



INFOß-Projekt Nr. 23

Charakterisierung und Ursachenanalyse von Cockle bei Inkjet-Papieren

SCHLUSSBERICHT

April 2002

Institut für Papierfabrikation
Technische Universität Darmstadt

Leiter der Forschungsstelle:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. L.. Götttsching

Projektbearbeiter:
Dr.-Ing. H. Praast

Charakterisierung und Ursachenanalyse von Cockle bei Inkjet-Papieren

Dr.-Ing. Hermann Praast
Institut für Papierfabrikation
Technische Universität Darmstadt

Projektbegleiter:

Olaf Friederichs, Zanders Feinpapiere AG
Gerd Carl, Nordland Papier AG
Dr. J.-L. Hemmes, M-real Stockstadt GmbH
Dr. F. Miletzky, Ahlstrom Osnabrück GmbH

April 2002

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Forschungsziel	2
3.	Probenmaterial	3
4.	Übertragene Tintenmenge durch Inkjet-Drucker	3
5	Visuelle Bewertung des Cockle	6
5.1	Cockle-Index	6
5.2	PV-Index	9
6.	Messverfahren zur Quantifizierung von Cockling	10
6.1	Codierter Lichtansatz (Gray-Code-Verfahren)	10
6.1.1	Messanordnung	11
6.1.2	Kalibrierung	12
6.1.3	Korrektur der Referenzebene	13
6.2	IfP-Cockling-Tester	14
7.	Auswertung von Cockling-Bildern	15
7.1	Tiefpassfilterung	15
7.2	Charakterisierung von Cockling	15
7.3	Vergleich zwischen visueller und messtechnischer Bewertung von Cockle	17
7.4	Cockling-Index und Flächendeckungsgrad	17
8.	Wet Cockle	19
9.	Ursachen des Cockle von Inkjet-Papieren	20
9.1	Fragebogen	20
9.2	Bemerkungen	23
9.3	Einfluss des Druckers	23
9.4	Flächenbezogene Masse	23
9.5	Dicke	25
9.6	Scheinbare Dichte	26
9.7	Bruchkraft-Verhältnis	26
9.8	Feuchtdehnung	27
9.9	Wasseraufnahme	28
9.10	Strich	29
9.10.1	Strichgewicht	29
9.10.2	Cockling von Rohpapier und Endprodukt	30
10.	Simulation von wet und dry cockle	32
10.1	Modifizierter Cobb-Tester	32
10.2	Wet Cockle	32
10.3	Dry Cockle	34
11.	Zusammenfassung	36
12.	Literatur	39
13.	Anhang (Paarweiser Vergleich)	40

Charakterisierung und Ursachenanalyse von Cockle bei Inkjet-Papieren

1. Einleitung

Die Bedeutung elektronischer Druckverfahren („Digital Non-Impact-Druckverfahren“) nimmt weltweit zu. Aktuelle Marktdaten bestätigen hierbei die Bedeutung des Mehrfarben-Inkjet-Drucks, der besonders im Home- und Office-Bereich, aber auch bei qualitativ höchstwertigen, fotoähnlichen Ausdrucken immer mehr an Bedeutung gewinnt. Für die breite Anwendung kommen im Wesentlichen Büropapiere zum Einsatz. Papiere für das mittlere Qualitätssegment, die eine gute Druckqualität bei annehmbaren Preisen bieten, werden meist mittels speziell angepasster Leimungsmittel oberflächengeleimt oder pigmentiert. High End Produkte sind gestrichen oder haben eine Spezialbeschichtung. Der Strich auf holzfreiem, massegeleimtem Papier besteht in der Regel aus einem Kieselsäure-Typ als Pigment sowie speziellen Bindern und kationischen Additiven. Wegen ihres hohen Preises werden die High End Produkte vornehmlich im Präsentationsbereich eingesetzt. Mit Inkjet-Druckern lassen sich hierauf fotoähnliche Druckqualitäten erreichen /1,2/. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes hat man sich darauf geeinigt, Inkjet-Papiere nach folgendem Schema zu klassifizieren:

- multifunktionale Büropapiere
- matt- und spezialgestrichene Inkjet-Papiere und
- Inkjet-Papiere mit Spezialbeschichtung.

Die Zusammensetzung von Inkjet-Tinten unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Drucksystem (kontinuierlich/diskontinuierlich) und vom Drucker- bzw. Tintenhersteller. Im Allgemeinen enthalten sie 3 bis 5 % saure oder Direktfarbstoffe. Den Hauptanteil stellt Wasser mit 50 bis 90 % dar. Daneben werde heute zunehmend organische Lösemittel mit einem Anteil bis 50 % eingesetzt, um die Trocknungsgeschwindigkeit der Tinten zu erhöhen. Zur Steuerung von Form und Größe der Tropfen sind ferner oberflächenaktive Substanzen (Tenside) erforderlich. Im so genannten kontinuierlichen Inkjet-Verfahren benötigt man zusätzlich Elektrolyte, um die Tintentröpfchen aufladen zu können. Neben den Druckeigenschaften (Wicking, Feathering, Bleeding, Farbdichte, Mottling) sind Wegschlag- und Trockenzeiten der Inkjet-Tinten wichtige Parameter /3/.

Bisher wenig erforscht ist das Cockle. Besonders bei der vollflächigen Bedruckung verursacht der hohe Wassergehalt der Inkjet-Tinte, dass die Papiere während des Druckens (wet cockle) und nach dem Trocknen (dry cockle) Planlagenstörungen aufweisen. Man erkennt kreisförmig oder sich in Laufrichtung des Papiers erstreckende Blasen, denen in Maschinenrichtung verlaufende Wellenstrukturen niedriger Frequenz überlagert sein können. Ferner resultieren Teile der Störungen durch den Drucker. Cockle stellt somit beim Ausdrucken von Bildern eines der maßgeblichen Probleme dar und bestimmt bei den High End Inkjet-Papieren die Produktqualität.

2. Forschungsziel

Das vorrangige Ziel dieses Forschungsantrages ist die Messung und Charakterisierung von Cockle über die zweidimensionale topographische Vermessung der Paperoberfläche mit Hilfe des codierten Lichtansatzes und einem am Institut für Papierfabrikation entwickelten Cockling-Tester, der das Schräglichtverfahren zur Beurteilung der Planlagestörungen benutzt. Neben der Applikation dieser an der Forschungsstelle vorhandenen Messverfahren, die zur Charakterisierung von Cockling in Zeitungsdruckpapieren entwickelt wurden, ist eine entsprechende Bildauswertesoftware zur Quantifizierung der Cockle-Intensität nötig.

Ein weiteres Ziel ist die Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen dem Cockle im Druckprozess (wet cockle) und nach dem Trocknen von vollflächig bedrucktem Papier (dry cockle).

Um eine Statusaufnahme der Cockleproblematik zu erhalten, soll ferner das Cockle gestrichener, pigmentierter und ungestrichener Inkjet-Papiere verschiedener Hersteller vermessen werden. Das vollflächige Bedrucken der Papiere erfolgt zuvor mit Tintenstrahldruckern. Ferner sind Benetzbarkeit, Papieraufbau (Strichstärke und Zusammensetzung) sowie Papierstruktureigenschaften (Formation, Porosität) mit dem Cockle (Blasigkeit, Welligkeit) zwecks Ursachenfindung zu korrelieren.

Die Zielsetzungen des Projektes gliedern sich somit in folgende Teilbereiche auf:

1. Entwicklung eines Messverfahrens zur Erfassung von Cockle durch

- „codierten Lichtansatz“ (Topographiemessung)
- IfP-Cockling-Tester (Schräglichtverfahren)

2. Festlegung der Tintenmenge zur Prüfung von Cockle

- Ab welcher Tintenmenge treten Planlagestörungen auf?
- Wie ändert sich das Cockle mit steigender Tintenmenge?

3. Statusaufnahme des Cockle von Inkjet-Papieren

Um eine Statusaufnahme der Cockle-Problematik zu erhalten, müssen die Inkjet-Papiere verschiedener Hersteller mit Inkjet-Druckern bedruckt werden. Die Untersuchungen beziehen sich auf diskontinuierliche Druckverfahren (Drop-on-demand-Verfahren). Hierbei erfolgt die Erzeugung des Tropfenstrahls entweder durch ein Piezoelement, wobei ein Vorratsbehälter für die Tinte elektromechanisch kurzzeitig zusammengedrückt wird, oder dadurch, dass in einem Vorratsbehälter für die Tinte durch schnelles lokales Erhitzen eine Dampfblase erzeugt wird, die den Tintentropfen aus dem Vorratsbehälter und der Düse austreibt (Bubble Jet Verfahren). Die Anforderungen an die Tinte sind bei den verschiedenen Drop-on-demand-Verfahren unterschiedlich. Zudem setzt jeder Druckerhersteller seine eigene Tinte ein. Da die Wechselwirkung Tinte-Papier das Cockle bestimmt, sind oben genannte Versuche mit drei verschiedenen Druckern, nämlich Epson Stylus Color 850, HP 959 und Canon S450, durchzu-

führen, bei denen die Tropfenerzeugung über Piezoelement oder Thermoelement (Bubble Jet) erfolgt.

4. Analyse der Ursachen von Cockle

Korrelation des gemessenen Cockle mit:

- Benetzbarkeit (Randwinkel)
- Eindringverhalten von Flüssigkeiten
- Papieraufbau (Strichstärke und Zusammensetzung)
- Papierstruktur (Formation, Porosität)

Während sich obige Versuche auf das so genannte dry cockle beziehen, also die verbleibende Beuligkeit nach dem Trocknen des Papiers beschreibt, ist ferner die unmittelbar beim Drucken auftretende starke Aufwölbung des Papiers (wet cockle) ein entscheidendes Kriterium der Inkjet-Papiere. Daher war im Antrag folgender weiterer Untersuchungspunkt aufgeführt:

5. Simulation des Wet Cockle durch modifizierten Cobb-Tester

4. Probenmaterial

Im Rahmen dieses INFOR-Projektes wurden mehrere Hersteller von Inkjet-Papieren mit der Bitte um Bereitstellung von Papiermustern angeschrieben. Die Firmen August Koehler AG, Cham Paper Group/Cham, Felix Schoeller Holding GmbH, Heinrich August Schoeller Söhne GmbH, Mitsubishi HiTec Paper Flensburg GmbH, Nordland Papier AG, Sihl GmbH, Steinbeis Temming GmbH und Zanders Feinpapiere AG stellten folgende Papiere bereit:

Sorte	Anzahl
Multifunktionale Büropapiere	6
Matt- und spezialgestrichene Inkjet-Papiere	13
Inkjet-Papiere als Rohpapiere	4
Inkjet-Papiere mit Spezialbeschichtung	3

Somit konnte bei den Untersuchungen auf insgesamt 22 verschiedene Papiere zurückgegriffen werden. Zusätzlich standen bei den matt- und spezialgestrichenen Papieren noch vier Rohpapiere zur Verfügung sowie einige Papiere mit Abstufungen bezüglich Flächen- und Strichgewicht.

4. Übertragene Tintenmenge durch Inkjet-Drucker

Vor Durchführung der eigentlichen Untersuchungen war die durch Tintenstrahldrucker übertragene Tintenmenge zu ermitteln. Dazu wurden mit CorelDraw Raster- und Volltonflächen mit gleichen Anteilen von Cyan und Magenta erzeugt und als Printdatei unter dem Betriebs-

system Dos mit den Druckern HP 959 und Canon S450 ausgedruckt. **Abb.1** zeigt die übertragene Tintenmenge, in Abhängigkeit von der Flächendeckung aufgetragen. Die Zahlenangabe 50% bedeutet, dass sowohl Cyan als auch Magenta mit jeweils einer Flächendeckung von 50% übereinander gedruckt sind. Während beim HP-Drucker die Tintenmenge proportional mit der Flächendeckung zunimmt, zeigt der Canon S450 ein nichtlineares Verhalten bei deutlich höherem Tintenverbrauch. Bei 100 % Flächendeckung ergeben sich Tintenmengen von 9 (HP 959) bzw. 19 g/m² (Canon S450). Ein noch höherer Tintenverbrauch lässt sich beim Bedrucken mit 100% Schwarz realisieren (**Abb.2**). Hierbei ergeben sich Tintenverbräuche von 21 bzw. 23 g/m². Bei dem HP-Drucker ermöglicht eine Flächendeckung von 94 % das Aufbringen von ca. 17 g/m². In allen Fällen war die Druckereinstellung „Normalpapier“ vorgegeben worden.

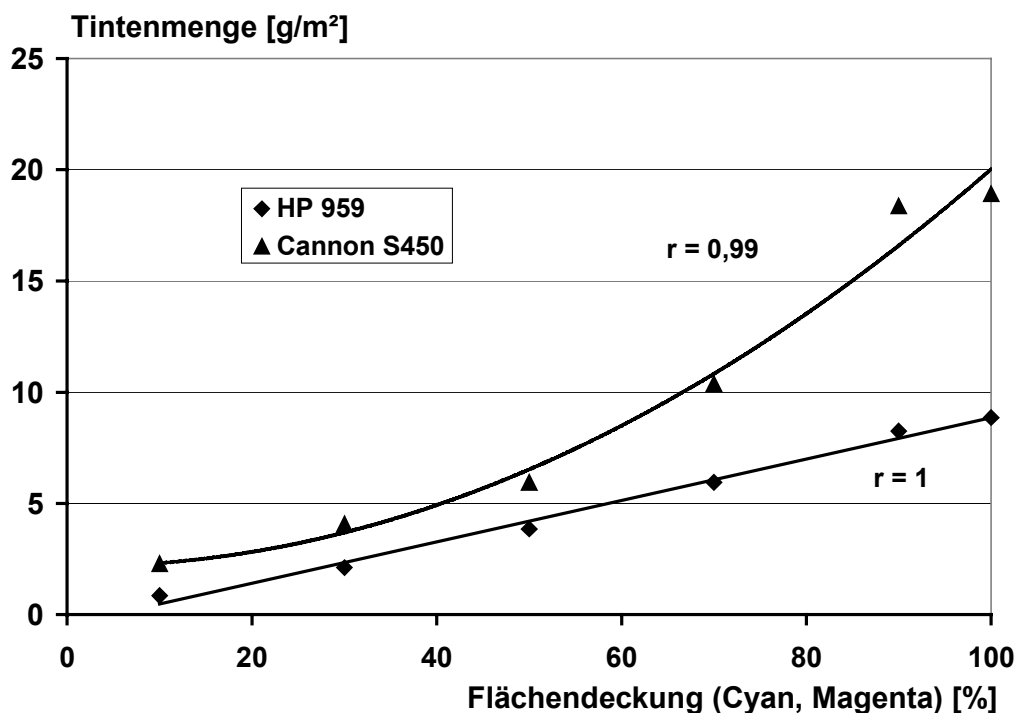


Abb.1: Tintenverbrauch in Abhängigkeit von Flächendeckung und Inkjet-Drucker (Druckereinstellung: Normalpapier)

Druckt man 100% Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz bei der Druckereinstellung Fotopapier übereinander, dann ergibt sich eine schwarze Volltonfläche. Gemäß **Abb. 3** wird diese bei dem HP-Drucker 959 fast ausschließlich durch Ausdrucken der farbigen Tinte realisiert, während der Canon S450 und Epson Color 850 der schwarzen Tinte ca. 10 bis 20% Farbe zumischen. Der gesamte Tintenverbrauch liegt nun zwischen 20 und 25,5 g/m². Da das Cockling eine Funktion der übertragenen Tintenmenge ist, belegt dieser einfache Versuch, dass die zu erwartenden Planlagestörungen sehr stark von dem verwendeten Drucker und den spezifizierten Druckereinstellungen abhängen.

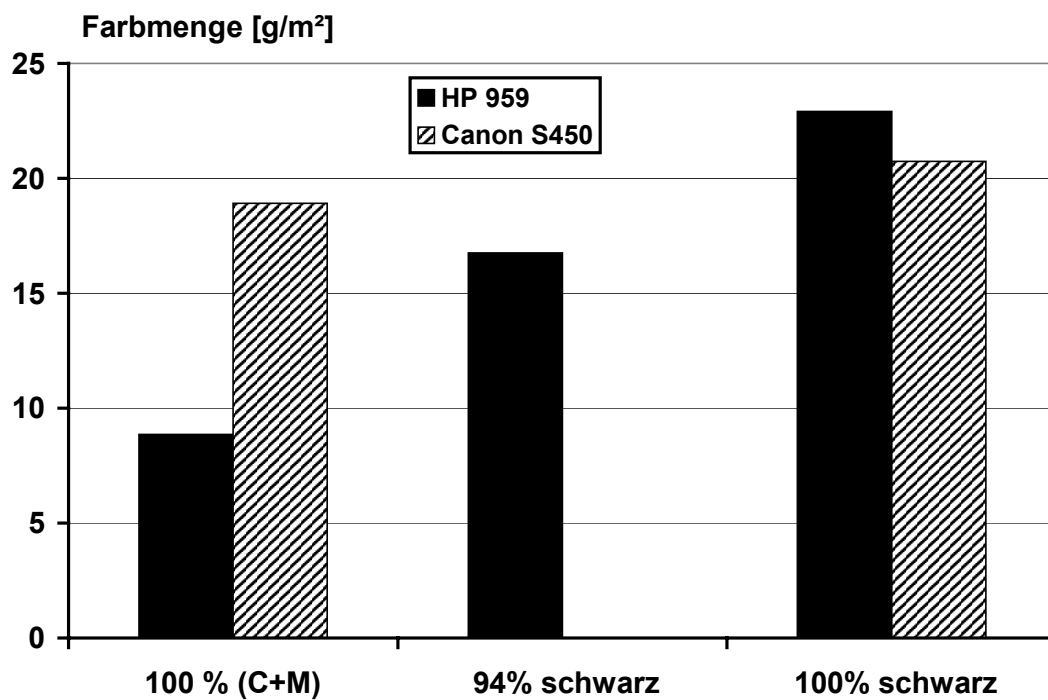


Abb.2: Tintenverbrauch bei Bedruckung mit schwarzer Tinte
(Druckereinstellung: Normalpapier)

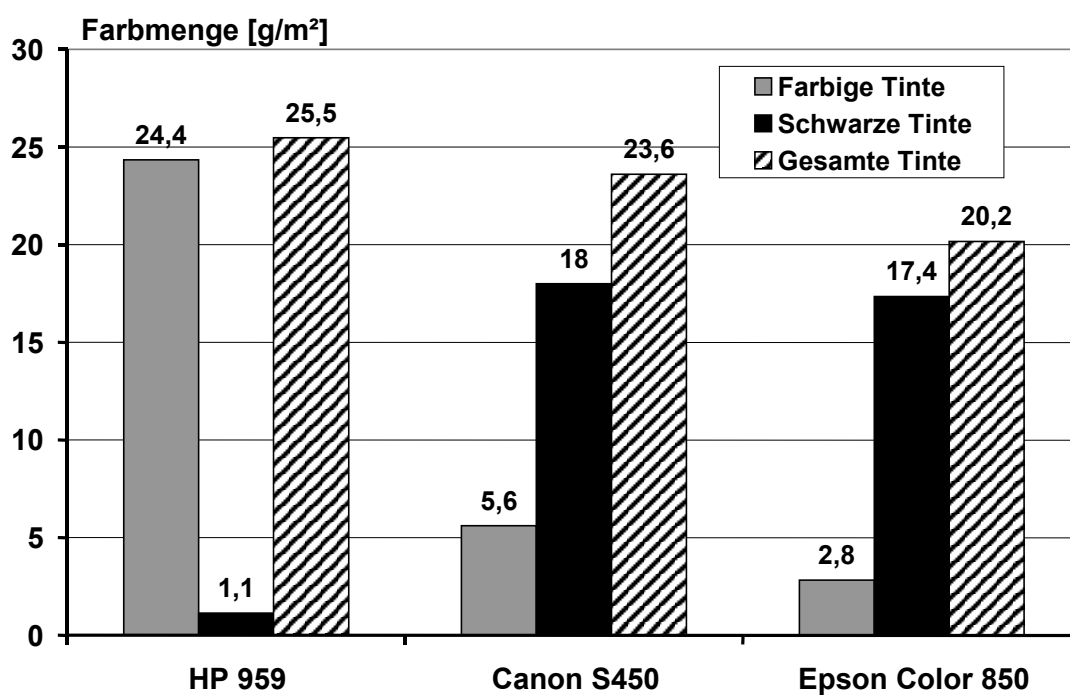


Abb. 3: Tintenverbrauch beim Übereinanderdrucken von je 100% Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz
(Druckereinstellung: Fotopapier)

5 Visuelle Bewertung des Cockle

5.1 Cockle-Index

In Anlehnung an den Normungsvorschlag „Cockle bei Inkjet - Drucken“ wurden verschiedene Inkjet-Papiere mit unterschiedlichen Flächendeckungsgraden bedruckt und unmittelbar nach dem Druck die Flächendeckungsgrade, bei dem die visuell beurteilte Wellenbildung der Papiere erfolgt, als Cockle-Index angegeben. Dieser Cockling-Index sollte sowohl das dry als auch das wet cockle charakterisieren. Entsprechend dem Drucklayout in **Abb. 4** bedruckte man immer zwei Bereiche je Papierblatt mit unterschiedlicher Flächendeckung.

