

**AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14345 N**

Laufzeit: 01.02.2005 – 31.10.2007

gefördert aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



**Entwicklung einer Labormethode zur Charakterisierung der  
Dimensionsstabilität und des Dehnungsverhaltens von  
Papier beim Bogenoffsetdruck**

**Schlussbericht**

**April 2008**

Technische Universität Darmstadt  
Fachgebiet Papierfabrikation und  
Mechanische Verfahrenstechnik

Technische Universität Darmstadt  
Druckmaschinen und Drucktechnik (IDD)

Technische Universität Darmstadt  
Institution for Paper Science and  
Technology gGmbH

Leiter der Forschungsstelle:  
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Leiter der Forschungsstelle:  
Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Wissenschaftlicher Leiter:  
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Projektleiter:  
Dipl.-Ing. Milena Niedernhuber



---

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Dimensionsstabilität des Papiers im Offsetdruck. Der Fokus fällt dabei auf die Untersuchung der Wirkung des Feuchtmittels auf den Bedruckstoff. Zur Bestimmung der Verformung von Papier beim Be- und Entfeuchten unter definierten Bedingungen wurde eine Messmethode entwickelt, welche die Beanspruchung des Papiers in einer Druckmaschine hinsichtlich Befeuchtung realitätsnah simuliert. Ein Feuchtdehnungsmessgerät wurde konstruiert und aufgebaut. Die Übertragung des Feuchtmittels erfolgte über Walzen. Dadurch ist eine Übertragung von ca. 0,3 bis ca. 1,5 g/m<sup>2</sup> Wasser aufs Papier möglich. Für die Detektion der Papierverformung wurde in Matlab ein Rechenalgorithmus entwickelt, welcher auf der Digital Speckle Photography basiert. Geplant war ursprünglich als Bildanalyseinstrument, die Siebmarkierungsanalyse einzusetzen. Diese wurde jedoch verworfen, da die Auflösung dieser Methode nicht ausreichend war, um die geringen Papierdeformationen zu erfassen. Mit dem Einsatz der neuen bildanalytischen Methode wurden gleichzeitig Vorteile erzielt. Mit der Digital Speckle Photography können die lokalen sowie die gesamten Verformungen zweidimensional erfasst werden. Außerdem ist diese Methode praktisch auf alle Papiere anwendbar.

Im Rahmen dieses Projektes wurden umfassende experimentelle Untersuchungen durchgeführt und bereits vorhandene Standardprüfmethoden angewandt. Weiterhin folgten Messreihen mit dem entwickelten Feuchtdehnungsmessgerät und anschließend wurde ein Druckversuch durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass die zurzeit gängigen Messmethoden zur Beurteilung des Feuchtdehnungsverhaltens von Papieren – Nassdehnung und Feuchtdehnung - ungeeignet für die Abschätzung des Feuchtdehnungsverhaltens in der Druckmaschine sind. Beide Meßmethoden ergaben bei den getesteten Papieren Dehnungsneigungen, die sich nicht mit deren Verformungen im Druckversuch deckten. Grund dafür ist, dass im Vergleich zum Druck, unterschiedliche Befeuchtungsverfahren eingesetzt werden, die in den Papieren andere Reaktionen auslösen. Die mit dem Feuchtdehnungsmessgerät ermittelten Dehnungstrends stimmten dagegen mit den Verformungen der Papiere im Druck überein.

Es wurde gezeigt, dass in Querrichtung bei nichtgeleimten Papieren die Dehnung proportional zu der Wasserauftragsmenge zunimmt. Bei geleimten Papieren wurden zum Teil auf Grund deren Wasserresistenz mit Erhöhung des Wasserauftrags keine zunehmenden Dehnungen

---

gemessen. In Längsrichtung sind die Dehnungen bei den Zeitungsdruckpapieren ebenfalls proportional zur Wasserauftragsmenge, bei geleimten Papieren werden zum Teil Schrumpfung gemessen, welche auf den Spannungsabbau in Längsrichtung zurückzuführen sind. Weiterhin wurde im Druckversuch festgestellt, dass die Dehnungstrends in Querrichtung unter den getesteten Papiersorten selbst bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen im Wesentlichen gleich bleiben. Diese Feststellung ist ein Hinweis darauf, dass es grundsätzlich ausreicht, die Trends zur Dehnungsneigung bestimmter Papieren bei nur einer Konstellation der Versuchsbedingungen (Feuchtmittelmenge und Farbbelegung) zu bestimmen.

Die Befeuchtungsversuche mit dem Feuchtdehnungsmessgeräts zeigten, dass selbst bei variierenden Klimabedingungen zwischen den Papieren gleiche Dehnungstrends herrschen. Der Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden zur Bestimmung des Feuchtdehnungsverhaltens der Papiere, zeigte deutlich, dass für eine korrekte Voraussage des Dehnungspotenzials der Papiere in der Druckmaschine ein praxisnahes Befeuchtungsverfahren eine Grundvoraussetzung ist. Ein Messgerät mit dem Messprinzip des Feuchtdehnungsmessgeräts, würde dem Drucker erlauben, schon im voraus die gesamte Papierpalette, die er zu bedrucken hat, auf ihr Dehnungspotenzial in der Druckmaschine abzuschätzen und erste Voreinstellungen an der Druckmaschine vorzunehmen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

**Verzeichnis der Abkürzungen**

CCD	Charge-coupled Device
CD	cross direction (Querrichtung)
DIP	deinked pulp
DSP	Digital Speckle Photography
FB	Farbbelegung
FDM	Feuchtdehnungsmessgerät
FM	Feuchtmittel
FOGRA	Forschungsgesellschaft Druck e. V.
FS	Füllstoff
HS	Holzschliff
IPA	Isopropylalkohol
Iso	Isotrop
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
MD	machine direction (Maschinenrichtung)
PMV	Fachgebiet für Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik
RH	relative humidity (relative Feuchte)
T	Temperatur
TSI	tensile stiffness index (Zugsteifigkeitsindex)
ZS	Zellstoff



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Feuchtigkeitsaufnahme von Papier .....</b>	<b>5</b>
2.1	Beanspruchungen in der Offsetdruckmaschine.....	5
2.2	Feuchtigkeitsaufnahme in der Druckmaschine .....	9
2.3	Probleme durch Wasseraufnahme .....	11
2.4	Die Wasseraufnahme aus physikalischer Sicht.....	12
2.5	Papierbedingte Parameter, die die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflussen.....	17
2.6	Feuchtmittelregelung an Offsetdruckmaschinen.....	19
2.7	Messtechnische Erfassung von Feuchtdehnung und Nassdehnung .....	20
2.7.1	Feuchtdehnung .....	21
2.7.2	Nassdehnung .....	21
2.8	Über den Passer.....	21
2.9	Maßnahmen zur Vermeidung von Passerdifferenzen .....	23
<b>3</b>	<b>Entwicklung des Feuchtdehnungsmessgeräts (FDM).....</b>	<b>26</b>
3.1	Konstruktion.....	26
3.2	Bildanalytische Auswertung .....	31
3.3	Prinzip der Digital Speckle Photography .....	31
3.4	Algorithmus zur Berechnung von Verschiebungen und Dimensionsänderungen .....	35
3.5	Versuchsdurchführung .....	36
3.6	Wiederholbarkeit der FDM-Messungen.....	36
3.6.1	Klimatische Bedingungen .....	37
3.6.2	Aufgebrachte Wassermenge.....	38
3.6.3	Gleichmäßigkeit des Wasserauftrags .....	39
3.6.4	Gleichmäßigkeit in der Struktur der Papierprobe .....	40
3.6.5	Bedienung des FDMs .....	41
3.6.6	Kreuzkorrelationsfunktion .....	41
3.7	Übertragene Wassermenge.....	41
<b>4</b>	<b>Experimentelle Arbeit.....</b>	<b>42</b>
4.1	Laborblattbildung und Standardmessungen .....	43
4.1.1	Blattbildung.....	43
4.1.2	Feuchtdehnung .....	43

---

4.1.3	Dynamische Nassdehnung .....	46
4.2	Ergebnisse aus den Messungen mit dem FDM .....	54
4.2.1	Einfluss des Anpressdrucks und der Zugbeanspruchung.....	54
4.2.2	Neigung zur Dimensionsänderung .....	54
4.2.3	Dimensionsänderung als Funktion des Feuchtauftrags.....	56
4.2.4	Laborblätter .....	57
4.3	Druckversuch .....	60
4.3.1	Konzept und Durchführung.....	60
4.3.2	Auswertung .....	63
4.3.2.1	Dimensionsänderung innerhalb eines Bogens.....	64
4.3.2.2	Einfluss von Druckfarbe und Feuchtmittel auf die Dimensionsstabilität ....	69
4.3.2.3	Trends zur Dimensionsänderung verschiedener Papiersorten .....	71

---

# 1 Einführung und Problemstellung

Der Offsetdruck ist ein Flachdruckverfahren, bei dem sich die druckenden und die nichtdruckenden Stellen auf einer Ebene befinden. Das Feuchtmittel benetzt die nichtdruckenden Partien der Druckplatte. Somit wird die ölhaltige Druckfarbe daran gehindert nichtdruckenden Flächen zu bedecken. In die Druckfarbe wird Feuchtmittel emulgiert. Beim Drucken wird das Papier in Kontakt mit Feuchtmittel und Druckfarbe gebracht. Das Feuchtmittel wird einmal direkt über das Gummituch und ein anderes Mal indirekt über die Druckfarbe auf das Papier übertragen. Ein Teil des Feuchtmittels verflüchtigt sich im Druckprozess, ein anderer Teil wird im Fasergefüge des Papiers aufgenommen. Über die Druckfarbe wird in der Regel deutlich mehr Wasser transportiert als durch den direkten Kontakt des Papiers mit dem Feuchtmittel. Die Angaben bezüglich der tatsächlichen Wassermenge, die vom Papier aufgenommen wird, schwanken in der Literatur. Die Werte bewegen sich etwa in dem Bereich von  $0,1 - 0,7 \text{ g/m}^2$ . Es handelt sich demnach um äußerst geringe Wassermengen. Dennoch kommt es dadurch je nach Bedruckstoffart und Druckmaschinentyp gelegentlich zu einer breit gefächerten Problematik. Die Probleme können eingeteilt werden in solche, die den Druckprozess und solche, die die Weiterverarbeitung beeinträchtigen. Im Druck kann entweder der Produktionsprozess gestört oder das Endergebnis beeinträchtigt werden, d. h. das Druckerzeugnis weist Qualitätsmängel auf. Ein typisches Beispiel für erschwerte Produktionsbedingungen durch die Wasseraufnahme ist die Senkung der Bahnspannung und des Fan-out-Effekts<sup>1</sup> im Rollenoffset. Das Druckerzeugnis wiederum kann negativ beeinflusst werden durch die Entstehung von Passerdifferenzen im Mehrfarbendruck, Curl, Cockling oder Mottling. In der Weiterverarbeitung kann es beispielsweise zu Schwierigkeiten in den Falzapparaten kommen.

Die vorliegende Arbeit behandelt das Thema Dimensionsstabilität von Papier im Offsetdruck. Vorrangig werden die Dimensionsänderungen betrachtet, die auf Grund der Befeuchtung des Papiers in der Druckmaschine entstehen.

---

<sup>1</sup> Verbreitung der Papierbahn in einer Rollendruckmaschine, meist durch Feuchtung, aber auch durch die Druckspannung verursacht, kann prinzipiell auch beim Bogendruck auftreten [36].

---

Selbst bei kontinuierlich steigender Papierqualität bleibt das Thema Dimensionsstabilität weiterhin aktuell. Der Bedruckstoff wird immer stärkeren Beanspruchungen ausgesetzt. Im Zeitungsdruk wird ein immer niedrigeres Flächengewicht angestrebt und dabei weiter im Vier-Farbdruck gedruckt. Die Tendenz bei den Druckmaschinen zu einem breiteren Format und zu breiteren Papierbahnen erschwert die Passerhaltung. In seinem „Handbuch der Printmedien“ [36] formuliert *Kipphan* folgende Weiterentwicklungspotenziale für den Offsetdruckprozess:

- „Druckqualitätsverbesserung und –stabilisierung,
- .....
- Verkürzung der Rüstzeiten und Reduktion der Makulatur“.

Beides Ziele, die eine zufrieden stellende Dimensionsstabilität des Bedruckstoffs voraussetzen. Eine weitere Herausforderung stellt sicherlich die breite Palette an Papiersorten und –qualitäten dar, die im Offsetdruck verdruckt wird. Der Offsetdruck ist zu einem „Allround-Verfahren“ geworden, was die eingesetzten Bedruckstoffsorten anbetrifft [32]. Von dünnem Bibelpapier bis zu Karton wird alles verdruckt.

Zudem ist die Dimensionsstabilität das Haupthindernis zur Entwicklung neuer Papierprodukte [1]. Obwohl zahlreiche Studien durchgeführt worden sind, existiert noch keine einheitliche Methode zur Kontrolle der Dimensionsstabilität auf Grund der Komplexität und der Vielfältigkeit der Problematik. Die Dimensionsstabilität wird nicht von einzelnen Papiereigenschaften oder verfahrenstechnischen Herstellungsparametern beeinflusst. Es ist vielmehr ein multivariates Phänomen. Folgende Papiereigenschaften sind maßgeblich für die Dimensionsstabilität verantwortlich [1], [2]:

- Hygro-thermische Eigenschaften,
- Mechanische Eigenschaften,
- Anisotropie der Eigenschaften,
- Ungleichmäßigkeit der Eigenschaften,
- Zeit- und Historieabhängigkeit.

Die Voraussage der Druckqualität ist eine der schwierigsten Aufgaben für die Druck- und Papierindustrie wegen der unterschiedlichen Eigenschaften der Papieroberfläche und den komplexen Papier-Druck-Wechselwirkungen. Der Druckprozess verbindet einige fundamentale Prozesse, wie den Kontakt von Papier mit dem Gummituch, den Transfer von

---

Farbe und Feuchtmittel zum Papier und anschließend deren Penetration und Trocknung [3]. Nicht ausreichender Kontakt zwischen dem Papier und dem Gummituch kann durch unterschiedliche Mechanismen wie Heterogenität der Oberflächenrauigkeit, Porosität und lokale Kompressibilität hervorgerufen werden. Das Zusammenspiel solcher Strukturfaktoren vom Papier mit den Maschineneinstellungen kann zu einer Reihe von Druckproblemen führen. Die Messung der Papiereigenschaften (Rauigkeit, Kompressibilität, Stoffzusammensetzung), die die Druckqualität bestimmen, ist eine komplexe Aufgabe. Das liegt einerseits an der Vielzahl der strukturellen und drucktechnischen Parameter, die in dem Druckprozess involviert sind, andererseits können viele der fundamentalen Papiereigenschaften nicht oder nur sehr aufwändig ermittelt werden. Als Konsequenz daraus basieren die meisten Bemühungen zur Verbesserung der Druckqualität auf empirischem Wissen [3].

In der vorliegenden Arbeit wird die Entstehung von Passerdifferenzen analysiert. Vorrangig wird dabei der Bogenoffsetdruck betrachtet. Die Passerabweichungen können ihre Ursache im Papier selbst oder in der Druckmaschine haben. Soweit diese papierbedingt sind, werden bei der Analyse ebenso Ergebnisse aus dem Rollenoffset in Betracht gezogen, die bei der Literaturrecherche gefunden wurden.

Die Arbeit ist in folgende Abschnitte unterteilt:

- Darstellung der theoretischen Grundlagen für die Hygroskopizität des Papiers,
- Vorstellung der am Fachgebiet für Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) entwickelten Vorrichtung und Mess- und Analysetechnik zu Detektierung von Dimensionsänderungen,
- Ergebnisdarstellung aus den begleitenden Standardmessungen, den FDM-Messungen und dem Druckversuch.

Um Bedruckbarkeitsprobleme vermeiden zu können, muss entweder eine einheitliche Papierqualität erreicht werden oder es wird durch die Messung bestimmter Schlüsselparameter die Voraussage der Dimensionsstabilität im Druck ermöglicht. Im ersten Fall wäre eine zusätzliche Einstellung an der Druckmaschine beim Papierwechsel nicht notwendig. Dies ist jedoch eine Herausforderung, die für Naturprodukte wie das Papier kaum zu erreichen ist. Würde es dagegen gelingen, durch gezielte Vorversuche die, für die

Dimensionsstabilität beim Befeuchten verantwortlichen Papiereigenschaften für alle Papiersorten zu bestimmen, würde dies eine Voraussage der Dimensionsstabilität und damit der Dimensionsänderung in der Druckmaschine ermöglichen.

## 2 Feuchtigkeitsaufnahme von Papier

### 2.1 Beanspruchungen in der Offsetdruckmaschine

Der Bogenlauf vom Anlagestapel über den Anleger durch die Druckwerke hindurch wird durch hochpräzise Transportsysteme, Leitelemente und Kontrollen realisiert, bis der Bogen schließlich mit Farbe bedruckt auf den Auslagestapel ausgelegt wird. Der Bogentransport durch eine Bogenoffsetdruckmaschine ist in Abb. 1 dargestellt.

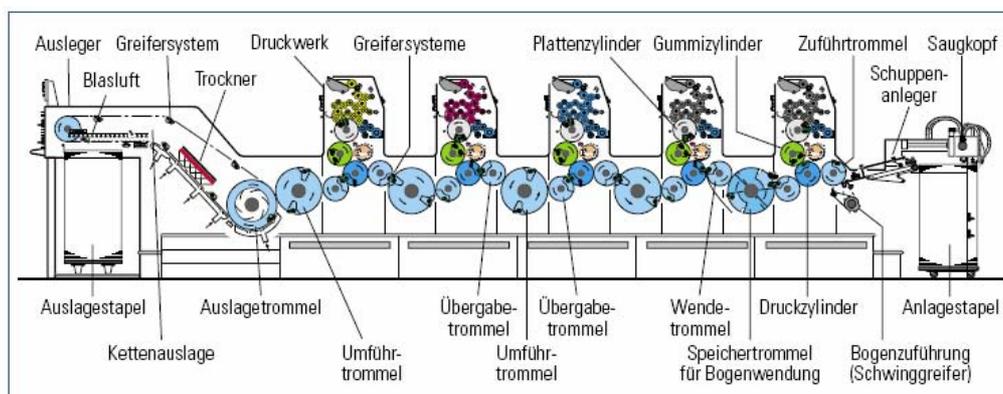


Abb. 1: Bogentransport in einer Bogenoffsetdruckmaschine, [36]

Im Anlegerbereich wird der Bogen überwiegend durch Saug- und Reibwirkung transportiert, wobei jeweils der oberste Bogen des Anlagestapels von Saugern des so genannten Saugkopfes angehoben und zum Anlegertisch transportiert wird, wo er zwischen Rollen, Bändern und Bürsten geführt wird. Jeder Bogen wird vor der Übergabe an die Druckwerke mit hoher Genauigkeit ausgerichtet. Hierfür wird er abgebremst und meist in völliger Ruhe an den Vorder- und Seitenmarken ausgerichtet. Im Stillstand wird der einzelne Bogen aus dieser Lage durch Greifer übernommen, auf Druckgeschwindigkeit beschleunigt und an die Druckwerke übergeben. In Maschinen, die 15000 Bogen/h im Format 70 cm x 100 cm produzieren, wird der Papierbogen mit Geschwindigkeiten von etwa 3,5 m/s bewegt. In den Druckwerken wird der Bogen dem Druckzylinder zugeführt. Von Greifersystemen gehalten, läuft er während der weiteren Zylinderdrehung unter dem Gummizylinder hindurch, wird mit Offsetfarbe bedruckt und an die Übergabetrommel zum Weitertransport ins folgende Druckwerk oder zur Auslage hin übergeben (Abb. 2).

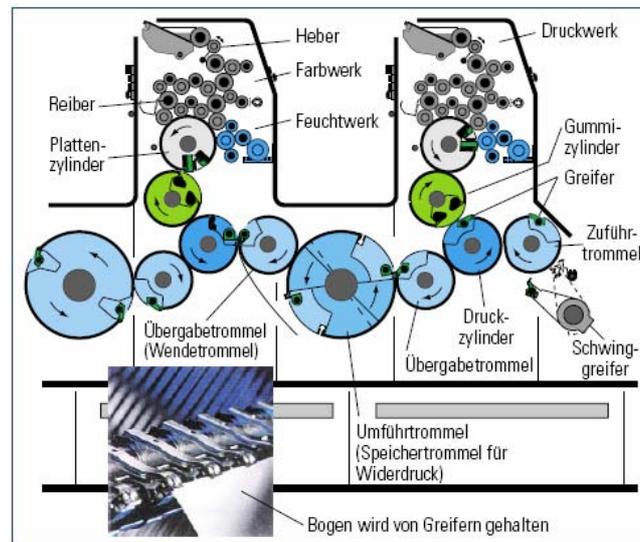


Abb. 2: Bogentransport in einem Druckwerk, [36]

Der Druckvorgang benötigt zum Übertragen der Druckfarbe eine gewisse Druckspannung zwischen Platten- und Gummizylinder sowie zwischen Gummi- und Druckzylinder. Je nach Oberflächenstruktur und Dicke des Papiers muss die Druckspannung eingestellt werden. Offsetfarben sind pastös, hochviskos und folglich klebrig. Damit das Papier an den druckenden Flächen nicht am Gummituch kleben bleibt, müssen die Greifer mit so großen Kräften am Bogen ziehen, dass er sich vom Gummizylinder löst. Für das Abziehen des Bogens ist also eine entsprechend große Haltekraft der Greifer erforderlich. Nach dem Druck folgt die Übergabe des Bogens auf den nächsten Zylinder. Im Durchlauf durch weitere Druckwerke werden die folgenden Farben aufgedruckt. Nach dem letzten Druckwerk werden die Bogen im Ausleger abgestapelt [36].

Im Druckprozess<sup>2</sup> wird die Dehnung des Bedruckstoffs hauptsächlich durch folgende Faktoren hervorgerufen:

- die Befeuchtung des Papiers während des Drucks,
- den Zug der Druckfarben beim Ablösen des Bogens vom Gummituch,
- den Walkprozess beim Durchgang durch die Druckzylindern,

<sup>2</sup> Im Folgenden wird unter den Begriffen Druck und Druckprozess stets Offsetdruck verstanden.

- den Zug durch die Greifer im Bogenoffsetdruck und durch den Bahnzug im Rollenoffsetdruck.

Auf die Befeuchtung des Papiers in der Druckmaschine wird im nächsten Kapitel [2.2] näher eingegangen.

Nachdem der Bogen in der Druckzone mit Druckfarbe in Berührung gekommen ist, hat er das Bestreben am Gummituchzylinder infolge der Klebkraft der Druckfarbe zu haften. Er wird solange haften bis die zur Farbspaltung erforderliche Zugkraft überschritten ist. Diese Zugkraft wirkt in Richtung der Druckabwicklung. Untersuchungen haben gezeigt [5], dass die Beanspruchung des Papiers beim Abziehen vom Gummituch an den farbbedeckten Stellen vielfach höher ist als an den farbfreien Stellen. Die Zugkräfte steigen mit wachsender Maschinengeschwindigkeit. Je nach Papiersorte können die zum Trennen des Bogens vom Gegenzylinder erforderlichen Zugkräfte sehr unterschiedlich sein. Untersuchungen auf unterschiedlichen Papiersorten zeigten, dass gestrichene Papiere größere Abzugkräfte erfordern als Naturpapiere gleichen Flächengewichtes [5]. Die Abzugkräfte nehmen mit steigender Farbführung zu.

Durch das Feuchtwerk wird beim Offsetdruck über Platte und Gummituch Feuchtigkeit auf das Papier übertragen. Am stärksten reagiert es dabei quer zur Faserlaufrichtung und es sind daher in dieser Richtung die größten Dimensionsänderungen zu erwarten. Aus diesem Grund wird das Papier im Schmalband verdrückt wie in Abb. 3a dargestellt, d. h. die Faserlaufrichtung ist parallel mit der längeren Kante des Bogens, die zugleich die Anlagekante darstellt. Die kritische Richtung wird damit auf die kürzere Seite des Bogens gelegt. Gleichzeitig kommt das Papier dadurch mit der Querrichtung der Fasern in die Bewegungsrichtung des Druckzylinders, in der es bekanntlich der mechanischen Verformung ebenfalls am meisten ausgesetzt ist. Typische Bogenverformungen in Querrichtung, die an dem Walkprozess der Druckmaschine liegen, resultieren in der Erhaltung von trapezförmigen Bögen (Abb. 3b). Diese Erscheinungsform der Deformation resultiert aus dem Walkprozess, dem das Gummituch beim Druck unterworfen ist [6].

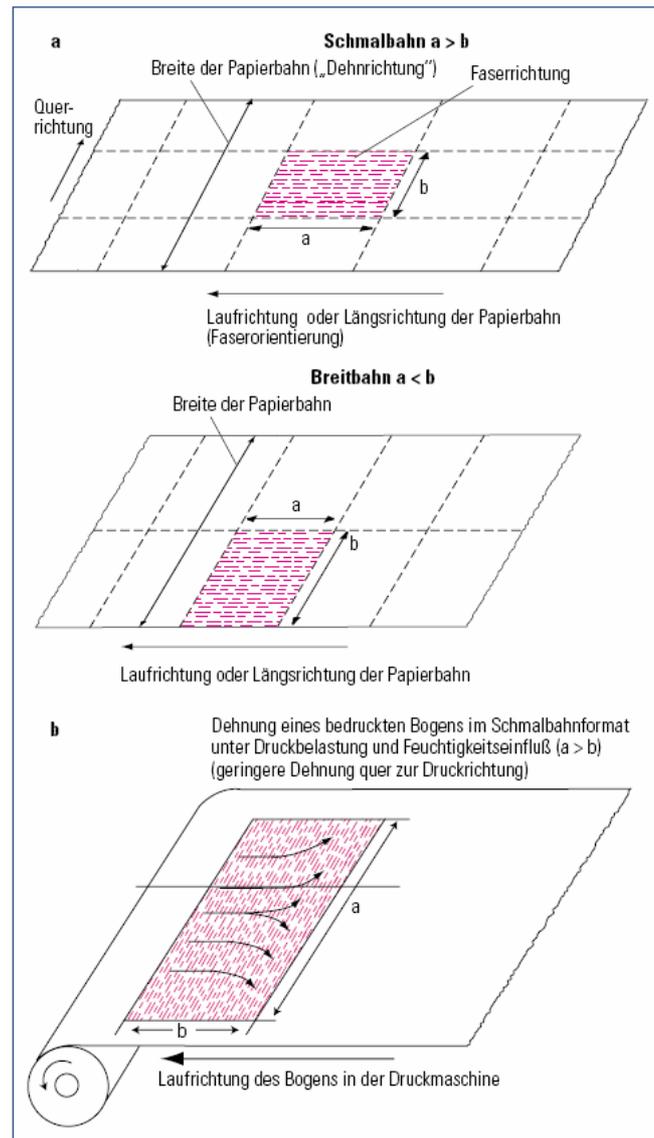


Abb. 3: Laufrichtung des Papiers bei der Herstellung; **a)** Bogen aus der Papierbahn geschnitten (Andeutung der Faserrichtung); **b)** Lage- bzw. Laufrichtung des Bogens in der Offsetdruckmaschine mit Angabe der Dehnrichtung (weniger Dehnung unter Feuchtigkeitseinfluss in Faserrichtung), [36].

