



INFOR-Projekt Nr. 22

Ermittlung der Ursachen von Dimensionsinstabilität von Papier bei thermischer Belastung

SCHLUSSBERICHT

Juni 2002

Papiertechnische Stiftung
München und Heidenau

Projektleiter:
Dr. rer. nat. Klaus Erhard
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Belle

Schlussbericht zum INFOR-Forschungsprojekt Nr. 22

**Ermittlung der Ursachen von Dimensionsinstabilität von Papier bei
thermischer Belastung**

Forschungsstellen

PTS München und Heidenau

Projektleiter

Dr. rer. nat. Klaus Erhard
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Belle

Laufzeit

01.01.2001 - 31.12.2001

Forschungsgebiet:

Produktziele / Papier, Karton, Pappe / techn. Spezialpapiere

München/Heidenau, Juni 2002

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
Danksagung.....	2
1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Ausgangssituation.....	2
1.1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Problemstellung	3
1.2 Dimensionsstabilität von Papier – Begriffe, Ursachen, Erscheinungsformen und messtechnische Erfassung – Stand von Forschung und Technik.....	3
1.2.1 Begriffsdefinition Dimensionsstabilität.....	3
1.2.2 Grundlagen der Dimensionsstabilität -Wechselwirkungen zwischen Papier und Klima-	4
1.2.3 Phänomenbeschreibung	5
1.2.3.1 Curl	5
1.2.3.2 Cockling	6
1.2.4 Einflussgrößen in der Papiererzeugung und Verarbeitung	7
1.2.4.1 Faserrohstoff (Zellstoff, AP und Holzstoff)	7
1.2.4.2 Mahlung (inkl. Stoffaufbereitung und -bereitstellung).....	8
1.2.4.3 Hilfsmittel (Stärke, Füllstoff und Chemikalien).....	8
1.2.4.4 Blattbildung und Presse	9
1.2.4.5 Oberflächenbehandlung durch Leim- oder Filmpresse	11
1.2.4.6 Trocknung:	11
1.3 Fazit	14
1.4 Verarbeitungsprozesse	14
1.4.1 Druck und Verpackung.....	14
1.4.2 Hilfsmittel (Feuchtmittel, Leime, Druckfarben)	15
1.4.3 Lagerung	15
1.5 Messmethoden:	15
1.5.1 Direkte Messung von Dimensionsänderung	15
1.5.2 Physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften mit Bezug zum Dimensions- verhalten	15
1.5.3 Benetzung und Wasserpenetration	16
2 Forschungsziel	16
3 Charakterisierung des Dimensionsstabilität ausgewählter Papiersorten	16

3.1	Untersuchte Papiere.....	17
3.2	Untersuchungsmethoden	19
4	Untersuchungsergebnisse und Diskussion	20
4.1	Direkte Messung von Dimensionsänderungen an verschiedenen Papieren.....	20
4.2	Physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften mit Bezug zum Dimensionsverhalten von Papier.....	29
4.3	Einfluss von Wasserbenetzung und Wasserpenetration	41
4.4	Abhängigkeit lokaler Dimensionsänderungen (Blasigkeit) von papiertechnologischen Eigenschaften.....	43
4.5	Fazit der Untersuchungen	44
5	Nutzbarkeit der FuE-Ergebnisse	45
	Literaturverzeichnis	46
	Anlagen	51
	Verzeichnis der Abbildungen	62
	Verzeichnis der Tabellen	63
	Verzeichnis der Anlagen.....	64

Zusammenfassung

Dimensionsänderungen von Papier sind ein Maß für den komplexen Qualitätsbegriff „Dimensionsstabilität“. Sie werden durch Längenänderungen innerhalb des Papiergefüges in x-, y- und z-Richtung infolge äußerer Einflüsse, die den Feuchtigkeitsgehalt des Papiers und den Quellungsstatus der Fasern und Feinstoffe beeinflussen, initiiert. Die Ursache für Dimensionsänderungen sind das anisotrope Quell- und Schrumpfungsverhalten von Faserstoffen, sowie die verstärkte Quellung der Feinstoffe unter den maschinentechnischen Einflüssen der Papiererzeugung.

Die anisotrope Quellung oder Schrumpfung der Zellstofffasern ist gekennzeichnet durch eine große relative Änderung der Faserbreite im Verhältnis zur Längenänderung. Feinstoffe können bis zum 6-fachen ihres Eigengewichtes Wasser binden und ihr Volumen vergrößern. Durch die Faserorientierung im und die Zweiseitigkeit von Papier führen diese Phänomene zu Dimensionsinstabilitäten, wenn durch äußere Einflüsse der Quellstatus der Faserstoffe verändert oder Trocknungsspannungen im Papier gelöst werden. Dann kann es zu Dimensionsinstabilitäten wie z. B. Wölbung (Curl) oder zu örtlich begrenzten, sich wiederholenden Verwerfungen (Cockling) kommen.

Chemische Additive können durch Wechselwirkung mit Faserstoffkomponenten die Dimensionsstabilität nachhaltig beeinflussen.

Das vorliegende Projekt zielte auf die messtechnische Ermittlung von Ursachen für temperaturbedingte Verwerfungen von Spezialpapieren, um Dimensionsprobleme frühzeitig im Erzeugungsprozess zu erkennen, gezielt zu beeinflussen und zu vermeiden.

Von fünf Papiererzeugern wurden Papiermuster (ungefüllte/gefüllte, ungestrichene/gestrichene sowie ungeglättete/geglättete ein- und mehrlagige Papiere) mit bekannten Eigenschaften bereitgestellt. Diese Papiermuster wurden einer umfangreichen Charakterisierung und Prüfung unterzogen, um anhand gemessener Kenngrößen, die in Bezug zu dimensionsbeeinflussenden Phänomenen stehen, die Papiereigenschaft Dimensionsstabilität quantitativ zu erfassen und durch mathematisch-statistische Auswertverfahren zu bewerten. Dabei wurden, soweit bekannt, die jeweiligen Papiererzeugungsbedingungen für die Papiermuster, die durch eine Befragung erhoben wurden, berücksichtigt und recherchierte Literaturerkenntnisse einbezogen.

In der recherchierten Fachliteratur beziehen sich zahlreiche Veröffentlichungen auf das Phänomen der Dimensionsstabilität. Dabei fallen die Autoren BRECHT, UESAKA und SALMEN durch häufige Veröffentlichung umfangreicher Arbeiten und Analysen auf.

Die Literaturschau zeigt deutlich, wie sich verschiedene Rohstoff-, Erzeugungs- und Verarbeitungseinflüsse auf die Dimensionsstabilität von Papier auswirken und dass beobachtete Erscheinungen auf ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Einflüsse zurückgeführt werden kann. Dabei liefert die Darstellung zum gegenwärtigen Stand der Technik und des Wissens eine fundierte Phänomenbeschreibung zum Dimensionsverhalten von Papier, wobei insbesondere auf die Einflussgrößen aus der Papiererzeugung und der Verarbeitung bezüglich Curl und Cockling eingegangen wird.

Anhand umfangreicher, exemplarischer Untersuchungen an den bereitgestellten Praxispapieren wurde versucht, die Eigenschaftsbandbreite dimensionsrelevanter Messgrößen zu erfassen, um einen Einblick über die Bandbreite der an die Papiere gestellten Anforderungen vermitteln. Die vorgenommenen Bewertungen zeigten, dass die einzelnen Messverfahren zuverlässige Aussagen zum konkreten Dimensionsverhalten eines bestimmten Papiers liefern. Das belegte eine Regressionsuntersuchung zur Prognose der Blasigkeit von Papier aus dem Verhältnis der Bruchkraft (MD/CD) und dem Formationsindex. Eine generelle Bewertung des Dimensionsverhaltens verschiedener Papiersortimente aus Messgrößen ohne Kenntnis des konkreten Papieraufbaus und der maschinentechnischen Fertigungsparameter ist derzeit nicht möglich. Die Resultate des Forschungsprojektes liefern jedoch Ansätze zur weiteren Strukturierung und Vorgehensweise zur Lösung anstehender Dimensionsprobleme.

Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen Wege auf, dimensionsrelevante Eigenschaften im Papier messtechnisch zu erfassen und zu bewerten. Dadurch können Dimensionsprobleme in der Papier-

erzeugung erkannt sowie Ausschuss und Verarbeitungsschwierigkeiten vermindert oder vermieden werden.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

Danksagung

Dieses Vorhaben (INFOR Nr. 22) wurde mit Mitteln des VDP gefördert.

Die umfangreichen Messungen wurden an Papiermustern aus der Praxis durchgeführt, die von den Vertretern des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt wurden.

Der projektbegleitende Ausschuss tagte dreimal während der Projektlaufzeit. Bei diesen Treffen wurden sehr anregende Diskussionen geführt, die wesentlich zum erfolgreichen Abschluss beitrugen. Des weiteren beteiligten sich einige Firmen aktiv an der Durchführung von Messungen.

Dem VDP und den beteiligten Firmen sei an dieser Stelle für die Finanzierung und die aktive Unterstützung der Arbeiten gedankt.

1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Ausgangssituation

Viele Papiere werden bei ihrer Verarbeitung starken, teilweise extremen Temperaturschwankungen oder wechselnden Klimaten ausgesetzt. Das geschieht beispielsweise sowohl beim Druckprozess, bei der Verarbeitung von Tapete oder beim Aufbringen von Etiketten mittels wasserbasierender oder wasserlöslicher Klebstoffe ebenso wie bei der Extrusionsbeschichtung oder bei der Silikonisierung von Spezialpapieren. In vielen Fällen sind diese Verarbeitungsschritte mit Dimensionsänderungen des verarbeiteten Papiers verbunden und können dadurch Papierverarbeitungsprozesse empfindlich stören oder auch unmöglich machen.

Immer schnellere, komplexe und anspruchsvollere Verarbeitungstechniken sind seit jeher eine Herausforderung für den Papiermacher Papiere zu erzeugen, die diesen technischen Erfordernissen entsprechen, ohne ihre Dimension in unerwünschter Weise zu verändern. Diesen gestiegenen Anforderungen an die Dimensionsstabilität erzeugter Papiere müssen heute hochproduktive Papiererzeugungsanlage, in die meist Oberflächenbehandlungsschritte, wie Leimen, Streichen oder Imprägnieren und Beschichten integriert sind, nachkommen. Dies geschah entweder durch neue Entwicklungen, die primär eine Steigerung der Papiermaschinengeschwindigkeit ermöglichten aber auch gleichzeitig zu einer Vereinheitlichung der Papierstruktur beitrugen. Dazu zählen unter anderem die Gap-former-Technologie und die unterschiedlichen Blas- und Vakuumsysteme in der Trockenpartie. Diese beeinflussen jedoch nicht nur die Runability in der Papiermaschine, sondern auch die Dimensionsstabilität des Endprodukts Papier.

Neben maschinentechnischen Veränderungen vollzog sich auch rohstoffseitig ein Umbruch. Dieser ist gekennzeichnet durch einen wachsenden Einsatz von Kurzfasern Zellstoffen, insbesondere von Eukalyptuszellstoffen, um Formation, Opazität und die Gleichförmigkeit der Papierstruktur zu verbessern und durch steigende Füllstoffanteile im Papier. In den vergangenen 15 Jahren wurde der klassische, nordische Langfasern Zellstoff durch ECF- und TCF-gebleichte Langfasern Zellstoffsortimente weitgehend abgelöst. Dadurch stehen heute dem Papiermacher verschiedene Zellstofftypen mit einem breiten Eigenschaftsspektrum zur Verfügung, um gewünschte Papiereigenschaften auszubilden.

In diese Papiersortimente mit hohen Dimensionsanforderungen hat auch immer mehr Altpapier als Rohstoff an Bedeutung gewonnen. Diese und noch weitere Veränderungen tragen in erheblichem Maße zur Gewährleistung der Dimensionsstabilität bei und werden in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet.

Einflüsse auf die Dimensionsstabilität sind vom Phänomen bekannt, können aber bisher nur unzureichend messtechnisch erkannt und quantifiziert werden, so dass ein gezieltes Einstellen der Papiereigenschaft Dimensionsstabilität im Prozess der Papiererzeugung nur schwer oder gar nicht möglich ist oder auf rein empirischem Wege vorgenommen wird.

Durch die Ergebnisse dieses Projektes sollen Dimensionsstabilitäten in der Papiererzeugung erkannt, sowie Ausschuss und Verarbeitungsschwierigkeiten vermindert oder vermieden werden.

1.1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Problemstellung

Dimensionsänderungen von Papier sind ein Maß für den komplexen Qualitätsbegriff „Dimensionsstabilität“. Sie werden durch Längenänderungen innerhalb des Papiergefüges in x-, y- und z-Richtung infolge äußerer Einflüsse, die den Feuchtigkeitsgehalt des Papiers und den Quellungs- und Schrumpfungs- und Feinstoffe beeinflussen, initiiert. Die Ursache für Dimensionsänderungen sind das anisotrope Quell- und Schrumpfungsverhalten von Faserstoffen sowie die verstärkte Quellung der Feinstoffe.

Die anisotrope Quellung oder Schrumpfung der Zellstofffasern ist gekennzeichnet durch eine große relative Änderung der Faserbreite im Verhältnis zur Längenänderung. Feinstoffe können bis zum 6-fachen ihres Eigengewichtes Wasser binden und ihr Volumen vergrößern. Durch die Faserorientierung im und die Zweiseitigkeit von Papier führen diese Phänomene zu Dimensionsinstabilitäten, wenn durch äußere Einflüsse der Quellstatus der Faserstoffe verändert oder Trocknungsspannungen im Papier gelöst werden. Dann kann es zu Dimensionsinstabilitäten wie z. B. Wölbung oder zum Cockling kommen.

Chemische Additive können durch Wechselwirkung mit Faserstoffkomponenten die Dimensionsstabilität nachhaltig beeinflussen.

Durch eine umfassende Charakterisierung verschiedenartiger Papiermuster sollte festgestellt werden, in welchem Maße heute zur Verfügung stehenden Messmethodiken Ergebnisse liefern, die eine Beurteilung des Dimensionsverhaltens von Papiermustern und ihren Ursachen ermöglichen.

1.2 Dimensionsstabilität von Papier – Begriffe, Ursachen, Erscheinungsformen und messtechnische Erfassung – Stand von Forschung und Technik

Die Darstellung des Standes der Technik basiert auf einer umfangreichen Literaturrecherche, die hauptsächlich deutsch- und englischsprachigen Literatur zum Thema Dimensionsstabilität der letzten Jahre berücksichtigt.

Zunächst wird eine Phänomenbeschreibung durchgeführt. Ausgehend von der allgemeinen Beschreibung der Vorgänge beim Klimawechsel von Papier über die Auswirkungen von direkter Befeuchtung bis zu den Erscheinungen Curl und Cockling wird das Phänomen Dimensionsstabilität erläutert. Anschließend wird eine Übersicht von Herstellungs- und Verarbeitungsparametern gegeben, die Einfluss auf diese ausüben.

Der Aufbau dieser Darstellung lehnt sich dabei weitgehend an das Kapitel 7 „Dimensional Stability“ im Buch Paper Physics[1] an.

1.2.1 Begriffsdefinition Dimensionsstabilität

Hinter dem Begriff Dimensionsstabilität verbergen sich viele verschiedene Phänomene, die in ihrer Auswirkung und in der Art, sie zu messen, sehr unterschiedlich sind. In der Literatur befinden sich deshalb viele Veröffentlichungen, die sich in irgendeiner Art und Weise mit diesem Thema bei Papier, Karton, Laminaten etc. beschäftigen. In der hier vorliegenden Literaturlauswertung liegt der Schwerpunkt auf dem Komplex Dimensionsstabilität ungestrichener Papiere.

Papier verändert als Response auf Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes und der Temperatur seine Dimension [2,3,4,5,6]. Wegen der orthotropen Materialsymmetrie erfolgt dieser Response auf Umgebungsänderungen sowohl in der Papierebene, als auch in z-Richtung (Dickenrichtung) unterschiedlich stark. Bei der Papierherstellung können wegen der speziellen Prozessbedingungen allerdings die Effekte in Längs-(Maschinen-) und Querrichtung verschieden sein.

Unter dem Begriff „Dimensionsstabilität“ versteht man im engeren Sinne vor allem möglichst geringe Längenänderungen der Papierebene („in-plane“) in Maschinen (MD)- und in Querrichtung (CD), wobei das Papier im wesentlichen als zweidimensionales Material angesehen wird.

Verwerfungen („out of plane“) des Materials, die mit einer messbaren Krümmung des Papiers verbunden sind, werden als Rollen oder Wölbung bzw. Roll- oder Wölbungsneigung (Curl) bezeichnet. Darüber hinaus werden unter bestimmten Randbedingungen weitere out-of-plane-Deformationsphänomene wie Wellenbildung und Cockling [5] beobachtet.

Die Deformationseffekte überlagern sich im allgemeinen. Die in-plane Dimensionsstabilität hängt in erster Linie vom MD- und CD-Strukturaufbau des Papiers, hervorgerufen durch die Anisotropie der Faserorientierung, ab, während die Rollneigung hauptsächlich von der Zweiseitigkeit des strukturellen Papieraufbaus in z-Richtung (bzw. bezüglich Ober- und Unterseite des Papiers) bzw. auch von unterschiedlichen Feuchtigkeits- und Temperatureinflüssen in Bezug auf die Ober- oder Unterseite (Feuchtigkeits- und Temperaturgradienten) beeinflusst wird [7].

Schlechte Dimensionsstabilität verursacht häufig in den weiterverarbeitenden Prozessen erhebliche Probleme. Immer wenn das Papier in einem solchen Prozess einem Feuchtigkeitswechsel, einer Trocknung oder direkten Befeuchtung ausgesetzt ist, reagiert das Papier mit einer Formänderung in x-, y- und z-Richtung. Beispielhaft sind im folgenden einige solcher Prozesse aufgeführt:

- Vierfarboffsetdruck,
- Etikettierprozess,
- Verklebung von Faltschachtel- oder Wellpappenkartons,
- Kopierprozess,
- Ink-Jet Druck
- Beschichtung mit Kunststoffen (Silikonisierung, Polymerbeschichtung)
- Streichen von Papier

1.2.2 Grundlagen der Dimensionsstabilität -Wechselwirkungen zwischen Papier und Klima-

Papier unterliegt einem Hystereseeffekt bei der Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit. Hysteresis bedeutet, dass der Feuchtegehalt von Papier bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte unterschiedlich ist bezüglich Adsorption, wenn das Papier aus einer trockeneren Umgebung und bezüglich Desorption, wenn es aus einer feuchteren Umgebung kommt. Weiterhin wird dieser Prozess beeinflusst von der Anzahl vorheriger Klimawechsel [1, 8].

Die Vorgeschichte zum Feuchtigkeits-Temperatur-Regime, dem das Papier beim Herstellungsprozess, insbesondere beim Trocknungsprozess, unterworfen ist, spielt eine erhebliche Rolle für den Grad der Dimensionsstabilität und somit der Roll- bzw. Wölbungsneigung [9,10,11].

Speziell bei Laminaten kann die unterschiedliche Feuchtdéhnung der Teilschichten zur Rollneigung bzw. zu Wölbungen des Materialverbundes führen [4]. Analoge Phänomene können grundsätzlich bei allen bezüglich ihrer Struktur in z-Richtung nicht symmetrischen Materialien, wie z.B. auch bei einseitig gestrichenen Papieren oder Kartons auftreten.

Bei kombinierten Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen überlagern sich die beiden Ausdehnungseffekte.

Der Wärme- bzw. Temperatureausdehnungskoeffizient von Papier ordnet sich in das Niveau anderer technisch relevanter Werkstoffe wie Glas oder Stahl ein (**Tab. 1**).

Tab. 1. Wärmeausdehnungskoeffizienten α_i im Bereich 20 – 100 °C (vgl. [4]);
 $\varepsilon_i = \alpha_i \Delta T$ mit $\varepsilon_i = \Delta l_i / l_i$ als Dehnung (relative Längenänderung) und
 ΔT [K] als Temperaturänderung

Material	α_i [10^{-6} K^{-1}]
Glas	3 - 9
Papier MD	3 - 8
Papier CD	8 - 16
Stahl	10 - 15

Aus **Tab. 1** ist ersichtlich, dass die Wärmeausdehnung des Papiers in Maschinenrichtung (MD) deutlich geringer ausfällt als in Querrichtung (CD). Die Ursache hierfür ist die Anisotropie in der Wärmeausdehnung der Zellstoff-Fasern, die bevorzugt in MD-Richtung ausgerichtet sind.

Noch deutlicher zeigt sich eine solche Anisotropie bei der Feuchtdehnung (Hygroexpansion) von Papieren (vgl. **Tab. 2**), da die Quellung der Fasern bei Feuchtigkeitsaufnahme morphologisch bedingt fast ausschließlich eine Hygroexpansion in Dickenrichtung bewirkt, während die Expansion in longitudinaler Faserrichtung sehr gering bleibt. Das Verhältnis von radialer zu longitudinaler Expansion der Fasern beträgt etwa 20 : 1 [5,6].

Die Feuchtdehnung (von Papier ist im Vergleich zur Wärmeausdehnung der weitaus dominierende Effekt. Sie ist im Bereich von Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit (RH) der Größenordnung 70% etwa um einen Faktor 25 größer als die thermisch bedingte Expansion bei Temperaturänderungen im Bereich um 15 °C [4]. **Tab. 2** macht die ausgeprägte Anisotropie in der Hygroexpansion von Papier bezüglich der drei Hauptsymmetrierichtungen deutlich.

Tab. 2. Feuchtdehnungskoeffizienten (Hygroexpansionskoeffizienten) β_i von Papier (vgl. [4]);
 $\varepsilon_i = \beta_i (\Delta RH [\%])$

Richtung	β_i [$10^{-6} (\%RH)^{-1}$]
Papier (Maschinenrichtung) MD	20 - 40
Papier (Querrichtung) CD	80 - 240
Papier (Dickenrichtung) zD	1400 - 2800

Der Hygroexpansionseffekt bleibt auch dann noch dominant, wenn das Papier wie im Falle der Druckfarbentrocknung auf hohe Temperaturen erhitzt wird, da der dadurch bedingte Feuchtigkeitsverlust einen Schrumpfungsprozess auslöst, der die thermische Expansion überwiegt.

Entstehen bei Änderungen der Feuchtigkeit oder der Temperatur hinreichend große Gradienten dieser Größen in der z-Richtung des Papiers, führt dies darüber hinaus prinzipiell zu einer mehr oder weniger ausgeprägten und bei Druck- oder Kopierpapieren unerwünschten Roll- oder Wölbungsneigung (Out-of-plane-Deformation).

1.2.3 Phänomenbeschreibung

1.2.3.1 Curl

Curl bezeichnet das makroskopische Rollen in eine oder mehrere Richtungen. So tritt dieses Phänomen bei Zeitungsdruckpapieren auf, die sich in eine Richtung rollen, wenn sie von einer Seite mehrfarbig und von der anderen Seite einfarbig bedruckt wurden. Auch bei Formatpapieren lässt sich eine solche Dimensionsänderung beobachten[1]. Unter diesen Begriff fällt auch die Rollneigung von Rollenpapieren, die eine gewisse Zeitdauer im aufgerollten Zustand verbracht haben,

wobei während dieser Zeitdauer viskoelastische Spannungsrelaxationsprozesse in der Rolle – insbesondere nahe dem Rollkern – auftreten [5].

Von besonderer praktischer Bedeutung für das Auftreten einer Roll- bzw. Wölbungsneigung, das auch als Tellern bezeichnet wird, sind die Trocknungsbedingungen [5,6,7,9,10,11,13,14,15,16,17].

In Abhängigkeit davon, ob die Krümmung des Papiers mit Rollneigung zur Ober- oder Unterseite hin erfolgt, sowie in Abhängigkeit von der Richtung der Krümmungsachse in MD- oder CD-Richtung, bzw. abweichend davon z.B. in Diagonalrichtung (diagonal curl) oder bei Ausbildung von Sattelflächen mit zwei Krümmungsachsen (saddle back curl) sowie S- oder wellenförmige Rollneigung (S curl, waviness), gibt es drei grundsätzliche Typen curl [1]:

- curl bei einem bestimmten Feuchtegehalt beim Herstellungsprozess,
- curl bei Klimaveränderung und
- curl durch einseitige Beanspruchung des Papiers in der Verarbeitung z. B. einseitiger Druck, Tonerfixierung beim Kopierprozess.

Grundsätzlich hängt die Rollneigung von Papieren sowohl von der Vorgeschichte des gesamten Temperatur- und Feuchtigkeits-Regimes des Papiers, als auch von den jeweils aktuellen Feuchtigkeitsbedingungen ab [5,7]. Damit werden Dimensionsstabilität und Rollneigung nachhaltig von den aktuellen Herstellungsbedingungen des Papierproduktes beeinflusst.

Im Bereich der relativen Umgebungsfeuchte von 25-65 % RH und bei Raumtemperatur entwickelt sich lediglich eine meist reversible Rollneigung. Irreversible Formen des Rollens oder Wölbens können auftreten, wenn die relative Umgebungsfeuchte bei Raumtemperatur im Bereich 65-75 % RH oder darüber variiert wird oder bei Einwirkung hoher Temperaturen. Ähnliche Effekte können auch durch viskoelastische Spannungsrelaxationsprozesse hervorgerufen werden.

Relativ kleine Unterschiede in der Dimensionsstabilität bezüglich Ober- und Unterseite erzeugen bereits signifikante Krümmungen eines Papiers mit Rollneigung. Dabei steigt die Krümmung umso stärker, je dünner das Papier ist. Nach [7] kann die Krümmung K [m^{-1}] aus der unterschiedlichen Hygroexpansion und dem Verhältnis der In-plane-Elastizitätsmodule bezüglich Ober- und Unterseite (Indizes 1, 2) sowie aus der Papierdicke t [m] gemäß

$$K = \frac{24 (\beta_2 \Delta M_2 - \beta_1 \Delta M_1)}{t (E_1 / E_2 + E_2 / E_1 + 14)} \quad (\text{Gleichung 1})$$

(β Hygroexpansionskoeffizient, ΔM Änderung des Gleichgewichts-Feuchtigkeitsgehaltes, E Elastizitätsmodule) berechnet werden.

Durch Vergrößerung des mittleren Elastizitätsmoduls (Steifigkeit) der Schicht kann danach die Rollneigung nicht verringert werden; mit wachsendem Verhältnis E_1/E_2 verringert sich dagegen die Krümmung K . Für die relative Größe der Hygroexpansionskoeffizienten β_1 und β_2 ist in starkem Maße die Faser-Orientierung auf der Ober- und Unterseite der Schicht verantwortlich [4,5]. Der Einfluss eines z-Gradienten von internen Trocknungsspannungen wurde bisher nicht näher untersucht.

1.2.3.2 Cockling

Als Cockling wird das kleinflächige oder mikroskopische Aufwölben beziehungsweise Einbeulen der Oberfläche bezeichnet [18,19]. Nach Praast et. al. tritt Cockling „hauptsächlich in Papieren nach dem Kopiervorgang oder dem Bedrucken im Offsetverfahren bzw. mittels Inkjet-Druckern in Erscheinung, und zwar infolge der Einwirkung von Wärme und Feuchtigkeit.“[20]. Überschreitet das Ausmaß der Blasigkeit eine bestimmte Größenordnung, so wird die Qualität des Drucks oder gar die Verarbeitung des eingesetzten Papiers maßgeblich beeinträchtigt. So kann es z. B. zur Stapelschräglage beim Kopierprozess kommen [21] oder beim Inkjet-Druck zu erheblichen Einbußen der Bildwiedergabe bis hin zum Abbruch des Druckprozesses. Cockling kann jedoch auch

schon direkt nach der Papierherstellung am Tambour der Papiermaschine festgestellt werden. Besonders für niedrige Flächenmasse, wie Zeitungsdruckpapier, ist eine solche Blasigkeit häufig zu erkennen. Bei Papieren mit höherer Flächmasse tritt dieses Phänomen bedingt durch die höhere Steifigkeit nicht auf.

Besondere lokale Formen von Out-of-plane-Deformationen oder Cockling und Wellenbildung haben ihre Ursachen in erster Linie in einer lokal ungleichmäßigen Befeuchtung oder Entwässerung des Papiers oder beruht auf einer ungleichmäßigen Faserstoffverteilung im Papier, bedingt durch schlechter Formation und durch ausgeprägte Flockenbildung. Bei Praast [20] werden diese eingehend erläutert und diskutiert.

Praast unterscheidet zwischen blasen- und wellenförmigen Cockling Strukturen, die er unter Schrägllicht oder mit Hilfe des codierten Lichtansatzes mittels Bildanalytik auswertet. Weitere Methoden sind unter anderem die berührungslose Abtastung des Musters mit einer anschließenden dreidimensionalen Darstellung und eine Darstellung der Topographie, sowie die Messung des Höhenunterschiedes eines definierten Papierstapels nach der Einwirkung von erhöhten Temperaturen.

1.2.4 Einflussgrößen in der Papiererzeugung und Verarbeitung

Die Einflussmechanismen auf Dimensionsstabilität und Wölbungsneigung von Papieren sind außerordentlich komplex, da insbesondere die Hygroexpansionseigenschaften der Papiere nicht nur von den eingesetzten Faser-/Füllstoff-Komponenten sondern auch vom Herstellungsprozess des Papiers abhängen. Im folgenden wird eine Zusammenfassung der Literatur hinsichtlich der Einflussgrößen und deren Auswirkung gegeben (siehe **Tab. 3**).

Tab. 3. Zusammenstellung einiger wichtiger Einflussgrößen auf Wellig- und Blasigkeit [22].

Parameter	Blasigkeit	Welligkeit
Formertyp	Größere Probleme bei Gapformern	Geringere Probleme bei Gapformern
Stoffauflauf	-	↑
Differenz zwischen Strahl- und Siebgeschwindigkeit	Problematisch bei > 150 m/minl	Optimum bei ca. 140 m/minl Problematisch bei > 160 m/minl
Querschrumpfung	↓	-
Trockenzylinder Anzahl	↑	-
Glättwerk (Linienkraft)	↑	-
Bruchkraft (MD/CD)	↓	↓(nur bei Gapformern)
Feuchtdehnung	↓	↓(nur bei Gapformern)
Porosität	↑	
Formation	↑(nur bei Gapformern)	
Klimaeinfluss	Hohe Luftfeuchtigkeit ist problematisch	
Rollenlagerung	Durch Rollenlagerung reduziert sich das Cockling	

↑ Die Pfeilrichtung zeigt die Änderung der Parameter an, die zur niedrigeren Blasigkeit oder Welligkeit führen

1.2.4.1 Faserrohstoff (Zellstoff, AP und Holzstoff)

Beim Eindringen von Feuchtigkeit oder Wasser ins Papier dringen Wassermoleküle in das Fasergefüge ein, lösen einige Wasserstoffbrücken zwischen Fibrillen, dringen anschließend in die Faserwand ein und bewirken dort ein Quellen der Faser. Dadurch steigt der Anteil gebundenen Wassers in den Fasern und die innere Festigkeit im Fasergefüge nimmt ab.

Der Fasertyp spielt für den Grad der Hygroexpansion eine besondere Rolle (vgl. [5]). Papiere aus Holzstoffen sind aufgrund des Ligningehaltes in der Faser dimensionsstabiler als holzfreie Papiere. Hemicellulosen sind amorph und hydrophil. Sie nehmen begierig Wasser auf und quellen. Der Feuchtdehnungseffekt der Faser wird verstärkt.

Folgender **Tab. 4** ist zu entnehmen, wie groß die Feuchtesättigung bei Papierrohstoffen bei 20°C und 100 % relativer Luftfeuchte ist [1].

Tab. 4. Feuchtesättigung von Papierrohstoffen bei 100 % rel. Luftfeuchte

	Feuchtegehalt	Bemerkungen
Lignin	10 %	Lignin ist hydrophob und amorph. Es verleiht der Faser Druckfestigkeit.
Zellulose	30 %	Zellulose ist hydrophil und überwiegend kristallin, Wasseraufnahme vorrangig in amorphen Bereichen
Hemizellulose	80 %	Hemizellulose ist amorph und hydrophil, starke Wasseraufnahme

Schweizer [23] untersucht den Einfluss des Recycling auf die Dimensionsstabilität. Zusammenfassend wird festgestellt, dass bei häufigem Recycling die Verhornung der Fasern zunimmt und damit die Neigung Wasser aufzunehmen abnimmt. Dagegen verliert die Faser bei jedem Recycling-Zyklus Faser-Faser-Bindungsvermögen, hervorgerufen durch den Verlust an Hemizellulosen. Die Dimensionsstabilität wird dadurch jedoch positiv beeinflusst.