Nach **Abb. 5** beginnt die Wellenbildung bei den meisten multifunktionalen Büropapieren bei dem Übereinanderdruck von je 30 % Cyan und 30 % Magenta mit dem HP- und Canon-Drucker, also bei einem Cockle-Index von 30.

Die Skala des Cockle-Index der höherwertigen matt- und spezialbeschichteten Papiere reicht bis 250, was bedeutet, dass diese Proben selbst bei höchstem Tintenauftrag nicht cockeln (**Abb.6**). Für Planlagestörungen bei einer Bedruckung mit 100 % Schwarz wurde der Cockle-Index 200 festgesetzt bzw. bei einer 94%-iger Flächendeckung mit der Farbe Schwarz beim HP-Drucker der Wert 150 gewählt. Die niedrigsten Cockle-Indizes erreicht man bei dem Canon-Drucker, der bekanntlich auch die höchsten Farbmengen beim Zweifarbendruck aufträgt (Abb.1).

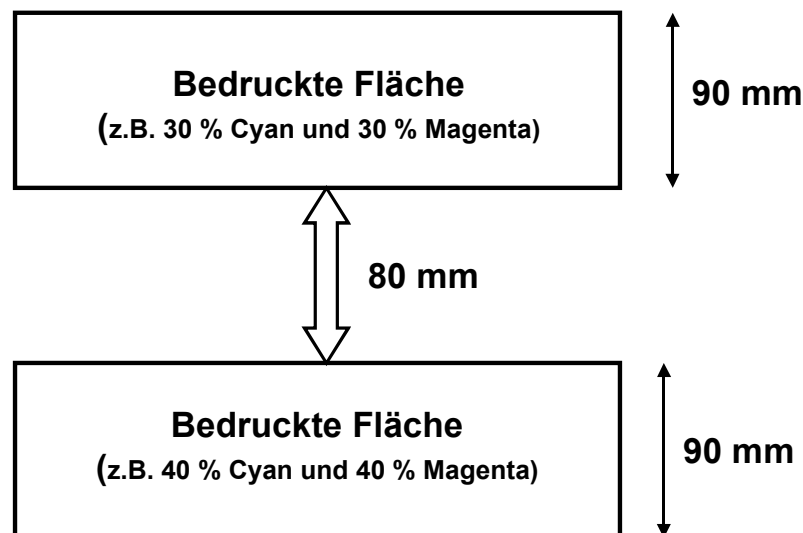


Abb. 4: Druckmuster zur Bestimmung des Cockle

Die spezialbeschichteten Inkjet-Papiere waren meist mit einer PE-Folie beschichtet, die zwar das Cockle verhinderte, dafür aber die Druckfarbentrocknung deutlich erschwerte, da die Flüssigkeit nicht in das Papier wegschlagen kann.

Die Gruppierung der einzelnen Papiere wurde nach Firmenangaben vorgenommen. So ist es durchaus vorstellbar, dass beispielsweise das Papier des Herstellers F bei den spezialbeschichteten Papieren eher in die Gruppe der matt- und spezialgestrichenen Papiere einzuordnen wäre.

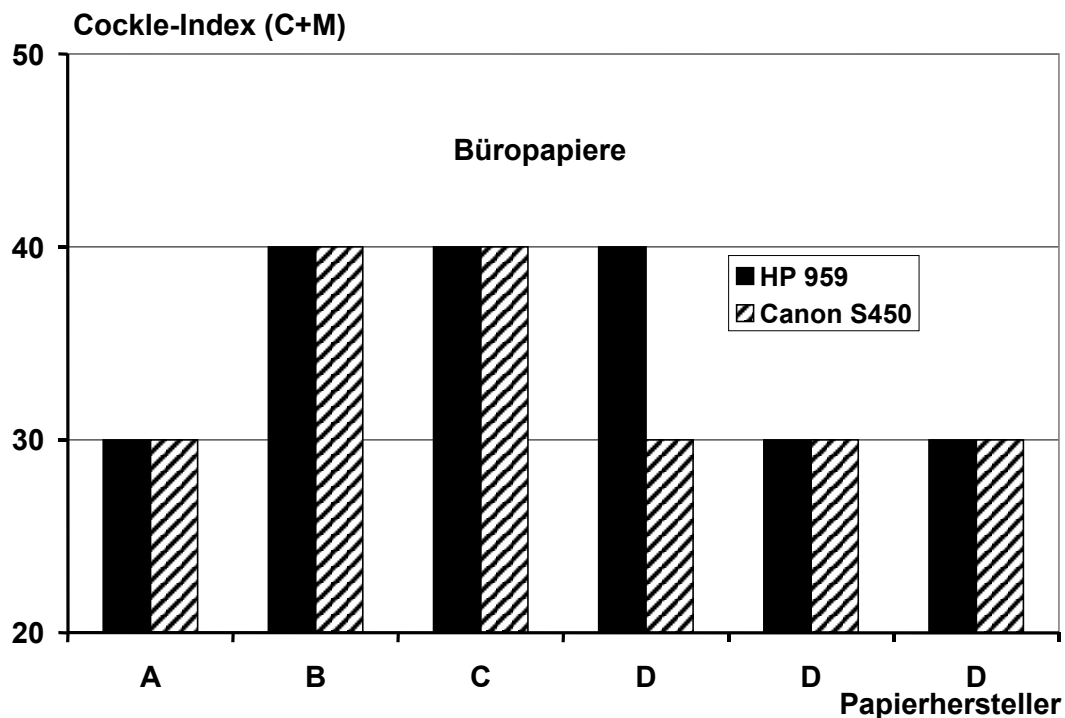


Abb. 5: Cockle-Index der multifunktionalen Büropapiere
(Druckeinstellung: Normalpapier; Druckfarben: Cyan und Magenta)

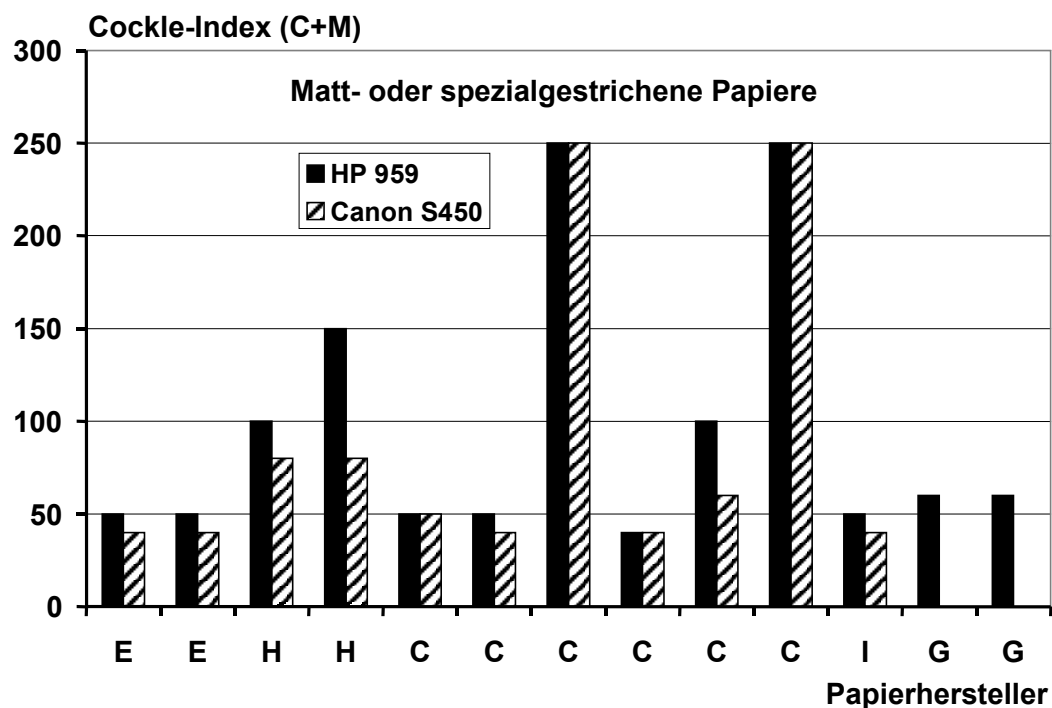


Abb. 6: Cockle-Index der matt- und spezialgestrichenen Papiere
(Druckeinstellung: Normalpapier; Druckfarben: Cyan und Magenta)

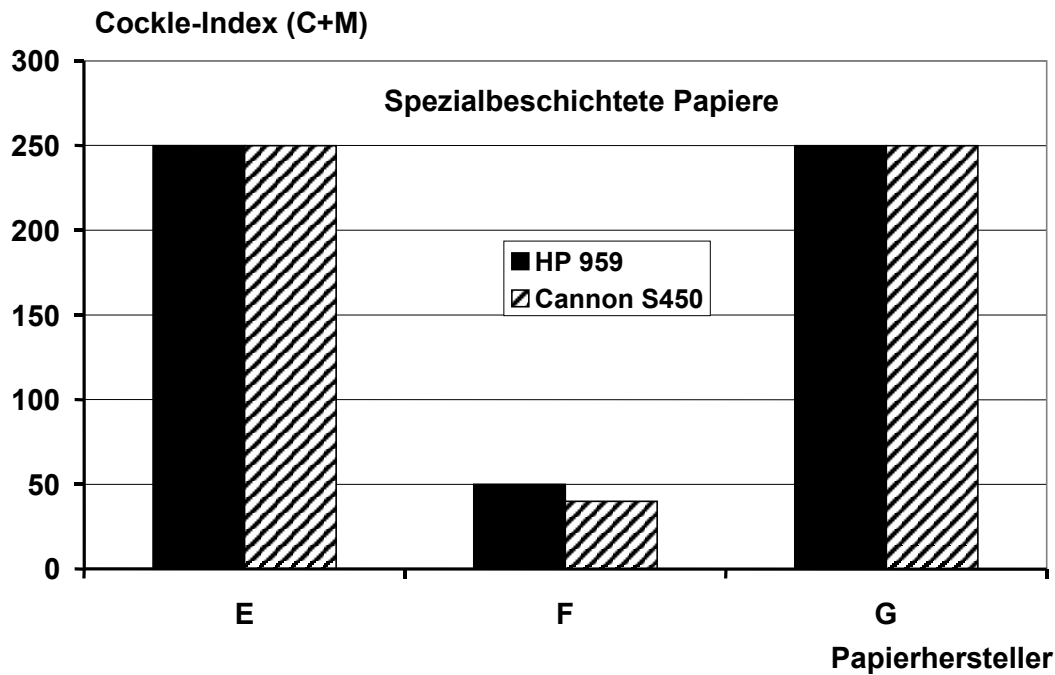


Abb. 7: Cockle-Index der spezialbeschichteten Papiere
(Druckeinstellung: Normalpapier; Druckfarben: Cyan und Magenta)

In **Abb. 8** sind die beim Bedrucken mit zwei (Cyan und Magenta) und drei Farben (Cyan, Magenta, Yellow) erreichten Cockle-Indizes gegenübergestellt. Aufgrund des höheren Tintenauftrags haben die mit drei Farben bedruckten Proben das stärkste Cockle. Nach unseren Beobachtungen mischt der HP-Drucker, mit dem alle Versuche durchgeführt wurden, bei Flächendeckungsgraden über 50% automatisch schwarze Tinte beim Dreifarbendruck und der Druckereinstellung Normalpapier hinzu, weshalb sich die aufgebrauchte Tintenmenge wahrscheinlich nicht mehr proportional zur Flächendeckung verhält. Ferner verdeutlicht Abb. 8, dass einige aus der Gruppe der matt- und spezialgestrichenen Produkte stammenden Papiere, selbst bei der maximal möglichen Tintenmenge, kein Planlagestörungen aufwiesen.

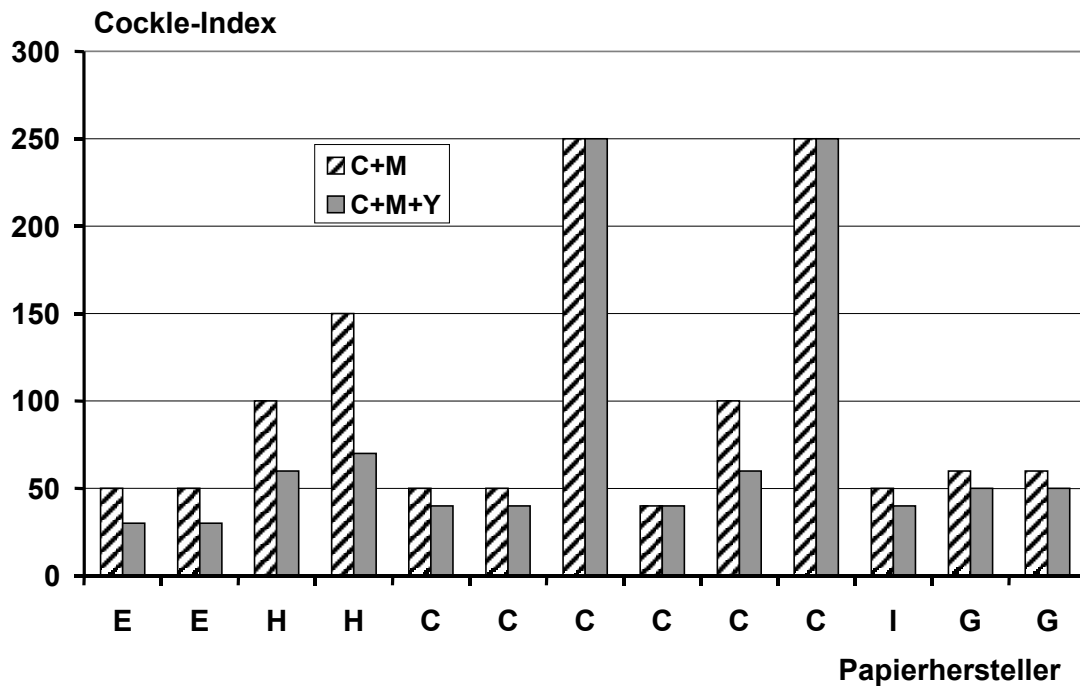


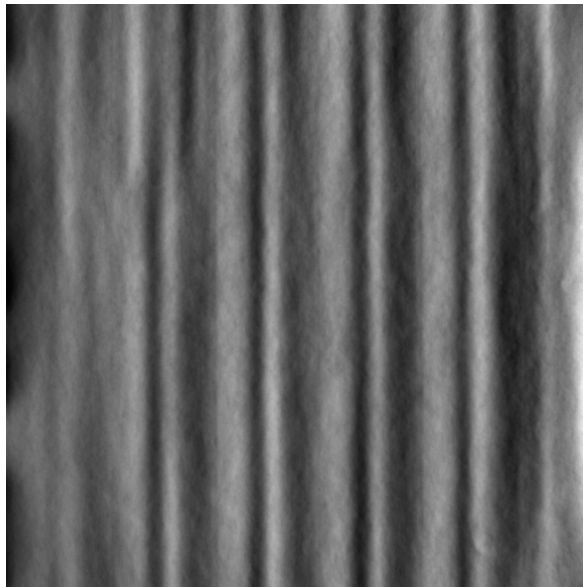
Abb.8: Cockle-Index der matt- und spezialgestrichenen Papiere
(Druckeinstellung: Normalpapier, Fotopapier; Druckfarben: Cyan und Magenta;
Cyan, Magenta, Yellow)

5.2 PV-Index

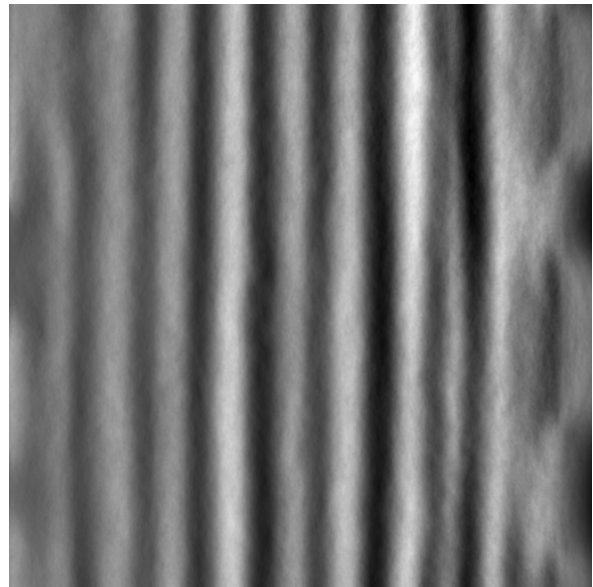
Bisher erfolgte die Bewertung von Cockle ausschließlich visuell, was erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich Klassifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit beinhaltet. Ferner sind auf subjektive Einstufungen gestützte Aussagen für Untersuchungen von technologischen Ursachen des Cockling unbefriedigend. Daher war es die Aufgabe, ein Messverfahren zu entwickeln, das eine objektive Bewertung der Planlagestörung vornimmt. Diese äußern sich beim Bedrucken der Papiere in den verwendeten DIN A4 Inkjet-Druckern in Form einer in Maschinenrichtung verlaufenden Welligkeit. Dabei erzeugt der HP 959 eine deutlich höherfrequente Störung als der Epson Drucker (**Abb.9**). Somit bestimmt der Drucker die Art der Wellenbildung.

Die visuelle Bewertung wurde an 12 Inkjet-Papieren unterschiedlicher Hersteller, die 24 Stunden zuvor mit den Farben Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz mit 400% Flächendeckung bedruckt worden waren, von 14 Personen im Schräglicht nach dem Kriterium Cockling (Welligkeit) vorgenommen. Das Ergebnis mündete im Paarvergleichs-Index (PV-Index), der eine den Qualitätsabständen gerecht werdende nichtäquidistante Rangordnung wiedergibt. Eine genaue Beschreibung des Paarweisen Vergleichs ist im Anhang aufgeführt.

