

Gemeinsamer Abschlussbericht der

INFOR-Projekte Nr. 8 und 15

**Funktionsgerechte Charakterisierung
der Oberflächen-Mikrostereometrie und
der „Kopierbarkeit“ von
Laserdruckpapieren
sowie der
"Mehrfarben-Bedruckbarkeit" von
Laserdruck-, Kopier- und Ink-Jet-Druck-
Papieren**

März 2002

Abschlußbericht
Funktionsgerechte Charakterisierung
der
Oberflächen-Mikrostereometrie und der "Kopierbarkeit" von Kopier-
und Laserdruckpapier, sowie der "Mehrfarben-Bedruckbarkeit"
von
Laserdruck- und Kopierpapieren

INFOR-Projekt TUD-LPT 01/99 "Kopierbarkeit"
INFOR-Projekt TUD-LPT 01/00 "Mehrfarben-Bedruckbarkeit"
H.L. Baumgarten, P. De Giuli, J. Heymer
März 2002
(2. Fassung)

Projektbegleiter:

- Dipl.-Ing. J. Hoppe
Nordland Papier AG
- Dr. G. Papier
Zanders Feinpapiere AG
- Dr. J. Hemmes/Dr. G. Winter
M-real/ MoDo Paper GmbH

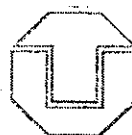
Das Forschungsprojekt wurde gefördert
als **INFOR-Projekt** des
Kuratoriums für Forschung und
Technik der Zellstoff- und Papier-
industrie im Verband Deutscher
Papierfabriken e. V. (VDP), Bonn

LEHRSTUHL UND FACHRICHTUNG
PAPIERTECHNIK

PROF.DR.-ING. H.L. BAUMGARTEN

TU Dresden * Lehrstuhl für Papiertechnik * 01062 Dresden

Tel.: (0351) 463 8033 Fax: (0351) 463 8032 e-mail: lepatec@mhp.mw.tu-dresden.de



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

März 2002

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt den Projektbegleitern für ihre intensive Unterstützung und Beratung während der Durchführung des Projektes.

Dem Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (VDP), Bonn, danken wir für die finanzielle Förderung dieses Projektes und die damit verbundene Nachwuchsförderung.

Dresden, März 2002

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Problemstellung	1-1
2. Ziele und Wege der Projekte	2-1
3. Methoden zur funktionsgerechten Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie für die Qualitätssteuerung	3.1-1
3.1 Bekannte Rauheits-Messverfahren	3.1-1
3.1.1 Einleitung	3.1-1
3.1.2 Rauheit Bendtsen	3.1-1
3.1.3 Glätte nach Bekk	3.1-2
3.1.4 Rauheit / Glätte nach Print-Surf	3.1-4
3.1.5 Vergleich der Luftstromverfahren (Bekk, Bendtsen und das Parker-Print-Surf-Verfahren)	3.1-5
3.1.5 TRACEIT® : Schräglicht-, Durchlicht- und Linienschnittverfahren	3.1-7
3.1.6 Glätte als Kontaktanteil KAM nach FOGRA	3.1-9
3.1.7 Glanz-Messverfahren	3.1-11
3.1.8 Glätte nach KL	3.1-14
3.2 Einführung standardisierter Rauheits-Kenngrößen	3.2-1
3.2.1 Standardisierte Rauheitskenngrößen	3.2-1
3.2.2 Rauheit Ra nach Bendtsen (BEN-Ra)	3.2-3
3.2.3 Rauheit Ra nach Bekk (BEK-Ra)	3.2-5
3.2.4 Rauheit Ra nach Parker-Print-Surf (PPS-Ra)	3.2-6
3.2.5 Vergleich der Rauheit BEN-Ra und BEK-Ra	3.2-7
3.3 Druckvariable Rauheitsmessverfahren	3.3-1
3.3.1 Einleitung	3.3-1
3.3.2 Modifizierte Rauheit Ra nach Bendtsen (BEN-Ra)	3.3-1
3.3.3 Druckvariabler Kontaktanteil (KAM)	3.3-2
3.4 Ergebnisse der Rauheitsuntersuchung	3.4-1
3.4.1 Rauheit nach Bendtsen und Bekk	3.4-1
3.4.2 Modifizierte Bendtsen-Rauheit	3.4-2
3.4.2.1 Einführung	3.4-2
3.4.2.2 Naturkopierpapiere (NKP)	3.4-4
3.4.2.3 Gestrichene Kopierpapiere (GKP)	3.4-7
3.4.2.4 Vergleich der BEN-Ra und PPS-Werte	3.4-8
3.4.3 Druckvariabler Kontaktanteil (KAM)	3.4-9
3.4.3.1 Einführung	3.4-9
3.4.3.2 Kontaktanteil bei Standard-Anpressdrücken	3.4-9
3.4.3.3 Druckvariabler Kontaktanteil mit Einfluss der Probenunterlage	3.4-14
3.5 TRACEIT®-Messergebnisse mit Bendtsen- und PPS-Werten	3.5-1
3.6 Glanz-Messergebnisse mit OS/US- und MD/CD-Vergleich	3.6-1
4. Messung der Mikroformation zur Strukturanalyse	4-1
4.1 Einführung	4-1
4.2 Formationsindex und Grauwertverteilung	4-1
4.2.1 Einleitung	4-1
4.2.2 Opazitäts-Formations-Index	4-1
4.2.3 Transparenz-Formations-Index	4-2
4.2.4 Berechnung des Formations-Index	4-2
4.2.5 Ergebnisse	4-3
4.3 Flockenverteilung und Nadellöcher	4-5
4.3.1 Einleitung	4-5
4.3.2 Spezifischer Perimeter	4-5
4.3.3 Flockengrößenverteilung	4-6
4.3.4 Ergebnisse	4-7

4.3.5 Nadellöcher	4-8
4.3.6 Analyse der Nadellochverteilung	4-8
4.4 Fourieranalyse	4-8
4.4.1 Einleitung	4-8
4.4.2 Zweidimensionale Fouriertransformation	4-9
4.4.3 Anwendung der Fourieranalyse	4-10
4.4.4 Ergebnisse	4-11
4.5 Co-Occurence-Matrix	4-14
4.5.1 Einführung	4-14
4.5.2 Texturparameter	4-14
4.5.3 Messwerterfassung	4-16
4.5.4 Ergebnisse	4-16
5. Probe-Laserdruck-, -Ink-Jet- und -Kopier-Verfahren	5.1-1
5.1 Schwarz-Weiß-Probedruck-Verfahren	5.1-1
5.1.1 Gravimetrische (Gewogener Andruck) und Densitometrische Bewertung	5.1-1
5.1.2 Mikro-Bildanalyse der Probedrucke	5.1-9
5.2 Mehrfarben-Probedruck-Verfahren	5.2-1
6. Zusammenfassung	6-1
7. Literaturliste	7-1
8. Anhang	A.1-1
A1 Referenz-Papiere	A.1-1
A2 Referenz-Laserdrucker	A.2-1
A3 Methode zur Charakterisierung der Transparenz- und Opazitäts-Mikro-Formation von Laser- Tintenstrahldruck- und Kopierpapier	
A4 Methode zur Bewertung der Probedrucke von Laserdruckern, Kopiergeräten und Tintenstrahldruckern	A.4-1

1. Problemstellung

Die heutige Sortengruppe "Ungestrichene holzfreie Kopier- und Laserdruckpapiere" hatte 1982 ein Marktvolumen von 1 Mt/a erreicht und dieses bis 1999 auf 2,8 Mt/a gesteigert. In den kommenden 5 Jahren wird ein weiteres Wachstum des westeuropäischen Marktvolumens für diesen Sortenbereich um 3,3% pro Jahr erwartet. Auf diese Sortengruppe konzentriert sich das INFOR-Projekt „Kopierbarkeit“.

Die Sortengruppe „Gestrichene holzfreie Kopier- und Laserdruckpapiere“ war zwar 1999 am Gesamtgebrauch mit weniger als 33000 t/a beteiligt. Allerdings wird für diese Sortengruppe in den kommenden Jahren ein Wachstum im Gebrauch von 7,6% pro Jahr prognostiziert.

Mit der Erweiterung des Projektbegleiter-Kreises und der gemeinsamen Formulierung des INFOR-Projektes TUD-LPT 01/00: Funktionsgerechte Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie und der "Mehrfarben-Bedruckbarkeit" wurden die ungestrichenen holzfreien Papiere stärker bei der Entwicklung der Meßmethoden berücksichtigt. Dies zeigt auch die Zusammensetzung der Kerngruppe von 14 Referenzpapieren – siehe Tabelle 1-1 – aus 9 ungestrichenen und 5 gestrichenen Papieren.

Kurzbezeichnung	Papierart	Flächenmasse [g/m ²]
NKP 1	ILK	80
NKP 2	ILK	80
NKP 3	IL	80
NKP 4	ILK	80
NKP 5	Farb-K; IL	80
NKP 6	Farb-K, IL, sat.	100
NKP 7	Farb-ILK, sat.	100
NKP 8	Farb-ILK	80
NKP 9	K	80
GKP 1	Farb-K, hgl	210
GKP 2	Farb-K, gl	135
GKP 3	Farb-K, m	135
GKP 4	Farb-KL, gg	160
GKP 5	Farb-KL	100

Tabelle 1-1: Übersicht der 14 Referenzpapiere

NKP	Naturkopierpapier
GKP	Gestrichenes Kopierpapier
I	Ink-Jet-Druck
L	Laserdruck
K	Kopierpapier
Farb	mehrfarbig bedruckbar bzw. kopierbar
sat.	satiniert
hgl	hochglänzend
gl	glänzend
m	matt
gg	gussgestrichen

Die erreichte hohe Reproduktionsfähigkeit vieler Kopiergeräte und Laserdrucker für schwarz-weiße und mehrfarbige Halbton-Vorlagen kann nur durch eine material- und verfahrenstechnische Optimierung der Oberflächen-Mikrostereometrie der verwendeten Papiere voll genutzt werden. Voraussetzung für eine solche gezielte material- und verfahrenstechnische Optimierung - unter Einschluss der Papiermaschinen-Prozesse und weitergehender Oberflächenveredlung durch Pigmentieren, Streichen und/oder Satinieren - sind Methoden zur Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie, die den geringen Druck beim Vervielfältigungsvorgang berücksichtigen.

2. Ziele und Wege der Projekte

Die großen und weiter rasch expandierenden Sortengruppen "ungestrichene, pigmentierte und gestrichene holzfreie Laserdruck-, Kopier- und Ink-Jet-Druck-Papiere" für den Schwarz-Weiß- und den Mehrfarben-Druck benötigen zur technisch-ökonomischen Optimierung der jeweiligen Kette "Herstellen der Papierprodukte, der Toner und Tinten, der Druck- und Kopiergeräte sowie der Papiere" ein Meßmethoden-System:

(A) zur funktionsgerechten Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie der Papiere in der Qualitätssteuerung,

(B) zur Analyse der Beziehungen zwischen der Mikro-Struktur der Oberfläche sowie der Mikro-Formation der Papiere und der Material- sowie Verfahrenstechnik ihrer Herstellung - Bahn bilden (Mikro-Flächenmassen-Formation, Retentions- und Siebstruktur), Bahnpressen (Filz-Struktur), Bahntrocknen (Sieb- und Schrumpfungs-Struktur)- der weitergehenden Veredlung - Oberflächenleimung, Pigmentieren, Streichen und/oder Satinieren sowie der Formation des Glanzes und der Schwärzung bedruckter Flächen.

(C) zur Herstellung und densitometrischen sowie gravimetrischen Bewertung von Schwarz-Weiß- und Mehrfarben-Drucken, so dass z. B. der Gesamt-Kostenaufwand für Papier und Toner pro Druckprodukt optimiert werden kann.

3. Methoden zur funktionsgerechten Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie für die Qualitätssteuerung

3.1 Bekannte Rauheitsmessverfahren

3.1.1 Einleitung

Die Rauheit wird auch als wirkliche Oberfläche bezeichnet, die den Gegenstand von dem ihm umgebenden Medium trennt. Für das offeneporige Material "Papier" ist die wirkliche Oberfläche schwer zu definieren. Das Gegenteil der Rauheit ist die Glätte, wobei die Glätte physikalisch nicht exakt definiert ist. Die Rauheit der Oberfläche von Papier ist für dessen Weiterverarbeitung - besonders im Hinblick auf die Druckqualität - von großer Bedeutung.

Für die Messung der Rauheit gibt es eine Vielzahl von Messverfahren. Diese können in

- indirekte Messverfahren
- direkte Messverfahren

unterteilt werden.

Zu den indirekten Messverfahren gehören die bekannten Luftstrommessverfahren nach Bekk, Bendtsen und das Parker-Print-Surf Verfahren. Bei diesen Verfahren stellt ein Volumenstrom des Mediums Luft die Rauheitskenngröße dar. Gemessen wird dabei die Größe eines Luft-Volumenstromes, der durch eine definierte Druckdifferenz, zwischen einer planen Bezugsfläche der Papieroberfläche, die mit einem definierten Druck angepresst wird, erzeugt wird. Das Parker-Print-Surf Verfahren erlaubt im Vergleich zum Bekk - und Bendtsenverfahren die Umrechnung in einen μm - Wert.

Direkte Messverfahren können unterteilt werden in:

- mechanisch-elektrische Verfahren (wie Abtastverfahren mit Tastnadel, z.B. Hommelgerät) oder in
- optische Verfahren, z.B. Kontaktanteilmessgerät, K.L.-Glättemessgerät, UBM-Gerät, Glanz nach DIN oder TAPPI, TRACEIT-Verfahren,

Zu den mechanisch-elektrischen Messverfahren zählen Tastschnittverfahren, bei denen eine Tastnadel entlang einer meist geraden Linie den zu prüfenden Oberflächenausschnitt abtastet. Erfasst wird mit Tastschnittgeräten die Geometrie der Papieroberfläche. Ein Nachteil bei ihrer Anwendung ist, dass die Papieroberfläche eine bleibende Verformung erfährt und der Zeitaufwand für die Gewinnung aussagekräftiger Daten groß ist.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden die in Tabelle 3.1-1 zusammengefassten Messverfahren näher betrachtet.

Typ	Messverfahren
Luftstrom-Verfahren	Glätte nach Bekk
	Rauheit nach Bendtsen
	Parker-Print-Surf
Optische Verfahren	Glätte als Kontaktanteil (KAM)
	TRACEIT-Verfahren
	Glätte nach K.L.
	Glanz nach Lehmann

Tabelle 3.1-1: Übersicht der angewendeten Messverfahren

3.1.2 Rauheit Bendtsen

Das Bendtsen-Gerät ist ein Luftstrommessgerät zur Charakterisierung der Struktur von Papieroberflächen. Das Verfahren ist im ZELLCHEMING-Merkblatt V/24/73 /1/ und darauf aufbauend in ISO 8791-2:1990 /2/ standardisiert. Es kann für einen weiten Bereich von Papieren, Kartons und Pappen zur Rauheitsmessung angewendet werden. Die Rauheit nach Bendtsen gibt die Größe des Luftstromes in ml/min an, der aus dem Messkopf (Abb.3.1-1) unter der Wirkung eines Überdruckes von 1470 Pa (150 mm WS) zwischen dem Auflagering und der Oberfläche der auf einer Glasplatte liegenden Probe herausgedrückt wird, wenn der Messring mit einer Auflagefläche von 15 mm^2 auf die Papieroberfläche eine Flächenpressung $p_k = 1 \text{ bar} = 98 \text{ kPa}$ ausübt.

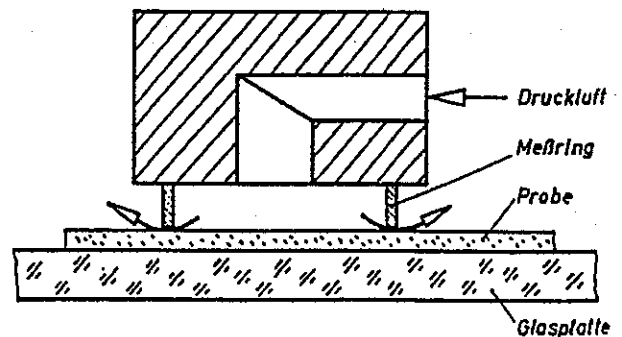


Abbildung 3.1-1: Messkopf des Bendtsengerätes

Die Messanordnung (Abbildung 3.1-2) besteht aus einem Kompressor (A), einem Druckausgleichsbehälter (B), dem Zentralgerät (D) mit Manostat (C), Schaltventilen und Rotameterrohren sowie dem Messkopf (F), ferner einer Glasplatte als Probenunterlage sowie ggf. einem U-Rohr Manometer (E) zum Messen des Druckes:

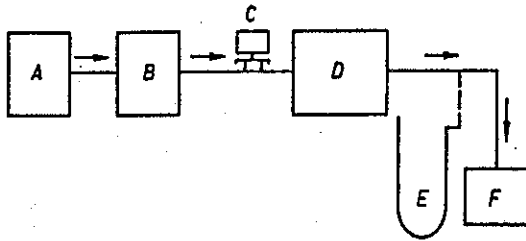
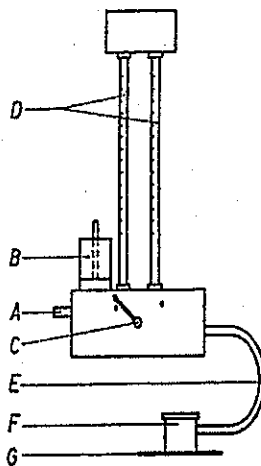


Abbildung 3.1-2: Schaltbild des Prüfgerätes /1/

Durch den Kompressor wird Druckluft von etwa 127 kPa erzeugt, welche mit Hilfe des Druckausgleichbehälters und dem Manostat am Zentralgerät auf 1470 Pa (150 mm WS) reguliert wird. Um bei einem Druck von 75 mm WS bzw. 225 mm WS die Messungen durchzuführen, ist lediglich ein Austausch des Manostates notwendig. Zwei weitere Manostate (75 mm WS und 225 mm WS) stehen zur Verfügung. Die Messung der aus dem Messkopf entweichenden Luftmenge erfolgt mit den nachfolgend genannten Rotametern:

- Rotameter 1: 10-150 ml/min,
- Rotameter 2: 50-500 ml/min
- Rotameter 3: 300-3000(5000) ml/min



A: Druckluftzufuhr; B: Manostat; C: Schalthebel für Rotameterrohre;
D: Rotameterrohre; E: Schlauch; F: Messkopf; G: Glasplatte

Abbildung 3.1-3: Zentralgerät /1/

Zum Messen ist die Probe so auf die Glasplatte zu legen, dass die zu prüfende Seite nach oben zeigt. Dann wird der Messkopf parallel zur Probe, d.h. ohne ihn zu verkanten, langsam und ohne Druckanwendung auf die Probe aufgelegt. Nachdem 5 Sekunden der Messkopf aufgesetzt und die Hand zurückgezogen worden ist, wird die Größe des Luftstromes am Rotameter möglichst genau abgelesen.

Die Bendtsen-Rauheit hängt von der Form, dem Gesamtvolumen und der Verteilung der Hohlräume ab, die unter den festgelegten Kontaktbedingungen zwischen Papieroberfläche und der ideal eben gedachten Auflagefläche des Messringes entstehen. Je größer die Bendtsen-Rauhigkeitszahl ist, desto größer ist die Rauigkeit der geprüften Oberfläche. Deshalb wird dieses Prüfverfahren als Rauheitsmessung und nicht als Glättemessung bezeichnet.

In das Messergebnis geht jedoch auch die Porosität des geprüften Papiers ein. Für Proben mit einer Dicke über 0,6 mm sollte das Verfahren nach ISO 8791-2:1990 nicht angewendet werden. Der durch die Probe hindurchtretende Luftstrom verfälscht das Ergebnis, und zwar um so stärker, je größer ihre Dicke, Luftdurchlässigkeit bzw. Porosität und Glätte sind.

3.1.3 Glätte nach Bekk

Das Bekk-Gerät gehört ebenfalls zu den sogenannten Luftstrommessgeräten. Das Verfahren kann in einem weiten Bereich von Papieren, Kartons und Pappen zur Glättemessung angewendet werden. Es ist in ZELLCHEMING-Merkblatt V/23/73 /3/ und darauf aufbauend in DIN 53107 /4/ standardisiert. Die Glätte Bekk ist die Zeitdauer in Sekunden, die benötigt wird, um eine bestimmte Luftmenge aus der Umgebungsluft bei definierter Druckdifferenz zwischen Papieroberfläche und einer ringförmigen, nahezu vollkommen ebenen Fläche unter festgelegten Kontaktbedingungen radial nach innen hindurchzusaugen.

