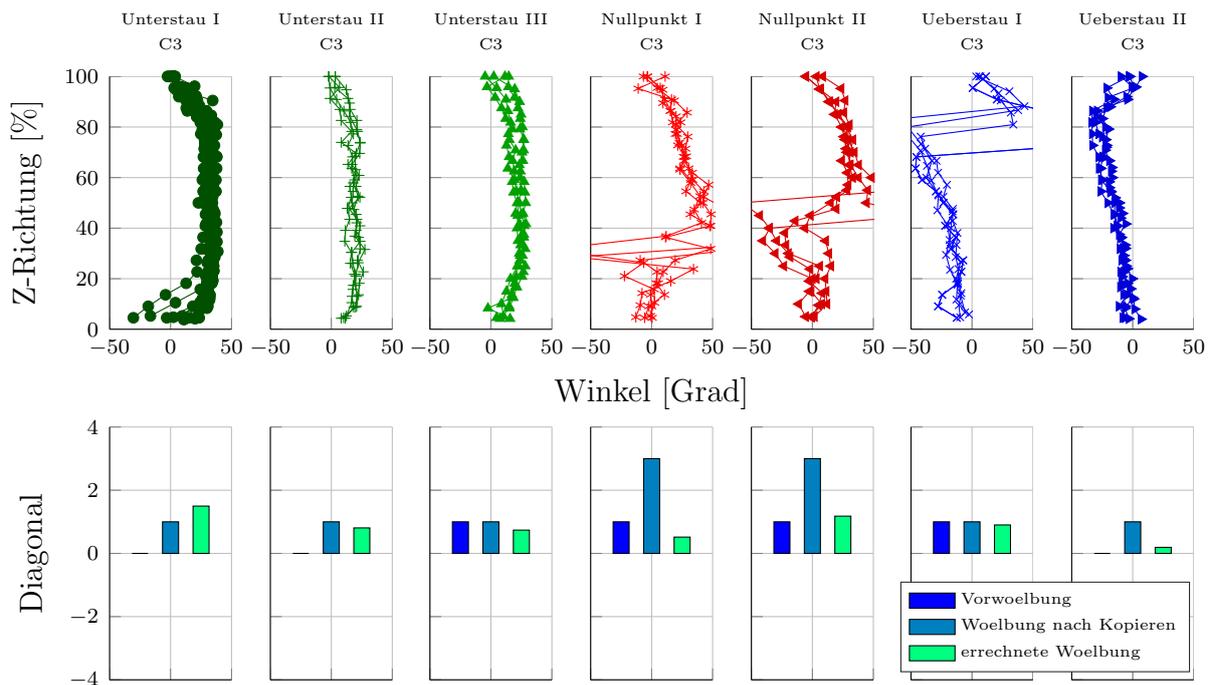


Diagramm 25: Ergebnis der Winkelabweichung und der Wölbung an der Position C3.