Bezüglich des Einflusses von Zugspannung und Anpressung in der Druckmaschine ohne Wasserauftrag, gibt es in der Literatur widersprüchliche Behauptungen. So wurde in [7] eine irreversible mechanische Dehnung von etwa 0,01 – 0,02 % gemessen, während in [8] der Zugspannung und der Anpressung kein Einfluss auf die Dimensionsstabilität zugeschrieben wird. Die Reaktion des Papiers auf den Wasserauftrag hängt jedoch direkt mit dem dynamischen Prozess in der Druckmaschine ab. Druckmaschinentyp, Druckgeschwindigkeit

und –spannung, applizierte Wassermenge und Papierqualität sollten dabei eine entscheidende Rolle spielen.

## 2.2 Feuchtigkeitsaufnahme in der Druckmaschine

Die Dimensionsstabilität vom Papier im Offsetdruck ist besonders von der Wasseraufnahme im Papier abhängig. Der Offsetdruck ist ein Flachdruckverfahren, bei dem sich die druckenden und nichtdruckenden Stellen der Druckplatte auf einer Ebene befinden. Das Prinzip des Offsetdrucks ist in Abb. 4 graphisch dargestellt. Das Wasser hat die Aufgabe die nichtdruckenden Partien der Druckplatte daran zu hindern Druckfarbe anzunehmen. Die Oberfläche der Druckplatte wird vor jedem Einwalzen mit Druckfarbe mit Hilfe des Feuchtwerkes in der Druckmaschine gefeuchtet. Dabei handelt es sich nicht um ein Nassmachen, sondern vielmehr um das Aufbringen eines möglichst gleichmäßig verteilten dünnen Feuchtigkeitsschleiers z. B. durch die Filmfeuchtwerke [32].

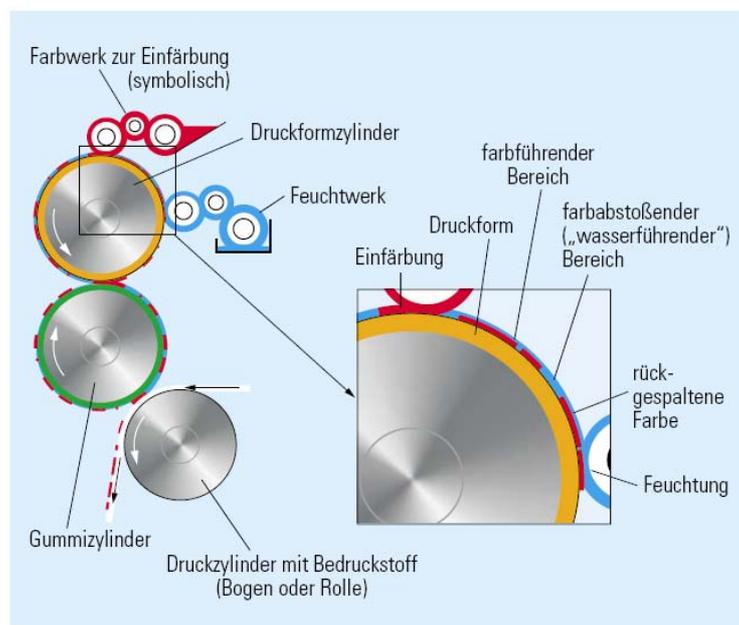


Abb. 4: Prinzip des Offsetdrucks, [36]

Das Feuchtmittel spielt eine Schlüsselrolle im Offsetdruck, eine quantitative Bestimmung der aufgetragenen Menge ist jedoch schwierig. Noch schwieriger ist es, zwischen den Teilmengen zu differenzieren, die jeweils an den bedruckten und an den unbedruckten Stellen aufgenommen werden. Diese Schwierigkeit hat zwei Gründe. Zum einen ist die

---

aufgenommene Feuchtmittelmenge äußerst gering, zum anderen verdampft ein Teil des Feuchtmittels beim Transport durch die Druckmaschine noch bevor es das Papier kontaktiert. *Lim* berichtet, dass der Feuchtmittelverlust durch Verdampfung etwa 40 % beträgt [9].

Das im Offsetdruckprozess verwendete Feuchtmittel besteht zu 95 % bis 98 % aus Wasser. Im Allgemeinen ist dies Rohwasser wie es über das Stadtwassernetz zur Verfügung steht. Das Rohwasser wird enthärtet und anschließend wird ihm Feuchtmittelzusatz und Isopropylalkohol beigemischt [36]. Das Zusatzmittel hat die Aufgabe die Oberflächenspannung des Wassers zu verringern und den Auftrag eines dünnen Films auf der Druckplattenoberfläche zu ermöglichen.

In Abhängigkeit von der Platte, der Farbmenge und dem Bedruckstoff wird soviel Wasser wie notwendig zugeführt, aber so wenig wie möglich. Das Wasser gelangt einmal „direkt“ an den bildfreien Partien über Druckplatte und Gummituch zur Papieroberfläche und zum anderen „indirekt“ an den bildtragenden Bereichen über die Druckfarbe, in die Wasser emulgiert ist. Eine exakte Angabe über die zum Papier gelangenden Feuchtmittelmengen ist sehr schwer, da in der Literatur unterschiedliche Werte genannt werden. Die Wasseraufnahme an bildfreien Stellen beträgt etwa 0,2-0,5 g/m<sup>2</sup> oder ungefähr 0,5 % pro Druckwerk, was mit einer Erhöhung des Feuchtigkeitsgehaltes um etwa 1-2 % korrespondiert [8]. Die minimale Menge an Wasser, die eingesetzt wird, hängt von den Eigenschaften der Druckplatte ab. Die notwendige Wassermenge, die eingesetzt wird, hängt ab von der Wechselwirkung des Wassers mit der Druckfarbe [31]. Untersuchungen [9], [10], [11], [12] haben gezeigt, dass mit der Druckfarbe deutlich mehr Wasser auf das Papier übertragen wird als direkt von der Druckplatte an bildfreier Partie. Somit ist die transferierte Wassermenge ungleichmäßig über die Papieroberfläche verteilt. Die Zahlenangaben für das in die Druckfarbe emulgierte Wasser schwanken, abhängig von den verschiedensten Parametern, wie z. B. Art der Druckfarbe, Feuchtmittelzusammensetzung, Druckmotiv, usw. zwischen 20 % und 70 %, bezogen auf die Druckfarbenmasse.

Die Durchlaufzeit vom ersten zum vierten Druckwerk beträgt je nach Maschinentyp und -geschwindigkeit etwa 1 bis 3 s, weit unter der Zeit, die für das Einstellen eines Feuchtigkeitsgleichgewichts notwendig ist. Die Wasseraufnahme durch das Papier erfolgt in

---

wenigen Millisekunden während des Kontakts des Papiers mit dem Gummituch im Druckwerk [31].

Sogar Papiere, die unter gleichen Bedingungen hergestellt wurden, können unterschiedlich auf Wasser reagieren, sich in der Druckmaschine unterschiedlich verhalten und folglich Passerdifferenzen hervorrufen [13]. Die beste Druckqualität wird fast immer mit dem Papier erzielt, auf das die Druckmaschine zu Beginn eingestellt wurde [34], [14].

Bezüglich des Einflusses der Druckgeschwindigkeit auf die aufgenommene Wassermenge gibt es in der Literatur ebenfalls widersprüchliche Angaben. So wird in unterschiedlichen Studien mit steigender Druckgeschwindigkeit eine Zunahme [31], in anderen Studien [30] dagegen eine Abnahme der aufgenommenen Feuchtmittelmenge beobachtet.

Beim Durchlauf durch die Druckmaschine wird der Papierbogen entfeuchtet und erwärmt. Allein der Transport der Bogen (ohne Kontakt zum Farbwerk und Feuchtmittelwerk) durch die beiden Druckwerke kann eine Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte von bis zu 8 % und eine Temperatursteigerung von bis zu 1 bis 3°C bewirken. Ungestrichene Papiere erfahren dabei eine stärkere Austrocknung. Ein Entfeuchten der Papiere in der Druckmaschine ist unter anderem durch die Verwendung von Blasluft (zur Trennung der einzelnen Bögen) und die Wärmeentstehung durch das Reiben der Walzen zueinander möglich. Untersuchungen an Coldset-Offsetmaschinen [30], [10], [12] zeigen, dass die gemessene relative Feuchte im Anlegerstapel höher als diese im Auslegerstapel ist. Druckversuche mit niedriger und mit hoher Feuchtmittelführung belegten, dass die bei niedriger Feuchtmittelführung aufgenommene Wassermenge geringer ist, als der Feuchtigkeitsverlust beim Durchlauf durch die Druckmaschine [30]. Die bei hoher Feuchtmittelführung zugeführte Wassermenge reicht in den meisten Fällen ebenfalls nicht aus, um den Feuchtigkeitsverlust zu kompensieren.

### **2.3 Probleme durch Wasseraufnahme**

Das Applizieren des Wasserfilms, so wie dies in der Offsetdruckmaschine geschieht, bedeutet das Applizieren einer Störgröße. Das Anfeuchten des Bedruckstoffs wirkt sich auf seine Dimensionen in Längs- und Querrichtung aus. Die Dimensionsänderungen des Papiers während des Drucks können zu zahlreichen Problemen führen, wie z. B. Passerdifferenzen,

---

Wellenbildung, Mottling, schlechte Planlage, Schwierigkeiten beim Bahnlauf, Probleme in den Falzapparaten o. ä. [15], [16], [17]. Diese Schwierigkeiten sind besonders dann gravierend, wenn von Rolle zu Rolle oder bei Formatdruck von Bogen zu Bogen Unterschiede in der Dimensionsstabilität des Bedruckstoffes vorhanden sind. Typische Probleme des Rollenoffsets sind die Senkung der Bahnspannung und der Fan-out-Effekt. Die Änderungen, die sich in der Druckmaschine zutragen, haben einen dynamischen Charakter.

In Hinsicht auf die Passerdifferenzen gibt es in der Regel keine unüberwindlichen Schwierigkeiten. Das liegt daran, dass sich die Feuchtdehnung der Papiere in Mehrfarbenmaschinen nicht bis zur Endphase der Faservergrößerung auswirkt, weil der Druckvorgang schon vorher beendet ist. Auf die Entstehung von Passerdifferenzen wird näher in Kapitel 2.8 eingegangen.

## **2.4 Die Wasseraufnahme aus physikalischer Sicht**

Das Papier ist ein hygroskopisches Fasergefüge, welches Feuchtigkeit von der Umgebungsluft aufnimmt oder in sie abgibt. Die Hygroskopizität beruht auf den fibrillären Faseraufbau und der chemischen Natur der Cellulose, deren Struktur die Quellfähigkeit bedingt [18], [19], [20]. Die hygroskopische Dehnung ist der Begriff für die Dehnung des Papiers, welche durch das Aussetzen des Papiers in einer veränderten Umgebungsfeuchte verursacht wird. Die Feuchtigkeitsänderung bedingt ein Quellen, bzw. ein Schrumpfen der Fasern und führt damit zu Dimensionsänderungen des Papiers. Die Dimensionsänderungen der einzelnen Faser werden durch die Netzwerkstruktur an die Nachbarfasern geleitet (Abb. 5). Die Leitung der Dimensionsänderung von einer Faser zur nächsten wird von einer Reihe Faktoren, wie Faser-zu-Faser-Bindungen, Faserkrümmung, Faserdimensionen und Faserorientierung beeinflusst [21]. Die hygroskopische Dehnung wird im Weiteren Feuchtdehnung genannt. Die Feuchtdehnung wird gemessen als die Längendifferenz von Probestreifen, die unterschiedlicher Umgebungsfeuchte ausgesetzt sind. Die Feuchtdehnung ist linear und reversibel. Der dominierende Mechanismus bei der hygroskopischen Wasseraufnahme ist vermutlich die Oberflächendiffusion, die Bewegung der Wassermoleküle entlang der Zelluloseoberfläche von einer Hydroxylgruppe zur nächsten. Der Wassertransport ist angetrieben durch den Gradienten der Oberflächenkonzentration und nicht durch den Gradienten der Volumenkonzentration des Wassers in den Zwischenfaserporen

(Außenporen). Experimente zeigen, dass ein minimaler Feuchtigkeitsgehalt notwendig ist, damit die Oberflächendiffusion einsetzt. Die erste Wasserschicht auf der Zellulosenoberfläche ist vermutlich immobil und trägt nicht zur Diffusion bei. Bei höheren relativen Feuchtigkeitsgehalten ist das Wasser in der Faserwand anscheinend mobil und kann durch den Druckgradient transportiert werden.



Abb. 5: Papier als Fasernetzwerk, [22]

Nassdehnung ist der äquivalente Begriff dazu, wenn das Papier flüssigem Wasser ausgesetzt wird. Die Nassdehnung ist höher als die Feuchtdehnung. Die Oberflächenschichten werden dabei komplett befeuchtet, was manchmal zu ungleichmäßiger Dehnung führt. Gibt es eine Nassdehnung, sind die inneren Spannungen komplett freigesetzt. Die Nassdehnung ist für den Offsetdruck, bei dem der Feuchtegehalt im Durchschnitt um etwa 1 – 2 % steigt, nicht bestimmend. Die Befeuchtung im Offsetdruckprozess kann im Bezug auf das Auftragsverfahren als Nassdehnung und im Bezug auf die aufgenommene Wassermenge als Feuchtdehnung bezeichnet werden.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Papiers ist definiert als die absorbierte Wassermenge, dividiert durch die Masse des ofentrockenen Papiers. Wenn sich das Papier im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft befindet, hängt dessen Feuchtigkeitsgehalt von der relativen Feuchtigkeit der Umgebungsluft und der Gleichgewichtstemperatur ab.

Um die einzelnen Mechanismen der Feuchtdehnung zu verstehen, muss die technologische Abfolge des Trocknungsprozesses rückwärts betrachtet werden. Die Schrumpfung, die während der Trocknung im Papierherstellungsprozess stattfindet, kann in Zwischenfaserschrumpfung und in Einzelfaserschrumpfung unterteilt werden [27]. Die Zwischenfaserschrumpfung ist die Folge der Oberflächenspannungen des Wassers zwischen den einzelnen Gefügeelementen [21]. Mit dem Entweichen des Wassers aus den Hohlräumen des Papiers während der Trocknung steigt die Wirkung dieser zusammenziehenden Kräfte. Bei der Einzelfaserschrumpfung wird die einzelne Faser entfeuchtet. Die Zwischenfaserschrumpfung gestaltet, den Anfangsteil der Schrumpfungskurve, der flach und linear verläuft, weil nur Kapillarwasser verdunstet. Die Einzelfaserschrumpfung dagegen bestimmt den steil ansteigenden Endteil der Kurve, in dem die stärkste Schrumpfung auftritt (Abb. 6). Beim Kontakt des Papiers mit den für den Offsetdruck üblich geringen Wassermengen, werden vermutlich zuerst die Einzelfaserschrumpfungen abgebaut und dass nur zu einem geringen Anteil.

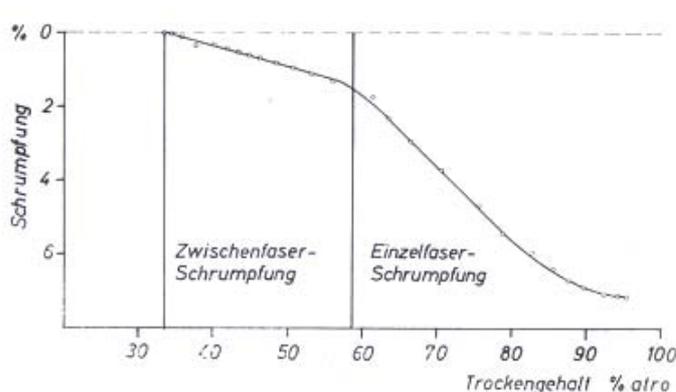


Abbildung 20. Schrumpfungsverlauf

(Nach W. Brecht und D. Potbmann, *Das Papier* 9, 304 [1955])

Abb. 6: Schrumpfungsverlauf während der Trocknung in der Papiermaschine, [27]

Was passiert genau beim Befeuchten von Papier? Das Papier weist eine Porenstruktur auf. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Poren innerhalb der Fasern (Innenporen) und den Poren zwischen den Fasern (Außenporen) [21]. Das Füllen der Innenporen mit Wasser ist für das Quellen der Fasern und für die Dimensionsänderungen des Papiers verantwortlich. Das Parallelogramm in Abb. 7 stellt ein vereinfachtes Sorptionsmodell dar und veranschaulicht den Unterschied zwischen der Wasseraufnahme in den Außenporen und der Wasseraufnahme in den Innenporen, welche ein Quellen verursachen. In vielen Situationen kann der Zustand

des feuchten Papiers durch einen Punkt in dem Parallelogramm beschrieben werden. Geht man vom trockenen Papier aus, erfolgt die Feuchtigkeitsaufnahme zunächst in Form monomolekularer, später in Form polymolekularer Adsorption. Bei hoher Steigerung der Luftfeuchte nimmt der Feuchtigkeitsgehalt des Papiers durch kapillare Sorption zu [18].

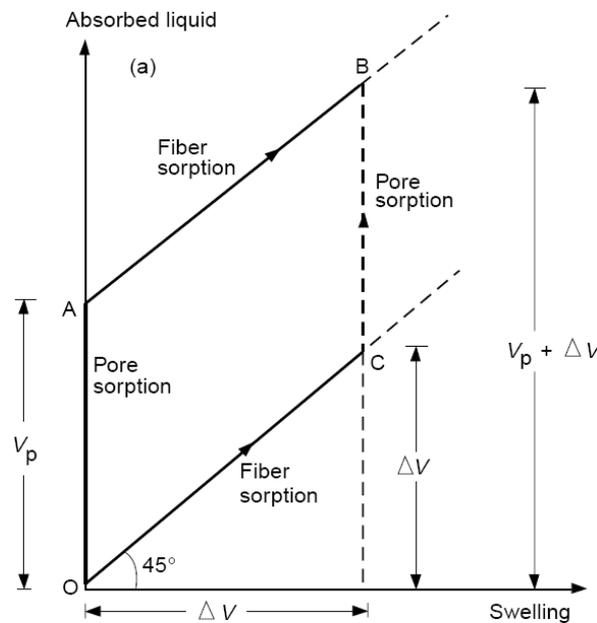


Abb. 7: Sorptionsmodell für die Wasseraufnahme ins Papier, [22]

Das aufgenommene Wasser wird von den Fasern durch unterschiedliche Mechanismen gehalten: an den amorphen Polymerteilen der Faserzellwand, in den Poren, an der Faseroberfläche sowie durch das fibrillare Oberflächengel. Das Wasser an den Holzpolymeren ist direkt an unterschiedlichen Hydrophilgruppen gebunden, Hydroxyl- und Carboxylgruppen. Es existiert außerdem das so genannte gebundene Wasser, welches in Form von einer Schicht auf die Zelluloseoberfläche der Fasern vorzufinden ist. Dieses Wasser kann nicht frei diffundieren. Um das gebundene Wasser aus dem Fasergefüge zu entfernen, wird Wärme benötigt. Die Fasern halten außerdem freies Wasser, an der Faserwand sowie an der Faseroberfläche und in unterschiedlichen Poren an der Zellwand. Die Fasern quellen bei Wasserabsorption, weil die Wassermoleküle zwischen die hydrogen-verbundenen Fibrillen eindringen. Die Menge des gebundenen Wassers steigt und die Anzahl der inneren Bindungen in der Faserwand nimmt ab. Das Umgekehrte tritt bei Desorption ein [22]. Fasern, eingetaucht ins Wasser, quellen, bis sich zwischen dem Wasser in den Fasern und dem Wasser in der Umgebung ein Gleichgewicht eingestellt hat [23]. Die Hygroskopizität des Papiers wird von

---

der Morphologie und den Faserdimensionen beeinflusst. Ausführliche Beschreibung dieser Zusammenhänge gibt *Uesaka* [24], [25].

Beim Wasserauftrag dringt das Wasser zuerst in die Außenporen und von dort in die Innenporen, wodurch eine Faserquellung hervorgerufen wird. Das Ansaugen des Wassers in die Außenporen basiert auf Kapillareffekten. Die Sorption in den Fasern wird ebenfalls durch kapillares Ansaugen realisiert, aber zusätzlich auch durch Oberflächendiffusion und Diffusion durch die Zellulose.

Der Effekt des Anpressdruckes im Offsetdruck wird in der Fachliteratur unterschiedlich ausgelegt. Zum einen wird ihm auf Grund einer Komprimierung des Papiers in z-Richtung und Reduzierung des Porenvolumens eine hemmende Wirkung auf die Flüssigkeitspenetration zugeschrieben. Zum Anderen wird ihm nachgesagt, ein Ansaugstoß zu geben und dadurch die Wasseraufnahme ins Papier zu forcieren. Auf Grund der geringen Mengen an Wasser, die beim Druck transferiert werden, erfolgt jedoch die Absorption möglicherweise nicht in dem Porensystem des Papiers, sondern nur an der Faseroberfläche [31]. Wäre dies der Fall, würde sich der Einfluss der Anpressung auf die Wasseraufnahme im Druckprozess relativieren.

Maschinengefertigte Papiere haben eine unterschiedliche Feuchtdehnung in MD und CD. Die Dehnung in CD ist für gewöhnlich etwa drei bis fünf Mal größer als in MD. Das liegt daran, dass bei den maschinengefertigten Papieren die Fasern vornehmlich in Maschinenlaufrichtung orientiert sind. Die Fasern dehnen sich in ihrem Durchmesser stärker als in ihrer Länge. In noch stärkerem Maß wird die in Längs- und Querrichtung unterschiedliche Feuchtdehnung bzw. Schrumpfung durch die Spannung der Papierbahn in der Trockenpartie der Papiermaschine und durch die damit verbundene Querkontraktion der Papierbahn beeinflusst. Die Freisetzung der eingefrorenen Zugspannungen verursacht in MD irreversible Schrumpfungen, aber kleine Änderungen in CD. Nach dem ersten Feuchtigkeitszyklus, nachdem die inneren Spannungen abgebaut sind, ist die Dehnung in MD ebenso linear und reversibel [29]. Die Papiereigenschaften, verbunden mit der Feuchteaufnahme, werden in CD und MD durch eine Hysterese dargestellt (Abb. 8). Das bedeutet, dass der Feuchtigkeitsgehalt von Papier von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. In Abhängigkeit von einer Feuchtigkeitsabsorption aus trockenen Umgebungsbedingungen oder einer Desorption aus

feuchten Umgebungsbedingungen ist der Feuchtigkeitsgehalt bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit bei Desorption höher als bei Adsorption.

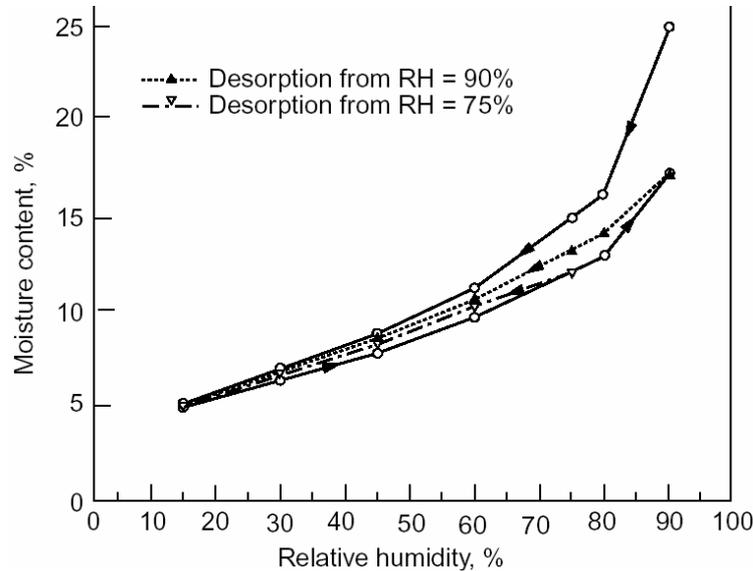


Abb. 8: Zusammenhang Feuchtigkeitsgehalt – Luftfeuchte, [22]

## 2.5 Papierbedingte Parameter, die die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflussen

Die Wasseraufnahme wird in großem Maße vom Papier selbst beeinflusst [28]. Wichtige Faktoren sind:

- die Faserstoffzusammensetzung und die Faserstoffaufbereitung (Anteile von Zellstoff und Holzstoff, sowie deren Mahlunugszustand),
- Art und Menge der Füllstoffzusätze,
- die Leimung in der Masse oder an der Oberfläche und
- die Glätte mit entsprechender Blattverdichtung und Kapillarität.

Die Wechselwirkung zwischen Feuchtmittel und Papier wird durch seine strukturellen Eigenschaften bestimmt. Meistens handelt es sich dabei um physikalische Wirkungen, es können aber auch chemische auftreten. Bei der Wechselwirkung zwischen Feuchtmittel und Papier spielt die Faserstoffzusammensetzung eine wesentliche Rolle, da sich Zellstoffe und Holzstoffe unter Wassereinwirkung unterschiedlich verhalten. Zellstoffe quellen infolge

---

größeren Wasseraufnahmevermögens stärker als Holzstoffe [26]. Ein höherer Mahlgrad führt zu einer größeren Wasseraufnahme des Faserstoffes [28], [27]. Hemicellulosen im Faserstoff begünstigen die Wasseraufnahme, während sie durch Lignin behindert wird.

Die Wasseraufnahme durch die Fasern und in den Zwischenräumen des Fasergefüges führt zu Dimensionsänderungen im Papier. Diese Dimensionsänderungen hängen von der Fläche der Faser-zu-Faser-Bindungen ab [28]. Eine Zunahme der Faser-zu-Faser Bindungen, gemessen als größerer spezifischer Elastizitätsmodul, führt zu einer höheren hygroskopischen Dehnung. Mathematische Beschreibungen der Zusammenhänge können der Arbeit von *Uesaka* [29] entnommen werden.

Ein Papier mit hoher Porosität und kleiner Bindungsfläche zeigt unter der Einwirkung von Wasser nur geringe Dimensionsänderungen, weil die Einzelfasern im losen Fasergefüge des Papiers freien Bewegungsspielraum haben und sich ihre Quellreaktionen nicht oder nur schwach auf das Fasergefüge des Papiers übertragen. Bei einem Papier mit niedriger Porosität und großer Bindungsfläche, in dem die Einzelfasern fest aneinander gebunden sind und im Fasergefüge des Papiers kein freier Bewegungsspielraum mehr vorhanden ist, übertragen sich die Quellungsreaktionen der Einzelfaser auf das gesamte Blattgefüge, mit der Folge ausgeprägter Dimensionsänderungen [28], [31].

Außerdem ist die Wasseraufnahme davon abhängig, ob das Papier gestrichen oder ungestrichen ist. Ungestrichene Papiere nehmen mehr Wasser und Öl auf [30]. Bei gestrichenen Papieren verläuft die Wasseraufnahme langsamer als bei Zeitungsdruckpapieren.

Die Menge und weniger die Art von Füllstoffzusätzen wirkt der Wasseraufnahme entgegen und verbessert dadurch die Dimensionsstabilität des Papiers. Füllstoffe quellen unter dem Einfluss von Wasser nicht.

Die Leimung des Papiers in der Masse oder an der Oberfläche kann zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Hydrophobierung führen, d. h. dass die Benetzbarkeit mit Wasser oder wässrigen Lösungen verringert wird. Die Empfindlichkeit von Papier gegenüber Wasser wird auf diesem Wege also reduziert.