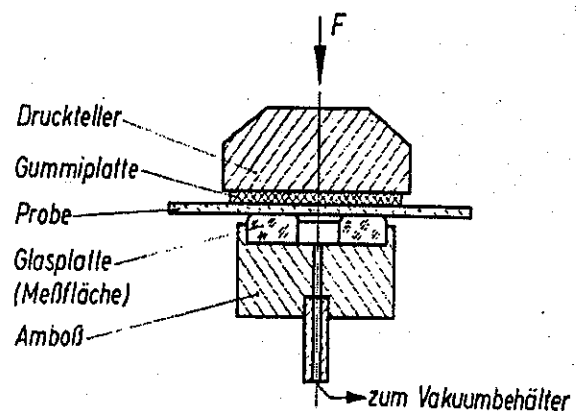


Abbildung 3.1-4: Messprinzip Bekk /3/

Das Gerät hat eine Vorrichtung, mit der über Druckteller und Gummipolsterung das Probestück mit einer Flächenpressung von 100 kPa gegen die ebene ringförmige Glasplatte mit einer Kontaktfläche von 10 cm² gedrückt werden kann. Die zentrische Bohrung in der Mitte der Glasplatte kann wahlweise mit einem von zwei Vakuumbehältern verbunden und wieder abgeschaltet werden.

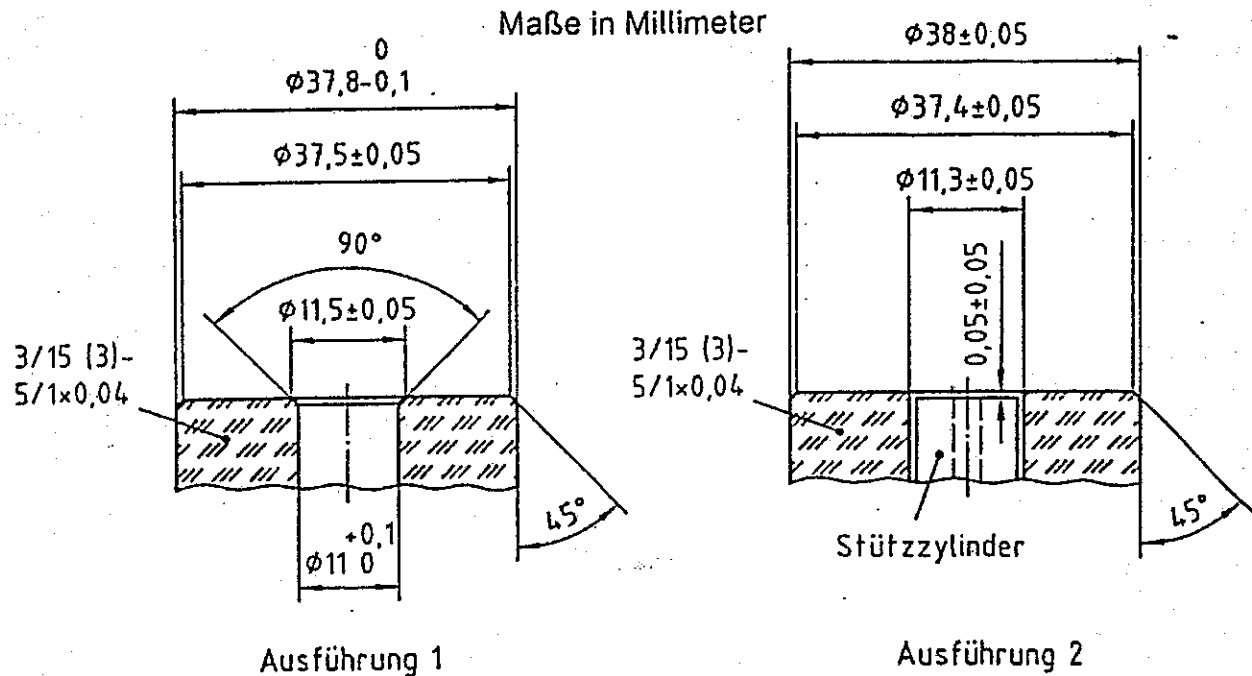


Abbildung 3.1-5: Toleranzen des Bekk-Messkopfes /4/

Der Rauminhalt der Behälter muss zusammen mit dem der Verbindungsleitung gerechnet bis zur Oberfläche der Glasplatte 380 ml bzw. 38 ml betragen. Mit Hilfe eines Manometers wird der jeweilige Unterdruck in den Behältern angezeigt.

60 ± 5 Sekunden nach Aufbringen der Belastung wird der Vakuumbehälter mit der Bohrung in der Glasplatte verbunden. Gemessen wird die Zeit, in welcher der Unterdruck in dem jeweiligen Vakuumbehälter um einen bestimmten Wert abfällt. Die Änderung des Unterdruckes ist vom Messverfahren abhängig und in Tabelle 3.1-2 dargestellt.

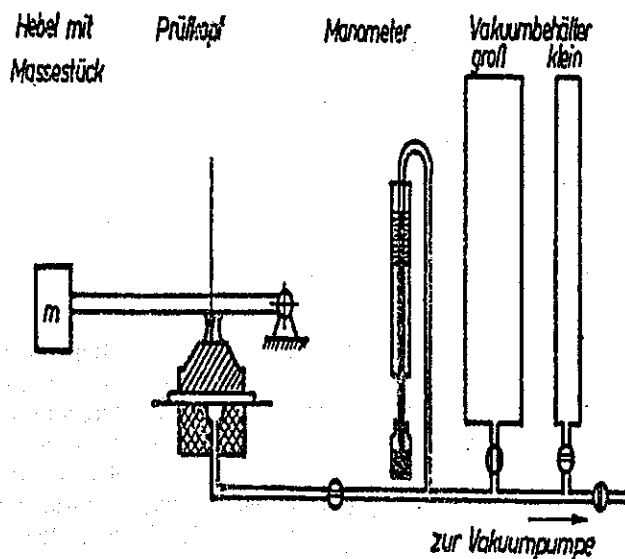


Abbildung 3.1-6: Gesamtanordnung Bekk-Gerät /3/

Zum Messen selbst wird eine vorbereitete Probe mit der zu prüfenden Seite nach unten so auf die Glasplatte gelegt, dass diese völlig bedeckt ist. Anschließend werden Gummiplatte und Druckteller auf die Probe gesetzt, die Flächenpressung von 100 kPa aufgebracht und im Vakuumbehälter ein Unterdruck von 380 mm Hg (51 kPa) erzeugt.

	Ver- fahren A	Ver- fahren B	Ver- fahren C
Behälter- volumen [ml]	380	38	380
Unterdruckabfall [mm Hg]	380-360	380-360	380-220
Anwendung	10-600s	$t_A > 300s$	$t_A < 20s$

Tabelle 3.1-2: Die unterschiedlichen Messverfahren der Bekk-Glätte (t_A = Zeit, die beim Verfahren A benötigt würde)

Die bei Verfahren B ermittelten Werte sind mit dem Faktor 10 zu multiplizieren, da die Messdauer auf ein Zehntel durch die Anwendung des kleineren Behälters im Vergleich zu Verfahren A verkürzt wird. Beim Verfahren C muss die gemessene Zeit durch den Faktor 10 dividiert werden, da durch den größeren Druckabfall ein höheres Luftvolumen angesaugt wird und gleichzeitig der mittlere wirksame Unterdruck verringert wird.

Wurde Prüfverfahren B oder C angewendet, so ist dies am Ergebnis zu vermerken.

Die Bekk-Glätte hängt von der Form, dem Gesamtvolumen und der Verteilung der Hohlräume ab, die zwischen Paperoberfläche und idealgedachter Ebene unter den festgelegten Kontaktbedingungen entstehen. Je größer die Glätte-

Bekk-Zahl, desto höher ist die Glätte des Papiers. In das Messergebnis geht jedoch auch die Porosität des geprüften Papiers ein. Deshalb sollte das Verfahren bei porösen Papieren, Kartons und Pappen sowie bei Proben mit einer Dicke von über 0,6 mm nicht zur Anwendung kommen /4/. Deshalb wird dieses Prüfverfahren zur Glättemessung verwendet.

3.1.4 Rauheit / Glätte nach Print-Surf

Das Verfahren zur Bestimmung der Rauheit nach Print-Surf ist ein Luftstrom-Messverfahren und in DIN ISO 8791 – 4 standardisiert /5/. Anwendbar ist das Verfahren für alle Papiere und Kartons, bei denen es möglich ist eine hinreichende luftundurchlässige Abdichtung entlang der Dichtringe des Messkopfes zu bilden. Die Rauheit nach Print-Surf ist dabei der mittlere Abstand zwischen einem Blatt Papier bzw. Pappe/ Karton und einer ebenen Ringfläche, die unter definierten Bedingungen angepresst wird. Der mittlere Abstand wird mit der allgemeinen Gleichung

$$Ra = k \cdot \sqrt[3]{G}$$

Gleichung 3.1-1

bestimmt. Diese Gleichung beruht auf dem Kanalmodell nach Parker und gibt einen Wert für die gemessene Rauheit in einem allgemein vorstellbaren μm -Wert an.

G ist dabei der gemessene Luftstrom, der das Oberflächengebirge der Papierprobe charakterisiert und k entspricht einem dimensionslosen Faktor der verfahrensbezogen (PPS, Bekk, Bendtsen) zu bestimmen ist.

Diese Formel wurde von J.R.Parker /11/ eingeführt mit der Entwicklung des Print-Surf-Verfahrens, das deshalb auch Parker-Print-Surf-Verfahren (PPS) genannt wird. Die Probe wird zwischen den ringförmigen, planen Messkopf aus Metall und eine federnde Grundplatte gelegt. Der innere und äußere Dichtring bilden bei definierten Druckbedingungen den Luftabschluss mit der Probe. Die Druckdifferenz auf beiden Seiten des Messrings ruft eine Luftströmung zwischen der Querschnittsfläche des Messrings und der Probeoberfläche hervor.

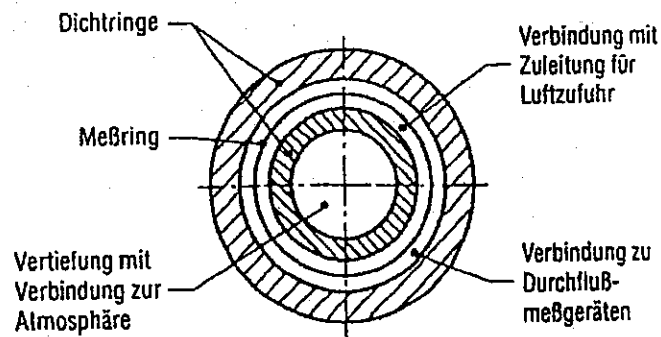


Abbildung 3.1-7: Anordnung der Messringe am Messkopf

Der Luftstrom wird entweder mittels eines Durchflusssmessgerätes erfasst oder es wird die Druckdifferenz auf beiden Seiten des Messrings mit der Druckdifferenz bei bekanntem Durchflusswiderstand verglichen.

Der Messring ist $51,0 \pm 1,5 \mu\text{m}$ dick und hat eine effektive Länge von $98 \pm 0,5 \text{ mm}$. Die beiden Dichtringe müssen überall mindestens $1000 \mu\text{m}$ dick sein. Die radiale Entfernung zwischen den Dichtringen muss überall $152 \pm 10 \mu\text{m}$ betragen. Der Messring ist zwischen den beiden Dichtringen zentriert. Die Ringe müssen in einer luftdichten Fassung so montiert sein, dass Luft in den Raum zwischen dem inneren Ring und dem Messring geleitet werden kann und aus dem Raum zwischen dem Messring und dem äußeren Dichtring entweichen kann.

Der Messring ist in Abbildung 3.1-6 dargestellt.

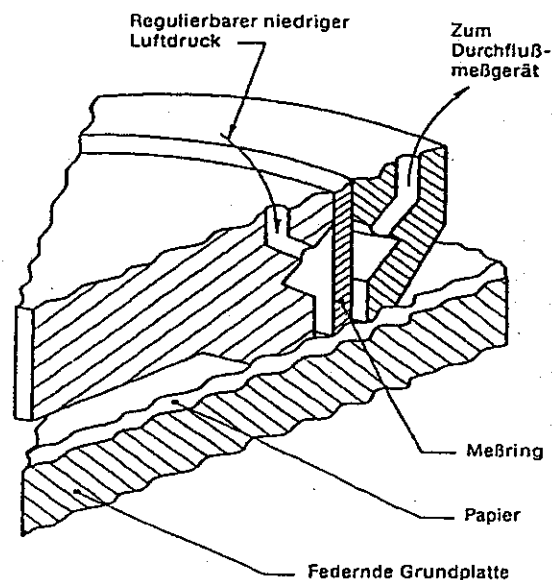


Abbildung 3.1-8: Schnitt durch den Messkopf

Die federnden Grundplatten von unterschiedlicher Beschaffenheit können in den Vertiefungen der Halterung befestigt werden. Die weiche Grundplatte ist federnd und besteht aus einem Gumm Tuch (Offsetdruck) aus synthetischem Gummi von mindestens $600 \mu\text{m}$ Dicke, der eine Gewebeunterlage trägt, so dass die Gesamtdicke des Tuches $2000 \pm 200 \mu\text{m}$ beträgt. Die harte Grundplatte ist federnd und aus Polyesterfolie hergestellt, mit einer Unterlage aus Kork, Gumm Tuch (Offset) oder ähnlichem Material.

Der Anpressmechanismus ermöglicht das Anpressen der federnden Grundplatte mit Anpressdrücken von $980 \pm 30 \text{ kPa}$ (10 bar) oder $1960 \pm 30 \text{ kPa}$ (20 bar). Die Messung der Rauheit nach PPS bei einem Anpressdruck von 5 bar ist laut Norm nicht erlaubt, da bei diesem Anpressdruck die Luft zum Entweichen unter den Dichtringen neigt. Die Messzeit sollte 3 bis 5 Sekunden betragen.

3.1.5 Vergleich der Luftstromverfahren (Bekk, Bendtsen und das Parker-Print-Surf-Verfahren)

Wie bereits zuvor erwähnt, gehören die bekannten Luftstrommessverfahren nach Bekk, Bendtsen und das Parker-Print-Surf Verfahren zu den indirekten Messverfahren. Bei diesen spielen die Geometrien der Messköpfe einen wesentlichen Einfluß auf die ermittelten Messwerte.

	Bendtsen	Bekk	PPS
Norm	ISO 8791-2	ISO 5627:95	ISO 8791-3
b [mm]	0,150	18	0,051
r [mm]	15,75	-	14,80
A [mm ²]	14,844	1000	4,743
p _A [bar]	1	1	10; 20
p _L [Pa]	1470	-	6200; 19600
Unterlage	hart	weich	weich; hart
Härte	-	40	w: 83; h: 95
D [mm]	-	4	0,6; (2)*

Tabelle 3.1-3: Vergleich der Geometrien der Messköpfe

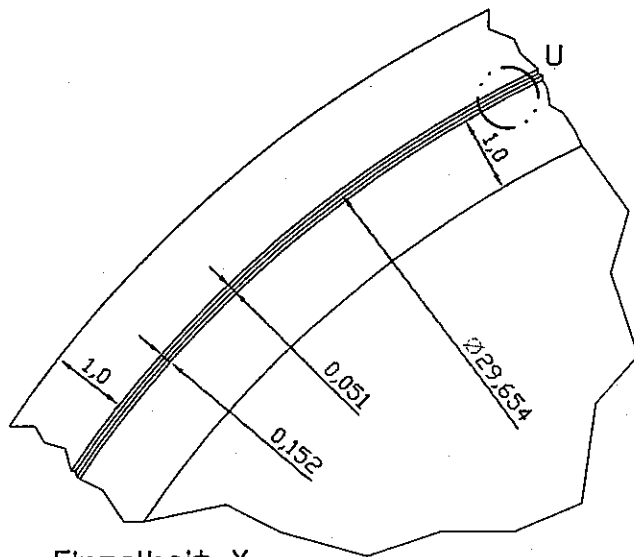
- b Messringbreite [mm]
- r Innenradius des Messrings [mm]
- A Auflagefläche des Messrings [mm²]
- p_A Messring-Anpressdruck [Pa] (Standard)
- p_L Luftdruck [Pa] (Standard) wobei:
9,8·Pa = 1 mmWS (Wassersäule)
- Härte Härte der weichen Unterlagen [IRHD]
- D Dicke der Probenunterlage [mm]
- (2)* Dicke des Gummituches der PPS Unterlage, wobei die gesamte Dicke mit der Gewebeunterlage darunter dann auf 2 mm ansteigt

Um die angegebenen Abmessungen anschaulich miteinander vergleichen zu können, wurden die Messköpfe von Bekk, Bendtsen und PPS, sowie von Sheffield im Maßstab 1:1 auf der folgenden Seite dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die im Vergleich zu PPS größere Auflagefläche der Bendtsen Schneide.

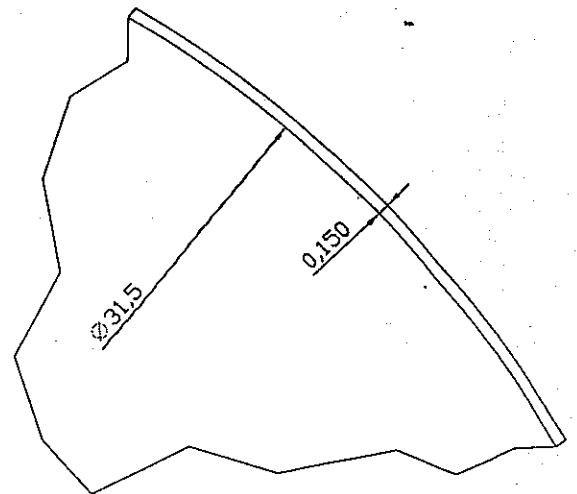
Jedoch hat nicht nur der Messkopf, sondern auch die entsprechende Unterlage einen großen Einfluß auf die ermittelten Ergebnisse. Um die Unterlagen zu kennzeichnen wurden ihre IRHD-Werte (International Rubber Hardness Degree) nach DIN 53519-1: 05/72 in der Tabelle 3.1-4 zusammengestellt /36/.

Gerät	Unterlage	Härte
PPS	- weich (Gummituch)	83 ± 6 IRHD
	- hart (Polyesterfolie)	95 ± 2 IRHD
Bekk	- Gummiplatte	40 ± 5 IRHD
Bendtsen	- Glasplatte	-

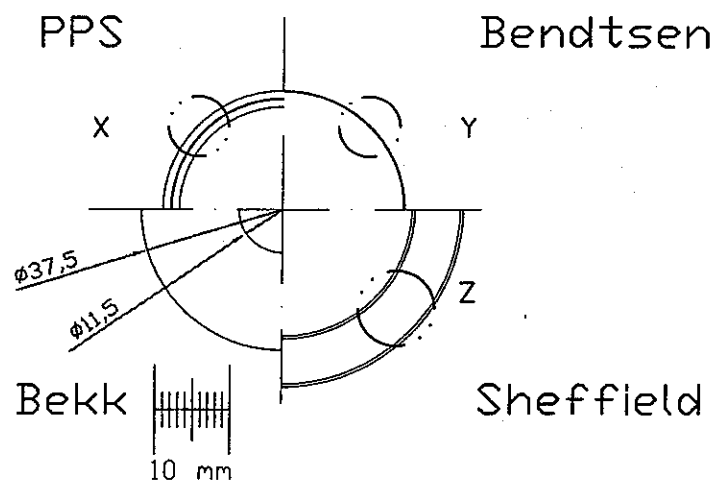
Tabelle 3.1-4: IRHD-Werte der PPS- und Bekk-Unterlagen



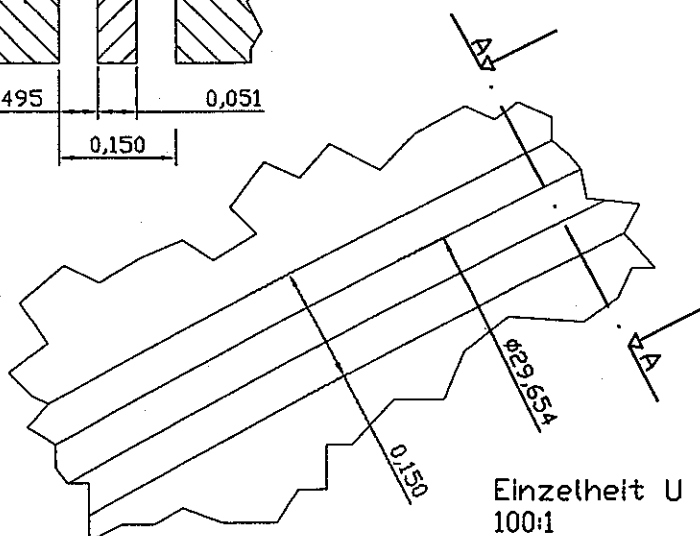
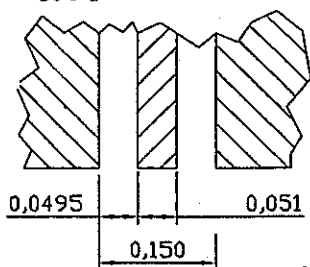
Einzelheit X
10:1



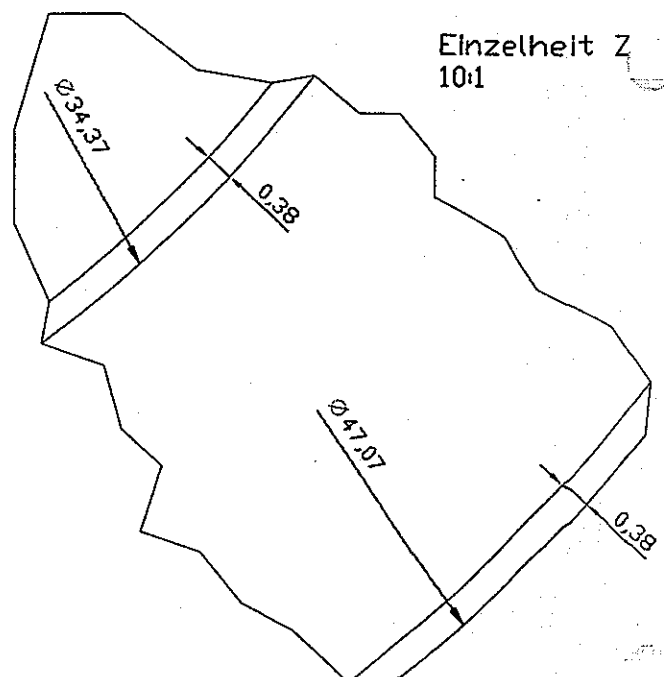
Einzelheit Y
10:1



A-A (70°gedreht gezeichnet)
100:1



Einzelheit U
100:1



Einzelheit Z
10:1

Abbildung 3.1-9: Auflageflächen der Messköpfe (Luftstrom-Messverfahren); Skala 1:1

3.1.6 TRACEIT®: Schräglicht-, Durchlicht- und Linienschnittverfahren

Grundprinzip des optischen Oberflächenstruktur-Analysegerätes TRACEIT® bildet das Schräglichtverfahren. Bei Schräglicht-Beleuchtung erscheinen glatte Oberflächen kontrastarm, rauhe dagegen kontrastreich. Ein Sensorkopf sorgt für Kontrastierung und Bilderfassung.