Weitere Rohstoffeinflüsse, die durch das Quellverhalten der Faserstoffe vorgegeben werden, sind bei Erhard et al. in zusammengefasst

1.2.4.2 Mahlung (inkl. Stoffaufbereitung und -bereitstellung)

Durch Mahlung wird das Quellvermögen und die Flexibilität der Faser gesteigert. Dadurch werden die statischen Festigkeiten (Faser-Faser-Bindungen) verbessert. Verstärkte Mahlung führt zwangsläufig zu verstärkter Schrumpfung im Trocknungsprozess. Die Mahlung der Fasern hat nur dann einen relativ geringen Einfluss auf das Hygroexpansionsverhalten des Papiers, wenn das Schrumpfen der Bahn während der Trocknung möglichst vollständig verhindert wird [26]. Zugunsten einer guten Dimensionsstabilität sollte die Mahlung hinsichtlich notwendiger Papierfestigkeit und Dimensionsstabilität optimiert werden, das heißt so wenig wie nötig mahlen, um die Erzeugung von Feinstoffen so gering wie möglich zu halten.

Der Bericht von Karnis [27] untersucht den Zusammenhang von Mittel und Hochkonsistenzmahlung. Ziel der Untersuchungen ist es, den Einsatz an Laubholzzellstoffanteil in Druckpapieren zu erhöhen. Karnis kommt zu dem Schluss, dass die Hochkonsistenzmahlung bei Kurzfaserzellstoffen zu einer Verschlechterung der Dimensionsstabilität führt, da offensichtlich die Fibrillierung und damit das Quellvermögen gesteigert wird. Hierbei müssen grundsätzliche Phänomene mit in Betracht gezogen werden, denn auf der einen Seite führen die kürzeren Fasern zu einer besseren Formation als die Langfasern, auf der anderen Seite jedoch zu verstärkter Quellung und Wasseraufnahme im Blattgefüge und damit zur größeren Dimensionsinstabilitäten.

1.2.4.3 Hilfsmittel (Stärke, Füllstoff und Chemikalien)

Die Dimensionsstabilität der Papiere nimmt mit wachsendem Füllstoffgehalt in der Regel zu, da dabei der relative Anteil von quellfähigem Material und die mittlere Faser-Faser-Bindungsstärke verringert werden. Jedoch liegen zu dieser Problematik bisher nur sehr wenig Ergebnisse vor, die noch keine fundierte Aussage gestatten, denn hier überlagern sich gegenläufige Effekte der Festigkeit und der geringeren Feuchtigkeitsaufnahme [5].

Durch den Einsatz chemischer Hilfsmittel kann heute wirkungsvoll eine Verbesserung der Feuchtdéhnung erzielt werden, indem die Quellung vermindert oder verzögert wird. Neuere Untersuchungen im Fall von Zeitungsdruckpapier sind bei Schall et al [29] zusammengefasst.

Nahezu alle Veröffentlichungen zu diesem Thema beschäftigen sich nicht in erster Linie mit dem Thema Dimensionsstabilität, sondern mit der spezifischen Verbesserung der Qualität bezüglich Festigkeit oder mit der Verträglichkeit der Produkte in Wechselwirkung zu weiteren eingesetzten

Additiven. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass kationische Additive die Quelfähigkeit vermindern.

1.2.4.4 Blattbildung und Presse

Aufgrund der Anisotropie der Einzelfasern spielt die Faserorientierung im Papier eine zentrale Rolle für das Längs-/Quer (MD/CD)-Verhältnis der Feuchtdehnung, wobei diese in der Hauptsache durch die Turbulenzen im Stoffauflauf, das Strahl/Sieb-Verhältnis und die initiale Blattbildungszone beeinflusst werden kann [30].

Daneben beeinflussen auch der Charakter und die Qualität der Faser-Faser-Bindungen, die als Transmitter von Spannungen und Dehnungen im Faser-Netzwerk des Papiergefüges fungieren, ebenfalls die Hygroexpansion und damit die Dimensionsstabilität. Auf diese Weise verstärken hohe Mahlgrade, große Faserflexibilität, Feinstoffe und intensive Nasspressvorgänge den Hygroexpansionseffekt des Papiers. Durch eine schrumpfbehinderte Trocknung kommt dieser Effekt jedoch kaum zum Tragen [1].

Andererseits führt ein Gradient im Füllstoffgehalt in z-Richtung, d.h. bezüglich Ober- und Unterseite des Papiers, zu einem entsprechenden Dichtegradienten und damit zur sogenannten Zweiseitigkeit des Papiers, die bereits per se dem Verarbeiter, insbesondere dem Drucker erhebliche Probleme (Printability) bereitet und darüber hinaus eine der Hauptursachen für die Roll- und Wölbungsneigung darstellt.

Neben dem Entwässerungsvorgang in der Siebpartie der Papiermaschine kann auch die mechanische Entwässerung der Papierbahn in der Pressenpartie Einfluss auf die Ausprägung der Zweiseitigkeit des Papiers nehmen. Durch die gerichtete Migration von Fein- und Füllstoffteilchen können Dichtegradienten in z-Richtung entstehen [31,32], die Unterschiede in der Hygroexpansion bezüglich Ober- und Unterseite des Papiers hervorrufen und als Quelle für Rollneigung fungieren.

Die Hauptursachen hierfür sind entweder das Auftreten von Feuchtigkeits- oder Temperaturgradienten des Papiermaterials oder eine strukturelle Asymmetrie (Zweiseitigkeit) in z-Richtung [4, 6].. Letztere kann u.a. bedingt sein durch Veränderungen der Faser-Orientierung in z-Richtung, unterschiedliche Fein- und Füllstoff-Konzentrationen an Ober- und Unterseite des Papiers (verbunden mit einem Dichtegradienten), einseitigem Strichauftrag oder mehrschichtigem Aufbau des Papiers oder Kartons [3].

Insbesondere die Schwankungen im Mikrobereich in den Parametern Flächengewicht und Faserorientierung wirken sich demnach nachteilig auf die Formation und damit auf den Feuchtegehalt aus. Aktuelle Ergebnisse Aiduns [33] zeigen eindrucksvoll, dass schon in der Blattbildungszone der Grundstein für diese Papierdefekte gelegt werden. So sind in der folgenden **Abb. 1** diese Schwankungen, aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera direkt nach dem Stoffauflauf, in der erwähnten Arbeit ausgewertet worden. Aidun kommt durch Ergebnisse einer Simulationsrechnung zu dem Schluss, dass diese Streifenbildung nicht durch eine Optimierung der Entwässerungszone bis zum Wasserspiegel zu beseitigen ist, sondern nur durch eine optimale Geometrie der Rohrbank im Stoffauflauf minimiert werden kann.

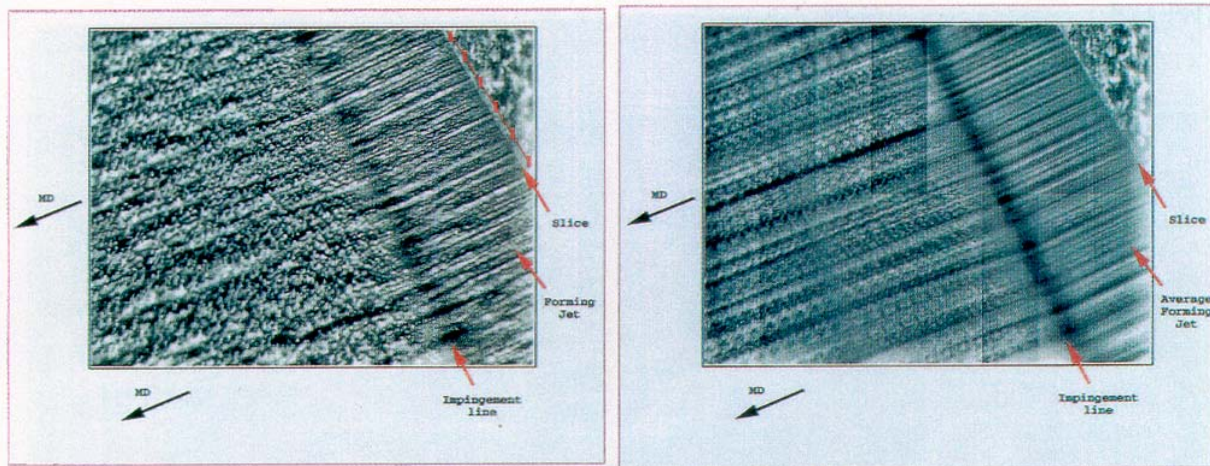


Abb. 1. Streifenbildung durch den Stoffauflauf [33]

Unterschiedliche Versuche einer Papierfabrik für Streichrohpapier [34] und die Erfahrungen der PTS in verschiedenen Beratungsprojekten belegen ebenfalls den großen Einfluss der Blattbildungszone bezüglich Dimensionsstabilität. Dähling konnte in seiner Studie nachweisen, dass der Einfluss der Streichfarbenrezeptur nur sehr gering ist.

Weitere Untersuchungen von Praast [35] zeigen einen leichten Unterschied bezüglich der Blasenbildung (Cockling) bei unterschiedlichen Blattbildungssystemen. So ist in der folgenden **Abb. 2** zu erkennen, dass bei Zeitungsdruckpapier der Gap-former gefolgt vom Hybrid-former eher einen Trend zu blasigem Papier ergibt. Papiere von einem Langsieb haben die geringste Neigung zu Blasigkeit, wobei hier jedoch nur 3 Maschinen untersucht wurden.

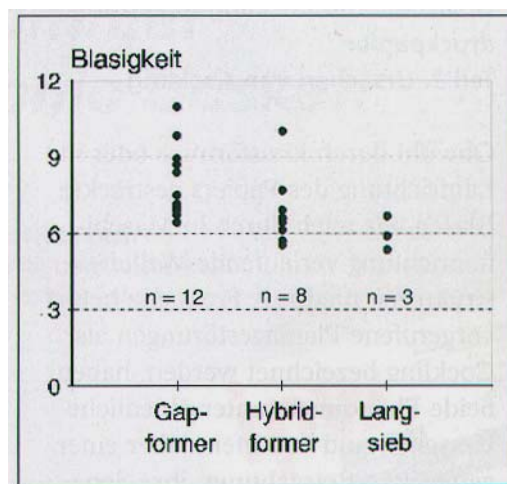


Abb. 2. Blasigkeit bei verschiedenen Blattbildungstypen aus [35]

1.2.4.5 Oberflächenbehandlung durch Leim- oder Filmpresse

Diese Art der Papierveredelung kann zwei Effekte verursachen [1]:

- 1) Stärkeauftrag zum Beispiel in der Leimpresse verbessert sowohl die Festigkeiten als auch die inneren Spannungen im Papier – die Feuchtdehnung steigt
- 2) Hydrophobierende Leime verhindern das Eindringen von Wasser in die Fasern und verzögern dadurch die Feuchtdehnung

Insbesondere Etikettenpapiere müssen in diesem Fall besondere Anforderungen erfüllen. Auf der einen Seite soll der eingesetzte Leim ins Papier wegschlagen, um möglichst schnell einen festen Sitz des Etiketts auf der Flasche zu garantieren. Auf der anderen Seite ist das Papier durch den hohen Schwitzwasseranteil einer hohen Belastung durch Wasser ausgesetzt, dem es standhalten muss.

1.2.4.6 Trocknung:

Die Anisotropie der Papiereigenschaften bezüglich MD und CD ist sowohl auf die Faser-Orientierung als auch auf den – wiederum mit der Faser-Orientierung korrelierten – anisotropen und mehr oder weniger stark behinderten Schrumpfungsprozess bzw. auf die Nass-Dehnung während des Trocknungsprozesses zurückzuführen [10,13,14, 36.].

Daraus ergeben sich bezüglich dieser Thematik folgende Bereiche, die jeder für sich Anlass zu tiefergehender Forschung darstellt:

- Trocknungsstrategie
- Bahnzug während der Trocknung
- Schrumpfungsbehinderung
- Trocknungsspannungen im Papier

Diese vier Gebiete werden im folgenden näher dargestellt. Es wird dabei deutlich, dass die Trocknung nicht nur einen Einfluss auf die Dimensionsstabilität hat, sondern auch auf Festigkeitseigenschaften, wie unter anderem das E-Modul.

a) Trocknungsstrategie

Die Trocknungsstrategie beeinflusst sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch das Hygroexpansionsverhalten – und damit die Dimensionsstabilität und Rollneigung von Papier.

Die jeweilige Trocknungsstrategie kann sowohl die Asymmetrie zwischen MD und CD als auch die Zweiseitigkeit des Papiers in Bezug auf Ober- und Unterseite (Gradienten in z-Richtung) beeinflussen. Letzteres insbesondere dann, wenn Temperatur und Wärmezufuhr in Bezug auf Ober- und Unterseite der Papierbahn in der Trockenpartie ungleichmäßig sind.

Bei asymmetrischen Trocknungsbedingungen mit unterschiedlichen Trocknungsraten an Ober- und Unterseite des Papiers kann auch ein Gradient des internen lokalen Spannungsniveaus in Dickenrichtung auftreten [37], der in Bezug auf die resultierende Rollneigung des Papiers beachtet werden muss. Zudem ist davon auszugehen, dass mit asymmetrischen Trocknungsbedingungen bezüglich der beiden Papierseiten mit jeweils unterschiedlichen Trocknungsraten einer bereits vor der Trockenpartie - z.B. in der Sieb- oder Pressenpartie der Papiermaschine - eingebrachten Zweiseitigkeit des Papiers und deren Auswirkungen auf die Rollneigung entgegengewirkt werden kann.

Wenn das Potential für eine Verringerung der Zweiseitigkeit über die Blattbildungs- und Nasspressprozesse weitgehend ausgeschöpft ist, dann besteht bezüglich der Trocknungsstrategie die Option, durch lokal gesteuerte Trocknung (d.h. ungleichmäßige Wärmezufuhr) bezüglich Ober- und Unterseite eine Minimierung der Rollneigung zu erreichen, indem der resultierende Gradient der Hygroexpansion mit einem Gradienten im inneren Spannungsniveau verringert wird.

Die Korrelation einer solchen Trocknungsasymmetrie unter Kontrolle des aktuellen Feuchtigkeitsgehaltes der Papierschicht mit der Zweiseitigkeit und den daraus resultierenden Rollneigungseigenschaften wurde bisher nicht genauer untersucht.

b) Bahnzug während der Trocknung

Durch eine gezielte Nass-Dehnung (stretching) des Papiers während des Trocknungsprozesses in der Größenordnung von 1 % können E-Modul und Bruchkraft in der betreffenden Zugrichtung ebenfalls erhöht werden, wenn die Dehnung im Trockengehaltsbereich von 50 – 70 % erfolgt [9,10,11,13,38]. In diesem Bereich kann eine Zunahme der molekularen Orientierung in den ungeordneten Cellulose-Zonen offenbar in besonders effektiver Weise erfolgen und damit die Dimensionsstabilität positiv beeinflussen.

c) Schrumpfungsbehinderung

In der Papiermaschine wird die Schrumpfungsbehinderung in MD-Richtung durch den Zug der Papierbahn in der Trockenpartie realisiert, während in der Querrichtung (CD) ein gewisser Grad der Schrumpfung nicht ausgeschlossen werden kann. Eine partielle Schrumpfungsbehinderung entsteht durch die Reibungskräfte der Papierbahn an den Trockenzylindern und den gespannten Trockensieben. Bei nichtunterstützter Bahn findet im wesentlichen keine CD-Schrumpfungsbehinderung statt.

In der Folge schrumpfen die Randbereiche der Bahn während der Trocknung stärker in CD-Richtung als die zentralen Bahnbereiche, was eine größere Hygroexpansion dieser Randbereiche bei Feuchtigkeitserhöhung nach sich zieht [39,40]. Das finale Hygroexpansionsverhalten des Papiers hängt darüber hinaus davon ab, bei welchem Trockengehalt welcher Grad der Schrumpfungsbehinderung realisiert war.

Der während der Trocknung eintretende anisotrope Schrumpfungsprozess ist im Trockengehaltsbereich von 55 – 85 % besonders ausgeprägt, und die Schrumpfung erreicht z.B. bei Sulfatzellstoff-Laborblättern mit isotroper Faser-Orientierung maximal 10 % [9].

Die Bruchdehnung eines Papiers verringert sich deutlich, wenn im Trocknungsverlauf eine Schrumpfungsbehinderung (R, restraint) bis zu möglichst hohen Trockengehalten und im restlichen Verlauf eine freie Trocknung (F) – RF-Strategie – realisiert wird. Reziprok dazu verhält sich die Einstellung des spezifischen Elastizitätsmoduls. Der Hauptanstieg im E-Modul wird mit einer RF-Trocknungsstrategie bis 60 % Trockengehalt für den R-F-Wechsel erreicht, andererseits erfolgt der hauptsächliche E-Modul-Abfall bei einer FR-Strategie bis 60 % Trockengehalt für den F-R-Wechsel [9,11].

Die Verringerung der Hygroexpansion von Papier durch Schrumpfungsbehinderung (restraint) bei der Trocknung hängt vom Grad der Schrumpfungsbehinderung, aber auch vom aktuellen Feuchtigkeitsgehalt bzw. Feuchtigkeitsbereich ab, bei dem die Schrumpfungsbehinderung wirksam war [11]. Minimale Hygroexpansion ist bei möglichst vollständiger Schrumpfungsbehinderung über den gesamten Trocknungsverlauf hin erzielbar.

Bei der Papiertrocknung mit Schrumpfungsbehinderung führen höhere effektive Rohdichten des Papiers zu einer Reduktion der Feuchtdehnung umgekehrt proportional zum In-plane-E-Modul für die betreffende Richtung. Bei freier Trockenschrumpfung kann sich dieses Verhalten umkehren, es findet dann eine Erhöhung der Feuchtdehnung mit steigender Gefügedichte statt [26].

In modernen Trockenpartien wird die CD- Schrumpfungsbehinderung durch konstruktive Maßnahmen bei der Zylinderanordnung und der Trockensiebführung (Slalomführung, einreihige Zylinderanordnung etc.) und durch Anwendung von Vakuum (was gleichzeitig auch der Verbesserung der Runnability dient) deutlich verbessert. So ist es laut Hooles et. al. [40] möglich, die Schrumpfung um 0,5 % zu reduzieren, wenn in der Trockenpartie Blaskästen bzw. Vakuumkästen eingebaut sind.

In jüngerer Vergangenheit wurden aufgrund dieser Erkenntnisse einige Neuentwicklungen von Papiermaschinenbauern auf den Markt gebracht. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass je nach Kombination von einreihigen und zweireihigen Trockenpartieabschnitten ein stärkeres Schrump-

fungsquersprofil eintritt [41]. Das Profil insgesamt weist im Gegensatz zur zweireihigen Trocknung sehr steile Ränder auf, jedoch eine breite Zone geringerer, gleichmäßiger Schrumpfung [42].

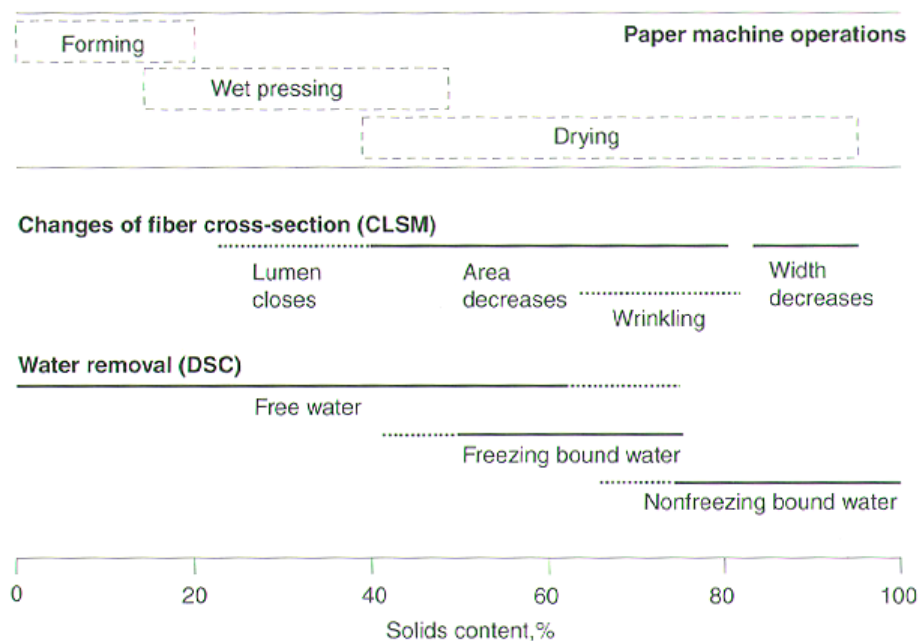


Abb. 3. Zusammenhänge zwischen Trockengehalt während des Herstellungsprozesses und der Faserausrichtung in Querrichtung.[1]

d) Innere Spannungen

Beim Trocknungsprozess unter Schrumpfbegrenzung bzw. durch Dehnung der Bahn in Laufrichtung werden Trocknungsspannungen (zusätzliche innere Spannungen) in das Papiergefüge eingebracht [9,10,11]. Nach Htun [15] ist das Niveau dieser Spannungen weitgehend identisch mit dem der Trocknungsspannungen.

Hohe innere Spannungen in einer bestimmten Symmetrierichtung aufgrund der Schrumpfbegrenzung haben eine verringerte Hygro-Reaktivität in dieser Richtung zur Folge. Durch Variation der Trocknungsbedingungen kann die Hygro-Reaktivität um etwa eine Größenordnung beeinflusst werden.

Interne Trocknungsspannungen werden lokal immer dort in das Papiergefüge eingebracht, wo die durch die mechanischen Randbedingungen des Trocknungsprozesses erlaubten Schrumpfungen geringer sind als das lokale maximale Schrumpfpotential. Der Einfluss dieser internen Spannungen auf die mittleren Bindungsstärken der Inter-Faser-Bonds wurde durch Setterholm und Ue-saka [17,43] untersucht.

Bei einem hinreichend hohen Niveau innerer Spannungen (Trocknungsspannungen) im Papiergefüge tritt bei Temperaturerhöhung zusätzlich zur Temperaturexpansion ein weiterer thermischer Effekt durch den Abbau innerer Spannungen auf. Hohe Temperaturen führen dann zu irreversiblen Schrumpfungsprozessen. Die Anwesenheit von Wasser, das die Glas-Übergangstemperatur der Cellulose-Komponenten beeinflusst, unterstützt den Abbau innerer Spannungszustände [44].

Bei Feuchtigkeitszunahme werden die „eingetrockneten“ inneren Spannungen wieder freigesetzt und führen zu einer Kontraktion des Fasergefüges in der betreffenden Spannungsrichtung, so dass eine entsprechende Reduzierung des Hygroexpansionseffektes und damit eine Verbesserung der Dimensionsstabilität eintritt [6, 45].

Die Analyse des Hygroexpansionsverhaltens unter zyklischen Feuchtigkeitsbedingungen zeigt, dass insbesondere die nichtlinearen und irreversiblen Anteile der Hygroexpansion mit der Relaxation der inneren Spannungen korrelieren, die beim Trocknungsprozess unter Schrumpfungsbehinderung in das Papiergefüge eingebracht wurden [16]. Ein weitgehend reversibler und linearer Verlauf der Hygroexpansion über dem Feuchtigkeitsgehalt wird nur bei frei getrockneten Papieren (ohne Schrumpfungsbehinderung) beobachtet. Beide Effekte können im Rahmen eines viskoelastischen Modells [16] getrennt beschrieben werden.

1.3 Fazit

Zwischen den Steifigkeitseigenschaften und dem Hygroexpansionsverhalten (hauptsächlich für die Dimensionsstabilität von Papieren verantwortlich), besteht zumindest im elastischen Bereich eine gut verifizierbare Relation [46,47]. Für eine gegebene Symmetrierichtung (z.B. MD oder CD) ist die Hygroexpansion proportional zum inversen Elastizitätsmodul für die betreffende Richtung, d.h. eine Verbesserung der richtungsspezifischen Steifigkeit führt auch zur Erhöhung der Dimensionsstabilität.

Abweichungen von diesem Proportionalverhalten können bei zyklischen Feuchtigkeitsänderungen auftreten, bei denen unterschiedliche Einflüsse auf den Elastizitätsmodul und die Hygroexpansion wirksam werden können [11].

Die gezielte Beeinflussung sowohl des mittleren Niveaus als auch des z-Gradienten der internen Trocknungsspannungen im Papier durch die Variation von Schrumpfungsbehinderung und Trocknungsasymmetrie bezüglich Ober- und Unterseite im definierten Kontext mit dem Trockengehalt im zeitlichen Verlauf der Papiertrocknung bietet ein noch nicht ausgeschöpftes Optimierungspotential zur Verbesserung der Dimensionsstabilität und zur Minimierung der Roll- bzw. Wölbungsneigung von Druck- und Kopierpapieren.

Die mit einem solchen Optimierungsprozess verbundenen Qualitätsverbesserungen haben u.a. Einfluss auf die Verbesserung der Runability von Formatpapieren in Hochleistungs-Laser-Druckern und –Kopierern, die Verminderung des „Welligwerdens“ beim großformatigen Inkjet-Druck und die Vermeidung des „Welligliegens“ von Formatpapieren und Karton auf Paletten sowie die Verbesserung der Runability in Verarbeitungsmaschinen, z.B. für Faltschachtelkarton.

1.4 Verarbeitungsprozesse

1.4.1 Druck und Verpackung

Fan-out Effekte sind in großem Maße von der Konfiguration der Druckmaschinen abhängig. Erfahrungen der FOGRA und durch Beratungsprojekte der PTS zeigen, dass bei gleicher Einstellung (Abrollung, Zug, Feuchtmittel, etc.) der Druckmaschinen, das gleiche Papier auf der einen Maschine ohne Probleme verdrukt werden kann, auf einer anderen aber zu so großen Problemen führt, dass die Papierrolle gewechselt werden muss.

Maßgeblichen Einfluss hat auch das Gummituch bei Offsetmaschinen und damit die Veränderungen im Druckspalt. Eine genaue Analyse dieser Thematik führt im Rahmen dieser Literatursichtung jedoch zu weit [48, 49].

Ein in der Literatur speziell in der Weiterverarbeitung immer wieder auftauchender Hinweis ist die gleichmäßige Feuchte im Papier während den Verarbeitungsschritten. Treten hier größere Abweichungen auf, so sind die Probleme in aller Regel vorprogrammiert [12, 50]. Oftmals ist jedoch in den kleineren und mittleren Betrieben eine Klimatisierung nicht vorhanden und auch nicht vorgesehen, so dass diese Probleme für einige Verarbeiter auf absehbare Zeit weiterhin existent sein werden.

1.4.2 Hilfsmittel (Feuchtmittel, Leime, Druckfarben)

Feuchtigkeits- und Temperaturgradienten können auch erst während des Verarbeitungsprozesses auftreten, beispielsweise beim einseitigen Auftragen von Druckfarben und deren Trocknung sowie beim Fixieren des Toners durch einseitige Wärmezufuhr während des Kopierprozesses.

Besonders beim Offsetdruck kann eine zu schnelle Hydroexpansion zu verschiedenen Problemen führen. Ist dies in Längsrichtung der Fall, so kann es zu Bahnspannungseinbrüchen in der Druckmaschine kommen und damit zu Verdruckproblemen. Ist die Querrichtung z. B. empfindlich gegenüber Feuchtmittel, so führt dies zum Fan-out Effekt, auch Passerdifferenzen genannt, im Mehrfarben Offsetdruck [1, 51].

In verschiedenen Veröffentlichungen werden die Einflüsse der Druckfarbe, Feuchtmittel, Leime etc. diskutiert. Papier reagiert bei Kontakt mit diesen Flüssigkeiten, hauptsächlich mit dem enthaltenen Wasser. Es treten die bereits erläuterten Effekte, die bei Wiederbefeuchtung beobachtet werden ein. Steigender Wassergehalt des genutzten Hilfsmittels beeinflusst dabei die Dimensionsstabilität des Papiers negativ.

1.4.3 Lagerung

Um insbesondere der Rollneigung bei ggf. vorhandener geringer Zweiseitigkeit entgegenzuwirken, muss eine geeignete Klimatisierung des Papiers vor dem Einsatz gewährleistet werden, damit möglichst keine Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes des Papiers unmittelbar vor dem Verarbeitungsprozess eintreten. Dies kann in erster Linie durch eine entsprechende Einstellung der Papiertemperatur vor dem Weiterverarbeitungsprozess erreicht werden, um auf diese Weise den für den Wasserdampftransport in das Papier bzw. aus dem Papier verantwortlichen Dampfdruck zwischen Papier und Umgebungsraum zu egalisieren [52].

Messungen von Praast [22] zeigen, dass Cockling durch eine Rollenlagerung von bis zu 3 Tagen nahezu aufgehoben wird.

1.5 Messmethoden:

Folgende Messungen werden je nach Anwendung und Weiterverarbeitung des Papiers herangezogen, um die Dimensionsstabilität von Papier zu beschreiben. In der Literatur sind darüber hinaus noch zahlreiche weitere Spezialentwicklungen genannt, die hier nicht vollständig Erwähnung finden. Unterscheiden kann man nach drei unterschiedlichen Bereichen:

- Direkte Messung von Dimensionsänderung
- Physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften mit Bezug zum Dimensionsverhalten
- Benetzung und Wasserpenetration

1.5.1 Direkte Messung von Dimensionsänderung

- Feuchtdehnung (DIN 53130)
- dynamische Nassdehnungsmessung nach Gabriel und Grüner (Mütek-Methode) [54]
- dynamische Trockenschrumpfungsmessung EMTEC
- Welligkeit, Blasigkeit über codierten Lichtansatz [20]
- Berührungslose Lasermessung der Oberflächentopographie (z. B. UBM-Microfocus)
- Messung der Papierhysterese im Klimaschrank

1.5.2 Physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften mit Bezug zum Dimensionsverhalten

- Flächengewicht
- Bruchkraft, Bruchdehnung (MC/CD)

- Arbeitsaufnahmevermögen
- Rauigkeit
- Glätte
- Porosität
- Rohdichte
- Formationsmessung
- TSI/TSO Messung
- Mahlgrad
- Wasserrückhaltevermögen
- Festigkeitsmessung in Längs- und Querrichtung (Bestimmung des Elastizitätsmoduls)
- Detektierung von kleinen Flächengewichtsabweichungen an der laufenden Bahn mittels Submillimeterlaser [55]
- Quecksilberporosimetrie

1.5.3 Benetzung und Wasserpenetration

- Grenzflächenenergie (Randwinkelbestimmung)
- Wasseraufnahme nach Cobb (DIN 53132)
- Wasseraufnahme mit einer Laborleimpresse (z.B. Stora Enso)
- Penetrationsverlauf mittels Ultraschall
- Flüssigkeitsausbreitung mit BASF-Adsorptionstest (BAT)
- Bildanalytische Feuchtdehnungsmessung an der laufenden Bahn [56]
- Kurzzeitadsorptionstest nach Bristow
- Vessico Test (KCL-Methode)

2 Forschungsziel

Das vorliegende Projekt zielt auf die messtechnische Ermittlung von Ursachen für temperaturbedingte Verwerfungen von Spezialpapieren, um Dimensionsprobleme frühzeitig im Erzeugungsprozess zu erkennen, gezielt zu beeinflussen und zu vermeiden.

Dabei galt es, die von sechs Papiererzeugern bereitgestellten Papiermuster (beschichtete/unbeschichtete Papiere und mehrlagige Papiere) mit bekanntem Dimensionsstabilitätsverhalten einer umfangreichen Charakterisierung und Prüfung unterziehen, um anhand gemessener Kenngrößen, die in Bezug zu dimensionsbeeinflussenden Phänomenen stehen, die Papiereigenschaft Dimensionsstabilität quantitativ zu erfassen und durch mathematisch-statistische Auswertverfahren unter Berücksichtigung der jeweiligen Papiererzeugungsbedingungen zu bewerten, soweit diese zugänglich waren.