Das Glätteniveau des Papiers ist ein wesentliches Kriterium seiner Bedruckbarkeitseigenschaften. Das Glätten von Papier in Maschinenglättwerken und Superkalandern ist mit einer Verdichtung des Blattgefüges verbunden, die sich in einer entsprechenden Veränderung des spezifischen Volumens, der Porosität und der Ölabsorption äußert. Über diesen Weg wird auch die kapillare Saugfähigkeit des Papiers gegenüber Wasser gesteuert. Studien haben gezeigt, dass mit steigender Rauigkeit des Papiers die Wasseraufnahme im Papier abnimmt [31]. Das liegt an der Tatsache, dass durch die hohe Rauigkeit des Papiers die Kontaktfläche zwischen Papier und Druckfarbenfilm reduziert wird. Das Wasser benötigt wenige Zehntel einer Sekunde um das Papier zu befeuchten. Im Druckprozess wird dem Papier Wasser nur in sehr niedriger Menge zugeführt. Jedoch ist dieser Einfluss nicht sehr stark, da das Gummituch und das Papier im Offsetdruck guten Kontakt haben. Die Wasseraufnahme in den nachfolgenden Druckwerken ist nicht von der Wasseraufnahme in dem vorgehenden Druckwerk abhängig [31].

Letztendlich wirken sich alle genannten Parameter auf das Verhalten des Papiers gegenüber Feuchtmittel und gegenüber Druckfarben bzw. ihren Bestandteilen aus [28].

## 2.6 Feuchtmittelregelung an Offsetdruckmaschinen

Der Offsetdruck wird von einer Vielzahl von Prozessvariablen beeinflusst. Neben der Farbführung, dem Passer, dem Register und der Farbwerktemperatur wird das Druckergebnis ebenso stark von der Feuchtmittelführung beeinflusst. Feuchtmittelschwankungen verursachen infolge der Wechselwirkungen von Farbe und Feuchtmittel Färbungsschwankungen. Das korrekte Druckfarben-Feuchtmittel-Gleichgewicht ist einer der wichtigsten Prozessparameter beim Offsetdruck, denn sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Feuchtmittelführung kann zu Druckschwierigkeiten führen. Eine zu hohe Feuchtung führt z. B. zum Aufbauen<sup>3</sup> im Farbwerk und damit verbundene Beeinträchtigung der Farbübertragung. Schmierer, hervorgerufen durch zu geringe Feuchtung, wird durch ein unzureichendes Freihalten der nichtbildführenden Partien der Druckplatte bedingt [30].

---

<sup>3</sup> ungewolltes örtliches Ansammeln von Druckfarbe auf farbübertragenden Flächen des Druckwerks, z. B. auf dem Gummituch, [36]

Die Feuchtmittelmenge wurde ursprünglich vom Drucker über den Glanz der Druckplatte beurteilt, was sehr subjektiv war. Seit mehreren Jahren gibt es jedoch automatische Feuchtmittelregelungen. Die Feuchtmittelmenge auf der Druckplatte wird über einen IR-Sensor gemessen. Durch das Regelsystem wird die Feuchtmittelmenge auf den Sollwert geregelt und konstant gehalten [32]. Die Feuchtmittelverteilung über die Plattenbreite ist jedoch oft ungleichmäßig. Untersuchungen bestätigen auch bei optimaler Feuchtwerk-Grundeinstellung eine häufige stark ungleichmäßige Feuchtmittelverteilung in den bildfreien Stellen. Dabei wird meist an den Randzonen weniger Feuchtmittel gefördert.

Die Schmiergrenze stellt den unteren Grenzwert der Feuchtmittelmenge dar. Sie ist daher eine wichtige Bezugsgröße für die Bestimmung des Sollwertes der Feuchtmittelmenge auf der Platte. Gleichzeitig mangelt es bis heute an objektiven Meßmethoden zur Kontrolle der notwendigen Wassermenge für die Praxis. Die Schmiergrenze wird durch „Herantasten“ ermittelt. Der Offsetdrucker beurteilt aufgrund seiner Erfahrung das Farb-Wasser-Gleichgewicht während des Fortdrucks sehr sorgfältig durch eine ständige subjektive Kontrolle der Druckbogen und muss es durch Bedrucken von Vorlaufbögen einpendeln lassen [32]. Die Feuchtmittelzuführung wird systematisch reduziert, bis in einer der Farbzonen ein sehr leichtes Schmieren auftritt. Dieser Wert stellt die Schmiergrenze dar [33]. Die Schmiergrenze ist aber keine feste Größe. Sie wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Wichtige Einflussgrößen sind die Druckfarbe, der Druckplattentyp, die Farbschichtdicke. Untersuchungen der FOGRA haben gezeigt, dass unterschiedliche Papiersorten praktisch keine Änderungen der Schmiergrenze hervorrufen [33].

## **2.7 Messtechnische Erfassung von Feuchtdehnung und Nassdehnung**

Die Papiereigenschaften, die für das Papierverhalten in der Druckmaschine signifikant sind, können nur bestimmt werden, wenn die Versuchsbedingungen möglichst nah an denen in der Druckmaschine sind. Zahlreiche Messvorrichtungen und -geräte zur Analyse der Wasseraufnahme vom Papier sind bereits entwickelt worden. Viele davon sind aus verfahrenstechnischer Sicht für die Analyse der Dimensionsstabilität von Papier im Offsetdruck nicht geeignet, auch wenn oft versucht wird, die Ergebnisse aus diesen

---

Messungen auf den Druckprozess zu übertragen. An dieser Stelle wird in Kürze das Messprinzip der Feuchtdehnung (Hygroskopizität) und der Nassdehnung erläutert.

### **2.7.1 Feuchtdehnung**

Die Feuchtdehnung wird bestimmt, in dem ein Probestreifen bei einer bestimmten Feuchtigkeit vorkonditioniert wird. Wenn der Probestreifen anschließend einer höheren Luftfeuchtigkeit ausgesetzt wird, dehnt er sich infolge der Wasseraufnahme. Nachdem ein Gleichgewicht mit der Umgebungsluft erreicht ist, wird die Feuchtdehnung gemessen. Da das Befeuchten in der Druckmaschine mit dem Erreichen des Feuchtigkeitsgleichgewichts nicht zu vergleichen ist, ist die Analogie solcher Untersuchungen mit dem eigentlichen Druckprozess fragwürdig. Ein anderer Aspekt ist, dass die Übertragung der Feuchte ins Papier durch die Umgebungsluft viel langsamer erfolgt, als durch direktes Applizieren des Wassers auf der Papieroberfläche wie dies im Druckprozess geschieht [34].

### **2.7.2 Nassdehnung**

Betrachtet wird hier das automatisierte Messgerät zur Erfassung der Nassdehnung von Gabriel und Grüner [35]. Dieses Gerät oder ähnliche Modifikationen davon, haben unter den Papierherstellern bereits breiten Einsatz gefunden. Dabei wird Dehnung von Papierproben unter geringer Vorspannung bei einseitiger Befeuchtung in Abhängigkeit von der Zeit als Längenänderung gemessen. Mit dieser Messung wird die Dynamik der Dimensionsänderungen des Papiers nach dem Flüssigkeitskontakt erfasst. Die somit gemessenen Dehnungswerte korrespondieren mit dem von der Papiermaschine bekannten Wannprofil über die Papierbahnbreite. Die Messmethode ist jedoch zur Aufdeckung relevanter Parameter für die Dimensionsstabilität im Offsetdruck wenig geeignet. Grund dafür ist die vollständige Durchnässung der Probestreifen, bei der im Fasergefüge andere Reaktionen ausgelöst werden wie im realen Offsetdruckprozess. Eine andere Einschränkung dieser Methode ist die Tatsache, dass die Dimensionsänderung nur eindimensional erfasst wird.

## **2.8 Über den Passer**

Der Druck von mehrfarbigen Bildern wird durch Aufeinanderdrucken einfarbiger Farbauszugs-Teilbilder realisiert. Der exakte lagerichtige Übereinanderdruck der einzelnen

Farbauszüge für Cyan, Magenta, Yellow und Black wird traditionell Passer oder Farbregister genannt. Der Passer prägt die Qualität des Mehrfarbendruckes entscheidend. Der Schärfeeindruck eines Vierfarbendruckes wird vom Passer maßgebend beeinflusst und ist einer der bedeutendsten Merkmale der Druckqualität. Die Farbregistergenauigkeit muss im Bereich von wenigen Hundertstel Millimeter liegen. Das Register bezeichnet formal die Lagegenauigkeit des Druckbildes auf dem Bedruckstoff, bezogen auf die Bogen- bzw. Bahnabschnittkanten. Meist wird aber vom Farbregister beim Übereinanderdruck der Farbauszüge gesprochen, wie zuvor erwähnt [36].

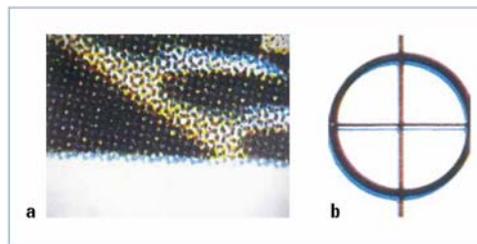


Abb. 9: Farbregisterabweichungen; a) Rasterbild b) Messmarke, [36]

In Diskussionen um den Passerfehler ist es natürlich wichtig die Trennschärfe des menschlichen Auges zu berücksichtigen. Das Auge hat ein Auflösungsvermögen von ca. 0,1 mm und es kann angenommen werden, dass ein Passerfehler von 0,1 mm mit bloßem Auge erkennbar ist [37]. Eine Abweichung in der Passereinhaltung kann ein unscharfes und verschwommenes Bild verursachen oder zu unterschiedlichen Nuancen führen. Wenn der Passer nicht 100 %-ig übereinstimmt, wird ein Bildpunkt vom nachfolgenden Druckwerk nur partiell den gleichen Bildpunkt, vom vorigen Druckwerk, bedrucken. Auch kleinere Fehler, die unterhalb der Passertoleranz liegen, können qualitätsmindernd wirken, da sie feine Details verwischen. Die ständig steigenden Qualitätsanforderungen bedeuten einen immer wichtiger werdenden „stehenden“ Passer und der jetzige Toleranzwert wird nach unten korrigiert werden müssen.

Die entstehenden Passerdifferenzen hängen wesentlich von den Bedingungen der Bogenführung (einschließlich Bogenausrichtung) und des Druckprozesses selbst ab. Jede Dimensionsänderung des Papiers macht es im Mehrfarbenoffsetdruck schwierig eine völlige Passerübereinstimmung in den unterschiedlichen Druckwerken zu erreichen. Das Papier verändert sich ungefähr gleichmäßig nach jeder Farbaufnahme in der Druckmaschine [37]. Im

---

Vierfarbdruck wird das Papier nach dem ersten Druckwerk noch praktisch drei weiteren Dehnungen durch Feuchteaufnahme unterworfen. Die größte Passerdifferenz wird deswegen zwischen dem ersten und dem letzten Druckwerk gemessen. Im 4-4 Farbdruck, das heißt der Bedruckstoff wird beidseitig mit vier Druckfarben bedruckt, absorbiert das Papier Feuchte von insgesamt acht Druckwerken.

Allgemein sind die Dimensionsänderungen in der Druckmaschine das Ergebnis einer Überlagerung von reversiblen Verzerrungen, hervorgerufen durch den Transport in der Druckmaschine und durch Spannungszustände, wie Schrumpfung durch Trocknen und Kalandriereffekte, die unter Umständen irreversibel sind. Daraus ergeben sich Verzerrungszustände, welche im Allgemeinen an jeder Stelle der Druckmaschine jeweils anders ausfallen. Damit die sich folgenden Teilbilder aufeinander anpassen, müssen die Bildgrößen, auf den nachfolgenden Formzylindern in Lauf- und in Querrichtung dem jeweiligen Verzerrungszustand der Bahn angepasst werden. Dementsprechend zeigt die Erfahrung, dass in der Praxis eine Anpassung in Querrichtung bei Bahnbreiten unter einem Meter im Allgemeinen nicht erforderlich ist. Bei Druckmaschinen breiter als 1 m ist jedoch meist eine Anpassung notwendig, um den zulässigen Bildbreitenfehler (Querpasserfehler) nicht zu überschreiten. Werden mehrere Seiten über die Bahnbreite gedruckt, dann genügt es meist, die Mittelabstände der einzelnen Seiten zu korrigieren.

## **2.9 Maßnahmen zur Vermeidung von Passerdifferenzen**

Im Zeitungsdruck wird durch unterschiedliche Maßnahmen versucht den Fan-out-Effekt des Papiers zu kompensieren. In einer Rollenoffsetmaschine mit doppelter Breite sind auf dem Druckzylinder nebeneinander vier Druckplatten eingehängt. Um die Querdehnung der Papierrolle zu kompensieren, werden die Druckplatten vom Druckwerk zu Druckwerk immer mehr auseinander gerückt. Die Dehnung des Bedruckstoffes kann außerdem bei der Druckvorstufe durch stufenweise Vergrößerung der Druckformvorlage für jedes weiteres Druckwerk kompensiert werden. In Wirklichkeit zeigen die unterschiedlichen Papiere unterschiedliche Neigungen zur Dehnung und diese Neigung kann von Rolle zu Rolle variieren. Das Justieren der Druckplatten nach jedem Rollenwechsel ist in dem gegenwärtigen Arbeitsalltag, der von Termindruck geprägt ist, sehr zeitraubend.

---

Bei einer Zeitungsdruckmaschine wird der Passer häufig in der Bahnmitte eingestellt, somit ist der reale Passerfehler die Hälfte der absoluten Passerabweichung. Wenn allerdings am Rand der Papierbahn ein wichtiges Werbungsfoto positioniert ist, wird der Passer auf dieser Seite eingestellt. In diesem Fall ist die Abweichung am anderen Rand der Papierrolle gleich der absoluten Passerabweichung.

Der Fan-out im Vierfarbenzeitungsdruck kann zu Passerdifferenzen bei den unterschiedlichen Farben führen. Der Fan-out-Effekt im Zeitungsdruck wird beeinflusst von einer Reihe von Parametern, die zum einen mit dem Papierherstellungsprozess und zum anderen mit den Druckbedingungen verbunden sind. Folgende Maßnahmen werden unternommen und sind nachfolgend beschrieben um dem Fan-out-Effekt entgegenzuwirken [38]:

- Drucken im Rollenoffsetdruck in Satelliten Druckmaschinen,
- „Adaption of Repro“,
- Das Auseinanderschieben der Platten in Querrichtung,
- Vorfeuchten und mechanische Breitung des Papiers,
- Mechanische Reduktion des Fan-outs.

#### Drucken im Rollenoffsetdruck in Satelliten Druckmaschinen

Das Breiterwerden des Papiers in einer Satellitendruckmaschine ist kleiner als in einer konventionellen Druckmaschine nicht nur wegen der kürzeren Verweilzeit zwischen den Druckwerken, sondern auch kleiner für das gleiche Zeitintervall. Die Ursache dafür liegt vermutlich darin, dass die Papierbahn in der Satelliteneinheit fixiert um den Zentralzylinder der Satelliteneinheit läuft. Deswegen kann sich die Papierbahn in Querrichtung nicht frei dehnen, so wie dies in der konventionellen Druckmaschine der Fall ist.

#### „Adaption of Repro“

Der Effekt der Dehnung in Querrichtung zwischen den Druckwerken kann durch „Adaption of Repro“ kompensiert werden. Bei dieser Technik wird in der Vorstufe das Bild um den gleichen Grad verkleinert um den sich die Papierbahn vermutlich dehnen wird. Diese Technik wird angewandt bei den so genannten Vierfarbpanoramabildern, welche beidseitig gedruckt werden. Der Vorteil von dieser Methode ist, dass es kontinuierliche (allmähliche) Kompensierung der Dehnung der Papierbahn in Querrichtung erlaubt. Die Anpassung nach

dieser Technik setzt allerdings voraus, dass die vermutliche Dehnung der Papierbahn in der Druckmaschine bekannt und von Rolle zu Rolle gleich ist.

#### Das Auseinanderschieben der Platten in Querrichtung

Die Dehnung der Papierbahn kann noch durch Auseinanderschieben der Platten in Querrichtung kompensiert werden. Die Platten werden um so viel verschoben, wie man vermutet, dass sich die Papierbahn dehnen wird. Auch bei dieser Methode ist es notwendig schon vorher die vermutliche Dehnung des Papiers zu kennen. Andernfalls muss die Druckmaschine gestoppt werden, um die Position der Platten nochmals neu zu justieren.

#### Vorfeuchten und mechanische Breitung des Papiers

Die Ausdehnung des Papiers hängt von der applizierten Wassermenge ab und ist annähernd proportional dazu. Das ist gültig bis zu einer bestimmten Menge, danach findet keine weitere Dimensionsänderung statt. Durch Applizieren des Wassers vor dem ersten Druckwerk, wird erwartet, dass das Papier keine weitere Dimensionsänderung beim Eintritt in dem ersten Druckwerk erfährt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Vorfeuchtung in Abhängigkeit der Papiereigenschaften variiert werden kann. Es hat vermutlich aber den Nachteil, dass eine große Wassermenge aufgetragen werden muss, so dass danach keine Ausdehnung mehr stattfindet. Die Feuchtigkeit beeinflusst jedoch negativ die Festigkeitseigenschaften von Papier. Diese Maßnahme findet keine breite Anwendung.

#### Mechanische Reduktion des Fan-outs

Die Papierausdehnung auf Grund der Wasseraufnahme wird ebenfalls mit mechanischen Vorrichtungen kompensiert. Durch kleine Räder über und unter dem Druckbogen wird ein welliges Profil erzeugt. Durch entsprechende Änderung der Anpressung der Räder und deren Anzahl können unterschiedlich große Dimensionsänderungen kompensiert werden. Der Nachteil liegt darin, dass durch den Kontakt mit dem frisch gedruckten Bogen Schmierungen entstehen können.

### 3 Entwicklung des Feuchtdehnungsmessgeräts (FDM)

In diesem Kapitel werden das Konzept des Feuchtdehnungsmessgeräts, sowie das angewandte bildanalytische Verfahren erläutert.

#### 3.1 Konstruktion

Um auf die Fragestellung dieser Arbeit antworten zu können, war es bei dem Versuchsaufbau notwendig, hinsichtlich des Wasserauftrags, Beanspruchungen zu realisieren, welche möglichst korrekt den realen Druckprozess abbilden. Hieraus ergaben sich folgende Anforderungen an das System:

- Wasserauftragsmenge wie im Offsetdruck,
- variable Wasserauftragsmenge,
- gleichmäßige Benetzung der Probe,
- realitätsnahes Befeuchtungsverfahren,
- Zugbeanspruchung durch Einspannung der Probe.

Wie in der Druckpraxis durchaus üblich, wurde dem Feuchtmittel 10 % Isopropylalkohol und 3 % eines Feuchtmittelzusatzes, hier Waterfit 1075 (Epple Druckfarben), zugemischt.

Es wurden unterschiedliche Befeuchtungsmöglichkeiten betrachtet und hinsichtlich ihrer Dosiermenge und der Gleichmäßigkeit des Wasserauftrags unter den gegebenen Randbedingungen beurteilt. Für die Messeinrichtung wurde daraufhin ein Walzenbefeuchtungssystem gewählt. Eingesetzt wurde das Befeuchtungssystem AB 9899 der Fa. Kompac, das als eigenständige Baugruppe für Kleinoffsetmaschinen geliefert wird. Es ist auch als Nachrüsteinheit geeignet und hat sich in der Praxis in großer Stückzahl bewährt.

Das Feuchtwerk besitzt eine gummierte Auftragswalze mit einem Durchmesser von 50 mm und eine Dosierwalze mit einem Durchmesser von 38 mm, welche in Wälzlagern in den Seitenwänden der Baueinheit gelagert sind. Die Dosierwalze ist über Exzenter beidseitig feinfühlig an die Auftragswalze anstellbar. Durch die unterschiedlich starke Anpressung der Dosierwalze an die Auftragswalze erfolgt die gewünschte Dosierung der Feuchtflüssigkeit (Abb. 10). Beide Walzen sind horizontal nebeneinander angeordnet, so dass im Bereich über

den Walzen ein Flüssigkeitsreservoir bereitgestellt wird, das seitlich durch zwei eingepasste Teflondichtscheiben abgedichtet wird. Die Auftragswalze wird in der Originalausführung durch ein Zahnrad von der Druckmaschine angetrieben. Im hier beschriebenen Einsatzfall treibt ein 24-Volt-Gleichstrommotor das Feuchtwerk über eine gummierte Scheibe, gepaart mit einem Kunststoffrad auf der Auftragswalze, an. Somit können Kraftspitzen bei Überlastung des Feuchtworks durch Schlupf am Reibradtrieb abgebaut werden. Die Auftragswalze wiederum schleppt die Dosierwalze durch Reibung mit. Der Gleichstrommotor wird über einen Drehzahlregler mit Laufrichtungsumkehr gesteuert. Die Drehzahlregelung wurde zur Ermittlung einer optimalen Drehzahl eingesetzt. Alle Versuche innerhalb der experimentellen Arbeit erfolgten bei gleicher Motordrehzahl von 16 U/min.

### Walzenfeuchtwerk Kompac AB 9899

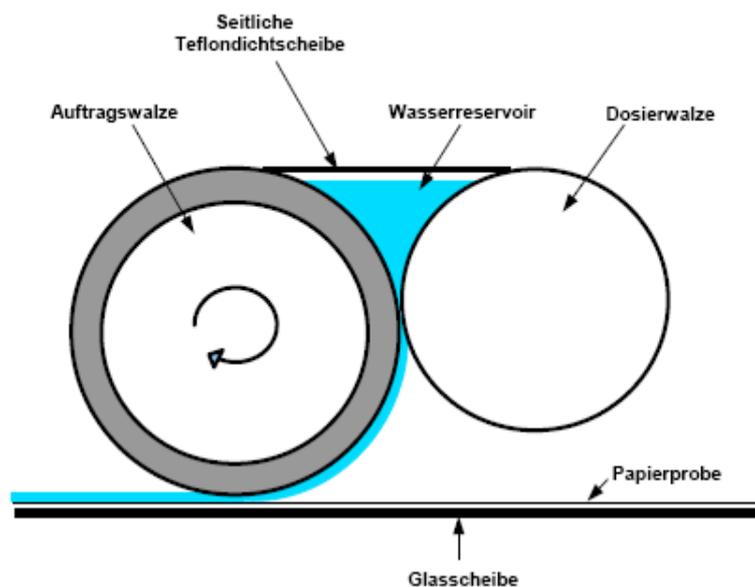


Abb. 10: Schema der Befeuchtungsvorrichtung im FDM

Das Feuchtwerk ist schwenkbar an zwei Kugelhülsen befestigt, die es auf zwei parallelen Präzisions-Stahlwellen in Arbeitsrichtung führen. Die Stahlwellen wurden hochgenau zur Glasplatte, auf der der Bedruckstoff aufliegt, ausgerichtet. In Ruheposition befindet sich das Feuchtwerk leicht abgeschwenkt über dem Bedruckstoff. Zur Befeuchtung wird es von Hand auf den Bedruckstoff abgesenkt und dann von der angetriebenen Auftragswalze mit 3 m/min Geschwindigkeit über den Bedruckstoff bewegt. Es sind mindestens 40 cm Vorlauf notwendig, ehe ein gleichmäßiger Feuchtfilm auf das Papier abgegeben werden kann.



---

Um einen gleichmäßigen Feuchtigkeitsfilm auf dem Bedruckstoff zu erreichen, wurde das Feuchtwerk zunächst mit reiner Tinte gefüllt. Eine ungleichmäßige Feuchtung wurde durch Farbdifferenzen der aufgetragenen Tinte schon bei kleinen Unregelmäßigkeiten sichtbar.

Durch Veränderung des Walzenspaltes zwischen den beiden Walzen des Feuchtwerks kann die aufzutragende Wassermenge zwischen ca. 0,3 und 1,5 g/m<sup>2</sup> variiert werden. Mit Wiegeversuchen wird im Vorfeld der eigentlichen Versuche die aufgetragene Menge bestimmt und der Walzenspalt entsprechend eingestellt und fixiert. Auch bei gleicher Einstellung des Walzenspalts neigen jedoch unterschiedliche Papiere dazu, unterschiedliche Wassermengen aufzunehmen. Zahlreiche Parameter, auf die in Kapitel 2.4 näher eingegangen wurde, beeinflussen die Bereitschaft des Papiers sich benetzen zu lassen.

In der Bogendruckmaschine wird der Bedruckstoff Beanspruchungen unterschiedlicher Art ausgesetzt. Wesentliche Kräfte, von der Druckmaschine ausgehend, die auf den Druckbogen wirken, sind die Zugkräfte durch die Greifer und die Anpresskräfte beim Walkprozess in den Walzen. Um den mechanischen Aufwand beim Aufbau des FDM in akzeptablen Grenzen zu halten wird in dem FDM eine statische Zugbeanspruchung simuliert. Das Papier wird nach der waagrecht liegenden Messstrecke über eine Umlenkrolle senkrecht nach unten geführt, wo ein mit Magneten versehener Rahmen als Gewicht an das Papier geklemmt wird. Damit wird eine Linienzugkraft von 200 N/m in die Probe erzeugt - ein typischer Wert für den Bahnzug in einer Offsetdruckmaschine.

Das Ziel, einen definierten Wasserauftrag bei den oben genannten geringen Auftragsmengen zu realisieren, stellt an den Versuchsaufbau hinsichtlich Präzision höchste Anforderungen. Um die Stabilität des Systems zu erhöhen, wurde die gesamte Befeuchtungseinheit auf einem soliden schwingungsarmen Gerüst aus Präzisionsprofilen aufgebaut. Der Versuchsaufbau ist somit Schwingungen und Bodenunebenheiten gegenüber unempfindlich. Die Papierrollen, von denen die Proben abgezogen werden, werden auf einer an der äußeren Wand des FDMs befestigten Achse gelagert. Die zu untersuchende Probe wird samt einem Vorlaufstück auf einen Unterlagetisch aufgelegt und über eine Umlenkrolle mit einem Gewicht belastet. Der Unterlagetisch besteht aus einer Aluminiumplatte, einer die Unebenheiten der Aluminiumplatte ausgleichenden Silikonunterlage und einer Glasplatte, auf der die

Papierprobe aufliegt. Der Unterlagetisch, die Stahlwellen, auf denen das Befeuchtungssystem geführt wird, sind mit einem Aluminiumrahmen verbunden (Abb. 12).