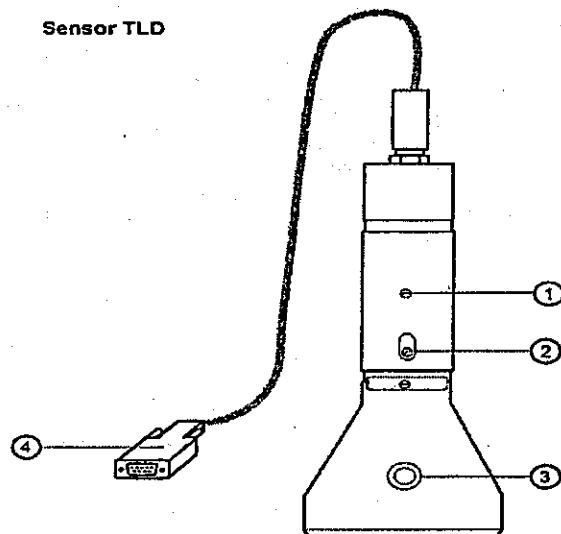


Abbildung 3.1-10: Zeichnung Sensorkopf /6/

- 1 = Arretierschraube
- 2 = Einstellung der Tiefenschärfe
- 3 = Orientierungshilfe
- 4 = Kabel mit Stecker

Das System besteht im einzelnen aus /6/:

- Steuerelektronik und Computereinheit
- Monitor sowie Tastatur
- Sensorkopf mit festem Messfeld, 4 x 4 mm
- Windows-Auswertesoftware

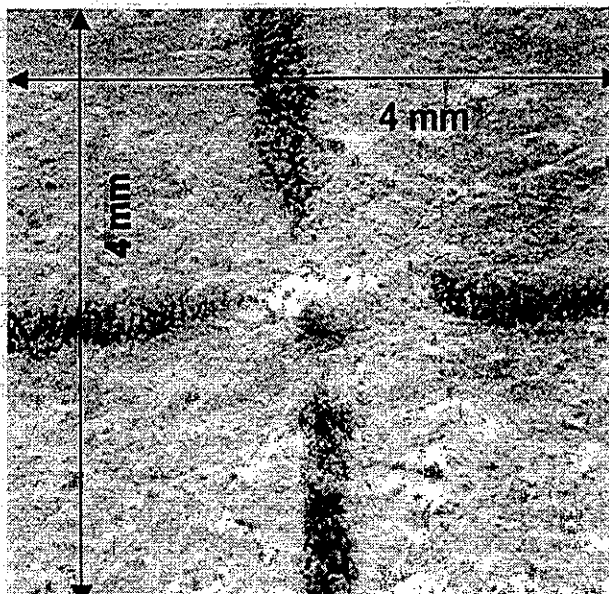


Abbildung 3.1-11: Mittelpunkt der Kamera (Schräglicht-Modus; NKP2)

Vom Sensorkopf wird ein Oberflächenbild aufgenommen, das den Abmessungen von 4x4 mm auf der Paperoberfläche entspricht. Dies geschieht durch eine exakt im Mittelpunkt des Messkopfes angebrachte Kamera.

Weiterhin ist es möglich, mit dem Sensorkopf ein Durchlichtbild zu erzeugen. Dazu wird das Schräglicht ausgeschaltet und die Durchlicht-Funktion mittels eines Lichttisches realisiert. Dabei lassen sich Rückschlüsse auf die Formation des Materials ziehen.

Die jeweiligen Bilder werden in der Rechner-Auswerteeinheit in 512 x 512 Pixel (7,8x7,8µm) geteilt und mittels 256 Graustufen ausgewertet. Dabei regelt die Kamera die Bildhelligkeit automatisch und bestimmt den mittleren Grauwert.

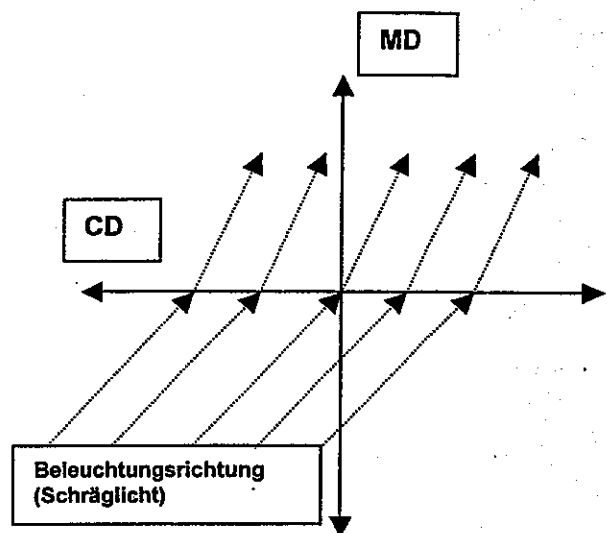


Abbildung 3.1-12: Beleuchtungsprinzip Schräglicht

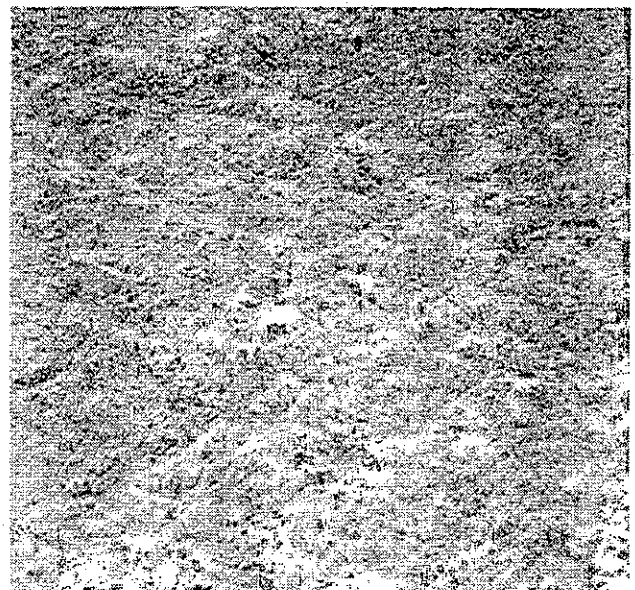


Abbildung 3.1-13: Schräglicht-Aufnahme (NKP2)

Die Kommunikation findet über die Softwareversion TRACEIT® für MS-Windows statt. Dabei stehen folgende Messmodi zur Verfügung:

1. *Normal* Bestimmung optischer Kennwerte
2. *Partikel* Bestimmung der Grauwertverteilung und der grenzwertabhängigen Flächenbelegung
3. *Referenz* Vergleich mit gespeicherten Mustern aus Modus *Normal*
4. *Vergleich* Mustervergleich über optische Kennwerte
5. *Abgleich* Überprüfung des Systems auf die werkseitig eingestellte Software passwortgeschützt

Für die Kennzeichnung der Oberflächeneigenschaften ist der Normal-Modus am wichtigsten. Dabei werden folgende Eigenschaften erfasst:

- *Ra opt* arithmetischer Mittelwert der absoluten Werte innerhalb der Gesamtbezugsstrecke
- *Rz opt* arithmetisches Mittel aus je 5 höchsten und tiefsten Einzelrauhwerten
- *Rq opt* quadratischer Mittelwert innerhalb der Bezugsstrecke
- *L opt* Länge, die sich ergeben würde, wenn das innerhalb der Bezugsstrecke liegende Profil zu einer geraden Linie gestreckt würde.
- *Kon* Kontrastwert bezogen auf die Gesamtbezugsstrecke
- *Mean* Mittlerer Intensitätswert bezogen auf die Gesamtbezugsstrecke

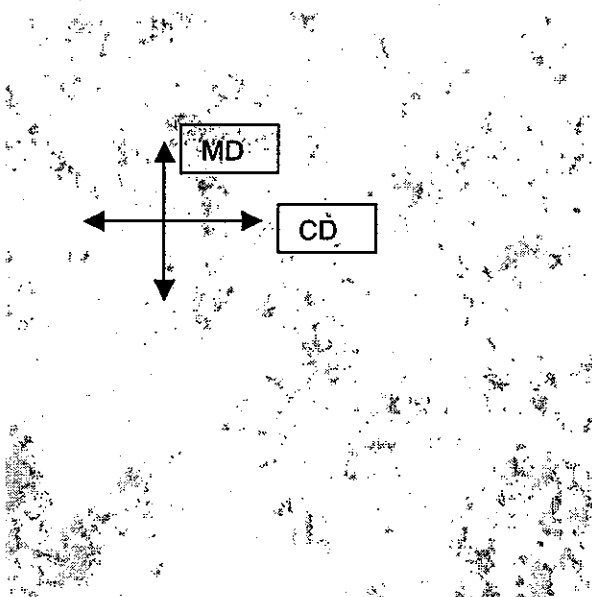


Abbildung 3.1-14: Durchlicht-Aufnahme (diffuse Beleuchtung; NKP2)

Wahlweise werden die Messwerte für einen Linienschnitt über die Bildmitte oder für den Flächenschnitt visualisiert.

Gray Values (along Line 256)

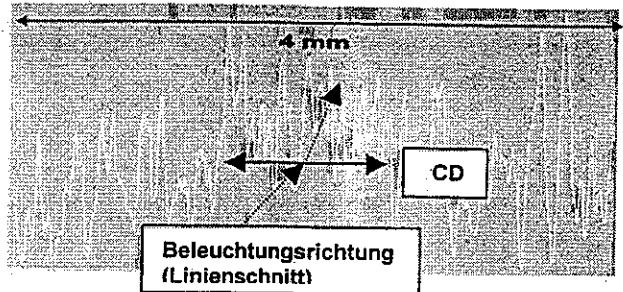


Abbildung 3.1-15: Grauwerte entlang der Mittellinie der Messfläche (Linienschnitt-Modus; NKP2)

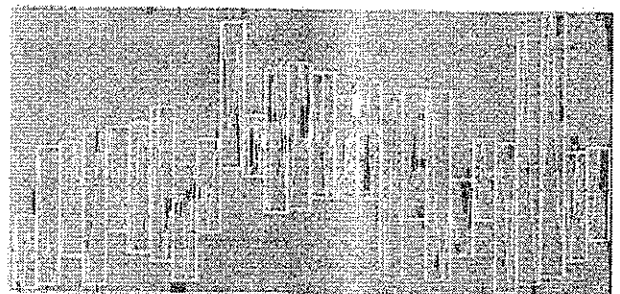


Abbildung 3.1-16: Grauwerte entlang der Mittellinie der Messfläche (Flächenschnitt-Modus; NKP2)

Zur Messung wird der Sensorkopf auf die Papieroberfläche gesetzt und die vorgewählte Anzahl Prüfungen durchgeführt. Dabei lässt sich von jeder Messung ein Oberflächen- oder Durchlicht-Bild im TIF-Format anfertigen und mit Bildverarbeitungsprogrammen weiterverarbeiten.

Bei der Arbeit ist auf die Messrichtung zu achten. Am Sensorkopf befindet sich eine Markierung („Orientierungshilfe“). Diese entspricht der Beleuchtungs- und auch der Messrichtung für den Flächenschnitt. Nach Absolvierung der vorgewählten Messanzahl werden im Menü die Mittelwerte der o.a. Parameter für die abgeschlossene Messreihe angegeben.

Die Messdatei sollte nun gespeichert werden. Die Einzeldaten sind in einer Datei im ASCII-Format verfügbar, welche jedoch angelegt werden muss. Dann lassen sich die Einzelwerte in ein Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. MS-Excel) einlesen und statistisch weiterverarbeiten.

Zu beachten ist, dass die Kalibrierung des Gerätes mit gerillten, weißen Keramikplatten erfolgt. Der Hersteller garantiert nicht für die exakte Größe der ausgegebenen Werte in μm . Wörtlich heißt es dazu in [6]:

Die von TRACEiT ermittelten optischen Kennwerte korrelieren mit den Rauigkeitskennzahlen der traditionellen Profilometer. Wegen des benutzten Messverfahrens, dem der Schattenwert an der strukturierten Oberfläche zugrunde liegt und nicht wie beim Profilometer eine Höheninformation, ist die Angabe in μm nicht möglich.

Im Messmodus *Partikel* werden statistische Kennwerte bezogen auf die Intensitätsverteilung aller Messpunkte, sowie der prozentuale Flächenanteil der unterhalb eines einstellbaren Grenzwertes liegenden Messpunkte berechnet. Ausgehend von einer Momentaufnahme der Materialoberfläche durch den Sensorkopf werden folgende Messwerte bestimmt:

- Mean mittlere Intensität der Messpunkte
- Varianz Varianz der Intensität über alle Messpunkte
- Std.Dev. Standardabweichung der Intensität
- Area prozentualer Flächenanteil alle Messpunkte

Ergänzend wird je Messung die Intensitätsverteilung der Grauwerte sowie ihre Klasseneinteilung in 30 Gruppen mit Angabe des prozentualen Flächenanteils visualisiert.

3.1.7 Glätte als Kontaktanteil KAM nach FOGRA

Die Glätte als Kontaktanteil nach FOGRA gibt den Anteil der Probenoberfläche in Prozent an, der unter festgelegten Anpressbedingungen mit einer vollkommen ebenen Fläche in optischem Kontakt steht. Es wird dafür das optisch-mechanisch arbeitende Kontaktanteilmessgerät der FOGRA eingesetzt. Nach Zellcheming-Merkblatt V/25/74 /7/ kann für die Kontaktanteilmessung ein Anpressdruck von 10, 25 oder 50 kp/cm^2 angewendet werden – in Anlehnung an die in Druckmaschinen auftretenden Drücke.

Die Glätte als Kontaktanteil nach FOGRA gibt für eine ellipsenförmige Messfläche mit den Durchmessern 32 und 20 mm den Anteil der Papieroberfläche in % an, der mit einer polierten Glasoberfläche – als angenäherte Darstellung einer vollkommen ebenen Fläche – in optischem Kontakt steht, nach dem auf die Probe bereits 10 Sekunden lang der Anpressdruck von vorzugsweise 25 kp/cm^2 (2,45 MPa) – oder auch 50 kp/cm^2 (4,9 MPa) bzw. 10 kp/cm^2 (0,98 MPa) eingewirkt hat – vgl. Abbildung 3.1-16 /7/. Der Anpressdruck ist mit einer Drucksteigerungsgeschwindigkeit von 0,98 MPa/s ($10 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) über eine glatte Acrylglasplatte von 33,8 mm Durchmesser aufzubringen.

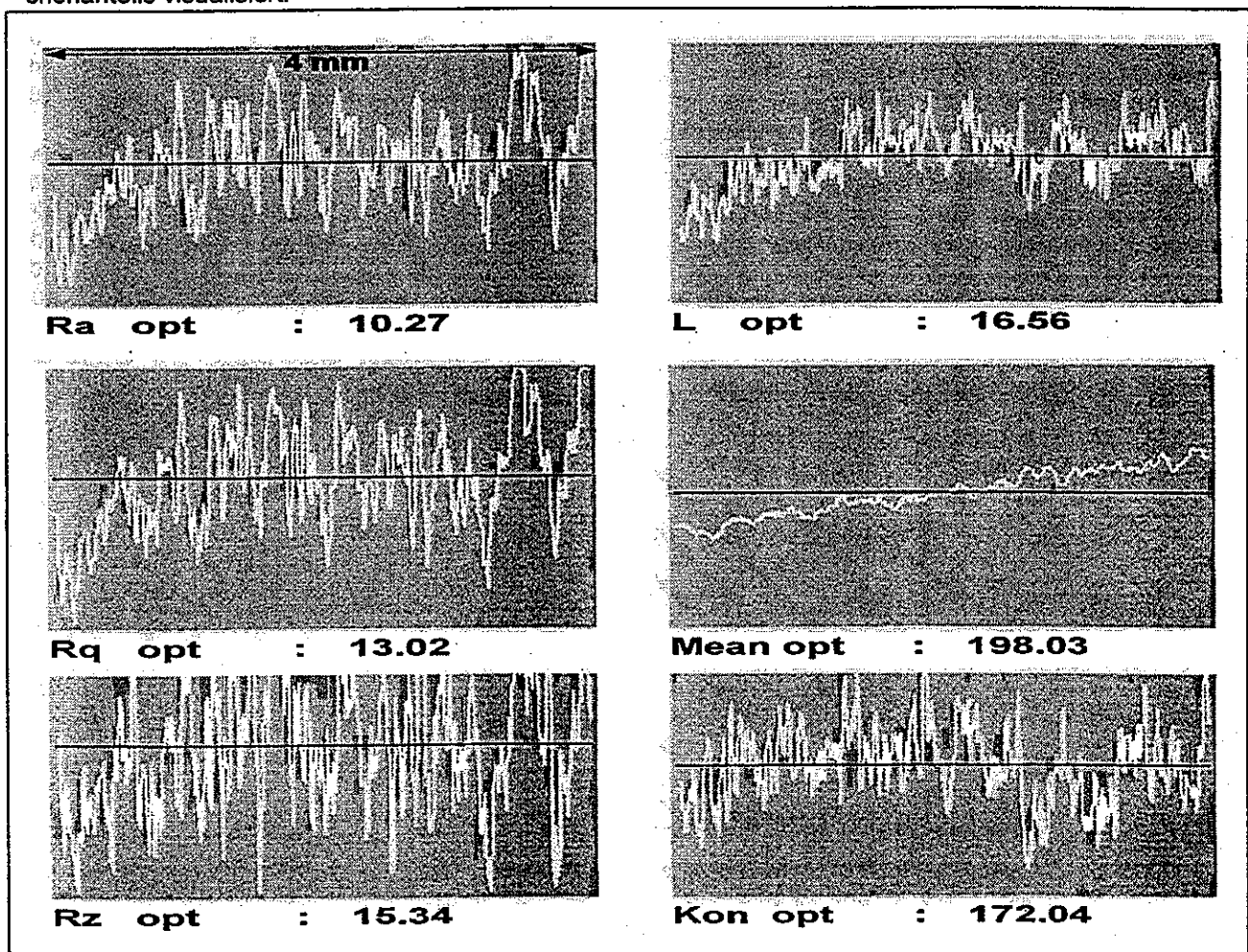


Abbildung 3.1-16: Optische Kennwerte (Linienschnitt-Modus; NKP2; Zahlenwerte in μm)

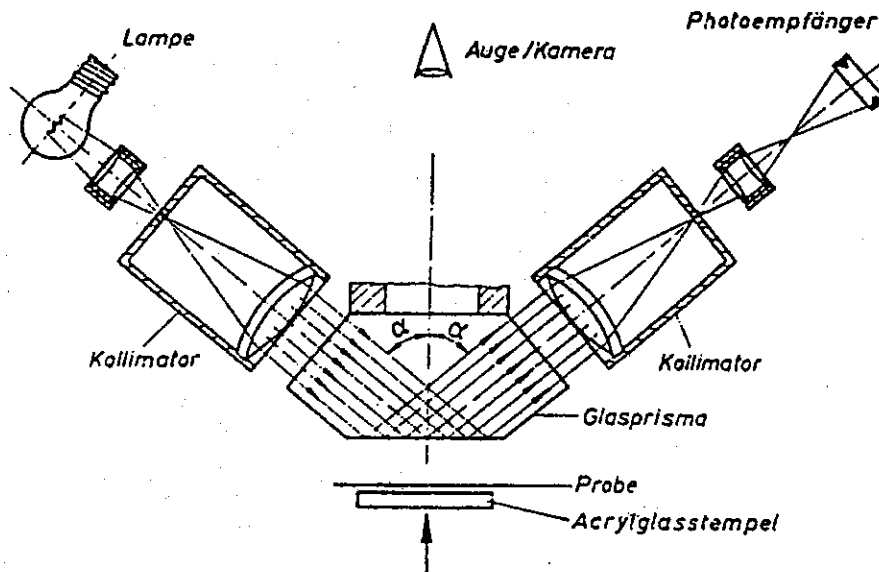


Abbildung 3.1-16: Messprinzip des FOGRA-Kontaktanteilmessgerätes: Schema der Messanordnung [7]

Die Größe, Form und Verteilung sowie die Tiefe der einzelnen Nichtkontaktstellen werden durch die Kontaktanteil-Maßzahl nicht charakterisiert. Kontaktstellen sind alle Teile der Papieroberfläche, deren Abstand von der polierten Glasoberfläche in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Glühlampenlichtes liegt oder geringer ist. Die Nichtkontaktstellen bestimmen das Messergebnis also unabhängig von ihrer Tiefe und proportional mit ihrer Fläche, während die Maßzahlen der Luftstrommessgeräte nach Bekk und besonders nach Bendtsen stärker von den großflächigen und tiefen Oberflächenporen als von den kleinen beeinflusst werden. (Durch Variation der Wellenlänge des verwendeten Lichtes kann man den Mindestabstand von Nichtkontaktstellen in einem weiteren Bereich variieren.) Demgegenüber geht die Verformbarkeit des Papiers – und besonders seiner Oberflächenschicht – stärker in die Kontaktanteil-Maßzahl als in die unter

geringerem Druck gemessenen Glättezahlen nach Bekk und Bendtsen ein.