Die PV-Indizes der Papiere mit unterschiedlicher Cockling-Intensität bilden die Leitlinie, an der sich die Entwicklung einer bildanalytischen Messmethode zu orientieren hat.



Epson Color 850



HP 959

Abb. 9: Cockling-Strukturen durch verschiedene Inkjet-Drucker

6. Messverfahren zur Quantifizierung von Cockling

6.1 Codierter Lichtansatz (Gray-Code-Verfahren)

Zur Erfassung der Topographie eines Papierblatts in einem Messvorgang wurde am Institut für Papierfabrikation die phasenmessende Triangulation gewählt. Hierbei projiziert man ein Liniengitter aus einer Beleuchtungsrichtung auf das zu vermessende Objekt und beobachtet das entstehende Muster unter dem Triangulationswinkel von 60° hierzu mit einer CCD-Kamera, die zur Vermeidung von Bildverzerrungen senkrecht über dem Messobjekt angeordnet ist. Bei dem verwendeten codierten Lichtansatz werden zur Codierung des Messvolumens n binäre Streifenmuster nacheinander auf das Prüfobjekt mit Hilfe eines steuerbaren LCD-Projektors abgebildet (**Abb. 10**). Die Streifenmuster ermöglichen die Unterscheidung von 2^n Projektionsrichtungen, die jeweils durch eine charakteristische Hell-Dunkel-Sequenz bzw. ein entsprechendes n -stelliges Codewort eindeutig gekennzeichnet sind. In den so gewonnenen Graubildern lassen sich zunächst durch eine geeignete Binarisierung die vom Projektor beleuchteten und unbeleuchteten Bereiche trennen. Die so entstehenden Binärbilder werden als Bitebene in einem konventionellen Bildspeicher zum so genannten Bit-Plane-Stack zusammengestellt, also hintereinander gespeichert. Jedes Pixel dieses Bit-Plane-Stack enthält nun für den an dieser Stelle beobachteten Objektpunkt eine n -stellige Bitfolge, die die Beleuchtungsrichtung des Projektors zu diesem Objektpunkt eindeutig beschreibt. Anschließend lassen sich bei bekannter Position von Kamera und Projektor die 3D-Koordinaten der beobachteten Objektpunkte durch Triangulation berechnen. Zur Steigerung der Auflösung wurde das

Verfahren noch durch eine zusätzliche Grauwertauswertung und ein Phasenshift-Verfahren, bei welchem Linienmuster mit konstanter Periode seitlich verschoben werden, erweitert. Interpolierende Auswerteverfahren ermöglichen somit Auflösungen im Sub-Pixel-Bereich $/4,5,6/$.

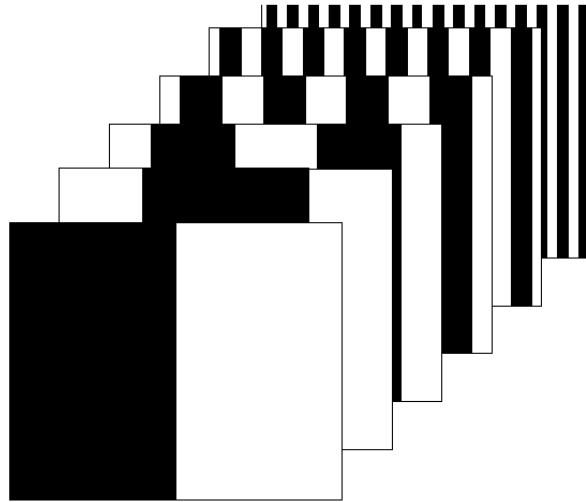


Abb. 10: Streifenmuster beim “codierten Lichtansatz”

Einer der wesentlichen Vorteile des codierten Lichtansatzes, auch als Gray-Code-Verfahren bezeichnet, liegt in der hohen Geschwindigkeit und Robustheit des Verfahrens, mit der die dreidimensionale Vermessung von Objektoberflächen durchgeführt werden kann. Für eine komplette 3D-Vermessung mit 262.144 Koordinaten benötigt man bei lediglich 10 Aufnahmen etwa 15 s. Der Bildausschnitt beträgt ca. 170 mm * 170 mm. Die Höhenschwankungen sind im einfachsten Fall durch die Standardabweichung beschreibbar.

6.1.1 Messanordnung

Die am IfP gewählte Messanordnung zeigt **Abb. 11**. Die CCD-Kamera wurde senkrecht zum Prüftisch angeordnet, um eine Verzerrung des Bildes zu vermeiden, während der Linienprojektor im Abstand von 130 cm zum Messobjekt unter einen Winkel von 60° (bezogen auf die Vertikale) die Linien auf das Papier projiziert.



Abb. 11: Messanordnung

6.1.2 Kalibrierung

Vor einer Messung muss das System zunächst kalibriert werden. Hierzu werden an verschiedenen z-Positionen (in der **Abb. 12** mit z_1 , z_2 , z_3 bezeichnet) Referenzebenen aufgenommen. Für jeden Kamerapunkt wird die beobachtete Liniennummer bestimmt und abgespeichert. Dies geschieht durch eine Kombination von codiertem Lichtansatz- und Phasenshiftverfahren. In der Abbildung ist exemplarisch nur ein einziger Kamerapunkt eingezeichnet, der bei der Kalibrierung der einzelnen Referenzebenen die Linien 11, 12, 13 "sieht". Es besteht also für diesen ausgewählten Kamerapunkt die Zuordnung $z_1 \rightarrow 11$, $z_2 \rightarrow 12$, $z_3 \rightarrow 13$. Durch diese Zuordnung ist der Projektor kalibriert. Bei der Messung des Objektes werden nun für alle Kamerapunkte die beobachteten Liniennummern bestimmt.

Um die Messgenauigkeit der 3D-Daten zu bewerten, muss ein geeigneter Prüfkörper, dessen physikalische Abmessungen genau genug bekannt sind, vermessen werden. Anhand der bei der Messung gewonnenen 3D-Punktwolke versucht man dann, die 3D-Daten durch eine lineare Transformation auf die Geometrie abzubilden. Im Allgemeinen wird mit einer ebenen, weißen Platte mit schwarzen Ringmustern kalibriert, die durch Unterlegen von mit hoher Genauigkeit gefertigte Stahlklötzchen horizontal verschoben wird (**Abb. 13**). Die aus jeweils vier Stahlzylindern bestehenden sieben Kalibriersätze unterscheiden sich in der Höhe jeweils um 0,75 mm.

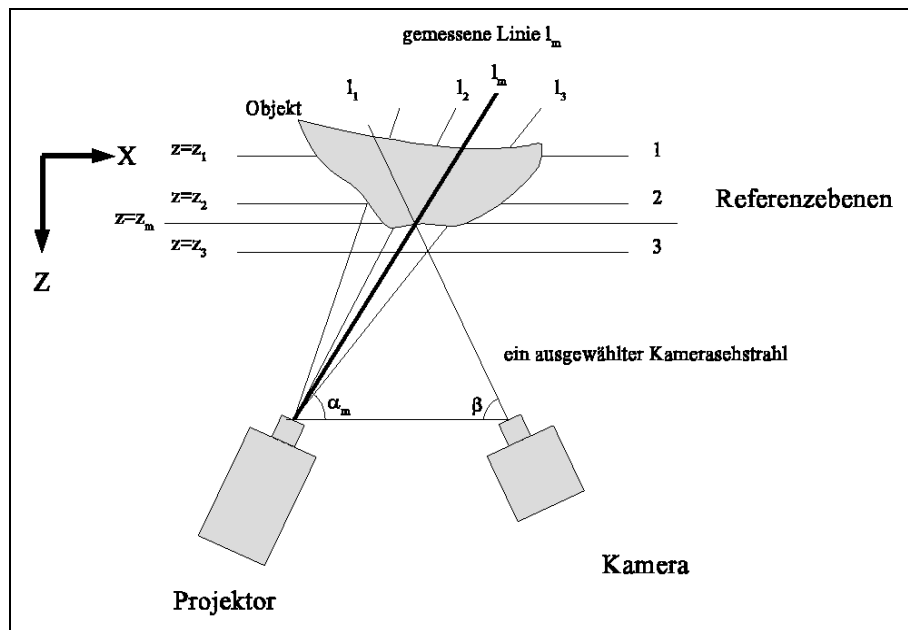


Abb. 12: Kalibrierungsverfahren

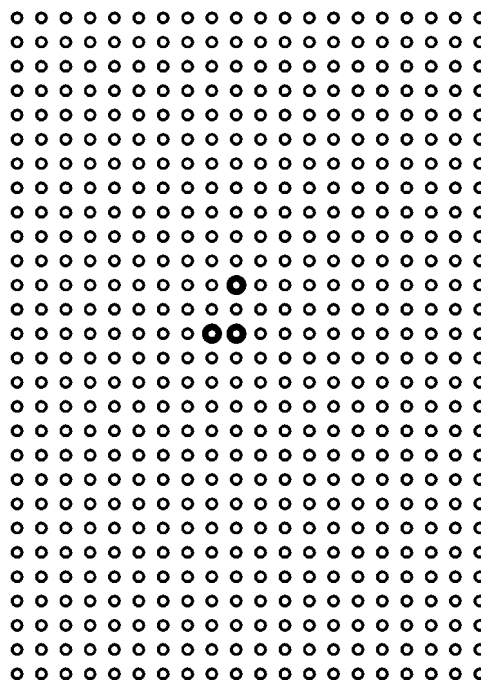


Abb. 13: Kalibriermuster

6.1.3 Korrektur der Referenzebene

Nach der Kalibrierung wird die Kalibrierplatte durch die Messunterlage ausgetauscht. Sowohl bei der Kalibrierplatte als auch bei der Messunterlage handelt es sich um mit hoher Präzision gefertigte Glasscheiben, welche im Siebdruck bedruckt wurden. Die Messunterlage ist weiß bedruckt, während sich auf der Kalibrierplatte das zur Kalibrierung benötigten Ringmuster

befindet. Der Austausch der Platten ist notwendig, da die Ringmuster der Kalibrierunterlage bei der Messung durch das Papier scheinen und somit das Messergebnis beeinflussen könnten.

Nach der Kalibrierung wird eine Messung der Referenzebene durchgeführt und das erhaltene Grauwertbild abgespeichert. Dieses wird bei den weiteren Messungen durch die Bildanalysesoftware vom Originalbild subtrahiert, um geringe Unterschiede zwischen Kalibriervorlage und Messplatte zu eliminieren.

6.2 IfP-Cockling-Tester

Ein am IfP entwickelter Cockling-Tester, dessen Aufbau und Messprinzip **Abb. 14** verdeutlicht, benutzt das Schräglichtverfahren zur Beurteilung der Planlagestörungen. Über ein Spiegelsystem wird die am Rand leicht niedergehaltene Papierprobe zur Unterdrückung des Curls unter einem Winkel von etwa 5° in Querrichtung beleuchtet, so dass die Berg- und Talstrukturen als helle bzw. dunkle Stellen hervortreten. Das kontrastreiche Bild von etwa 180 mm * 180 mm wird mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgenommen, in 512*512 Bildpunkte digitalisiert und anschließend ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass die Standardabweichung der Welligkeit des Schräglichtbildes in Form seiner Grauwerte (Abb. 15), nachfolgend als Cockling-Index bezeichnet, den visuellen Eindruck aussagekräftig beschreibt. Ein Nachteil des IfP-Cockling-Testers ist es, dass die Maßzahl keine Aussagen über die Wellenhöhe in z-Richtung liefert.

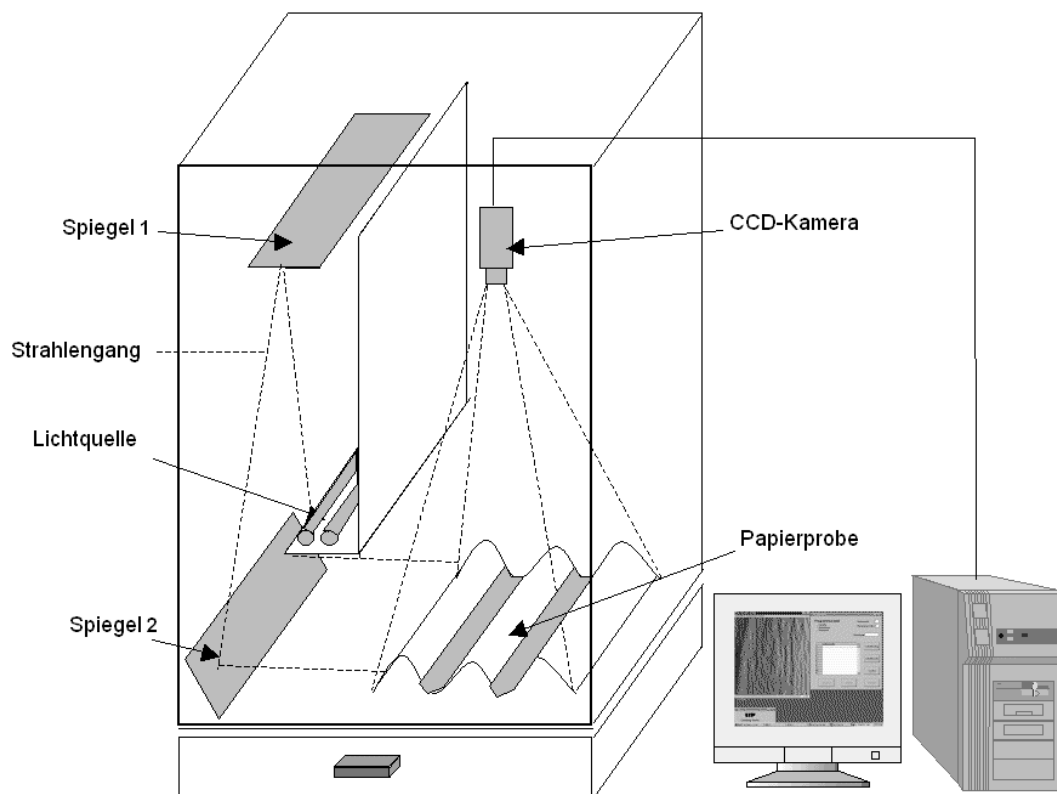


Abb. 14: IfP-Cockling-Tester

7. Auswertung von Cockling-Bildern

7.1 Tiefpassfilterung

Bei der Bedruckung von höherwertigen Inkjet-Papieren tritt ausschließlich eine Welligkeit auf. Um kurzwellige Oberflächenstrukturen zu eliminieren, wurde das Bild mit Hilfe einer Tiefpassfilterung im Ortsbereich gefaltet. Eine mit den Koeffizienten 1 besetzte Filtermatrixgröße von $16 * 64$ Pixel in x-y-Richtung hat sich als sinnvoll erwiesen.

Abb.15 verdeutlicht am Beispiel einer Schräglichtaufnahme des IfP-Cockling-Testers die Vorgehensweise. Im linken Teil der Abbildung ist das Originalbild dargestellt. Nach der Filterung sind alle Feinstrukturen eliminiert und es bleibt lediglich die Grobstruktur des Bildes als Wellenstruktur erhalten. Man erkennt die überwiegend in Maschinenrichtung verlaufenden Wellen. Subtrahiert man die Welligkeit vom Originalbild, so resultieren hieraus die Feinstrukturen bzw. Blasen. Originalbild, Welligkeit und Blasigkeit können nun im einfachsten Fall durch die Standardabweichungen s ihrer Höhenschwankungen als Grauwertschwankungen des Schräglichtbildes beschrieben werden. Als ein Maß für die innere Kohärenz und damit die Strukturgröße der Bilder erfolgte zusätzlich die Berechnung der Korrelationslänge $\lambda / 7$.

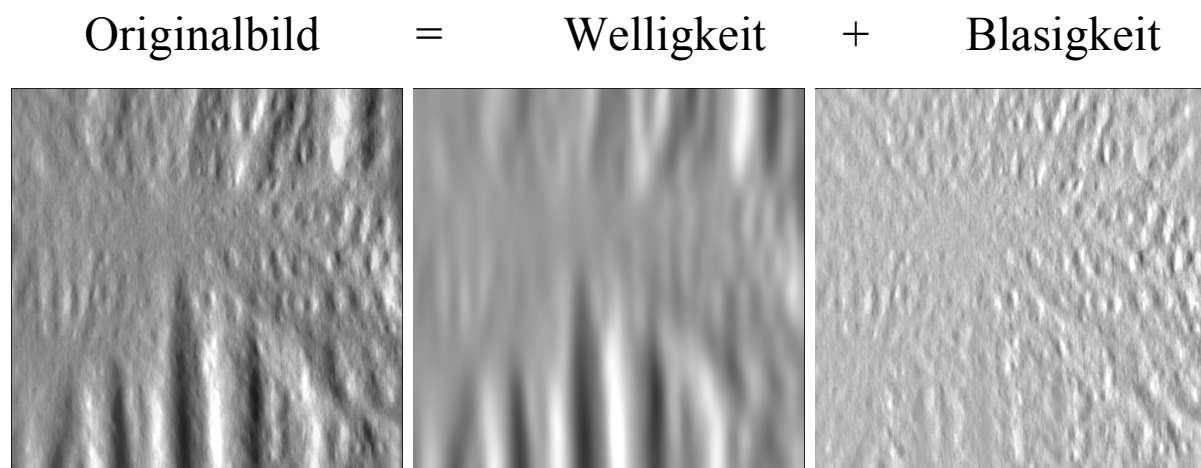


Abb. 15: Trennung der Cockling-Strukturen in Blasigkeit und Welligkeit

7.2 Charakterisierung von Cockling

Da es das Ziel ist, den visuellen Eindruck messtechnisch in entsprechender Reihenfolge zu quantifizieren, müssen die gewonnenen Messergebnisse aus der Tiefpassfilterung möglichst gut mit den in Kapitel 5.2 erläuterten PV-Indizes korrelieren.

Gemäß **Abb.16** zeigt die Standardabweichung des Welligkeitsbildes vom IfP-Cockling-Tester eine hohe Übereinstimmung zur subjektiven Einstufung. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,95.