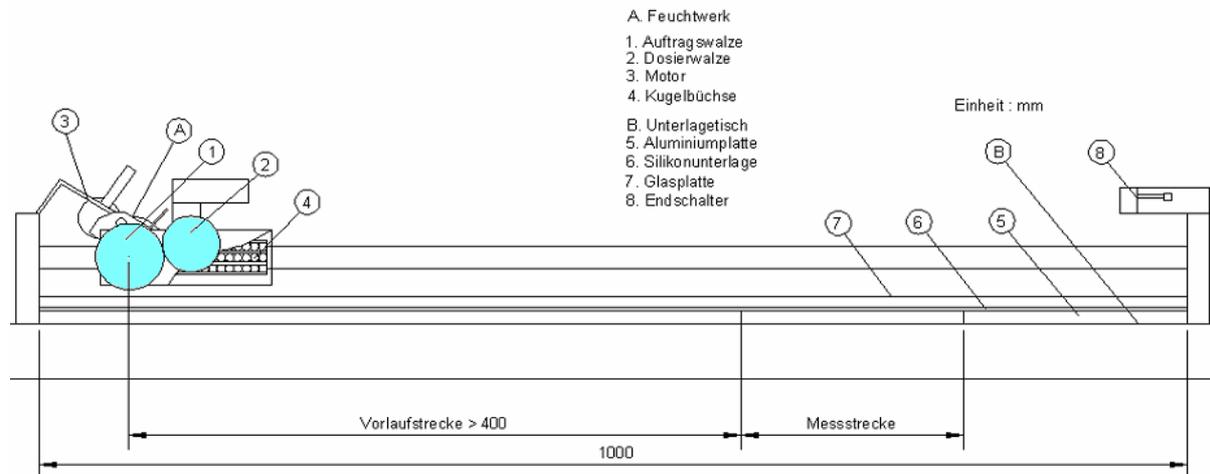


Abb. 12: Tisch mit Befeuchtungsvorrichtung

Bei den geplanten Befeuchtungsversuchen sollten geringe Wassermengen aufgetragen werden. Die resultierenden Dimensionsänderungen bewegen sich erwartungsgemäß im  $\mu\text{m}$ -Bereich. Um auch kleinste Verformungen detektieren und erfassen zu können, sind höchste Anforderungen ebenfalls an die Messtechnik gestellt. Speziell für diese Arbeit wurde die extrem hoch auflösende Kamera pco.4000 der Fa. PCO beschafft (Tab. 1). Das Kamerasystem pco.4000 ist mit einem monochromen Bildsensor ausgestattet und erzeugt Bilder mit 16384 Graustufen (14 Bit) [39]. Die Darstellung der Schwarzweiß-Bilder auf dem Monitor erfolgt mit 256 Graustufen. Der CCD Bildsensor im Kamerasystem wird über einen thermoelektrischen Kühler (Peltier-Kühler) gekühlt und hat eine Größe von 4096 x 2672 Pixel. Das Kamerasystem beinhaltet ein externes Netzteil.

Model	pco.4000
Hersteller	PCO Imaging
Graustufen	$2^{14}=16384$
Pixelabstand bei Entfernung von 433 mm zum Papierblatt [ $\mu\text{m}$ ]	70
Maximale Bildfrequenz [1/s]	5

Tab. 1: Technische Daten der PCO 4000 CCD-Kamera

---

Für die Durchleuchtung der Probe werden zwei Halogenlampen verwendet. In konventionellen Bildanalyseanwendungen sind die Lichtverhältnisse besonders kritisch wegen des Grenzwertes der Lichtintensität. Mit der Digital Speckle Photography (DSP) dagegen, die hier verwendet wird, haben Unterschiede in der Lichtintensität keinen signifikanten Einfluss, solange genügend Grauwertinformationen im aufgenommenen Bild vorhanden sind. Das liegt daran, dass die DSP den „Fingerabdruck“ des jeweiligen Segments nutzt und nicht den individuellen Grauwert des Segments betrachtet [40]. Der Datenaustausch zwischen dem PC und der CCD-Kamera erfolgt über eine Firewire-Schnittstelle. Zur Verfügung stand ein Nikon-Objektiv vom Typ Nikkor 50 mm mit der Schärfentiefe  $f/1.4$ .

### 3.2 Bildanalytische Auswertung

Zur Steuerung der Kamera und zur Bildaufnahme wurde am PMV ein Algorithmus mit der Bildanalysesoftware HEURISKO programmiert, der auf den Versuchsaufbau und die konkreten Versuchsanforderungen abgestimmt war. Beim Ausführen des erstellten Workspace vor jeder Messung erfolgte zunächst eine Initialisierung. Dabei wurde die Kamera auf den mittleren Grauwert kalibriert und die erforderliche Belichtungszeit für die jeweilige Papiersorte eingestellt. In dem HEURISKO-Workspace wurden folgende Prozeduren programmiert:

- Wahl des gewünschten Bildausschnitts,
- Einstellen der Belichtungszeit,
- Auslösen der Bildaufnahme,
- Abspeichern der Bilder in dem entsprechenden Verzeichnis,
- Triggern der Kamera,
- Ausgabe des mittleren Grauwertes und der Belichtungszeit für jede Messung.

### 3.3 Prinzip der Digital Speckle Photography

Für die Detektion der Papierverformung wurde in Matlab ein Rechenalgorithmus entwickelt, welches auf die Digital Speckle Photography basiert. Geplant war ursprünglich hierfür die Siebmarkierungsanalyse einzusetzen. Diese wurde jedoch verworfen, da die Auflösung dieser Methode nicht ausreichend war um die kleinen Messwertänderungen zu erfassen. Ein weiterer Vorteil der Digital Speckle Photography besteht darin, dass diese Methode praktisch auf alle

---

Papiere anwendbar ist, während bei Nutzung der Siebmarkierungsanalyse entsprechende Markierungen messbar sein müssen.

Die Digital Speckle Photography ist eine kontaktlose, bildanalytische Methode, die in den letzten Jahren breite Verwendung bei der Untersuchung von Papier gefunden hat. Sie wird zur Bestimmung der lokalen Verformungen eingesetzt, die bei Zugbeanspruchungen oder durch Befeuchten entstehen [41], [42], [43], [44], [45]. Die Digital Speckle Photography ermöglicht die Bestimmung der Verformung einer stochastischen Struktur einer Materialoberfläche und auf diese Weise indirekt der lokalen Verformungen des Körpers. Die stochastische Struktur der Materialoberfläche kann beispielsweise durch die Beleuchtung der Oberfläche mit einem Laser erzeugt oder künstlich auf die Oberfläche des Körpers aufgebracht werden (z. B. durch Bedrucken, Sprühen). Auch eine materialspezifische Oberflächenstruktur kann zu diesem Zweck verwendet werden [41].

Dank hoher lokaler Auflösung und hoher Graustufensensitivität der eingesetzten Kamera war es möglich, die bildanalytische Auswertung der Papierprobe ohne Aufbringen von zusätzlichen Mustern durchzuführen. Vorversuche haben gezeigt, dass das aufgenommene Schwarzweißbild den notwendigen optischen Kontrast liefert und die papierspezifische Oberflächenstruktur das für die DSP-Methode erforderliche stochastische Punktemuster liefert. Somit bleiben Schwierigkeiten, sowie Ungenauigkeiten, verbunden mit dem Auftrag eines zusätzlichen Musters aus.

Bei der Digital Speckle Photography wird mit der CCD-Kamera der Zustand der stochastischen Papierstruktur vor und nach der Befeuchtung digital festgehalten und abgespeichert. Die Grauwertverläufe der digitalen Bilddaten, welche die Papierstruktur vor und nach der Befeuchtung repräsentieren, werden ausschnittsweise mit Hilfe einer Kreuzkorrelation (Statistik zweiter Ordnung) verglichen, um die lokalen Verschiebungen der Struktur zu ermitteln. Das Prinzip der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) für zwei Segmente zur Bestimmung deren lokalen Verschiebungen ist in Abb. 13 dargestellt.

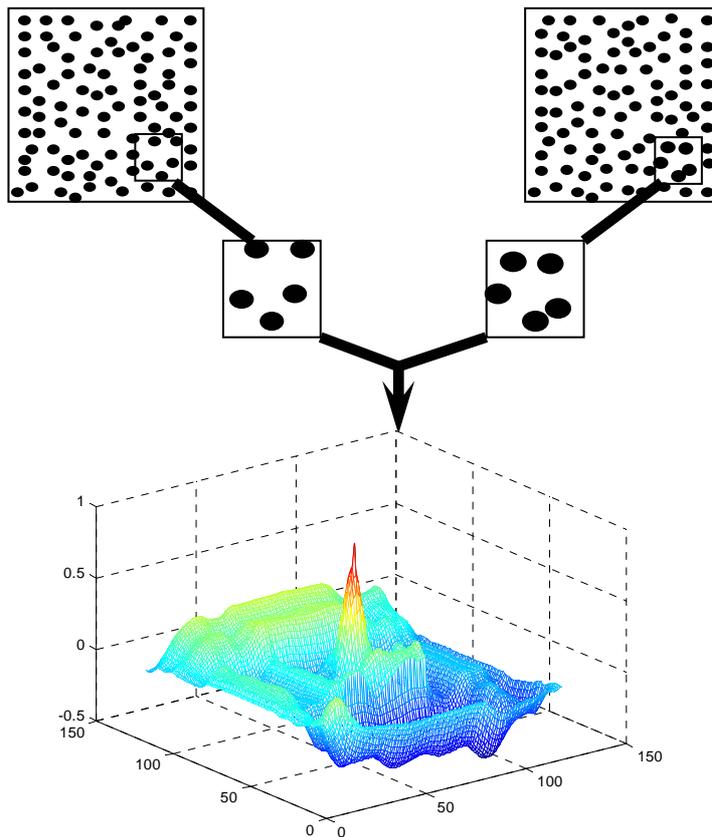


Abb. 13: Prinzip der Berechnung der Kreuzkorrelation für zwei Segmente

Als Referenz für einen Vergleich verschiedener Verformungszustände wird das Bild der trockenen Probe zugrunde gelegt. In dem Bild werden gleich große Segmente aus unterschiedlichen Positionen der Papierprobe eingegrenzt. Diese Segmente sind durch den jeweiligen Grauwertverlauf der digitalen Bilddaten, welcher mit einem Fingerabdruck vergleichbar ist, eindeutig charakterisiert. Die Kreuzkorrelation tastet ab, an welcher Stelle sich die Segmente der trockenen Probe in der befeuchteten Probe wiederfinden. Die Positionsänderung eines Segments von der trockenen Probe zu der befeuchteten Probe gibt die durch die Befeuchtung und die Zugbelastung verursachte Verschiebung dieses Segments wieder.

Die diskrete Kreuzkorrelation stellt eine elementweise Multiplikation der Grauwerte des Segmentes der trockenen Probe mit den Grauwerten des gewählten Segmentes in der feuchten Probe dar. Aus dem digitalen Gesamtbild der trockenen und der nassen Probe werden jeweils die Segmente  $A(M_a, N_a)$  und  $B(M_b, N_b)$  gewählt.

Die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion  $C(i, j)$  leitet sich im Ortsbereich folgendermaßen her:

$$C(i, j) = \sum_{m=0}^{(Ma-1)} \sum_{n=0}^{(Na-1)} A(m, n) \cdot \text{conj}(B(m+i, n+j)), \quad \text{Gl. 1}$$

mit

$$0 \leq i < Ma + Mb - 1 \quad \text{Gl. 2}$$

und

$$0 \leq j < Na + Nb - 1 \quad \text{Gl. 3}$$

Die optimale Ähnlichkeit wird mathematisch mit dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion ausgedrückt. Um die Rechenprozedur zu beschleunigen, findet das „Suchen“ nach einem Segment der trockenen Probe in der feuchten Probe in einem abgegrenzten lokalen Bereich statt. In der befeuchteten Probe wird ein Bereich mit einer Fläche von 70 x 70 Pixel (ca. 4,9 x 4,9 mm) eingegrenzt. Das Zentrum dieser Fläche hat im Gesamtbild dieselben Koordinaten wie das Zentrum des entsprechenden Segments in der trockenen Probe. Die Berechnung der Kreuzkorrelationsmatrizen erfolgt demnach deutlich schneller. Die durch die Befeuchtung verursachte Dehnung ist in jedem Fall kleiner als die gewählten +/-35 Pixel. Somit ist immer gewährleistet, dass die Positionsänderung eines Segments die eingegrenzte Fläche nicht überschreitet. Das aufgenommene Schwarz-Weißbild besteht aus 2.600 x 2.600 Pixel. Bei dem gewählten Abstand entsprechen einem Pixel ca. 70 µm. Um Verschiebungen kleiner ein Pixel erfassen zu können wird das Bild vor der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) interpoliert. Dabei wird das Bild um das 10-fache auf 26.000 x 26.000 Pixel vergrößert. Somit können mit der KKF Verschiebungen im Bereich von 7 µm erfasst werden.

Auf diese Weise lassen sich die lokalen Verformungen eines Körpers, die sich durch unterschiedliche Arten der Beanspruchung (Zug und Befeuchtung) ergeben, berührungslos ohne zusätzliche Materialbeeinflussung bestimmen. Die an einem Segment ermittelte Verschiebung stellt einen Messpunkt dar und wird dem Mittelpunkt des jeweiligen Segments zugeordnet (Abb. 14).

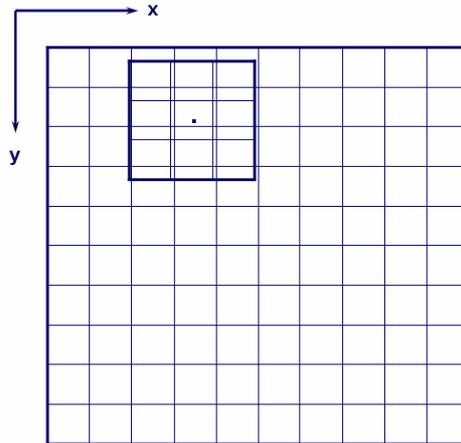


Abb. 14: Berechnung der Kreuzkorrelation

### 3.4 Algorithmus zur Berechnung von Verschiebungen und Dimensionsänderungen

Der Rechenalgorithmus zur Berechnung der mittleren Gesamtdehnung in Längs- und Querrichtung wurde ebenfalls in Matlab programmiert. In der Grauwertmatrix, die eine Schwarzweiß-Aufnahme der Papierprobe darstellt, wird die Verschiebung für  $[n*n]$  Segmente betrachtet. Im ersten Schritt werden die Kreuzkorrelationsfunktion und deren Maximum berechnet, die sich nach der Befeuchtung durch die neue Position des jeweiligen Segments ergibt. Die Kreuzkorrelationsberechnung wird für jedes einzelne Segment ausgeführt. In zwei getrennte Matrizen werden die Positionsänderungen jeweils für die Verschiebung in Längs- und in Querrichtung eingetragen. Im zweiten Schritt werden aus den Verschiebungen der einzelnen Segmente und die sich daraus ergebenden neuen Abständen zueinander, die Dehnungen, bzw. die Schrumpfungen zwischen zwei benachbarten Segmenten in % von der Breite, bzw. der Länge der gesamten Probe berechnet. Jedes Segment ist durch seine Koordinaten in  $x$ - und  $y$ -Richtung eindeutig definiert. Aus einer Matrix mit  $[n*n]$  Segmente ergeben sich zwei  $[n*n]$  Matrizen mit den Verschiebungen für jeweils Längs- und Querrichtung. Daraus lassen sich je eine  $[(n-1)*n]$  und eine  $[n*(n-1)]$  Matrix für die Dimensionsänderung errechnen. Die Matrizen werden wieder zu der Größe  $[n*n]$  ergänzt, in dem in der letzten Zeile, bzw. Spalte noch die Gesamtdehnung/Gesamtschrumpfung zwischen den ersten und den letzten Segment in der jeweiligen Richtung berechnet und dazugeschrieben wird.

---

Die Dimensionsänderungen für die gesamte Probe in Längs- oder in Querrichtung werden herangezogen, wenn verschiedene Papiersorten oder Prüfbedingungen verglichen werden. Die lokalen Dimensionsänderungen, die aus den Verschiebungen der einzelnen Segmente zu ihren Nachbarn berechnet werden, dienen dazu, die Beanspruchungen und Verformungen im Papier visuell darzustellen.

### 3.5 Versuchsdurchführung

Die Befeuchtungsversuche wurden nach folgendem Ablaufschema durchgeführt:

- Einspannen der Papierprobe mittels eines definierten Gewichts,
- Einzelaufnahme der trockenen Probe bei Durchlichtbeleuchtung,
- Benetzung der Papierprobe mit Wasser durch das Befeuchtungssystem,
- Triggern der Kamera,
- Betätigung des Endschalters durch das Befeuchtungssystem, wenn dieses das Tischende erreicht hat,
- nachfolgende Aufnahme einer Bildsequenz oder eines einzelnen Bildes der befeuchteten Probe.

Die Steuerung der Kamera wurde mit der Steuerung des Befeuchtungssystems gekoppelt. Dies geschah mit Hilfe eines Triggersignals. Am Ende des Tischrahmens wurde ein Endschalter positioniert, der durch das Befeuchtungssystem betätigt wird, wenn dieses das Tischende erreicht hat. Durch die gewählte Auftragsgeschwindigkeit ergibt sich der Zeitpunkt der Bildaufnahme. Die Bildaufnahme erfolgte etwa zweieinhalb Sekunden nach Befeuchtung der gesamten Probe. Dabei wird das Befeuchtungssystem ausgeschaltet und zeitgleich über den „acquire enable“-Ausgang am Kameranetzteil pco.power das Steuersignal zur Bildaufnahme eingespeist. Das ist ein statisches Signal. Der Eingang ist intern mit einem Widerstand von  $R = 10 \text{ k}\Omega$  abgeschlossen [39].

### 3.6 Wiederholbarkeit der FDM-Messungen

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus den FDM-Messungen wird beeinflusst von verfahrenstechnischen, klimatischen und papierbedingten Parametern, sofern diese

---

Verformungen der Papierprobe hervorrufen. Insgesamt sind folgende Parameter für die Endergebnisse zuständig:

- klimatische Bedingungen,
- aufgebrauchte Wassermenge,
- Gleichmäßigkeit des Wasserauftrags,
- Gleichmäßigkeit in der Struktur der Papierprobe,
- Bedienung des FDMs.

### **3.6.1 Klimatische Bedingungen**

Die klimatischen Bedingungen (relative Luftfeuchte und Temperatur) beeinflussen die Wasseraufnahme vom Papier. Bei der konkreten Versuchsanordnung war es allerdings aus technischen Gründen nicht möglich die Versuche in einem Klimaraum durchzuführen. Abgesehen davon würden bei einer Untersuchung im Normklima Probleme, die in der Praxis bei veränderlichem Klima auftreten, verborgen bleiben. Die Papierrollen wurden in demselben Raum gelagert in dem das FDM stand. Bei jeder Messung wurde ein Protokoll der relativen Luftfeuchte und der Temperatur geführt. Streng genommen, geben diese Daten aber keine ausschlaggebende Information, da das Klima in dem Raum, in dem das FDM aufgebaut wurde und die Papiere gelagert wurden, kontinuierlich schwankt. Um die Grenzen der Feuchtigkeitsgehaltsänderungen der Papiere abzuschätzen, die sie während der gesamten Lagerung in dem Raum erfahren, wurde an fünf der Proben an fünf zufälligen Tagen zusätzlich der otro-Gehalt bestimmt. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, schwanken die otro-Gehalte für die jeweiligen Papiere nur geringfügig, so dass angenommen werden kann, dass die variierenden klimatischen Bedingungen das Feuchtdehnungspotenzial der Papiere nicht wesentlich beeinflussen.

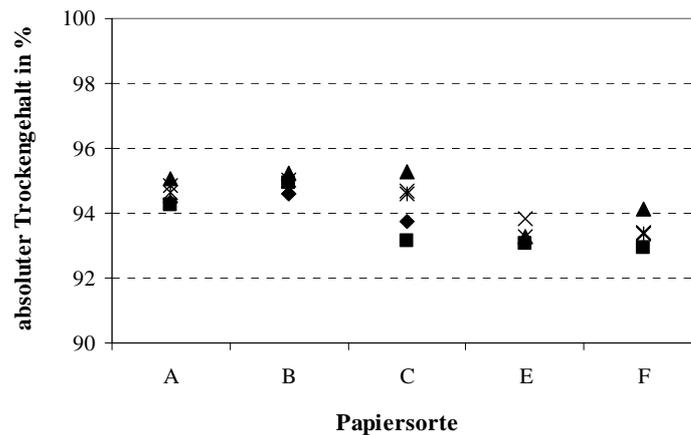


Abb. 15: Trockengehalt, gemessen an unterschiedlichen Tagen

### 3.6.2 Aufgebrachte Wassermenge

Die übertragene Feuchtigkeitsmenge ist ein Faktor, der die Dimensionsänderungen der Papiere beeinflusst. Um die Wiederholbarkeit der aufgetragenen Feuchtigkeitsmenge zu beurteilen sind an fünf der Papierproben gravimetrische Versuche durchgeführt. Dabei wurden aus jeder Papiersorte jeweils zehn Probelblätter mit den Maßen 16,5 cm x 21 cm herausgeschnitten. Diese wurden gewogen, anschließend befeuchtet und unmittelbar nach der Befeuchtung wieder gewogen. Für die Wiegeversuche kam eine analytische Waage der Fa. Sartorius mit einer Genauigkeit von 0,1 mg zum Einsatz. Aus den sich ergebenden Gewichtsunterschieden vor der Befeuchtung und nach der Befeuchtung wurde der Wasserauftrag in  $\text{g/m}^2$  berechnet. Abb. 16 zeigt die aufgetragenen Feuchtigkeitsmengen, sowie die erzielte Wiederholbarkeit für beide Grenzfälle.

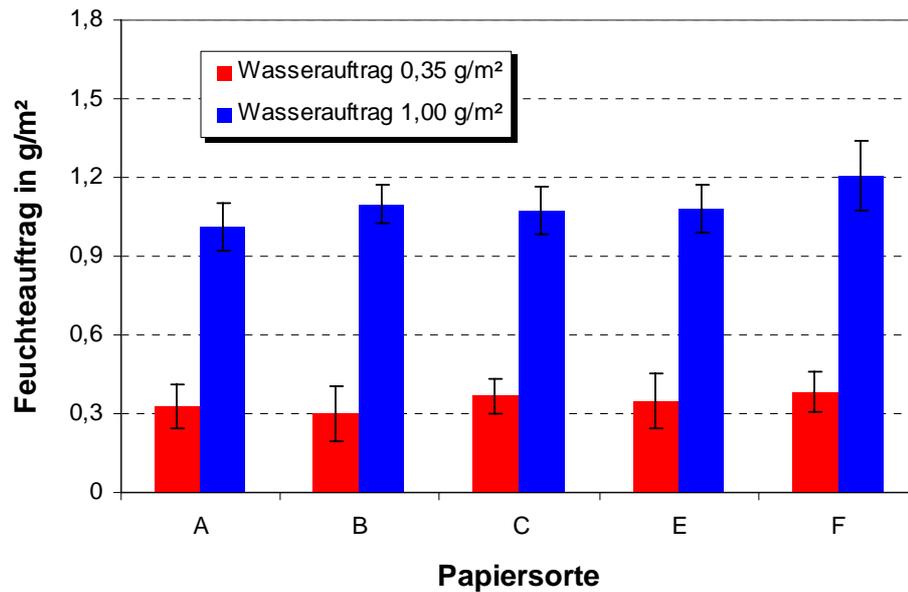


Abb. 16: Wasserübertragung bei verschiedenen Papiersorten

### 3.6.3 Gleichmäßigkeit des Wasserauftrags

Die Gleichmäßigkeit des Auftrags über die Breite und über die Länge der Papierprobe wurde kontrolliert, indem statt Wasser schwarze Tinte aufgetragen wurde. Der Farbauftrag auf dem Papierblatt wurde lokal über die optische Farbdichte beurteilt. Die optische Farbdichte wurde mit einem Densitometer gemessen. Das bedruckte Probeblatt von ca. 21 cm x 21 cm wurde in 13 x 13 Quadrate aufgeteilt. In der Mitte jeder Quadrate wurde die optische Farbdichte gemessen. In den Abb. 17 und Abb. 18 ist der Farbdichteverlauf für die einzelnen Messpositionen in Längs- und Querrichtung mit hoher und niedriger Tintenbelegung dargestellt. In beiden Fällen ist der Farbdichteverlauf in Querrichtung stabiler, als in Längsrichtung. Vergleicht man das Ergebnis bei den zwei unterschiedlichen Tintenaufträgen, so ist beim höheren Tintenauftrag in beiden Richtungen eine gleichmäßigere Farbbelegung erzielt worden. Die Schwankungen in der Farbdichte über die Papierprobe sind umso größer je niedriger die Tintenbelegung ist. Das liegt daran, dass es beim Auftrag von niedrigen Wassermengen auf Grund der Papierrauigkeit zu einer ungleichmäßigen Verteilung auf die Oberfläche kommt.

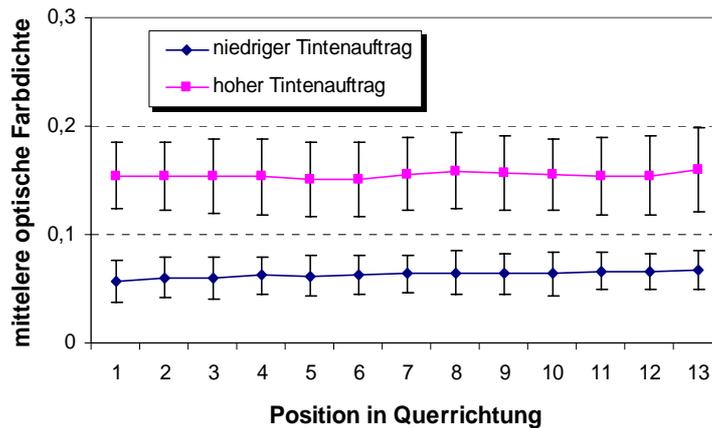


Abb. 17: Farbdichteverlauf in Querrichtung

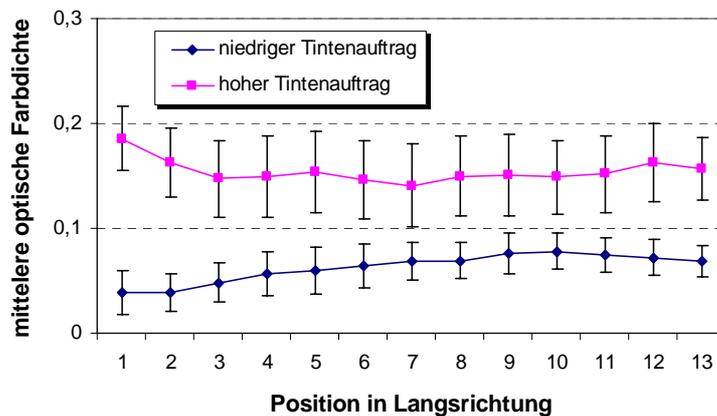


Abb. 18: Farbdichteverlauf in Längsrichtung

### 3.6.4 Gleichmäßigkeit in der Struktur der Papierprobe

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Ergebnisse aus den Befeuchtungsversuchen mit dem FDM sowohl an Laborblätter als auch an Industripapiere haben gezeigt, dass der bestimmende Faktor für die Wasseraufnahme durch die Papiere deren Oberflächenbeschaffenheit ist. Die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst entscheidend die Benetzbarkeit der Papiere, eine Eigenschaft, welche beim direkten Auftrag von geringen Wassermengen besonders stark an Bedeutung gewinnt. Das bedeutet, dass eventuelle Schwankungen in der Struktur einer Papiersorte sich deutlich auf die Benetzung, demzufolge auf die Wasseraufnahme und die darauf folgenden Dimensionsänderungen auswirken können.

### **3.6.5 Bedienung des FDMs**

Der Einfluss der gerätebedingten Schwankungen wurde minimiert, indem die Einstellung des Wasserauftrags, also die Zustellung der Walzen zueinander fixiert und in der Zeit zwischen den Befeuchtungsversuchen nicht verändert wurde. Durch gleiche Abfolge der einzelnen Handgriffe bei der Versuchsdurchführung wurden die Schwankungen durch den Bediener so gering wie möglich gehalten.

### **3.6.6 Kreuzkorrelationsfunktion**

Der entwickelte KKF-Algorithmus wurde durch synthetisches Verschieben des Bildes getestet. Die Verschiebungen um ein ganzes Pixel werden immer korrekt detektiert, bei Verschiebungen kleiner ein Pixel gibt es gelegentlich Abweichungen von 0,1 Pixel. Dieses liegt vermutlich daran, dass die vor der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion durchgeführte Interpolation der Grauwertmatrix zu einem gewissen Informationsverlust führt.