Wie Abbildung 3.1-19 zeigt, wird die Bodenfläche eines Glasprismas mit annähernd parallelen Lichtstrahlen unter einem Winkel α beleuchtet, der größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion (41° [7]) für die Grenzfläche Glas/Luft ist. Steht die Probe an keiner Stelle mit der polierten Bodenfläche des Prismas in optischem Kontakt, so gelangt der Lichtstrom fast ungeschwächt zu dem Photoempfänger – die Kontaktanteil-Maßzahl ist 0 %.

An den Kontaktstellen wird die Totalreflexion aufgehoben, an diesen Stellen wird das Licht remittiert – soweit es nicht von der Probe absorbiert wird. Wegen des geringen Öffnungswinkels der Empfängeroptik soll weniger als 1% des auf die Kontaktstelle auftreffenden Lichtstromes zum Photoempfänger gelangen, so dass das Messergebnis weitgehend unabhängig von Glanz und Farbart der Probe ist.

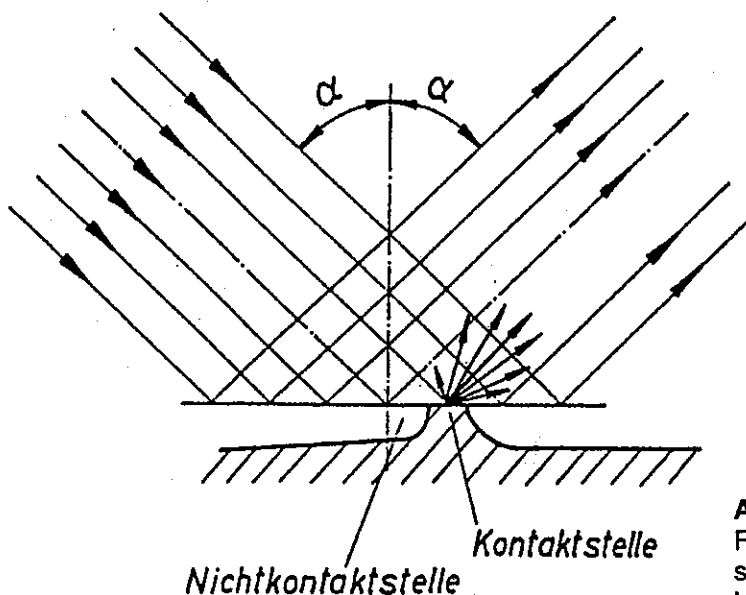


Abbildung 3.1-16: Messprinzip des FOGRA-Kontaktanteilmessgerätes: Gestörte Totalreflexion an einer Kontaktstelle [7]

Die Messanordnung besteht aus der optischen Baugruppe mit Prisma, Beleuchtungseinrichtung und Photoempfänger, der mechanischen Baugruppe zur Aufbringung des gewünschten Anpressdruckes und der elektronischen Baugruppe zur Gerätesteuerung und zur Gewinnung der Kontaktanteil-Maßzahl. Das Messprinzip des FOGRA-Kontaktanteilmessgerätes ist in Abbildung 3.1-19, Abbildung 3.1-20 und Abbildung 3.1-21 dargestellt.

Das Glasprisma (Abbildung 3.1-16) soll eine rechteckige Bodenfläche von 40 mm × 50 mm haben. Das Glas hat einen Brechungsindex $> 1,5$.

Mit Glühlampenlicht wird so beleuchtet, dass in das Prisma ein Strahlenbündel mit 20 mm Durchmesser unter einem Winkel von 51° gegen die Normale auf die Bodenfläche einfällt. Bei diesem Winkel kommt es zur Totalreflexion des Lichtes. Dabei wird auf der Bodenfläche eine ellipsenförmige Teilfläche mit den Durchmessern $32 \pm 0,5$ mm und $20 \pm 0,5$ mm ausgeleuchtet. Der ausgeleuchtete Teil der Bodenfläche wird bei der Messung von der Probe bedeckt. Die Anpressfläche ist also größer als die Messfläche und wird durch die Acrylglasplatte mit einem Durchmesser von 33,8 cm bestimmt.

Die Kontaktanteil-Maßzahl ist um so größer, je höher die Glätte der geprüften Oberfläche ist. Die Aufnahmetechnik der Mikro-Kontaktanteil-Bilder ist in Abbildung 3.1-20 beschrieben:

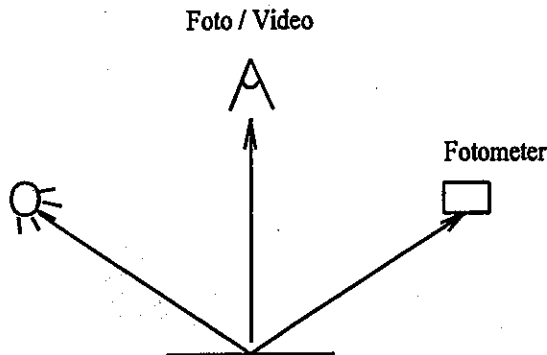


Abbildung 3.1-20: Aufnahmetechnik für KAM-Bilder

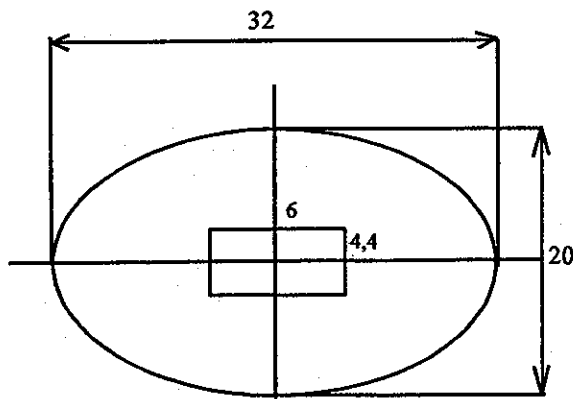


Abbildung 3.1-21: Messfläche des Fotometer
(Alle Abmessungen sind in mm angegeben)

- Messfläche nach FOGRA (Fotometer):
Ellipse 32 mm × 20 mm
- Aufgenommene Papieroberfläche mit Videokamera (JVC Farbkamera)
CCD-Sensor $\frac{1}{4}$ Zoll × $\frac{1}{4}$ Zoll = 8,5 mm × 6,4 mm
- Digitale Konvertierung (Screen Maschine)
640 × 512 pixel, 8-bit Graustufen (256 Grauwerte)
Bildgröße = 5,9 mm × 4,4 mm
Auflösung = 9 μ m/pixel

3.1.8 Glanz-Messverfahren

Die Glanzbeurteilung ebener Papier- und Pappeoberflächen ist mit Hilfe von Reflektometerwerten zu bestimmen. Der Glanz wurde primär als Sinnesempfindung definiert. Die Sinnesempfindung Glanz entsteht durch einen physikalischen Reiz, der dadurch gekennzeichnet ist, dass bei geeigneter Beleuchtung einer Oberfläche diese ein mit dem Abstrahlungswinkel variierendes Reflexionsverhalten aufweist, welches durch eine Indikatrix beschrieben wird. Deren Maximum wird im allgemeinen durch den gerichteten Anteil der Reflexion vorgegeben, welcher für den visuellen Glanzeindruck bestimmend ist. Dieses Maximum liegt bei einem Abstrahlungswinkel, der etwa gleich dem Einstrahlungswinkel ist. Durch Erfassen dieses Indikatrixbereiches wird der Reflektometerwert erhalten /8/.

Tatsächlich reflektieren alle Oberflächen von allen Testkörpern mit einer Rauigkeit kleiner als die halbe Wellenlänge des sichtbaren Lichtes dieses. Der Glanzwert einer Papieroberfläche muss also proportional mit dem Oberflächenanteil wachsen, dessen Ra-Wert $\leq 0,2 \mu$ m ist. In Analogie zum Kontaktflächenanteil wird so also berührungsfrei der Glanzflächenanteil bestimmt. Glanzwert und Glanzflächenanteil kennzeichnen als Summenparameter die glänzende Mikrostereometrie der Papieroberfläche. In einfacher Weise kann man zusätzlich die Sub-Mikrostereometrie als Glanz-Formation ermitteln und analysieren. Durch gerichtete Bestrahlung mit definierten Wellenlängenbereichen - auch ober- und unterhalb des sichtbaren Bereiches - kann der Glanzflächenanteil und seine Formation in Mikrorauheits-Klassen eingeteilt werden.

Gemessen wird das von der Papieroberfläche zurückgestrahlte Licht. Ganz allgemein kann man zwei Grenzfälle unterscheiden (Abbildung 3.1-22). Die ideal matt erscheinende Fläche, die auf sie auftreffendes Licht nach allen Seiten diffus zerstreut, wie es die gleich langen Leuchtdichtevektoren andeuten und die ideal spiegelnde Fläche, die ein auf sie auftreffendes Parallelstrahlbündel nach dem Reflexionsgesetz als ebensolches Parallelstrahlbündel reflektiert. Papier nimmt eine Zwischenstellung irgendwo zwischen diesen beiden

Extremen ein, es reflektiert gleichzeitig diffus und spiegelnd, erkennbar an der mehr oder weniger ausgeprägten sogenannten "Spiegelspitze".

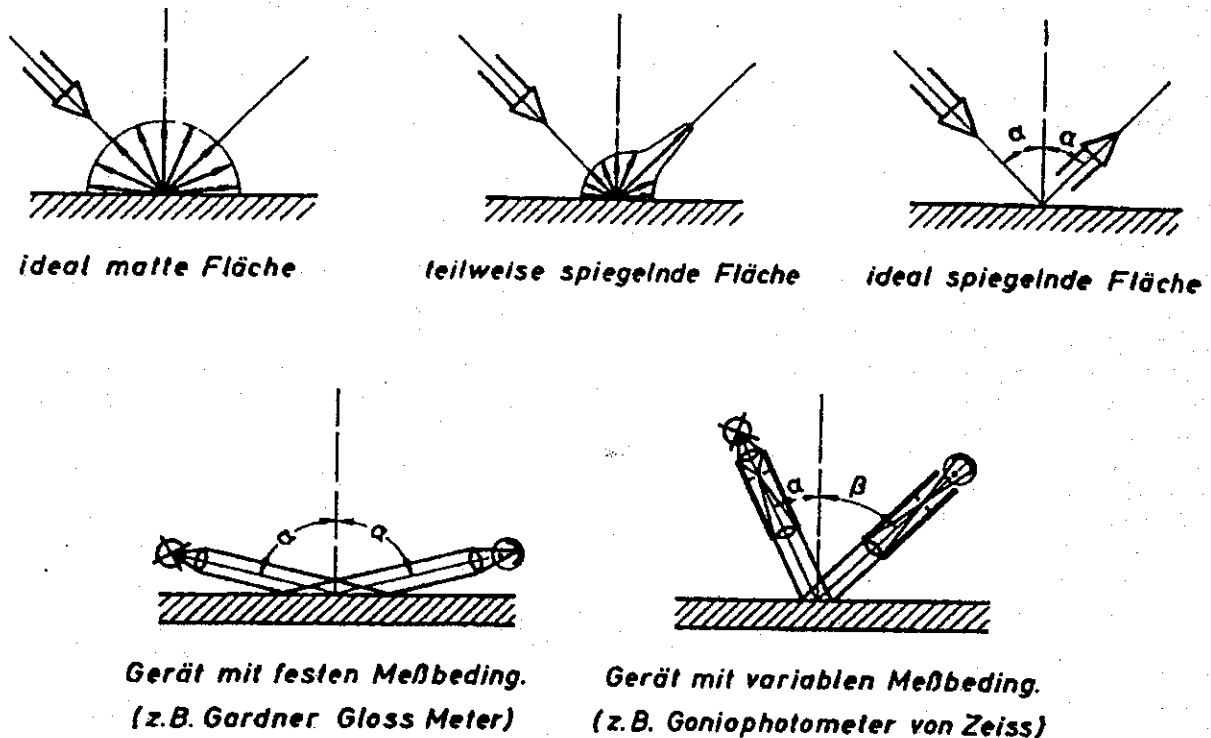


Abbildung 3.1-22: Glanz-Messgeräte /9/

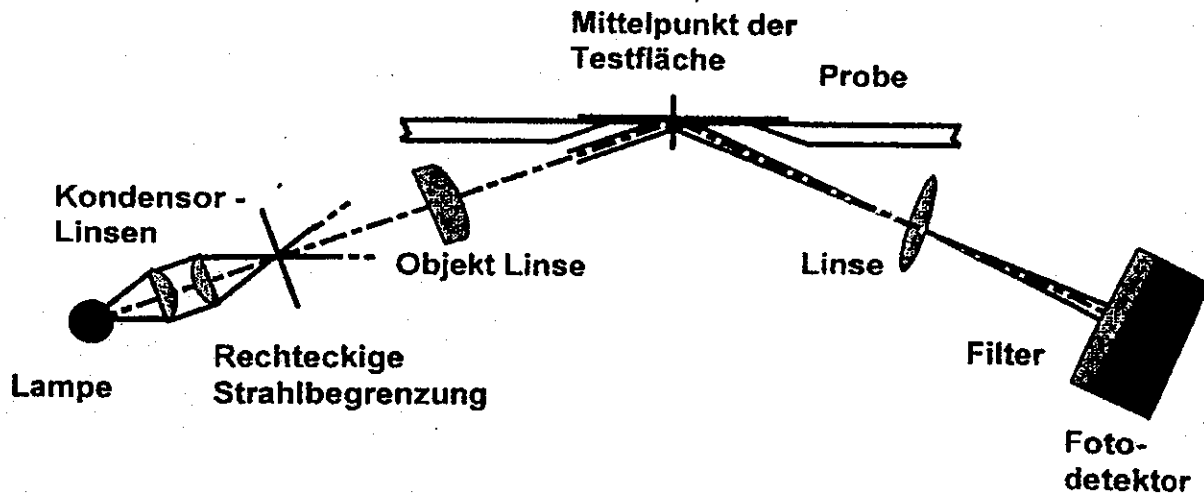


Abbildung 3.1-23: Schematische Darstellung der Glanzmessung nach TAPPI 480 /10/

Heute ist in vielen Normen festgelegt, was wir unter Glanz (als indirekte berührungslos Messverfahren) verstehen wollen bzw. wie er zu messen ist. Zwei der heute gebräuchlichsten Normen sind die TAPPI-Norm 480 om-92 "Specular gloss of paper and paperboard at 75 degrees" (zuletzt überarbeitet im Jahre 1992) und die DIN-Norm 54502 "Prüfung von Papier und Pappe. Glanzbeurteilung ebener Papier- und Pappeoberflächen mit Hilfe von Reflektometerwerten" (herausgegeben im März 1992) /8/ erfüllt, dargestellt. Das Prüfverfahren des Zellcheming-Merkblattes V/22/72 dient zur Beurteilung des Glanzes weißer

und farbiger (bunter und unbunter) Papiere, Kartons und Pappe /11/. In Abbildung 3.1-23 ist der schematische Aufbau eines Glanzmessgerätes, das die TAPPI-Norm erfüllt, dargestellt.

In der DIN-Vorschrift ist die Messung des Glanzes mit zwei verschiedenen Winkelgeometrien vorgesehen. Eine Anordnung nutzt die 75° Geometrie (identisch zur Anordnung nach TAPPI) aus, während die andere Geometrie 45° beträgt. In einer Arbeit /12/ ist eine Beziehung angegeben, die es ermöglicht, die Empfindlichkeit der Glanzmessung beider Geometrie zu berechnen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.1-25 dargestellt /10/.

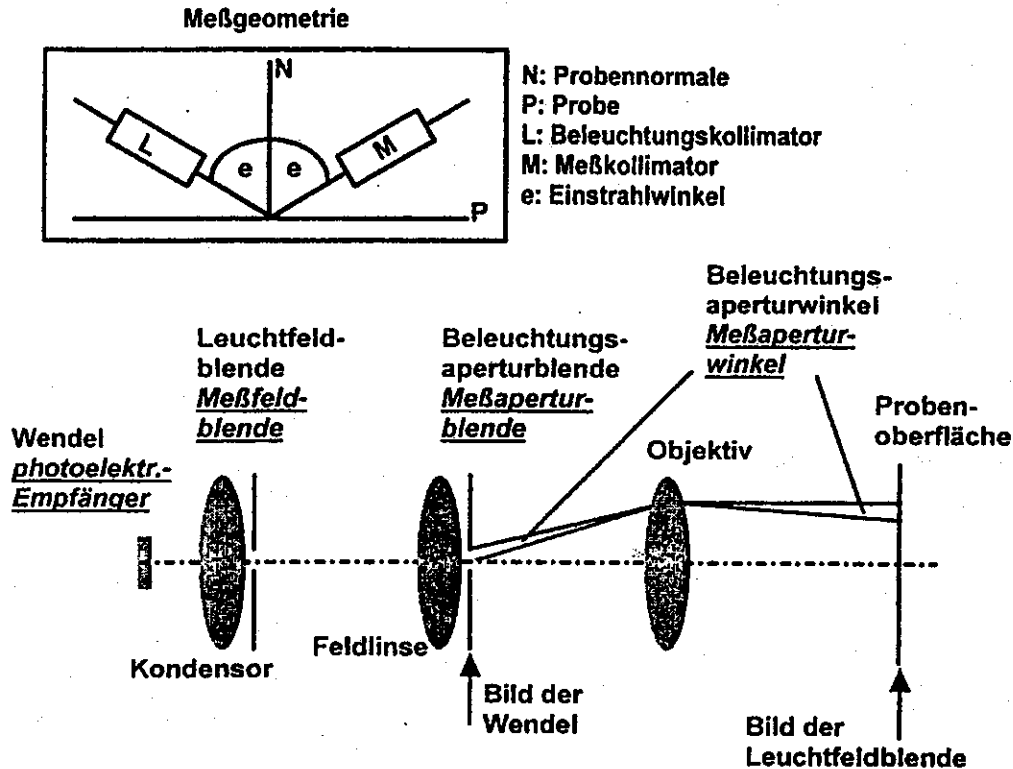


Abbildung 3.1-24: Schematische Darstellung der Glanzmessung nach DIN 54 502 /8/

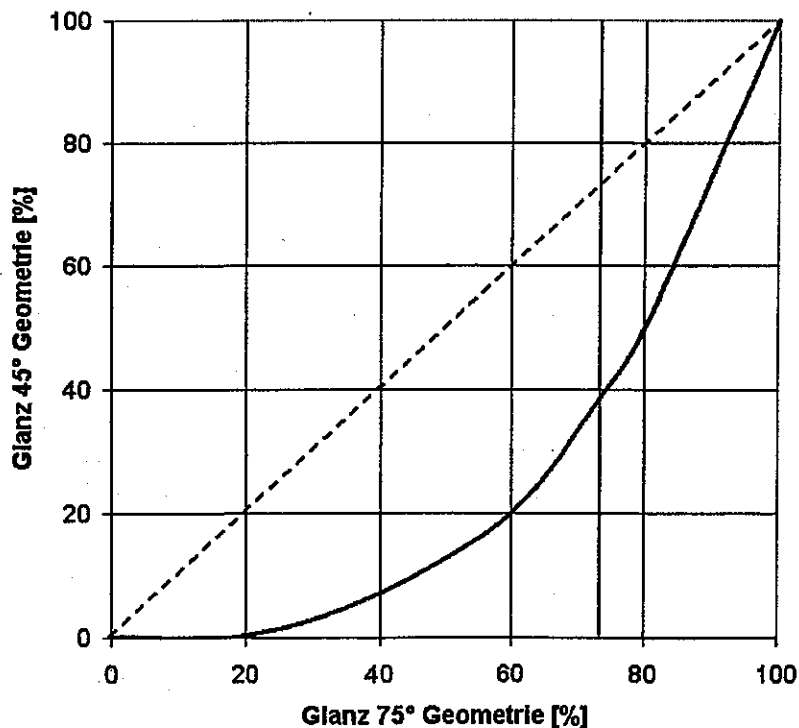


Abbildung 3.1-25: Vergleich der Glanzgeometrien /10/

Man kann diesem Diagramm entnehmen, dass die 75° Geometrie den Vorzug im niedrigen Glanzbereich hat. Bei ca. 73 Glanzpunkten sind beide Geometrien gleichwertig. Für höheren Glanz ist vorzugsweise die 45° Geometrie zu verwenden /10/.