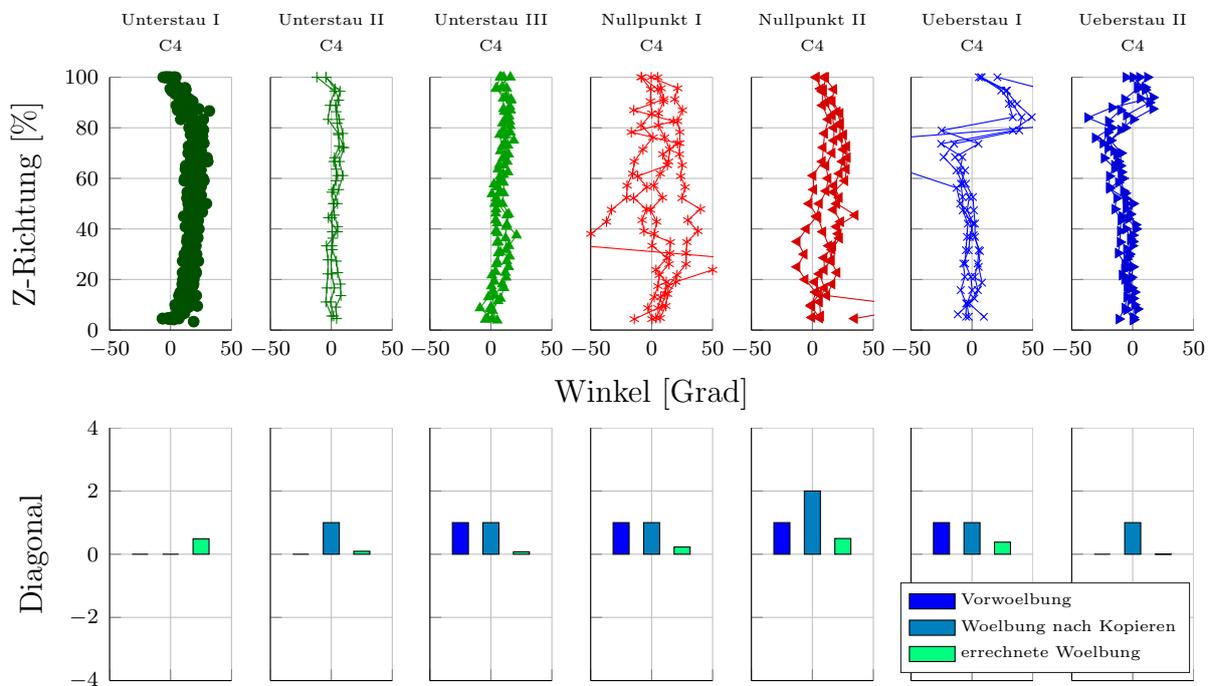


Diagramm 26: Ergebnis der Winkelabweichung und der Wölbung an der Position C4. Für die Position C4 im Unterstau I sind keine Wölbungsmessungen durchgeführt worden.

7.2.3 Zusammenfassung des strukturellen Curls

Die Ergebnisse zum strukturellen Curl zeigen, dass ein relevanter Zusammenhang mit dem strukturellen Papieraufbau und dem Wölbungsverhalten nach dem Kopierprozess besteht. Die Füllstoffzweiseitigkeitsanalyse ergibt einen höheren Gehalt an der Papieroberseite, wodurch die Hygroexpansion an dieser Seite abnimmt. Die Papierunterseite mit dem geringen Füllstoffgehalt besitzt somit eine höhere Hygroexpansion. Diese Zweiseitigkeit bewirkt bei Trocknung einen strukturellen Curl zur Unterseite. Jedoch ist der Einfluss des Füllstoffes in den Untersuchungen nicht erkennbar, da hier keine Unterschiede in der Zweiseitigkeit innerhalb der einzelnen Versuche aufgetreten sind.

Die Stärke Z-Analyse zeigt ein sehr symmetrisches Profil, wodurch kein struktureller Curl hervorgerufen wird.

Der Haupteinfluss auf den strukturellen Curl wird somit durch die Faserorientierungszweiseitigkeit ersichtlich. Wie die Ergebnisse zeigen, besteht ein relevanter Zusammenhang zwischen dem Wölbungsverhalten nach dem Kopiervorgang und der Anisotropiezweiseitigkeit. Die Faserorientierungswinkelzweiseitigkeit und der Diagonal-Curl korrelieren jedoch nicht, wobei hier die grobe Bewertung der Papierproben mit dem Benotungssystem 0 bis 3 wahrscheinlich zu ungenau ist. Dafür muss eine genauere Messmethodik angewandt werden und zusätzlich muss auch die Berechnung der Zweiseitigkeit in den Bereichen mit der geringen Anisotropie angepasst werden, da hier starke Winkelfluktuationen auftreten.