3 Charakterisierung der Dimensionsstabilität ausgewählter Papiersorten

Das Phänomen der Dimensionstabilität ist, das zeigt die Darstellung zum der Stand der Technik, umfassend hinsichtlich der wirkenden Einflüsse untersucht worden. Dies betrifft sowohl stoffliche Einflüsse als auch die Einflüsse einzelner Prozessstufen von der Faserstoffaufbereitung bis zur

Papierverarbeitung. Diese Tatsache verdeutlicht **Abb. 4** für den Papiererzeugungsprozess. Für Papierverarbeiter aber auch für Papiererzeuger stellt sich oftmals die Frage, das Dimensionsstabilitätsverhalten vorliegender Papiermuster zu vergleichen bzw. zu bewerten, um dadurch entweder für die Verarbeitung geeignete Papiersortimente auszuwählen oder gezielt Rohstoff- und Prozesseinflüsse zu steuern. Hierbei besteht die Notwendigkeit, geeignete Messwerte zu finden, die Auskunft über das Dimensionsstabilitätsverhalten von Papier geben und seine Ursachen aufdecken. Die Beantwortung dieser Fragestellung, das zeigt die Auswertung der Literatur, ist äußerst komplex und kaum durch ein einzelnes Forschungsprojekt zu beantworten.

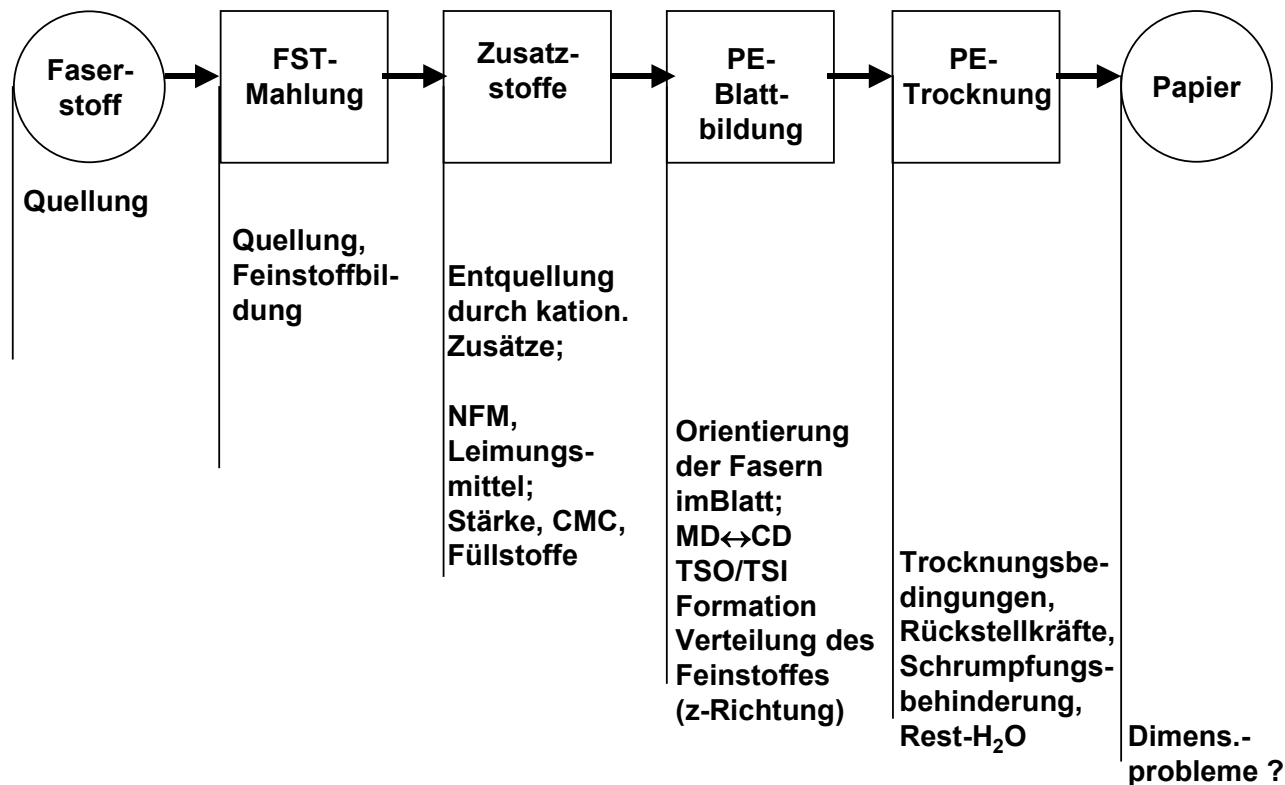


Abb. 4. Rohstoff- und Prozesseinflüsse auf die Dimensionsstabilität von Papier

Deshalb wurde in Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Firmen eine pragmatische Vorgehensweise vereinbart, um generelle Zusammenhänge zwischen dimensionsrelevanten Messgrößen von Papiermuster und Papiereigenschaften aufzuzeigen. Dadurch sollte es gelingen, komplexe Zusammenhänge messtechnisch zu erfassen und zu bewerten.

3.1 Untersuchte Papiere

Zur Beurteilung des Dimensionsverhalten von Papier wurden von fünf Firmen gezielt Musterpapiere bereitgestellt. Diese Musterpapiere spiegeln eine breite Palette verschiedenster Papiersorten wieder. Das verdeutlicht die **Tab. 5**, in der die detaillierte Papiermusterbezeichnung anonym erfolgt

Tab. 5. Untersuchte Papiersortimente mit Probenahmeort und Musterbezeichnung

Firma	Probeort	Nr	Musterbez.	Bemerkungen
A	FS	1	A/FS/1	1 FS, holzfr. Silikonpapier (Sk.), 90 g/m ² , gefüllt
A	M	1	A/M/1	2 M, holzfr. Silikonpapier (Sk.), 90 g/m ² , gefüllt
A	FS	2	A/FS/2	3 FS, holzfr. Silikonpapier (Sk.), 90 g/m ² , ungefüllt
A	M	2	A/M/2	4 M, holzfr. Silikonpapier (Sk.), 90 g/m ² , ungefüllt
A	FS	3	A/FS/3	Tapetenduplex, 120 g/m ² , FS
A	M	3	A/M/3	Tapetenduplex, 120 g/m ² , M
A	FS	4	A/FS/4	Tapetenduplex, 115 g/m ² , FS, ungestrichen
A	M	4	A/M/4	Tapetenduplex, 115 g/m ² , M, ungestrichen
B	FS	5	B/FS/5	Streichrohpapier, FS, 50 g/m ²
B	M	5	B/M/5	Streichrohpapier, M, 50 g/m ²
B	FS	6	B/FS/6	gestr. Papier, FS, (n. SM) 90 g/m ²
B	M	6	B/M/6	gestr. Papier, M, (n. SM) 90 g/m ²
B	FS	7	B/FS/7	gestr. Papier, FS, (n. SK) 90 g/m ²
B	M	7	B/M/7	gestr. Papier, M, (n. SK) 90 g/m ²
C	FS	8	C/FS/8	SC 56 FS
C	M	8	C/M/8	SC 56 M
C	FS	9	C/FS/9	EP 70 FS
C	M	9	C/M/9	EP 70 M
C	FS	10	C/FS/10	MWC 80 FS
C	M	10	C/M/10	MWC 80 M
D	FS	11	D/FS/11	Muster 1 FS, Streichrohpapier, 90 g/m ²
D	M	11	D/M/11	Muster 2 M, Streichrohpapier, 90 g/m ²
D	FS	12	D/FS/12	Muster 3 FS, gestr. Kopierpapier, 120 g/m ²
D	M	12	D/M/12	Muster 4 M, gestr. Kopierpapier, 120 g/m ²
D	FS	13	D/FS/13	Muster 5 FS, Streichrohpapier, 69 g/m ²
D	M	13	D/M/13	Muster 6 M, Streichrohpapier, 69 g/m ²
D	FS	14	D/FS/14	Muster 7 FS, Bilderdruck, glänzend, 115 g/m ²
D	M	14	D/M/14	Muster 8 M, Bilderdruck, glänzend, 115 g/m ²
E		15	E/15	Muster A: M, Einseitig gestrichen
E		16	E/16	Muster B: M, Einseitig gestrichen
E		17	E/17	Muster C: M, beide Seiten gestrichen
E		18	E/18	Muster D: M, beide Seiten gestrichen
E		19	E/19	Muster E: M, beide Seiten gestrichen

Musterbezeichnung: Firma / Probeort / Papierbezeichnung

Probeort: **FS** – Führerseite
 M – Mitte

3.2 Untersuchungsmethoden

In der **Tab. 6** sind die zur Charakterisierung der Papiermuster angewandten Untersuchungsmethoden zusammengefasst. Es erfolgte eine Einteilung nach Methoden, die entweder das Dimensionsverhalten von Papier direkt beurteilen oder darauf wirkende Einflüsse charakterisieren. Letztere Methoden beinhalten sowohl die Messung physikalischer Papiereigenschaften als auch die Flüssigkeitsbenetzung und die Kinetik der Flüssigkeitspenetration ins Papier.

Tab. 6. Angewandte Methoden zur Charakterisierung des Dimensionsstabilitätsverhaltens

Beschreibung der gemessenen Phänomen/ Parameter	Methode
Direkte Messung von Dimensionsänderungen von Papier	
dynamische Nassdehnung	Dynamische Messung der relativen Längenänderung bei konstanter Zugspannung, Gerät der Fa. Müttek (1 N/60 mm - nach Gabriel und Grüner, Betriebsanleitung emtec Gerät)
dynamische Trockenschrumpfung	Dynamische Messung der relativen Längenänderung bei konstanter Zugspannung, Gerät der Fa. Emtec, Leipzig; (1 N/60 mm, 180°C – PTS-Methode – Betriebsanleitung des Emtec-Gerätes ^(*))
Cocklingverhalten als Blasigkeit und Welligkeit	IfP-Methode mit codiertem Lichtansatz: Ermittlung von: Mittelwert der Höhe, Gesamtstandardabweichung, Blasigkeit und Welligkeit <u>Probenvorbehandlung:</u> 4 h bei 23°C und 98 % RH, danach im Normklima (23°, 50% RH) konditionieren und Messung (s.o.)
Dehnungs- und Schrumpfungsverhalten von Papier bei Klimawechsel (Hysterese) (Durchführung bei Sappi Alfeld)	Betriebsmethode Sappi Alfeld (Aufnahme der Klimakurve (relative Längenänderung) bei 23°C und folgendem Wechsel der relativen Luftfeuchtigkeit (RH-Wechsel) 50% → 80% → 50% → 20% → 50% → 80%. Haltezeit jeweils 30 min
physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften von Papier mit Bezug zum Dimensionsverhalten	
Flächenmasse	DIN EN ISO 536
Bruchkraft, Bruchdehnung (MD/CD)	DIN EN ISO 1924-2
Arbeitsaufnahmevermögen (MD/CD)	DIN EN ISO 1924-2

^(*) - Die Methode der Nassdehnung nach Gabriel und Grüner (emtec) wurde dabei so modifiziert, dass auch eine Messung der Schrumpfung unter Temperatureinwirkung möglich wurde. Eine solche Messung war bislang nicht verfügbar und kann wertvolle Informationen über das Verhalten von Papieren bei extremen Temperaturschwankungen liefern. Die Messung mit Temperaturen von bis zu 180 °C durchgeführt, wobei die Papiere ähnlich der Praxis voll austrocknen. Dabei kann anschließend das Rückstellverhalten bei Feuchtaufnahme ebenfalls erfasst werden. Das Messgerät ist mittlerweile bei Emtec, Leipzig als HSA Modul erhältlich.

Fortsetzung **Tab. 6**

Beschreibung der gemessenen Phänomen/ Parameter	Methode
TSO (Winkel), MD/CD-Verhältnis der Zugsteifigkeitsindices (TSI MD/CD)	Ermittlung der Orientierung der Zugsteifigkeit und Ermittlung der Zugsteifigkeitsindices in MD und CD-Richtung: Ultraschallmethode Lorentzen & Wettre, TSO/TSI-Tester Fa. Lorentzen und Wettre
Gleichmäßigkeit der Masseverteilung im Papierblatt durch bildanalytische Formationsmessung	Bildanalytisch, 4 Aufnahmen je Probe und Auswertung von je 3 ROI's a 62x62 mm ² ➤ Kontrastvariation und Nachbarschaftsanalytik Co-occurrence-Verfahren(Ergebnis durch Farbe und Flächenmasse beeinflusst) ➤ PTS-Methode auf Basis von Grauschwankungen entlang eines Liniengitters bei vorgegebenen Triggerstufen ➤ Powerspektrumsanalyse, Bewertung der Gleichmäßigkeit
Benetzung und Wasserpenetration	
Registrieren der Penetrationsdynamik von Wasser in das Papier	Betriebsanleitung emtec-Gerät pda-c
Benetzung der Papieroberfläche mittels Randwinkelmethode (Oberflächenspannung)	Oberflächenspannung (Randwinkelmethode), PTS-Methode PTS-PP 103/85

4 Untersuchungsergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der exemplarische Untersuchungen an verschiedenen Papiermustern von am Projekt beteiligten Firmen sind in den folgenden **Abb. 5** bis **Abb. 40** zusammengefasst, die auf den Messergebnissen, dargestellt in den Tabellen der **Anlage 1.** bis Anlage 5, basieren. Grundsätzlich liefert die ausführliche Literaturbetrachtung der für Dimensionsinstabilitäten verantwortlichen Phänomen hier schon Antworten zu beobachteten Verhaltensmustern. Darauf wird im Folgenden Bezug genommen und anhand der erzielten Ergebnisse wird das Dimensionsverhalten der untersuchten Papiermuster diskutiert.

4.1 Direkte Messung von Dimensionsänderungen an verschiedenen Papieren

Direkte Dimensionsänderungen von Papier können unter anderem durch Messung der Nassdehnung, der Trockenschrumpfung und des Klimaverhaltens erfasst werden. Im Ergebnis dieser Messverfahren werden Längenänderungen, Wölbungen, die Blasigkeit oder die Welligkeit erfasst. Diese Dimensionsänderungen kann man im Grunde auf zwei Effekte zurückführen: Während das anisotrope Quell- und Schrumpfungsverhalten des Fasermaterials und seine Aufbereitung durch Mahlung für die absolute Stärke der Dimensionsänderung verantwortlich ist, entscheiden maschinentechnische Parameter, insbesondere in der Blattbildung, Entwässerung und Trocknung über Form und Stärke der Phänomen. Dies verdeutlichen auch die Messwerte.

In den **Abb. 5** und **Abb. 6** sind die Nassdehnungswerte nach 2 s und in der **Abb. 7** nach 60 s aufgetragen. Bis auf eine Ausnahme ist die Nassdehnung bei allen Papieren an den Rändern ausgeprägter als in der Mitte. Geht man davon aus, dass die Faserstoffzusammensetzung an Rand und Mitte gleich sind, so muss man hier vor allem die Faserorientierung und die Schrumpfung innerhalb der Papiermaschine für das beobachtete Verhalten verantwortlich machen.

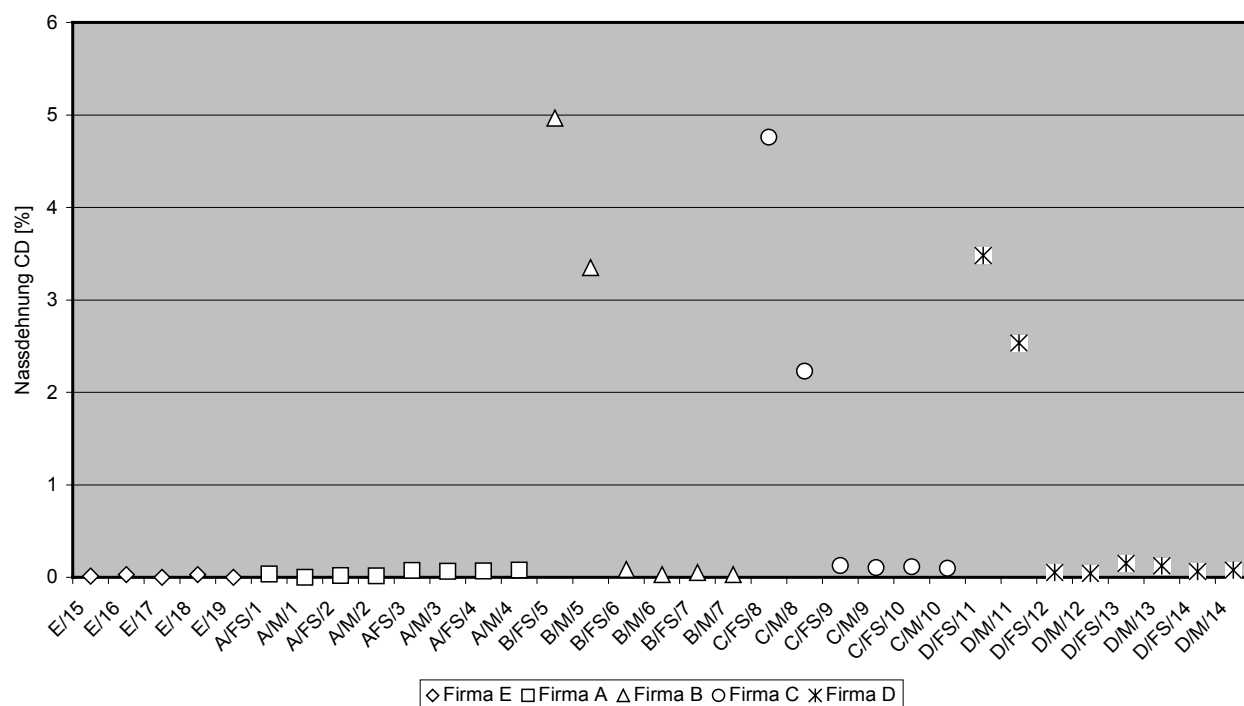


Abb. 5. Nassdehnung der Papiermuster 2s nach Befeuchtung (in CD-Richtung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**, geringe Auflösung

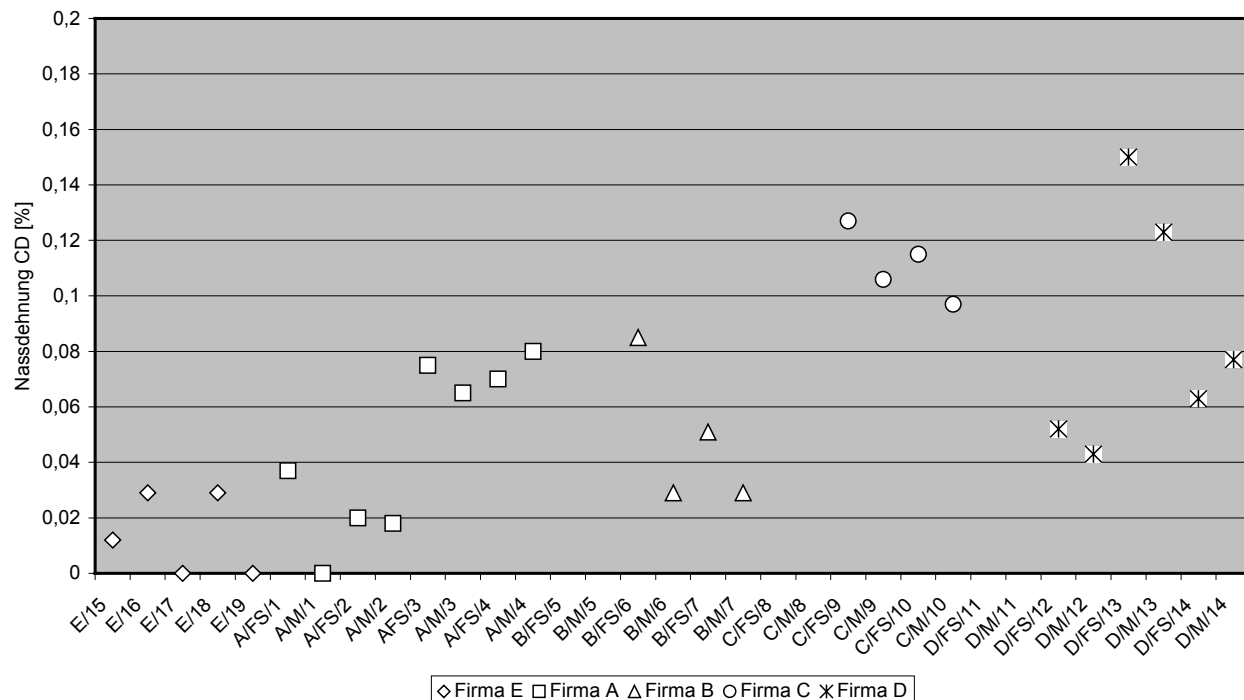


Abb. 6. Nassdehnung der Papiermuster 2s nach Befeuchtung (in CD-Richtung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**, hohe Auflösung

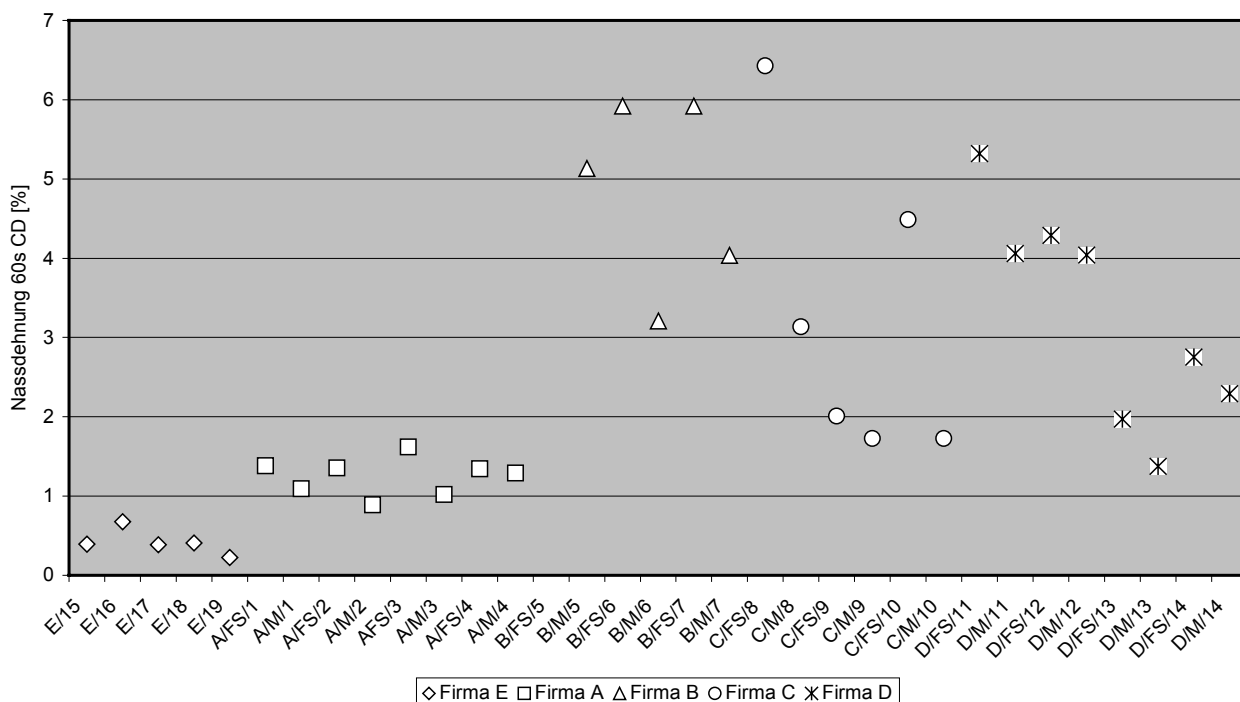


Abb. 7. Nassdehnung der Papiermuster 60s nach Befeuchtung (in CD-Richtung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

Diese Feststellung wird durch das beobachtete MD/CD-Verhältnis der Bruchkraft (**Abb. 20**), das am Rand deutlich eine stärkere Faserausrichtung in MD-Richtung ausweist, gestützt.

Ganz analog, jedoch bedeutend schwächer, stellt sich die Hitzeschrumpfung dar. Die **Abb. 8** und **Abb. 9** zeigen die Hitzeschrumpfung bei 180 °C nach 2 und 60 s. Diese Temperatur wurde mit Blick auf die Weiterverarbeitung in Kopier- und Beschichtungsprozessen gewählt. Die ausgewiesenen Schrumpfungen nach 2 s und 60 s simulieren dabei einen kurzzeitige und länger andauernde Temperatureinwirkung auf das Papier. Dies ist insbesondere für Papiere interessant, die in der Verarbeitung hohen Temperaturen ausgesetzt sind, so zum Beispiel Kopierpapiere, Papier für den Heat-Set Druck oder Silikonrohre.

Beide gewählten Hitzeeinwirkungszeiten sollten dabei grundsätzliches Verhalten in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit ausweisen. Einige Papiere schrumpfen in der Mitte weniger als an den Rändern. Da für die Schrumpfung das Dimensionsänderungspotenzial gegenüber der Feuchte- dehnung deutlich reduziert ist, sind auch hier die beobachteten Effekte, also die beobachteten Längenänderungen, geringer. Die Ursachen hierfür liegen hier in einer weiteren Trocknung des Papiers aus dem jeweiligen Gleichgewichts-Feuchtegehalt des „lutro Papier“.

Feuchtedehnung und Hitzeschrumpfung von Papier wird durch das anisotrope Quellverhalten der Faser im Papiergerüst verursacht und weist deshalb ein ausgeprägtes Längs/Quer-Verhalten in Abhängigkeit von der Faserorientierung auf. In dem Verhältnis, wie durch Wasseraufnahme in der Faserzellwand deren Volumenänderung initiiert wird, hängt von deren Feinbau und Zusammensetzung ab. Deshalb wurden für verschiedene Papiere auch unterschiedliche Ergebnisse der Nassdehnung und Trockenschrumpfung beobachtet. Aus der Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Faserstoffeigenschaften und Dehnungs- sowie Schrumpfungseffekten kann gezielt durch Faserstoffauswahl und Mahlung, die diese Effekte in der Regel verstärkt, Einfluss genommen werden.

Nadelholz Zellstoffe weisen ein geringeres Quellvermögen als Laubholz Zellstoffe auf, da diese einen geringeren Hemicellulosegehalt aufweisen. Sie bedürfen einer intensiveren Mahlung als Laubholz Zellstoffe. Der dabei gebildete Feinstoff beeinflusst das Quellvermögen in z-Richtung in Abhängigkeit von der Feinstoffverteilung im Papier.

Laubholzzellstoffe besitzen eine geringere Faserlänge und weichen im Mahlungsverhalten von Nadelholzzellstoffen ab. Geringere Faserlängen wirken sich günstig auf die Formation und auf das MD/CD-Verhältnis aus. Die mittlere Faserlänge in den ausgewiesenen Papiermustern wird einerseits durch die fasermorphologischen Eigenschaften des eingesetzten Zellstoffs sowie durch die Mahlung festgelegt. Papiere aus hoch ausgemahlten Faserstoffen, wie z.B. Silikonrohpapiere,, weisen eine geringe Faserlänge und einen beträchtliche Feinstoffgehalt auf. Damit ist zu erwarten, dass die Anisotropie des Quellverhaltens (MD/CD-Verhältnis) sich vermindert. Andererseits wird dadurch die Zugänglichkeit des Wassers zu den Faserstofffragmenten erleichtert, wenn diese nicht durch eine Verdichtung des Papiers und Oberflächenbehandlung vermindert wird. Das rasche Eindringen von Wasser führt zu schnellen Dimensionsänderungen.

Holzstoffe zeigen ein sehr geringeres Quellvermögen. Durch satinieren kann eine verbesserte Festigkeit und eine höhere Dichte erzielt werden. Das Quellvermögen der Fasern im Papier wird vermindert, so dass die Dimensionsänderungen deutlich verringert werden.

Die untersuchten Papiere überstreichen ein breites Spektrum verschiedener Papiersortimente (vgl. **Tab. 5**). Deshalb ist es schwierig, verallgemeinerungsfähige Ergebnisse aus den Messungen abzuleiten. Vielmehr wird ersichtlich, dass aus dem Zusammenspiel

- von mahlungsabhängigen Faserstoffeigenschaften
- mit technischen Parametern der Papiermaschine und
- dem zeitlichen Verlauf des Wasser- bzw. Feuchtigkeitszutritts zum Fasermaterial

sich Dimensionsverhaltensmuster ableiten. Insbesondere der letztgenannte Punkt besitzt für geleimte, beschichtete, gestrichene und hoch gefüllte, sowie mehrlagige Papiere Bedeutung.