Der Glanz nach Lehmann wird nach den genormten Reflektometer-Messverfahren: DIN (45° und 75° Einstrahlwinkel), TAPPI (75°) gemessen. Das Reflektometer besteht aus folgenden hauptsächlichen Bauteilen: Beleuchtungskollimator, photoelektronische Empfängereinheit des Meßsystems, Probenhalterung. Abbildung 3.1-24 stellt

eine schematische Anordnung des optischen Systems dar (Schnittbild), wobei die Schnittebene parallel zur optischen Einstrahlungsebene liegt. Diese Ebene enthält die optischen Achsen des Beleuchtungs- und Messstrahlenganges und somit den Einstrahlungswinkel ϵ_1 den Abstrahlungswinkel ϵ_2 und die Probennormale N.

Der Beleuchtungskollimator L (Abbildung 3.1-24) erzeugt ein nahezu paralleles Lichtbündel, das unter einem mittleren Winkel ϵ_1 , auf die Probe fällt. Die Leuchtfeldblende ist kreisrund und wird durch Feldlinse und Objektiv scharf auf die Probenoberfläche abgebildet. Aufgrund des im Winkel $\epsilon_1 > 0^\circ$ zur Probennormale stehenden Beleuchtungskollimators entsteht statt eines kreisrunden ein elliptisches Leuchtfeld.

Messfläche für die Glanzmessung:

- Messkopf 45° DIN: Ellipse mit Durchmessern 10 mm und 7 mm (55 mm²)
- Messkopf 75° DIN: Ellipse mit Durchmessern 26 mm und 7 mm (143 mm²)
- Messkopf 75° TAPPI: unregelmäßig, etwa 18 mm × 7 mm (110 mm²)

Vergleich KAM nach FOGRA: Ellipse mit Durchmessern 32 mm und 20 mm (502 mm²)

Die leuchtende Fläche der Lampe, z.B. Wendel einer Glühlampe, wird vom Kondensator in die Ebene der Beleuchtungsaperturblende vergrößert abgebildet. Deren Querschnitt ist rechteckig, wobei die Kanten parallel und senkrecht zur Einstrahlungsebene stehen. Die Querschnittsfläche liegt in der Brennebene des Objektivs austretende nahezu parallele Lichtbündel; dessen Öffnungswinkel wird durch die Kantenlängen der Beleuchtungsaperturblende bestimmt.

Mit steigendem Einstrahlungswinkel wächst der Anteil der gerichteten Reflexion. Bei sehr matten Oberflächen bildet sich ein merklicher Anteil gerichteter Reflexion und damit ein Ganzeffekt erst oberhalb eines gewissen Mindesteinstrahlungswinkels aus. Andererseits führt bei stärker glänzenden Oberflächen ein großer Einstrahlungswinkel zu einer Verringerung der Unterscheidbarkeit. Es ist daher zweckmäßig, matte Proben bei Einstrahlungswinkel 75,0° und glänzende Probe bei 45,0° zu messen.

Je zu messender Seite eines Probeblattes sind 6 Einzelmessungen durchzuführen, bei 3 Messungen verläuft die Einstrahlungsebene parallel zur Papiermaschinenlaufrichtung, bei den 3 anderen Werten verläuft sie senkrecht dazu.

Ein weiterer Aspekt zur gesamten Betrachtung der Oberflächeneigenschaften ist die Gegenüberstellung der relativen Zweiseitigkeit bei Glanz nach Lehmann und Glätte als Kontaktanteil nach FOGRA:

$$RZW = \frac{|OS - US|}{OS + US} \cdot 100\%$$

Mit:

rel. Zweiseitigkeit (RZW) [%]

OS Oberseite

US Unterseite

3.1.9 Glätte nach K.L.

Die Bestimmung der Oberflächenstruktur bei Papier mit dem K.L.-Glättemessgerät gehört auch zu den Reflektionsverfahren. Ein paralleles Lichtbündel, das unter einem bestimmten Winkel auf eine nicht perfekt glatte Oberfläche fällt, wird im Richtung der Spiegelreflektion in einen Streukegel aufgefächert.

Der Durchmesser des Streulichtkegels in der Ebene senkrecht zur Oberfläche des Messobjektes hängt von deren Rauigkeit ab und ist ein genaues Maß für diese Rauigkeit, solange sie durch statistisch verteilte Oberflächenunregelmäßigkeiten hervorgerufen wird.

Bei Papier sind diese Voraussetzungen erfüllt. Wie dies aussieht, ist in Abbildung 3.1-26 gezeigt /9/.

Abbildung 3.1-27 zeigt schematisch den Aufbau des Messkopfes im Detail.

Die Spaltblende Sp wird durch eine Lumineszenzdiode homogen ausgeleuchtet. Mit Hilfe der Linse L1 wird die Spaltblende Sp ins Unendliche abgebildet, so das sich ein paralleles Lichtbündel ergibt. Dieses Lichtbündel fällt über den Spiegel S1 unter hohem Einfallswinkel auf die Probe. Das durch Streuung an der Probenoberfläche aufgefächerte Lichtbündel wird nach Umlenkung über den Spiegel S2 durch das auf unendlich eingestellte Objektiv einer Linearkamera erfasst. In der Bildebene der Linearkamera befindet sich lineares Diodenarray.

Zwischen K.L.-Glätte und Glätte nach Bekk wurde experimentell eine Beziehung in Form von $KL[\%] = \text{Konst} \cdot (\text{Bekk [s]})^{1/3}$ /9/. Mit der Auswertung der Glätte Bekk in μm ergibt sich dann $KL[\%] = \text{Konst} \cdot 1/(\text{Bekk } [\mu\text{m}])$.

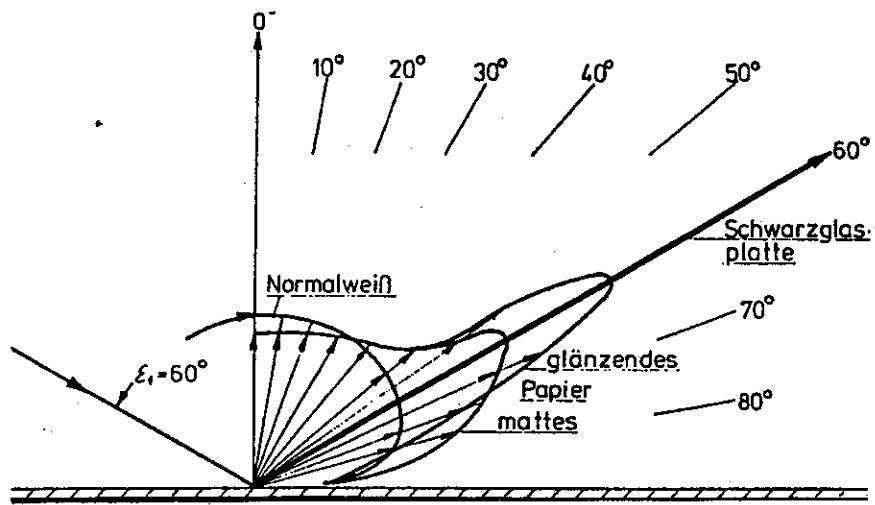


Abbildung 3.1-26: "Glanzkurven" in Polarkoordinatendarstellung /9/

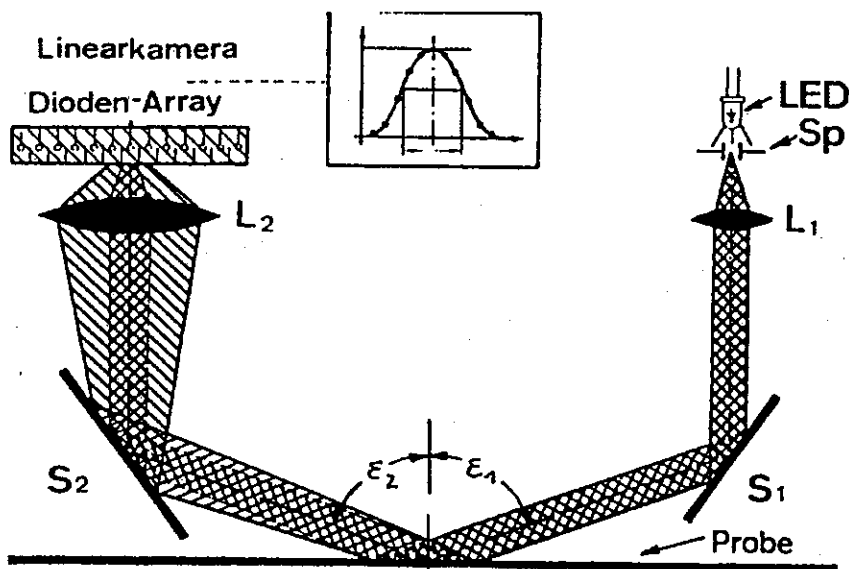


Abbildung 3.1-27: Strahlengang und schematischer Aufbau des K.L.-Gerätes /9/

3.2 Einführung standardisierter Rauheits-Kenngrößen

3.2.1 Standardisierte Rauheits-Kenngrößen

Die Glätte oder Rauigkeit von Papier, Karton und Pappe ist eine Eigenschaft, welche in starkem Maße die Bedruckbarkeit, aber auch die Verarbeitbarkeit und Verwendungsfähigkeit der Papierprodukte mitbestimmt. Vollständig ließe sich die Oberflächengestalt nur durch ein System von Kennzahlen beschreiben. Die Praxis ist aber, dass die Mikrogeometrie der Paperoberfläche durch eine einzige Maßzahl gekennzeichnet wird und dafür Unzulänglichkeiten in Kauf genommen werden. Die Glätte Bekk eines Papiers in Sekunden sowie die Rauheit Bendtsen in ml/min sind traditionelle Größen zur Kennzeichnung der Oberflächeneigenschaften. In der Kommunikation mit Unkundigen der Papier-Prüftechnik treten jedoch Verständigungsprobleme auf. Auch der Papertechniker hat keine bildlichen Vorstellungen von der Größe dieser Rauheitswerte seines Papiers. Auch hinsichtlich der Vergleichbarkeit einzelner Messergebnisse treten Probleme auf. Einen Ausweg bietet die konsequente Anwendung von Rauheitsmaßen, wie sie allgemeingültig für eine Vielzahl von Materialien als funktionale Eigenschaften verwendet werden. Nicht zuletzt liefern das Parker-Print-Surf-Gerät sowie optische Verfahren zur Beurteilung der Rauheit bzw. Oberflächengeometrie solche Werte.

Im folgenden sollen nun die einzelnen Rauheitsmessverfahren kurz erläutert, sowie ein Weg vorgestellt werden, wie mit Hilfe des Kanalmodells nach Parker vergleichbare Rauheitskennwerte für die unterschiedlichen Messverfahren (Bendtsen, Bekk) ermittelt werden können.

Zur Charakterisierung einer Werkstückoberfläche wurden verschiedene geometrische Kenngrößen eingeführt und standardisiert (DIN EN ISO 4287: 98 /13/):

- P-Kenngröße: Kenngröße, die aus dem Primärprofil berechnet wird.
- W-Kenngröße: Kenngröße, die aus dem Welligkeitsprofil berechnet wird.

aus dem Primärprofil hergeleitet und entsteht durch Abtrennen der langwelligen Profilanteile mit einem entsprechenden Profilter.

Die o.g. Norm bzw. deren Vorläufer (DIN 4762, 02.89 /14/) enthält Definitionen von Begriffen der Oberflächenrauheit, die in technischen Unterlagen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen angewendet werden. Alle Begriffe, die hier mit Rauheitskenngrößen verbunden sind, beziehen sich auf das Mittelliniensystem, das für die Beschreibung mechanisch strukturierter Oberflächen mit Rillen- oder Riefenstruktur entwickelt wurde.

Für die Beschreibung der Mikrostereometrie der Paperoberfläche im Rahmen dieser Forschungsarbeit sind folgende Kategorien und Größen von Bedeutung:

- **Wirkliche Oberfläche:** Die Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihn umgebenden Medium trennt (Gegenstück zu idealer Oberfläche). *[Das offeneporige Papier kann in diesem Sinne keine definierte wirkliche Oberfläche haben.]*
- **Querprofil:** Ein Profil als Schnittlinie einer senkrecht zur Rillenrichtung *[die Oberfläche des Papiers hat keine definierte Rillenstruktur]* stehenden Ebene mit der wirklichen Oberfläche.
- **Längsprofil:** Ein Profil als Schnittlinie einer parallel zur Rillenrichtung stehenden Ebene mit der wirklichen Oberfläche
- **Bezugsstrecke l:** Die Länge der Bezugslinie, die zum Ermitteln der Oberflächenrauheit kennzeichnenden Unregelmäßigkeiten angewendet wird.
- **Mittelliniensystem:** Das Bezugssystem, das zum Ermitteln der Oberflächenrauheitskenngrößen angewendet wird und bei dem die Mittellinie m als Bezugslinie benutzt wird.

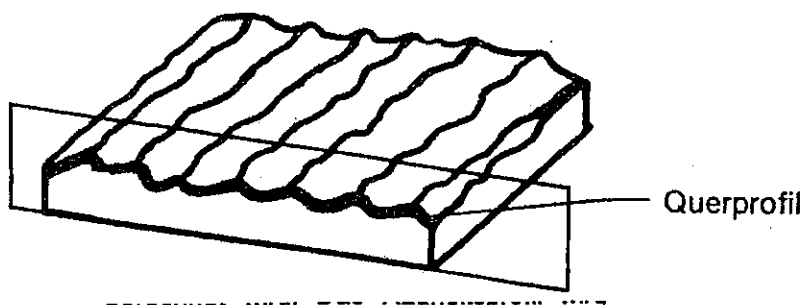


Abbildung 3.2-1: Darstellung Querprofil (DIN 4762, 02.89 /14/)

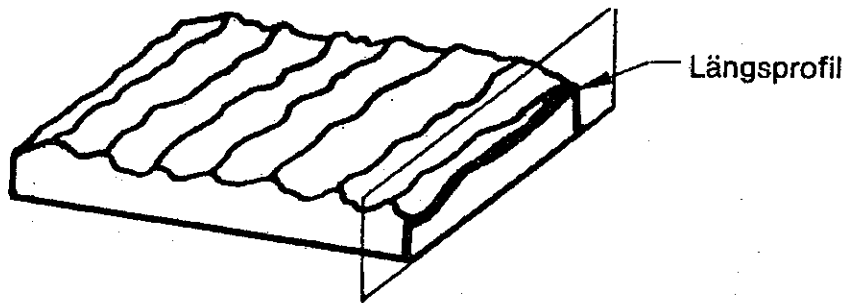


Abbildung 3.2-2: Darstellung Längsprofil (DIN 4762, 02.89 /14/)

- **Oberflächenrauheit:** Sie umfasst Oberflächenunregelmäßigkeiten mit relativ kleinen Abständen, die üblicherweise solche Unregelmäßigkeiten einschließen, die durch das angewendete Fertigungsverfahren und/ oder andere Einflüsse verursacht werden.
- **Profilkuppelhöhe y_p :** Abstand zwischen der Mittellinie und dem höchsten Punkt der Profilkuppe.

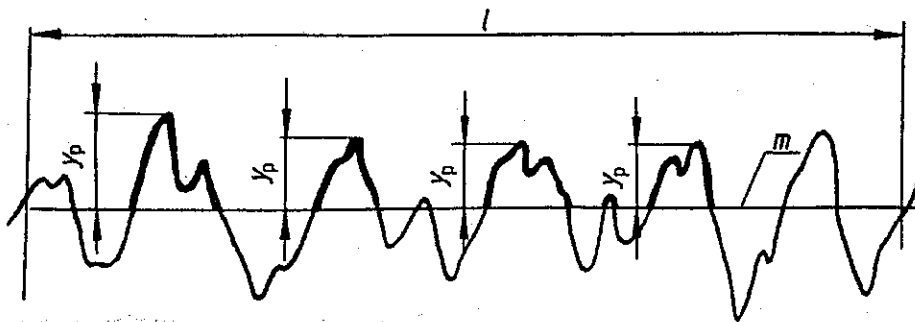


Abbildung 3.2-3: Darstellung y_p (DIN 4762, 02.89 /14/)

- **Profilkuppelhöhe y_v :** Abstand zwischen der Mittellinie und dem tiefsten Punkt des Profiltalles.

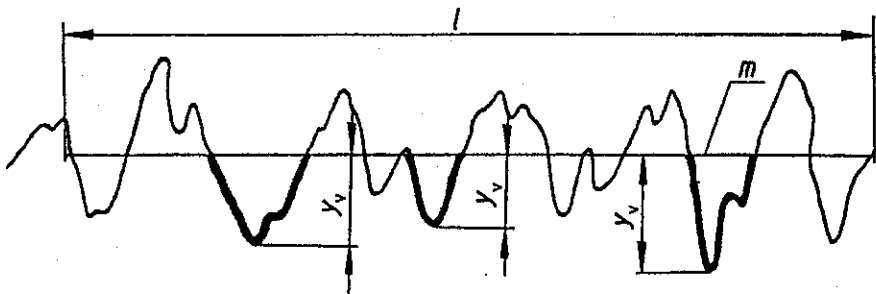


Abbildung 3.2-4: Darstellung y_v (DIN 4762, 02.89 /14/)

- **Zehnpunkthöhe R_z :** Mittelwert der Absolutwerte der Höhen der fünf höchsten Profilkuppen und der Absolutwerte der Tiefen der fünf tiefsten Profiltäler innerhalb der Bezugsstrecke.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}$$

Gleichung 3.2-1

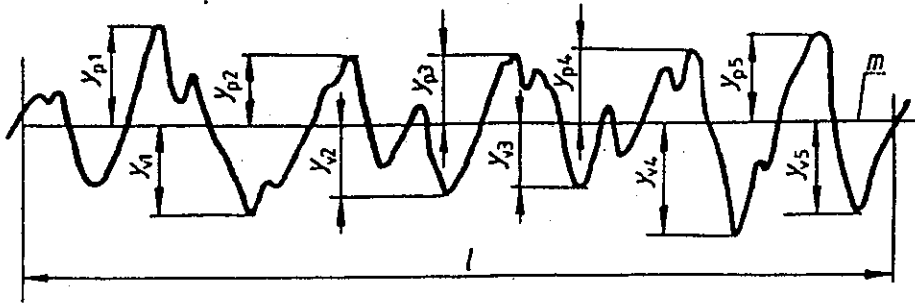


Abbildung 3.2-5: Darstellung R_z (DIN 4762, 02.89 /14/)

- **Arithmetischer Mittenrauhwert R_a :** Der arithmetische Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichungen innerhalb der Bezugsstrecke.