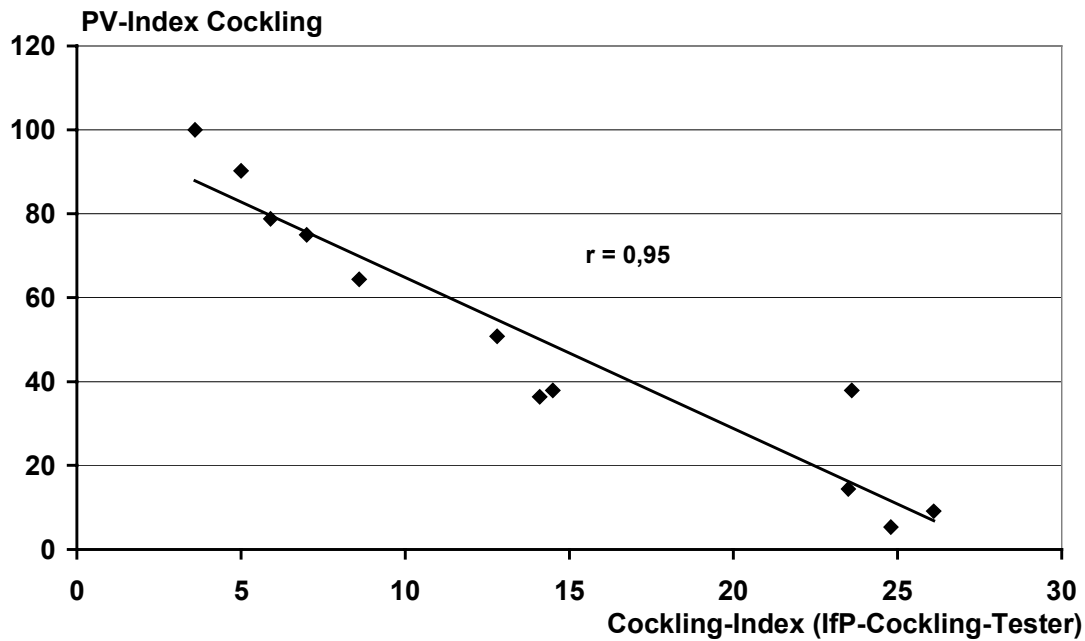


Abb. 16: Zusammenhang zwischen PV-index und Cockling-Index (“IfP-Cockling-Tester”)

Bei den Topographiebildern hat es sich bewährt, die Standardabweichung der Höhenschwankungen des Originalbildes noch durch die Wurzel aus der Korrelationslänge der Wellen zu dividieren. Das über den codierten Lichtansatz erfasste Cockling hat damit die Einheit $\mu\text{m}/(\text{mm})^{0.5}$ und zeigt denselben Trend wie die Messwerte vom IfP-Cockling-Tester (Abb.17). Demnach empfindet man das Cockling um so störender, je hochfrequenter die Wellenstrukturen auftreten.

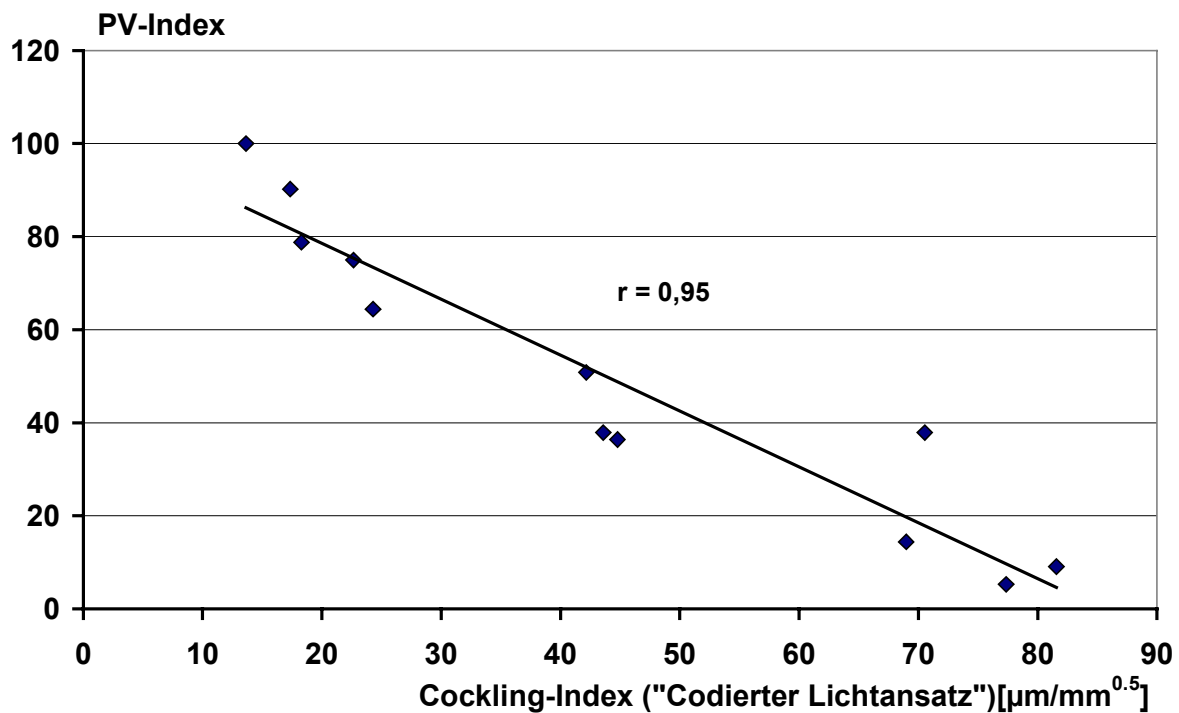


Abb. 17: Zusammenhang zwischen PV-Index und Cockling-Index (“Codierter Lichtansatz”)

7.3 Vergleich zwischen visueller und messtechnischer Bewertung von Cockle

In **Abb. 18** ist die visuelle Einstufung der Wellenbildung, also der Cockle-Index als Flächendeckung des Übereinanderdrucks von Cyan und Magenta, dem über codierten Lichtansatz messtechnisch ermittelten Cockling-Index für einige multifunktionalen Büropapiere sowie matt- und spezialgestrichene Inkjet-Papiere gegenübergestellt. Man erkennt, dass bei Cockle-Beginn die Wellenbildung unterschiedlich stark ausgeprägt ist, was mit Unsicherheiten bezüglich der subjektiven Bewertung sowie den relativ großen Flächendeckungsgradsprüngen bei der Prüfung dieses Qualitätskriteriums begründet werden kann. Ferner muss man bedenken, dass die visuelle Bewertung unmittelbar nach dem Druck erfolgte, während die Messung nach einer Trocknungszeit von 24 h vorgenommen wurde.

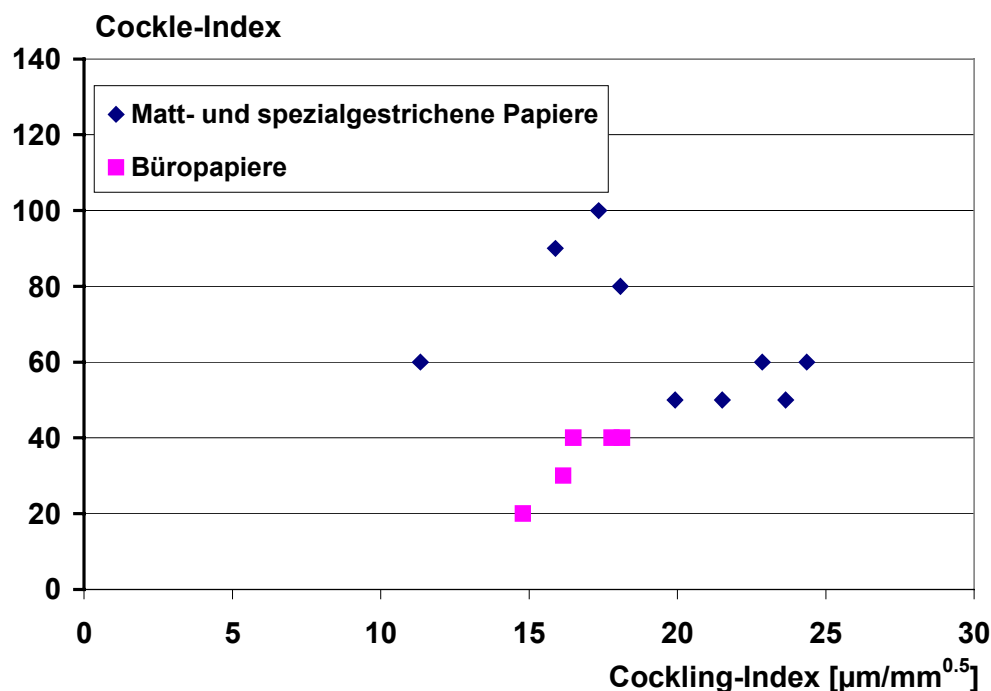


Abb. 18: Zusammenhang zwischen Cockle-Index (visuell) und Cockling-Index (gemessen)

7.4 Cockling-Index und Flächendeckungsgrad

Um die Veränderung der Wellenbildung in Abhängigkeit von der aufgetragenen Tintenmenge zu untersuchen, wurden die Papiere mit der Flächendeckung bis zum Cockle-Beginn, einer darüber um absolut 20 % höheren Cyan- und Magentaflächenbelegung (Cockling + 20) sowie mit der höchst möglichen Tintenmenge, also je 100% Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz (Flächendeckung 400 %), bedruckt. Der über den codierten Lichtansatz -24 h nach dem Druck- ermittelte Cockling-Index nimmt sowohl bei den Büro- als auch den matt- und spezialgestrichenen Inkjet-Papieren nur geringfügig zu, wenn beispielsweise statt einer Flächendeckung von 30 % mit 50% bedruckt wird (**Abb. 19** und **20**, Cockling Beginn; Cockling +20). Bei einer Flächendeckung von 400% zeigen alle Büropapiere eine extreme Wellenbildung, was sich in einem Cockling-Index zwischen 74 und 83 niederschlägt

(Abb.19). Derartig starke Planlagestörungen weisen auch viele matt- und spezialgestrichene Papiere auf, während die Papiere des Herstellers C, G und H ein deutlich geringeres bzw. kein Cockling zeigen. Da spezialbeschichtete Papiere keine Welligkeit aufweisen, fanden sie bei diesen Untersuchungen keine Berücksichtigung.

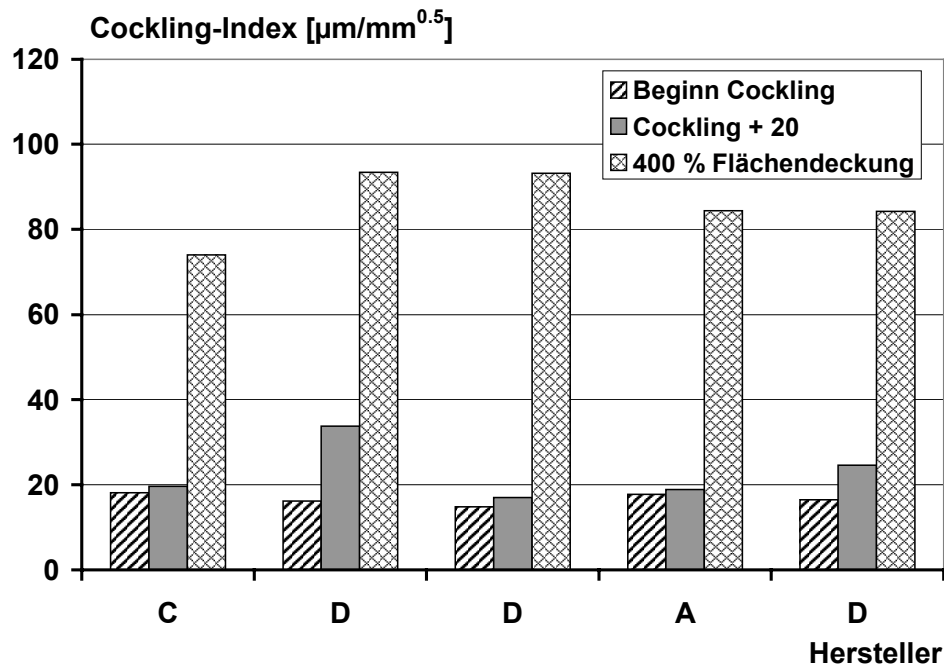


Abb. 19: Cockling-Index der multifunktionalen Büropapiere bei unterschiedlichen Flächendeckungsgraden

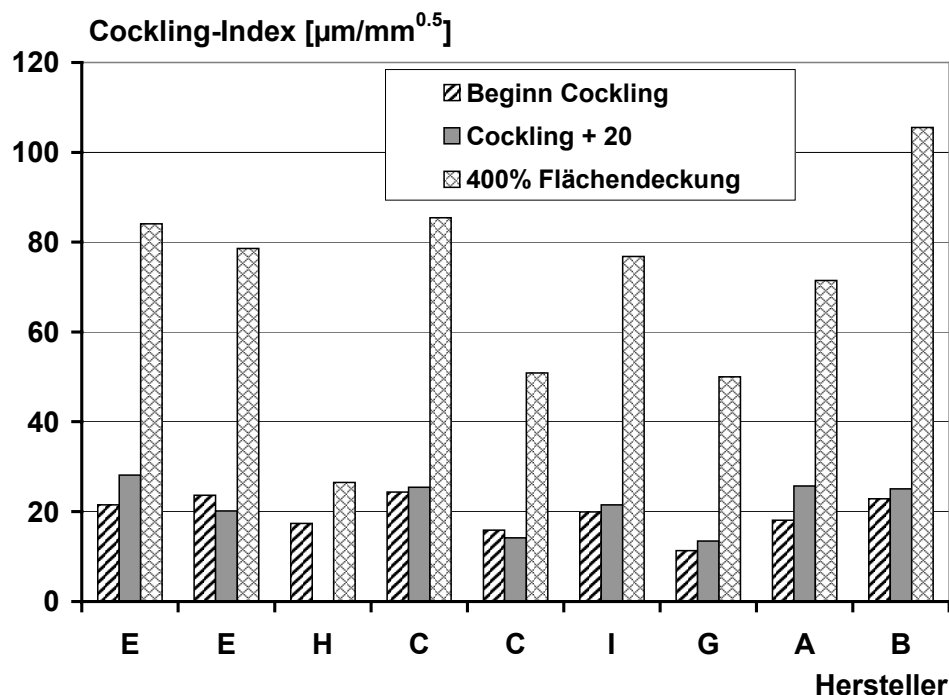


Abb. 20: Cockling-Index der matt- und spezialgestrichenen Papieren bei unterschiedlichen Flächendeckungsgraden

8. Wet Cockle

Während sich die bisherigen Untersuchungen auf das so genannte dry cockle beziehen, also die verbleibende Welligkeit nach dem Trocknen des Papiers beschreibt, ist ferner die unmittelbar beim Drucken auftretende starke Aufwölbung des Papiers (wet cockle) ein entscheidendes Kriterium der Inkjet-Papiere. Infolge des wet cockle kann es im Extremfall zum head crash der Papiere mit dem Druckkopf kommt. Zur Untersuchung beider Cockle-Arten wurden Büro- sowie matt- und spezialgestrichene Papiere mit einer Flächendeckung von 400 % bedruckt und der Cockling-Index mit Hilfe des codierten Lichtansatz unmittelbar nach dem Drucken als auch nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden im Normklima vermessen. Wie aus der **Abb. 21** hervorgeht, liegt der Cockling-Index, als Quotient von Standardabweichung der Höhenschwankungen und Korrelationslänge, im nassen Zustand durchschnittlich um etwa $31 \mu\text{m}/\text{mm}^{0.5}$ über dem des getrockneten Papiers. Da die Korrelationslänge der untersuchten Papiere etwa 9 mm betrug, beschreibt eine Differenz von $31 \mu\text{m}/\text{mm}^{0.5}$ im Cockling-Index etwa eine Standardabweichung von 100 μm . Diese Betrachtung verdeutlicht anschaulicher, in welchem beträchtlichen Maße die Papierwelligkeit während der Papiertrocknung abnimmt.

Bei den matt- und spezialgestrichenen Inkjet-Papieren besteht ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Cockling-Indizes. Dieser klare Trend ist bei den Büropapieren nicht erkennbar, die zudem ein ausgesprochen hohes Cockling-Niveau haben.

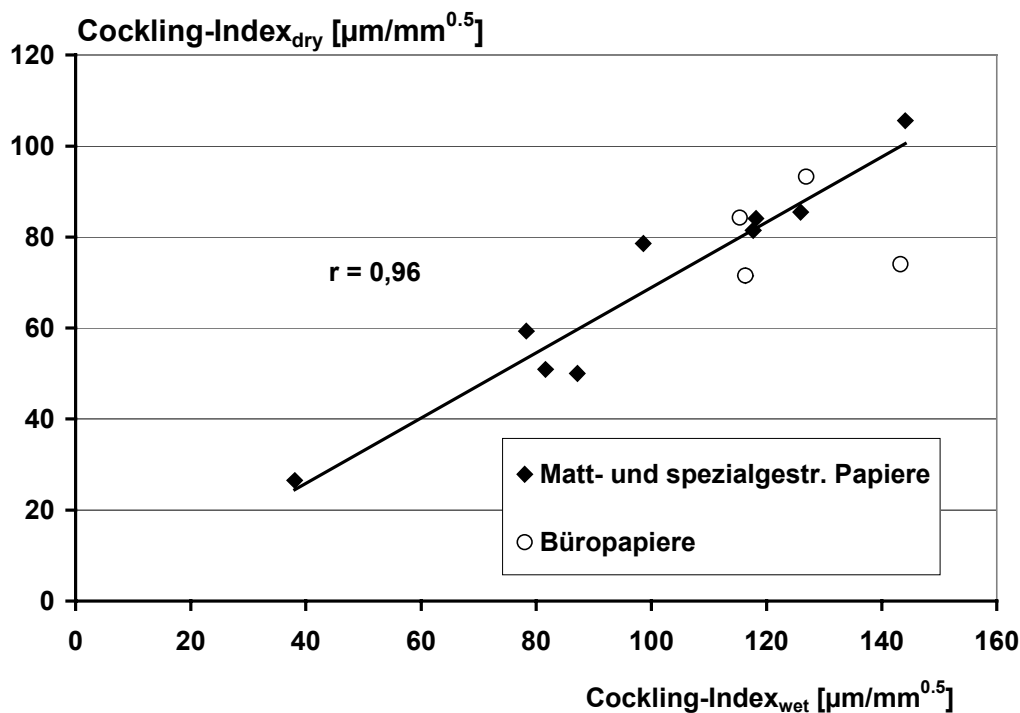


Abb. 21: Zusammenhang zwischen dry cockle und wet cockle

9. Ursachen des Cockle von Inkjet-Papieren

Zur Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Papiereigenschaften und dem Cockling-Verhalten wurden die mit 400% Tinte im HP 959 - Drucker beaufschlagten Papiere herangezogen. Deshalb wird nachfolgend immer von Cockling-Index₄₀₀ gesprochen. Spezialbeschichtete Papiere sowie Inkjet-Papiere, bei denen eine vollflächige Bedruckung zum Farbdurchschlagen führten, fanden keine Berücksichtigung.

9.1 Fragebogen

Die Papierproben stammten vorwiegend von Papierfabriken aus Deutschland und der Schweiz. Ferner wurden in einem Fragebogen, der nachfolgend wiedergegeben ist, Papiereigenschaften sowie Papier- und Streichmaschinendaten abgefragt, welche eventuell Rückschlüsse auf die Ursachen der Planlagestörungen zuließen.

Fragebogen

Analyse von Cockle bei Inkjet-Papieren

1. Allgemeine Angaben

1.1 Firma / Werk:

1.2 PM-Nr.:

1.3 Papiersorte:

Büropapier ☐

Matt- oder spezialgestrichen ☐

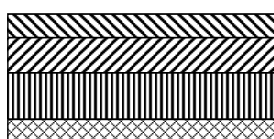
Spezialbeschichtung ☐

2. Qualitätsdaten:

	Rohpapier	Endprodukt
2.1 Reißlängen MD / CD:		
2.2 Spezifisches Volumen [cm ³ /g]:		
2.3 Porosität, Bendtsen [ml/min] :		
2.4 Trockengehalt des Papiers [%]:		
2.5 Flächenbezogene Masse [g/m ²]:		

3. Aufbau des Produktes (Handskizze):

Beispiel:



Deckstrich, 8 g/m²

Vorstrich, 10g/m²

Rohpapier, 60g/m²

Strich (Rückseite), 5g/m²

Unterseite

4. Stoffdaten

4.1 Stoffeintrag:

Faserstoffmix [%]:

Aschegehalt [%]:

4.2 Leimungsmittel

Masseleimung ☐

Oberflächenleimung ☐

Leimungsmittel:

.....