Kapitel 8

Ausblick

In der Arbeit sind vielversprechende Erkenntnisse über das Wölbungsverhalten gewonnen worden. Der strukturelle Aufbau des Papiers zeigt einen signifikanten Einfluss auf das Wölbungsverhalten nach dem Kopierprozess. Um dieses Verhalten noch besser zu beschreiben, sind jedoch weitere Analysen, wie die Bestimmung der Feuchtezeitigkeit, welche versuchsweise auch bestimmt wurde, nötig. Für die Fortführung der Arbeit, muss neben der Entwicklung der Bestimmungsmethode für die Feuchtezeitigkeit auch der Einfluss der Füllstoffzeitigkeit auf den strukturellen Curl ermittelt werden. Zusätzlich sollen weitere Maschinenparameter, welche das Wölbungsverhalten beeinflussen, näher untersucht werden. Genauer sprechen wir hier vom Einfluss des Strahlauftreffpunktes und der Siebschüttelung auf den strukturellen Papieraufbau. Um hierbei die Faserorientierungszeitigkeit der Papierprobe eindeutig zuzuordnen zu können, muss die Faserorientierungsmessung nach dem Kopierprozess direkt an den kopierten Proben durchgeführt werden. In weiterer Folge muss auch der Einfluss der Endfeuchte beziehungsweise der unterschiedlichen Trocknung in der letzten Trockengruppe der Papiermaschine genauer analysiert werden. Diese zwei Parameter werden weitere Erkenntnisse in Bezug auf den irreversiblen und viskoelastischen Curl bringen.

Bei den Untersuchungen der Trocknungsspannungen hat sich ebenfalls ein interessantes Resultat gezeigt, welches in einer weiterführenden Analyse enden sollte. Hierbei sollen die Proben nach der Musterentnahme direkt in einen Klimaraum gebracht werden, wo die Vorwölbung bestimmt wird und danach der Versuchsablauf, wie im Kapitel 3.6 vorgestellt, durchgeführt wird. Dabei ist es auch wichtig herauszufinden, warum sich die Wölbungsrichtung nach dem Befeuchtungsprozess ändert. Das Ziel sollte sein, durch den irreversiblen und viskoelastischen Curl die Vorwölbung der Blätter zu beschreiben und anschließend das Wölbungsverhalten nach dem Kopierprozess durch die oben genannten Einflüsse bestmöglich darzustellen.

Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung eines Papierfasernetzwerks.	3
2	Schematische Darstellung der Faserorientierung in einem Polardiagramm. .	4
3	Darstellung der Winkeldefinition in dieser Arbeit.	4
4	Einfluss des Papiermaschinenkonzepts auf den Faserorientierungsindex im Unterstau und Überstau.	5
5	Schematische Darstellung der Geschwindigkeitsprofile am Auftreffpunkt des Strahles bei unterschiedlichen Staupunkten.	6
6	Staukurve des TSI-Ratio in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit von Strahl und Sieb.	7
7	Auswirkung der Strahlkontraktion auf das TSI-Ratio.	8
8	Auswirkungen der hydrodynamischen Turbulenzen auf das TSI-Ratio. . . .	8
9	Auswirkung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen Strahl und Sieb auf die Strömungsrichtung.	10
10	Mollier-Diagramm für Luft.	12
11	Erweichungsbereiche von Zellulose, Hemizellulose und Lignin.	12
12	Darstellung der Sorptionsisothermen unterschiedlicher Faserstoffe.	13
13	Darstellung der Sorptionshysterese.	13
14	Abhängigkeit des Hygroexpansionskoeffizienten von der Faserorientierung. .	14
15	Darstellung der unterschiedlichen Wölbungsphänomene.	16
16	Entstehung des viskoelastischen Curls.	18
17	Entstehung des viskoelastischen Curls durch einseitige Trocknung in der Trockenpartie.	18
18	Entstehung und Auswirkung des irreversiblen Curls.	19
19	Auswirkungen von Faserorientierungszweiseitigkeiten auf das Wölbungsverhalten.	21
20	Darstellung der eingesetzten Messmethoden.	24
21	Aufbau des online Messkopfes zur Faserorientierungsbestimmung von ABB.	25
22	Messprinzip des online FO-Sensors.	26
23	Messprinzip TSO-Tester.	27
24	Messergebnisse des TSO-Tester.	27