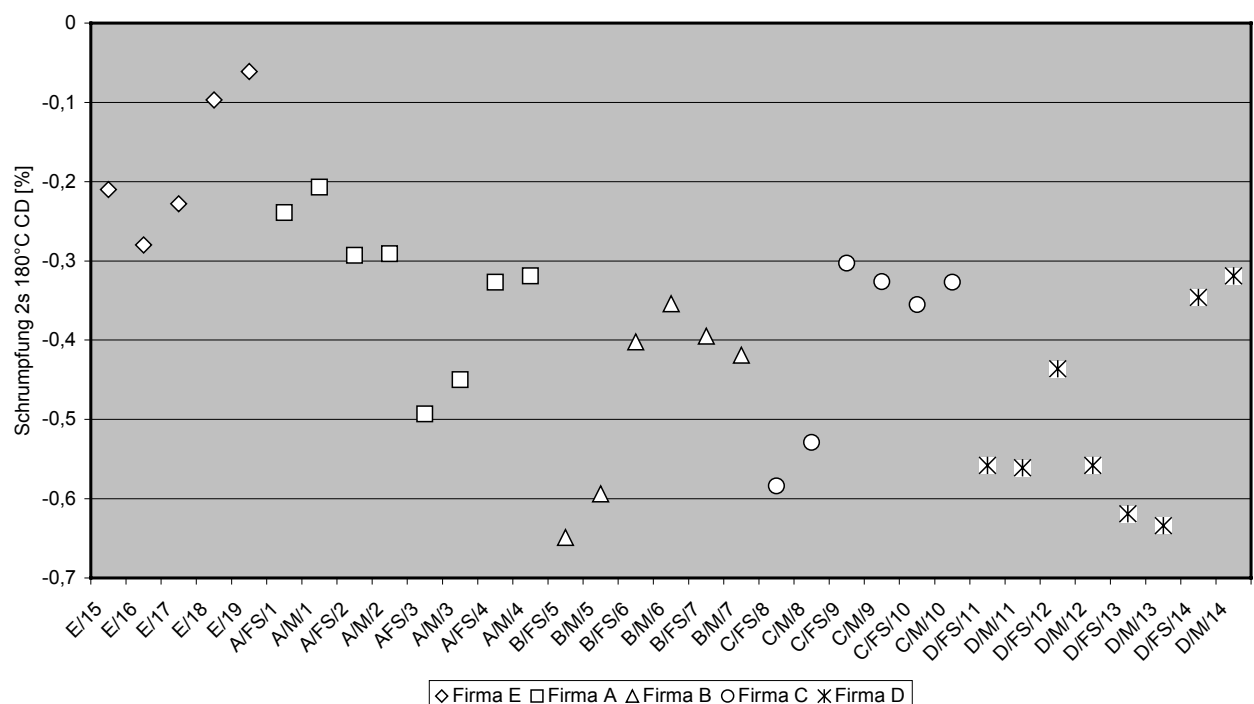


Abb. 8. Trockenschrumpfung der Papiermuster 2s nach Temperatureinwirkung (in CD-Richtung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

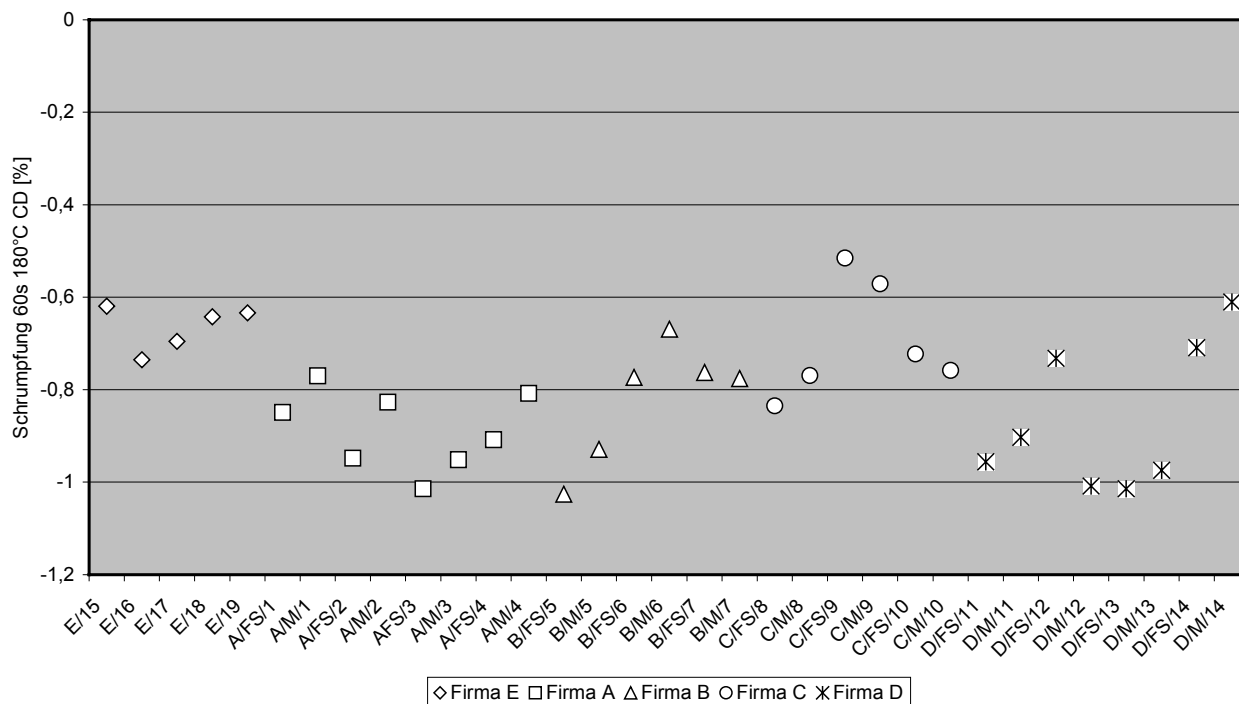


Abb. 9. Trockenschrumpfung der Papiermuster 60s nach Temperatureinwirkung (in CD-Richtung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

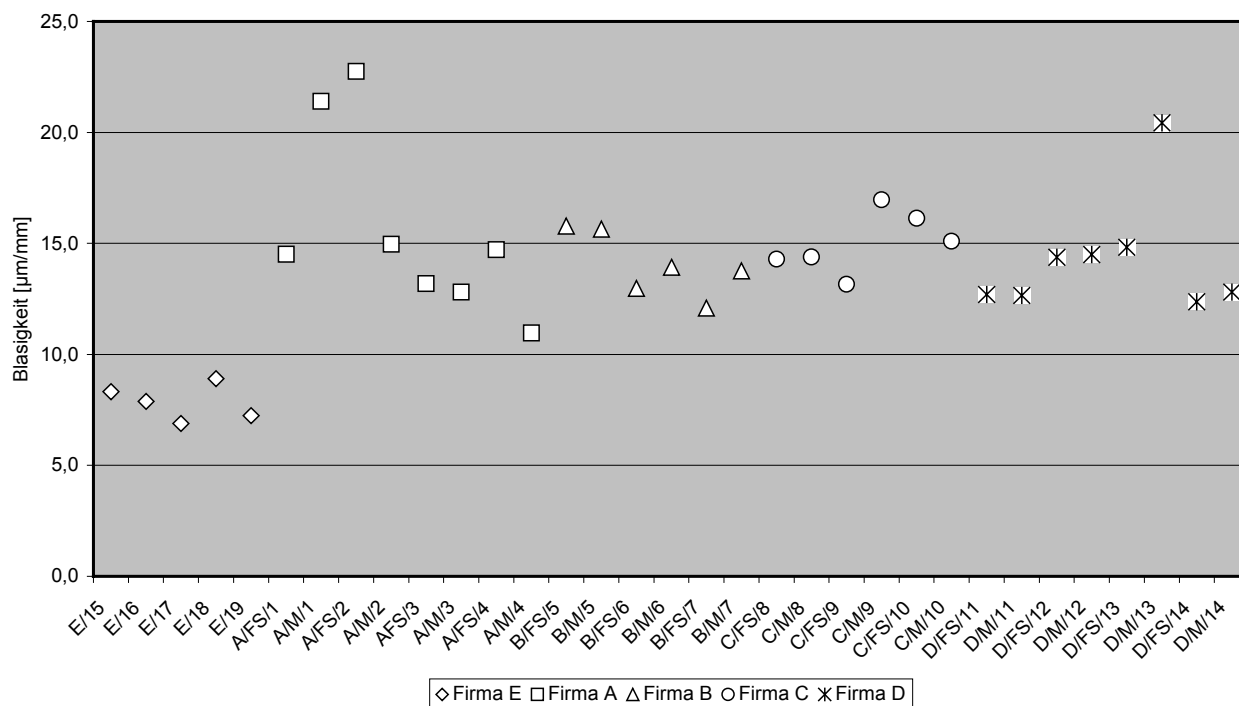


Abb. 10. Blasigkeit der Papiermuster, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel (4 h bei 23°C und 98 % RH, danach im Normklima (23°, 50% RH) konditionieren und Messung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

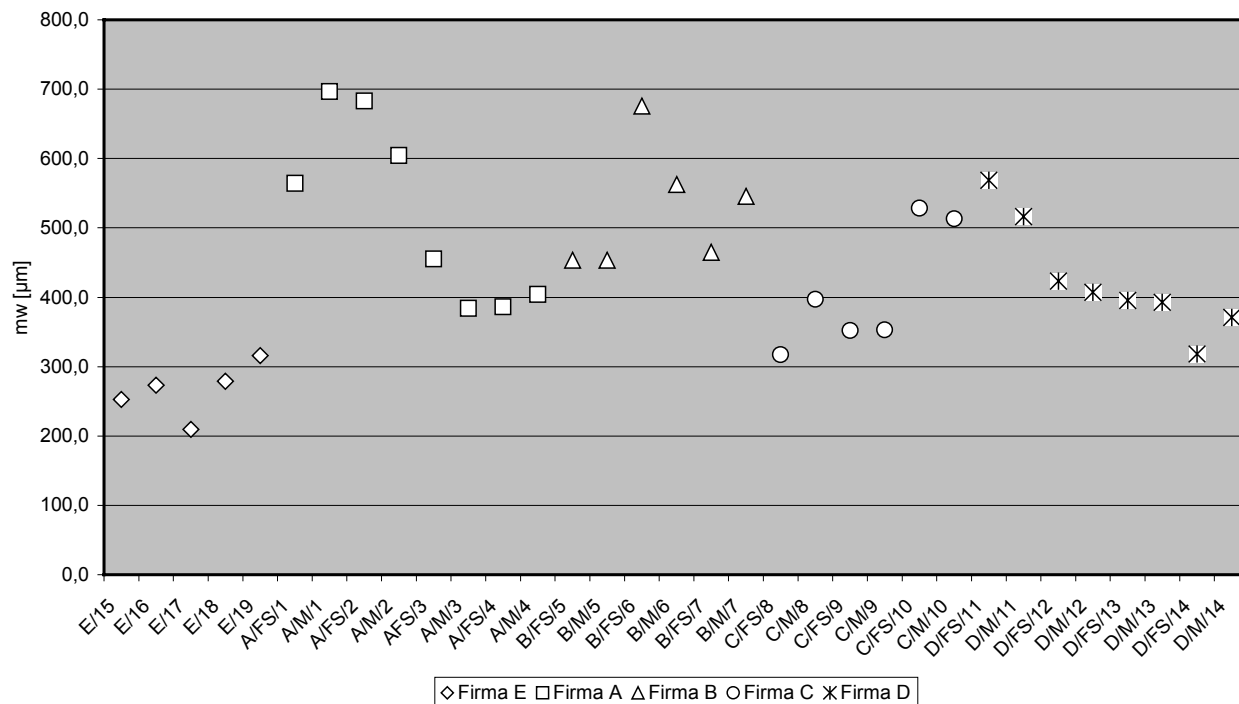


Abb. 11. Blasigkeit, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel: mittlere Blasenhöhe als Dimensionsänderung, vgl. **Abb. 10** und **Abb. 12**; Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

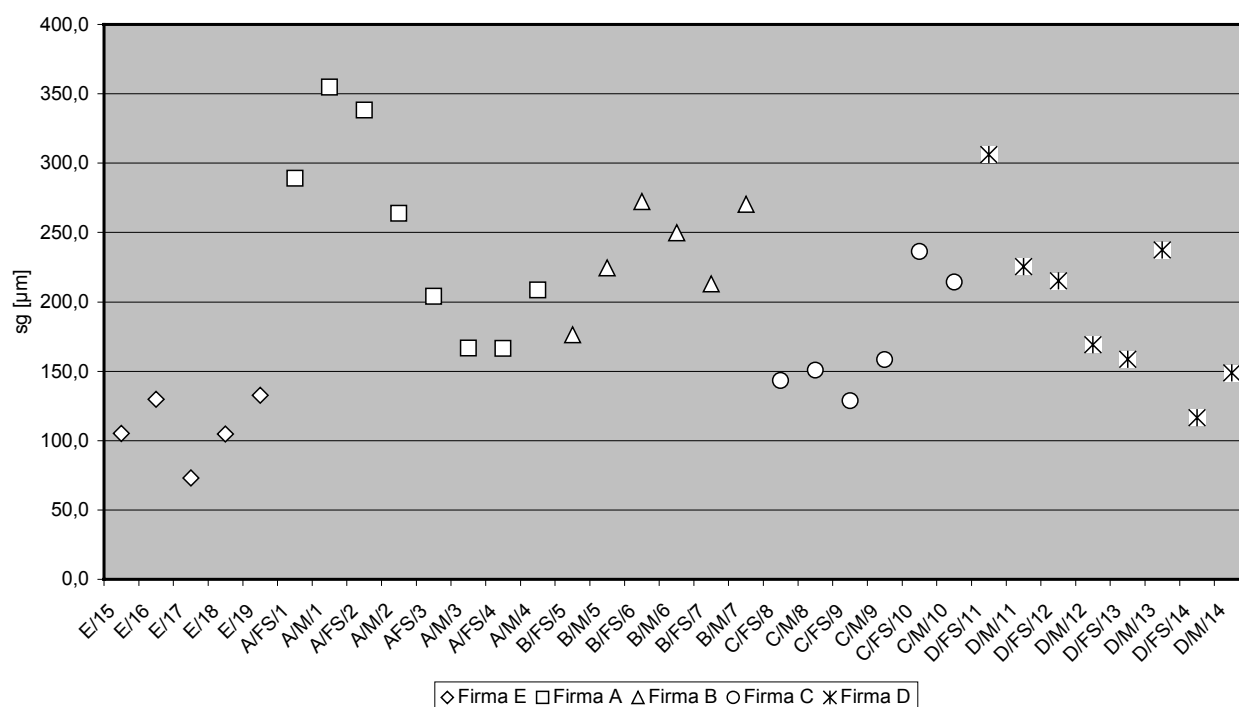


Abb. 12. Blasigkeit hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel: Standardabweichung der mittleren Blasenhöhe als Dimensionsänderung, vgl. **Abb. 10** und **Abb. 11**; Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

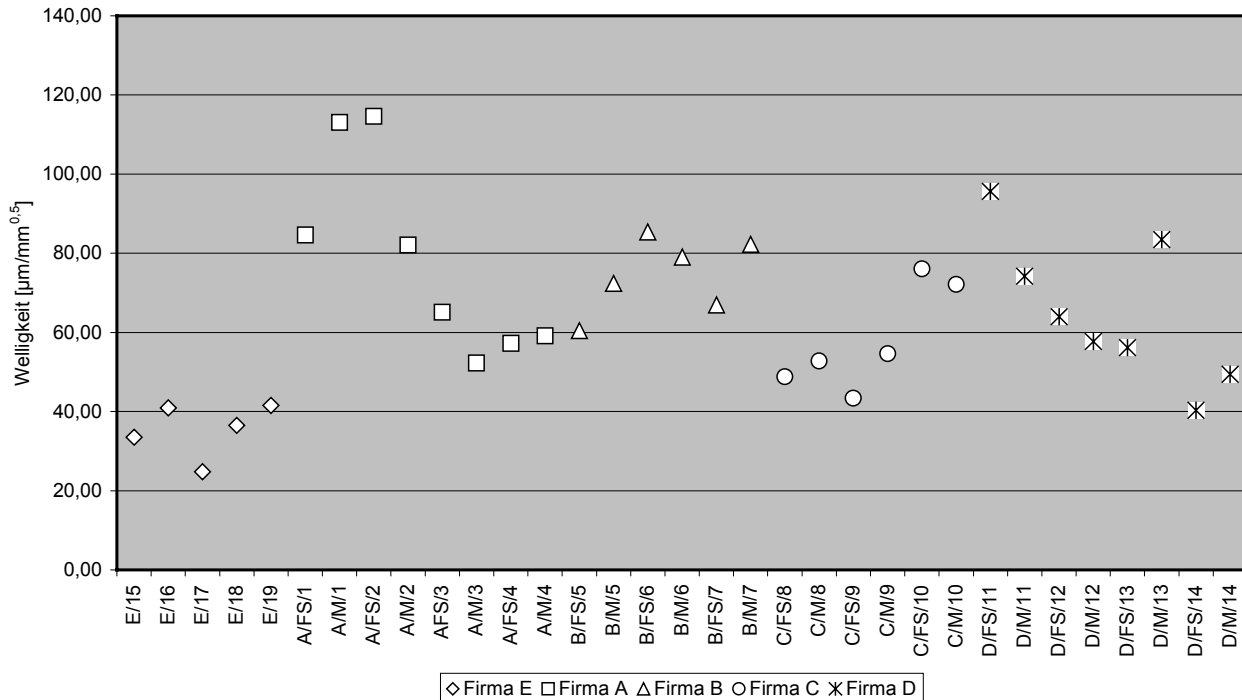


Abb. 13. Welligkeit der Papiermuster, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel (4 h bei 23°C und 98 % RH, danach im Normklima (23°, 50% RH) konditionieren und Messung); Probenbezeichnung siehe **Tab. 5**

Blasigkeit und Welligkeit sind der Ausdruck für lokale Dimensionsänderungen im Papier bei Klimawechsel. Sie werden durch lokale Flächenmassenunterschiede, die sich im Formationsindex widerspiegeln (vgl. **Abb. 35** und **Abb. 37**) und nach neueren Untersuchungen an der TU in Graz vor allem auch durch lokale Unterschiede der Faserorientierung in z-Richtung, die ihren Ursprung in den Prozessbedingung der Blattbildung in der Nasspartie haben, verursacht [58].

In den **Abb. 14** bis **Abb. 17** wird das Klimawechselverhalten ausgewählter Papiermuster durch die Papierhysterese dargestellt. Die untersuchten Papier verhielten sich analog zur beobachteten Feuchtedehnung. Das führt auch dazu, dass das Papier auf eine Veränderung in Richtung mehr Feuchte wesentlich stärker reagiert, als in Richtung trockenerer Umgebungsluft. Es sind auch hier die erheblichen Unterschiede zwischen Führerseite und Mitte erkennbar, wobei die Unterschiede von Fall zu Fall sehr stark variieren. Auch die Unterschiede der Faserorientierung zwischen Mitte und Randbereich spiegeln sich in gleicher Weise wider. In **Abb. 15** ist zu erkennen, dass die Mitte der Papierbahn in der Maschine deutlich weniger auf eine Klimaveränderung reagiert als die Führerseite.

Abb. 16 zeigt die Wirkung des Strichs auf die Dimensionsstabilität. Der einseitige Strich aus Muster 15 und 16 zeigt sich empfindlicher als die Muster 17 und 18. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass das Rohpapier gleich war, so ist dies mit einer gewissen Barrierewirkung des Strichs zu erklären. In **Abb. 17** sind Papiere mit unterschiedlichen Aschegehalten aufgetragen. Das ungefüllte Papier zeigt sich hier reaktiver gegenüber Klimaveränderung als das gefüllte.

Dieses Verhalten wird im Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf der Wasser- oder Feuchtigkeitsaufnahmen (Kinetik – Randwinkel, Wasserpenetrationsverhalten) noch näher erläutert.

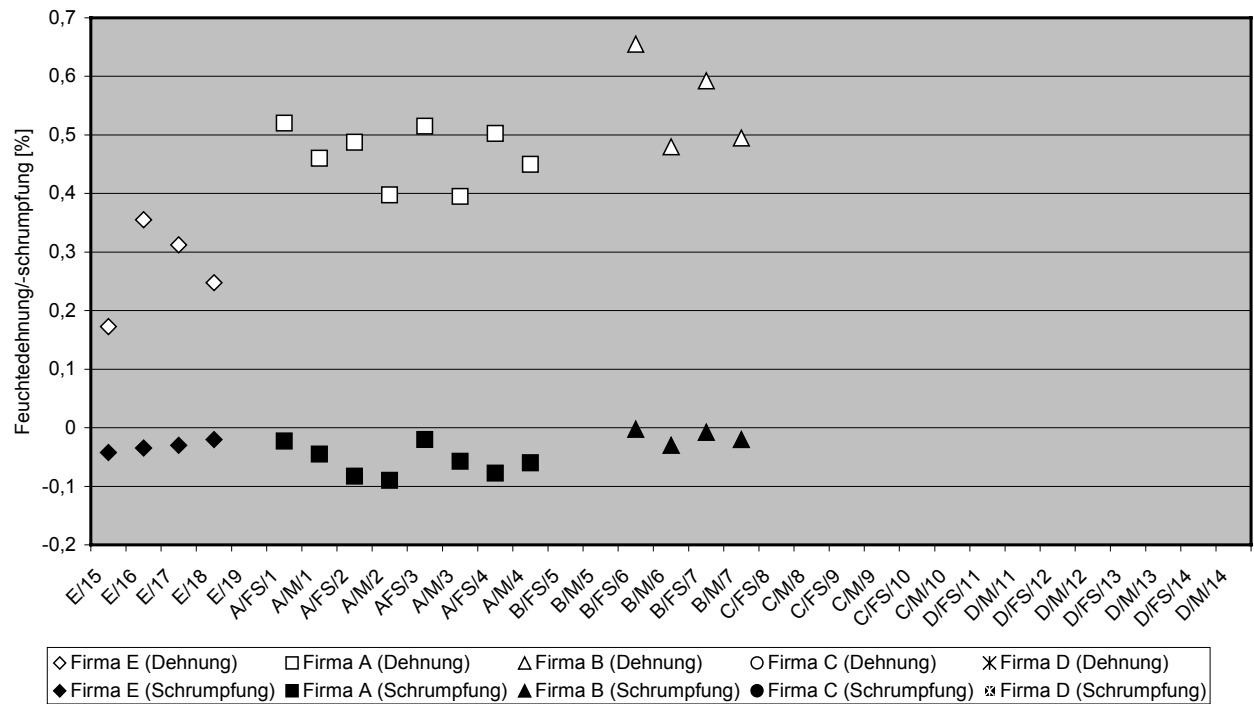


Abb. 14. Feuchtedehnung (50 → 80 % rel. Feuchte) und Trockenschrumpfung (50 → 20 % rel. Feuchte) (entnommen aus der Klimakurve/Hysteresese)

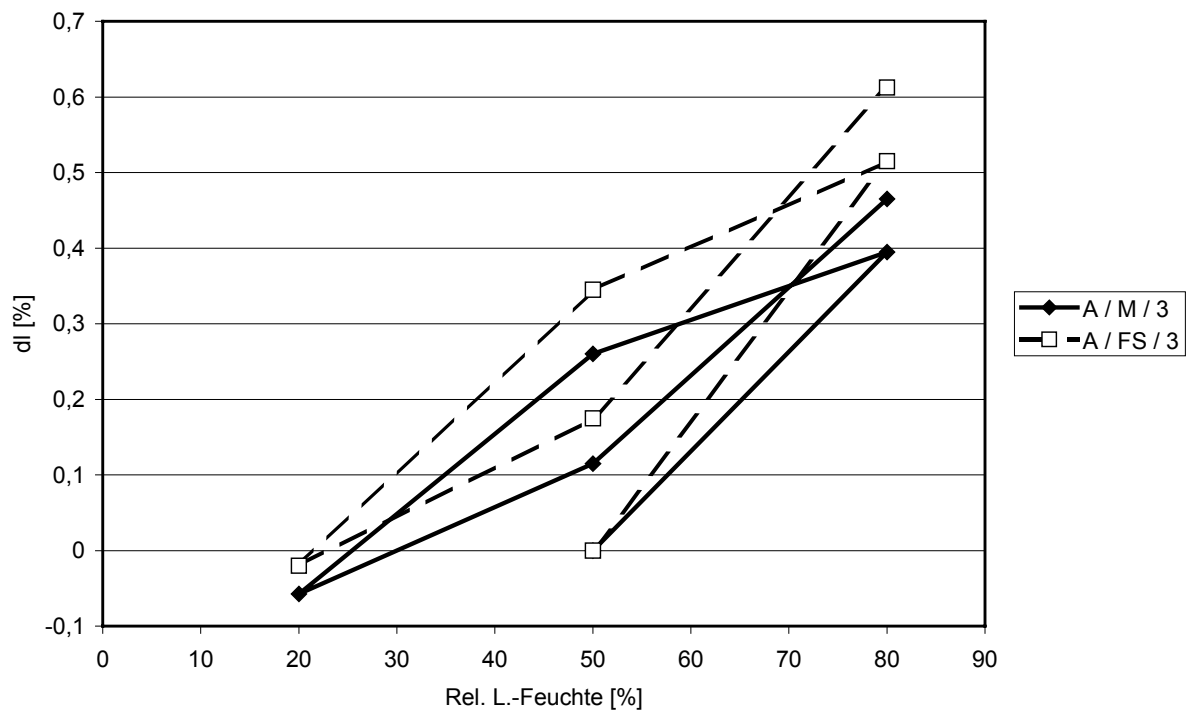


Abb. 15. Beispiel für Unterschiede in der Klimakurve von zwei Papiermustern, die sich hinsichtlich der Probeorte (Führerseite - FS und Mitte – M) auf der Papierbahn unterscheiden

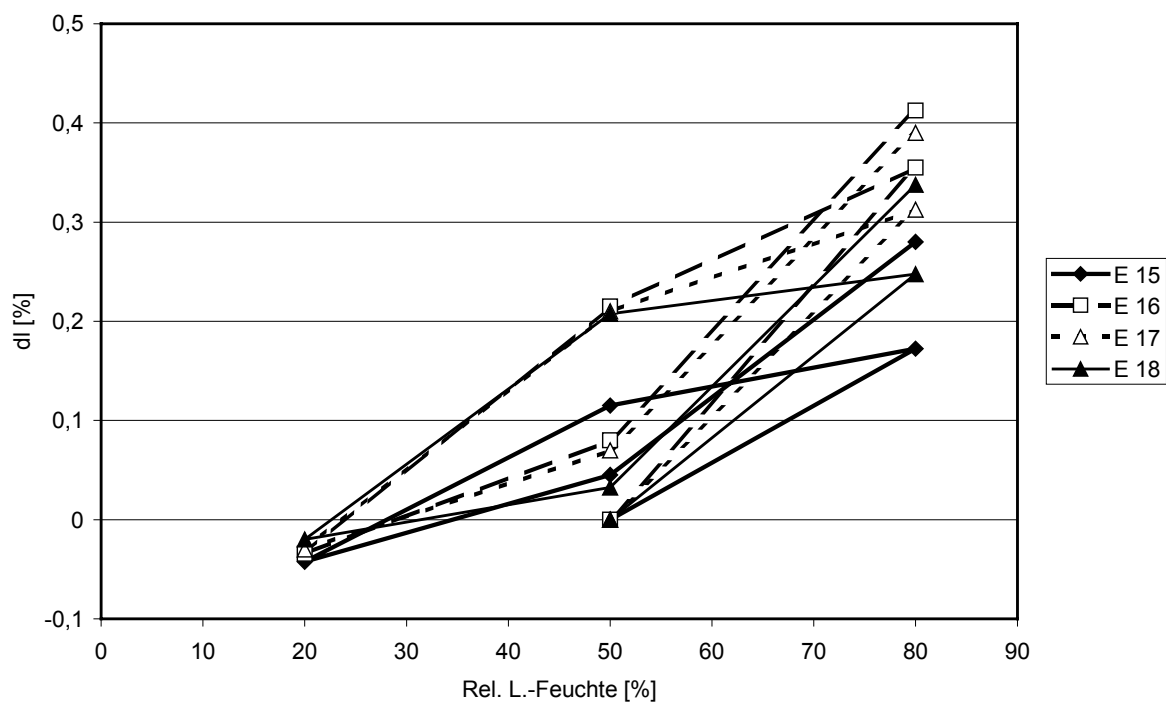


Abb. 16. Unterschiede in der Klimakurve zwischen Papiermustern, die sich im Strichauftrag (ungestrichen und gestrichen) unterscheiden

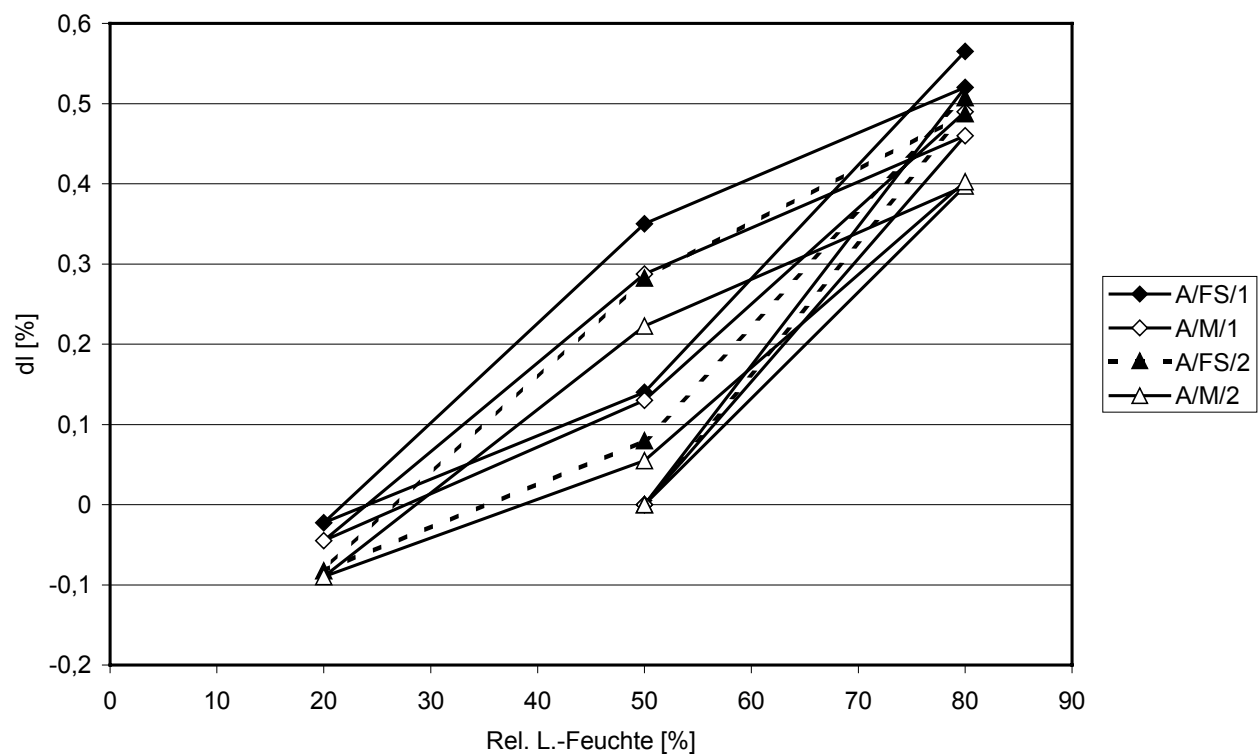


Abb. 17. Beispiel für Unterschiede in der Klimakurve von ungefüllten (1) und gefüllten (2) Papieren in Abhängigkeit vom Probenahmeort (FS – Führerseite, M – Mitte)

4.2 Physikalisch-papiertechnologische Eigenschaften mit Bezug zum Dimensionsverhalten von Papier

In den folgenden Diagrammen **Abb. 18** bis **Abb. 37** wurden jeweils übereinander die untersuchten Messgrößen (Flächenmasse, Bruchkraftverhältnis MD/CD, Bruchdehnungsverhältnis MD/CD, Arbeitsaufnahmevermögen, TSO – Tensile Orientation, TSI – Tensile Stiffness Index und Formationsindex) in Abhängigkeit von Papiersorte und Probenahmeort (oben) sowie die Abhängigkeit der Blasigkeit in Abhängigkeit der jeweils dargestellten Messgröße (unten) dargestellt.

In einem weiteren Diagramm werden dann die genannten Messwerte gegen die Blasigkeit aufgetragen. Die Blasigkeit steht hier für eine insbesondere durch die Blattbildungsbedingungen beeinflusste Dimensionsänderung. Sie soll die Abhängigkeit dieser lokalen Dimensionsänderung von den einzelnen untersuchten Messgrößen darstellen und Voraussetzung für einen Regressionsansatz liefern. Natürlich ist diese Beschreibung der Dimensionsstabilität recht speziell und hängt von der Probenvorbereitung sowie der bewertenden Messmethodik der Blasigkeit ab:

Die im Papier vorliegenden Spannungen und Inhomogenitäten anhand von Blasigkeit und Welligkeit zu verdeutlichen, wurden die Papiermuster für 4 h bei 23°C einer relativen Luftfeuchte von 98% ausgesetzt und danach im Normklima (23°C und 50% RH) konditioniert. Dabei lösten sich die innewohnenden Trockenspannungen und das Papier wurde blasig und wellig.

Mittels der im IfP Darmstadt entwickelten Methode wurde die Topographie dieser konditionierten Blätter vermessen und als Mittelwert der Blasenhöhe (m_w), als Gesamt-Standardabweichung der Blasenhöhe (s_g), als Blasigkeit und Welligkeit ausgewiesen. Je größer der Wert der Blasigkeit und Welligkeit, desto größer die Verwerfung des Papiers. Dabei kennzeichnet die Blasigkeit höherfrequente und die Welligkeit niederfrequente Wechsel der beobachtbaren Erhebungen des vermessenen Papiers.

Bei der Bewertung der Blasigkeit in Relation zu den dargestellten Messgrößen ist die Verschiedenartigkeit der betrachteten Papiersortimente zu berücksichtigen (vgl. **Tab. 5**).

Die Flächenmasse (**Abb. 18** und **Abb. 19**) der untersuchten Papiere überspannte einen Bereich von 50 – 140 g/m². Für diesen Bereich wird nachgewiesen, dass die Blasigkeit von der Flächenmasse abhängt. Diese Aussage wird in Bezug zur Dimensionsstabilität von Papier und Karton allgemeingültig sein, da mit steigender Flächenmasse die innere Stabilität und Festigkeit des Papiergefüges steigt und einer Verwerfung oder Deformation entgegenwirkt.

In den **Abb. 20** und **Abb. 21** sowie **Abb. 28** und **Abb. 29** sind die Bruchkraft und der Zugsteifigkeitsindex (Tensile Stiffness Index – TSI) in Abhängigkeit von der Fertigungsrichtung (MD – (längs) und CD – (quer) zur Fertigungsrichtung) sowie ihr Verhältnis dargestellt. Der TSO /Tensile Stiffness Orientation - **Abb. 26** und **Abb. 27**) gibt an, um welchen Winkel die Zugsteifigkeit von der MD-Richtung abweicht.

Je größer das Verhältnis MD/CD, desto größer ist die Anisotropie des Papiers. Ein annähernd isotropes Papier ist z. B. das Laborblatt. Festgelegt werden diese Eigenschaften durch die Faserorientierung, sowie durch die im Trocknungsprozess fixierten Spannungen im Papier.

Da bei Wasseraufnahme in die Faser der Zuwachs der Faserbreite wesentlich größer ist als ihre Längenänderung, sind die beobachteten Dimensionsänderungen eines Papiers bei Wasseraufnahme bzw. bei Klimawechsel im wesentlichen von der Faserausrichtung und der Richtung der im Papier fixierten Spannungen abhängig. Je größer das MD/CD-Verhältnis, desto größer die Dimensionsänderungen quer zur Fertigungsrichtung. Dem kann vor allem durch maschinentechnische Parameter, wie das Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsverhältnis sowie durch Fasereigenschaften, wie hinreichend feine Fasern (Laubholz und Mahlung) entgegengewirkt werden. Als Maß kann hier das MD/CD-Verhältnis der Bruchkraft (bei vergleichbarer Flächenmasse) herangezogen werden. Ein günstiges Dimensionsstabilitätsverhältnis wird dann vorliegen, wenn ein möglichst kleines MD/CD-Verhältnis einerseits zwischen verschiedenen Papieren und selbstverständlich zwischen unterschiedlichen Probenahmen innerhalb eines Papiers beobachtet werden.