4.3 Naßverfestigung:

☐ keine

☐ schwach

☐ stark

4.4 Strich:

Einfachstrich ☐

Doppelstrich ☐

Bindemitteltyp:

Bindemitteltyp:

Pigmente und Anteile:

Pigmente und Anteile:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Weitere Strichbestandteile (Additive) und Menge:

.....

.....

.....

.....

Strichgewicht:

Oberseite:

Unterseite:

Oberseite:

Unterseite:

Rückseitenbeschichtung: ja ☐ nein ☐

Art:

Menge [g/m²]:

5.0 Papiermaschine

5.1 Stoffauflauf-Typ/ Startjahr:

5.2 Hydraulische Belastung des Stoffauflaufs in Bezug zur Auslegung [%]:

5.3 Papiermaschinen-Typ/ Hersteller:

☐ Gapformer

☐ Hybridformer

☐ Langsieb

5.4. Anzahl der Trockenzylinder:

☐ Konventionelle Trockenpartie (Zylinder von..... bis)

☐ Einreihige Trockenpartie (Zylinder von..... bis.....)

- 5.5 Art der Trocknung: schonend ☐ ausgeglichen ☐ scharf ☐
(Eigene Einschätzung !)
- 5.6 Glättwerk-Typ:
☐ Maschinenglättwerk ☐ Softkalander
- 5.6.1 Linienkraft [kN/m]:
- 5.6.2 Temperatur [°C] :
- 5.7 Sieb-/Strahl-Verhältnis:
- 5.7.1 Siebgeschwindigkeit [m/min]:
- 5.7.2 Papiermaschinengeschwindigkeit am Tambour [m/min]:
- 5.8 Mittlere Querschrumpfung [%]:
- 5.9 Mittlere Dehnung [%]:

6. Streichmaschine

Online ☐

Offline ☐

Streichmaschinentyp/ Hersteller:

.....

.....

6.1 Strichtrocknung:

Infrarottrocknung ☐

Infrarottrocknung ☐

einseitig ☐ zweiseitig ☐

einseitig ☐ zweiseitig ☐

Trockenstrecke [m]:

Trockenstrecke [m]:

Strahlertemperatur [°C]:

Strahlertemperatur [°C]:

Lufttrocknung ☐

Lufttrocknung ☐

einseitig ☐ zweiseitig ☐

einseitig ☐ zweiseitig ☐

Trockenstrecke [m]:

Trockenstrecke [m]:

Lufttemperatur [°C]:

Lufttemperatur [°C]:

Zylindertrocknung ☐

Zylindertrocknung ☐

Anzahl der Zylinder:

Anzahl der Zylinder:

6.2. Streichmaschinengeschwindigkeit [m/min]:

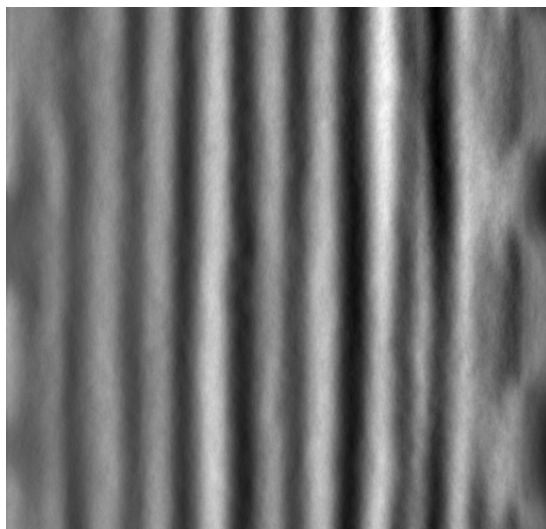
|

9.2 Bemerkungen

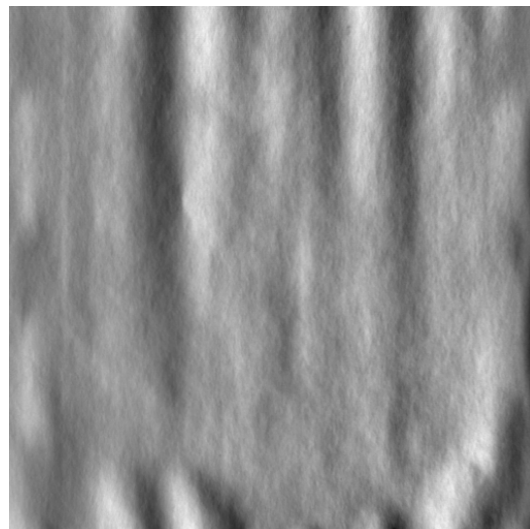
Da die Fragebögen von den Firmen in den meisten Fällen nur sehr unvollständig ausgefüllt worden waren, konnten diese Angaben zur Ursachenanalyse nur eingeschränkt benutzt werden. Die papierphysikalischen Eigenschaften wurden an der Forschungsstelle nachgemessen.

9.3 Einfluss des Druckers

Neben den Papiereigenschaften haben, wie bereits erwähnt, auch die verwendeten Drucker und Tinten einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Cockling. Dies wird deutlich, wenn man beispielhaft die in **Abb. 22** wiedergegebenen Wellenbildungen am gleichen Papier nach dem Bedrucken im Schräglicht visualisiert. Das Cockling-Muster hängt demzufolge sehr stark von dem verwendeten Drucker ab. Während der Canon Drucker sehr langwellige, in Maschinenrichtung verlaufende Wellen erzeugt, sind diese beim HP 959 deutlich hochfrequenter. Damit bestimmt der Drucker die Art der Wellenbildung, während die Intensität der Planlagestörungen maßgeblich die aufgebrauchte Tintenmenge beeinflusst.



HP 959



Canon S450

Abb. 22: Durch verschiedene Inkjet-Drucker verursachte Cockle-Strukturen

9.4 Flächenbezogene Masse

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Cockling-Neigung mit zunehmender flächenbezogener Masse abnimmt /8/. Dieser Trend ist an Papieren gleicher Zusammensetzung mit unterschiedlichen Flächengewichten von 90, 110, 125, 160 und 225 g/m² nachvollziehbar (**Abb. 23**). Das leichteste Papier zeigt die stärkste Wellenbildung, während die 225g/m² schwere Probe nur sehr geringe Planlagestörungen aufweist. Allerdings zeigt die **Abb. 24**, in der Papiere unterschiedlicher Hersteller berücksichtigt sind, wie unterschiedlich das Cockling der verschiedenen 120 g/m² Papiere ausfällt. Erwartungsgemäß zeigen alle Büropapiere unter diesen Bedin-

gungen ein ausgesprochen starkes Cockling. Die Grafiken belegen allerdings, dass neben der flächenbezogenen Masse noch weitere Parameter bei der Ursachenanalyse Berücksichtigung finden müssen.

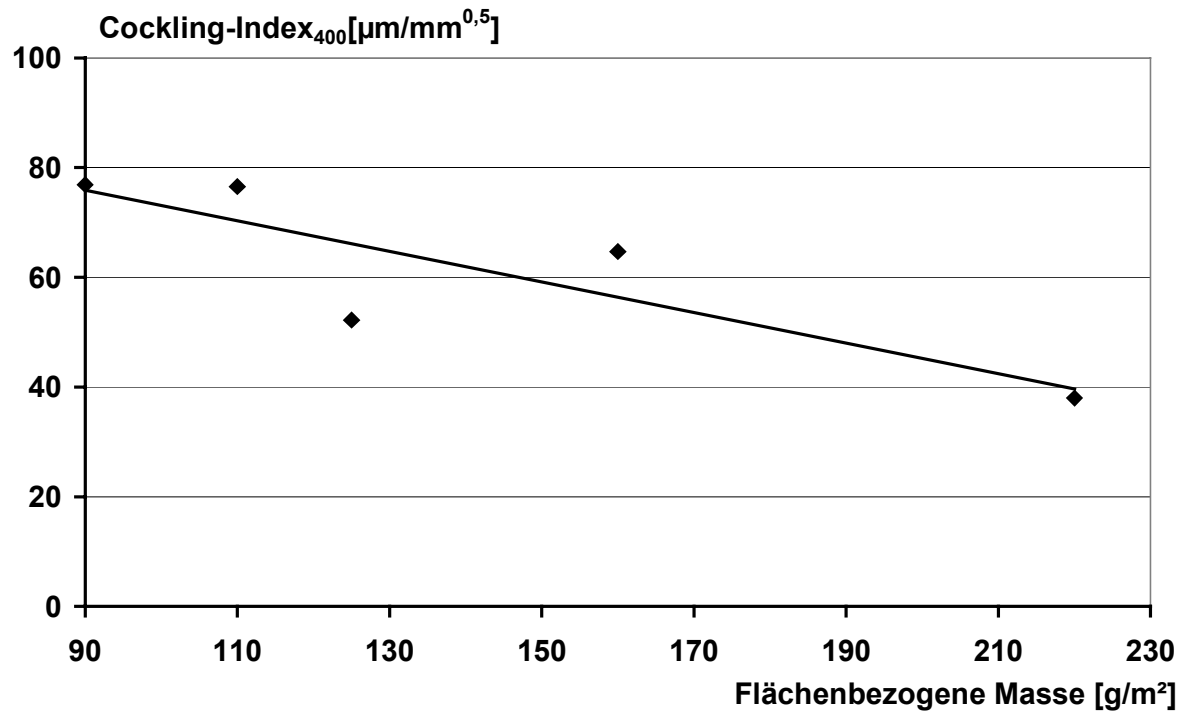


Abb.23: Cockling-Index in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse bei Papieren mit gleicher Zusammensetzung

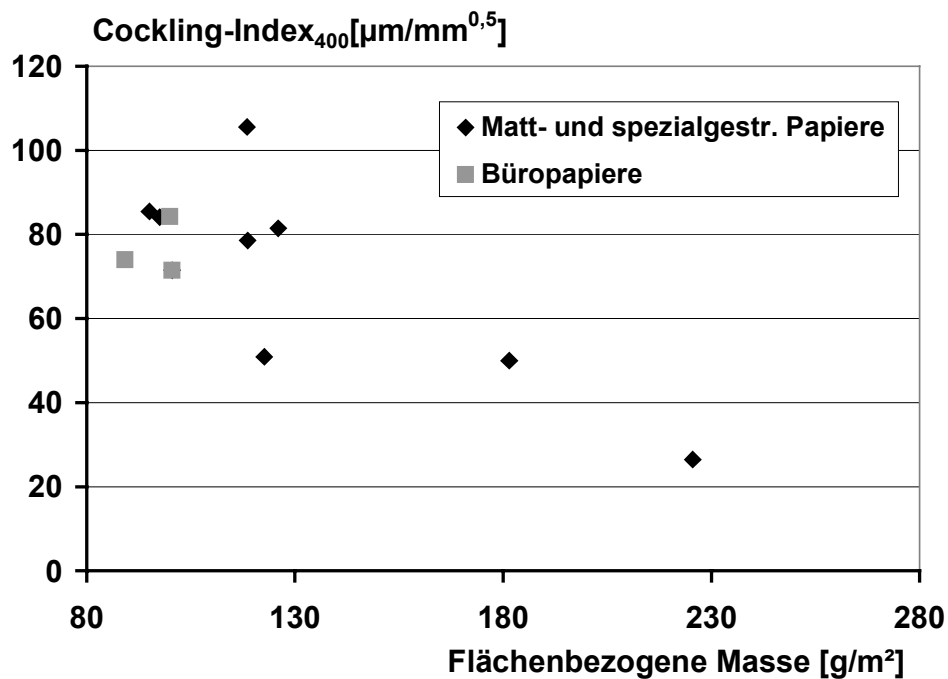


Abb.24: Cockling-Index in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.5 Dicke

Für die Dicke stellen sich dieselben Zusammenhänge zum Cockling-Index dar wie für die flächenbezogene Masse. Eine große Papierdicke reduziert aufgrund der dadurch erhöhten Biegesteifigkeit das Cockle (Abb.25 und 26)

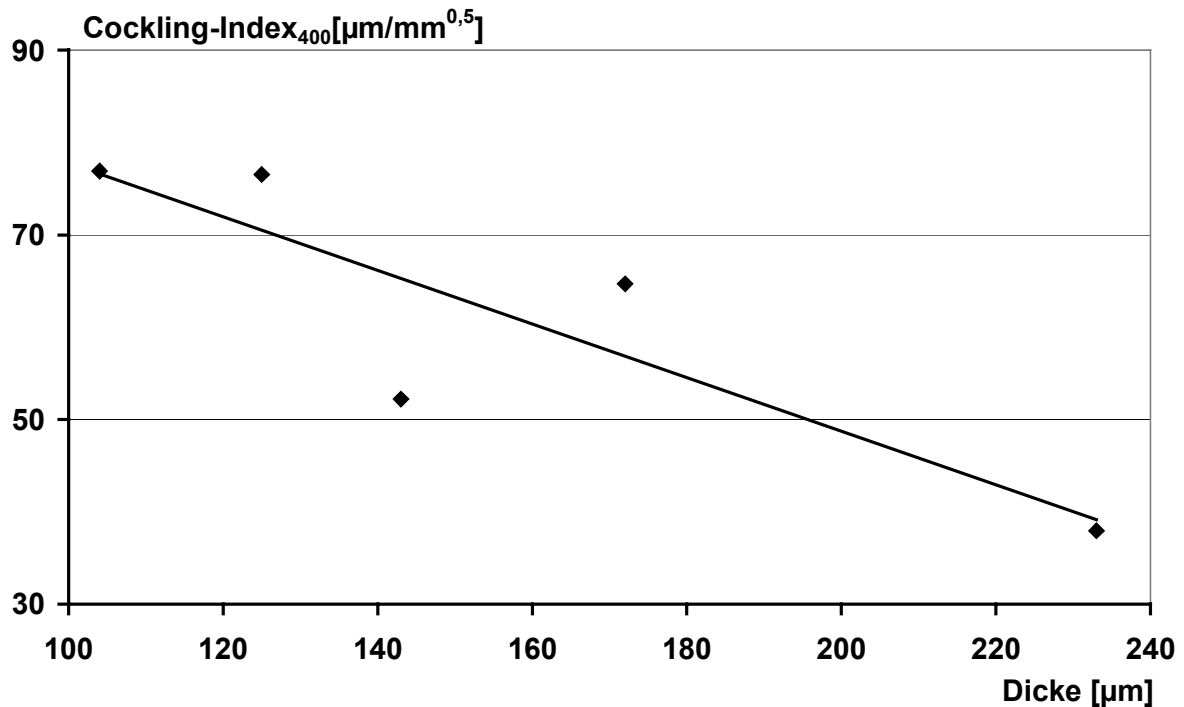


Abb.25: Cockling-Index in Abhängigkeit von der Dicke bei Papieren mit gleicher Zusammensetzung

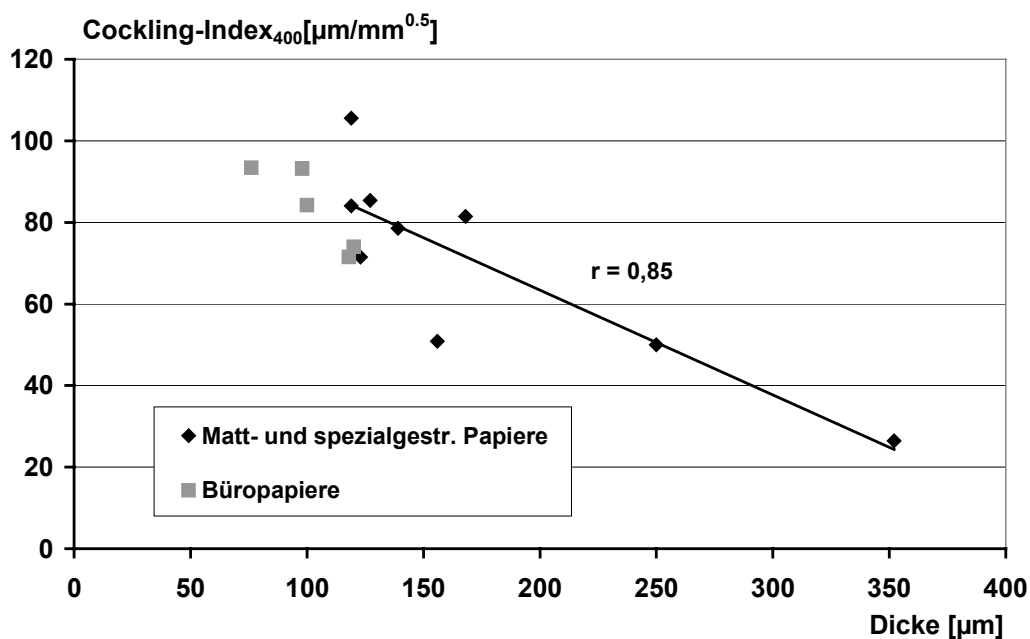


Abb.26: Cockling-Index in Abhängigkeit von der Dicke bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.6 Scheinbare Dichte

Den Korrelationskoeffizienten von 0,8 zwischen scheinbarer Dichte und dem Cockling-Index₄₀₀ sollte man nicht überbewerten, da er hauptsächlich durch die beiden Extrempunkte für die matt- und spezialgestrichenen Papiere in **Abb. 27** zustande kommt. Im Bereich der scheinbaren Dichte um 0,8 g/cm³ ist keine Abhängigkeit erkennbar.

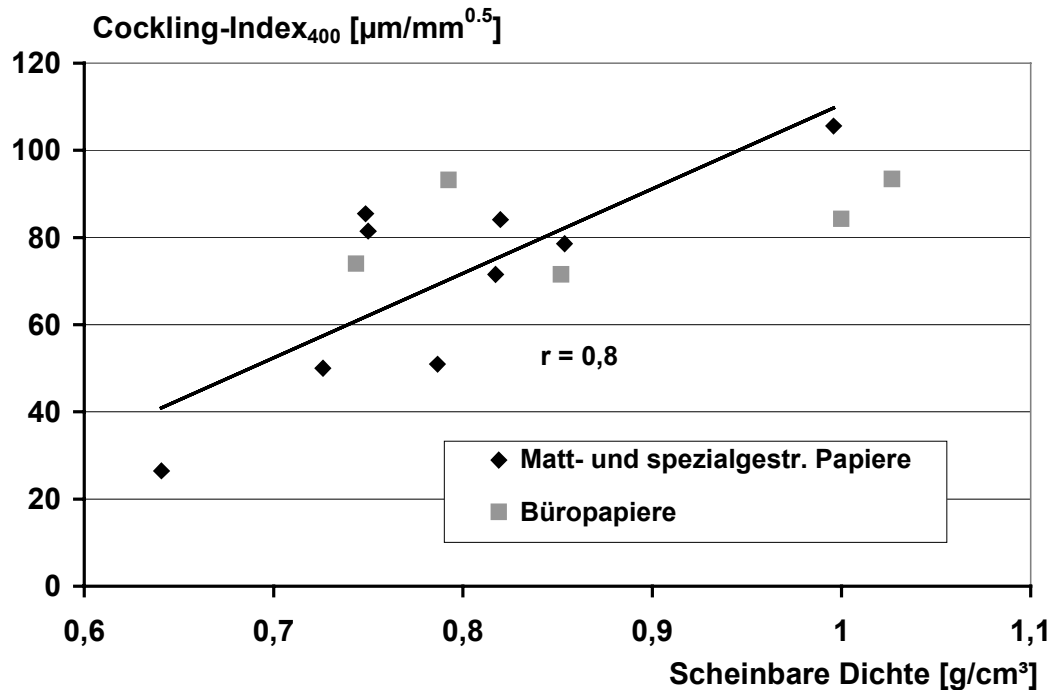


Abb.27: Cockling-Index in Abhängigkeit von der scheinbaren Dichte bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.7 Bruchkraft-Verhältnis

Bezüglich des Bruchkraft-Verhältnisses zeigen die Büropapiere einen eindeutigen Zusammenhang zum Cockling (**Abb.28**). Die zunehmende Anisotropie verstärkt hier die Wellenbildung, während für die matt- und spezialgestrichenen Papiere, von denen lediglich solche mit flächenbezogenen Massen zwischen 95 und 126 g/m² berücksichtigt sind, kein eindeutiger Trend erkennbar ist.