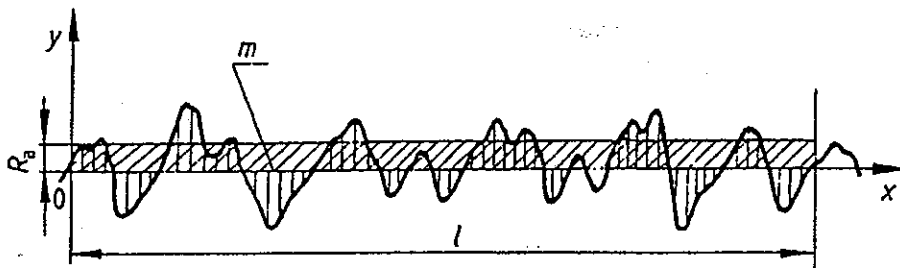


Abbildung 3.2-6: Darstellung R_a (DIN 4762, 02.89 /14/)

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| \cdot dx$$

Gleichung 3.2-2

oder näherungsweise

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Gleichung 3.2-3

Anmerkung 1: Begriffe und Abkürzungen werden in DIN EN ISO 4287 (10.98) /13/ geringfügig abgeändert. So heißt z.B. der arithmetische Mittenrauhwert R_a jetzt arithmetischer Mittelwert der Rauheitsprofilordinaten R_a . Die Berechnungsformel ist gleich geblieben.

Anmerkung 2: Die standardisierten Rauheits-Kenngrößen gelten für das Mittellinien-System und für Oberflächen mit vorwiegend zweidimensionaler Struktur, die bevorzugt durch Werkzeugmaschinen erzeugt werden. Die Papier-Oberfläche ist im allgemeinen komplexer strukturiert und wird nicht auf eine Mittellinie bezogen, sondern in den Luftstrom-Messverfahren – wie Bendtsen, Bekk und Parker – auf eine ebene Referenzfläche, über die – in Abhängigkeit von dem jeweiligen Anpressdruck und seiner Einwirkungszeit – das Oberflächengelände und die gesamte Papierdicke elastisch und plastisch verformt wird. Zwar scheint die mittlere Dicke des freien Querschnitts zwischen der Referenzfläche des jeweiligen Luftstrom-Messverfahrens und der

„Oberfläche“ des Papiers dem R_a -Wert zu ähneln, trotzdem sollen die Unterschiede deutlich gemacht werden. Der Wert D aus Gleichung 3.2-4 gibt die mittlere Schichtdicke eines Druck- oder Streich-Farben-Filmes an, mit dem der freie Querschnitt zwischen der Referenzfläche der „Oberfläche“ des Papiers gerade gefüllt werden kann.

In ähnlichem Sinne wurde in der DIN 4762 Teil 1/08.60 die Glättungstiefe R_p als mittlerer Abstand des Bezugsprofils vom Istprofil definiert, wobei als Bezugsprofil die Profilkuppenhöhe y_p dient (siehe Abbildung 3.2-3).

3.2.2 Rauheit R_a nach Bendtsen (BEN- R_a)

Allgemein üblich ist die Angabe der Rauheit nach Bendtsen in ml/min. Bei Anwendung des Kanalmodells nach Hagen-Poiseuille für das Bendtsen-Verfahren (Gleichung 3.2-4), welches auch Parker /5/ für die Umrechnung beim PPS-Messverfahren verwendete, kann diese in μm umgerechnet werden. Die Annahme einer laminaren Strömung muss durch Abschätzung der Reynoldszahl gerechtfertigt werden:

$$D = 3 \sqrt{\frac{\dot{V} \cdot 12 \eta \cdot l}{b \cdot |\Delta p|}}$$

Gleichung 3.2-4

$\dot{V}$ Volumenstrom
 Δp Druckdifferenz
 l Kanallänge
 b Kanalbreite
 η dyn. Viskosität
 D Kanalhöhe

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\eta}$$

Gleichung 3.2-5

ρ Dichte [kg/m³] = 1,17 kg/m³
 η dyn. Viskosität = 18,1 · 10⁻⁶ Pas
 v mittlere Geschwindigkeit [m/s]
 d_h hydraulischer Durchmesser [m]

Bei den Bendtsen-Messgeräten ist ein maximaler Volumenstrom $\dot{V}$ von 5000 ml/min verfügbar. Dies ergibt nach Gleichung 3.2-4 eine Kanalhöhe von ca. 26 μm . Bei dem Schneidenumfang von 0,1 m bedeutet dies eine mittlere Geschwindigkeit von 32 m/s und einen hydraulischen Durchmesser d_h von 52 μm . D.h.:

$$Re \approx \frac{1,17 \cdot 32 \cdot 52 \cdot 10^{-6}}{18,1 \cdot 10^{-6}} = 107,6$$

Als Kriterium für eine laminare Strömung wird $Re < 2000$ angesehen, die vorliegenden Strömungsverhältnisse sind also in jedem Fall laminar. Für das Bendtsen-Standardverfahren kann der Messwert BEN-RA durch Einsetzen folgender Größen in Gleichung 3.2-4 nun umgerechnet werden:

$b=0,1$ m Breite des Kanals oder Messring-
 umfang
 $l=0,15$ mm Länge des Kanals oder Messring-
 breite
 $\Delta p=1471,5$ Pa Luftdruck (150 mm WS)
 $\eta=18,1 \cdot 10^{-6}$ Pas dyn. Viskosität der Luft
 (23°C; 50% rel. Feuchte)

$$BEN-Ra = 1,545 \cdot \sqrt[3]{BEN-RA} \approx 1,5 \cdot \sqrt[3]{BEN-RA}$$

Gleichung 3.2-6

BEN-Ra Rauheit Bendtsen [μm]

BEN-RA Messwert Rauheit Bendtsen [ml/min]

Nimmt man gemessene Bendtsen-Werte BEN-RA für verschiedene Papiersorten aus der Veröffentlichung Baumgarten, Götsching, Volk (/15/, Anhang A.1.3) und rechnet diese nach Gleichung 3.2-6 um, dann erhält man den Bereich für BEN-Ra dieser Papiere:

Einige ausgewählte Werte-Paare sollen die Beziehung zwischen BEN-RA und BEN-Ra für die Druckdifferenz von 150 mm WS skizzieren:

BEN-RA [ml/min]	BEN-Ra [μm]
2	1,95
10	3,33
100	7,17
300	10,35
1000	15,46
2000	19,48
5000	26,43

BEN-Ra [μm]	BEN-RA [ml/min]
2	2,2
3	7,3
5	33,8
10	270,7
15	913,7
20	2165,9
30	7309,8

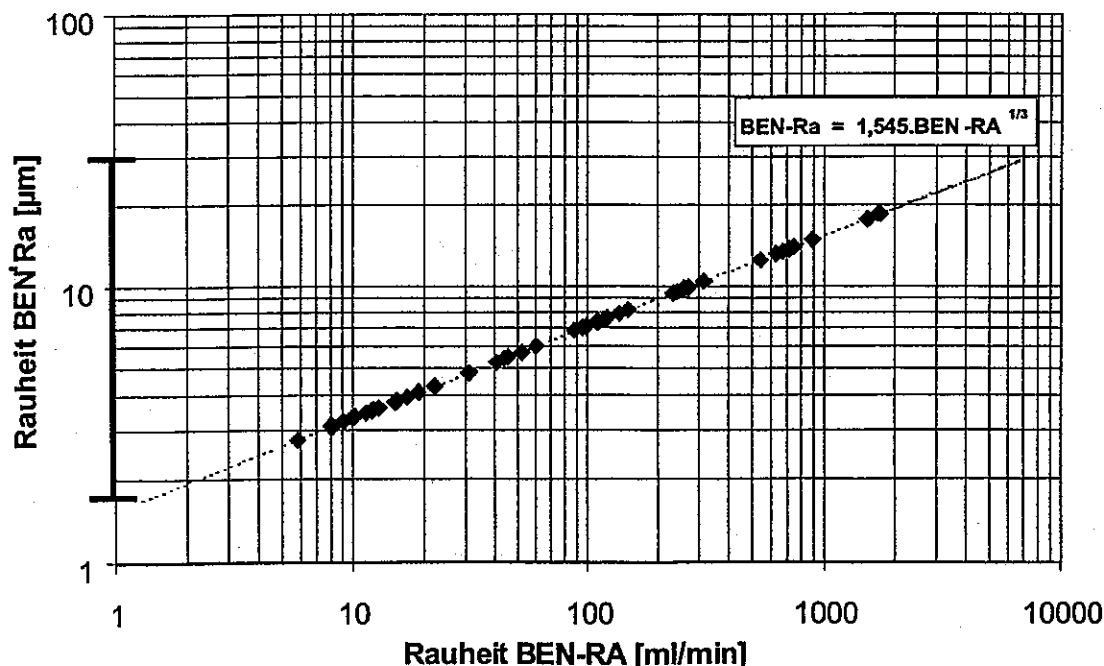


Abbildung 3.2-7:
Umrechnung der
Rauheit BEN

Man erkennt, dass die in dem Bereich der Kommunikationspapiere und insbesondere in dem der Kopier-, Laserdruck-, und Ink-Jet-Druck-Papiere auch extrem raue Papiere (BEN-Ra = 30 µm) mit den üblichen Bendtsen-Messgeräten gut gemessen werden können – insbesondere dann, wenn man auch die Möglichkeit der Halbierung der Druckdifferenz von 150 mm WS auf 75 mm WS nutzt. Andererseits sind gestrichene und satinierte Papiere mit BEN-Ra-Werten ≤ 2 µm auch bei Nutzung der hohen Druckdifferenz von 225 mm WS statt 150 mm WS mit den üblichen Bendtsen-Messgeräten nur unzureichend messbar.

3.2.3 Rauheit Ra nach Bekk (BEK-Ra)

Die Glätte Bekk stellt nach [3] die Zeit dar, die benötigt wird, um eine bestimmte Luftmenge bei definierter Druckdifferenz zwischen einer Papieroberfläche und einer ringförmigen, nahezu vollkommen ebenen Fläche radial nach innen unter festgelegten Kontaktbedingungen hindurchzusaugen. Bei der definierten Luftmenge V_0 von 10 ml je Zeitdauer in Sekunden ist der Volumenstrom der eingesaugten Luft klar bestimmbar.

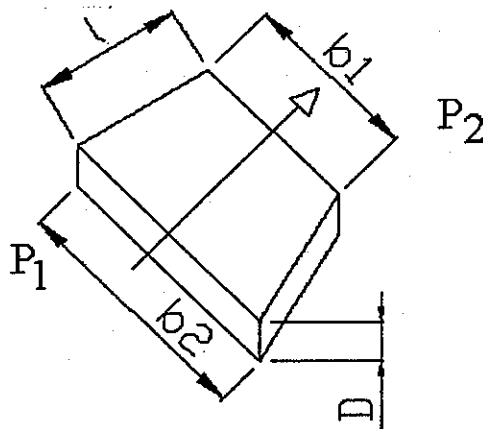


Abbildung 3.2-8: konvergentes Kanalmodell

Auf das Verfahren Glätte Bekk lässt sich ebenfalls ein Kanalmodell zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit in µm anwenden. Bestimmt durch die Geometrie kommt hier ein konvergentes Kanalmodell zur Anwendung. Bedingt durch die angelegte Druckdifferenz ergeben sich eine Verminderung der Dichte der durchströmenden Luft in radialer Richtung. Dazu wird die Formel 3.2-4 alternativ zum Bendtsen-Verfahren in folgender Weise erweitert: Als Kanallänge l wird zunächst die Differenz von Außen- und Innenradius der Messfläche angenommen.

Diese entspricht 13 mm. Als Eingangs-Kanalbreite b_1 kann daher der äußere Messringumfang 117,81 mm eingesetzt werden. Die Ausgangs-Kanalbreite b_2 dient die zentrische Öffnungsumfang der Glasplatte von 36,13 mm. Als Luftdruckdifferenz wirkt der mittlere Unterdruck von 50 kPa.

Die Berechnung des Luftvolumenstroms q_m im konvergenten Kanalmodell ist durch nachfolgende Gleichung möglich.

$$q_m = \frac{1}{12 \cdot \eta \cdot l} \cdot \frac{b_1 - b_2}{\ln \frac{b_1}{b_2}} \cdot \rho_M \cdot (P_1 - P_2) \cdot D^3$$

Gleichung 3.2-7

$$\rho_M = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

Gleichung 3.2-8

Durch Einsetzen und die Umstellung obiger Gleichung nach der Kanaldicke D erhält man folgenden Ausdruck:

$$D^3 = \frac{V_B}{t_B} \cdot \rho_1 \cdot 12 \cdot \eta \cdot l \cdot \frac{\ln \frac{b_1}{b_2}}{b_1 - b_2} \cdot \frac{1}{\rho_M \cdot (P_1 - P_{2M})}$$

Gleichung 3.2-9

Mit

V_B	10 ml (Verfahren A) = $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
t_B	Messwert Bekk [s]
ρ_1	$1,170 \text{ kg/m}^3$ (23°C, 50 % RF)
η	$18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, wobei $\eta_1 \approx \eta_2 = f(T)$ (unabhängig vom Druck von 0,1 bis 10 bar)
l	$13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
b_1	$117,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
b_2	$36,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
ρ_M	$0,6036 \text{ kg/m}^3$ (23°C, 50 % RF)
P_1	101,3 kPa (ortsabhängig)**
P_{2M}	51,95 kPa (ortsabhängig)**

ergibt sich:

$$BEK-Ra = \frac{22,188}{\sqrt[3]{BEK-GL}}$$

Gleichung 3.2-10

BEK-Ra	Rauheit Bekk [µm]
BEK-GL	Messwert Glätte Bekk [s]

**Jedoch sei auch hier noch einmal angemerkt, dass bereits in der Veröffentlichung von Baumgarten, Götsching und Volk [15] darauf verwiesen wird, stets den Umgebungs-Luftdruck bei der Messung der Glätte nach Bekk zu ermitteln.

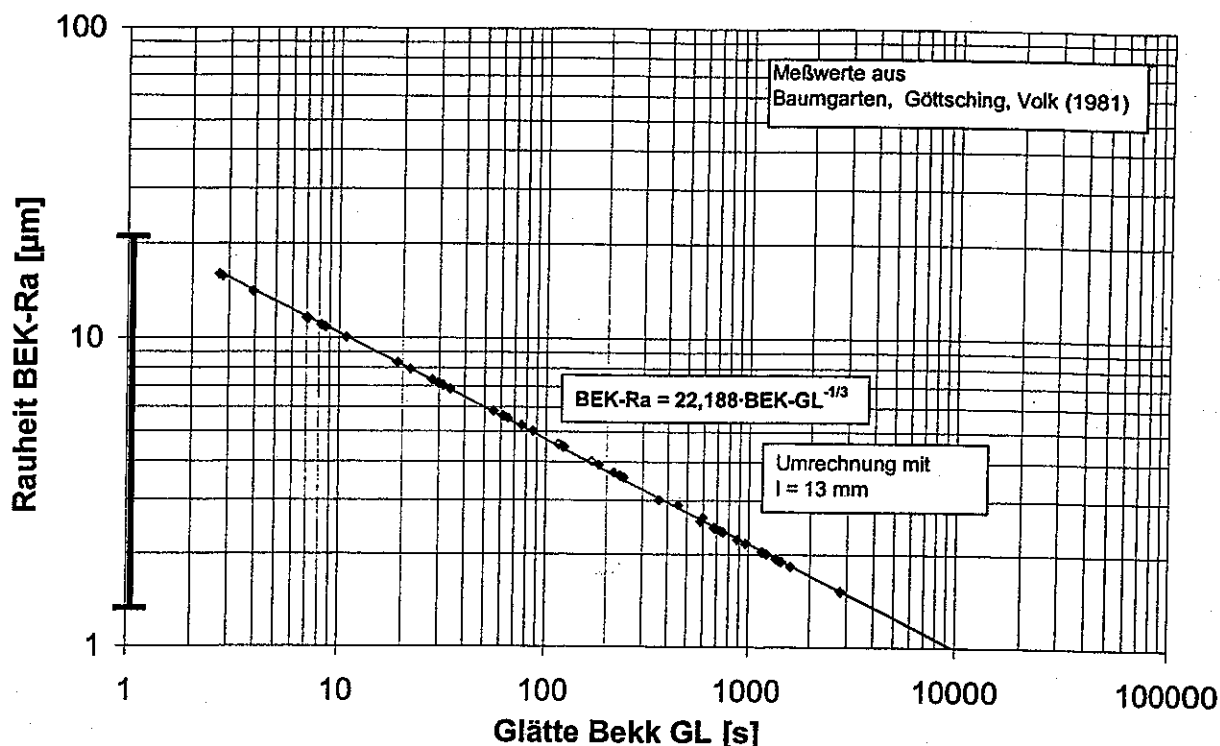


Abbildung 3.2-9: BEK-Ra vs. BEK-GL

Bei Anwendung des Kanalmodells für das Bekk-Verfahren muss man folgendes berücksichtigen:

- Die Luft wird aus dem Labor mit dem dort herrschenden Luftdruck bzw. der entsprechenden Dichte angesaugt.
- Auf dem Durchströmungsweg nimmt der absolute Luftdruck von etwa 1 bar auf etwa 0,5 bar ab, d.h. das Luftvolumen steigt und gleichzeitig sinkt die Kanalbreite b bzw. die freie Querschnittsfläche proportional mit dem Radius des Messringes.
- Während die Kanallänge im Bendtsen-Gerät mit 150 μm klein gegenüber der Faserlänge ist, beträgt die Breite des Bekk-Messringes mit 13 mm ein Vielfaches der Faserlänge, so dass die Wege der Luft wesentlich von der radialen Richtung abweichen können.
- Die weiche Gummiplatte des Bekk-Gerätes erhöht den Kontaktanteil der Papieroberfläche mit dem Bekk-Messring wesentlich stärker als die Glasplatte des Bendtsen-Gerätes oder die härteren Unterlagen des PPS-Gerätes.

Nimmt man gemessene Bekk-Werte für verschiedene Papiersorten (/15/, Anhang A.1.3) und rechnet diese nach oberer Gleichung um, dann erhält man Abbildung 3.2-9, wobei eine Umrechnung der Bekk-Glätte BEK-GL [s] in die Bekk-Rauheit BEK-Ra [μm] erfolgte (Quelle für BEK-GL: A.1.3 /15/; $p_K = 1$ bar; Verfahren: A, B, C).

3.2.4 Rauheit Ra nach Parker-Print-Surf (PPS-Ra)

Auch das PPS-Gerät nutzt ein Luftstrommessverfahren zur Kennzeichnung der Rauheit oder Glätte

te, gibt das Ergebnis aber nicht als Luftstromwert, sondern bereits umgerechnet als PPS-Ra-Wert in μm an. Im Vergleich mit dem Bekk-Gerät und dem Bendtsen-Gerät zeichnet sich das PPS-Gerät durch einen besonders dünnen Messring mit $l = 51 \mu\text{m}$ und einen hohen Überdruck von $\Delta p = 0,2$ bar aus. Mit Rückgriff auf die Gleichung 3.2-4 und Gleichsetzen von D sowie PPS-Ra ergibt sich:

$$PPS-Ra = \sqrt[3]{\frac{PPS-RA \cdot 12 \eta \cdot l}{b \cdot |\Delta p|}}$$

Gleichung 3.2-11

Mit

l	Breite des Messringes	$= 51 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
b	Umfang des Messringes	$= 0,1 \text{ m}$
Δp	Luftdruckdifferenz	$= 19,6 \cdot 10^3 \text{ Pa}$
η	dyn. Viskosität Luft	$= 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$

ergibt sich:

$$PPS-Ra = 0,455 \cdot \sqrt[3]{PPS-RA}$$

Gleichung 3.2-12

PPS-Ra	Rauheit PPS [μm]
PPS-RA	Rauheit PPS [ml/min]

Der Messbereich für die Rauheitsmessung des am LPT vorhandenen PPS-Gerätes liegt zwischen $0,6\mu\text{m}$ und $6\mu\text{m}$.

Abbildung 3.2-9 zeigt umgerechnete PPS-Rauheitswerte aus der Papiersammlung A.1.1, A.1.2 und die Geradengleichung Gleichung 3.2-11:

Dort ist die Umrechnung der PPS-Rauheit PPS-Ra [μm] in PPS-Rauheit PPS-RA [ml/min] (Quelle für PPS-RA: A.1.1 u. A.1.2; $\Delta p = 2000 \text{ mm WS}$, $p_K = 5\text{-}10\text{-}20 \text{ bar}$) zu sehen.

Da die Rauheit der Kopier-, Laserdruck-, und Ink-Jet-Druck-Papiere funktionsgerecht bei geringem Anpressdruck gemessen werden soll, sind die standardisierten hohen Anpressdrücken des PPS-Verfahrens von 10 bar bzw. 20 bar /5/ nachteilig. Zwar besteht die Möglichkeit, den Anpressdruck auf 5 bar zu verringern – allerdings verbunden mit der Gefahr, dass die Funktion der Dichtungsringe nur mangelhaft ausgeübt wird. Da einfache Modifizierungen des kompakten, nicht kalibrierbaren PPS-Messkopf nicht möglich sind, wird das PPS-Verfahren in diesem Projekt nur zur vergleichenden Messung von Ra bei hohen Anpressdrücken herangezogen.