25	Ablauf der Sheet-Splitting Messmethode zur Bestimmung der Faserorientierung.	28
26	Fasernetzwerk einer Lage aus der Sheet-Splitting Methode.	29
27	Wölbungstest zum Bestimmen des CD und MD Curls	30
28	Bestimmungsmethode des Diagonal-Curls.	30
29	Versuchsaufbau des irreversiblen Curls.	33
30	Schematische Darstellung der Ermittlung der Faserorientierungszweiseitigkeit.	34
31	Abbildung der Papiermaschine 5.	36
32	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der praktischen Arbeiten, der Ziele und der Untersuchungsparameter.	39
33	Schematische Darstellung des Versuchsablaufes für die Evaluierung des online Faserorientierungssensors.	40
34	Versuchsaufbau für die Untersuchungen des strukturellen und irreversiblen Curls.	41
35	Versuchsplan.	43
36	Faserorientierungsquerprofile aus dem Qualitätsleitsystem.	45
37	Ablauf der Probenentnahme.	47
38	Abhängigkeit zwischen Hygroexpansion und Füllstoffgehalt.	67

Diagrammverzeichnis

1	Ergebnis der ATR-IR Spektroskopie des Vorversuches zur Feuchtezeitigkeitsbestimmung.	32
2	Staukurve aus den Untersuchungen der Stauversuche.	44
3	Ergebnis der Anisotropiemessung des online Sensors.	51
4	Ergebnis der Anisotropiemessung des TSO-Testers.	52
5	Ergebnis der Korrelation zwischen dem online Sensor und dem TSO-Tester.	53
6	Ergebnis der Faserorientierungswinkelmessung des online Sensors	54
7	Ergebnis der Orientierungswinkelmessung des TSO-Testers.	55
8	Ergebnis der Korrelation zwischen dem online Sensor und dem TSO-Tester.	56
9	Ergebnisse der Anisotropiemessung der Sheet-Splitting Methode und des online Systems.	57
10	Ergebnisse der Orientierungsmessung mithilfe der Sheet-Splitting Methode und des online Systems.	59
11	Ergebnis des irreversiblen Curls der ersten Versuchsreihe.	62
12	Ergebnis des irreversiblen Curls im Unterstau II.	63
13	Ergebnis der Füllstoffzweiseitigkeitanalysen.	66
14	Ergebnis der Stärkezweiseitigkeitanalysen.	68
15	Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C1.	69
16	Zusammenhang der tatsächlichen Wölbungswerte vor dem Kopieren und den durch das mathematische Modell errechneten Werten.	70
17	Zusammenhang der tatsächlichen Wölbungswerte nach dem Kopieren und den durch das mathematische Modell errechneten Werten.	71
18	Lineares Regressionsmodell zur Beschreibung der Wölbung nach dem Kopieren mit den Prediktorvariablen Vorwölbung und struktureller Curl durch die Berechnung.	72
19	Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C2.	73
20	Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C3.	73
21	Ergebnis der Anisotropiezweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C4.	74
22	Ergebnis der Winkelzweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C1.	75
23	Zusammenhang der tatsächlichen Diagonal-Wölbungswerte nach dem Kopieren und der Berechnung.	76

24	Ergebnis der Winkelzweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C2. . .	76
25	Ergebnis der Winkelzweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C3. . .	77
26	Ergebnis der Winkelzweiseitigkeit und der Wölbung an der Position C4. . .	77

Literaturverzeichnis

- ABB (2008). Dual-sided online fibre orientation sensor.
- Blechschildt, J. (2013). *Taschenbuch der Papiertechnik*. Hanser eLibrary. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
- Carlsson, L., Fellers, C., und Htun, M. (1980). Curl and two-sidedness of paper. *Svensk Papperstidning* 83, (7):194–197.
- Fellers, C. (2009). The interaction of paper with water vapour. In Ek, M., Gellerstedt, G., und Henriksson, G., editors, *Pulp and Paper Chemistry and Technology Volume 4: Paper Products Physics and Technology*, chapter 4, pages 109 – 143. Walter de Gruyter.
- Hirn, U. und Bauer, W. (2006). Investigating paper curl by sheet splitting. In *Proceedings of the 2006 Eucepa supported conference Challenges in Pulp-and Papermaking Technology Bratislava, Slovakia*, pages 23–1 – 23–18. Nov, EN, Bratislava.
- Hirn, U. und Bauer, W. (2007). Evaluating an improved method to determine layered fiber orientation by sheet splitting. In *Proceedings of the 61st Annual APPITA Conference & 2007 Paper Physics Conference*, pages 71 – 80. May, EN, Gold Coast.
- Holik, H. (2006). *Handbook of Paper and Board*. Wiley.
- Jukka, K. (2008a). Dimensional stability. In Niskanen, K., editor, *Papermaking Science and Technology: Paper physics. 16*, chapter 9, pages 320 – 348. Fapet.
- Jukka, K. (2008b). Rheology. In Niskanen, K., editor, *Papermaking Science and Technology: Paper physics. 16*, chapter 8, pages 296 – 320. Fapet.
- Kulachenko, A. (2012). Moisture-induced deformations. In Niskanen, K., editor, *Mechanics of Paper Products*, De Gruyter Textbook, chapter 9, pages 164 – 179. De Gruyter.
- Lindblad, G. und Fuerst, T. (2007). *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. AB Lorentzen & Wettre.