## **3.7 Übertragene Wassermenge**

Die auf die Papierprobe aufgetragenen Wassermengen stellen bei den Feuchtdehnungsversuchen höchste Anforderungen an die Messgenauigkeit, -bereich und -geschwindigkeit. Zur Bestimmung der übertragenen Feuchtmittelmenge sollte die am PMV entwickelte Transparenzmethode eingesetzt werden. Diese Methode basiert auf dem Zusammenhang zwischen Transparenz und Trocknungsgehalt. Allerdings gewährleistet die Transparenzmethode eine verlässliche Bestimmung des Feuchtegehalts erst ab einem Trockengehalt von ca. 90 % [46]. Da die Feuchtigkeitsgehalte der Papiere in der aktuellen Arbeit jedoch darunter lagen, musste die Methode verworfen werden. Verworfen wurde ebenfalls die kapazitive Messung, da die Messtoleranz bei der kapazitiven Messung im Bereich der Messwerte liegt [30]. Eine punktuelle Messung der Feuchtigkeitsgehalte an unterschiedlichen Stellen der Probe war demnach nicht möglich. Durch gravimetrische Versuche, wie bereits in Kapitel 3.6.2 beschrieben, wurde der Feuchtungsaufrag bei der entsprechenden Walzenzustellung der Befeuchtungsvorrichtung im Vorfeld an Probenblätter bestimmt. Mit dieser Methode konnten ausreichend genau die übertragenen Wassermengen bei unterschiedlicher Einstellung an der Befeuchtungsvorrichtung gemessen werden.

## 4 Experimentelle Arbeit

Bei der experimentellen Arbeit wurde das Feuchtdehnungsverhalten von Papier mit unterschiedlichen Messmethoden untersucht. Die sich ergebenden Zusammenhänge sollen zeigen, welches die entscheidenden Parameter für die Dimensionsänderungen im Druck sind.

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse aus:

- den Standardmessungen,
- den Feuchtdehnungsmessungen mit dem FDM und
- dem Druckversuch

zusammengetragen.

Untersucht wurden Offsetpapiere mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Anwendung. Die Testpapiere G und H standen in Form von Bögen in DIN A4-Format, die restlichen Papiere – in Form von Rollen (mit einer Breite von ca. 21 cm und Durchmesser von ca. 40 cm) zur Verfügung. In Tab. 2 ist das verwendete Probenmaterial aufgelistet.

Papiersorte	Bezeichnung	Besonderheit
Schreibpapier, 80 g/m <sup>2</sup>	A	Mittenrolle, geleimt
Schreibpapier, 90 g/m <sup>2</sup>	B	Mittenrolle, geleimt
Zeitungsdruckpapier mit Altpapier, 43 g/m <sup>2</sup>	C	keine
Schreibpapier mit Recyclingpapier, 70 g/m <sup>2</sup>	D	hoher Füllstoffgehalt
Zeitungsdruckpapier mit Altpapier, 40 g/m <sup>2</sup>	E	Randrolle
Zeitungsdruckpapier mit Altpapier, 40 g/m <sup>2</sup>	F	Mittenrolle
Transparentpapier, 110 g/m <sup>2</sup>	G	Randrolle
Transparentpapier, 110 g/m <sup>2</sup>	H	Mittenrolle

Tab. 2: Liste des Probenmaterials

---

## 4.1 Laborblattbildung und Standardmessungen

### 4.1.1 Blattbildung

Um das Spannungs-Dehnungs- und Feuchtdehnungs-Verhalten des Werkstoffs Papier gezielt beeinflussen zu können, ist es wichtig zu wissen, welche Materialparameter dieses Verhalten maßgeblich bestimmen. Die Möglichkeiten einer gezielten und systematischen Untersuchung solcher Parameter an industriell gefertigten Papieren sind begrenzt. Das Variieren der Stoffkomponenten ist bei Laborblattbildung möglich. Im Rahmen dieser Arbeit sind vier Serien Laborblätter angefertigt worden, die sich je nach Stoffzusammensetzung unterscheiden:

- 100% Zellstoff<sup>4</sup>
- 50% Zellstoff + 50% Holzschliff
- 1/3 Füllstoff<sup>5</sup> + 1/3 Zellstoff + 1/3 Holzschliff
- DIP

Jede Serie Laborblätter wurde mit vier flächenbezogenen Massen von je 40 g/m<sup>2</sup>, 60 g/m<sup>2</sup>, 90 g/m<sup>2</sup>, 130 g/m<sup>2</sup> hergestellt. Für die Blattbildung wurde der am Fachgebiet für Papierfabrikation und mechanische Verfahrenstechnik vorhandene MK-Sheetformer verwendet. Mit diesem Blattbildner können faserorientierte Laborblätter hergestellt werden. Von jeder Sorte wurden anisotrope und isotrope Blätter hergestellt. Somit kann der Einfluss der Faserrichtung auf die Festigkeitseigenschaften von Papier untersucht werden.

### 4.1.2 Feuchtdehnung

Nach den Vorschriften der Norm DIN 53 130-78 für „Einspannen von Proben im Feuchtdehnungs-Messschrank (Prüfbau)“ wurde bei den Laborblättern und maschinengefertigten Papieren die Feuchtdehnung ermittelt. Die Proben werden bei relativer Feuchte  $RH = 45\%$  vorkonditioniert und anschließend im Klimaschrank einer relativen Feuchte von 83 % ausgesetzt. Zur Untersuchung der Materialproben wird Zugspannung in

---

<sup>4</sup> Kiefersulfat

<sup>5</sup> Kaolin

---

eine jeweils beidseitig fixierte Probe eingeleitet. Die Belastung erfolgt unter konstanter Zugspannung.

Da die Laborblätter zugfrei getrocknet wurden, wird die Feuchtdehnung einzig durch die Quellung der Fasern verursacht. Bei maschinengefertigten Papieren ist ein Teil der Feuchtdehnung produktionsbedingt. Während der Trocknung in der Papiermaschine eingefrorene Spannungen werden durch die Absorption von Feuchte ins Fasergefüge des Papiers freigesetzt. Dieser Feuchtdehnungsanteil fehlt bei den Laborblättern, da der Trocknungsprozess im MK-Sheetformer ohne Zugbeanspruchung erfolgt.

Bei dem Vergleich von Industripapieren und faserorientierten Laborblättern mit gleicher Flächenmasse und ähnlicher Zusammensetzung fällt auf, dass sich die Industripapiere im Vergleich zu den Laborblättern in Querrichtung etwa drei bis vier mal stärker dehnen - in Längsrichtung dehnen sich die Laborblätter stärker. Die höhere Dehnung in Querrichtung bei maschinengefertigten Papieren resultiert im Vergleich zu Laborblättern aus der erhöhten Faserschrumpfung während der Herstellung. Erstere besitzen außerdem eine höhere Blattdichte, so dass die Quellung der Fasern sich in einer stärkeren Dehnung auswirkt. In Längsrichtung werden bei maschinengefertigten Papieren bei der Aussetzung einer höheren Luftfeuchte zuerst die eingefrorenen Spannungen abgebaut, was zu einer Verkürzung des Blattes und der Fasern selbst führt.

Eine Differenzierung der Laborblätter bei der Feuchtdehnungsmessung ist weder in Bezug auf die Zusammensetzung, noch in Bezug auf das Flächengewicht möglich (Abb. 19, Abb. 20).

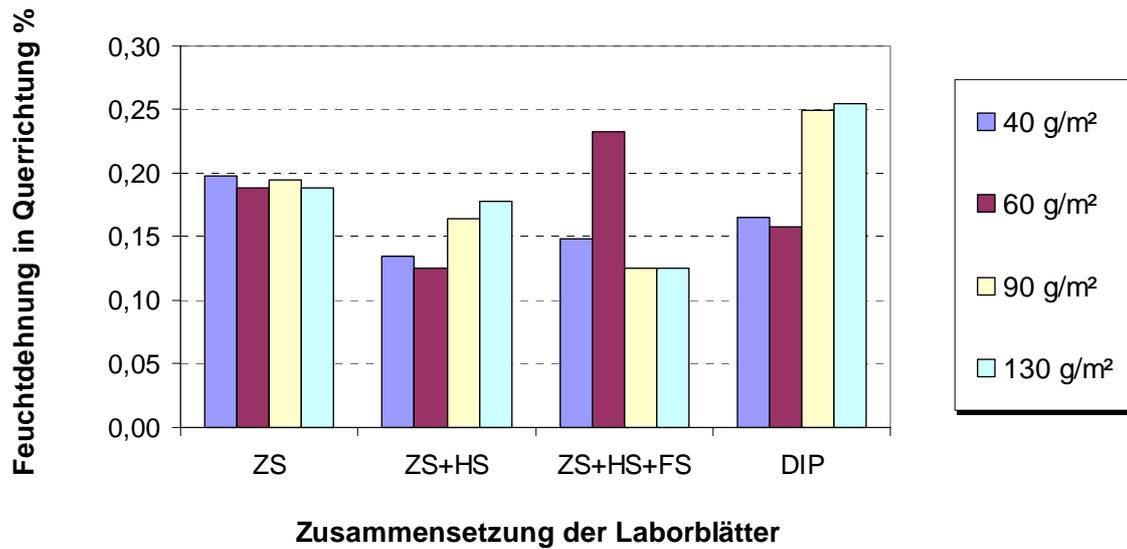


Abb. 19: Feuchtdehnung in Querrichtung bei Laborblättern

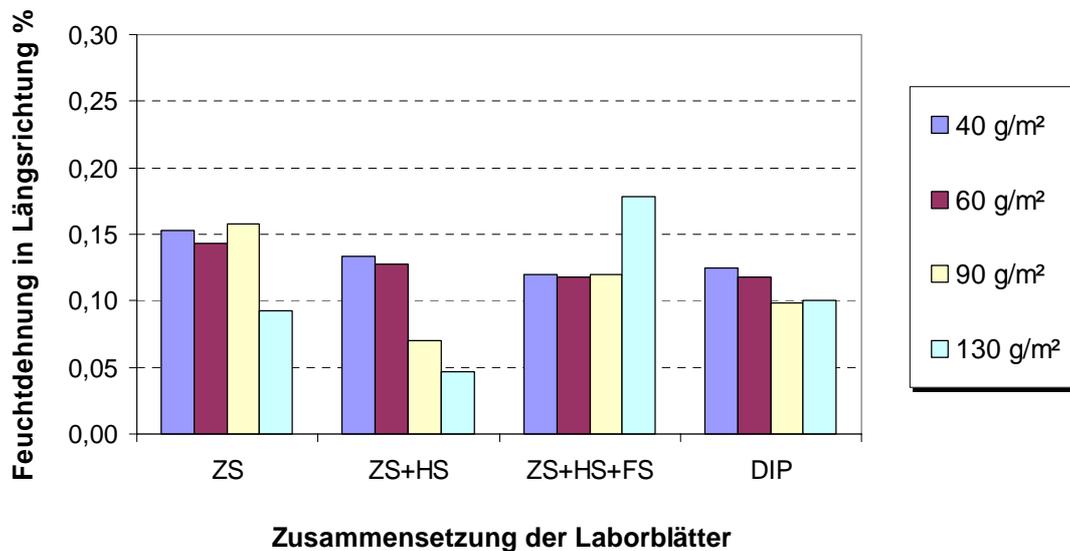


Abb. 20: Feuchtdehnung in Längsrichtung bei Laborblättern

Unter den maschinengefertigten Papieren zeigen die Transparentpapiere die höchste Feuchtdehnung. Grund dafür ist die starke Mahlung dieser Papiere. Während der langen Messzeit wird die Wasserresistenz durch die Leimung überwunden, was zu einer starken Faserquellung führt. Die restlichen geleimten Papiere A und B dehnen sich etwa so stark wie

Zeitungsdruckpapiere, ein Trend, der bei den Druckversuchen nicht bestätigt wird (Kapitel 4.3.2). Diese Überlegungen verdeutlichen wie entscheidend der Zeitfaktor bei einer Messung ist, um das Dehnungspotenzial der Papiere im Druck richtig voraussagen zu können.

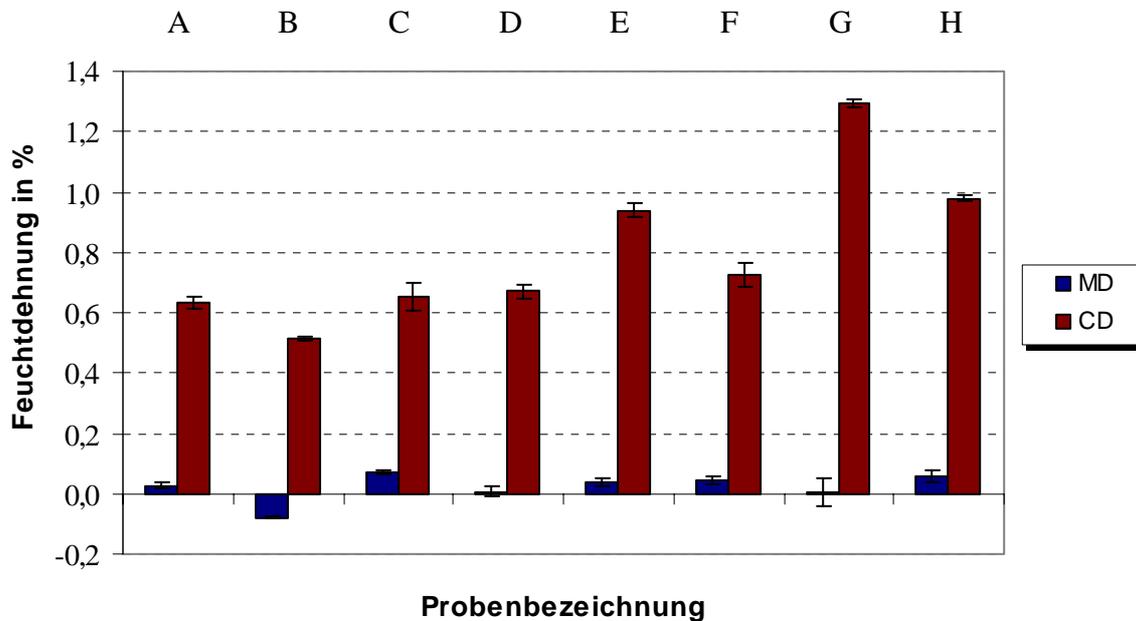


Abb. 21: Feuchtdehnung bei maschinengefertigten Papieren

### 4.1.3 Dynamische Nassdehnung

Eine weitere durchgeführte Vergleichsuntersuchung ist die Messung zur Bestimmung der dynamischen Nassdehnung nach der Methode von Gabriel und Grüner. Bei dieser Messmethode wird die Dehnung von Papierproben unter geringer Vorspannung bei einseitiger Befeuchtung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Die Messung der Längenänderung erfolgt über einen Wegmesssensor [35]. Von jeder Papiersorte sind jeweils fünf Messstreifen gemessen worden. In den Abb. 22 bis Abb. 31 sind die berechneten Mittelwerte dargestellt.

Von den Laborblättern wurden jeweils drei Muster gemessen – CD, MD und zweidimensional isotrope Laborblätter (Abb. 22 bis Abb. 25). Die höchste Nassdehnung erfolgte dabei immer in CD und die niedrigste – immer in MD. Je nach Zusammensetzung besitzen die Laborblätter unterschiedliche Festigkeitseigenschaften beim Kontakt mit Wasser. Wegen dem hohen

Füllstoffgehalt (etwa 30 %) weisen die ZS+HS+FS-Laborblätter eine besonders niedrige Dimensionsstabilität auf. Wegen der kompletten Durchnässung der Proben bei der Nassdehnungsmessung, teilweise bis zur vollen Zerstörung der Probe, können sich Nassdehnungsunterschiede im Bezug auf die Saugfähigkeit der einzelnen Stoffkomponenten vollständig auswirken. Dies ist jedoch nicht der Fall im Druck (Kapitel 4.3). Die geringen Wassermengen, die im Druck zum Bedruckstoff hin transportiert werden, lösen ganz andere Reaktionen im Papier aus.

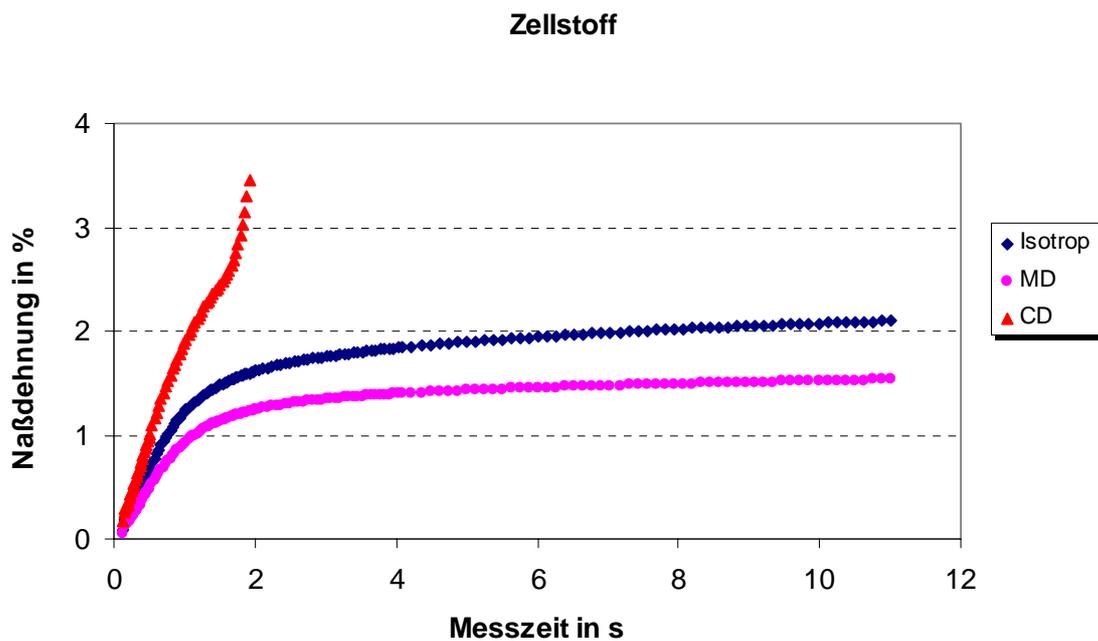


Abb. 22: Nassdehnung bei Laborblättern (ZS, 40 g/m<sup>2</sup>, Siebseite)

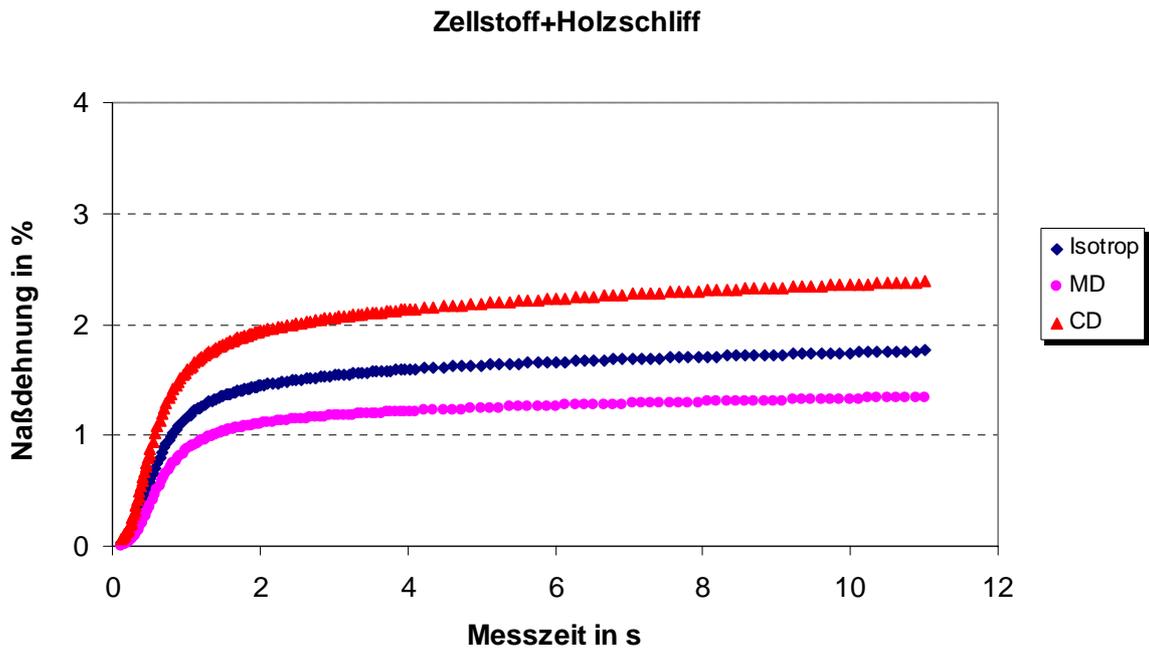


Abb. 23: Nassdehnung bei Laborblättern (ZS+HS, 40 g/m<sup>2</sup>, Siebseite)

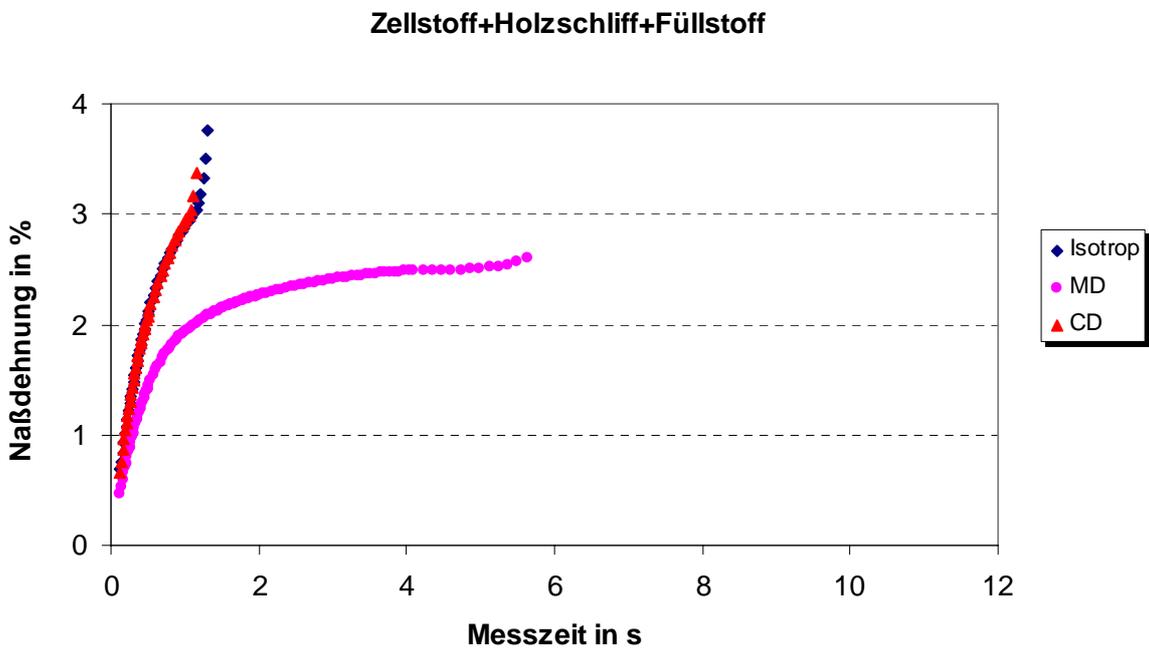


Abb. 24: Nassdehnung bei Laborblättern (ZS+HS+FS, 40 g/m<sup>2</sup>, Siebseite)

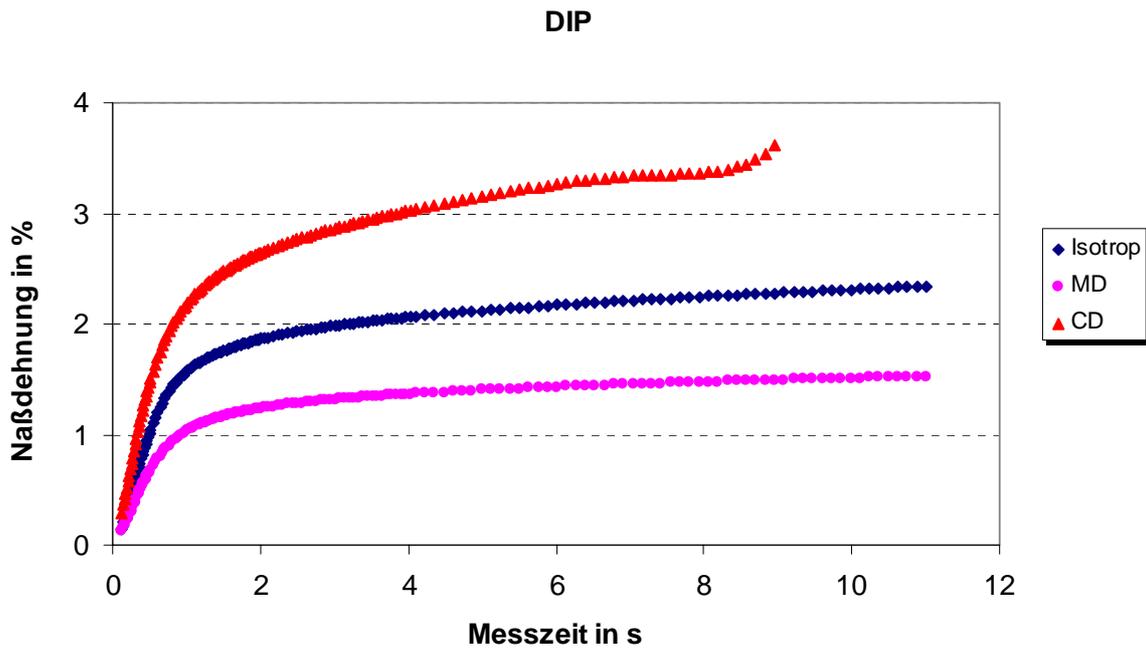


Abb. 25: Nassdehnung bei Laborblättern (DIP, 40 g/m<sup>2</sup>, Siebseite)

Ein Vergleich hinsichtlich des Einflusses der Zusammensetzung auf die Nassdehnung ist in Abb. 26 dargestellt. Schon nach etwa 1 Sekunde wird das Fasernetzwerk des ZS+HS+FS-Laborblattes zerstört, während sich die übrigen Laborblätter ähnlich verhalten und ungefähr die gleiche Nassdehnung aufweisen. Die Dehnung bei den ZS+HS+FS-Laborblätter setzt schneller ein und die hervorgerufenen Längenänderungen sind höher. Der hohe Füllstoffgehalt in Kombination mit niedriger Blattdichte wirkt sich dramatisch auf die Festigkeitseigenschaften dieser Laborblätter. Durch den Füllstoff wird das Papierfasernetzwerk geschwächt. Der Füllstoff füllt die Poren aus und sorgt für eine höhere Glätte, bildet aber keine Verbindungen in Form von Wasserstoffbrücken, die das Papiergerüst stärken. Somit entsteht beim Befeuchten ein so genanntes „Fließen“ der Fasern. Die Bindungen zwischen den Fasern sind nicht stark und das Fasernetzwerk ist gegenüber mechanischen Beanspruchungen weniger stabil.