Bei der Interpretation der PPS-Messwerte ist neben der relativ starken Kompression oder Glättung des Rauheitsgebirges und des dünnen Messringes auch der Einfluss der s.g. weichen oder harten Unterlage zu berücksichtigen. Beide Unterlagen sind deutlich weicher als die Bendtsen-Glasplatte und deutlich härter als die Bekk-Gummi-Scheibe.

3.2.5 Vergleich der Rauheit BEN-Ra und BEK-Ra

Das Kanalmodell von *Parker* geht von einem geschlossenen Luftkanal gleichmäßiger Dicke aus. Das dürfte in der Realität nicht der Fall sein. Eine umfassende Betrachtung derartiger Probleme findet sich in /16/.

Möglichkeiten zur Modifizierung dieses Modells können sein:

1. parallele, quadratische Kanäle, Wanddicke vernachlässigbar (100% freie Querschnittfläche)
2. parallele, quadratische Kanäle im Material, 50% freie Querschnittfläche
3. gekrümmte, quadratische Kanäle, 50% freie Querschnittfläche
4. zylinderförmige Kanäle, ca. 40% freie Querschnittfläche

Dabei geht man zunächst von der *Darcy*-Gleichung für einen kreisförmigen Kanal aus:

$$\dot{V} = \frac{d^4 \cdot \Delta p \cdot \pi}{128 \cdot \eta \cdot l}$$

Gleichung 3.2-13

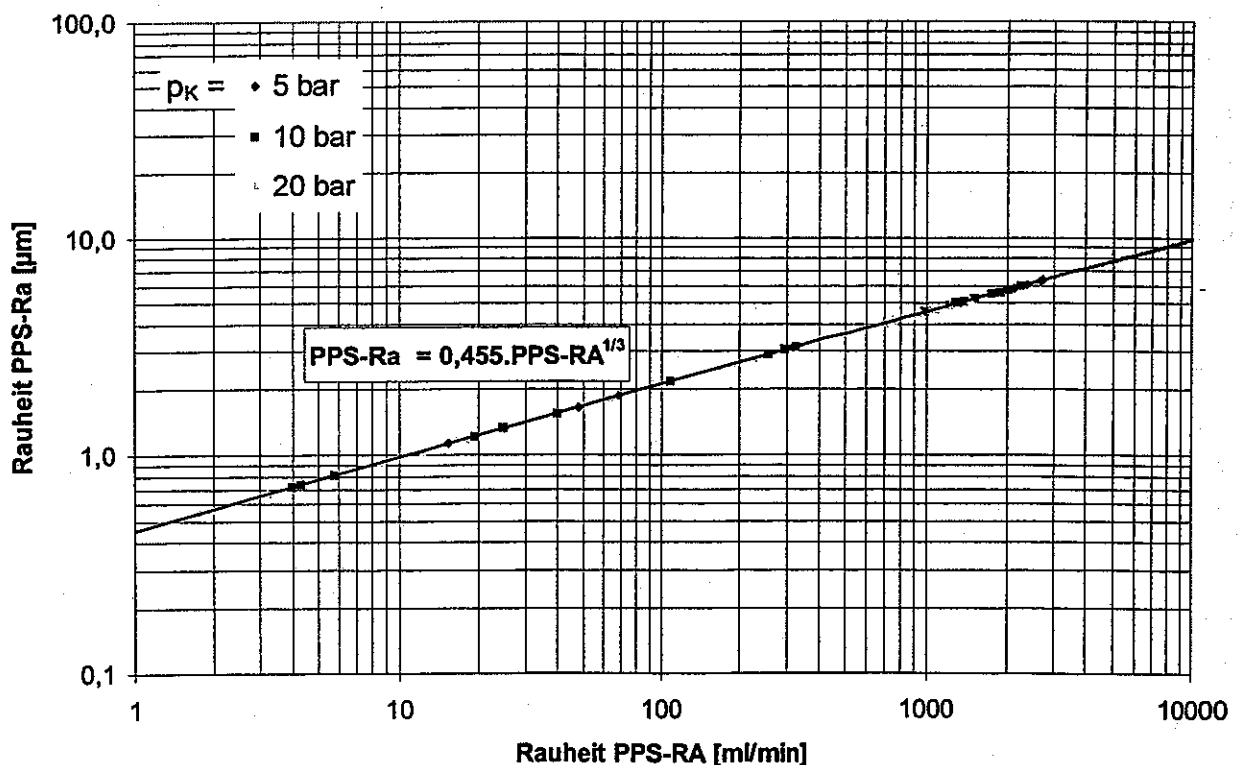


Abbildung 3.2-10: Umrechnung PPS-Rauheit

Modell 1 besteht aus n dünnwandigen, quadratischen Kanälen:

$$\dot{V} = \frac{n \cdot d^4 \cdot \Delta p \cdot \pi}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot FF$$

$\dot{V}$	Luftvolumenstrom [m^3/s]
n	Anzahl der Kanäle = b/d (dünne Wände)
d	Kanaldurchmesser/Kanalhöhe [m]
Δp	Druckdifferenz [kPa] = 1470 kPa
η	dyn. Viskosität = $18,1 \cdot 10^{-6}$ Pas
l	Länge des Kanals [m] = $150 \cdot 10^{-6}$ m
FF	Formfaktor = 1,434 (parallele, quadratische Kanäle)
b	Breite des Gesamtkanals [m]

Werden diese Werte eingesetzt, sowie nach dem Durchmesser umgestellt, ergibt sich:

$$d = 1,33 \cdot BEK-Ra \quad \text{Gleichung 3.2-14}$$

Die nach diesem Modell berechneten Werte sind also stets um 1,33 größer als die Werte nach dem Parker-Modell. Nimmt man wiederum Messwerte aus /15/ und rechnet die Bekk-Glätte nach dem Parker-Modell (Gleichung 3.2-10) um, erhält man folgende Gegenüberstellung der BEN-Ra und BEK-Ra (Quelle für Messwerte: A.1.3 /15/) in Abbildung 3.2-11.

Es liegen BEN-Ra- und BEK-Ra-Werte eng um die 45°-Linie. Zum besseren Verständnis wurde diese Gegenüberstellung der BEN-Ra und BEK-Ra mit Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß in Abbildung 3.2-11 veranschaulicht (Quelle für Messwerte: A.1.3 /15/).

Modell 2 ist eine Modifizierung des Modells 1. Hier werden die Oberflächeberge des Papiers berücksichtigt und deren Masse als Wanddicke verstanden. Nur 50% der Querschnittfläche bleibt für die Luftströmung frei. Die Anzahl der Kanäle ist somit $n=b/(2 \cdot d)$. Nach Einsetzen ergibt sich:

$$d = 1,68 \cdot BEK-Ra \quad \text{Gleichung 3.2-15}$$

Beim Modell 3 sind die Kanäle zylinderförmig (Formfaktor = 1). Der Abstand zwischen zwei Kanälen ist gleich dem Kanaldurchmesser d ($n=b/2 \cdot d$, freie Querschnittfläche $\approx 40\%$). Nach Einsetzen ergibt sich:

$$d = 1,89 \cdot BEK-Ra \quad \text{Gleichung 3.2-16}$$

Da die Rauheitswerte nach dem einfachen Kanalmodell ohnehin schon verhältnismäßig hohe Werte im Vergleich zu direkten Verfahren liefern

/12/, scheinen diese modifizierten Modelle keine Alternative zur genaueren Berechnung der Rauheit von Papieroberflächen zu sein.

Die Auswertung von Messungen an ausgewählten Industriepapierproben (Anhang A.1.1) nach dem Bendtsen- und Bekk-Standardverfahren ist im Abbildung 3.2-2 dargestellt

Berücksichtigt man die deutlich unterschiedlichen Messbedingungen der Messverfahren nach Bendtsen und Bekk, so ist in allen Beispielen die Übereinstimmung der Rauheitswerte BEN-Ra und BEK-Ra überraschend gut.

Zunächst erwartet man, dass der weiche Gummistempel des Bekk-Gerätes für einen höheren Kontaktanteil des Papiers mit dem „Messring“ – dem polierten Glasring – sorgt, als die harte Glasplatte des Bendtsen-Gerätes. Außerdem wird man besonders im Bereich kleiner Rauheitswerte bzw. kleinflächiger Nichtkontaktstellen des Papiers mit dem Messring steigende Rauheitswert Ra mit abnehmender Messringbreite (l) erwarten, also in der Reihenfolge BEK-Ra ($l = 13$ mm), BEN-Ra ($l = 150$ μm) und PPS-Ra ($l = 51$ μm). In den oberen Abbildungen gibt es deutliche Hinweise dafür – z. B. die BEN-Ra-Werte von etwa 1-1,5 μm für BEK-Ra-Werte von 0 μm . Die Empfindlichkeit des Bendtsen-Gerätes für kleiner Ra-Werte wird andererseits wohl auch deshalb von dem PPS-Gerät noch übertroffen.

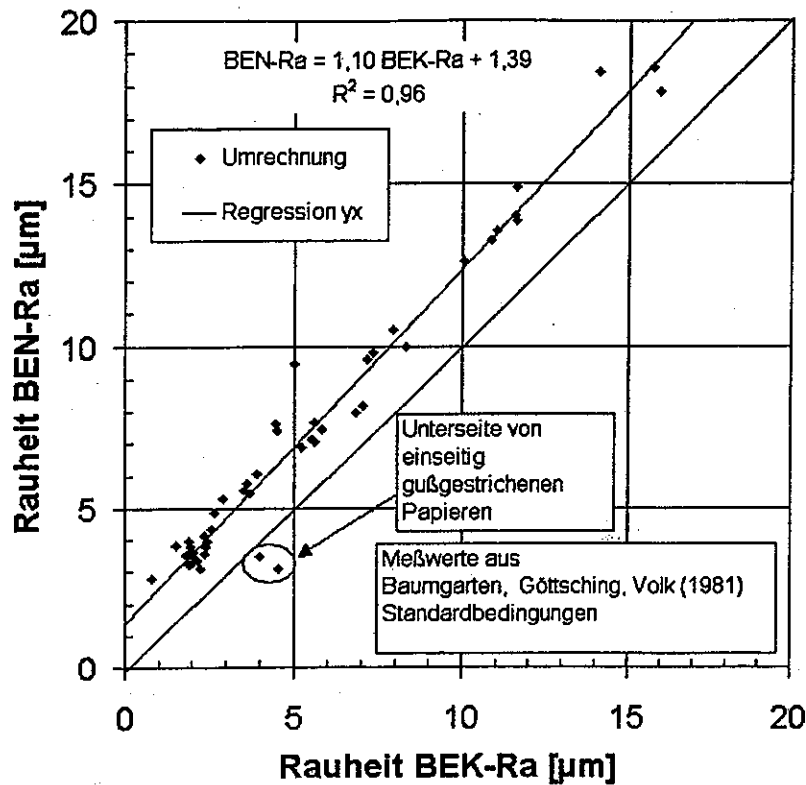


Abbildung 3.2-11: BEN-Ra und BEK-Ra (Quelle für Messwerte A.1.3 /15/)

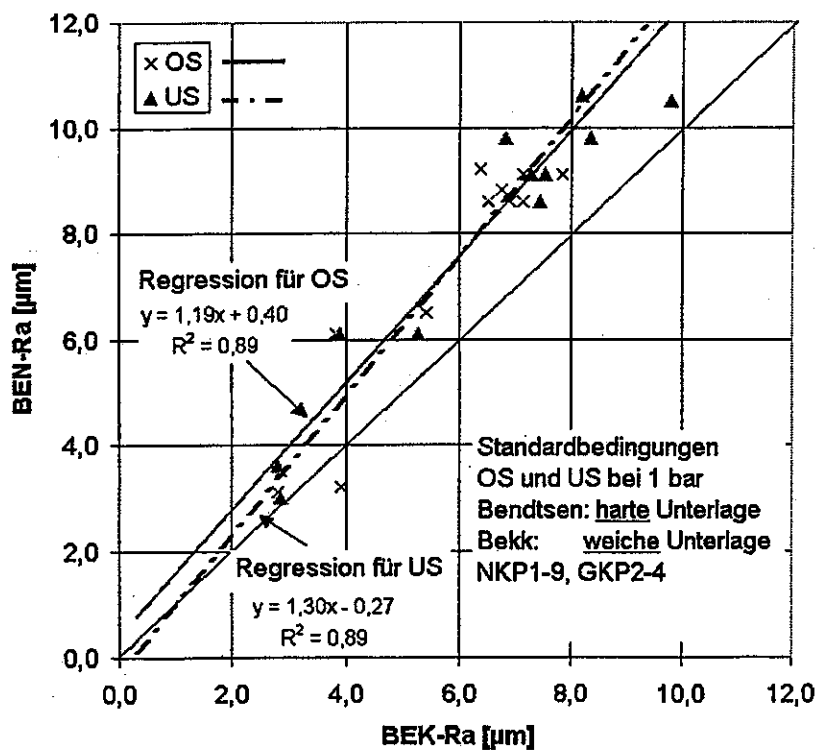


Abbildung 3.2-12: Gegenüberstellung BEN-Ra und BEK-Ra für Referenzpapiere (Quelle für Messwerte A.1.1)

3.3 Druckvariable Rauheitsmessverfahren

3.3.1 Einleitung

Bekannte und bewährte Geräte zur Rauheitsmessung von Papier sollen für die funktionsgerechte (druckfreie oder berührungslose Vervielfältigungsprozesse) Charakterisierung der Rauheit von Kopier-, Laserdruck- und Ink-Jet-Druck-Papieren modifiziert werden:

- Der Anpressdruck bei der Rauheitsmessung soll möglichst auf (0.1) 0.2 bar reduzierbar sein unter Erhalt der Möglichkeit mit dem "Standard-Druck" von 1 bar und zusätzlich mit Drücken von 5, 10, 20 (25) bar (50, 75, 100 bar) die Rauheitsmessung durchzuführen.
- Die Rauheitsmessung soll möglichst synchron mit einer Dickenmessung erfolgen und so die elastische und plastische Kompression der gesamten Papierdicke und getrennt davon des Rauheitsgebirges ermitteln.
- Es soll möglich sein, die Anisotropie der Rauheit des Papiers - z. B. Rauheit in MD- und CD-Richtung zu ermitteln.

Nach umfangreichen Vorversuchen mit verschiedenen Messverfahren wurde das Bekk- und PPS-Verfahren (vgl. 3.1.3 und 3.1.4) - bei gleichzeitiger Konzentration auf das Bendtsen-Verfahren - ausgeschieden.

Weiterentwickelt werden soll auch die druckvariable KAM-Messung mit einer integrierten Kontaktanteil-Mikroformationsmessung.

3.3.2 Modifizierte Rauheit Ra nach Bendtsen (BEN-Ra)

Zur Modifizierung des Messdruckes am Bendtsen-Gerät ist es zuerst erforderlich, die Kraft- und Druckverhältnisse am Messkopf darzustellen. Um diese zu beschreiben, ist über folgende Sachverhalte Klarheit zu schaffen:

- Masse
- genormte geometrische Abmessungen
- Druckverhältnisse

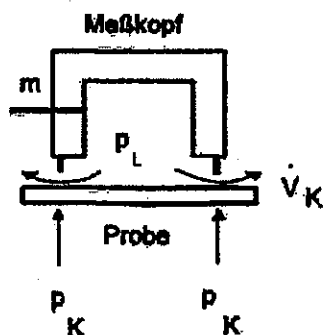


Abbildung 3.3-1: Darstellung relevanter Größen am Bendtsen-Messkopf

Wird um den Messkopf ein Kräftegleichgewicht angetragen, so gilt für das standardisierte Verfahren:

$$p_K \cdot A_K = m \cdot g - p_L \cdot A_i \quad \text{Gleichung 3.3-1}$$

p_K	Kufendruck	= 98100 Pa
A_K	Auflagefläche der Kufe	= 15 mm ²
m	Masse des Messkopfes	= 267 ± 2 g
g	Erdbeschleunigung	= 9,81 m/s ²
p_L	Luftdruck im Messkopf	= 1471 Pa
A_i	Innenfläche	= 781 mm ²

Stellt man die Gleichung nach dem Kufendruck p_K um, ergibt sich:

$$p_K = \frac{m \cdot g - p_L \cdot A_i}{A_K} \quad \text{Gleichung 3.3-2}$$

beziehungsweise

$$m = \frac{p_K \cdot A_K + p_L \cdot A_i}{g}$$

Aus Gleichung 3.3-2 folgt, dass der Kufendruck p_K bei konstanten Abmessungen des Messkopfes, nur von der Masse und vom innen wirkenden Luftdruck abhängig ist. Will man den Kufendruck über 98,1 kPa auf z.B. 981 kPa oder 1962 kPa erhöhen, so ist es üblich, Zusatz-Massen auf den Messkopf aufzulegen. Will man den Kufendruck unter 98,1 kPa verringern oder unabhängig von der Messkopf-Masse variieren, so bietet sich das Umdrehen des Messkopfes und das Auflegen einer Glasplatte bzw. einer geeigneten Acrylglasplatte mit Zusatz-Massen an (Abbildung 3.3-2).

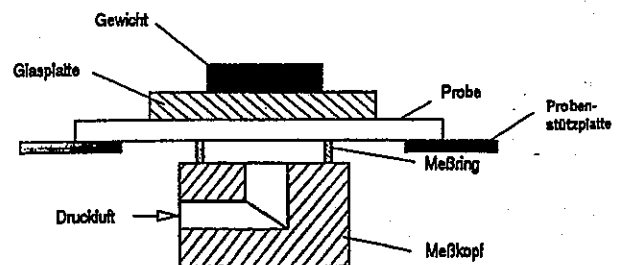


Abbildung 3.3-2: Modifiziertes Bendtsen-Verfahren

Mit dieser Methode besteht die Möglichkeit, Kufendrucke von 0,2 bar (17 l) bis 20 bar zu realisieren. Bei Kufendrucke von 0,1 bar traten häufig Instabilitäten auf.

Der Kufendruck p_K ist der Druck der auf die Papierfläche wirkt. Dabei wird ein Tragflächenanteil von 100% vorausgesetzt. Da dies, bei Messungen

mit Rauheitswerten größer als Null, nicht der Fall sein kann, wirkt auf die Papierfläche der mit der Masse des Aufлагengewichtes eingestellte scheinbare Druck $p_{KSchein}$. Der wirkliche Druck ist damit so groß wie der scheinbare Druck geteilt durch den Tragflächenanteil.

Somit ergeben sich für die in der Abbildung 3.3-3 angegebenen „scheinbaren“ Drücke, aufgrund obiger Angaben folgende dazugehörige Aufлагengewichte. Für 0,2 bar Kufendruck musste der Luftdruck auf 60 mmWS verringert werden.

Anpressdruck [bar]	Auflagengewicht [g]
0,20	77*
1	269
5	877
10	1637
20	3157

Abbildung 3.3-4: Kufendruck des Bendtsen-Gerätes in Abhängigkeit von der Auflagenmasse bei 150 mmWS Luftdruck (*) für 60 mmWS)

Das Kanalmodell nach Parker ist in [17] ausführlich dargestellt und bietet auch für das modifizierte Messverfahren nach Bendtsen die Möglichkeit, Rauheitswerte von ml/min in Mikrometerwerte umzuwandeln.

$$d = GP = \sqrt[3]{\frac{\dot{V} \cdot 12\eta \cdot l}{b \cdot |\Delta p|}}$$

Gleichung 3.3-3

- $\dot{V}$ - Luftvolumenstrom [m³/s]
- d - Kanalhöhe [μm]
- GP - Rauheit nach Parker [μm]
- l - Länge des Kanals = 0,1 m
- b - Breite des Kanals = 0,00015 m
- p - Druckdifferenz (Triebkraft) [Pa]
- η - dyn. Viskosität von Luft = $18,1 \cdot 10^{-5}$ Pas (bei 23°C/50 % rel. Luftfeuchte)

Angegeben werden die Gleichungen 3.3-4 bzw. 3.3-5 für Luftdrücke von 150 mm WS (entspricht 1471 Pa) bzw. von 60 mm WS (588 Pa)

$$GP_{Ben} = 1,5458 \cdot \sqrt[3]{RA}$$

Gleichung 3.3-4

$$GP_{Ben, 60 \text{ mmWS}} = 2,1505 \cdot \sqrt[3]{RA}$$

Gleichung 3.3-5

- GP_{Ben} - Rauheit Bendtsen [μm]
- RA - Rauheitsmesswert [ml/min]

3.3.3 Druckvariabler Kontaktanteil (KAM)

Das Kontaktanteil-Messgerät wurde mit einer Zusatz-Druck-Einrichtung versehen, die Anpressdrücke von (0,2) 0,4 – 2,5 bar ermöglicht - zusätzlich zu den üblichen Anpressdrücken von 10, 25 und 50 (75) bar. Nach Einbau eines Digitalvoltmeters gelingt es auch, KAM-Werte ab 0,1% zu messen.