Insbesondere der TSO zeigt die zwischen Strahl und Sieb ablaufenden Vorgänge an. Nach Lorentzen & Wettre soll der Betrag des TSO-Winkels möglichst nahe an 0° liegen, insbesondere für Papiere mit hohen Anforderungen an die Dimensionsstabilität. TSO-Winkel im Bereich von $\pm 3^\circ$ zeigen an, dass noch relativ ausgeglichene Verhältnisse am Stoffauflauf vorliegen. In diesen Bereich fallen die gemessenen TSO-Winkel der meisten Muster. Nachteilig sind auf alle Fälle Schwankungen des TSO innerhalb eines Papiers.

Hinsichtlich des TSI-Wertes in MD-Richtung sollten die Abweichungen zwischen Minimal- und Maximalwert geringer als 10 %, in CD-Richtung geringer als 20 %, sein. Für Papiere mit hohen Dimensionsanforderungen sollten 5 % nicht überschritten werden. Es wird empfohlen, dass der TSI in MD-Richtung im Bereich von 7 –11 kNm/g und in CD-Richtung zwischen 2 und 6 kNm/g, liegen sollte[59]. Ob diese Forderungen praktischen Gegebenheiten immer gerecht wird und ob das angewandte kostenintensive Messverfahren gerechtfertigt bessere Ergebnisse liefert, wurde von den projektbegleitenden Firmen angezweifelt.

Dehnung und Arbeitsaufnahme zeigen die Verformungseigenschaften des Papiers unter Zugbeanspruchung an (**Abb. 22** bis **Abb. 25**). Durch Dehnung und Arbeitsaufnahme kann ein Papier bei Formänderung Energie absorbieren. Dieser Vorgang endet mit dem Bruch, an dem das Papier zerreißt. Formänderungen haben Dimensionsänderungen zur Folge. Sowohl Dehnung als auch Arbeitsaufnahme hängen vom MD/CD-Verhältnis ab und kennzeichnen so, wie das Papier in Abhängigkeit von der Krafteinwirkung Formänderungen vollzieht. Die Dehnung bis zum Bruch schließt dabei sowohl die elastische als auch die plastische Verformung ein. Deshalb sind die beobachteten Formänderungen nur für einen bestimmten Bereich der Krafteinwirkung proportional. Die Möglichkeit der Formänderungen zwischen Zug- und Druckeinwirkung sind dabei verschieden. Sowohl Dehnung als auch Arbeitsaufnahmevermögen kennzeichnen damit strukturelle Eigenschaften des Papiers in Abhängigkeit von der Fertigungsrichtung. Unterschiedliche Messwerte deuten dabei auf strukturelle Inhomogenitäten, insbesondere der Rohdichte, hin, da die Flächenmasse des Mustermaterials weitgehend homogen ist. Diese Schwankungen werden sich dabei in zwei Richtungen auswirken: Die Dimensionsänderung bei Klimawechsel wird innerhalb des Papierblattes Schwankungen unterliegen und durch strukturelle Unterschiede wird auch die Dynamik des Feuchtigkeit Zutritts inhomogen sein. Die beobachteten Unterschiede zwischen den einzelnen Mustern sowie innerhalb einzelner Muster in Abhängigkeit von der Mitte- oder Randlage sind teilweise erheblich.

Formationsunterschiede im Papier sind letztlich lokale Masseschwankungen und damit Inhomogenitäten im Papier. Handelt es sich dabei vorrangig um Faserstoff, bedeuten diese Homogenitätsschwankungen beim Klimawechsel oder bei Wassereinwirkung auch Inhomogenität für das Ausmaß der Quellung im Papier. Die Ergebnisse der Formationsmessungen zeigen die **Abb. 32** bis **Abb. 37**. Kleinere Werte für die Formationsindices verweisen dabei auf eine bessere Formation.

Ermittelt wurden die Blattformation durch die Co-occurrence-Matrix, die PTS-Methode und das Powerspektrum mittels bildanalytische Bewertung der Papiersortimente. Während die Co-occurrence-Matrix den Formationsindex auf Basis von Kontrastvariation und Nachbarschaftsanalytik ermittelt, erfolgt bei der PTS-Methode eine Bewertung der Grauwertschwankungen entlang eines Liniengitters anhand von vorgegebenen Triggerstufen. Mittels des Powerspektrums wird die Gleichmäßigkeit bewertet. Dabei wird eine Aussage über die Häufigkeit der Wolkigkeit getroffen. Während die Co-occurrence-Methode von der Flächenmasse und der Papierfarbe beeinflusst wird sind die anderen beiden Methoden von diesen Größen unbeeinflusst.

Die untersuchten Papiermuster unterscheiden sich teilweise erheblich, wobei gleiche Muster zwischen Randlage und Mitte verglichen wurden. Die Unterschiede zwischen einzelnen Mustern kennzeichnen dabei die Formation auf verschiedenen Papiermaschinen. Hier spielen, wie schon erwähnt, der Faserrohstoff und die Mahlung eine große Rolle. Insbesondere kurzfasrige Stoffe und hinreichend große Turbulenzen sowie eine ausreichende Stoffverdünnung im Stoffauflauf werden die Formation günstig beeinflussen.

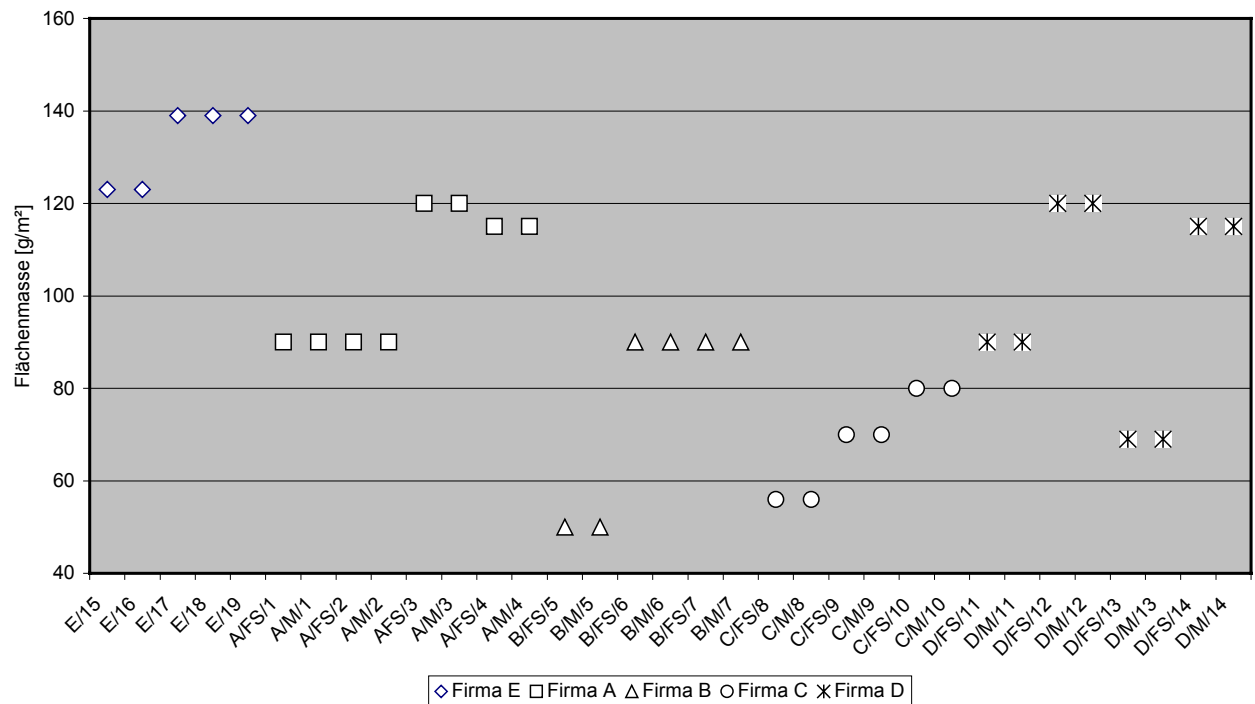


Abb. 18. Flächenmasse der Papiermuster

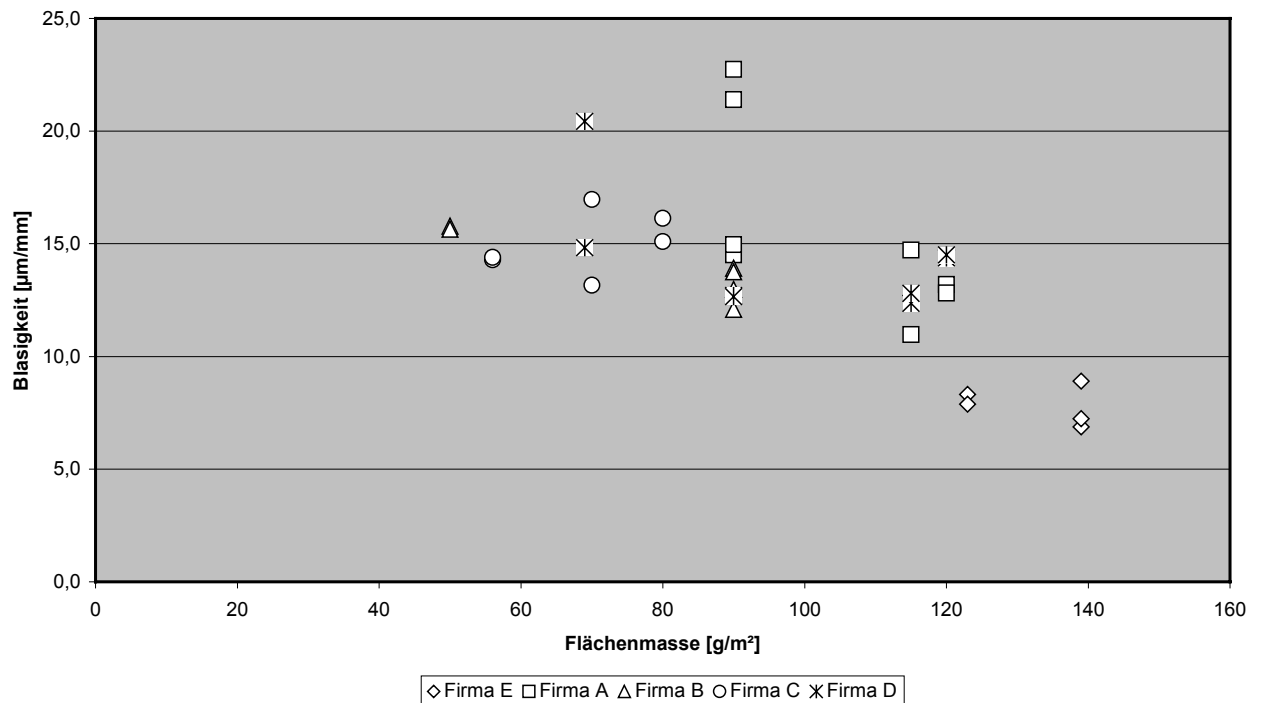


Abb. 19. Einfluss der Flächenmasse auf die Blasigkeit; höhere Flächenmasse reduziert die Blasigkeit

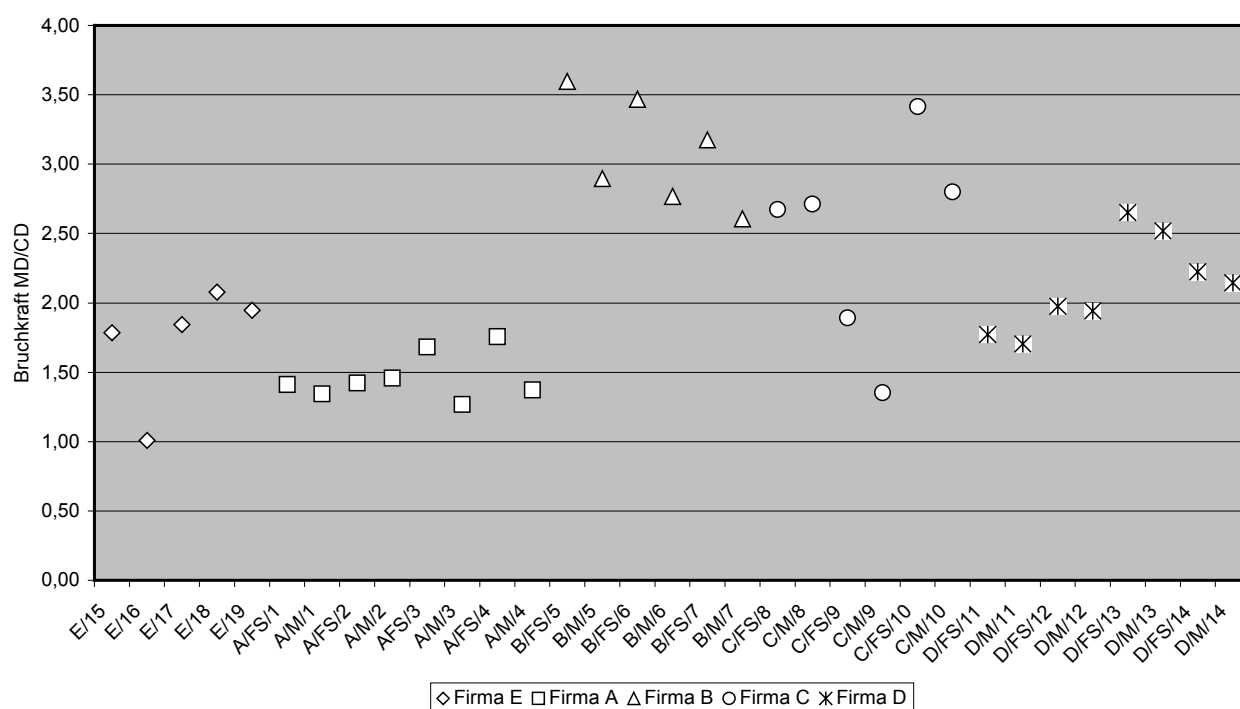


Abb. 20. Bruchkraftverhältnis MD/CD für die Papiermuster

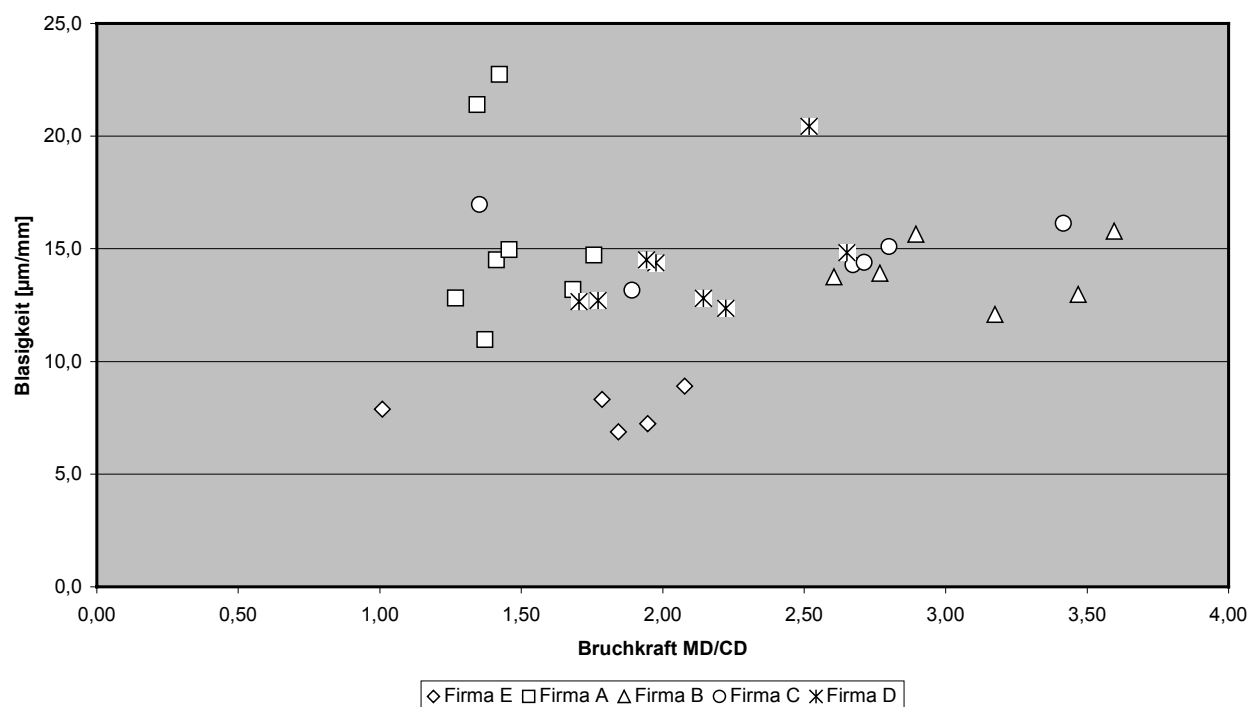


Abb. 21. Abhängigkeit der Blasigkeit von Bruchkraftverhältnis MD/CD

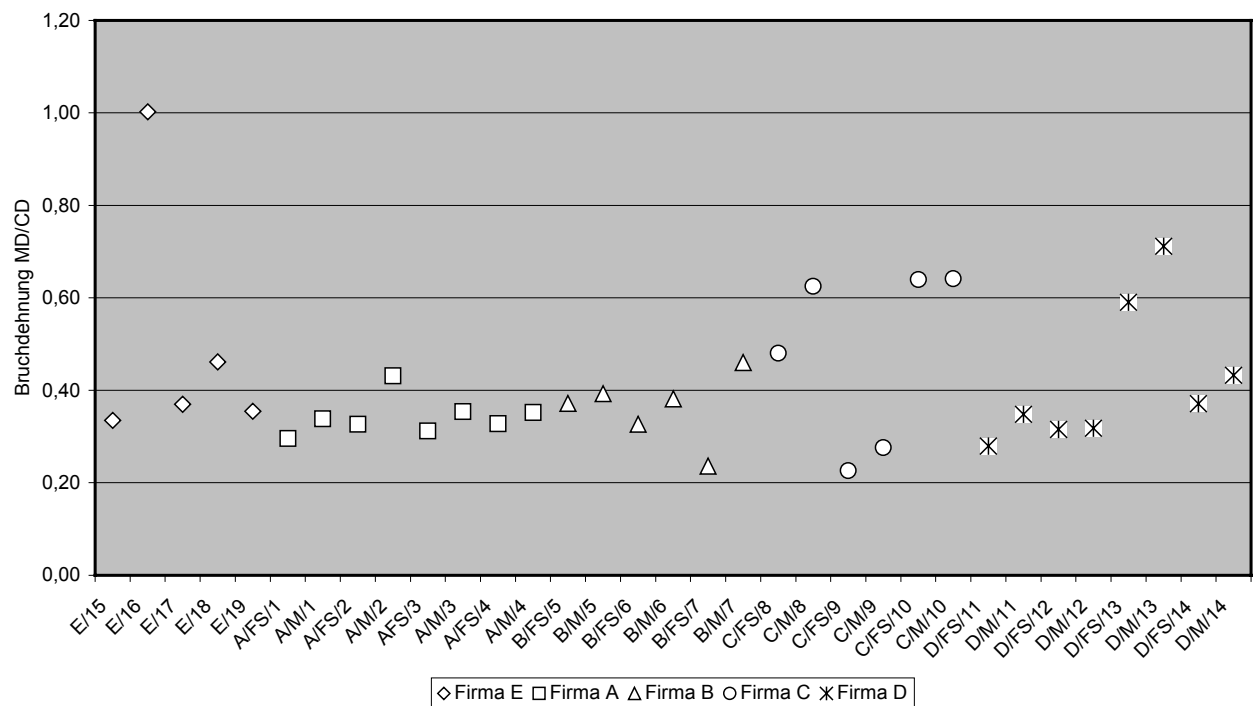


Abb. 22. Verhältnis der Bruchdehnung MD/CD für die Papiermuster

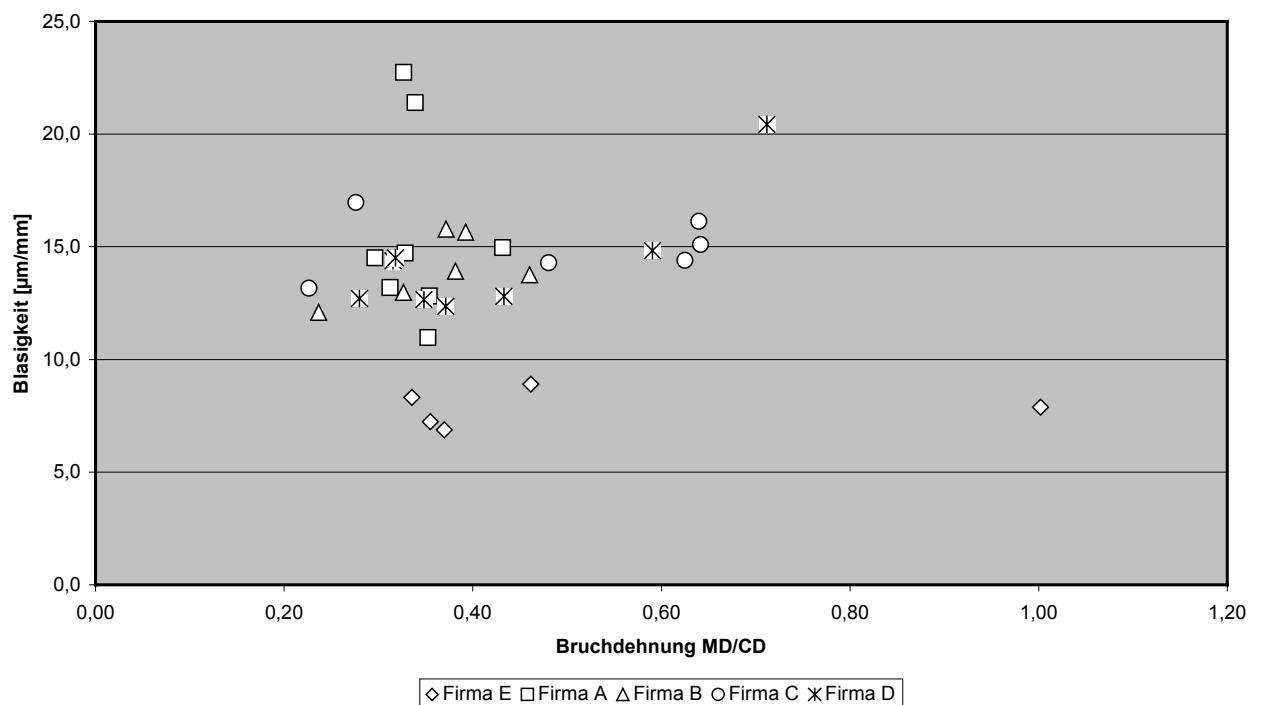


Abb. 23. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Bruchdehnung für die untersuchten Papiermuster

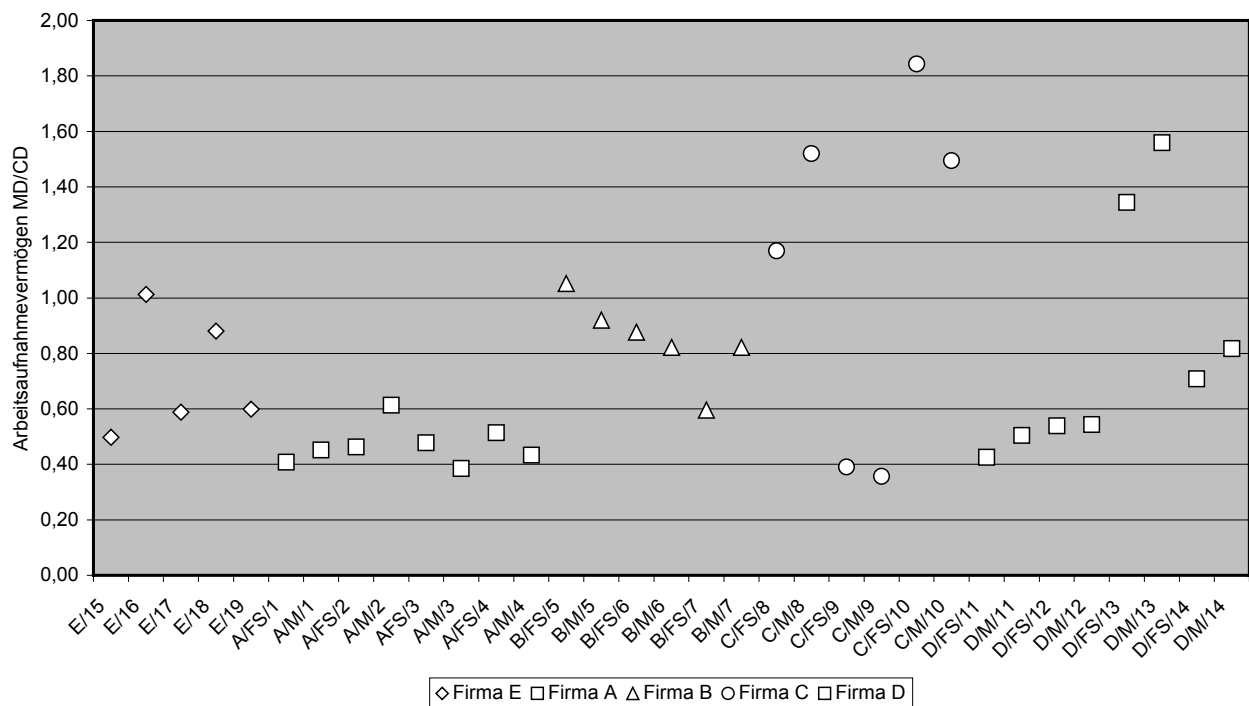


Abb. 24. Arbeitsaufnahmevermögen für die untersuchten Papiermuster

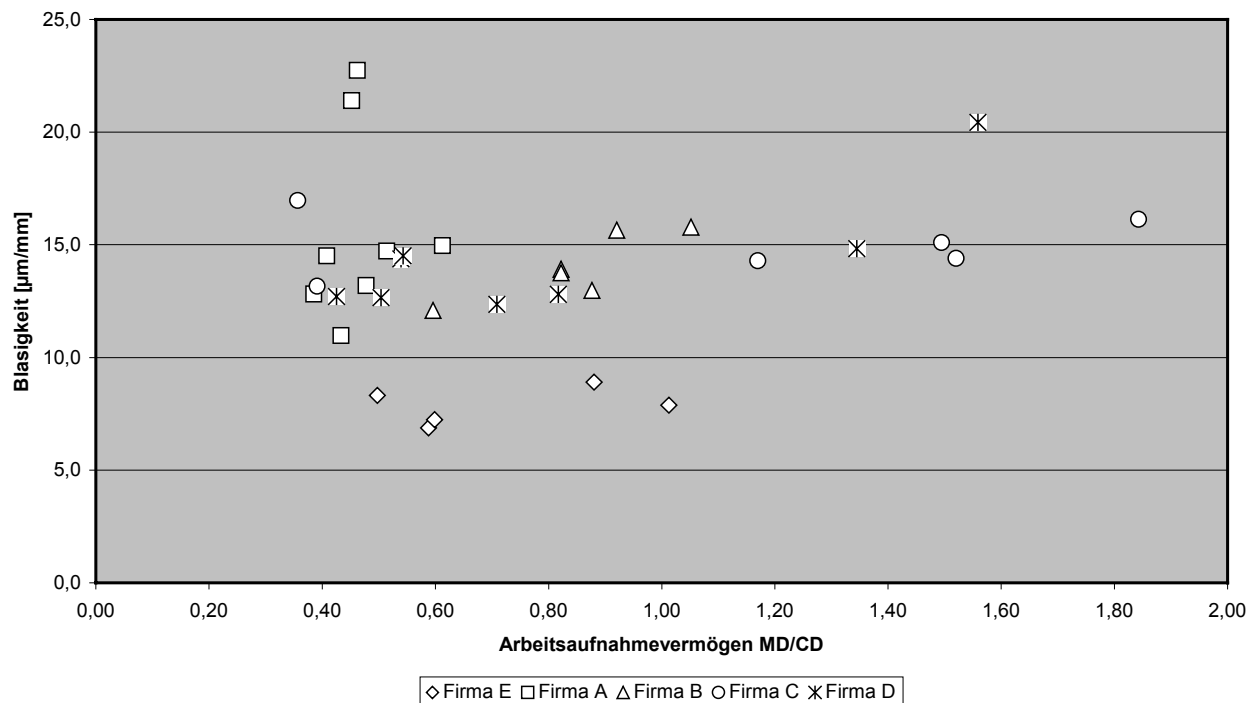


Abb. 25. Abhängigkeit der Blasigkeit vom Arbeitsaufnahmevermögen

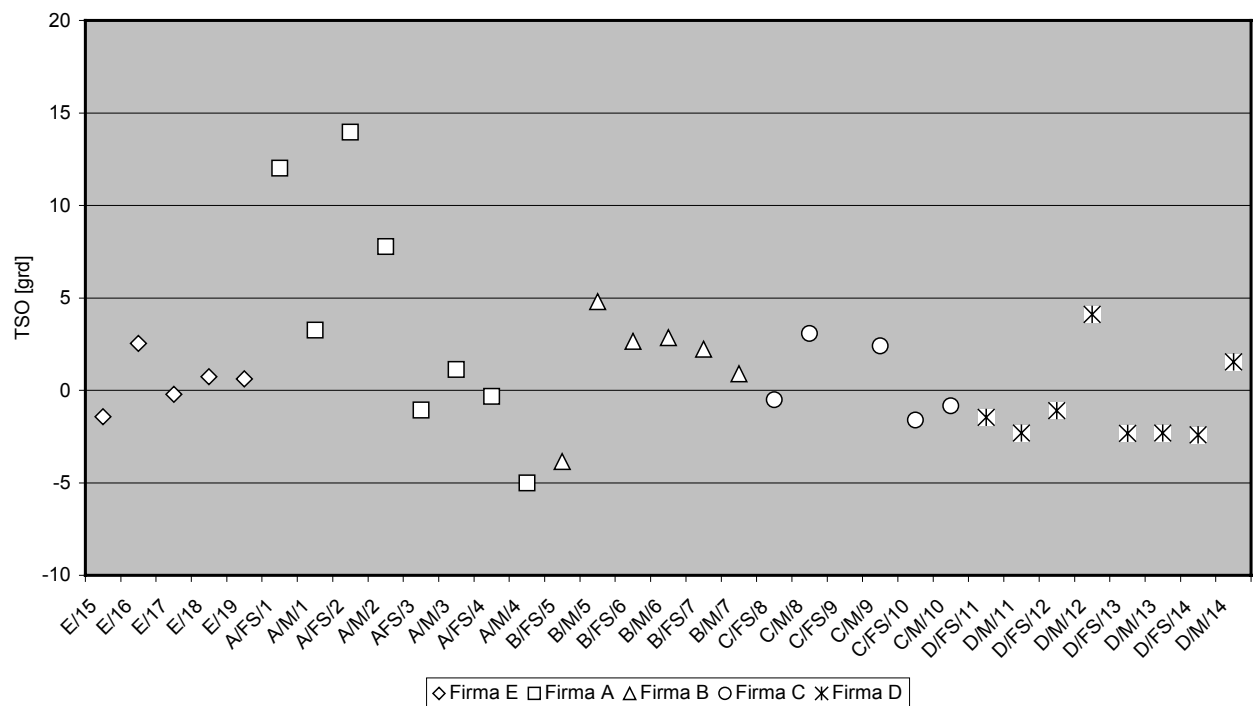


Abb. 26. TSO (Tensile Orientation) für die untersuchten Papiermuster

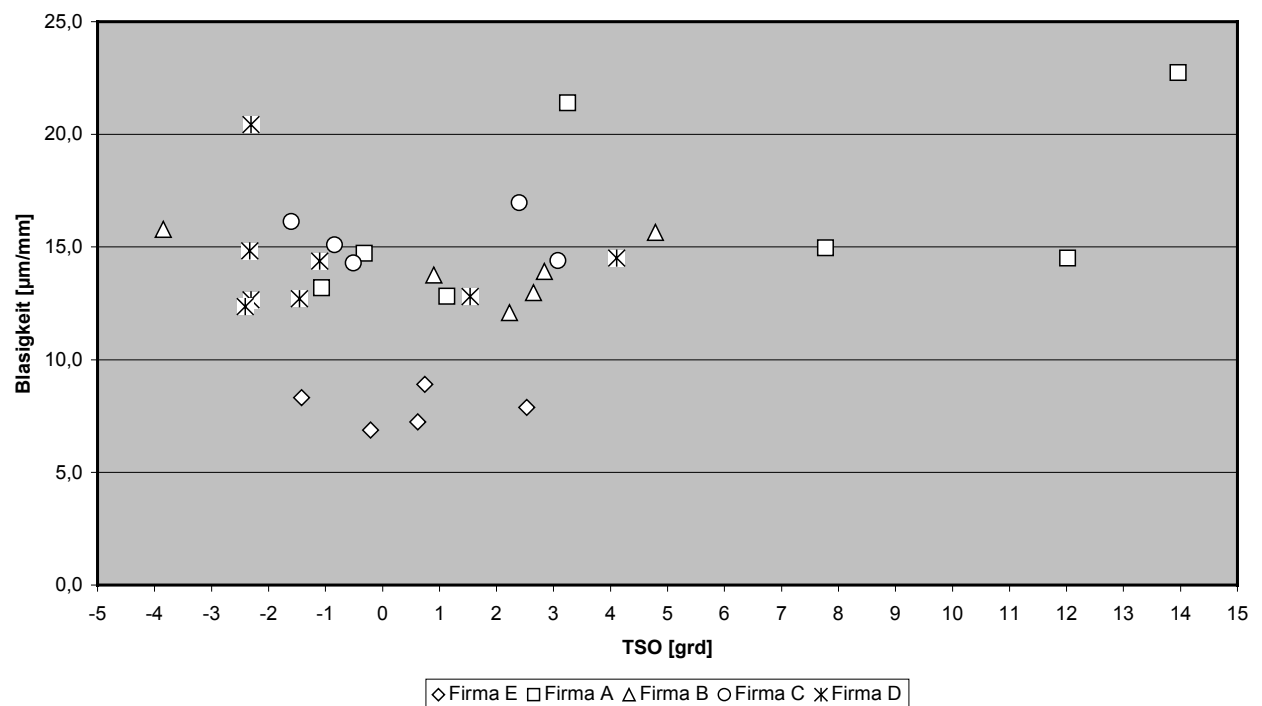


Abb. 27. Abhängigkeit der Blasigkeit vom TSO (Tensile Orientation)