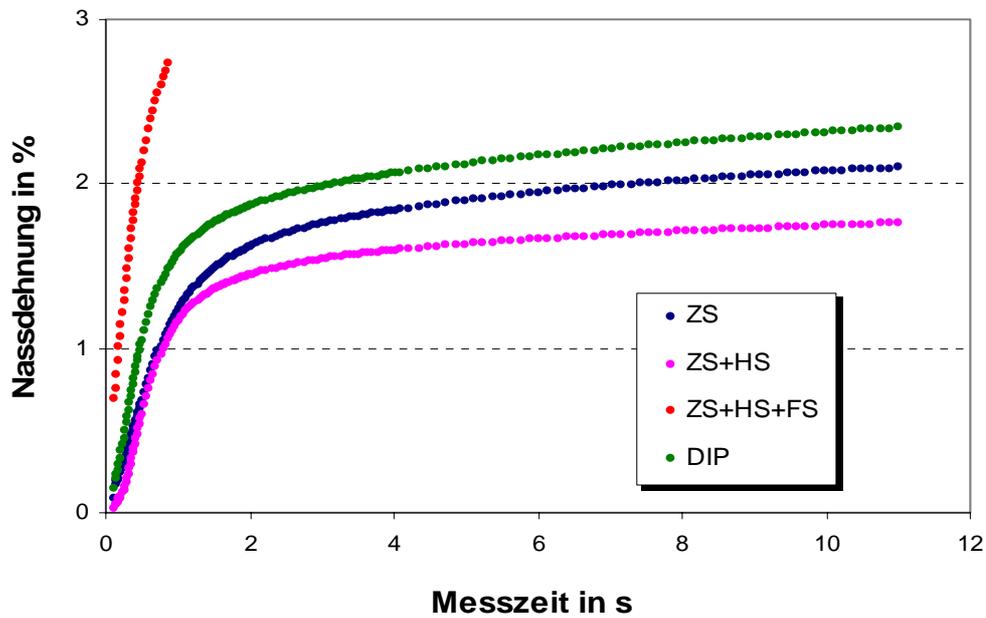


Abb. 26: Nassdehnung in % (isotrope Laborblätter, Siebseite, 40 g/m<sup>2</sup>)

Abb. 27 zeigt den zeitlichen Verlauf der Dehnungsgeschwindigkeit für die Laborblätter. Bei allen Laborblättern setzt die Nassdehnung beim ersten Kontakt mit dem Wasser mit einer hohen Geschwindigkeit ein, die mit der Zeit allmählich sinkt.

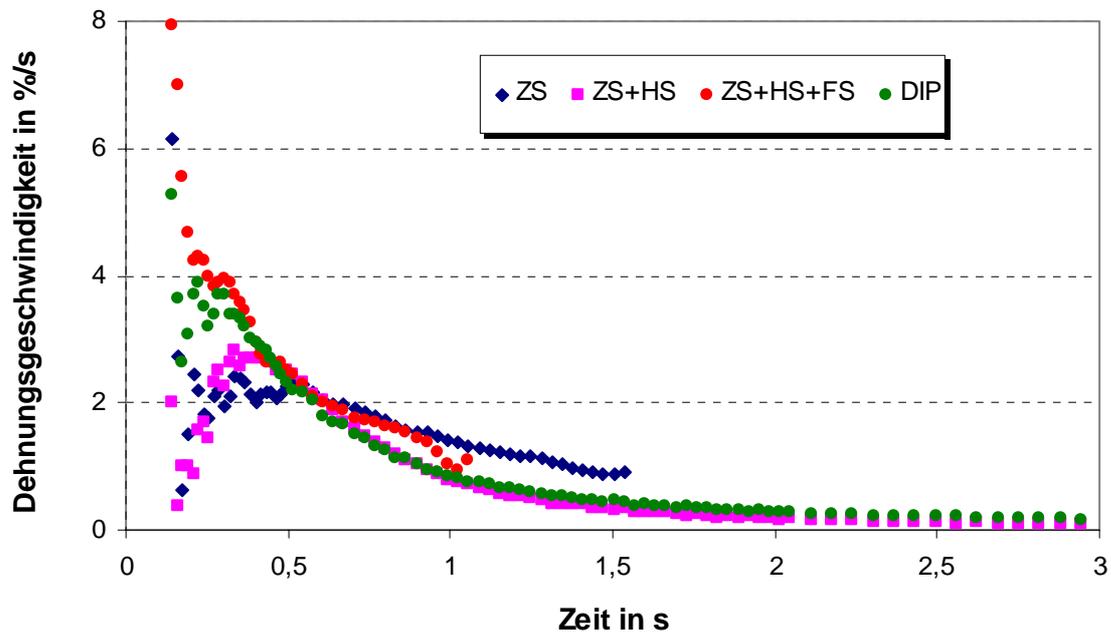


Abb. 27: Dehnungsgeschwindigkeit bei Laborblättern (cd, Siebseite, 40 g/m<sup>2</sup>)

In Abb. 28 bis Abb. 29 ist der zeitliche Verlauf der Nassdehnung bei Industripapieren in Quer- bzw. in Längsrichtung dargestellt. Geleimte Papiere dehnen sich generell am wenigsten, jedoch ist dieser Unterschied zu den anderen Papieren in Maschinenrichtung deutlich kleiner als in Querrichtung. Zwischen der Randrolle E und die dazugehörige Mittenrolle F gibt es Unterschiede lediglich in Querrichtung. Durch die verstärkte Faserschrumpfung am Papierbahnrand baut sich dort ein höheres Dehnungspotenzial auf, welches sich in Querrichtung in einer deutlich höheren Nassdehnung bei der Randrolle E äußert. Die Dehnung in Maschinenrichtung, ist für beide Papierrollen nahezu identisch. Das lässt vermuten, dass die Längsdehnung hauptsächlich durch den Abbau der eingefrorenen Spannungen zustande kommt.

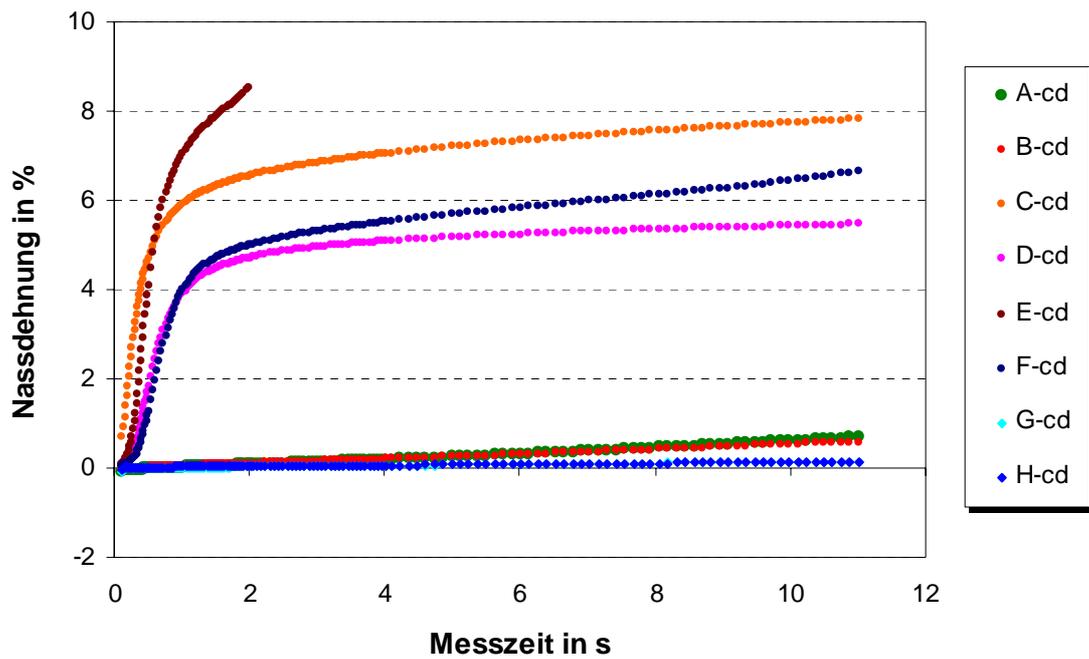


Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Nassdehnung bei Industriepapieren in Querrichtung

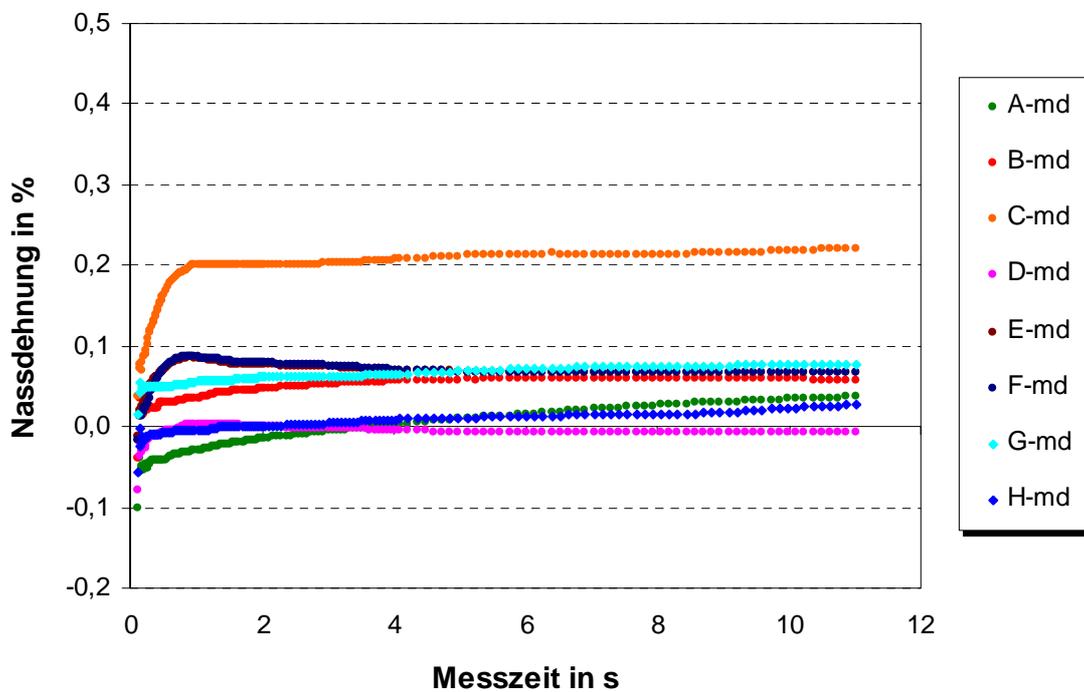


Abb. 29: Zeitlicher Verlauf der Nassdehnung bei Industriepapieren in Längsrichtung

In Abb. 30 bis Abb. 31 ist die mittlere Nassdehnung bis zur ersten bzw. dritten Sekunde jeweils in Längs- und Querrichtung dargestellt. Mit Fortschreiten der Zeit, also mit Zunahme der Wasseraufnahme erfahren einige der Papiere in Längsrichtung eine Schrumpfung. Wie bereits angedeutet, korrespondiert dies mit dem Abbau der eingefrorenen Trocknungsspannungen im Fasergefüge. Die Wasseraufnahme in Querrichtung führt zu einer kontinuierlich wachsenden Nassdehnung.

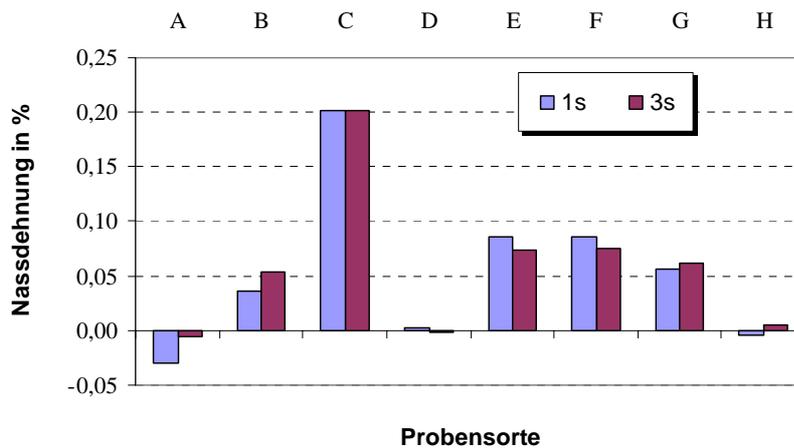


Abb. 30: Mittlere Nassdehnung in Längsrichtung bei einer Benetzungszeit von 1 s bzw. 3 s

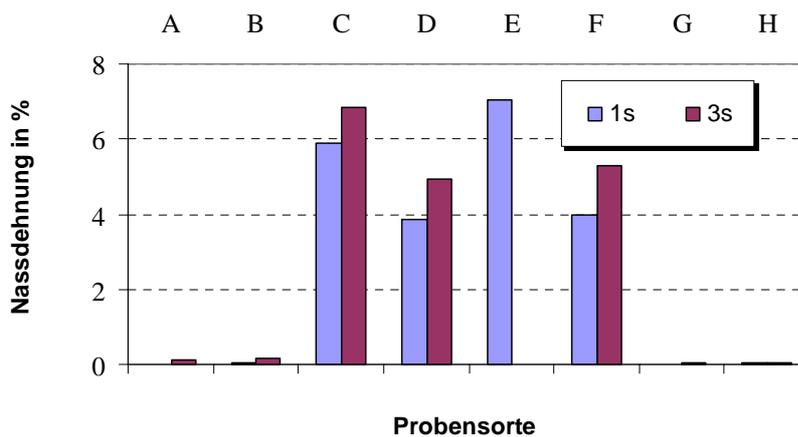


Abb. 31: Mittlere Nassdehnung in Querrichtung bei einer Benetzungszeit von 1 s, bzw. 3 s<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Probe E reißt nach ca. 2 s, deswegen fehlt der Balken im Diagramm für die mittlere Nassdehnung bei 3 s

---

## 4.2 Ergebnisse aus den Messungen mit dem FDM

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Befeuchtungsversuchen mit dem FDM präsentiert, die gemäß Kapitel 3.5 erfolgten. Mit der CCD-Kamera wurden Bilder der Papierproben vor und nach der Befeuchtung aufgenommen. Daraus erfolgte mit dem entwickelten Softwareprogramm die Berechnung der Dimensionsänderungen in Längs- und Querrichtung, lokal, wie auch für die gesamte Probe. Für jede Versuchsserie einer bestimmten Papiersorte und je Wasserauftrag wurden zehn Einzelversuche durchgeführt. Abb. 32bis Abb. 34 basieren auf Mittelwerten, welche jeweils aus den Einzelmessungen einer Versuchsserie gebildet sind.

### 4.2.1 Einfluss des Anpressdrucks und der Zugbeanspruchung

An trockenen Probelättern wurde der Einfluss des Anpressdruckes durch die Befeuchtungsvorrichtung, sowie der Zugbeanspruchung durch das in den Tests verwendete Gewicht untersucht. Dabei wurde ein erstes Bild der Probe aufgenommen, anschließend fuhr über das Probelblatt die Befeuchtungsvorrichtung, allerdings ohne Feuchtmittel und nachdem das Tischende erricht war wurde das zweite Bild aufgenommen. Auf diese Weise wurde ebenfalls der Einfluss der Zugkraft auf die Dimensionsstabilität des Papiers untersucht. In beiden Fällen ergaben die Versuche ohne Feuchteinwirkung keine messbare Vergrößerung der Probe durch den Anpressdruck und der Zugkraft.

### 4.2.2 Neigung zur Dimensionsänderung

Wie bereits beschrieben stand das FDM nicht in einem Klimaraum. Wie auch in Druckereien üblich, war das Papier somit während der Befeuchtungsversuche und der Zeit dazwischen schwankenden Klimabedingungen ausgesetzt. Deshalb wurden Vergleichsversuche an drei zufälligen Tagen durchgeführt. Ziel war zu prüfen, in wie weit die variierenden Klimabedingungen, unter denen die Versuche stattgefunden haben, das Dehnungspotenzial der Papiere beeinflussen. Nichtkontrollierbare Parameter wie Verdampfen des Alkohols aus dem Feuchtmittel, sowie veränderter Fließvorgang durch eine mögliche Erwärmung der Walzen oder des Feuchtmittels selbst während der Befeuchtungsversuche wirken ebenfalls als Einflussparameter mit. Auch deren Einfluss auf die Benetzung der Papiere und die nachfolgende Wasseraufnahme wird in den Ergebnissen abgebildet. Mögliche Unterschiede in

der Struktur einer Papiersorte können ebenfalls zu Schwankungen der Ergebnisse führen. Die Vergleichsversuche wurden mit einem Wasserauftrag von ca. 1 g/m<sup>2</sup> durchgeführt. Trotz variierenden Testbedingungen zeichnet sich an ein und demselben Tag unter den getesteten Papieren etwa der gleiche Dehnungstrend ab (Abb. 32). Das ist damit zu erklären, dass das Papier naturgemäß einen sehr niedrigen Feuchtegehalt aufweist. Gleichzeitig ist das Papier ein hygroskopisches Material, welches beim direkten Auftrag von Wasser, wie dies in den Befeuchtungsversuchen passiert, auf jeden Fall bestrebt ist, Wasser aufzunehmen. Der aufgetragene Wasserfilm stellt ein Grenzmedium dar und nach den in Kapitel 2.4 beschriebenen Transportmechanismen ist das System bestrebt, einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Vorwiegend durch Oberflächendiffusion wird das aufgetragene Wasser entlang der Zelluloseoberfläche transportiert. Die beobachteten Ergebnisse bestätigen noch einmal, dass die Dimensionsänderungen bei einem direkten Auftrag von geringen Wassermengen, hauptsächlich durch die Oberflächeneigenschaften des Papiers abhängen, welche die Bereitschaft des Papiers zum Benetzen vorgeben. Selbst bei schwankenden Klimabedingungen bleibt diese Bereitschaft zum Benetzen der einzelnen Papiere relativ stabil. Dies erklärt den gleichen Feuchtdehnungstrend der Papiere an unterschiedlichen Versuchstagen.

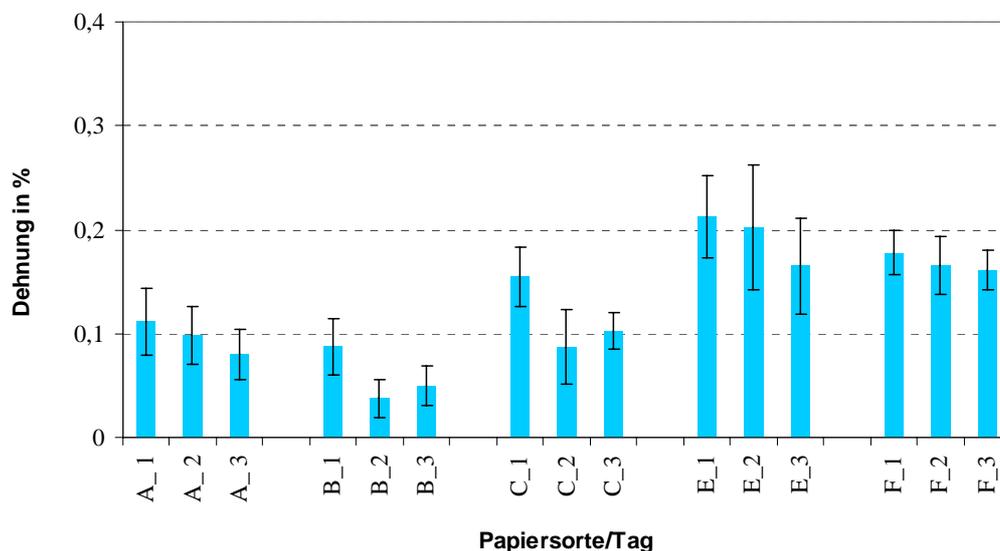


Abb. 32: Dehnung in Querrichtung für verschiedene Papiersorte an drei unterschiedlichen Tagen

### 4.2.3 Dimensionsänderung als Funktion des Feuchtauftrags

Um den Einfluss der Wasserauftragsmenge auf die hervorgerufenen Dimensionsänderungen zu untersuchen sind an Industripapieren Befeuchtungsversuche mit drei Wasserauftragsmengen von 0,35; 0,70 und 1,00 g/m<sup>2</sup> durchgeführt worden. In Abb. 33 und Abb. 34 ist die Dimensionsänderung für jedes Papier in Abhängigkeit der Wasserauftragsmenge dargestellt. Die Erhöhung der aufgetragenen Wassermenge ist in Querrichtung meist mit einer zunehmenden Dimensionsänderung verbunden (Abb. 33). Die hervorgerufene Dimensionsänderung ist bei nicht geleimten Papieren proportional zu der aufgetragenen Wassermenge. Geleimte Papiere dagegen besitzen eine gewisse Wasserresistenz und weisen bei Erhöhung des Wasserauftrags von 0,35 auf 1,00 g/m<sup>2</sup> teilweise keine Dehnungszunahme auf.

Für nichtgeleimte Papiere ist die Feuchtdehnung  $\alpha$  proportional zu der aufgetragenen Wassermenge:

$$\alpha = \beta \cdot \Delta W, \quad \text{Gl. 4}$$

wobei

$\beta$  den Gradienten der Kurve Wasserauftrag – Dehnung und

$\Delta W$  die Änderung der Wasserauftragsmenge darstellt.

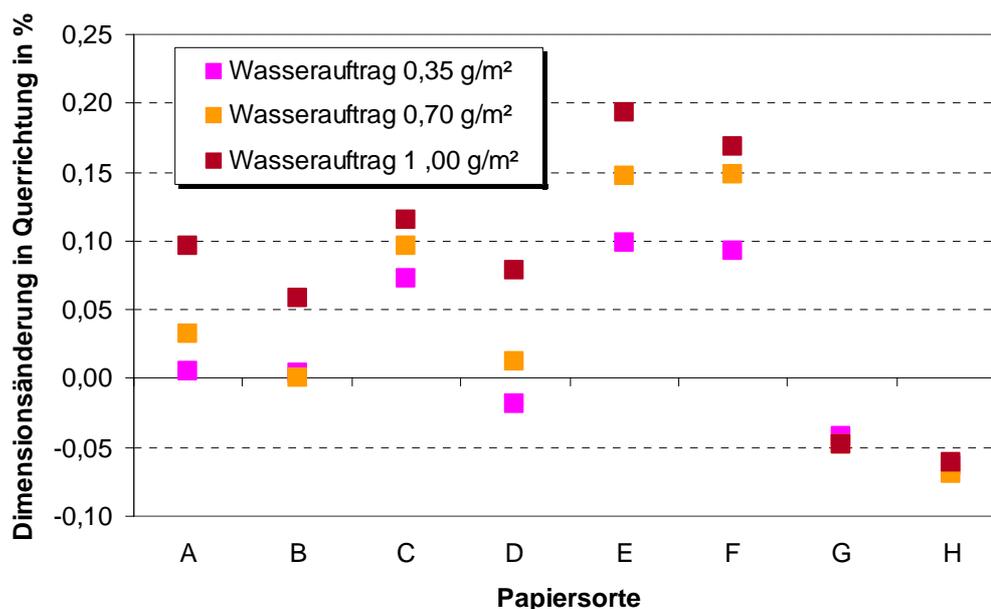


Abb. 33: Dimensionsänderung in Querrichtung je nach Wasserauftragsmenge

Die Dimensionsänderung in Längsrichtung korrespondiert mit dem Abbau der eingefrorenen Spannungen, die während der Papierherstellung in die Papierbahn eingebracht werden. Aus diesem Grund verzeichnen die Papiere beim Befeuchten teilweise Schrumpfungen (Abb. 34). Diese Reaktion der Papiere wurde ebenfalls im Druckversuch festgestellt. Ein linearer Zusammenhang zwischen der Wasserauftragsmenge und den Dimensionsänderungen wurde hier auch bei den nicht geleimten Papieren festgestellt.

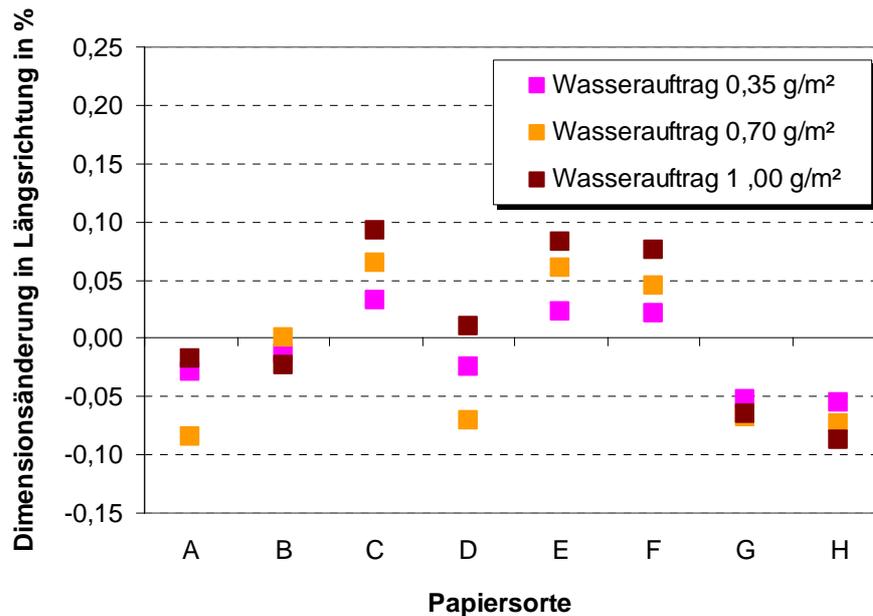


Abb. 34: Dimensionsänderung in Längsrichtung je nach Wasserauftragsmenge

#### 4.2.4 Laborblätter

Mit dem Feuchtdehnungsmesssystem wurden ergänzend Laborblätter mit unterschiedlicher Flächenmasse und definierter Stoffzusammensetzung untersucht. Ziel war zu prüfen, ob anhand der Laborblätter Feuchtdehnungstendenzen im Bezug auf deren Zusammensetzung festgestellt werden können. Mit dem MK-Sheetformer, war es möglich, faserorientierte und isotrope Laborblätter herzustellen.

Die dynamische Feuchtdehnung von Laborblättern, getrocknet ohne Zug, unterscheidet sich wesentlich von maschinengefertigten Papieren. Letztere schrumpfen unmittelbar nach der Befeuchtung und erst später kommt es zu einer Dehnung. Die Schrumpfung ist mit der

Freisetzung der inneren Spannungen zu erklären. Unterschiedliche Neigung zur Dehnung im Bezug auf das Flächengewicht kann in Abb. 35 beobachtet werden. Laborblätter mit niedriger Flächenmasse sind instabiler und dehnen sich nach der Befeuchtung stärker als Laborblätter mit höher flächenbezogener Masse.

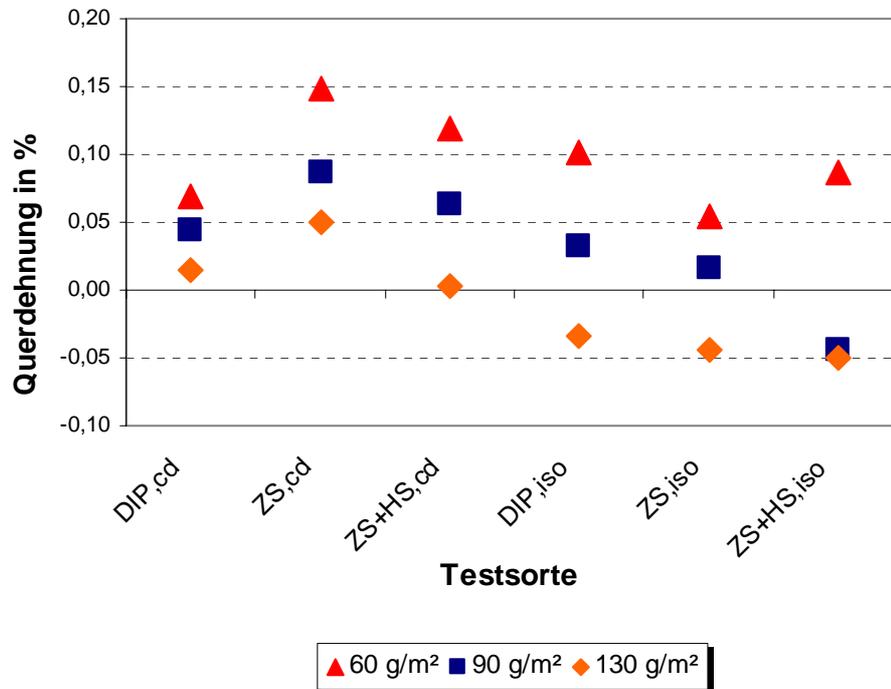


Abb. 35: Dehnung in Abhängigkeit vom Flächengewicht

Ein eindeutiger Einfluss der Zusammensetzung auf die Dimensionsstabilität konnte jedoch nicht festgestellt werden. Ebenfalls kein Einfluss auf die Dimensionsstabilität in Bezug auf die Zusammensetzung beobachteten in ihrer experimentellen Arbeit *Gomar und Lindholm* bei maschinengefertigten Papieren [37]. Die übertragenen niedrigen absoluten Wassermengen, sowie die hohe Rauigkeit der Laborblätter hemmen das Entfalten der Wirkung einzelner Stoffkomponenten auf das Feuchtdehnungsverhalten. Das deutet darauf hin, dass die Wasseraufnahme bei den Laborblättern im Wesentlichen durch die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst wird, die Dimensionsstabilität zusätzlich vom Faktor Flächenmasse.