- Mondi (2014). *Vorschrift fuer Analytische Untersuchung der Staerke und Fuellstoff Z-Verteilung.*
- Niskanen, K. (1993). Anistropy of laser paper. *Paperi ja Puu - Paper and Timber*, 75(5):321–328.
- Niskanen, K. und Pakarinen, P. (2008). Paper structure. In Niskanen, K., editor, *Paper-making Science and Technology: Paper physics. 16*, chapter 1, pages 11 – 53. Fapet.
- Odell, M. H. und Pakarinen, P. (2001). The compleat fibre orientation control and diverse effects on paper properties. *TAPPI Papermakers Conference*, pages 317 – 341. Machine runnability;.
- Uesaka, T. (2001). Dimensional stability and environmental effects on paper properties. In Mark, R. und Borch, J., editors, *Handbook of Physical Testing of Paper*, volume 1, chapter 3, pages 115 – 166. Marcel Dekker AG.
- Wahlstroem, T. (2009). Development of paper properies during drying. In Ek, M., Gellerstedt, G., und Henriksson, G., editors, *Pulp and Paper Chemistry and Technology Volume 4: Paper Products Physics and Technology*, chapter 3, pages 69 – 107. Walter de Gruyter.

Anhang - Messdaten

Unterstau I	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,268	1,234	1,302	1,278
Anisotropie BOT (50%)	1,446	1,387	1,598	1,486
Angle TOP 9 (50%)	-17,131	-2,864	23,112	14,760
Angle BOT 9 (50%)	-13,169	1,960	27,723	14,031
Hygroexpansion MD [%]	0,254	0,229	0,225	0,232
Hygroexpansion CD [%]	0,667	0,606	0,540	0,600
Dicke [μm]	115,922	115,812	115,947	116,634
Vorwoelbung	17	20	10	0
Woelbung nach Kopieren	27	35	22	0
diagonal Vorwoelbung	1	0	0	0
diagonal nach Kopieren	1	1	1	0
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	7,757	6,025	11,524	8,292
KXY [1/m] Niskannen, 1993	0,629	0,695	0,608	0,104
Unterstau II	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,270	1,309	1,322	1,320
Anisotropie BOT (50%)	1,324	1,409	1,492	1,486
Angle TOP 9 (50%)	-10,301	1,049	12,765	3,628
Angle BOT 9 (50%)	-3,699	5,261	18,806	1,603
Hygroexpansion MD [%]	0,269	0,252	0,252	0,262
Hygroexpansion CD [%]	0,698	0,642	0,627	0,696
Dicke [μm]	113,092	113,108	112,922	112,990
Vorwoelbung	35	17	20	45