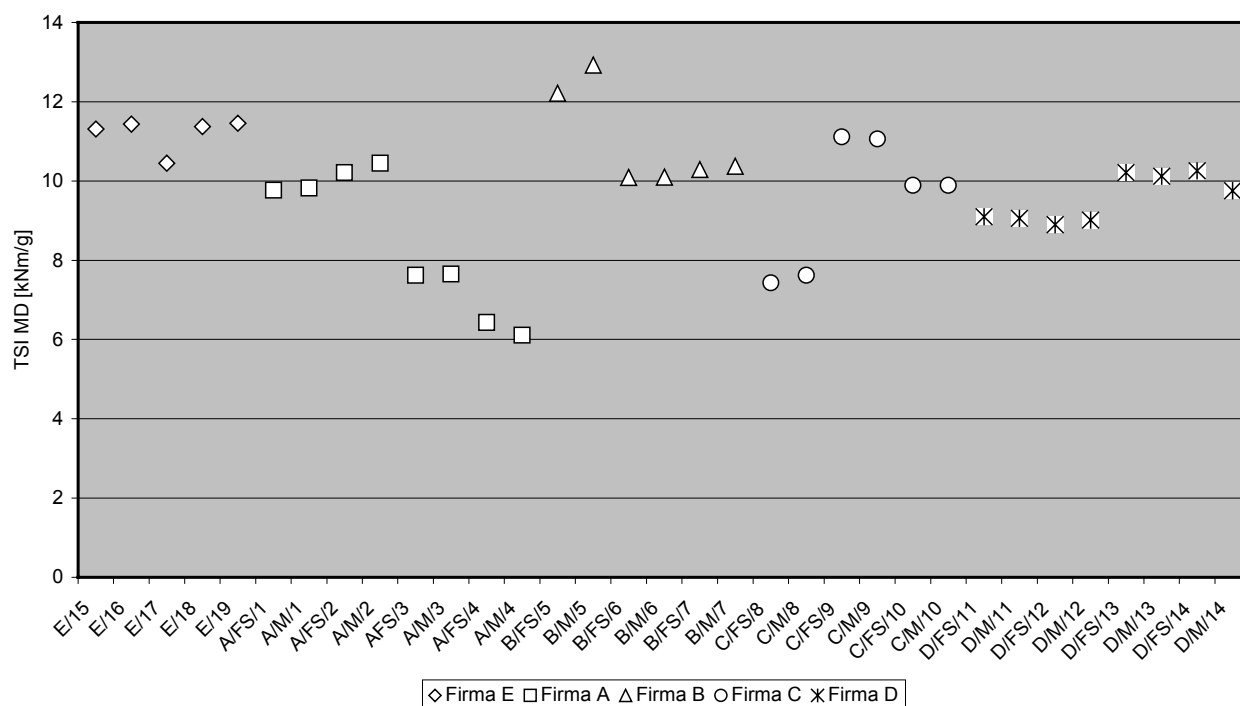


Abb. 28. Zugsteifigkeit (TSI) in MD-Richtung für die untersuchten Papiermuster

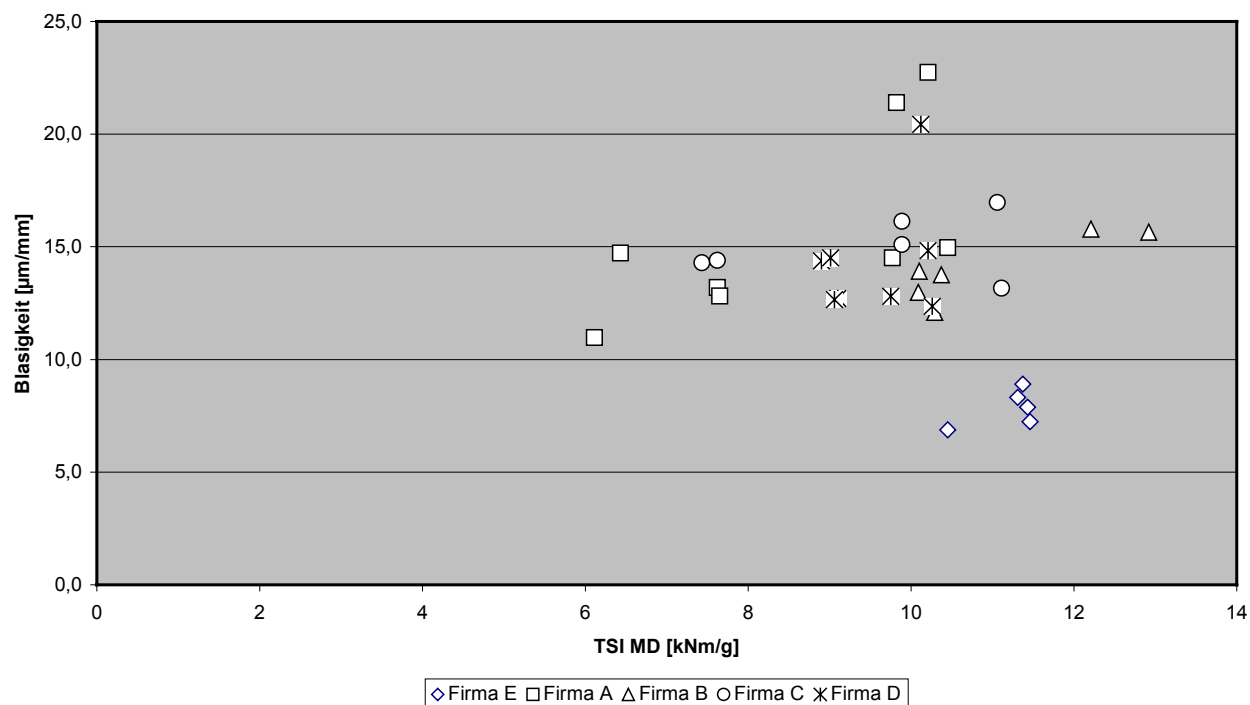


Abb. 29. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Zugsteifigkeit (MD)

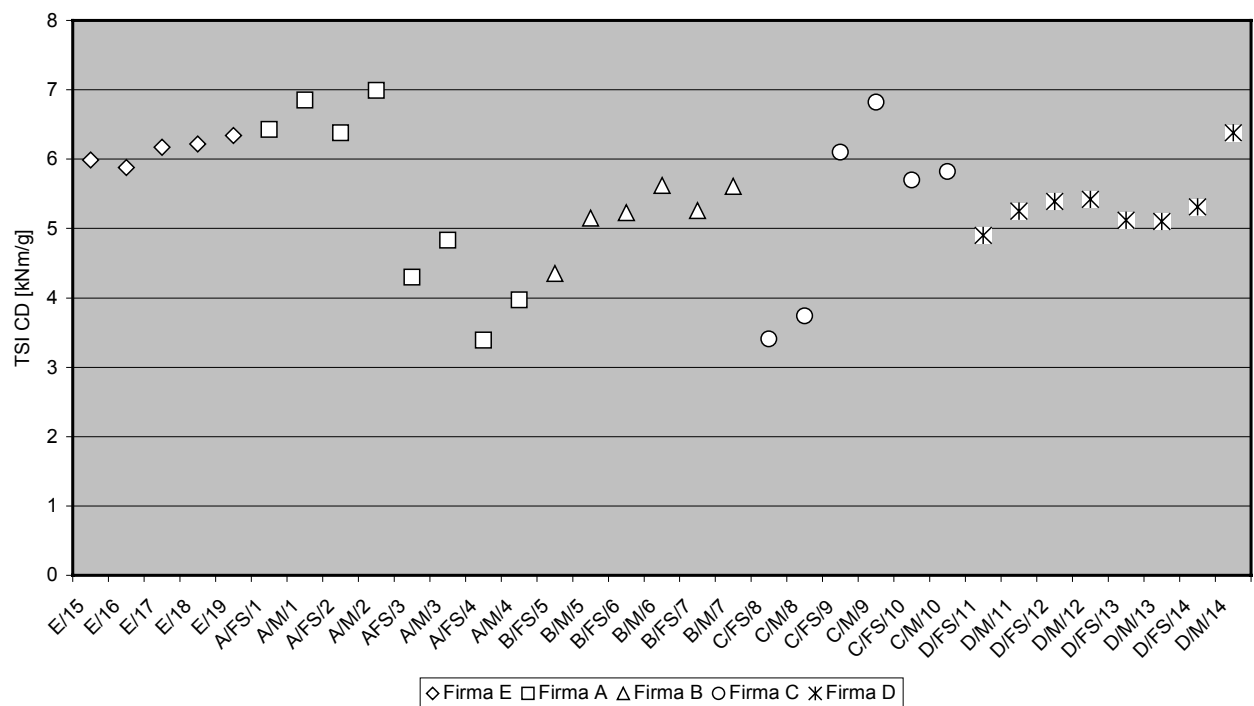


Abb. 30. Zugsteifigkeit in CD-Richtung (TSI) für die untersuchten Papiermuster

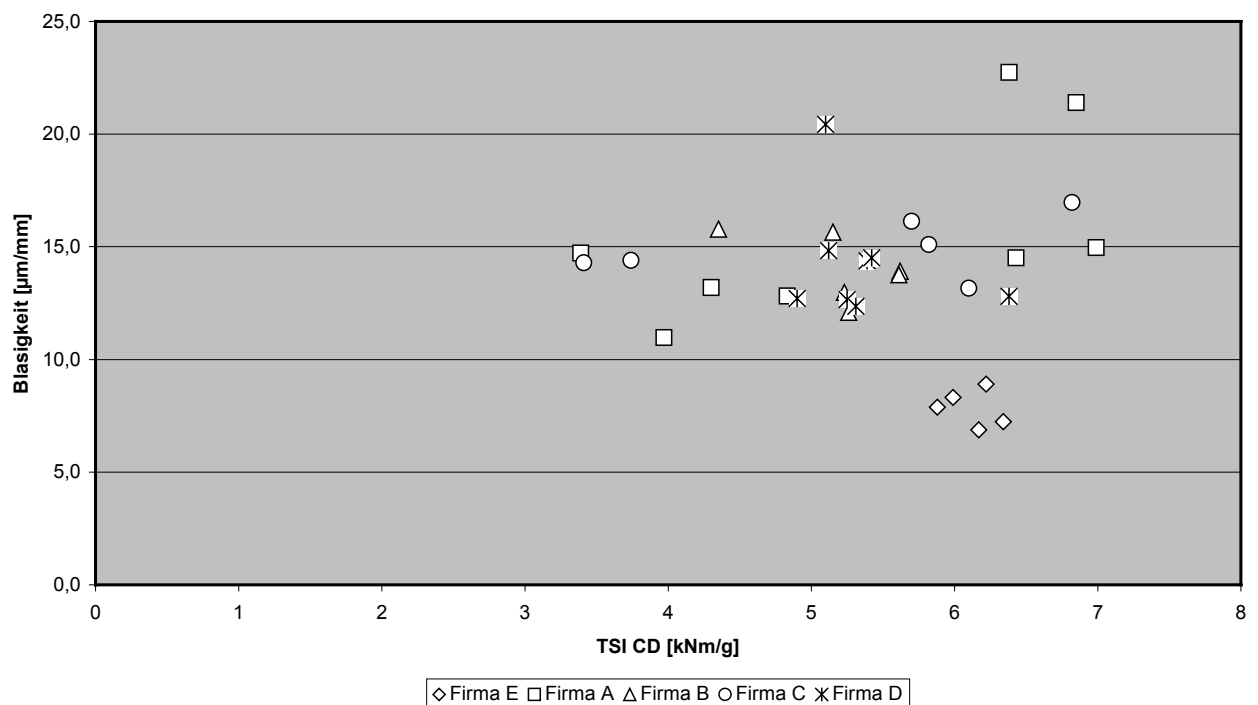


Abb. 31. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Zugsteifigkeit (CD)

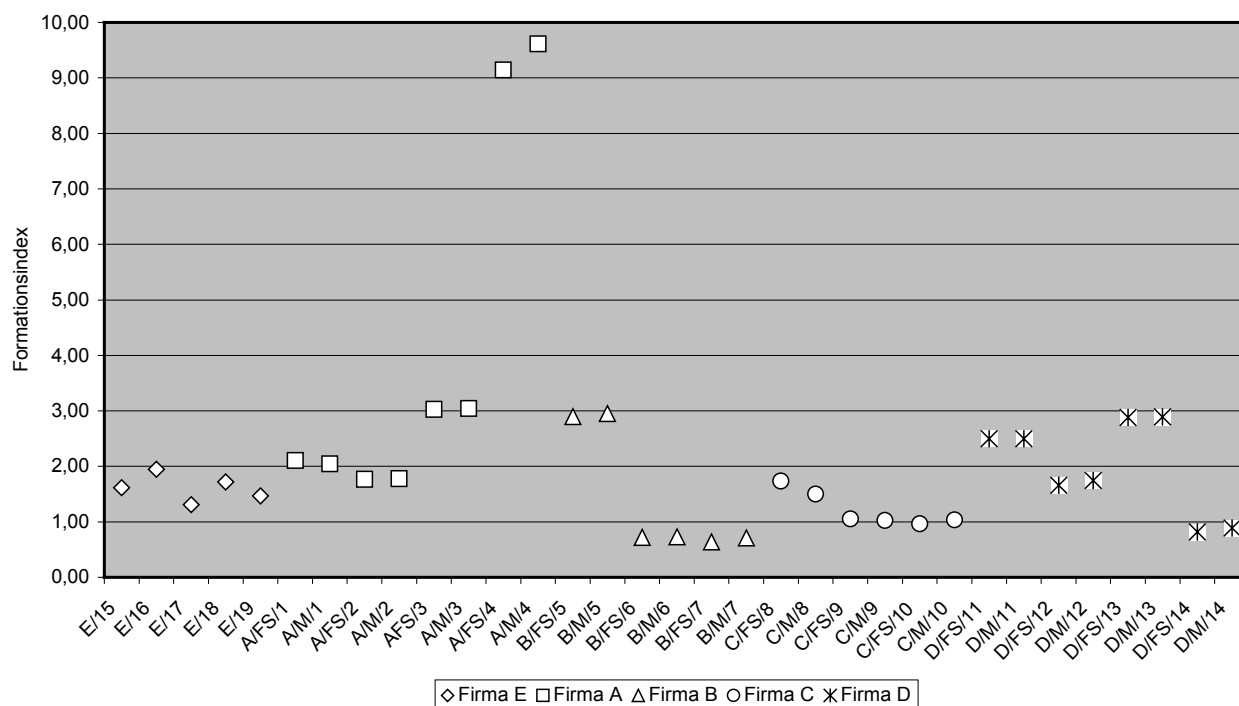


Abb. 32. Formationsindex (Co-Occurrence) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)

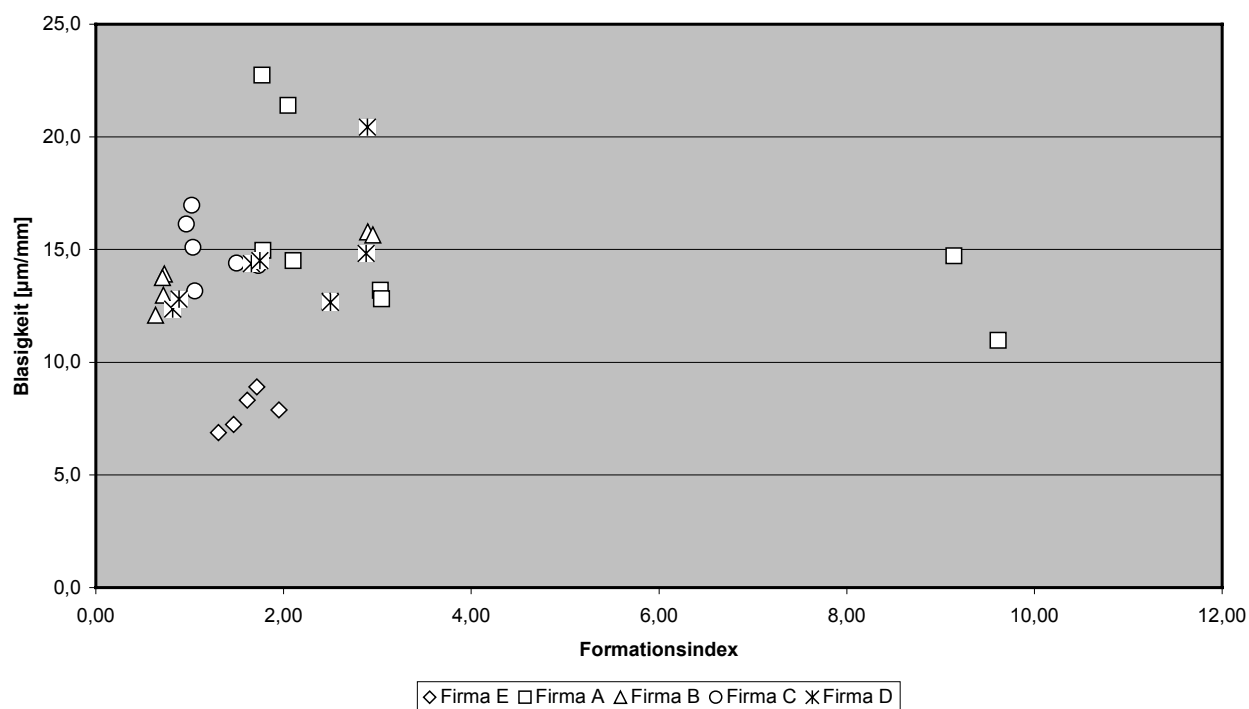


Abb. 33. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation (Co-Occurrence-Methode)

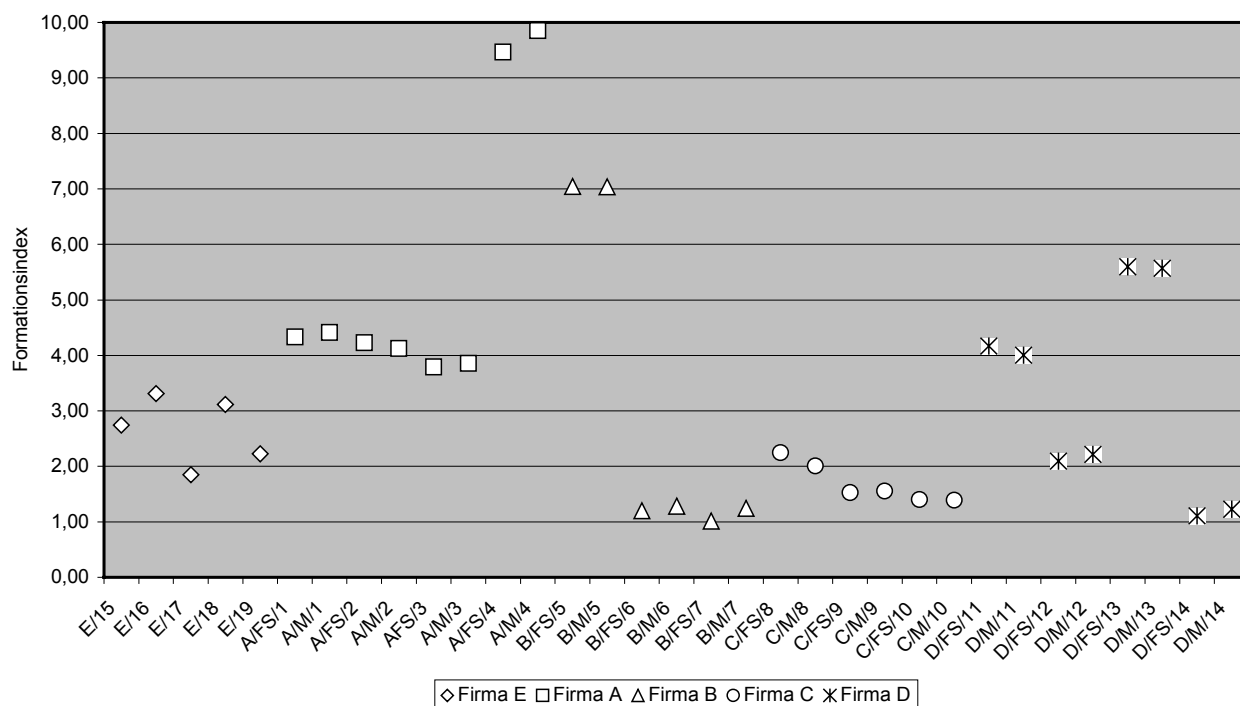


Abb. 34. Formationsindex (PTS-Methode) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)

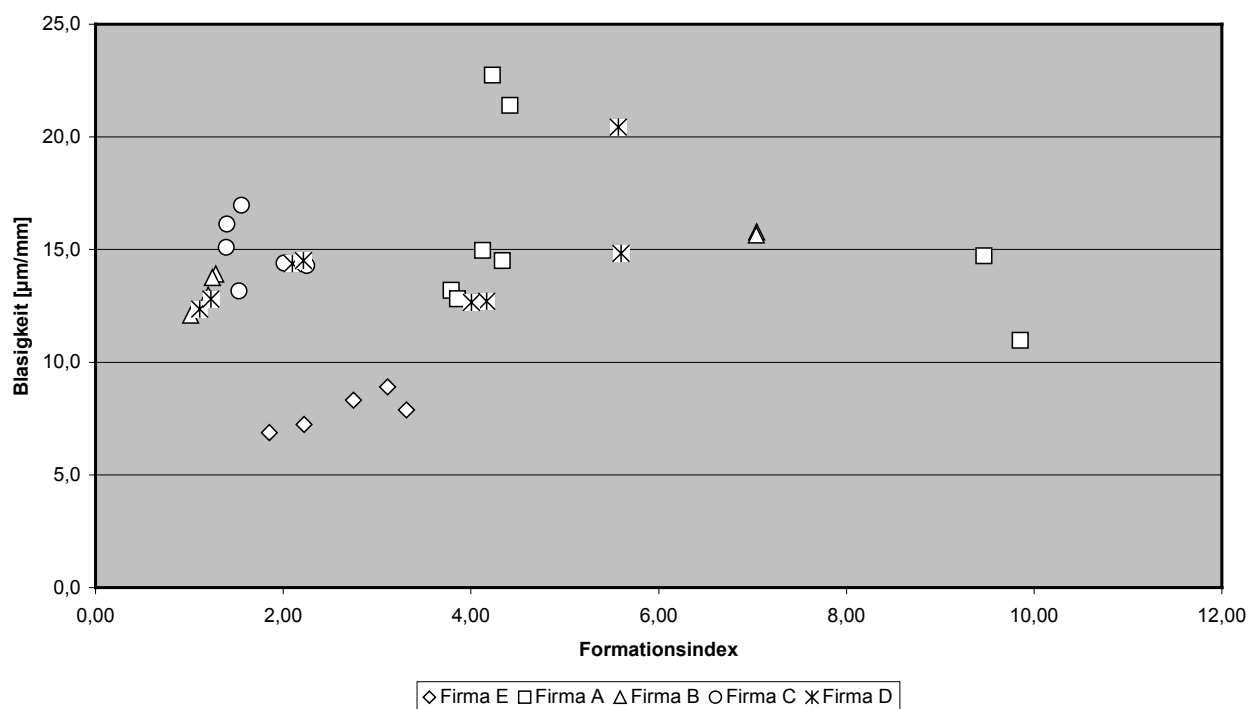


Abb. 35. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation (PTS-Methode)

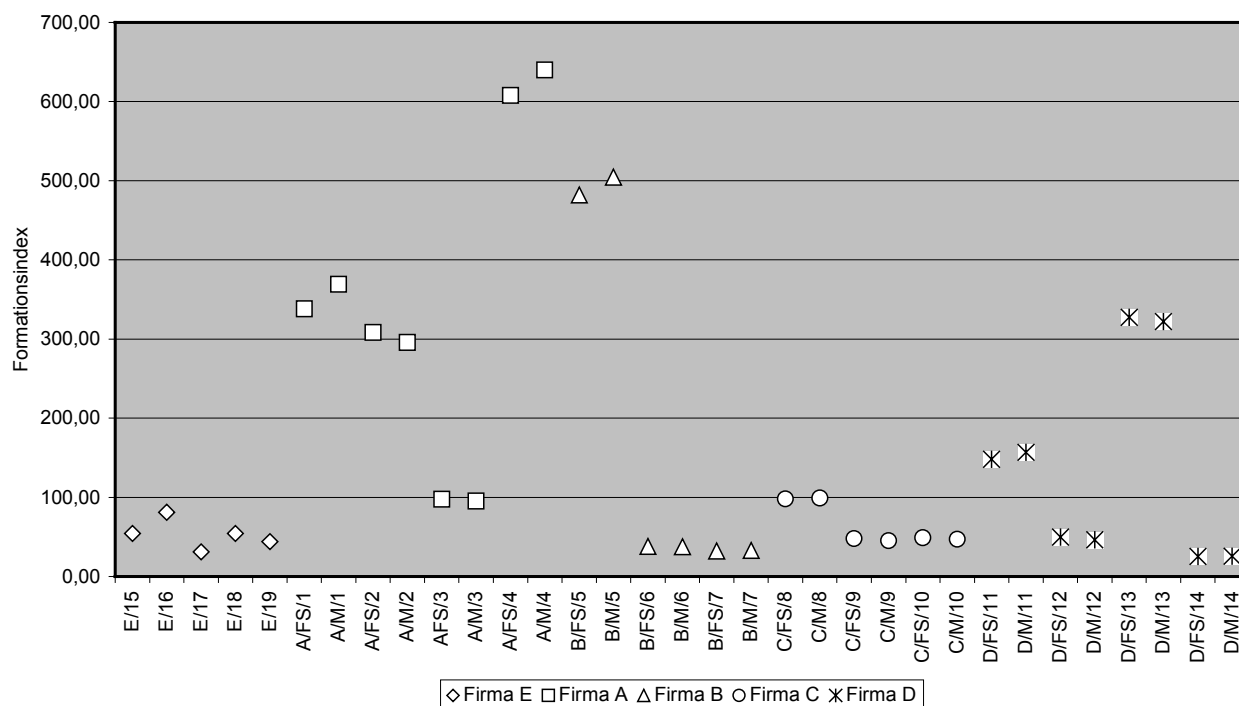


Abb. 36. Formationsindex (Powerspektrum) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)

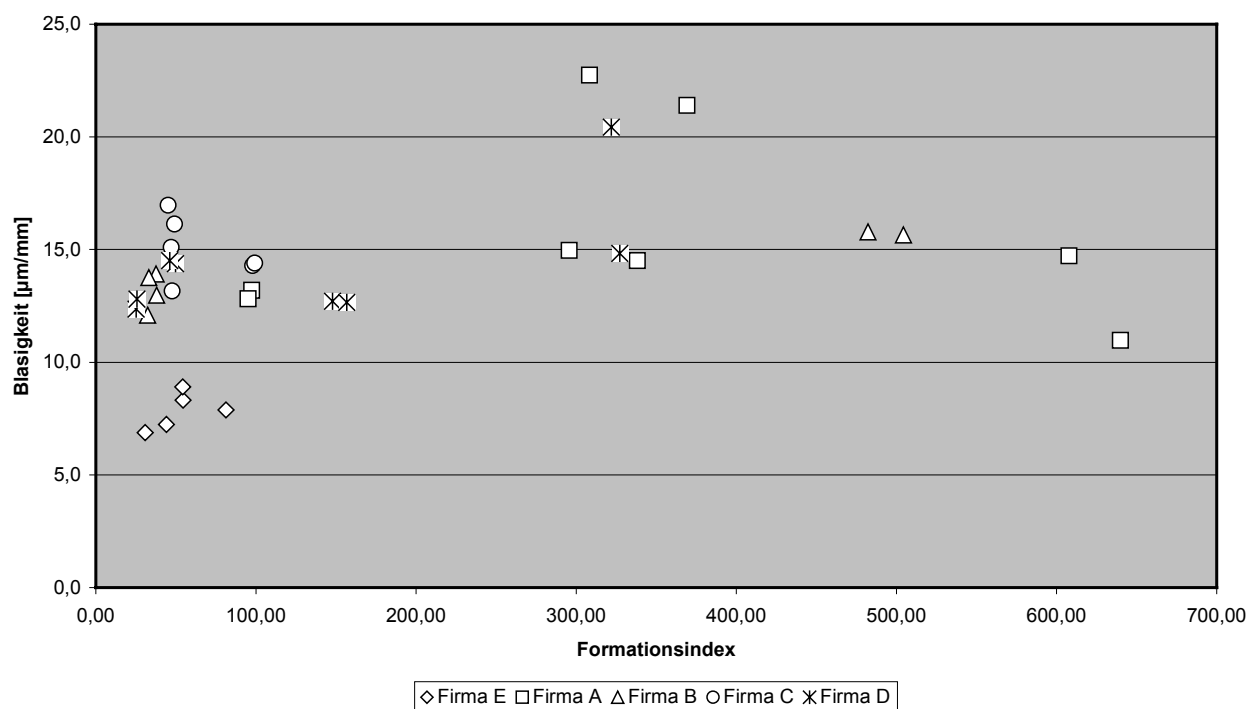


Abb. 37. Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation

4.3 Einfluss von Wasserbenetzung und Wasserpenetration

Die Registrierung der Oberflächenspannung sowie des dynamische Penetrationsverhaltens von Wasser in das Papier machen eine Aussage zur Dynamik des Wasserzutritts (**Abb. 38** bis **Abb. 40**). Wie die **Abb. 38** zeigt, bestehen zwischen den einzelnen Papiermustern erhebliche Unterschiede. Diese sind auf Leimung und auf Eigenschaften der Strichoberfläche oder auf Beschichtungen zurückzuführen. Bei der Bewertung ist hier die Charakterisierung der einzelnen Papiermuster (**Tab. 5**) behilflich.

Für die Mehrzahl aller untersuchten Papiere wird das Benetzungsmaximum im Bereich < 1 s erreicht, wobei im Bereich von 0,1 bis 1,0 s sich die einzelnen Papiere noch differenzieren, die Unterschiede zwischen ihnen aber gering sind.