Obwohl bei den anisotropen Laborblättern eine deutliche Faserorientierung erreicht wurde, ist die Abhängigkeit der Feuchtdehnung von der Faserorientierung nicht so stark ausgeprägt wie bei maschinengefertigten Papieren (Abb. 36). Bei dem MK-Sheetformer erfolgt die

Trocknung der produzierten Laborblätter frei von Zugkräften. Das Papierblatt wird zwischen eine laufende Filzbahn und einen Trockenzylinder abtransportiert. Das Papier wird in Maschinenrichtung nicht gezogen und die Faserschrumpfung in Querrichtung wird nicht unterstützt. Dementsprechend hat sich in Querrichtung kein so großes Dehnungspotenzial durch Faserschrumpfung aufgebaut wie bei den Industripapieren. Die Dehnung bei den Laborblättern beschränkt sich nun in Maschinen- als auch in Querrichtung hauptsächlich auf die Quellung der Fasern selbst. Trotz vergleichbaren Längs-Querverhältnis<sup>7</sup> zeigen Laborblätter und Industripapiere unterschiedliche Dehnungsneigung in Quer- und Längsrichtung. Es kann jedoch beobachtet werden, dass in den meisten Fällen die Dehnung in Querrichtung bei den anisotropen höher als bei den isotropen Laborblättern ist.

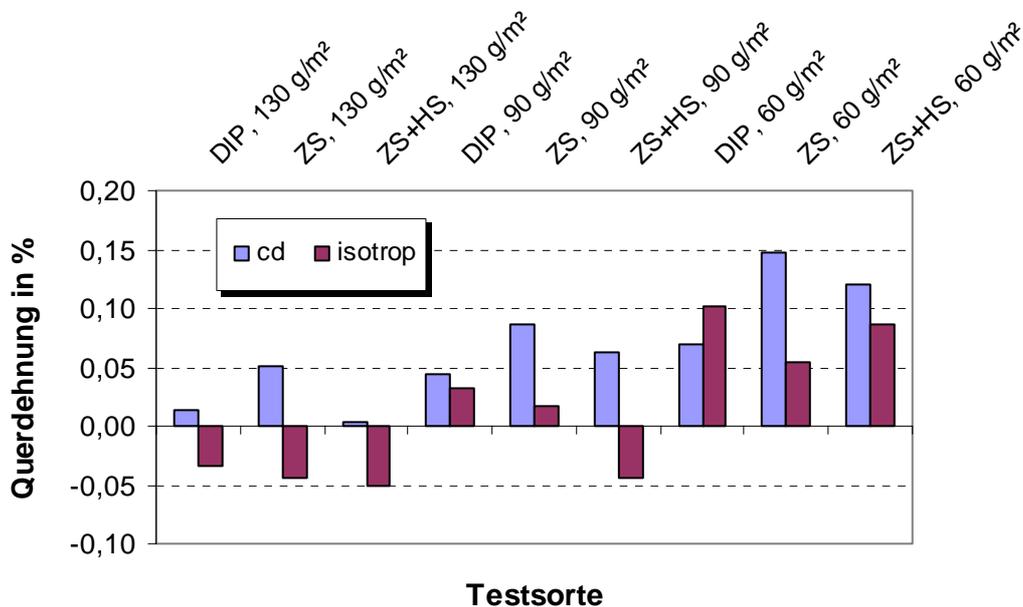


Abb. 36: Dehnung in Abhängigkeit von der Faserorientierung

Die Dimensionsänderung unter der Einwirkung von Feuchte resultiert aus der Überlagerung zweier Effekte: Hygroexpansion in Querrichtung und Freisetzung innerer Spannungen und nachfolgende Schrumpfung in Längsrichtung. Die Stoffzusammensetzung und die

<sup>7</sup> Das Längs-Querverhältnis ist dimensionslos und wird als  $\frac{TSI(MD)}{TSI(CD)}$  bestimmt.

---

Papiereigenschaften, außer denen, die die Wasseraufnahme beeinflussen, sind für die Dimensionsänderungen der Laborblätter nicht bestimmend.

## 4.3 Druckversuch

### 4.3.1 Konzept und Durchführung

Um die Ergebnisse aus den FDM-Befeuchtungsversuchen in der Praxis zu verifizieren, wurde ein Druckversuch konzipiert und durchgeführt. Der Druckversuch wurde bei der Fa. Heidelberger Druckmaschinen AG an einer Bogenoffsetdruckmaschine Typ SM 52 durchgeführt. Gedruckt wurden die gleichen Offsetpapiere, die mit dem FDM getestet worden und in Tab. 2 aufgelistet sind. Es wurde im einseitigen Betrieb vierfarbig gedruckt. Die standardgemäße Farbreihenfolge in den Druckwerken ist Black, Cyan, Magenta, Yellow. Da jedoch erfahrungsgemäß die Druckfarbe Yellow auf Zeitungsdruckpapier einen für die Auswertung mit dem Passermesssystem „Luchs“ unzureichenden optischen Kontrast erzeugt, wurde im vierten Druckwerk statt Yellow wiederholt die Druckfarbe Cyan gedruckt. Die Druckgeschwindigkeit wurde konstant auf 6.000 Bogen/Stunde gehalten. Für die Farbdichte wurden die Vorgaben der Heidelberger Druckmaschinen AG, aufgelistet in Tab. 3, eingehalten. Weitere technische Daten zu dem Druckversuch sind Tab. 4 zu entnehmen.

Black	Cyan	Magenta
1,25	0,95	1,05

Tab. 3: Vorgaben für die Farbdichte

Feuchtmittel	IPA 10 % Combifix XL 4 % T = 10° C pH = 5,1 Leitwert = 1150 µS
Raumklima	RH = 52 %; T = 22° C
Farbreihenfolge	Black, Cyan, Magenta, Cyan
Papierdicke	A: 0,10      E: 0,06 B: 0,11      F: 0,07 C: 0,08      G: 0,09 D: 0,10      H:0,09

Tab. 4: Technische Daten zum Druckversuch

Da das Wasser sowohl über das reine Feuchtmittel und als auch über die in der Druckfarbe emulgierten Menge übertragen wird, ist es wichtig, den Einfluss einerseits der Feuchtmittelmenge und andererseits der Druckfarbenmenge auf die Dimensionsstabilität des Bedruckstoffs zu durchleuchten. Aus diesem Grund wurden zwei Druckplattenformen eingesetzt (Abb. 37). Über die Druckplattenformen wurden insgesamt 25 Luchs-Passermesselemente verteilt.



Abb. 37: Darstellung der beiden verwendeten Druckformen

Eine der Druckplattenformen besitzt zusätzlich Volltonflächen sowohl in den Originalfarben als auch gemischt. Die Farbbelegung dieser Form beträgt ca. 80 %<sup>8</sup>. Die zweite Druckplattenform besteht nur aus den Passermesselementen und besitzt eine Farbbelegung von ca. 5 %<sup>9</sup>. Beim Verdrucken beider Druckformen wurde die Feuchtmittelmenge variiert, und zwar 5 %<sup>10</sup> und 25 %<sup>11</sup> über die Schmiergrenze. Daraus ergeben sich für jedes getestete Papier vier Versuchszustände. Die Reihenfolge der Druckjobs ist in Tab. 5 dargestellt. Von jeder Serie wurden für jedes Papier ca. 200 Bögen verdruckt.

<sup>8</sup> 80 % Farbbelegung wird in Folgendem als ↑ FB bezeichnet

<sup>9</sup> 5 % Farbbelegung wird in Folgendem als ↓ FB bezeichnet

<sup>10</sup> 5 % Feuchtmittel über die Schmiergrenze wird in Folgendem als ↓ FM bezeichnet

<sup>11</sup> 25 % Feuchtmittel über die Schmiergrenze wird in Folgendem als ↑ FM bezeichnet

1 <sup>er</sup> Druckjob	2 <sup>er</sup> Druckjob	3 <sup>er</sup> Druckjob	4 <sup>er</sup> Druckjob
↓ FM, ↓ FB	↑ FM, ↓ FB	↓ FM, ↑ FB	↑ FM, ↑ FB

Tab. 5: Versuchszustände im Drucktest

Nach dem in Kapitel 2.6 bereits erwähnten Prinzip wird zunächst durch Vorlaufbögen die Schmiergrenze ermittelt. Anschließend wird das Feuchtmittel um 5 %, bzw. 25 % erhöht. Die Feuchtmittelmenge wird über die Prozentangabe der maximalen Motorleistung des Feuchtwerksantriebs verändert. Zwischen der Drehzahl der Tauchwalze in Umdrehung pro Minute und der Motorleistung des Feuchtantriebs in Prozent besteht ein linearer Zusammenhang (Abb. 38). Die Erhöhung der Feuchtmittelmenge von 5 % aus 25 % über die Schmiergrenze führte nicht zur Abnahme der Farbdichte. Nach jedem Papierwechsel wird die Papierdicke eingegeben und die Anpressung danach eingestellt. Feuchtmittelmenge und Farbdichte wurden beim Papierwechsel möglichst konstant gehalten.

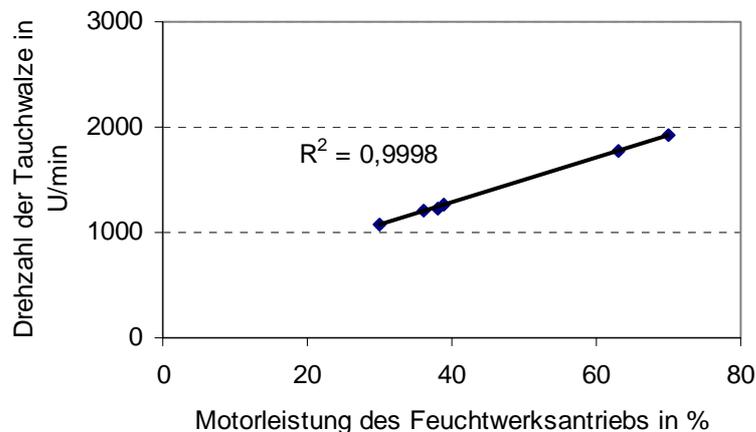


Abb. 38: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Drehzahl der Tauchwalze

### 4.3.2 Auswertung

Die Passerabweichungen im Druck wurden mit dem patentierten Passermesssystem LUCHS des Sächsischen Instituts für die Druckindustrie gemessen. Das System ist objektiver als die konventionelle Noniusmessung und ermöglicht gleichzeitig den Passer von Farbkombinationen in Längs- und Querrichtung zu messen. Das Passermesssystem besteht aus einem Messkopf mit integrierter Schwarzweißkamera und einem portablen Computer. Die

vom Hersteller angegebene Messunsicherheit beträgt  $5\ \mu\text{m}$  [47], [48]. Das Messprinzip basiert auf Analyse von Videobildern mit mathematischen Verfahren, einschließlich Schiebe- und Dublierkorrektur. Da die Elemente auf den Druckplatten immer die gleiche Lage zueinander haben, können anhand der Positionsänderungen der Messelemente im Druck, Rückschlüsse auf die Änderung des Druckbogens gezogen werden. Die Messelemente haben eine Ortskodierung. Jedes Messelement besteht aus Teilmesselementen, welche jeweils in einem anderen Druckwerk gedruckt werden (Abb. 39). Bei der Auswertung wird immer die Positionsänderung in  $\mu\text{m}$  zum ersten Druckwerk angegeben. Pro Messelement bekommt man einen Wert für jede Farbkombination jeweils für Längs- und Querrichtung: Druckwerk 1 zu Druckwerk 2 (1/2l bzw. 1/2q), Druckwerk 1 zu Druckwerk 3 (1/3l bzw. 1/3q), Druckwerk 1 zu Druckwerk 4 (1/4l bzw. 1/4q). Durch die Anordnung mehrerer Messelemente über die Bogenfläche kann die Veränderung der Papierlänge, bzw. -breite zu dem Zustand im ersten Druckwerk gemessen werden.

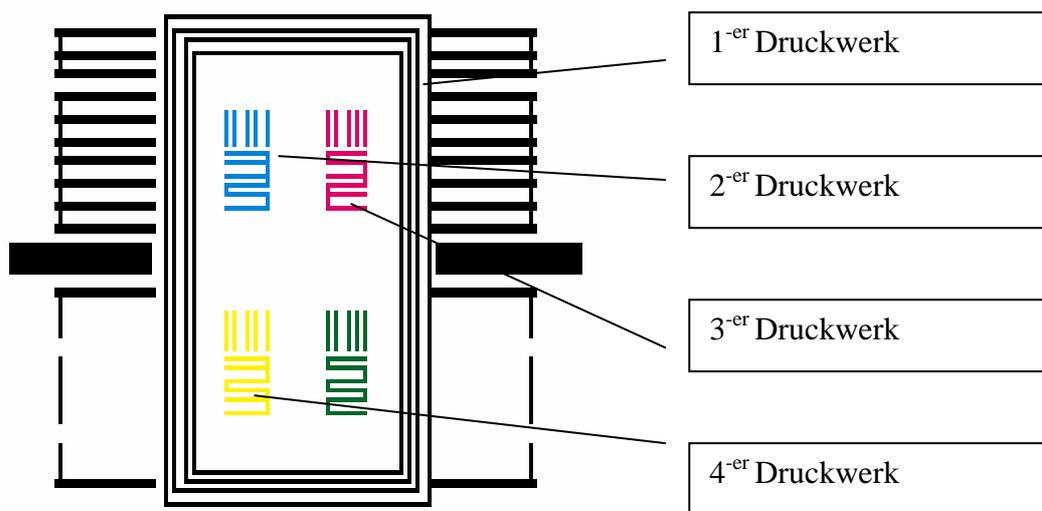


Abb. 39: Darstellung eines Luchs-Passermesselementes

#### 4.3.2.1 Dimensionsänderung innerhalb eines Bogens

Über die Druckform werden insgesamt 25 Luchsmesselemente, in Längs- und Querrichtung jeweils 5 Messelemente in Reihe verteilt. Die Luchsmesselemente sind von Z1 bis Z5 nummeriert und haben eine Anordnung wie in Abb. 40 gezeigt. Durch entsprechendes Subtrahieren der Werte für die Abstandsänderung in den einzelnen Teilmesselementen wird

die jeweilige Dimensionsänderung des Bogens errechnet. Positive Werte in den Abb. 41 bis Abb. 47 entsprechen einer Dehnung, negative Werte einer Schrumpfung. Durch die Differenzen ( $Z5-Z1$ ), ( $Z10-Z6$ ), ( $Z15-Z11$ ), ( $Z20-Z16$ ) und ( $Z25-Z21$ ) wird die Dehnung in Querrichtung von der Vorderkante bis zur Hinterkante eines Bogens errechnet. Durch die Differenzen ( $Z21-Z1$ ), ( $Z22-Z2$ ), ( $Z23-Z3$ ), ( $Z24-Z4$ ) und ( $Z25-Z5$ ) wird die Längsdehnung eines Bogens über die Bogenbreite vom linken zum rechten Rand errechnet. Somit können innerhalb des Bogens Dimensionsänderungen in Längs- und Querrichtung an unterschiedlichen Stellen bestimmt werden.

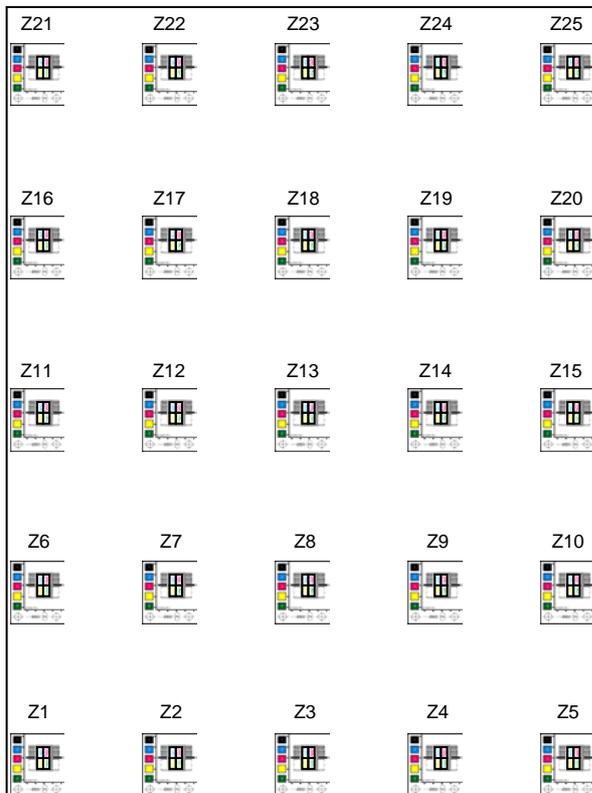


Abb. 40: Anordnung der Passermesselemente

Die getesteten Papiere weisen in Quer- und in Längsrichtung ein charakteristisches Dehnungs- bzw. Schrumpfungsverhalten auf. In Abb. 41 ist der typische Dehnungstrend in Querrichtung an einem Beispiel für Papier E abgebildet.

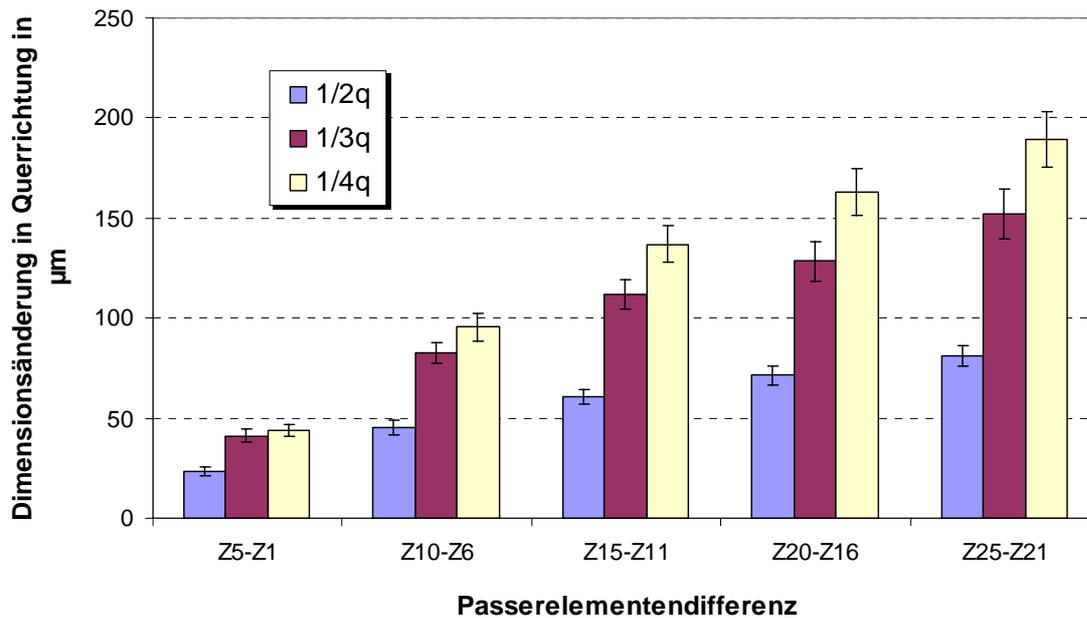


Abb. 41: Querdehnung im zweiten, dritten und vierten Druckwerk (Papier E, ↓ FB, ↓ FM)

Der Bogen erfährt in Querrichtung die für den Bogenoffsetdruck typische Verformung (Abb. 3b). Der Bogen erhält während des Druckprozesses eine trapezförmige Form. Die Dehnung innerhalb des Druckbogens von der Vorderkante bis zur Hinterkante nimmt kontinuierlich zu. Wie Abb. 41 entnommen werden kann, bleibt dieser Trend bei allen Druckwerken erhalten. Dies wird bei allen Testpapieren, unabhängig von Druckform und eingesetzter Feuchtmittelmenge beobachtet. Die Vorderkante, die von den Bogenführungselementen gehalten wird, ist in ihrer Dehnungsfreiheit gehindert. Die Hinterkante dagegen, welche das freie Ende des Bogens darstellt, kann sich frei dehnen. Die Dehnung an der Hinterkante wird zusätzlich durch den Walkprozess in der Druckmaschine verstärkt. Hinzu kommt auch der zusätzlich destabilisierende Effekt durch das Abziehen des Druckbogens von der Gummiwalze, der sich jedoch meist auf die Dimensionen des Bogens in Längsrichtung auswirkt.

Mit jedem weiteren Druckwerk steigt die Wasseraufnahme im Druckbogen. Diese hängt bei den für den Offsetdruck üblicherweise übertragenen Wassermengen laut *Per-Olov Trollås* nicht von der Wasseraufnahme im vorausgegangenen Druckwerk ab [31]. Somit kann angenommen werden, dass in jedem Druckwerk die gleiche Wassermenge vom Papier

aufgenommen wird. Demnach nehmen die Dimensionsänderungen vom ersten bis zum letzten Druckwerk proportional mit der vermittelten Wassermenge zu.

In Längsrichtung verlängert sich der Bogen vom ersten zum zweiten Druckwerk. Ähnlich wie in Querrichtung, sind auch hier die Grenzsegmente des Bogens stärker von der Deformation betroffen. Wie in Abb. 42 beispielhaft dargestellt, ist die Verformung an den Bogenrändern stärker ausgeprägt als in Bogenmitte. Zwischen dem zweiten und dem dritten Druckwerk verkürzen sich die Papiere in Längsrichtung (Abb. 42 und Abb. 43). Dies ist mit dem Abbau innerer Spannungen verbunden. Die Schrumpfung erfolgt naturgemäß in Längsrichtung, in der das Papier im Herstellungsprozess am stärksten beansprucht wurde. Zwischen dem dritten und dem vierten Druckwerk kommt es wieder zu einer Verlängerung des Bogens, wobei die Dehnung bei einer höheren Feuchtmittelzufuhr größer ausfällt.

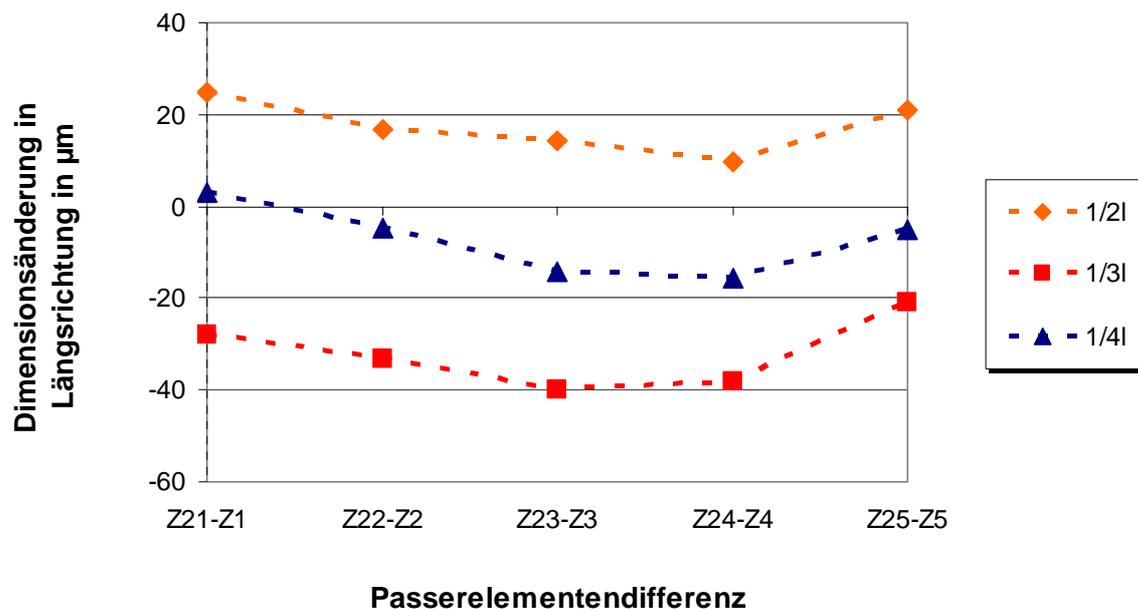


Abb. 42: Dimensionsänderung in Längsrichtung (Papier E, FM↓, FB↓)

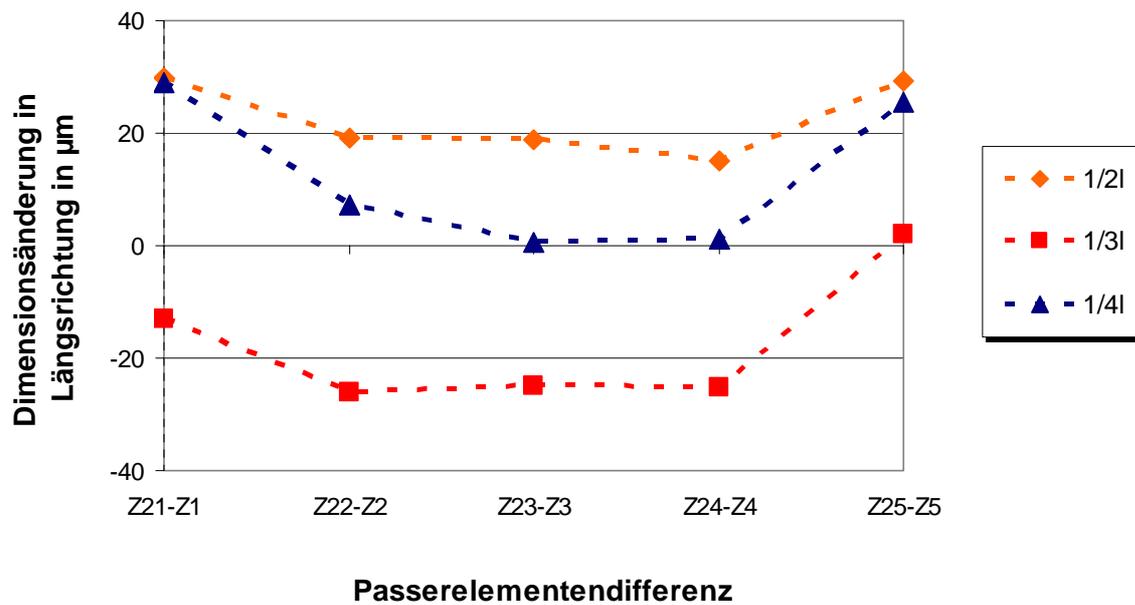


Abb. 43: Dimensionsänderung in Längsrichtung (Papier E, FM↑, ↓FB)

Zwischen dem ersten und dem zweiten Druckwerk haben geleimte Papiere bei einer hohen Farbbelegung und niedriger Feuchtmittelmenge überraschenderweise gleiche oder sogar stärkere Dehnungen als Zeitungsdruckpapiere erfahren (Abb. 44). Dieses liegt sicherlich nicht an ihrem Wasseraufnahmevermögen. Die Einwirkung der Druckfarbe oder die Anpressung führen vermutlich zu diesem Ergebnis. Denkbar ist auch, dass die Zeitungsdruckpapiere die größte Längsdehnung schon im ersten Druckwerk erfahren, bei der zweiten Befeuchtung, also nach dem zweiten Druckwerk wie in Abb. 44 dargestellt, dehnen sich die geleimten Papiere stärker.