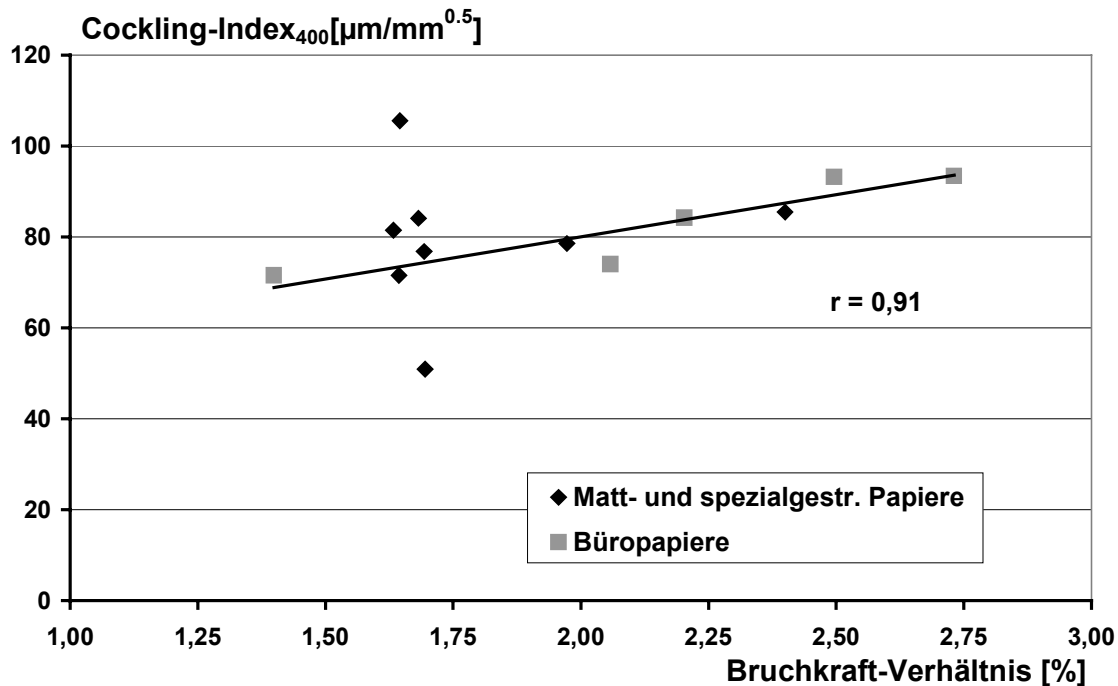


Abb.28: Cockling-Index in Abhängigkeit von dem Bruchkraft-Verhältnis bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.8 Feuchtdehnung

Wie aus der Literatur bekannt ist, bestimmt die Ausdehnung von Papier bei Feuchtigkeitsaufnahme (Hygroexpansion), ein Parameter, der von der Querschrumpfung sowie unter anderem auch von der Anisotropie und damit der Faserorientierung abhängt, entscheidend die Cockling-Neigung /8, 9/. Unsere Messungen können das bestätigen. In **Abb. 29** ist die nach DIN 53 130-78 bestimmte Feuchtdehnung in Querrichtung gegen den Cockling-Index₄₀₀ aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,7 für die matt- und spezialgestrichenen Papiere, während bei den untersuchten Büropapieren keine Korrelation nachweisbar war. Feuchtdehnungen in Maschinenrichtung sind gegenüber der Querrichtung zu vernachlässigen und waren zur Aufhellung des Phänomens Cockling nicht hilfreich.

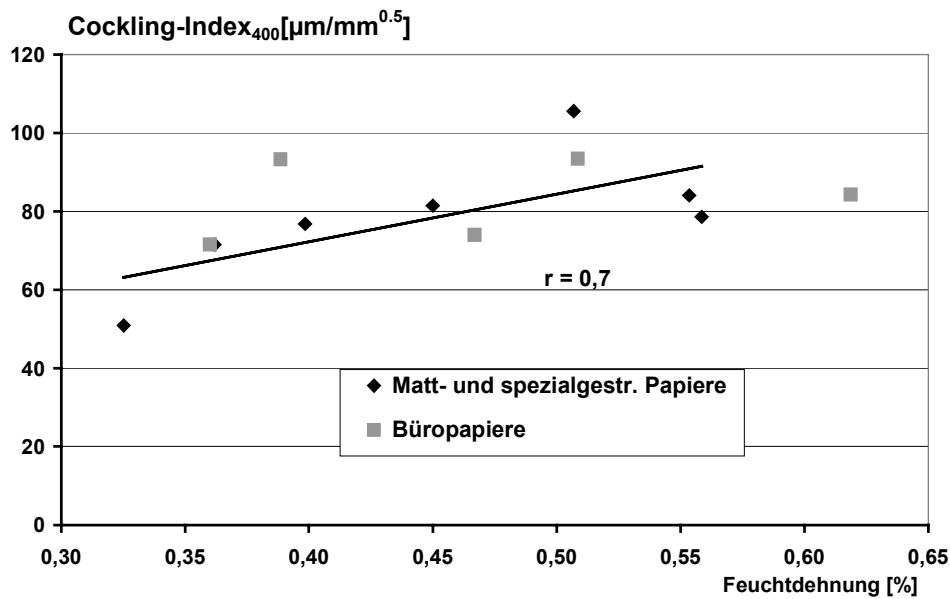


Abb.29: Cockling-Index in Abhängigkeit von der Feuchtdehnung bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.9 Wasseraufnahme

Da die Inkjet-Druckfarbe zu einem hohen Anteil aus Wasser besteht, wurde das Wasseraufnahmevermögen der Papiere als Cobb-Wert bei einer Einwirkzeit von 120 s bestimmt. Nach **Abb. 30** erlaubt dieser Test keine Rückschlüsse auf das Cockling-Verhalten der Papiere. Auch in diesem Zusammenhang durchgeführte Randwinkelmessungen brachten keine weiteren Erkenntnisse.

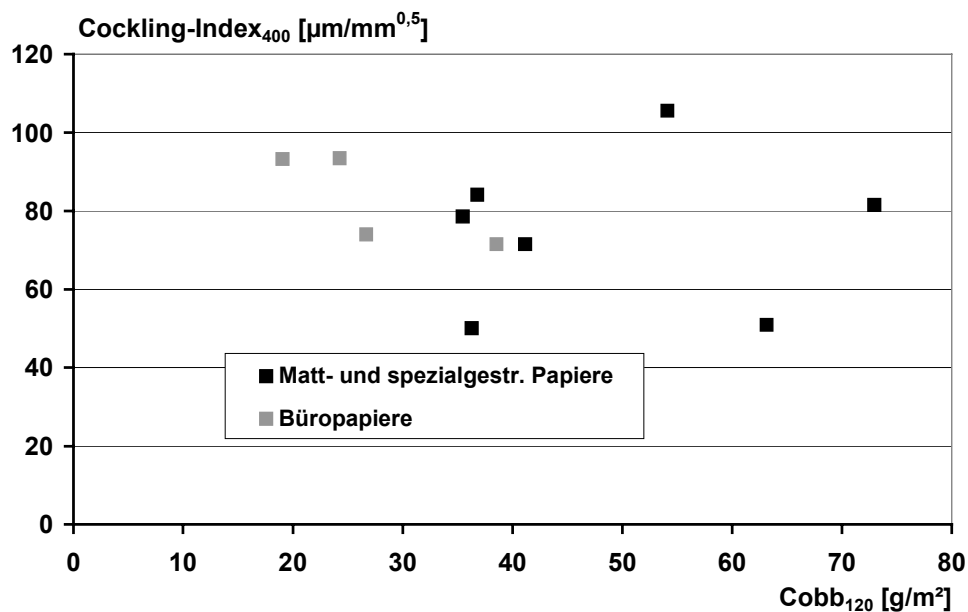


Abb.30: Cockling-Index in Abhängigkeit vom Cobb-Wert bei Papieren unterschiedlicher Hersteller

9.10 Strich

Um den Anforderungen eines Farbdrucks bezüglich Wicking, Feathering, Bleeding, Brillanz und Farbstand, um nur einige Parameter zu nennen, gerecht zu werden, sind die höherwertigen Inkjet-Papiere gestrichen. Pigmente auf Kieselsäure-Basis vermögen aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche, der Teilchenfeinheit und des Porenvolumens die Tinte durch Flüssigkeitsaufnahme in der obersten Strichschicht zu immobilisieren, während diesbezüglich calcinierter Clay und Bariumsulfat nur einen kleinen Beitrag leisten. Wichtig ist ferner die richtige Auswahl des Binders (z.B. Polyvinylalkohol) und entsprechender Additive. Da bezüglich der Strichzusammensetzung keine Angaben vorlagen, konnte lediglich der Einfluss des Strichgewichtes näher beleuchtet werden /10,11/.

9.10.1 Strichgewicht

Die untersuchten Inkjet-Rohpapiere mit einem Flächengewicht bis etwa 127 g/m² hatten ein maximales Strichgewicht von 14 g/m², während auf schwergewichtigeren Papieren Auftragsgewichte bis maximal 45 g/m² realisiert waren. Gemäß **Abb. 31** zeigen alle analysierten matt- und spezialgestrichene Inkjet-Papiere unter 8 g/m² Strichgewicht ein sehr starkes Cockling bei der vollflächigen Bedruckung wie es auch bei den Büropapieren zu beobachten ist. In diesem Fall vermag die Oberflächenbeschichtung das Planlageverhalten nicht maßgeblich zu beeinflussen, während sich Strichgewichte über 12 g/m² offensichtlich positiv auswirken. Bei der Interpretation der Abb. 31 sollte man allerdings bedenken, dass sich alleine durch eine hohe flächenbezogene Masse das Cockling maßgeblich reduziert lässt, weshalb die in der Grafik mit „bis 120 g/m² Rohpapiergewicht“ markierten Proben nicht mit den übrigen verglichen werden sollten.

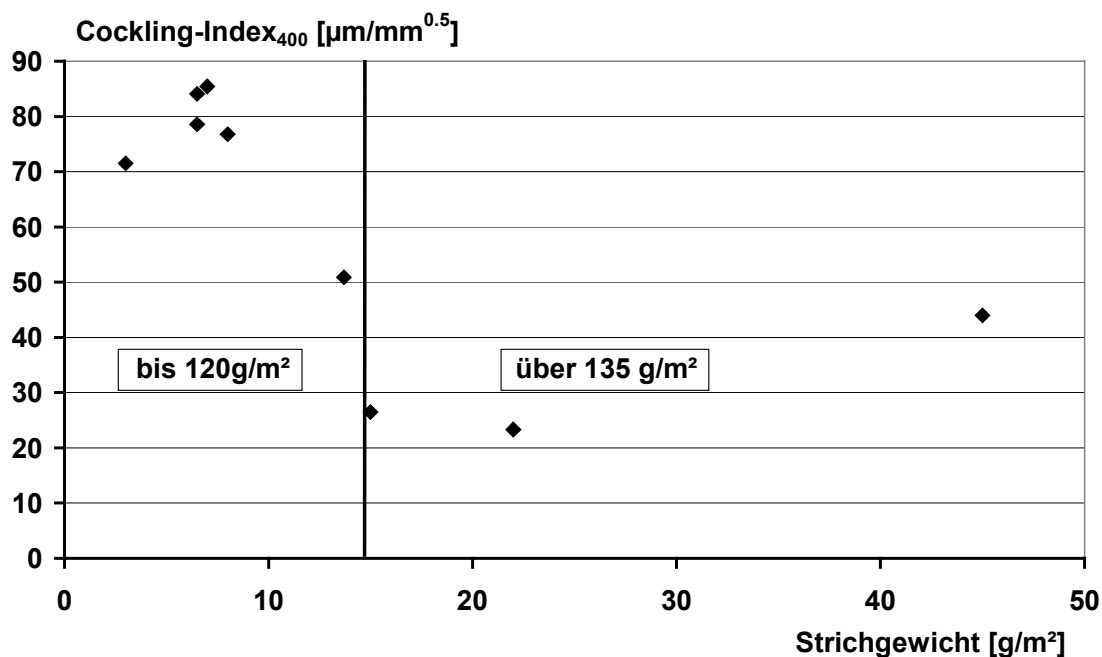


Abb.31: Cockling-Index in Abhängigkeit vom Strichgewicht bei unterschiedlichen Papieren

9.10.2 Cockling von Rohpapier und Endprodukt

Die Vermutung, dass geringe Strichgewichte bei matt- und spezialgestrichenen Inkjet-Papieren das Cockling nicht vermindern, belegt auch **Abb. 32**, welche die Planlagestörungen von Rohpapieren und den entsprechenden Endprodukten bei vollflächiger Bedruckung gegenüberstellt. Auf der x-Achse sind die Flächengewichte von Rohpapier und Strichauftrag vermerkt. Es fällt auf, dass alle untersuchten Inkjet-Papiere mit Strichgewichten unter 10 g/m^2 ein ausgeprägteres Cockling als das Basispapier hatten. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist in den unterschiedlichen Eigenschaften von Strich und Rohpapier zu suchen. Bei der Bedruckung von Proben dringt die flüssige Phase der Tinten durch den Strich in das Papier ein. Da nach **Abb. 33** die Feuchtdehnung von Strich und Rohpapier verschieden sind, werden bei der Trocknung die beiden Lagen (Strich, Papier) auch ein unterschiedliches Schrumpfungsverhalten haben. Dadurch entstehen Verspannungen, die zum Cockle führen, deren Ausprägung sicherlich auch von den unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der Lagen beeinflusst wird. Wie **Abb. 34** am Beispiel der Bruchkraft in CD verdeutlicht, ist die Festigkeit des gestrichenen Inkjet-Papiers höher als vom Rohpapier. Es liegt somit eine Art „Bimetalleffekt“ bei gestrichenen Papieren vor.