Beeinflusst wird das Penetrationsverhalten einerseits durch das Benetzungsverhalten, also die Oberflächenspannung des Papiers, und andererseits durch die Papierstruktur. In hochverdichtete Papiere mit einer wenig ausgeprägten Porenstruktur wird Wasser und feuchte Luft langsamer eindringen als in poröse Rohpapiere. Durch Füllen des Papiers sowie Streichen kann die Oberflächenbeschaffenheit und Porosität gesteuert werden und somit auch die Dynamik des Wasserzutritts. Die Dynamik des Wasser- und Gaszutritts spielt eine große Rolle für die Verarbeitbarkeit von Papier. Wenn Verarbeitungsschritte einer geringeren Zeit bedürfen als der Wasserzutritt zur Faser benötigt, so kann dadurch ein vorhandenes Potenzial für Dimensionsinstabilität durch den Abgleich der zeitlichen Abläufe unerwünschte Dimensionsänderung beim Verarbeiten vermieden werden.

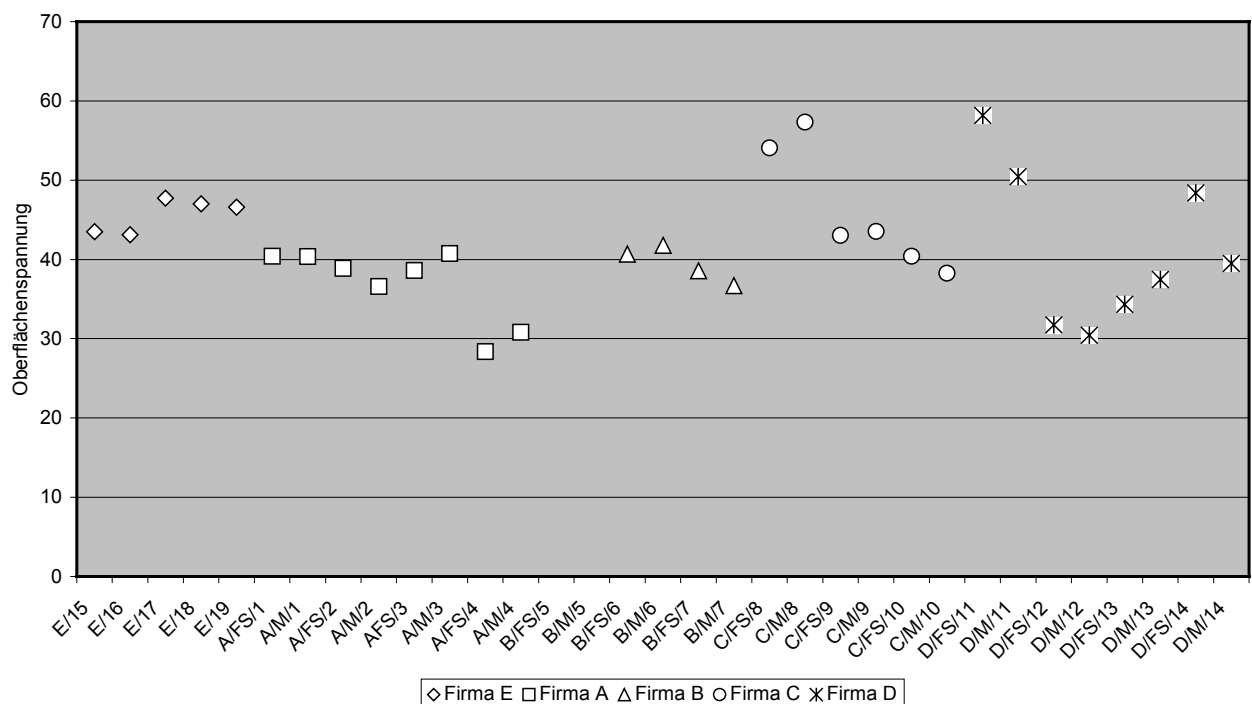


Abb. 38. Oberflächenspannung der untersuchten Papiermuster, untersucht nach der Randwinkelmethode

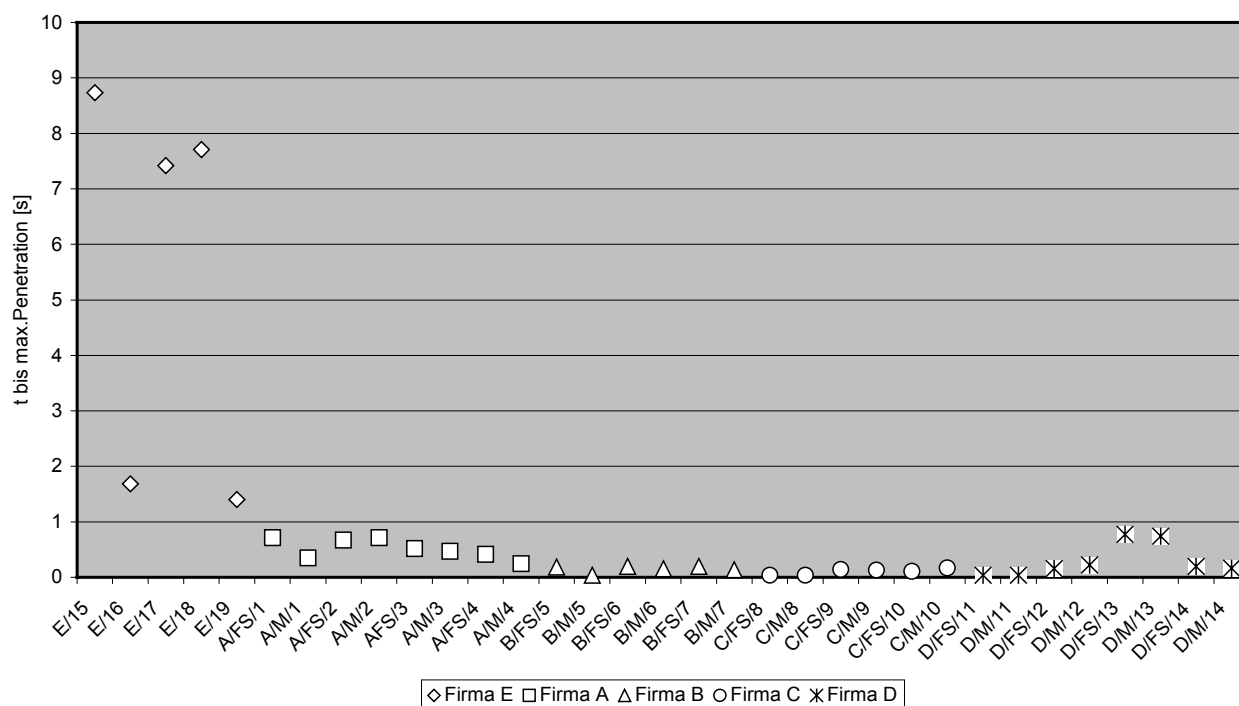


Abb. 39. Zeitlicher Verlauf der Wasserpenetration ins Papier: benötigte Zeit für die vollständige Papierbenetzung der untersuchten Muster (geringe Zeitauflösung)

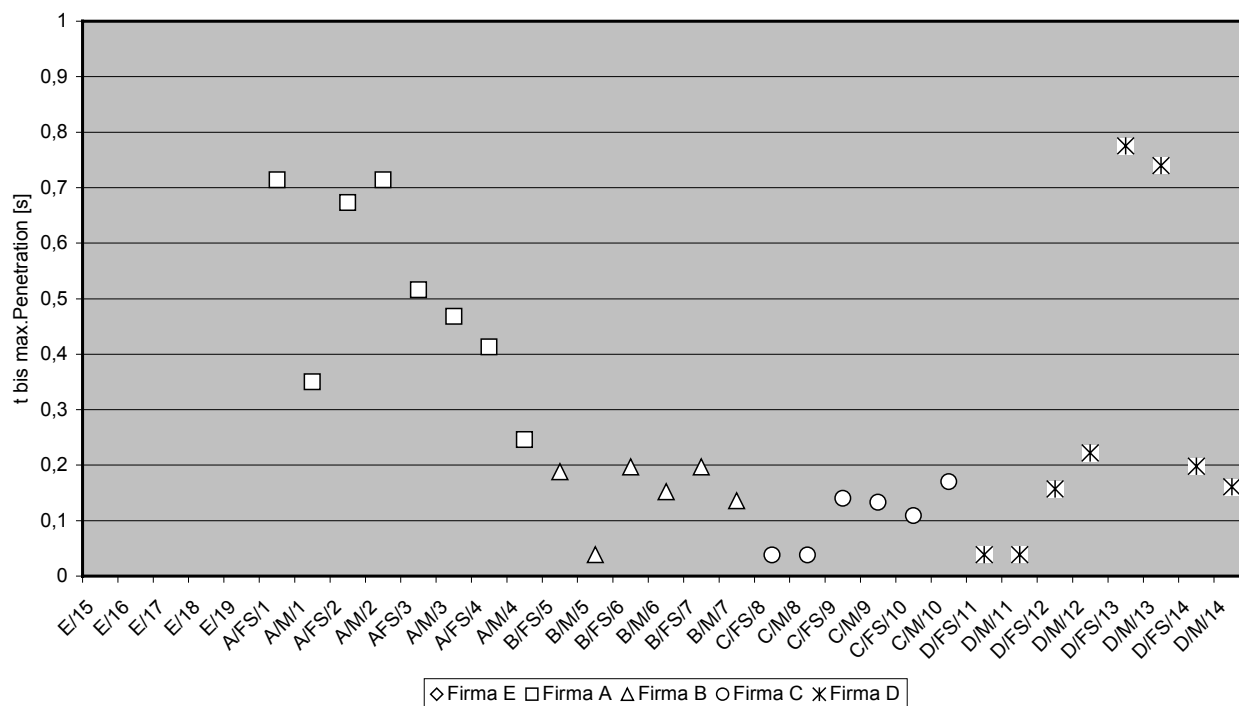


Abb. 40. Zeitlicher Verlauf der Wasserpenetration ins Papier: benötigte Zeit für die vollständige Papierbenetzung der untersuchten Muster (hohe Zeitauflösung – ohne Muster der Firma E)

4.4 Abhängigkeit lokaler Dimensionsänderungen (Blasigkeit) von papiertechnologischen Eigenschaften

Aus den Untersuchungen zur Abhängigkeit der Blasigkeit von Papiereigenschaften wurden gute Korrelationen zwischen der Bruchkraft (MD/CD) sowie der Formation und der Blasigkeit beobachtet. Dies führte zur Entwicklung eines Regressionsansatzes gemäß Gleichung 2, um aus der Bruchkraft und dem Formationsindex die Blasigkeit eines Papiers zu prognostizieren:

$$B = a \times \ln \frac{F_b(\text{MD})}{F_b(\text{CD})} + b \times \text{FI}_{\text{PTS}} \quad \text{Gleichung 2}$$

In Gleichung 2 bedeuten:

- B – Blasigkeit
- a, b – Regressionskoeffizienten
- F_b Bruchkraft in MD/CD-Richtung
- FI – Formationsindex (PTS-Methode)

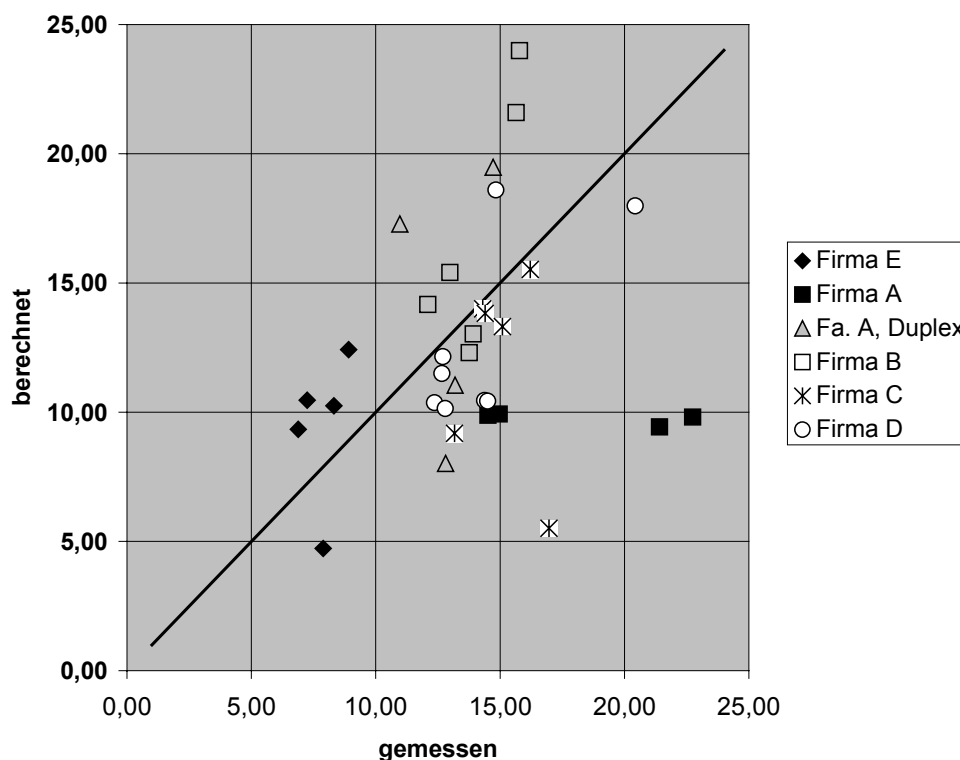


Abb. 41. Vergleich von Messung und Prognose für Blasigkeit, berechnet nach Gleichung 2

Aus dem Regressionsansatz der Gleichung 2 unter Anwendung der Messwerte für die Papiermuster ergeben sich folgende Regressionskoeffizienten:

Regressionskoeffizienten	a	b
mit Ausreißer	11,04	1,40
ohne Ausreißer	11,83	1,15

Sie ermöglichen für den erfassten Eigenschaftsumfang der untersuchten Papiersortimente eine gute Vorhersage für die Blasigkeit unter Beachtung der angewandten Mustervorbereitungs- und Messmethodik.

4.5 Fazit der Untersuchungen

Die Untersuchungsergebnisse untermauern, dass die Papiereigenschaft Dimensionsstabilität sehr komplexen Wirkmechanismen unterliegt.

Die Untersuchungen liefern Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf das Dimensionsverhalten verschiedener Papiersortimente, die sich hinsichtlich Herkunft (Papiererzeuger) und Probeort, in der Rolle (Mitte und Rand) unterscheiden. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die bereits mehrfach erwähnten Unterschiede in Faserstoffeinsatz und Aufbereitung, sowie den Papiererzeugungsbedingungen und in der Ausrüstung der Papiere. Dabei wurden aus den ermittelten Ergebnissen Verhaltensmuster dieser Papiere bei Klimawechsel oder bei direktem Feuchtigkeitseinfluss abgeleitet und versucht, einen Bezug zu Erzeugungsbedingungen herzustellen (vgl. **Abb. 42**).

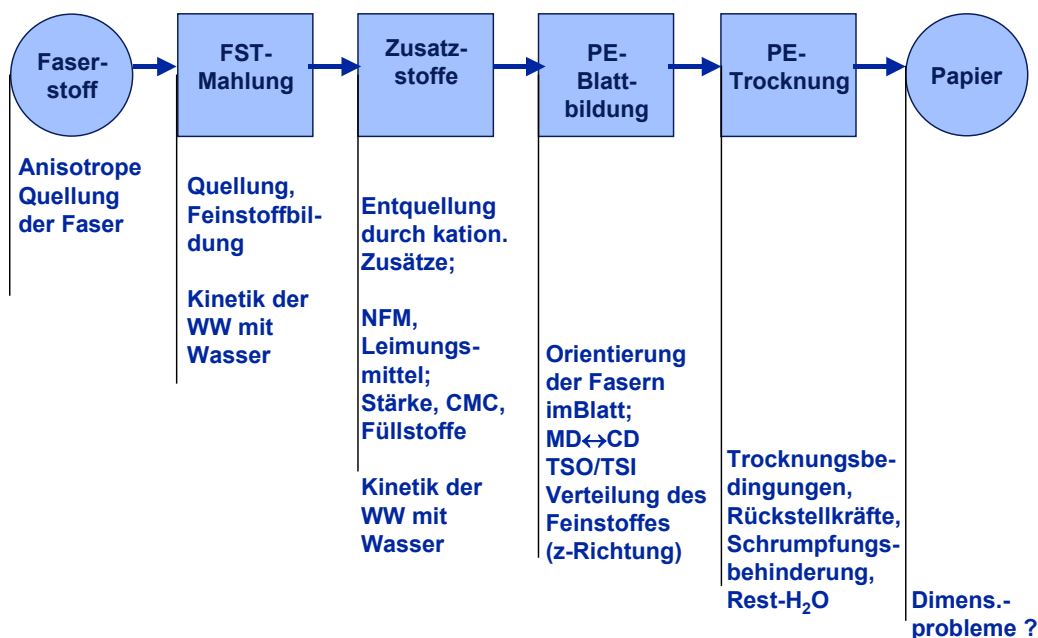


Abb. 42. Probleme in der Dimensionsstabilität haben ihre Ursache in den Erzeugungsbedingungen

In einem ersten Schritt sollte eine Diskussion der Untersuchungsergebnisse in Relation zum Verhalten der Papiersortimente bei Klimawechsel oder Feuchtigkeitzutritt geführt werden, um die Aussagekraft eingeführten Messmethoden zu prüfen. Die hohe Komplexität der Prozesseinflüsse wurde bestätigt, wobei das vorliegende Forschungsprojekt Voraussetzungen für den Aufbau und

die inhaltliche Gestaltung eines Projektclusters lieferte, um eine erfolgreiche systematische Klärung einzelner Einflüsse auf das Dimensionsverhalten in zukünftig zu bearbeitenden Forschungsprojekten zu klären.

5 Nutzbarkeit der FuE-Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurde erkannt, dass die zu erwartende Blaugkeit bei Klimawechsel mit hinreichender Genauigkeit durch die Messung der Bruchkraft sowie des Formationsindices prognostizierbar ist. Fernerhin wurde erkannt, dass generell drei Einflussbereiche in der Papiererzeugung zur Steuerung des Dimensionsverhaltens heranzuziehen sind:

- Auswahl und Aufbereitung geeigneter Faserstoffmischungen
- Steuerung der Gleichmäßigkeit der Papiereigenschaften in x,,y und z-Richtung des erzeugten Papiers durch maschinentechnische Voraussetzungen sowie Parameterabgleich in der Papiermaschine und
- durch Steuerung der Dynamik der Dimensionsänderung durch Beeinflussung des Wasser- bzw. Dampfzutritts zum Faserstoff mittels Oberflächenbehandlung und Steuerung der Porosität.

Dadurch können die dafür verantwortlichen Parameter im Herstellungsprozess so verändert werden, dass insbesondere durch Qualitätskonstanz Ursachen der Dimensionsänderung des zu verarbeiteten Papiers gezielt abgestellt werden und so die Verarbeitbarkeit gesichert und Reklamationen vermindert werden.

Gerade bei Trennrohpapieren kann z.B. die Menge an Ausschuss im Prozess vermindert und Reklamationen vermieden werden. Das spart Kosten in mehrerlei Hinsicht:

- geringerer Produktionsausfall in der Anlage,
- weniger problematischer Ausschuss, der aufwendig aufbereitet oder kostenträchtig entsorgt werden muss und
- weniger zu entsorgende Menge bedeutet eine Entlastung der Umwelt.

Darüber hinaus sind die hierbei entstehenden Erkenntnisse für einen großen Bereich der Papierherstellung von Belang, weil in vielen Betrieben der Weiterverarbeitung insbesondere im Drucksektor eine gute Dimensionsstabilität Voraussetzung ist. Hierzu gehören unter anderem Kopierpapier, Ink-Jet Qualitäten, Laserdruckpapiere, Etikettenpapiere, Druckpapier (bei Trocknung nach dem Druckprozess, FAX Papiere und Thermotransferpapiere.

Auf all diese Fälle können die Ergebnisse übertragen werden und eine Optimierung im Materialverbrauch und Einsatz durchgeführt werden. Einige Ansätze zur Umsetzung der Ergebnisse wurden zum Teil in den verschiedenen projektbegleitenden Meetings durch die beteiligten Firmen diskutiert. Die Umsetzung selbst obliegt jedoch selbstverständlich in der Entscheidung der hier beteiligten Unternehmen, wobei die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse in den industriellen Bereich übertragen werden können.

Literaturverzeichnis

- 1 KAJANTO, I.; NISKANEN, K.
Dimensional stability
PAPER PHYSICS; Papermaking Science and Technology; Band 16, Kapitel 7; Niskanen K.
Hrsg.; Helsinki 1998;
- 2 BRECHT, W. UND HILDENBRAND, W.
Über die Flächenbeständigkeit der Papiere,
Das Papier 14 (10a) (610 – 624) 1960
- 3 GREEN, C. J.
Curl, expansivity, and dimensional stability
Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paper board; Vol. 2 Chapter 27;
Eds. R.E. Mark und K. Murakami; Marcel Dekker Inc.:New York und Basel; 1984
- 4 RUTLAND, D. F.
Dimensional stability and curl – a review of the causes
Design Criteria for the Paper Performance, Eds. P. Kolseth, C. Fellers, L. Salmen und M. Rig-
dahl; STFI-Meddelande A 969, 1987 (29 – 50)
- 5 RUTLAND, D. F.
Dimensional stability and curl
Pulp and Paper Manufacture, 3th Edition, Vol.9 Chapter V; Ed. M. Kouris TAPPI / CPPA Atlanta
und Montreal, 1992
- 6 SALMEN, L.
Responses of paper properties to changes in moisture content and temperature
Products of Papermaking, Transactions of the 10th Fundamental Research Symposium, Ox-
ford 1993; Ed. C.F. Baker, (269 – 430)
- 7 CARLSON L., FELLERS C., HTUN M.
Curl and two-sidedness of paper
Svensk Papperstidning 83 (7) (194 – 197) 1980
- 8 BAUMGARTEN H.L., WURSTER K.
Beziehung zwischen Druckpapier-Eigenschaften und Umgebungsklima
Der Druckspiegel 38, Nr. 9 (764 – 767), Nr. 10 (832 – 852) 1983
- 9 HTUN M.
The controll of mechanical properties by drying restraints
Paper Structure and Properties, Chapter 15; Eds. J.A. Bristow und P. Kolseth; Marcel Dekker
Inc. New York und Basel 1986
- 10 HTUN M., FELLERS C.
The in-plane anisotropy of paper in relation to fiber orientation and drying restraints
Paper Structure and Properties, Chapter 16; Eds. J.A. Bristow, P. Kolseth; Marcel Dekker Inc
New York und Basel, 1986
- 11 SALMEN L., FELLERS C., HTUN M.
The development and release of dried-in stress in paper
Nordic Pulp and Paper Research J. 2 (2) (44 – 48) 1987
- 12 FALTER K.-A., OBST G.
Feutigkeitsaufnahme und –abgabe von Druckpapier in Kurzzeit und die Auswirkung auf Di-
mensionsveränderungen
FOGRA Forschungsbericht Nr. 4.208; ISSN 0340-708, 1993

- 13 SETTERHOLM V., KUENZI E. W.
Fiber orientation and degree of restraint during drying
Effect on tensile anisotropy of paper handsheets; TAPPI J. 53 Nr. 10; (1915 – 1920) 1970
- 14 HTUN M., ANDERSSON H., RIGDAHL M.
The influence of drying strategies on the anisotropy of paper in terms of network mechanics
Fibre Science and Technology 20 (165 – 175) 1984
- 15 HTUN M., DE RUVO A.
Correlation between the drying stress and the internal stress in paper
TAPPI J. 61 (75 – 77) 1978
- 16 UESAKA T., MOSS C., NANRI Y.
The characterization of hygroexpansivity of paper
Journal of Pulp and Paper Science 18 Nr. 1 (J11 – 16) 1992
- 17 SALMINEN L.I., RÄISÄNEN V.I., ALAVA M.J., NISKANEN K.J.
Drying-induced stress state of inter-fibre bonds
Journal of Pulp and Paper Science 22 Nr. 10 (J402 – J407) 1996
- 18 GEENEN H.
Über die Behebung von Planlagestörungen bei ungestrichenen Papieren
Wochenblatt für Papierfabrikation 114 Nr. 3 (69 – 70) 1986
- 19 UESAKA T.
Dimensional stability of paper: Upgrading paper performance in end use
Journal of Pulp and Paper Science 1991 Band 17 Nr. 2 (J39 – J46)
- 20 PRAAST H., BURGDORF W., GÖTTSCHING L.
Messtechnische Erfassung und Ursachen von Cockling in Zeitungsdruckpapier Teil 1
Internationale Papierwirtschaft Nr. 9 (T147 – T155) 2000
- 21 KLEEBAUER M.
Ursachen und Vermeidung von Stapelschräglagen bei Endlosformularwaren
PTS Forschungsbericht Nr. 37/00; 2000
- 22 PRAAST H., GRAF-MEIBNER A., GÖTTSCHING L.
Messtechnische Erfassung und Ursachen von Cockling in Zeitungsdruckpapier Teil 3
Internationale Papierwirtschaft (ipw) Nr 7 (38 – 41) 2001
- 23 SCHWEIZER G., AERDKEN A.
Der Einfluss des Recycling auf die Dimensionsstabilität von grafischen Papieren
Wochenblatt für Papierfabrikation Jg 112 Nr. 22 (806 – 808) 1984
- 24 ALBER W., ERHARD K., FROHBURG K. U. T. GÖTZE
Die Veränderung der chemischen Reaktivität und des Quellverhaltens von Faserstoffen durch
Mahlung und Trocknung
Das Papier 53, 366 – 375 (1999), Nr. 6
- 25 ALBER W., ERHARD K., FROHBURG K. U. T. GÖTZE
Die Veränderung der chemischen Reaktivität und des Quellverhaltens von Faserstoffen durch
Mahlung und Trocknung
Das Papier 53, 366 – 375 (1999), Nr. 6
- 26 SALMEN L., BOMAN R., FELLERS C., HTUN M.
The implications of fiber and sheet structure for the hygroexpansivity of paper
Nordic Pulp and Paper Research J. 2, Nr. 4 (127 – 131) 1987

- 27 KARNIS A.
High-consistency refining of bleached sulfate pulps
TAPPI J Band 72 Nr. 6 (97 – 102) 1989
- 28 BRECHT W., ARRAZOLA X., MAH Y.M.
Die Dimensions-Instabilität von Papier aus dem Blickwinkel der Prüftechnik
Wochenblatt für Papierfabrikation Jg 102 Nr. 6 (185 – 192) 1974
- 29 SCHALL N. RIEBELING U. ISERMANN R. HUGHES D.
Mehrfarbenoffset – eine Herausforderung für den Zeitungsdruck
Wochenblatt für Papierfabrikation Nr. 11/12 (758 – 766) 2001
- 30 KALLMES O.
Über die Grundlagen der Formation, der Struktur und der Eigenschaften von Papier
Das Papier 35 Nr. 10A (V 56 – V 73) 1981
- 31 MACGREGOR M.A.
A description of sheet stratification caused by wet pressing
TAPPI J. 66 Nr 6 (53 – 57) 1983
- 32 MAC GRGOR M.A.
Practical effects of sheet stratification caused by wet pressing
TAPPI J. 66 Nr. 7 (65 – 69) 1983
- 33 AIDUN C.K.
Hydrodynamics of streaks on the forming table
TAPPI J. Vol 80 Nr. 8, (155 – 162) 1997
- 34 DÄHLING, HEINZ
Neue Gesichtspunkte zur Wellenbildung im Rollenoffset
FOGRA-Symposium Druckfarbe und Papier in der Praxis; 13. - 14. November 2001, München
- 35 PRAAST H., GRAF-MEISNER A., GÖTTSCHING L.
Messtechnische Erfassung und Ursachen von Cockling in Zeitungsdruckpapier Teil 2
Internationale Papierwirtschaft (ipw) Nr. 6 (95 – 100) 2001
- 36 HANSSON T.
Anordnung in der Trockenpartie einer Papiermaschine,
Patent: EP 0238470 A 1
- 37 WATERHOUSE J. STERA S., BRENNAN D.
Z-direction variation of internal stress and properties in paper
J. of Pulp and Paper Science 13 Nr. 1 (J33 – J37) 1987
- 38 PARSONS S.R.
Effect of drying restraint on handsheet properties
TAPPI J. 55 Nr. 10 (1516 – 1521) 1972
- 39 BRECHT W., WANKA R.
Neue Beiträge zur Kenntnis der Dimensionsstabilität von Papieren
Das Papier Jg. 21 Nr. 7 (354 – 360) 1967
- 40 HOOLE S.M., ET AL
CD Shrinkage Profiles of Paper – Experiments on a Commercial Paper Machine.
Paper Technology, December 1999 (63 – 70)
- 41 PULKOWSKI, J. H.
The Bel-Champ single-tier drier World Pulp & Paper Technology 1992
Sterling Publications Internat. , London

- 42 KOTITSCHKE G.
Braviken PM 53 – Die schnellste Zeitungsdruckpapiermaschine der Welt
Wochenblatt für Papierfabrikation Nr. 7 (320 ff) 1997
- 43 UESAKA T., QI D.
Hygroexpansivity of paper – Effects of fibre-to-fibre bonding
J. of Pulp and Paper Science 20 Nr. 6 (J175 – J179) 1994
- 44 SALMEN L., BACK E.L.
Moisture-dependent thermal softening of paper, evaluated by its elastic modulus
TAPPI J. 63 Nr. 6 (117 – 120) 1980
- 45 KUROYAMA, Y ET. AL.
Cast-coated paper for ink jet recording and production method thereof
EP 0770729 A1; 1996
- 46 SCHULGASSER K.
Moisture and thermal expansion of wood, particle board and paper
Paperi ja Puu 70 Nr. 6, (534 – 539) 1988
- 47 DE RUVO A., LUNDBERG R., MARTIN-LÖF S., SÖREMARK C.
Influence of temperature and humidity on the elastic and expansional Properties of paper and its constituent fibre
The Fundamental Properties of Paper related to its Uses; Ed F. Bolam, Transactions of the Symposium held at Cambridge, London (784) 1976
- 48 HANSEN A.
Water adsorption and dimensional changes of newsprint during offset printing
23rd IARIGAI Research Conference „Advances in printing; science and technology“ Conference 1995; Paris Bristow J. A. (Hrsg)
- 49 LINDHOLM G.
Dimensional stability and the influence of conditions in the printing nip
International Printing and Graphic Arts Conference 1996; Atlanta TAPPI Press (55 – 64)
- 50 WIMMER M.
Untersuchungen von Einflussparametern auf die Verarbeitungseigenschaften von Rollenoffsetprodukten
FOGRA Mitteilung 47 Nr. 156, (63 – 69) 1998
- 51 GLÖCKNER, E.
Zukünftige Anforderungen an Druckpapiere
Internationale Papierwirtschaft (IPW) Nr. 7, 73 – 74 (1999)
- 52 ANDERSON J. G.
Using paper temperature to prevent curl
TAPPI J. 74 nr. 6 (131 – 135) 1991
- 53 TROLLSAS, P.-O. ET AL.
Determination of time dependence of dimensional changes in newsprint
International printing & Graphic Arts Conference, (341 – 349) TAPPI 1992
- 54 BELLE J.
Nassdehnung und Druckqualität
Wochenblatt für Papierfabrikation Jg.129 Nr.20 (1340 - 1346) 2001
- 55 GAGNON, R. ET AL.
High spatial resolution non-destructive testing of newsprint
Journal of pulp and paper science (J179 – J183) Vol. 16 No. 6 Nov. 1990

- 56 TROLLSAS, P.-O. ET AL.
Determination of time dependence of dimensional changes in newsprint
International printing & Graphic Arts Conference, (341 – 349) TAPPI 1992
- 57 GAGNON, R. ET AL.
High spatial resolution non-destructive testing of newsprint
Journal of pulp and paper science (J179 – J183) Vol. 16 No. 6 Nov. 1990
- 58 KNOTZER U., WILTSCHE M.
Papierstruktur in z-Richtung – Beeinflussung durch die Blattbildung
Vortrag anlässlich der APV-Tagung, Graz Mai 2002
- 59 LINDBLAD G., FÜRST T.
The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board
Hrsg. Lorentzen & Wettre, 2001 ISBN 91-973781-0-0

Anlagen

Anlage 1. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. A (vgl. **Tab. 5**)