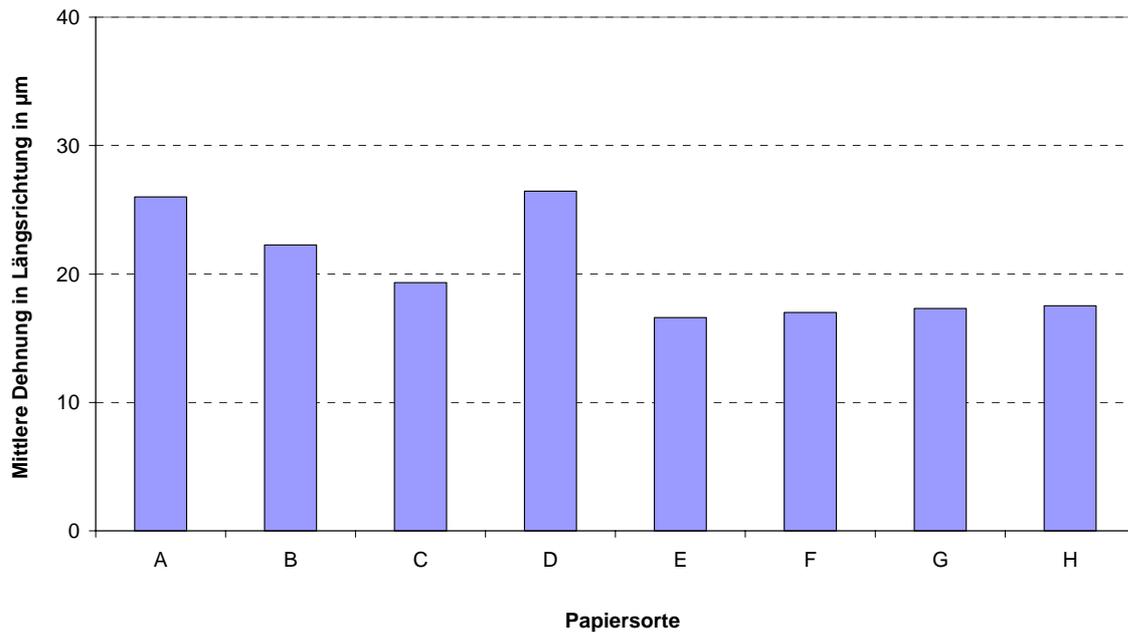


Abb. 44: mittlere Dehnung in Längsrichtung zwischen dem ersten und dem zweiten Druckwerk ( $\uparrow$  FB,  $\downarrow$  FM)

#### 4.3.2.2 Einfluss von Druckfarbe und Feuchtmittel auf die Dimensionsstabilität

Um die Dimensionsänderung je nach aufgetragener Feuchtmittelmenge und Druckfarbe zu untersuchen, müssen die vier Versuchszustände (Tab. 5) für die jeweilige Papiersorte betrachtet werden. Da immer die relativen Dimensionsänderungen eines Bogens betrachtet werden, können alle Versuchsreihen miteinander verglichen werden. Eventuelle Fehler, die durch die Druckplattenmontage zustande gekommen sind, wenn dazwischen ein Plattenwechsel erfolgt ist, wirken sich nicht auf das Endergebnisse aus. Eine Erhöhung der Feuchtmittelmenge bzw. der Farbbelegung verursachen eindeutig größere Dehnungen. Mehr Feuchtmittel bei den geleimten Papieren A und B destabilisiert das Papier offensichtlich stärker als die Erhöhung der Druckfarbenbelegung Abb. 45. Offensichtlich ist die Wirkung auf die Leimung durch das "offene" Wasser bei wenig Druckfarbe stärker und schneller als durch das emulgierte Wasser bei hoher Farbbelegung. Bei Zeitungsdruckpapieren, erfolgt die Quellung in Querrichtung dagegen bereits beim Auftrag einer geringen Feuchtmittelmenge. Daher ist der Dehnungszuwachs zwischen den beiden Zuständen nicht so groß wie bei den geleimten Papieren. Die größten Dimensionsänderungen bei Zeitungsdruckpapieren werden bei gleichzeitiger Erhöhung der Feuchtmittelzufuhr und der Druckfarbenbelegung

hervorgehoben. Auf Grund des hohen Füllstoffgehaltes reagiert Papier D nur unwesentlich auf ein erhöhtes Angebot an Feuchtmittel.

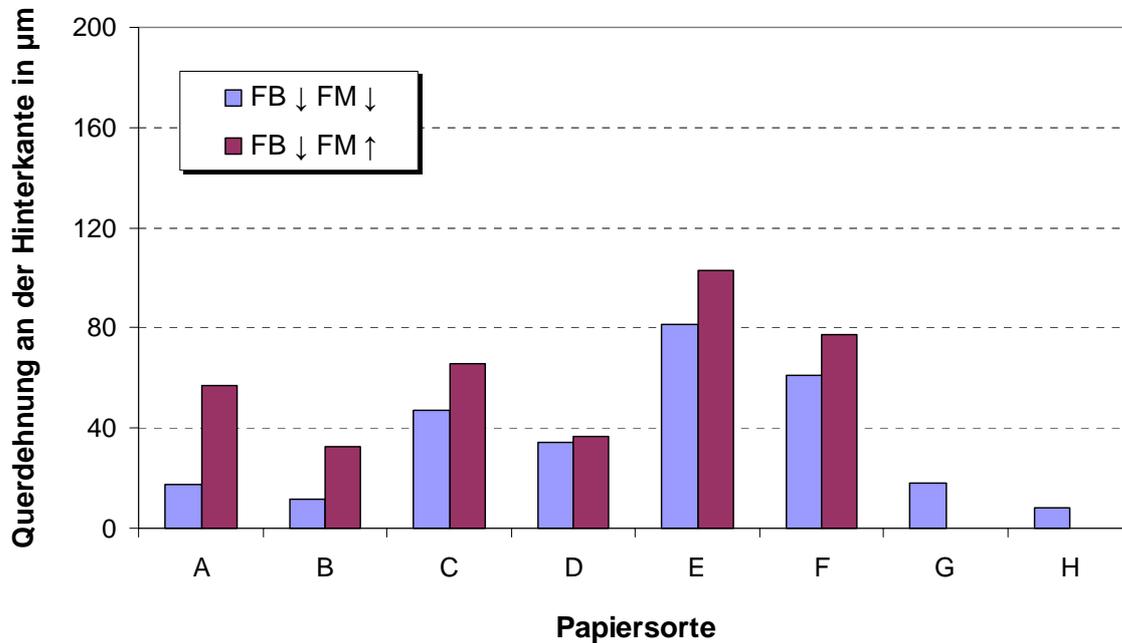


Abb. 45: Querdehnung bei niedriger Farbbelegung und variierender Feuchtmittelmenge zwischen dem ersten und dem zweiten Druckwerk<sup>12, 13</sup>

Eine Erhöhung der Feuchtmittelmenge, führt mit Ausnahme der Papieren E und F zu keinen signifikanten Dimensionsänderungen bei Drucken mit hoher Farbbelegung (Abb. 46).

<sup>12</sup> Bei den Papieren G und H ist die Qualität der mitgedruckten Messelemente bei ↑FM nicht ausreichend, weswegen eine Auswertung mit dem Luchs-Messgerät nicht erfolgen konnte.

<sup>13</sup> Die Querdehnung an der Hinterkante ist durch die Differenz Z25-Z21 gebildet.

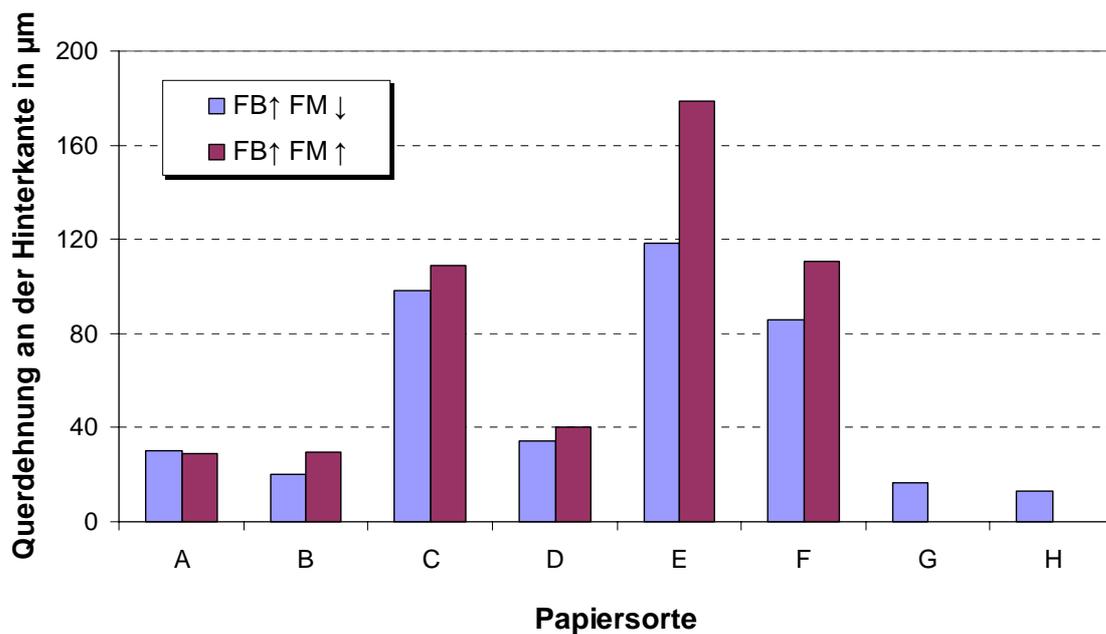


Abb. 46: Querdehnung bei hoher Farbbelegung und variierender Feuchtmittelmenge zwischen dem ersten und dem zweiten Druckwerk<sup>12,13</sup>

#### 4.3.2.3 Trends zur Dimensionsänderung verschiedener Papiersorten

Innerhalb einer Versuchsserie wurde keine Veränderung an den Einstellungen der Druckmaschine vorgenommen. Unter den getesteten Papiersorten gibt es gewisse Trends in der Dehnungsneigung im Druck. Wie aus Abb. 47 hervorgeht, bleiben diese Trends unter den Papieren selbst bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Änderung der Farbbelegung und Feuchtmittelmenge) im Wesentlichen erhalten. So zeigen die geleimten Papiere A und B bei allen Versuchsanordnungen eine höhere Dimensionsstabilität als die Zeitungsdruckpapiere. Der Unterschied zwischen der Mittenrolle F und der dazugehörige Randrolle E ist ebenfalls immer festzustellen, wobei dieser signifikant wird, wenn mit höherer Farbbelegung und viel Feuchtmittel gedruckt wird. Diese Feststellung ist ein Hinweis darauf, dass es grundsätzlich ausreicht, die Trends zur Dehnungsneigung bestimmter Papiere bei nur einer Konstellation der Versuchsbedingungen zu bestimmen.

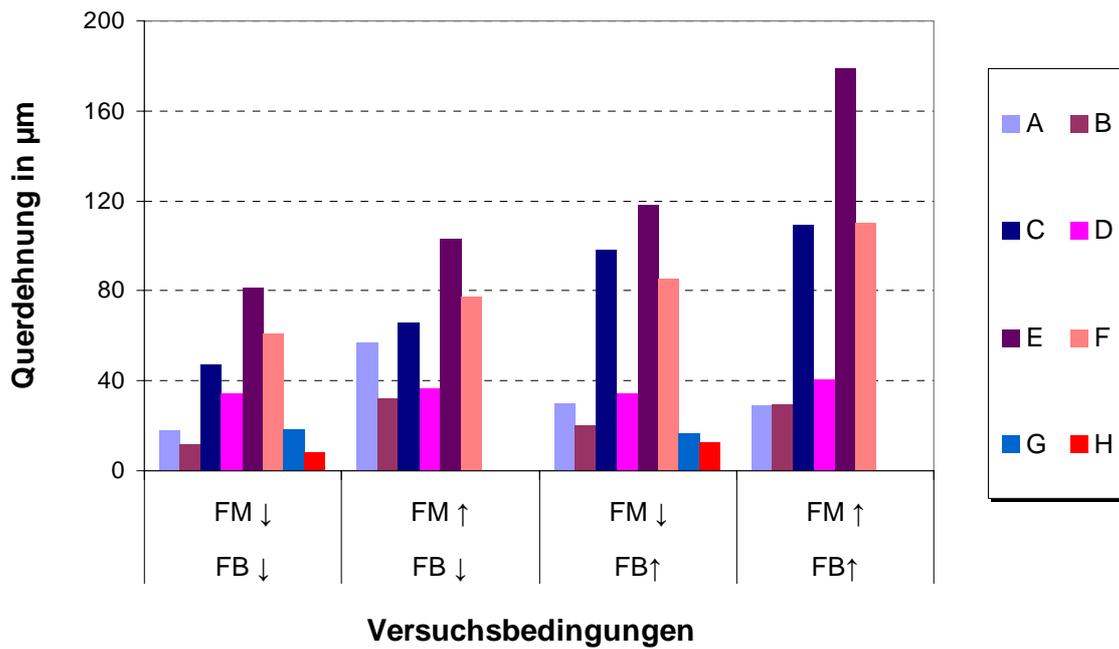


Abb. 47: Dimensionsänderung bei unterschiedlichen Druckbedingungen  $(1/3q)^{14}$

<sup>14</sup> Die Passermesselemente bei den Transparentpapieren waren bei der Einstellung FM ↑ wegen nicht ausreichender optischer Farbdichte nicht messbar.

---

## Schlussbetrachtung

Der experimentelle Teil der aktuellen Arbeit besteht aus drei Gruppen Untersuchungen – Standardmessungen, Messungen mit dem Feuchtdehnungsmessgeräts und Druckversuch. Das Testmaterial wurde dabei unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt. Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurden Gesetzmäßigkeiten bei der Dehnung unter der Einwirkung von Wasser in beiden Richtungen, sowie Dehnungstrends für die getesteten Papiere beobachtet. Um das Feuchtdehnungspotenzial der Papiere zu bewerten, wurden drei nach Befeuchtungsverfahren und Messprinzip unterschiedliche Messungen durchgeführt – Feuchtdehnung, Nassdehnung und Befeuchtung mit FDM. Dabei wurde das Wasser respektiv in Form von Wasserdampf aus der Luft ins Fasergefüge aufgenommen, in direktem Kontakt mit der Papieroberfläche gebracht und in Form eines dünnen Films aufgetragen. Die unterschiedlichen Beanspruchungen lösen bei den Papieren unterschiedliche Reaktionen aus.

Im Rahmen der aktuellen Arbeit wurde ein Feuchtdehnungsmessgerät entwickelt, welches die Beanspruchungen des Papiers in der Druckmaschine hinsichtlich Befeuchtung realitätsnah simuliert. Die eingesetzte bildanalytische Methode ist auf fast alle Papiere anwendbar. Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus der experimentellen Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Um eine korrekte Voraussage bezüglich des Dehnungspotenzials der Papiere im Druck treffen zu können, ist es besonders wichtig, dass Wasserauftragsmengen, sowie Testzeit möglichst wenig von denen im Druckversuch abweichen. Bei der Feuchtdehnungsmessung ruft die lange Testzeit, bei der Nassdehnungsmessung das Überangebot an Wasser, Reaktionen im Fasergefüge hervor, welche im Druckprozess nicht stattfinden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Tendenzen zwischen den getesteten Papieren.
- Die Dehnungstrends in Querrichtung, welche sich hauptsächlich durch die Wasseraufnahme im Papier ergeben, lassen sich grundsätzlich mit der erarbeitenden Prüfvorrichtung- und –methode voraussagen. Die Dehnungen bei nicht geleimten Papieren nehmen proportional mit Erhöhung des Wasserauftrags zu.

- 
- Die Dehnungstrends in Längsrichtung sind vielmehr Folge vom Spannungsabbau im Papier, der nach der Befeuchtung stattfindet. Der Zusammenhang zwischen den Dimensionsänderungen und der Wasserauftragsmenge ist nicht linear, da auch die eingefrorenen Spannungen im Trocknungsprozess bei der Papierherstellung in einem nichtlinearen Prozess entstanden sind.
  - In Längsrichtung wird die Voraussage der Dehnung mit dem FDM weiterhin von folgenden Parametern erschwert:
    - Beanspruchung durch die Druckfarbe, welche sich hauptsächlich in Längsrichtung auswirkt,
    - Dynamische Zugbelastung in der Bogendruckmaschine,
    - Die erste Erfassung der Deformationen in der Druckmaschine mit dem LUCHS-Messsystem bezieht sich auf die Dehnung zwischen dem ersten und dem zweiten Druckwerk. Die Dehnung nach dem ersten Druckwerk wird derzeit mit dem Passermesssystem nicht erfasst. Gerade jedoch die erste Befeuchtung des Papiers ist besonders wichtig. Mit dem FDM wird die Dehnung nach der ersten Befeuchtung erfasst.
  - Untersuchungen an Laborblätter mit definierter Stoffzusammensetzung ergaben keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Stoffzusammensetzung und der Feuchtdehnung bei den für den Offsetdruck üblichen Wassermengen.

Es kann zusammengefasst werden, dass sich die Dimensionsänderungen in Querrichtung, die sich auf Grund der Befeuchtung im Offsetdruck ergeben, mit dem FDM grundsätzlich voraussagen lassen. Die Schwankungen der Ergebnisse können weiter reduziert werden, wenn die Befeuchtung der Proben unter konstanten Klimabedingungen stattfindet. Mit der eingesetzten bildanalytischen Methode können die lokalen Dehnungen in der Probe bestimmt werden. Eine Erweiterung der Messmethode ist denkbar, wenn die lokalen Dehnungen der Probe mit lokalen Feuchtigkeitsgehalten und lokalen Messwerten für die Papierstruktur (Dichteschwankungen, Rauigkeit) kombiniert werden. Dadurch würde die Methode weiter an Aussagekräftigkeit gewinnen.

**Literaturverzeichnis**

[1] T. Uesaka

Dimensional Stability of Paper: Upgrading paper performance in end use

Journal of Pulp and Paper science, Vol. 17, 1991, Nr. 2, S. 39 – S. 46

[2] Y. Nanri, T. Uesaka

Dimensional stability of mechanical pulps – drying shrinkage and hygroexpansivity

Tappi Journal, Vol. 76, 1993, No. 6, S.62 –S. 66

[3] N. Provatas, T. Uesaka

Modelling Paper Structure and Paper-Press Interactions

Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 29, 2003, Nr. 10, S.332 –S. 340

[5] R. Kettinger

Messung der auf die Druckzylinder greifer wirkenden Zugkräfte

Untersuchung über Dimensionsveränderungen von Bogenpapieren

[6] J. Nader

Passerschwierigkeiten beim Offsetdruck

FOGRA-Mitt. Nr. 48, München, 1966

[7] H. Tattari, K. Niskanen

Mechanical deformation of paper in the printing nip

Oy Keskuslaboratorio- Centrallaboratorium AB

PSC Communications 115, Espoo 1998, S. 19

[8] B. Boström

Short-time dynamic hygro-expansivity caused by moisture

4<sup>th</sup> International Symposium Moisture and Creep Effects on paper, board and containers

E.F.P.G. France, 1999

[9] P. Lim

Determination of the fountain solution picked up by the paper and ink offset printing  
TAPPI Proceedings; International Printing & Graphic Arts Conference, Atlanta, USA, 1996

[10] A. Rosenberg

Einfluss der Feuchtung des Bedruckstoffes auf das Druckergebnis im Offsetdruck  
FOGRA-Forschungsbericht Nr. 3.281, München, 1992

[11] J. Kananen, J. Mäkinen, P. Puuko

Prediction of rheological behaviour of paper in coldset web offset printing  
Advances in Printing Science and Technology, S. 53-S. 62  
Proceedings of the 30<sup>rd</sup> research conference of IARIGAI, Zagreb, Croatia, 2003

[12] Å. Hansen

Water absorption and dimensional changes of newsprint during offset printing  
Advances in printing science and technology; S. 247-S. 267  
Proceedings of the 23<sup>rd</sup> research conference of IARIGAI, Paris, France, 1995

[13] C. Menschig-Rivas, H.-J. Putz, M. Petrova

Untersuchungen zum Papierschumpungsverhalten in schnell laufenden Zeitungsdruck-  
papiermaschinen und der Papierqualität in Abhängigkeit von der Maschinenkonfiguration  
sowie deren Auswirkungen auf die Bedruckbarkeit  
Studienarbeit, PMV, TU Darmstadt, 2003

[14] M. Niedernhuber, H.-J. Putz

Untersuchungen zum Papierschumpungsverhalten in schnell laufenden  
Zeitungsdruckmaschinen und dessen Auswirkungen auf die Bedruckbarkeit  
Forschungsprojekt INFOR 38, Teil 2  
PMV, TU Darmstadt, 2005

[15] Water Interference Mottling

<http://www.sappi.com/SappiWeb/Knowledge%20bank/Technical%20brochures/>

[16] E. Nelson

Changes in temperature and relative humidity directly affect paper

Gatfworld, Vol. 2, 1990, Issue 3, S. 39 – S. 42

[17] K.-A. Falter

Dynamische und drucktechnische Eigenschaften von Offsetpapieren unter besonderer Berücksichtigung der Kurzzeitbelastung

Fogra-Forschungsbericht Nr. 4.205, München, 1982

[18] W. Brecht

Über das Dimensionsverhalten von Papier

Cellulose Chemistry and Technology, 3, 1969, S. 657 – S. 674

Institut für Papierfabrikation der Technischen Hochschule, Darmstadt

[19] J. Berthold, R. J. O. Olsson, L. Salmen

Water sorption to hydroxyl and carboxylic acid groups in Carboxymethylcellulose (CMC) studied with NIR – spectroscopy

CELLULOSE 5, 1998, S. 281 –S. 298

[20] C. Lamprecht

Untersuchungen und Ursachenanalyse der Querschrumpfung von Papier sowie Verformungen von Entwässerungssieben

Diplomarbeit, Institut für Papierfabrikation, TU Darmstadt, 1994

[21] T. Uesaka

Determination of Fiber –Fiber Bond Properties

Handbook of Physical and Mechanical Testing of Papier and Paperboard,

Vol. 2, S. 379 –S. 402, 1984

[22] I. Kajanto, K. Niskanen

Dimensional Stability

Paper Physics, Chapter 7, S. 222-S. 259, Fapet Oy, Helsinki, Finland, 1998

[23] L. Salmen, J. Berthold

The swelling ability of pulp fibres

Fundamentals of Papermaking Materials, S. 683–S. 674, 1997; Vol. 2

[24] T. Uesaka, C. Moss

Effects of Fibre Morphology on Hygroexpansivity of Paper - A Micromechanics approach

Fundamentals of Papermaking Materials, S. 663 – S. 679, 1997, Vol. 1

[25] T. Uesaka

General formula for hygroexpansion of paper

Journal of Materials Science 29, S. 2373-S. 2377, 1994

[26] K. Erhard, M. Fiedler, J. Kretzschmar

Verbesserung der Dimensionsstabilität von Papier durch gezielte Auswahl und Aufbereitung der Faserstoffe

PTS-Forschungsbericht, 2006

[27] W. Brecht

Verhalten der Papiere bei Änderung ihres Feuchtigkeitsgehaltes

Das Papier, Heft 9/10, 1959, S. 201-S. 207

[28] J. Weidenmüller, E. Hotzmann & Cie AG

Wechselwirkung zwischen Feuchtmittel und holzhaltigen Naturpapieren.

FOGRA-Symposium: Offsetfeuchtung in Forschung und Praxis, München, 1986

[29] T. Uesaka, D. Qi

Hygroexpansivity of paper – Effects of fiber-to-fiber bonding

Journal of Pulp and Paper science, Vol. 20, 1994, Nr. 6

- [30] A. Rosenberg, Ch. Brückers  
Wasseraufnahme des Bedruckstoffes während des Offset-Druckprozesses und deren  
Auswirkung  
FOGRA-Forschungsbericht Nr. 3.253, München, 1998
- [31] P.-O. Trollsås  
Water uptake in newsprint during offset printing.  
Tappi Journal, Vol. 78, 1995, Nr. 1, S. 155-S. 159
- [32] W. Walenski  
Offsetdruck, Polygraph-Handbuch  
Polygraph Verlag GmbH Frankfurt am Main, 1991
- [33] B. Wirz  
Automatische Feuchtmittelregelung an Bogen- und Rollenoffsetmaschinen  
FOGRA-Symposium: Offsetfeuchtung in Forschung und Praxis, München, 1986
- [34] B. Boström  
How to Measure Dimensional Stability  
Paper Technology, S. 45-S. 50, PITA Coating Conference, 2001
- [35] J. Belle  
Nassdehnung und Druckqualität  
Internationales Münchner Papier Symposium, München 2000
- [36] H. Kipphan  
Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren  
Springer Verlag 2000
- [37] M. Gomer, G. Lindholm  
Hygroexpansion of newsprint as a result of water absorption in a printing press

TAGA Proceedings 1991, Rochester, NY, 1991, . S. 268-282

[38] P.-O. Trollsås

Different ways to counteract the fan-out of newsprint in offset printing

Technical PM – Nr. 93:7, 1993-11-22

Swedish Newsprint Research Centre, Djursholm, Sweden 1998

[39] Benutzerhandbuch pco.camera

PCO AG

Stand 12/2004

[40] B. Boström

New perspectives on test methods für dimensional stability

3<sup>rd</sup> International Symposium Moisture and Creep Effects on Paper, Board and Containers

[41] M. Wiens

Untersuchung der Eignung von Parametern der elastisch-plastischen Bruchmechanik zur Charakterisierung des Risswiderstands von Papier unterbesonderer Berücksichtigung des J-Integrals

Dissertation, Institut für Papierfabrikation, TU Darmstadt, 1999

[42] M. Sjö Dahl

Electronic Speckle Photography applied to in-plane deformation and strain field measurements

Doctoral thesis, D171, 1995

Lulea, University of technology, Division of Experimental Mechanics

[43] M. Sjö Dahl, L. R. Benckert

Electronic Speckle Photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy

Applied Optics, Vol. 32, 1993, Nr. 13

[44] M. Sjö Dahl, L. R. Benckert

Systematic and random errors in electronic speckle photography

Applied optics, Vol. 33, 1994, Nr. 31

[45] M. Sjö Dahl

Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting

Applied optics, Vol. 33, 1994, Nr. 28

[46] M. Häußler

Messtechnische Erfassung des Trocknungsverlaufs mit optischen Methoden

Master Thesis Nr. 2, 2005

Fachgebiet für Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik, TU Darmstadt

[47] [http://www.sidleipzig.de/pdf/sid\\_luchs\\_de.pdf](http://www.sidleipzig.de/pdf/sid_luchs_de.pdf)

[48] G. Loh

Passermessung an Druckmaschinen mit konventioneller Videotechnik

Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006