Woelbung nach Kopieren	27	-12	27	40
diagonal Vorwoelbung	0	0	0	0
diagonal nach Kopieren	0	1	1	1
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	2,566	4,429	7,562	7,702
KXY [1/m] Niskannen, 1993	1,128	0,666	0,940	0,343
Unterstau III	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,243	1,246	1,273	1,251
Anisotropie BOT (50%)	1,372	1,380	1,420	1,354
Angle TOP 9 (50%)	-7,050	5,121	16,551	11,720
Angle BOT 9 (50%)	-11,363	14,982	20,234	6,226
Hygroexpansion MD [%]	0,272	0,266	0,274	0,271
Hygroexpansion CD [%]	0,691	0,642	0,630	0,695
Dicke [μm]	115,541	115,937	115,962	116,170
Vorwoelbung	35	20	27	50
Woelbung nach Kopieren	27	20	27	65
diagonal Vorwoelbung	1	1	1	1
diagonal nach Kopieren	1	1	1	1
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	6,063	6,121	6,939	4,796
KXY [1/m] Niskannen, 1993	0,719	1,546	0,574	0,914
Nullpunkt I	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,277	1,270	1,327	1,290
Anisotropie BOT (50%)	1,192	1,188	1,147	1,177
Angle TOP 9 (50%)	1,887	-2,238	17,811	6,758
Angle BOT 9 (50%)	4,672	8,216	16,238	6,790
Hygroexpansion MD [%]	0,289	0,268	0,266	0,274
Hygroexpansion CD [%]	0,621	0,590	0,563	0,614
Dicke [μm]	111,107	111,331	111,450	111,602
Vorwoelbung	27	15	17	35
Woelbung nach Kopieren	-15	-27	-22	20
diagonal Vorwoelbung	1	1	1	1

diagonal nach Kopieren	2	1	3	1
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	-4,414	-3,954	-8,563	-5,562
KXY [1/m] Niskannen, 1993	0,456	1,611	0,234	0,005
Nullpunkt II	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,212	1,203	1,276	1,317
Anisotropie BOT (50%)	1,274	1,171	1,183	1,203
Angle TOP 9 (50%)	-15,977	4,236	22,906	15,241
Angle BOT 9 (50%)	20,244	-2,614	-3,840	10,708
Hygroexpansion MD [%]	0,296	0,285	0,291	0,289
Hygroexpansion CD [%]	0,641	0,603	0,590	0,648
Dicke [μm]	113,627	113,848	113,575	113,906
Vorwoelbung	35	17	27	35
Woelbung nach Kopieren	27	-20	-17	27
diagonal Vorwoelbung	1	1	1	1
diagonal nach Kopieren	1	1	3	2
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	3,217	-1,609	-4,769	-5,786
KXY [1/m] Niskannen, 1993	5,969	1,069	4,147	0,746
Ueberstau I	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,203	1,198	1,218	1,174
Anisotropie BOT (50%)	1,490	1,410	1,416	1,379
Angle TOP 9 (50%)	10,480	0,250	2,254	6,593
Angle BOT 9 (50%)	14,168	-5,137	-16,448	-2,883
Hygroexpansion MD [%]	0,266	0,259	0,272	0,271
Hygroexpansion CD [%]	0,676	0,640	0,632	0,678
Dicke [μm]	111,621	112,006	111,686	111,826
Vorwoelbung	35	22	35	40
Woelbung nach Kopieren	35	22	35	35
diagonal Vorwoelbung	0	0	1	1
diagonal nach Kopieren	1	0	1	1

KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	13,684	9,794	9,634	9,907
KXY [1/m] Niskannen, 1993	0,623	0,864	3,027	1,609
Ueberstau II	C1	C2	C3	C4
Anisotropie TOP (50%)	1,185	1,195	1,200	1,171
Anisotropie BOT (50%)	1,451	1,419	1,423	1,410
Angle TOP 9 (50%)	9,111	-4,005	-19,127	-7,684
Angle BOT 9 (50%)	8,851	-3,449	-7,074	-3,529
Hygroexpansion MD [%]	0,271	0,269	0,275	0,274
Hygroexpansion CD [%]	0,683	0,642	0,633	0,681
Dicke [μm]	113,726	113,866	114,149	114,260
Vorwoelbung	40	27	40	50
Woelbung nach Kopieren	35	-27	35	40
diagonal Vorwoelbung	0	0	0	0
diagonal nach Kopieren	0	0	1	1
KYY [1/m] Hirn und Bauer, 2006	12,685	10,581	10,708	11,472
KXY [1/m] Niskannen, 1993	0,044	0,089	1,917	0,694