Papiersorte		Lauf- rich- tung	1 FS (gefüllt)	2 Mitte (gefüllt)	3 FS (unge- füllt)	4 Mitte (unge- füllt)	Tapeten- duplex FS	Tapeten- duplex Mitte	Tapeten- duplex FS	Tapeten- duplex Mitte
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeich- nung			A/FS/1	A/M/1	A/FS/2	A/M/2	A/FS/3	A/M/3	A/FS/4	A/M/4
Flächen-m.	g/m ²		90	90	90	90	120	120	115	115
Physikalische Papiereigenschaften- Eigenschaftsorientierung im Papier										
Messung	Einheit									
Breitenbe- zogene Bruchkraft	kN/m	MD	6,587	6,834	7,225	7,306	5,099	4,683	3,44	3,173
Breitenbe- zogene Bruchkraft	kN/m	CD	4,664	5,088	5,077	5,013	3,03	3,693	1,958	2,313
Bruchdeh- nung	%	MD	2,23	2,28	2,53	2,43	1,57	1,48	1,51	1,41
Bruchdeh- nung	%	CD	7,53	6,73	7,74	5,63	5,03	4,18	4,6	4
Arbeitsauf- nahme- vermögen	J/m ²	MD	97,65	104	122,8	119,9	51,01	40,71	34,41	29,65
Arbeitsauf- nahme- vermögen	J/m ²	CD	239,3	230	265,6	195,7	106,8	105,7	66,92	68,4
Ultraschallmethode nach Lorentzen&Wettre										
TSO- Winkel	(+MD) grd	+MD	12,02	3,25	13,96	7,77	-1,07	1,13	-0,32	-5,01
Min.	grd		10,62	2,5	12,18	6,4	-3,43	-0,07	-1,4	-6,71
Max.	grd		13,67	4,37	15	10,39	2,1	2,34	1,71	-3,59
TSI (MD)	kNm/g	MD	9,77	9,82	10,21	10,45	7,62	7,65	6,43	6,11
TSI (CD)	kNm/g	CD	6,43	6,85	6,38	6,99	4,3	4,83	3,39	3,97
TSI (MD/CD)			1,51	1,43	1,59	1,49	1,76	1,57	1,89	1,53
Formation										
Co- occurrence	Vk		7,15	7,73	6,21	6,11	5,61	5,36	12,83	13,47
	Stabw.		0,22	0,10	0,08	0,03	0,04	0,12	0,32	0,13
	Corr.- index		0,09	0,07	0,08	0,09	0,29	0,32	0,51	0,51
	Stabw.		0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
	F.-index		2,10	2,05	1,77	1,78	3,03	3,04	9,14	9,61
	Stabw.		0,11	0,10	0,03	0,04	0,06	0,15	0,27	0,17
PTS- Methode	Index horiz.		4,40	4,49	4,32	4,22	3,21	3,66	9,43	9,72
	Stabw.		0,19	0,18	0,10	0,07	0,11	0,40	0,57	0,48
	Index vertikal		4,26	4,33	4,14	4,03	4,38	4,06	9,51	9,98
	Stabw.		0,19	0,16	0,14	0,04	0,23	0,51	0,61	0,13
	F.-index		4,33	4,41	4,23	4,12	3,79	3,86	9,47	9,85
	Stabw.		0,19	0,17	0,06	0,06	0,17	0,43	0,54	0,19
Power- spektrum	F.-index		338,12	369,24	308,30	295,64	97,37	95,16	607,79	639,97
	Stabw.		24,05	21,82	6,78	4,32	1,42	5,28	33,98	20,26

Papiersorte		Lauf- rich- tung	1 FS (gefüllt)	2 Mitte (gefüllt)	3 FS (unge- füllt)	4 Mitte (unge- füllt)	Tapeten- duplex FS	Tapeten- duplex Mitte	Tapeten- duplex FS	Tapeten- duplex Mitte
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeich- nung			A/FS/1	A/M/1	A/FS/2	A/M/2	A/FS/3	A/M/3	A/FS/4	A/M/4
Flächen-m.	g/m ²		90	90	90	90	120	120	115	115
Penetrationsdynamik										
Messung	Einheit									
	A 30		8,5	9,5	7,7	7,4	16,9	16,9	15,6	16,1
	A 60									
	Max [s]	s	0,714	0,35	0,673	0,714	0,516	0,468	0,413	0,246
	W		1	0,39	0,73	0,63	1,4	1,1	0,078	0,055
Oberflächenspannung										
Randwinkel	Sigma- gesamt	grd	40,39	40,35	38,86	36,58	38,6	40,73	28,39	30,8
Dimensionsstabilität										
Nassdehnung und Trockenschrumpfung										
Nassdeh- nung bei 1N/60mm Spannung	nach 2 s [%]	CD	0,037	0	0,02	0,018	0,075	0,065	0,07	0,08
	nach 60 s [%]	CD	1,383	1,091	1,354	0,89	1,62	1,021	1,344	1,292
Schrump- fung bei 1 N/60 mm, 180°C	nach 2 s [%]	CD	-0,239	-0,207	-0,293	-0,291	-0,493	-0,45	-0,327	-0,319
	nach 60 s [%]	CD	-0,849	-0,77	-0,948	-0,827	-1,014	-0,951	-0,908	-0,808
Klimakurve (Hysteresis)										
Δl [%] bei relativer Feuchte	50 %	CD	0	0	0	0	0	0	0	0
	80 %	CD	0,520	0,460	0,488	0,398	0,515	0,395	0,503	0,450
	50 %	CD	0,350	0,288	0,283	0,223	0,345	0,260	0,300	0,270
	20 %	CD	-0,023	-0,045	-0,083	-0,090	-0,020	-0,058	-0,078	-0,060
	50 %	CD	0,140	0,130	0,080	0,055	0,175	0,115	0,135	0,115
	80 %	CD	0,565	0,490	0,508	0,403	0,613	0,465	0,573	0,505
Cockling										
mw	μm		564,5	696,5	682,9	604,5	455,3	384,2	386,1	404,3
s _g	μm		289,2	354,9	338,2	263,8	204,0	166,8	166,4	208,6
Blasigkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}$		14,5	21,4	22,7	15,0	13,2	12,8	14,7	11,0
Welligkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}^{0,5}$		84,63	113,09	114,58	82,11	65,14	52,28	57,23	59,10

Anlage 2 Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. B (vgl. **Tab. 5**)

Papiersorte		Lauf- rich- tung	Streich- rohpapier SR	Streichroh- papier SR	gestr. Pa- pier (n.SM)	gestr. Pa- pier (n.SM)	gestr. Pa- pier (n.SK)	gestr. Pa- pier (n.SK)
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeichnung			B/FS/5	B/M/5	B/FS/6	B/M/6	B/FS/7	B/M/7
Flächen-m.	g/m ²		50	50	90	90	90	90
Physikalische Papiereigenschaften- Eigenschaftsorientierung im Papier								
Messung	Einheit							
Breitenbezo- gene Bruch- kraft	kN/m	MD	4,247	4,264	4,907	4,746	4,923	4,504
Breitenbezo- gene Bruch- kraft	kN/m	CD	1,181	1,473	1,415	1,715	1,551	1,729
Bruchdehnung	%	MD	1,52	1,39	1,58	1,53	1,61	2,03
Bruchdehnung	%	CD	4,09	3,54	4,84	4,01	6,81	4,41
Arbeitsauf- nahmevermö- gen	J/m ²	MD	41,75	38	49,66	44,19	50,73	49,28
Arbeitsauf- nahmevermö- gen	J/m ²	CD	39,7	41,29	56,65	53,76	85,13	59,95
Ultraschallmethode nach Lorentzen&Wettré								
TSO-Winkel	(+MD) grd	+MD	-3,85	4,79	2,65	2,84	2,23	0,9
Min.			-4,92	4,53	1,4	2,25	1,48	0,07
Max.			-2,34	5,15	3,75	4,21	3,2	1,79
TSI (MD)	kNm/g	MD	12,21	12,92	10,09	10,1	10,29	10,37
TSI (CD)	kNm/g	CD	4,35	5,15	5,23	5,62	5,26	5,61
TSI (MD/CD)			2,8	2,5	1,92	1,79	1,94	1,84
Formation								
Co-occurrence	Vk		5,26	5,36	3,97	3,90	3,74	3,78
	Stabw.		0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,04
	Corr.-index		0,30	0,30	0,03	0,04	0,03	0,03
	Stabw.		0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
	Form.- index		2,90	2,95	0,72	0,73	0,64	0,71
	Stabw.		0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,06
PTS-Methode	Index ho- riz.		6,53	6,73	1,22	1,25	0,95	1,15
	Stabw.		0,16	0,37	0,18	0,17	0,03	0,13
	Index verti- kal		7,55	7,34	1,17	1,31	1,08	1,34
	Stabw.		0,13	0,34	0,20	0,11	0,02	0,20
	Form.- index		7,04	7,04	1,20	1,28	1,01	1,24
	Stabw.		0,13	0,35	0,19	0,13	0,02	0,17
Powerspekt- rum (PSA)	Form.- index		482,15	504,39	37,98	37,61	32,29	33,07
	Stabw.		3,26	8,37	0,28	0,82	0,18	0,58

Papiersorte		Lauf- rich- tung	Streich- rohpapier SR	Streichroh- papier SR-	gestr. Pa- pier (n.SM)	gestr. Pa- pier (n.SM)	gestr. Pa- pier (n.SK)	gestr. Pa- pier (n.SK)
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeichnung			B/FS/5	B/M/5	B/FS/6	B/M/6	B/FS/7	B/M/7
Flächen-m.	g/m ²		50	50	90	90	90	90
Penetrationsdynamik								
Messung	Einheit							
	A 0,5		1,1	2,3				
	A 10				21	22	21	20,9
	Max [s]	s	0,188	0,039	0,197	0,152	0,197	0,136
	W		1,2	-	0,036	0,024	0,036	0,017
Oberflächenspannung								
Randwinkel	sigma- Gesamt		nM	nM	40,66	41,78	38,56	36,71
Dimensionsstabilität								
Nassdehnung und Trockenschrumpfung								
Nassdehnung bei 1N/60mm Spannung	nach 2 s [%]	CD	4,967	3,35	0,085	0,029	0,051	0,029
	nach 60 s [%]	CD	gerissen	5,133	5,919	3,206	5,919	4,038
Schrumpfung bei 1 N/60 mm, 180°C	nach 2 s [%]	CD	-0,649	-0,594	-0,402	-0,354	-0,395	-0,419
	nach 60 s [%]	CD	-1,026	-0,929	-0,773	-0,669	-0,763	-0,776
Klimakurve (Hysterese)								
Δl [%] bei relativer Feuchte	50 %	CD	0	0	0	0	0	0
	80 %	CD			0,655	0,480	0,593	0,495
	50 %	CD			0,370	0,278	0,345	0,285
	20 %	CD			-0,003	-0,030	-0,008	-0,020
	50 %	CD			0,180	0,125	0,173	0,133
	80 %	CD			0,733	0,565	0,695	0,575
Cockling								
mw	µm		453,3	453,5	675,7	562,6	464,7	545,6
s _q	µm		176,4	224,6	272,3	249,9	212,9	270,3
Blasigkeit	µm/mm		15,8	15,6	13,0	13,9	12,1	13,8
Welligkeit	µm/mm ^{0.5}		60,41	72,39	85,40	79,01	66,97	82,23

Anlage 3. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma C (vgl. **Tab. 5**)

Papiersorte	Maßeinheit	Laufrichtung	SC 56	SC 56	EP 70	EP 70	MWC 80	MWC 80
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeichnung			C/FS/8	C/M/8	C/FS/9	C/M/9	C/FS/10	C/M/10
Flächen-m.	g/m ²		56	56	70	70	80	80
Physikalische Papiereigenschaften- Eigenschaftsorientierung im Papier								
Messung	Einheit							
Breitenbezogene Bruchkraft	kN/m	MD	2,022	2,168	4,519	4,073	4,055	3,746
Breitenbezogene Bruchkraft	kN/m	CD	0,7566	0,7993	2,389	3,012	1,187	1,338
Bruchdehnung	%	MD	0,99	1	1,69	1,61	1,49	1,27
Bruchdehnung	%	CD	2,06	1,6	7,47	5,83	2,33	1,98
Arbeitsaufnahmevermögen	J/m ²	MD	12,4	13,42	49,94	43,28	38,88	29,2
Arbeitsaufnahmevermögen	J/m ²	CD	10,6	8,828	127,8	121,3	21,1	19,54
Ultraschallmethode nach Lorentzen&Wettré								
TSO-Winkel	(+MD) grad	+MD	-0,51	3,08	2,7	2,4	-1,6	-0,84
Min.			-2,1	2,18	0,08	-1,25	-4,68	-2,65
Max.			0,46	3,82	6,18	5,7	2,81	1,4
TSI (MD)	kNm/g	MD	7,43	7,62	11,11	11,06	9,89	9,89
TSI (CD)	kNm/g	CD	3,41	3,74	6,1	6,82	5,7	5,82
TSI (MD/CD)			2,17	2,02	1,82	1,61	1,72	1,69
Formation								
Co-occurrence	Vk		6,34	6,58	4,09	3,96	4,23	4,19
	Stabw.		0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,01
	Corr.-index		0,07	0,05	0,07	0,07	0,05	0,06
	Stabw.		0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	Form.-index		1,73	1,50	1,05	1,02	0,96	1,04
	Stabw.		0,09	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03
PTS-Methode	Index horiz.		2,04	1,83	1,66	1,57	1,25	1,24
	Stabw.		0,14	0,11	0,10	0,01	0,01	0,02
	Index vertikal		2,46	2,20	1,40	1,54	1,55	1,55
	Stabw.		0,21	0,06	0,09	0,09	0,03	0,03
	Form.-index		2,25	2,01	1,53	1,55	1,40	1,39
	Stabw.		0,18	0,08	0,09	0,05	0,02	0,03
Powerspektrum (PSA)	Form.-index		97,89	99,16	47,72	45,19	49,12	47,00
	Stabw.		4,59	4,89	0,64	0,31	1,62	0,46
Penetrationsdynamik								
	A 0,5		2,8	2,7				
	A 30				12	11,8	15,9	16,4
	A 60							
	Max [s]	s	0,038	0,038	0,14	0,133	0,109	0,17
	W		-	-	0,014	0,006	0,003	0,004
Randwinkel	sigma-Gesamt		54,08	57,33	43,02	43,52	40,42	38,26
Dimensionsstabilität								
Nassdehnung und Trockenschrumpfung								
Nassdehnung bei 1N/60mm Spannung	nach 2 s [%]	CD	4,761	2,228	0,127	0,106	0,115	0,097
	nach 60 s [%]	CD	6,428	3,137	2,01	1,725	4,488	1,725
Schrumpfung bei 1 N/60 mm, 180°C	nach 2 s [%]	CD	-0,584	-0,529	-0,303	-0,326	-0,355	-0,327
	nach 60 s [%]	CD	-0,835	-0,769	-0,515	-0,571	-0,723	-0,758

Papiersorte	Maßeinheit	Laufrichtung	SC 56	SC 56	EP 70	EP 70	MWC 80	MWC 80
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeichnung			C/FS/8	C/M/8	C/FS/9	C/M/9	C/FS/10	C/M/10
Flächen-m.	g/m ²		56	56	70	70	80	80
Klimakurve (Hysterese)								
ΔI [%] bei relativer Feuchte	50 %	CD	0	0	0	0	0	0
	80 %	CD						
	50 %	CD						
	20 %	CD						
	50 %	CD						
	80 %	CD						
Cockling								
mw	µm		317,2	397,2	352,4	352,9	528,4	513,4
s _g	µm		143,4	150,7	128,8	158,4	236,3	214,3
Blasigkeit	µm/mm		14,3	14,4	13,2	17,0	16,1	15,1
Welligkeit	µm/mm ^{0.5}		48,81	52,75	43,38	54,66	76,04	72,17

Anlage 4. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma D. (vgl. **Tab. 5**)

Papiersorte		Lauf- rich- tung	Muster 1 Streich- roh.	Muster 2 Streich- roh.	Muster 3 gestr. Kopier- papier	Muster 4 gestr. Kopier- papier	Muster 5 Streich- roh.	Muster 6 Streich- roh	Muster 7 Bilder- druck glänzend	Muster 8 Bilder- druck glänzend
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeich- nung			D/FS/11	D/M/11	D/FS/12	D/M/12	D/FS/13	D/M/13	D/FS/14	D/M/14
Flächen-m.	g/m ²		90	90	120	120	69	69	115	115
Physikalische Papiereigenschaften- Eigenschaftsorientierung im Papier										
Messung	Einheit									
Breitenbe- zogene Bruchkraft	kN/m	MD	5,319	5,222	6,317	6,341	4,88	4,813	5,637	5,882
Breitenbe- zogene Bruchkraft	kN/m	CD	3,002	3,064	3,197	3,264	1,841	1,912	2,536	2,743
Bruchdeh- nung	%	MD	1,57	1,41	2,01	1,88	2,02	2	2,05	2,13
Bruchdeh- nung	%	CD	5,61	4,05	6,37	5,91	3,42	2,81	5,52	4,92
Arbeitsauf- nahme- vermögen	J/m ²	MD	53,99	47,16	84,21	79,5	66,04	64,42	77,65	83,11
Arbeitsauf- nahme- vermögen	J/m ²	CD	127	93,6	156,2	146,4	49,11	41,33	109,6	101,7
Ultraschallmethode nach Lorentzen&Wettré										
TSO- Winkel	(+MD) grd	+MD	-1,46	-2,31	-1,1	4,11	-2,33	-2,31	-2,41	1,54
Min.			-5,15	-4,59	-3,35	2,18	-3,51	-3,43	-3,9	-1,17
Max.			1,48	0	1,01	5,07	-1,79	-1,32	-1,4	4,59
TSI (MD)	kNm/g	MD	9,1	9,06	8,9	9,01	10,21	10,12	10,26	9,75
TSI (CD)	kNm/g	CD	4,9	5,25	5,39	5,42	5,12	5,1	5,31	6,38
TSI (MD/CD)			1,85	1,71	1,64	1,65	1,98	1,98	1,92	1,52
Formation										
Co- occurrence	Vk		4,43	5,16	3,57	3,68	5,06	5,07	3,38	3,21
	Stabw.		0,07	0,03	0,03	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02
	Corr.- index		0,32	0,24	0,22	0,23	0,32	0,32	0,06	0,08
	Stabw.		0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	F..-index		2,50	2,50	1,66	1,75	2,88	2,89	0,82	0,89
	Stabw.		0,10	0,05	0,06	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
PTS- Methode	Index horiz.		3,91	3,83	2,14	2,10	5,33	5,30	1,04	1,16
	Stabw.		0,28	0,05	0,08	0,09	0,12	0,06	0,05	0,07
	Index vertikal		4,42	4,18	2,05	2,33	5,87	5,84	1,17	1,30
	Stabw.		0,45	0,09	0,14	0,02	0,13	0,13	0,07	0,08
	F.-index		4,17	4,01	2,10	2,22	5,60	5,57	1,11	1,23
	Stabw.		0,36	0,06	0,11	0,05	0,12	0,08	0,06	0,08
Power- spektrum	F.-index		147,90	156,80	49,71	46,17	327,27	321,90	25,21	25,80
	Stabw.		10,80	3,41	2,04	1,37	13,85	8,22	0,79	0,71

Papiersorte		Lauf- rich- tung	Muster 1 Streich- roh.	Muster 2 Streich- roh.	Muster 3 gestr. Kopier- papier	Muster 4 gestr. Kopier- papier	Muster 5 Streich- roh.	Muster 6 Streich- roh.	Muster 7 Bilder- druck glänzend	Muster 8 Bilder- druck glänzend
Position			FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte	FS	Mitte
Bezeich- nung			D/FS/11	D/M/11	D/FS/12	D/M/12	D/FS/13	D/M/13	D/FS/14	D/M/14
Flächen-m.	g/m ²		90	90	120	120	69	69	115	115
Penetrationsdynamik										
	A 0,5		3,2	3,7						
	A 10		64,7	64,5	23,9	17,4	12,4	12,7	13,5	14,6
	Max [s]	s	0,039	0,039	0,157	0,222	0,775	0,74	0,198	0,161
	W		-	-	0,015	0,041	2	1,9	0,013	0,017
Oberflächenspannung										
Randwinkel	sigma- Gesamt		58,17	50,45	31,74	30,44	34,35	37,45	48,39	39,48
Dimensionsstabilität										
Nassdehnung und Trockenschrumpfung										
Nassdeh- nung bei 1N/60mm Spannung	nach 2 s [%]	CD	3,478	2,534	0,052	0,043	0,15	0,123	0,063	0,077
	nach 60 s [%]	CD	5,321	4,059	4,29	4,042	1,97	1,373	2,754	2,292
Schrump- fung bei 1 N/60 mm, 180°C	nach 2 s [%]	CD	-0,558	-0,561	-0,436	-0,558	-0,619	-0,634	-0,346	-0,319
	nach 60 s [%]	CD	-0,956	-0,903	-0,732	-1,008	-1,014	-0,974	-0,709	-0,61
Klimakurve (Hysterese)										
Δl [%] bei relativer Feuchte	50 %	CD	0	0	0	0	0	0	0	0
	80 %	CD								
	50 %	CD								
	20 %	CD								
	50 %	CD								
	80 %	CD								
Cockling										
mw	μm		568,6	516,5	423,3	407,3	395,6	393,0	318,2	370,9
s _g	μm		306,2	225,5	215,1	169,2	158,7	237,5	116,5	148,9
Blasigkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}$		12,7	12,7	14,4	14,5	14,8	20,4	12,4	12,8
Welligkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}^{0,5}$		95,65	74,18	63,95	57,72	56,12	83,47	40,32	49,45

Anlage 5. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. E (vgl. **Tab. 5**)

Papiersorte		Lauf-richtung	A (einseitig gestr.)	B (einseitig gestr.)	C (beide Seiten gestr.)	D (beide Seiten gestr.)	E beide Seiten gestr.)
Position			Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Bezeichnung			E/15	E/16	E/17	E/18	E/19
Flächenmasse	g/m ²		123	123	139	139	139
Physikalische Papiereigenschaften- Eigenschaftsorientierung im Papier							
Messung	Einheit						
Breitenbezogene Bruchkraft	kN/m	MD	7,047	4,166	7,554	8,72	8,656
Breitenbezogene Bruchkraft	kN/m	CD	3,946	4,131	4,099	4,198	4,446
Bruchdehnung	%	MD	1,12	4,7	1,69	2,04	1,7
	[s]	MD	0,21	0,181	0,128	0,137	0,16
Bruchdehnung	%	CD	3,34	4,69	4,57	4,42	4,79
Arbeitsaufnahmevermögen	J/m ²	MD	48,8	145,3	84,16	121	98,03
Arbeitsaufnahmevermögen	J/m ²	CD	98,1	143,5	143,2	137,4	163,8
Ultraschallmethode nach Lorentzen&Wettre							
TSO-Winkel	(+MD) grd	+MD	-1,42	2,53	-0,21	0,74	0,62
Min.			-3,59	-2,89	-1,79	-1,09	-1,87
Max.			0,93	6,09	2,5	2,02	2,89
TSI (MD)	kNm/g	MD	11,31	11,43	10,45	11,37	11,46
TSI (CD)	kNm/g	CD	5,99	5,88	6,17	6,22	6,34
TSI (MD/CD)		MD/CD	1,88	1,93	1,69	1,82	1,8
Formation							
Co-occurrence	Vk		3,03	3,35	2,79	3,08	2,94
	Stabw.		0,02	0,04	0,05	0,05	0,02
	Corr.-index		0,28	0,34	0,22	0,31	0,25
	Stabw.		0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
	Form.-index		1,61	1,95	1,31	1,72	1,47
	Stabw.		0,02	0,01	0,09	0,06	0,02
PTS-Methode	Index horiz.		2,63	3,19	1,81	3,05	2,06
	Stabw.		0,17	0,07	0,29	0,09	0,22
	Index vertikal		2,87	3,43	1,90	3,18	2,38
	Stabw.		0,22	0,07	0,21	0,05	0,30
	Form.-index		2,75	3,31	1,85	3,11	2,22
	Stabw.		0,18	0,07	0,24	0,07	0,25
Powerspektrum (PSA)	Form.-index		54,41	81,20	30,87	54,16	44,14
	Stabw.		1,68	2,12	1,94	4,30	0,32

Papiersorte		Lauf-richtung	A (einseitig gestr.)	B (einseitig gestr.)	C (beide Seiten gestr.)	D (beide Seiten gestr.)	E beide Seiten gestr.)
Position			Mitte	Mitte	Mitte	Mitte	Mitte
Bezeichnung			E/15	E/16	E/17	E/18	E/19
Flächenmasse	g/m ²		123	123	139	139	139
Messung	Einheit						
Penetrationsdynamik							
	A 60		8,8	13,8	2	5,5	2,4
	Max [s]	s	8,736	1,686	7,417	7,708	1,404
	W		5,2	0,44	3,6	3,8	0,21
	[s]		1,53	0,3	0,91	0,65	0,58
Oberflächenspannung							
Randwinkel	sigma-Gesamt		43,51	43,13	47,75	47,01	46,6
Dimensionsstabilität							
Nassdehnung und Trockenschrumpfung							
Nassdehnung bei 1N/60mm Spannung	nach 2 s [%]	CD	0,012	0,029	0	0,029	0
	nach 60 s [%]	CD	0,395	0,677	0,387	0,409	0,226
Schrumpfung bei 1 N/60 mm, 180°C	nach 2 s [%]	CD	-0,21	-0,28	-0,228	-0,097	-0,061
	nach 60 s [%]	CD	-0,619	-0,735	-0,695	-0,642	-0,634
Klimakurve (Hysterese)							
Δl [%] bei relativer Feuchte	50 %	CD	0	0	0	0	0
	80 %	CD	0,173	0,355	0,313	0,248	
	50 %	CD	0,115	0,215	0,210	0,208	
	20 %	CD	-0,043	-0,035	-0,030	-0,020	
	50 %	CD	0,045	0,080	0,070	0,033	
	80 %	CD	0,280	0,413	0,390	0,338	
Cockling							
mw	μm		252,7	273,1	209,4	278,7	316,0
s_q	μm		105,2	129,9	73,2	104,7	132,6
Blasigkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}$		8,3	7,9	6,9	8,9	7,2
Welligkeit	$\mu\text{m}/\text{mm}^{0.5}$		33,48	40,95	24,82	36,46	41,55

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.	Streifenbildung durch den Stoffauflauf [33]	10
Abb. 2.	Blasigkeit bei verschiedenen Blattbildungstypen aus [35]	10
Abb. 3.	Zusammenhänge zwischen Trockengehalt während des Herstellungsprozesses und der Faserausrichtung in Querrichtung.[1]	13
Abb. 4.	Rohstoff- und Prozesseinflüsse auf die Dimensionsstabilität von Papier	17
Abb. 5.	Nassdehnung der Papiermuster 2s nach Befeuchtung (in CD-Richtung)	21
Abb. 6.	Nassdehnung der Papiermuster 2s nach Befeuchtung (in CD-Richtung)	21
Abb. 7.	Nassdehnung der Papiermuster 60s nach Befeuchtung (in CD-Richtung)	22
Abb. 8.	Trockenschrumpfung der Papiermuster 2s nach Temperatureinwirkung (in CD- Richtung).....	23
Abb. 9.	Trockenschrumpfung der Papiermuster 60s nach Temperatureinwirkung (in CD-Richtung)	24
Abb. 10.	Blasigkeit der Papiermuster, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel (4 h bei 23°C und 98 % RH, danach im Normklima (23°, 50% RH) konditionieren und Messung)	24
Abb. 11.	Blasigkeit, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel: mittlere Blasenhöhe als Dimensionsänderung	25
Abb. 12.	Blasigkeit hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel: Standardabweichung der mittleren Blasenhöhe als Dimensionsänderung.....	25
Abb. 13.	Welligkeit der Papiermuster, hervorgerufen durch gezielten Klimawechsel (4 h bei 23°C und 98 % RH, danach im Normklima (23°, 50% RH) konditionieren und Messung)	26
Abb. 14.	Feuchtedehnung (50 → 80 % rel. Feuchte) und Trockenschrumpfung (50 → 20 % rel. Feuchte) (entnommen aus der Klimakurve/Hysteresis)	27
Abb. 15.	Beispiel für Unterschiede in der Klimakurve von zwei Papiermustern, die sich hinsichtlich der Probeorte (Führerseite - FS und Mitte – M) auf der Papierbahn unterscheiden	27
Abb. 16.	Unterschiede in der Klimakurve zwischen Papiermustern, die sich im Strichauftrag (ungestrichen und gestrichen) unterscheiden.....	28
Abb. 17.	Beispiel für Unterschiede in der Klimakurve von ungefüllten (1) und gefüllten (2) Papieren in Abhängigkeit vom Probenahmeort (FS – Führerseite, M – Mitte)	28
Abb. 18.	Flächenmasse der Papiermuster.....	31
Abb. 19.	Einfluss der Flächenmasse auf die Blasigkeit; höhere Flächenmasse reduziert die Blasigkeit.....	31
Abb. 20.	Bruchkraftverhältnis MD/CD für die Papiermuster.....	32
Abb. 21.	Abhängigkeit der Blasigkeit von Bruchkraftverhältnis MD/CD	32
Abb. 22.	Verhältnis der Bruchdehnung MD/CD für die Papiermuster	33
Abb. 23.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Bruchdehnung für die untersuchten Papiermuster.....	33

Abb. 24.	Arbeitsaufnahmevermögen für die untersuchten Papiermuster	34
Abb. 25.	Abhängigkeit der Blasigkeit vom Arbeitsaufnahmevermögen	34
Abb. 26.	TSO (Tensile Orientation) für die untersuchten Papiermuster	35
Abb. 27.	Abhängigkeit der Blasigkeit vom TSO (Tensile Orientation)	35
Abb. 28.	Zugsteifigkeit (TSI) in MD-Richtung für die untersuchten Papiermuster	36
Abb. 29.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Zugsteifigkeit (MD)	36
Abb. 30.	Zugsteifigkeit in CD-Richtung (TSI) für die untersuchten Papiermuster	37
Abb. 31.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Zugsteifigkeit (CD)	37
Abb. 32.	Formationsindex (Co-Occurrence) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)	38
Abb. 33.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation (Co-Occurrence-Methode)	38
Abb. 34.	Formationsindex (PTS-Methode) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)	39
Abb. 35.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation (PTS-Methode)	39
Abb. 36.	Formationsindex (Powerspektrum) für die untersuchten Papiermuster (je kleiner der Formationsindex, desto besser die Formation)	40
Abb. 37.	Abhängigkeit der Blasigkeit von der Formation	40
Abb. 38.	Oberflächenspannung der untersuchten Papiermuster, untersucht nach der Randwinkelmethode	41
Abb. 39.	Zeitlicher Verlauf der Wasserpenetration ins Papier: benötigte Zeit für die vollständige Papierbenetzung der untersuchten Muster (geringe Zeitauflösung)	42
Abb. 40.	Zeitlicher Verlauf der Wasserpenetration ins Papier: benötigte Zeit für die vollständige Papierbenetzung der untersuchten Muster (hohe Zeitauflösung – ohne Muster der Firma E)	42
Abb. 41.	Vergleich von Messung und Prognose für Blasigkeit, berechnet nach Gleichung 2	43
Abb. 42.	Probleme in der Dimensionsstabilität haben ihre Ursache in den Erzeugungsbedingungen	44

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.	Wärmeausdehnungskoeffizienten α_i im Bereich 20 – 100 °C	5
Tab. 2.	Feuchtdehnungskoeffizienten (Hygroexpansionskoeffizienten) β_i von Papier	5
Tab. 3.	Zusammenstellung einiger wichtiger Einflussgrößen auf Wellig- und Blasigkeit	7
Tab. 4.	Feuchtesättigung von Papierrohstoffen bei 100 % rel. Luftfeuchte	8
Tab. 5.	Untersuchte Papiersortimente mit Probenahmeort und Musterbezeichnung	18
Tab. 6.	Angewandte Methoden zur Charakterisierung des Dimensionsstabilitätsverhaltens	19

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. A (vgl. Tab. 5)	52
Anlage 2. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. B (vgl. Tab. 5)	54
Anlage 3. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma C (vgl. Tab. 5)	56
Anlage 4. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma D. (vgl. Tab. 5)	58
Anlage 5. Messergebnisse an den Papiermustern der Firma. E (vgl. Tab. 5)	60