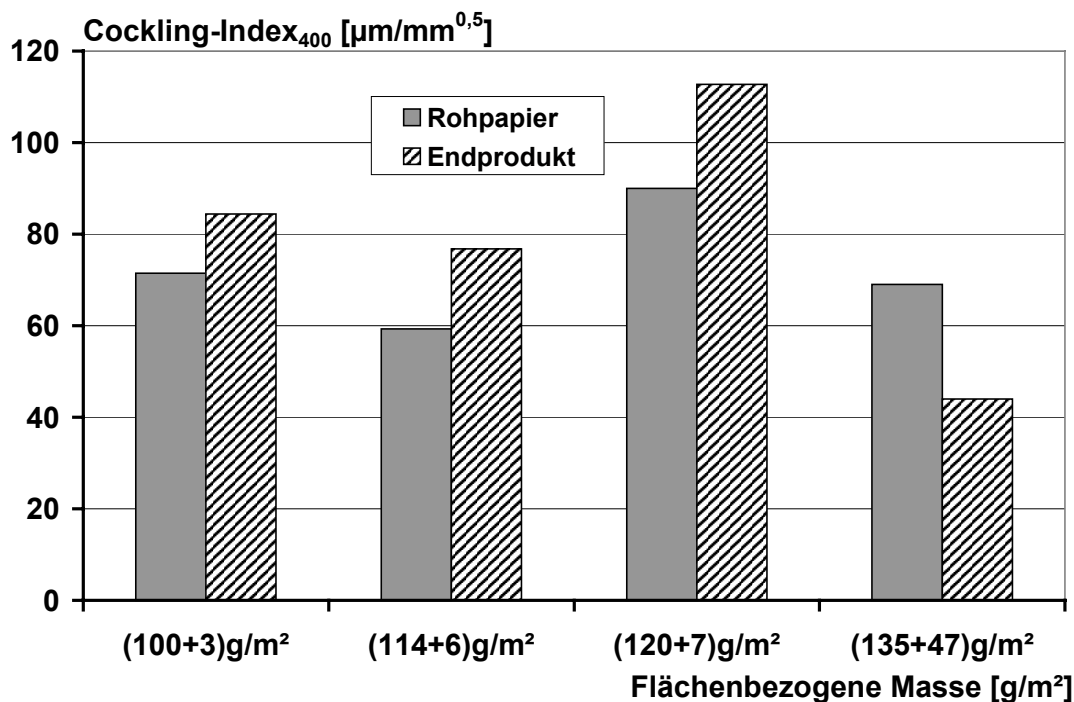


Abb.32: Cockling-Index von Roh- und gestrichenem Inkjet-Papier

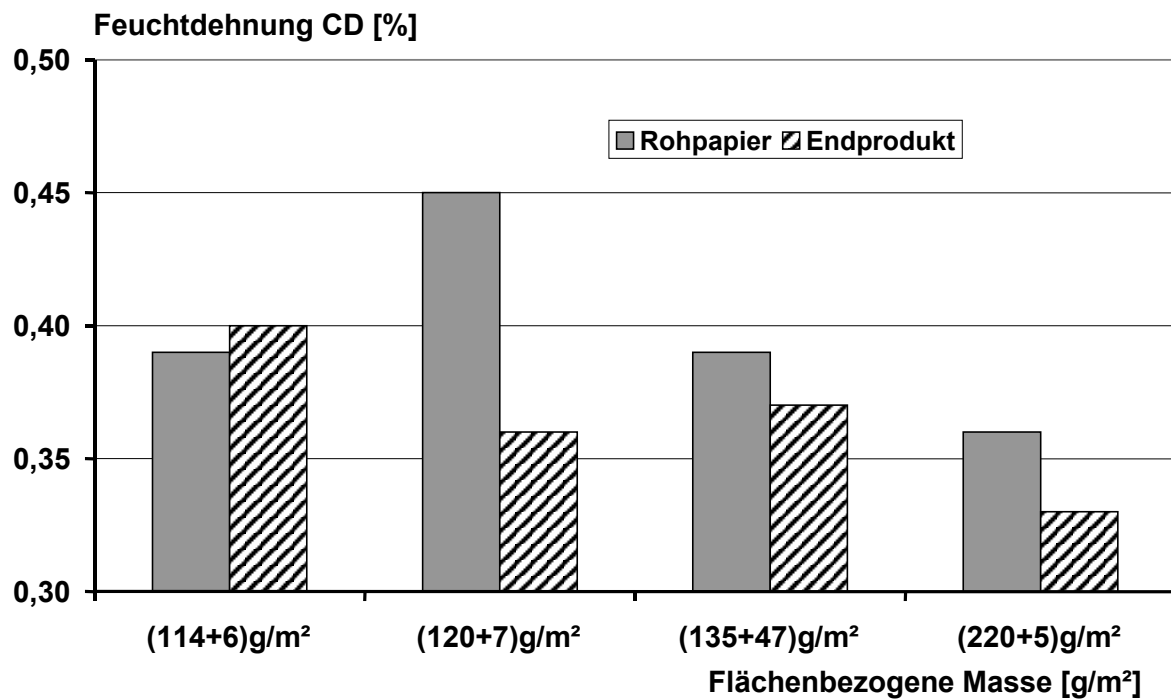


Abb.33: Feuchtdehnung in Querrichtung von Roh- und gestrichenem Inkjet-Papier

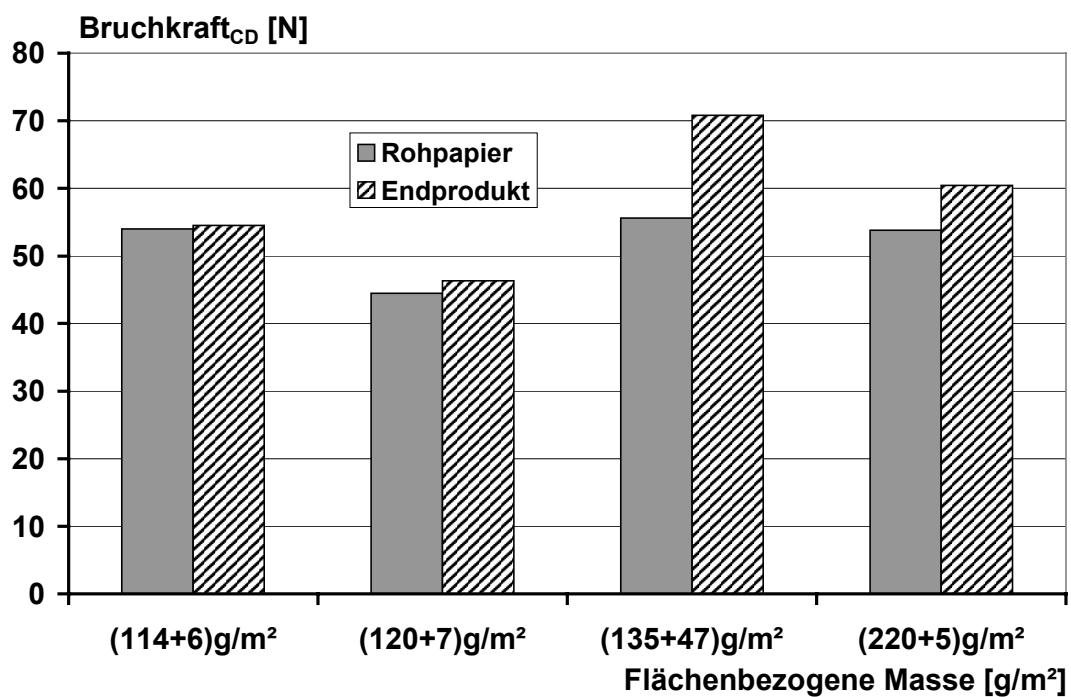


Abb.34: Bruchkraft in Querrichtung von Roh- und gestrichenem Inkjet-Papier

10. Simulation von wet und dry cockle

Wie bereits erwähnt, kann das unmittelbar im Druck auftretende wet cockle im Extremfall zum head crash der Papiere mit dem Druckkopf führen, weshalb den im feuchten Zustand auftretenden Planlagestörungen besonderes Interesse gilt. Das wet und dry cockle wurde daher versucht mit Hilfe eines modifizierten Cobb-Testers zu simulieren.

10.1 Modifizierter Cobb-Tester

Der modifizierte Cobb-Tester besteht aus einer glatten Kunststoffunterlage mit Gummituch (Abb. 35). Darüber ist ein Plexiglaszylinder mit einem Innendurchmesser von 140 mm platziert. Für die Simulation des wet und dry cockle wird die Papierprobe zwischen Gummituch und Zylinder mit Hilfe von zwei Federn fixiert. Anschließend füllt man 50 ml destilliertes Wasser in den Zylinder und erfasst mit Hilfe einer Stoppuhr unter Schräglichtbeleuchtung die Zeit, bis sich Planlagestörungen zeigen. Ferner wurde in Analogie zum Cobb-Tester die absorbierte Wassermenge bis zum Cockle-Beginn gravimetrisch ermittelt.

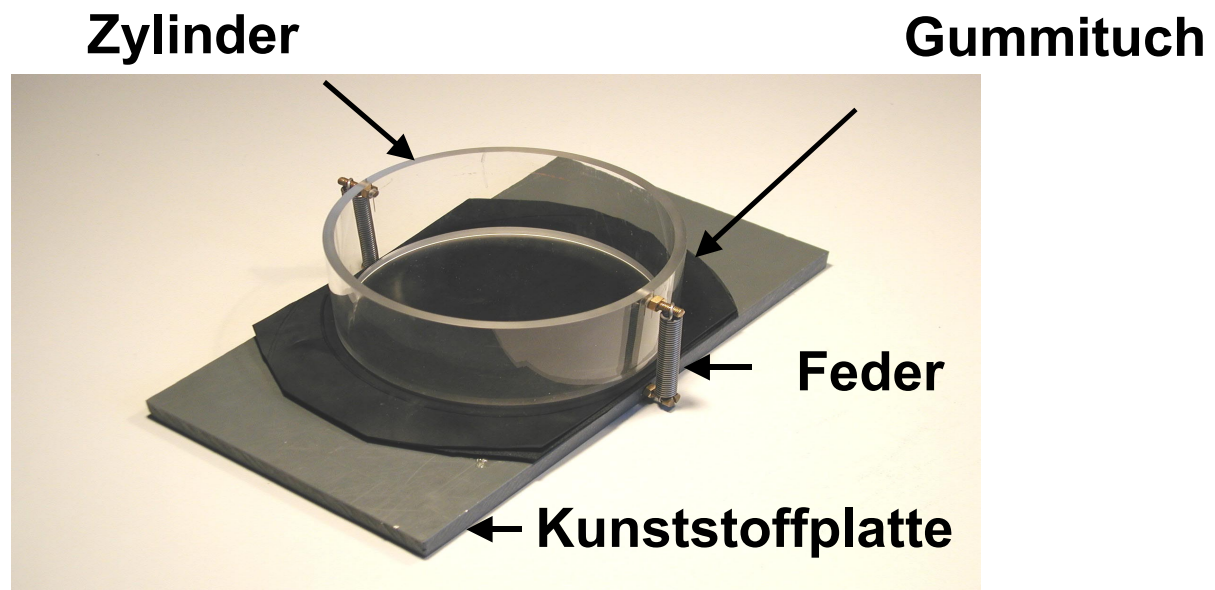


Abb.35: Modifizierter Cobb-Tester

10.2 Wet Cockle

Da das unmittelbar beim Druck auftretende Cockle nicht messbar war, bot sich als Referenz zur Überprüfung der Vorhersagbarkeit des wet cockle mit Hilfe des modifizierten Cobb-Testers nur der unmittelbar nach der vollflächigen Bedruckung der Inkjet-Papiere bestimmte Cockling-Index_{wet} an. Stellt man diesen Wert der gemessenen Zeit bis Cockling-Beginn im modifizierten Cobb-Tester für alle Büro- sowie matt- und spezialgestrichenen Papiere gegen-

über, so ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,82, der allerdings maßgeblich von den erst nach sehr langer Einwirkzeit cocklenden Proben bestimmt wird. Für die matt- und spezialgestrichenen Papiere im Flächengewichtsbereich zwischen 95 und 126 g/m² zeigt diese Testmethode ebenfalls den Trend des wet cockle auf, nicht jedoch für Büropapiere (Abb. 36 und 37). Auch unter Einbeziehung der aufgenommenen Wassermenge und weiterer Parameter lassen sich die Korrelationen nicht verbessern.

Bei dieser Auswertung gilt es zu bedenken, dass, wie bereits erwähnt, der Cockling-Index_{wet} nicht den Zustand im Drucker repräsentiert, da allein der Druckvorgang mehrere Minuten in Anspruch nimmt und durch das Handling der feuchten Papierproben sich die Cockling-Struktur bzw. -Intensität verändern kann.

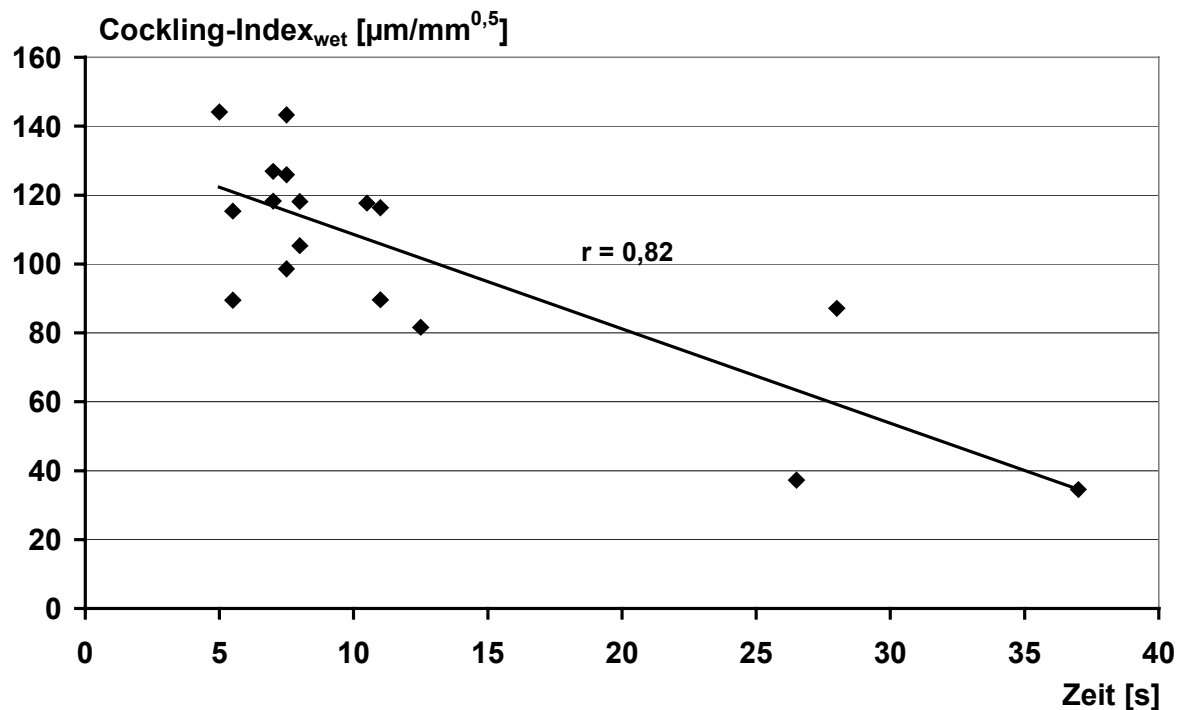


Abb.36: Zusammenhang zwischen Cockling-Index_{wet} und Zeit bis Cockle-Beginn im modifizierten Cobb-Tester (Büro- sowie matt- und spezialgestr. Papiere)

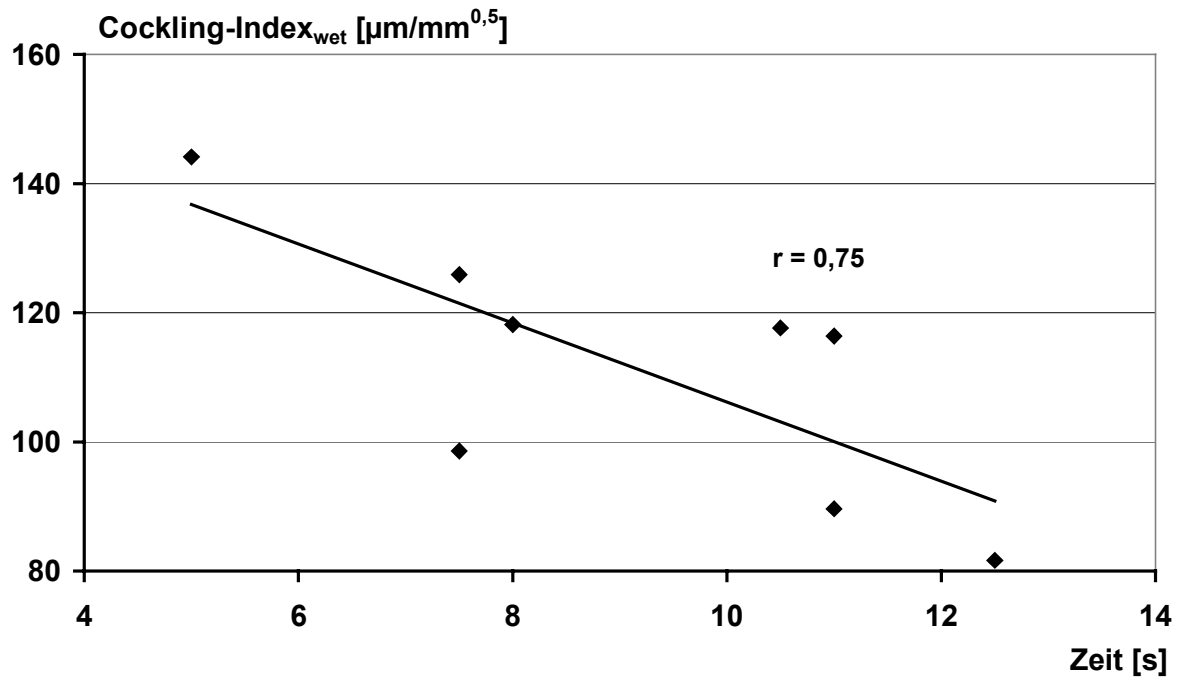


Abb.37: Zusammenhang zwischen Cockling-Index_{wet} und Zeit bis Cockle-Beginn im modifizierten Cobb-Tester
(stark cocklende matt- und spezialgestr. Papiere bis zu einer flächenbezogenen Masse von 126 g/m²)

10.3 Dry Cockle

Analoge Darstellungen wie für das wet cockle sind auch für die nach dem Trocknen verbleibende Welligkeit möglich. In diesem Fall ist unsere Referenz der Cockling-Index₄₀₀, der für alle Papiere mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,91 mit der Einwirkzeit bis Cockling-Beginn im modifizierten Cobb-Tester übereinstimmt und für die Gruppe der stark cocklenden Papiere immerhin noch 0,8 beträgt (**Abb.38** und **39**) Angesichts der Toleranzen bei der subjektiven Zeitmessung ist dieses Ergebnis beachtlich und eröffnet damit eine Möglichkeit auf einfache Art und Weise das dry cockle vorauszusagen. Je höher die Zeitdauer bis zur Wellenbildung ist, desto geringer das dry cockle, während die in dieser Einwirkzeit aufgenommene Wassermenge keine Abhängigkeiten erkennen lässt (**Abb.40**).

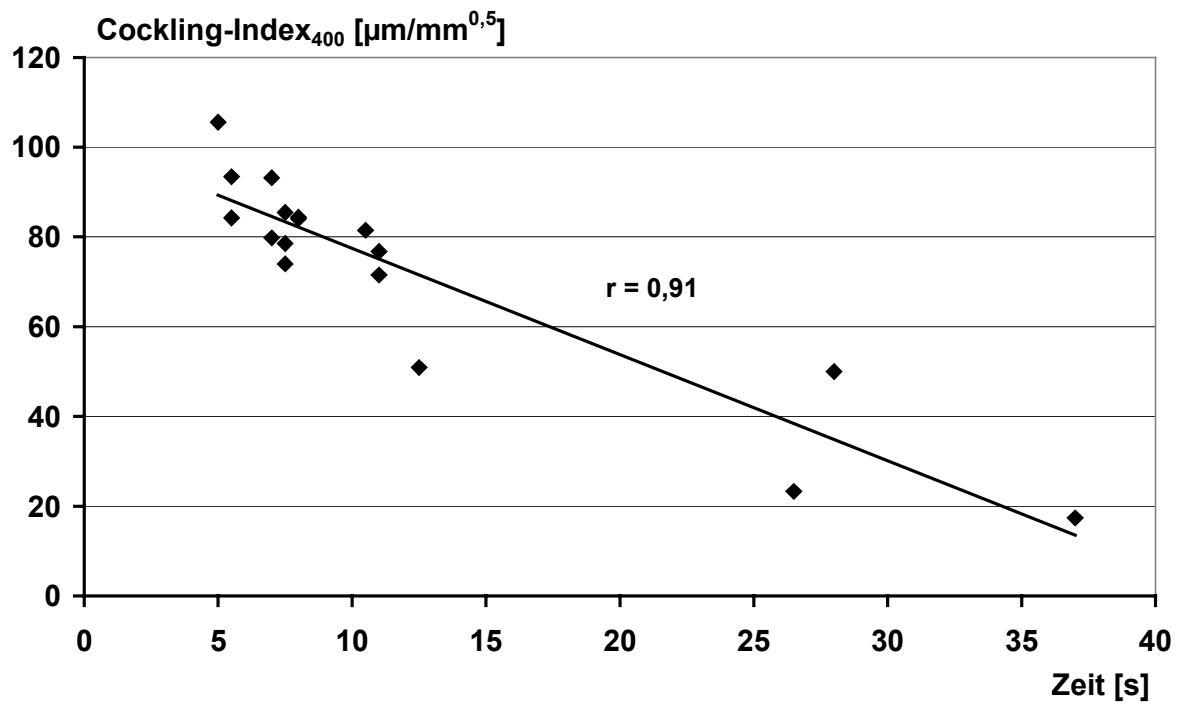


Abb.38: Zusammenhang zwischen Cockling-Index und Zeit bis Cockle-Beginn im modifizierten Cobb-Tester (Büro- sowie matt- und spezialgestr. Papiere)

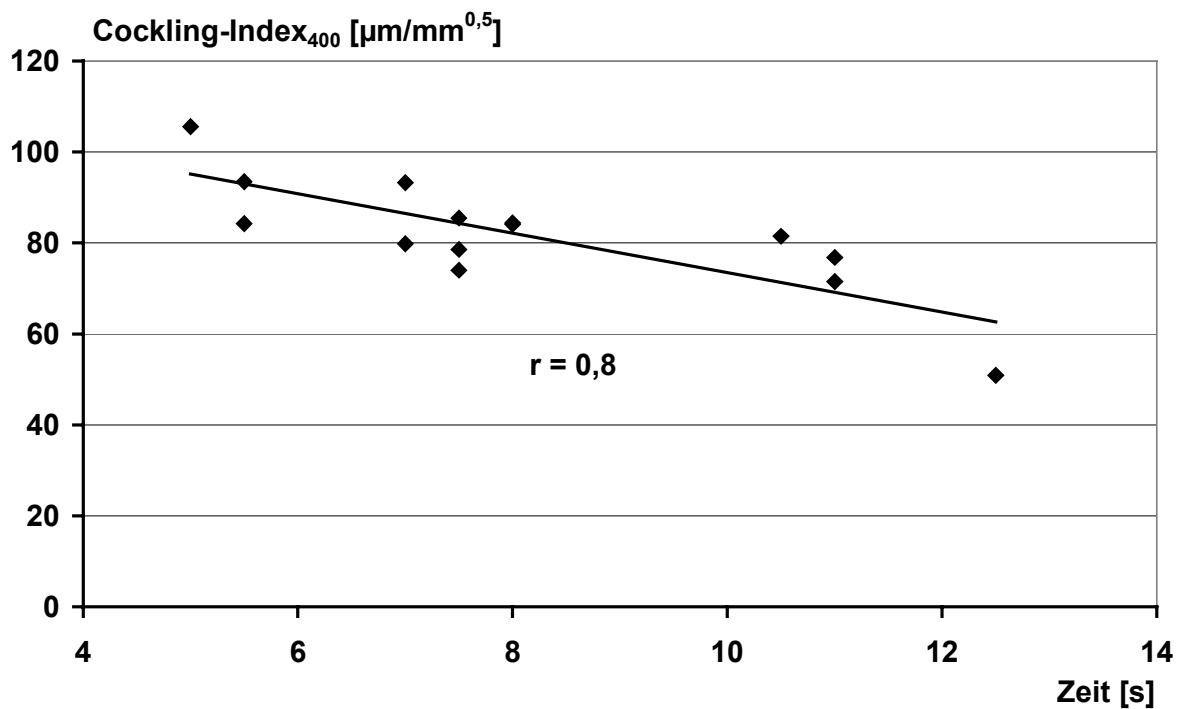


Abb.39: Zusammenhang zwischen Cockling-Index und Zeit bis Cockle-Beginn im modifizierten Cobb-Tester (strak cocklende Büro- sowie matt- und spezialgestr. Papiere)

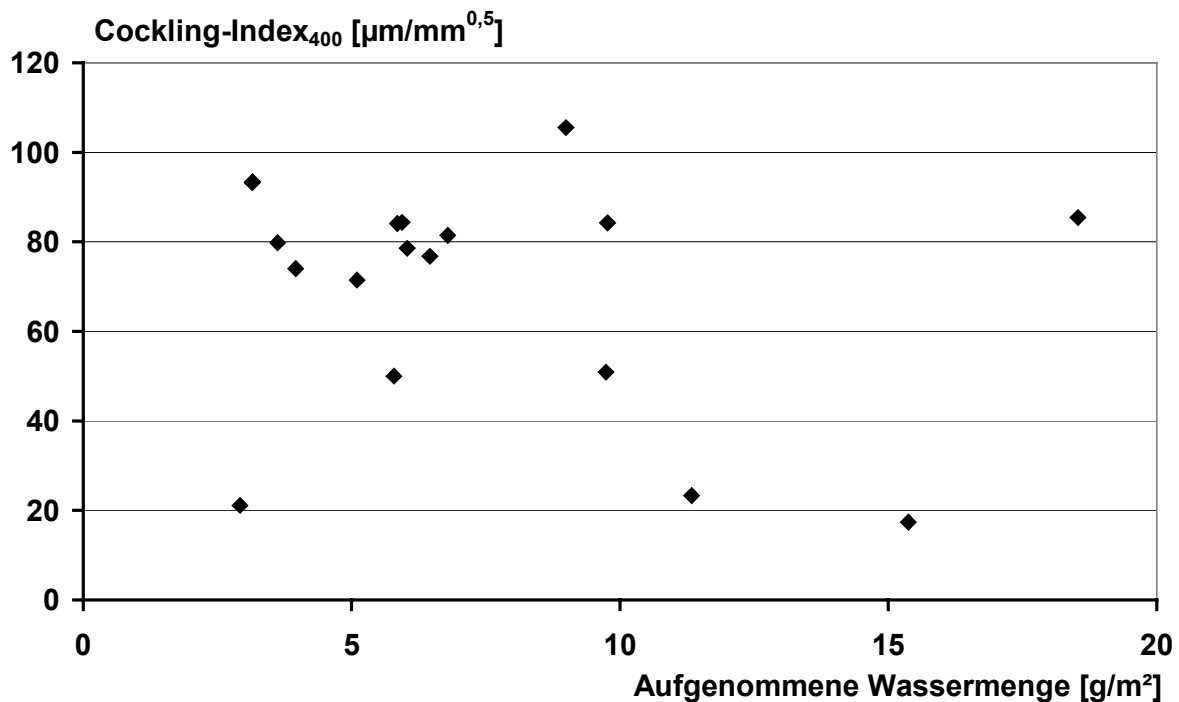


Abb.40: Zusammenhang zwischen Cockling-Index₄₀₀ und aufgenommene Wassermenge bis Cockle-Beginn im modifizierten Cobb-Tester (Büro- sowie matt- und spezialgestr. Papiere)

11. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses INFOR-Projektes wurden Inkjet-Papieren unterschiedlicher Hersteller auf das Cockle nach dem Bedruckung mit Inkjet-Druckern untersucht. Man unterschied dabei zwischen

- multifunktionalen Buropapieren
- matt- und spezialgestrichenen Inkjet-Papieren und
- Inkjet-Papieren mit Spezialbeschichtung.

Bei Voruntersuchungen stellte man fest, dass die durch Drucker übertragene Tintenmenge lediglich beim HP 959 proportional mit der Flächendeckung zunimmt, falls man gleichzeitig Cyan und Magenta auf die Probe aufbringt. Bei 100% Flächendeckung durch jede Farbe ergeben sich Tintenverbräuche von etwa 9 g/m² bzw. 19 g/m² für den Canon S450. Ein Übereinanderdruck von 100% Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz benetzt das Papier mit bis zu 25,5 g/m² Tinte bei den untersuchten Druckern. Da das Cockle eine Funktion der übertragenen Tintenmenge ist, hängt die Intensität der zu erwartenden Planlagestörungen sehr stark von dem verwendeten Drucker und den spezifizierten Druckeinstellungen (Normalpapier, Fotopapier usw.) ab. Das Cockle-Erscheinungsbild stellte sich in Form von in Maschinenrichtung verlaufenden Wellen dar, die beim HP 959 eine deutlich hochfrequenterer Störung erzeugte als beim Epson Stylus Color 850- oder Canon S450-Drucker.

Charakterisiert man in Anlehnung an den Normungsvorschlag „Cockle bei Inkjet - Drucken“ den Flächendeckungsgrad, bei dem die visuell beurteilte Wellenbildung der Papiere erfolgt, als Cockle-Index, so stellt man fest, dass die meisten multifunktionalen Büropapiere beim Übereinanderdruck von je 30 % Cyan und 30% Magenta cocklen, also den Cockle-Index 30 besitzen. Für matt- und spezialbeschichtete Inkjet-Papiere ergeben sich oftmals nur wenig höhere Werte, während die Papiere mit Spezialbeschichtung keine Planlagestörungen aufweisen.

Bisher erfolgte die Bewertung von Cockle überwiegend visuell, was erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich Klassifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit beinhaltet. Ferner sind auf subjektive Einstufungen gestützte Aussagen für Untersuchungen von technologischen Ursachen des Cockle unbefriedigend. Daher war es die Aufgabe, ein Messverfahren zu entwickeln, das eine objektive Bewertung der Planlagestörung vornimmt. Zu diesem Zweck wurden 12 Inkjet-Papiere unterschiedlicher europäischer Hersteller von 14 Personen im Schräglicht nach dem Kriterium Welligkeit (Cockle) bewertet. Das Ergebnis mündete im Paarvergleichs-Index (PV-Index), der eine den Qualitätsabständen gerecht werdende, nicht äquidistante Rangordnung wiedergibt. Die PV-Indizes der Papiere mit unterschiedlicher Cockle-Intensität bildeten die Leitlinie für eine objektive bildanalytische Bewertung.

Zur Erfassung der Papiertopographie wurde an der Forschungsstelle der codierte Lichtansatz gewählt. Hierbei projiziert man n binäre Streifenmuster nacheinander auf das Prüfobjekt mit Hilfe eines steuerbaren LCD-Projektors und beobachtet das entstehende Muster mit einer CCD-Kamera, die zur Vermeidung von Bildverzerrungen senkrecht über dem Messobjekt angeordnet ist. Hieraus lassen sich bei bekannter Position von Kamera und Projektor die 3D-Koordinaten der beobachteten Objektpunkte durch Triangulation aus den Verformungen der Streifenmuster berechnen. Zur Steigerung der Auflösung wurde das Verfahren noch durch eine zusätzliche Grauwertauswertung und ein Phasenshift-Verfahren, bei welchem Linienmuster mit konstanter Periode seitlich verschoben werden, erweitert. Interpolierende Auswerteverfahren ermöglichen somit Auflösungen im Sub-Pixel-Bereich.

Einer der wesentlichen Vorteile des codierten Lichtansatzes, auch als Gray-Code-Verfahren bezeichnet, liegt in der hohen Geschwindigkeit und Robustheit des Verfahrens, mit der die dreidimensionale Vermessung von Objektoberflächen durchgeführt werden kann. Wie Untersuchungen zeigten, korreliert die mit dem codierten Lichtansatz bestimmte Welligkeit als Quotient von Standardabweichung der Höhenschwankungen des Topographiebildes und der Wurzel der Korrelationslänge am engsten mit dem visuellen Eindruck, was sich in einem Korrelationskoeffizienten von 0,95 äußert.

Zur Beurteilung der Planlagestörungen kam ferner ein am IfP entwickelter Cockling-Tester zum Einsatz, bei dem die Proben unter einem Winkel von etwa 5° in Querrichtung beleuchtet werden, so dass die Berg- und Talstrukturen als helle bzw. dunkle Stellen hervortreten. Das kontrastreiche Bild von etwa 180 mm * 180 mm wird mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgenommen, in 512*512 Bildpunkte digitalisiert und anschließend ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass der Variationskoeffizient des Schräglichtbildes, der Cockling-Index, den visuellen Eindruck aussagekräftig beschreibt. Der Korrelationskoeffizient zum PV-Index beträgt auch in diesem Fall 0,95.

Bezüglich der Ursachenanalyse half ein im Rahmen des Projektes verschickter Fragebogen, in dem Papiereigenschaften sowie Papier- und Streichmaschinendaten der untersuchten Papiere abgefragt wurden, wenig, da dieser von den Firmen meist nur sehr unvollständig ausgefüllt war. Es zeigte sich, dass mit Erhöhung von Dicke und flächenbezogener Masse der Inkjet-Papiere eine Cockling-Reduzierung aufgrund der somit gewonnenen Biegesteifigkeit möglich wird. Ferner wirkt sich eine geringe Feuchtdehnung in Querrichtung positiv aus, während eine Verringerung des Bruchkraft-Verhältnisses nur bei multifunktionalen Büropapieren zu einer Verbesserung führte.

Alle untersuchten Inkjet-Papiere mit Strichgewichten unter 10 g/m² hatten ein ausgeprägteres Cockling als das Basispapier. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist in den unterschiedlichen Eigenschaften von Strich und Rohpapier zu suchen. Bei der Bedruckung von Proben dringt die flüssige Phase der Tinten durch den Strich in das Papier ein. Da die Feuchtdehnung von Strich und Rohpapier verschieden ist, werden bei der Trocknung die beiden Lagen (Strich, Papier) auch ein unterschiedliches Schrumpfungsverhalten haben. Dadurch entstehen Verspannungen, die zum Cockle führen, deren Ausprägung sicherlich auch von den Festigkeitseigenschaften der Lagen beeinflusst wird.

Untersuchungen ergaben, dass die Einwirkzeit von destilliertem Wasser auf Papier in einem modifizierten Cobb-Tester bis zur „Wellenbildung“ sehr gut mit dem dry cockle korreliert und zumindest auch den Trend für das zu erwartende wet cockle angibt, das unter den beiden genannten Planlagestörungen die stärkste Intensität aufweist.

Dank

Unser Dank gilt dem INFOR-Forschungsrat, der dieses INFOR-Projekt Nr. 23 finanziell förderte sowie dem Engagement der Projektbegleiter.

12. Literatur

1. Sangl, R.; Weigl, J.:
Kostengünstige Herstellung ink-jet-geeigneter Papiere bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten.
Papier 52 (1998), Nr. 10A, V109 – V115
2. Fischer, K.:
Einfluss der Oberflächenleimungsmittel auf die Inkjet-Eignung.
Wochenbl. F. Papierf. 127 (1999), Nr.11/12, 765 – 768
3. Grenz, R.; Koch, T.:
Methoden zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften von Inkjet-Druckpapieren.
PTS-Analytik-Tage, Aktuelle Analyseverfahren für die Papiertechnik (1998).
4. Tiziani, H.J.:
Automatisierung der optischen Qualitätsprüfung.
Technisches Messen 55 (1988), Nr. 12, 481 – 491
5. Strutz, T; Tiechmann, W.:
Tiefendatengewinnung mit dem Codierten Lichtansatz – Einsatzmöglichkeiten in der Automobilindustrie.
2. ABW-Workshop zur 3-D Bildverarbeitung, TAE Esslingen, 1996
6. NN:
Automatisierung Bildverarbeitung Dr. Wolf (ABW):
Kurzbeschreibung Codierter Lichtansatz, Frickenhausen, 1996
7. Praast, H.; Götsching, L.:
Formation graphischer Papier.
Papier 45 (1991), Nr.7, 333 - 347
8. Niskanen, K.:
Papermaking Science and Technology, Book 16
Paper Physics.
Fapet Oy, Helsinki, 1998
9. Galley, W.:
Stability of dimensions and form of paper.
Tappi 56(1973), No.11, 54 – 63
10. Hentzschel, P.; Pelzer, R.:
Verbesserung der Bedruckbarkeit von Inkjet-Papieren durch Polyvinylalkohol und andere Komponenten.
Wochenbl. F. Papierf. 124 (1996), Nr. 18, 795 – 801
11. Khoultaev, K.; Graczyk, T.:
Polymer-Polymer and Polymer-Pigment Interactions –Implications on Ink Jet Universal Media.
Tappi Coating Conf.(1999), S.155-168

13. Anhang

A1 Prinzip des Paarweisen Vergleichs

Beim Paarweisen Vergleich werden je zwei Proben visuell miteinander verglichen und von der Testperson mit schlechter oder besser beurteilt. Mit dieser Methode lassen sich unterschiedliche Papierproben qualitätsabstufend beurteilen. Der Vergleich wird systematisch durchgeführt, so dass am Ende jede Probe mit jeder anderen verglichen ist. Das Ergebnis des jeweiligen Vergleichs wird in die quadratische Dominanzmatrix der Größe A_{ij} eingetragen. Die Größe richtet sich nach der Anzahl der Proben a .

Ist die Probe j bezüglich des betrachteten Kriteriums schlechter als die Probe i , erhält das Element g_{ij} die Ziffer Null, ist sie besser, erhält das Element die Ziffer eins. Die Beurteilung ist beendet, sobald die obere Diagonalmatrix der Dominanzmatrix ausgefüllt ist. Die untere Diagonalmatrix wird nun so ausgefüllt, dass jedem Element g_{ji} der inverse Wert des Elementes g_{ij} zugeordnet wird. Dies entspricht einer Spiegelung der Invertierten oberen Diagonalmatrix an der Hauptdiagonalen. Für jeden Beobachter wird eine eigene Dominanzmatrix erstellt. Abb. 1 zeigt eine Dominanzmatrix für einen Beobachter bei einer Probenzahl von 12.

Signifikanz:	0,97	Summe S^2 : 502										
i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0		0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	1	0		1	1	1	0	1	1	1	1
5	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	1		0	1	1	1	1	1
7	0	1	0	0	1	1		1	1	1	1	1
8	0	1	0	1	1	0	0		1	1	1	1
9	0	0	0	0	1	0	0	0		0	1	1
10	0	0	0	0	1	0	0	0	1		1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Summe	0	6	1	3	9	4	3	4	8	7	10	11
S^2	0	36	1	9	81	16	9	16	64	49	100	121

Abb. 1.: Dominanzmatrix für einen Beobachter bei 12 Proben

Die auf Signifikanz geprüften Dominanzmatrizen werden in einer kombinierten Dominanzmatrix $R [r_{ij}]$ zusammengefasst. Dabei wird der Inhalt des Elements r_{ij} durch die Addition der Inhalte von den Elementen g_{ij} der einzelnen Dominanzmatrizen berechnet:

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^n A_n(g_{ij})$$

mit: n = Anzahl der geprüften Dominanzmatrizen

Mit der kombinierten Dominanzmatrix kann der Paarweise Vergleichs-Index berechnet werden:

$$PV - Index = \frac{\sum_{i=1}^a r_{ij}}{n(a-1)} \cdot 100$$

Der PV-Index stellt die mittleren relativen Häufigkeiten der Beurteilungen durch die Testpersonen bezüglich des Kriteriums dar und gibt somit eine den Qualitätsabständen gerecht werdende Rangordnung wieder. Sie ist deshalb für Korrelationsbetrachtungen zwischen visuellen Bewertungen und objektiven Messungen geeignet.

A2 Signifikanzprüfung

Da jeder Mensch unterschiedliche visuelle Eindrücke hat, muss bei der Ermittlung des PV-Indexes sichergestellt werden, dass die Beurteilung der verschiedenen Proben nicht vom Zufall abhängig sind und die Beurteilungswahrscheinlichkeit einen bestimmten Wert nicht unterschreitet. Dafür ist es wichtig, dass die verschiedenen Testpersonen zu einer Urteilkonsistenz kommen. Diese kann mathematisch aus der Dominanzmatrix ermittelt werden. Damit liegt ein Werkzeug vor, um Personen auszuschließen, die zur Beurteilung des vorliegenden Problems nicht in der Lage sind oder aber durch Konzentrationsmangel, Ermüdung oder bei Änderung der Empfindung zu einer Änderung im Entscheidungskriterium kommen.

Beurteilt eine Person drei Proben in der folgenden Reihenfolge: 1 besser als 2 und 2 besser als 3, so ist die folglich richtige Aussage, dass die erste Probe besser als die Dritte ist. Entscheidet der Beobachter aber, dass die dritte Probe besser ist als die erste, so entsteht ein Widerspruch. Diese intransitive Aussage wird auch als zirkuläre Triade bezeichnet.

Die Urteilkonsistenz ζ eines Beobachters berechnet sich aus dem Verhältnis der tatsächlich vorhandenen zirkulären Triaden (d) zu den maximal möglichen zirkulären Triaden ($d_{\max}$).

$$\zeta = 1 - \frac{d}{d_{\max}}$$

Dabei berechnet sich $d_{\max}$ aus der Probenanzahl. Es gilt:

Ungerade Anzahl Proben:

$$d_{\max} = a(a^2 - 1) / 24$$

Gerade Anzahl von Proben:

$$d_{\max} = a(a^2 - 4) / 24$$

Die tatsächliche Anzahl der zirkulären Triaden d errechnet sich aus der Probenanzahl und der Spaltensumme der Dominanzmatrix:

$$S_j = \sum_{i=1}^a g_{ij}$$

$$d = [a(a-1)(2a-1)/12] - 0,5 \sum_{j=1}^a S_j^2$$

Damit die Urteilkonsistenz der Beobachter eine gewisse Wahrscheinlichkeit nicht unterschreitet, wird das Ergebnis mit der χ^2 -Methode überprüft. Der Wert von χ^2 wird einer Tabelle entnommen. Dabei wird eine willkürlich festgelegte Wahrscheinlichkeit, in diesem Fall 95 % ($\alpha = 0,05$) und der Freiheitsgrad df benötigt. Der Freiheitsgrad berechnet sich wiederum nur aus der Probenzahl:

$$df = \frac{a(a-1)(a-2)}{(a-4)^2}$$

χ^2 kann auch berechnet werden. Es gilt:

$$\chi^2 = \left[\frac{8}{(n-4)} \right] \left[0,25 \cdot \frac{n!}{3!(n-3)!} - d - 0,5 \right] + df$$

Mit dem Wert von χ^2 aus der Tabelle kann ζ so bestimmt werden, damit die Urteilkonsistenz von 95 % nicht unterschritten wird. Dies kann in dem vorliegenden Fall mit dem Wert für $\zeta \geq 0,9$ erreicht werden.