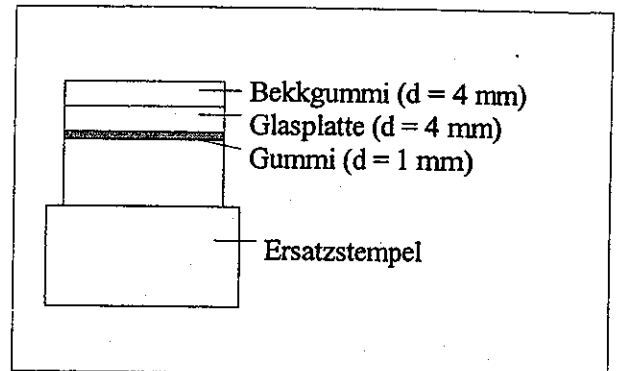


Abbildung 3.3-5: weiche Unterlage für KAM nach FOGRA ab 10 bar bis 50 (75) bar Anpreßdruck

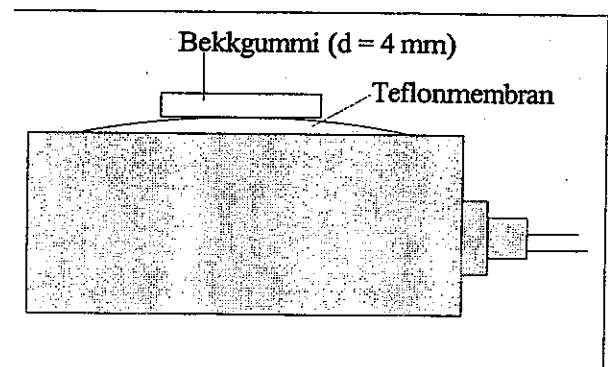


Abbildung 3.3-6: weiche Unterlage für KAM nach FOGRA von (0,2) 0,4 – 2,5 bar Anpreßdruck durch Luftdruck-Variation unter der Teflon-Membran

Die Abbildungen 3.3-4 bis 6 zeigen die modifizierten Unterlagen des Kontaktanteilmessgerätes. Erwähnenswert ist, dass für die weiche Unterlage bis 2,5 bar ein Ersatzstempel verwendet werden muss. Da man bei der Standardmethode nach FOGRA mit der harten Unterlage in dem Bereich über 10 bar misst, ist eine Modifikation des Stempels nicht notwendig. Zur Kontrolle bzw. zum Einstellen des gewünschten Luftdruckes, der den Stempel gegen das Prisma drückt, wurde ein handelsübliches Luftdruck-Barometer verwendet.

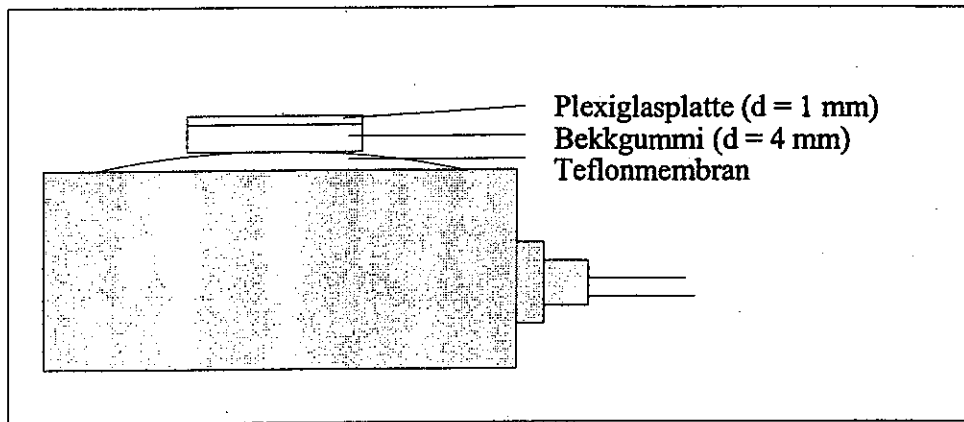


Abbildung 3.3-7: harte Unterlage für KAM nach FOGRA von (0,2) 0,4 bis 2,5 bar Anpressdruck

3.4 Ergebnisse der Rauheitsuntersuchung

3.4.1 Rauheit nach Bendtsen und Bekk

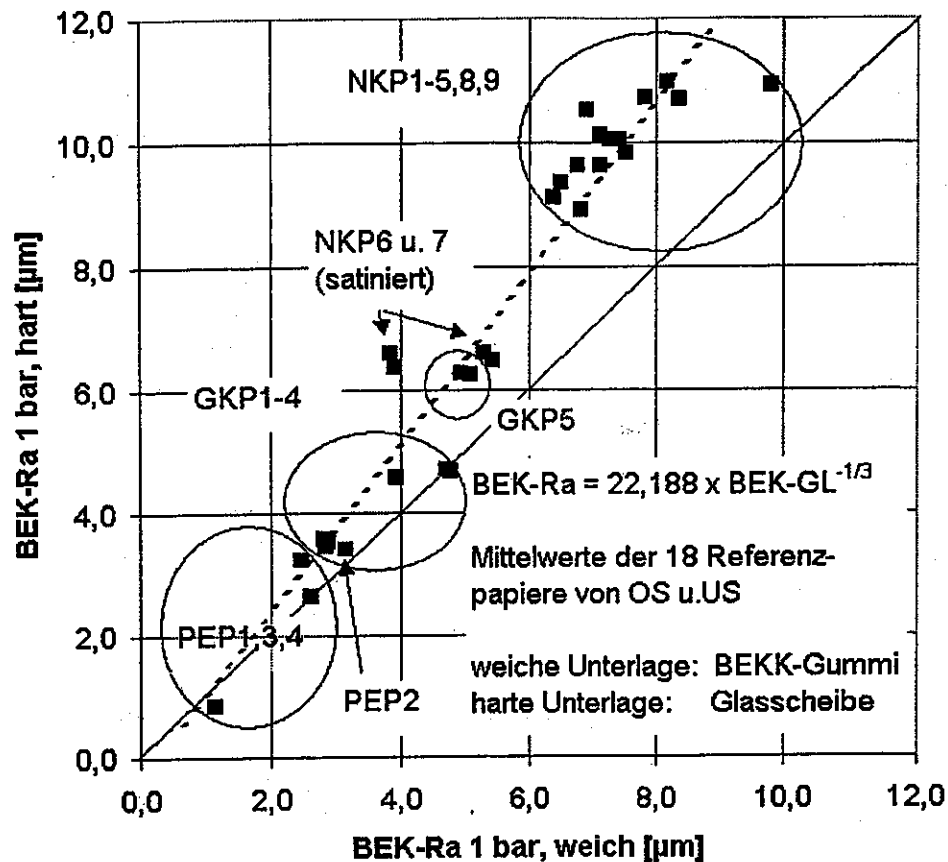


Abbildung 3.4-1: Gegenüberstellung BEK-Ra weich und hart für NKP, GKP und PEP

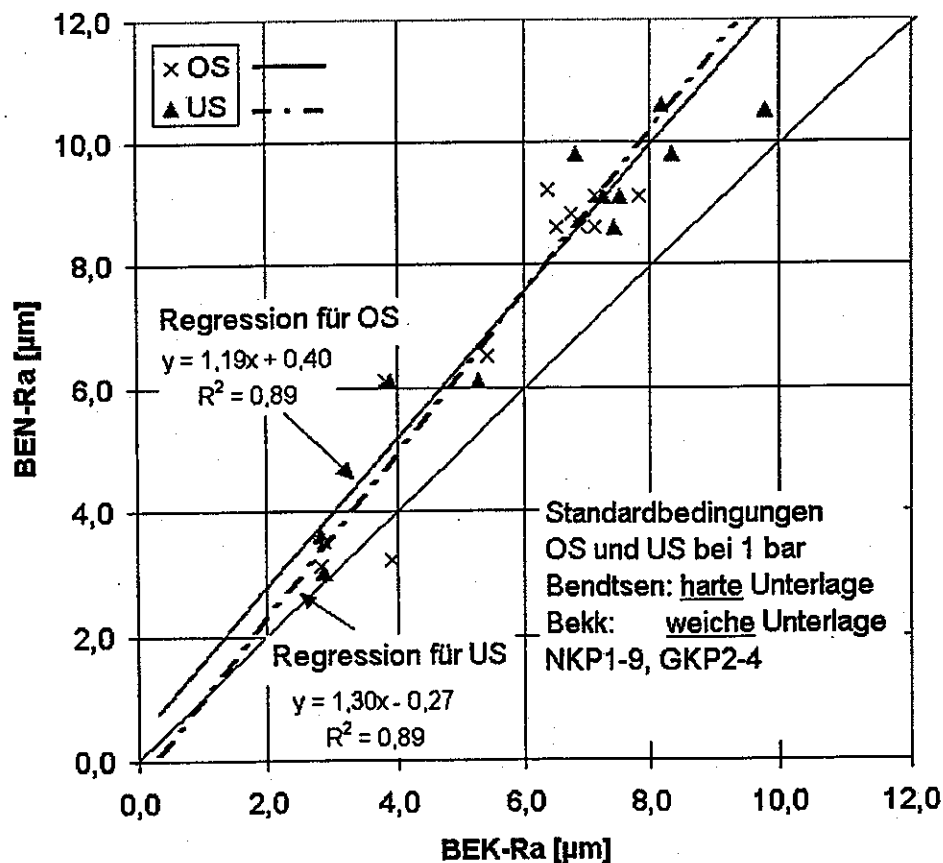


Abbildung 3.4-2: Gegenüberstellung BEN-Ra und BEK-Ra für NKP und GKP

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Glätte nach Bekk mittels weicher (Standardunterlage) und harter (Glas-) Unterlage bestimmt. Wie zu erwarten, ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Standardmethode und der harten Unterlage ersichtlich. So erhält man bei den rauen, ungestrichenen Naturkopierpapieren mit der weichen Unterlage eine Bekk-Rauheit von 6 – 10 μm , während man mit der harten Unterlage einen Bereich von 8 – 11 μm ermittelt. Dieser doch deutliche Unterschied verringert sich mit zunehmender Glättung der zu untersuchenden Papiere. So sind beispielsweise die Werte der glatten PE-beschichteten Papiere für beide Unterlagen mit 1 – 3 μm nahezu gleich.

In den Studienarbeiten /17/, /18/ wurde die lineare Beziehung zwischen den Bendtsen- und Bekk-Rauheitswerten (BEN-Ra und BEK-Ra) in μm auch für die 33 Papiere /15/ bestätigt – vgl. Abbildung 3.2-11.

Über den ganzen Messbereich der Abbildung 3.4-2 sind die BEN-Ra-Werte höher als die BEK-Ra-Werte. Dies wird besonders deutlich, wenn man davon ausgeht, dass der Weg des Luftstromes zwischen Messring und Papier 13 mm lang ist, also radial verläuft.

Es gibt mindestens drei Erklärungen dafür, dass die BEK-Ra-Werte kleiner als die BEN-Ra-Werte sind:

- der effektive Luftstromweg im Bekk-Gerät ist höher als die 13 mm der radialen Meering
- Kurze Täler in der Papieroberfläche können im Bekk-Gerät gegen den Luftstrom abgedichtet werden, während sie ab einer Länge von über 150 μm , also der Dicke des Bendtsen-Messringes, im Bendtsen-Gerät voll durchströmt werden.
- Hinzu kommt, dass die weiche Gummischeibe im Bekk-Gerät den Kontaktanteil zwischen der Papieroberfläche und dem gläsernen Messring des Bekk-Gerätes, und damit die Abdichtung, steigert.

Da das Bekk-Verfahren insgesamt weniger als das Bendtsen-Verfahren zur funktionsgerechten Charakterisierung der Mikrosteometrie von Kopierpapieren mit geringen Anpressdrücken geeignet ist, wurde die Untersuchung der der Anpressdrücke zwischen (0,1) 0,2 – 20 bar zurückgestellt. Die Untersuchung der Einflüsse von harter und weicher Unterlage wurde ebenfalls mit dem Bendtsen- und dem Kontaktanteil-Messverfahren weiterverfolgt.

3.4.2 Modifizierte Bendtsen-Rauheit

3.4.2.1 Einführung

Nach eingehender Prüfung der Möglichkeiten erwies sich das Bendtsen-Verfahren als einziges zur Verfügung stehendes Luftstromverfahren, mit dem eine Verringerung des Anpressdruckes in Richtung 0,1 bar möglich erschien.

Wie bereits geschildert, wurde als gangbarer Weg gesehen, den Standard-Messkopf zu belassen, das System aber umzudrehen und ein entsprechendes Auflagegewicht auf eine Glasplatte zu setzen, um die gewünschten Messbedingungen zu realisieren (s. A.2.3.1).

Erste Versuche in dieser Richtung wurden am LPT Ende 1998, Anfang 1999 mit einem Anpressdruck von 0,1 bar durchgeführt. Gearbeitet wurde mit einem Luftdruck von 100 mm WS, welcher von Hand mit Hilfe eines U-Rohr-Manometers eingestellt werden musste. Als Messvorrichtung diente ein zu diesem Zweck umgebauter Mikroskopständer, bei dem der Messkopf in einer Führung von unten gegen Probe und Glasplatte mit Auflagegewicht geführt wurde (Abbildung 3.4-3):

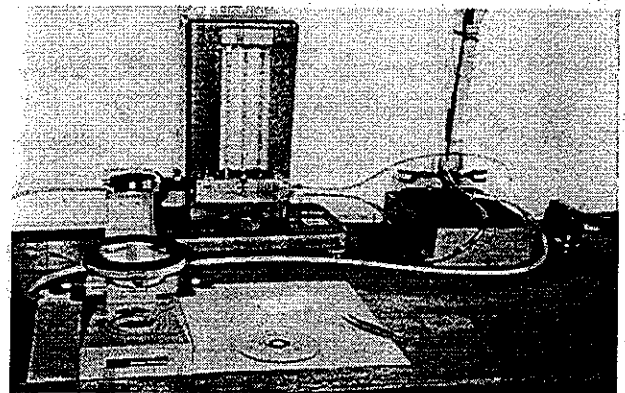


Abbildung 3.4-3: Modifizierte Bendtsen-Versuchsmessanordnung, Version 1

Der angestrebte Kufenanpressdruck war jedoch mit dieser Messvorrichtung nicht realisierbar. Das System zeigte Schwingungserscheinungen. Deshalb wurde festgelegt, den Anpressdruck auf 0,2 bar zu erhöhen. Auch hier trat Schwingungsneigung auf, mit etwas Erfahrung ließ sich dieser Effekt aber abstellen. Das Luftzufuhrventil wurde zuerst vollkommen geschlossen und zur Messung nur bis zum Luftdruck von 100 mm WS geöffnet. Jetzt konnte der Messwert am Rotameter abgelesen werden. Nachteilig war in jedem Fall das schlechte Handling des Verfahrens, verbunden mit einem verhältnismäßig hohen Zeitaufwand je Messung. Um das Verfahren anwendbar zu machen, war es unbedingt zu verbessern. Weitere Forderungen an das Gerät waren:

- Integration des Standard-Bendtsen-Verfahrens in das modifizierte Verfahren
- einfachste Handhabung,
- robuste, möglichst einfache, aber präzise Ausführung.

Bei der realisierten Lösung (Abbildung 3.4-3) ruht der Messkopf in Rückenlage auf einer Grundplatte mit den Abmessungen 30 x 35 mm. Über die Grundplatte lässt sich die eigentliche, parallel justierte Probenstützplatte von 35 x 40 mm klappen. Diese hat an der Stelle des Messkopfes eine

kreisrunde Aussparung von 50 mm Durchmesser, in welcher sich die Kufe des Messkopfes befindet und etwa 1 mm hinausragt. Auf diese Stützplatte wird die Probe mit der zu prüfenden Papierseite nach unten aufgelegt. Nun kann das Auflagegewicht mit der Glasplatte von oben auf die Probe bewegt werden. Am Rotameter sollte nach 5 Sekunden der Messwert abgelesen werden. Nach der Messung ist das Gewicht samt Glasplatte mit dem Hebel nach oben zu bewegen, die Probe wird gewechselt oder verschoben, und schließlich wird die nächste Messung durchgeführt (Abbildung 3.4-4).

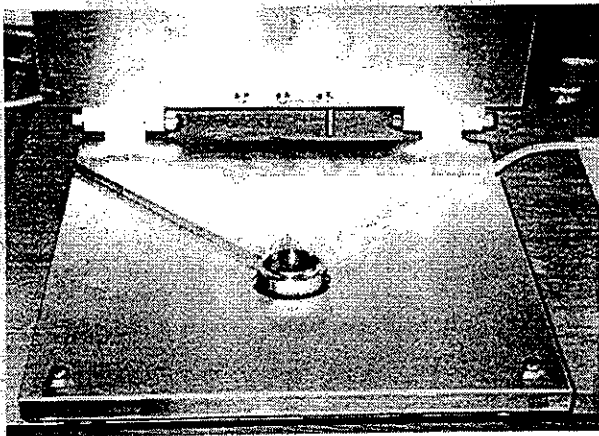


Abbildung 3.4-4: Grundplatte mit Messkopf, Version 2

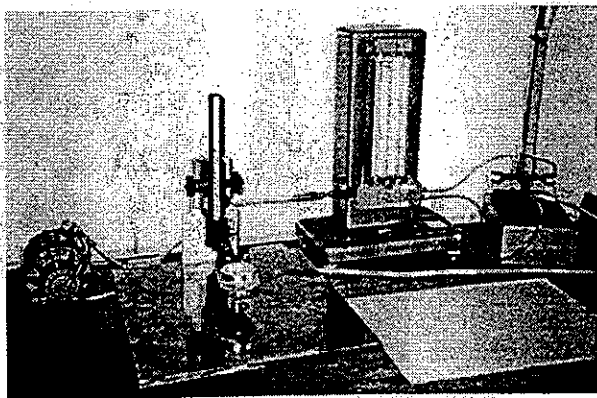


Abbildung 3.4-5: Modifizierte Bendtsen-Versuchsmessanordnung, Version 2

Im Folgenden soll die statistische Auswertung der Messwerte sowie die Anzahl der erforderlichen Messungen zur Diskussion stehen. Entsprechend den Vorgaben in sind beim Standard-Verfahren 15 Messungen je Probenoberfläche durchzuführen.

	NKP1	NKP2	NKP3	NKP4	NKP5	NKP6	GKP1	GKP2	GKP3	GKP4
$\bar{x}$ [ml/min]	157	151	129	142	138	36	26	17	7	10
s [ml/min]	17,5	15,4	15,5	13,1	14,7	4,4	9,4	5,4	3,3	10,4
v [%]	11,15	10,20	12,02	9,23	10,65	12,22	36,15	31,76	47,14	104,0
VB (95%) [ml/min]	13,2	11,6	11,2	9,9	11,1	3,3	7,1	4,1	2,5	7,9

Von den n Messwerten x_i wird zunächst der Mittelwert $\bar{x}$ gebildet, die Standardabweichung und der Vertrauensbereich VB für eine Wahrscheinlichkeit von 95 % berechnet – vgl. A.3-2.

Mit steigender Anzahl der durchgeführten Messungen nimmt bekanntlich der Vertrauensbereich VB kleinere Werte an. Anhand dieser Zusammenhänge ist über den Vertrauensbereich die Anzahl der notwendigen Messungen abschätzbar. Betrachtet werden hier exemplarisch die Oberseiten einiger Papiere aus einer der drei Papiersammlungen (Anhang A.1.2). Für jedes Papier wurden 20 Messungen durchgeführt (FG = 19). Der Variationskoeffizient v wurde mitbestimmt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt 5%.

Exemplarisch soll nun gezeigt werden, welche Anzahl der Messwerte bei dem Papier NKP2 zur Erreichung eines Vertrauensbereiches von ± 5 ml durchgeführt werden müsste:

$$n = \left(\frac{t \cdot s}{VB} \right)^2$$

VB Vertrauensbereich = 5 ml/min
s Standardabweichung = 15,4 ml/min
t Quantil = 2,093 (für W=95%, FG=19)

Dies ergibt eine notwendige Anzahl Messungen von $n = 42$. Nach 42 Messungen wird die neue Standardabweichung und das dazugehörige Quantil t ermittelt. Der Algorithmus ist zu wiederholen, bis sich die errechnete Anzahl der notwendigen Messungen nicht mehr ändert.

Im Folgenden soll anhand einer Messreihe gezeigt werden, dass die Messwerte des modifizierten Bendtsen-Verfahrens normalverteilt sind und somit die Voraussetzung für die obige Berechnung des Vertrauensbereichs erfüllt ist. Genutzt werden dafür die 20 Messwerte von NKP 2 (Abbildung 3.4-7).

Abbildung 3.4-6: Statistische Auswertung ($p_L=60$ mm WS, $p_k=0,2$ bar)

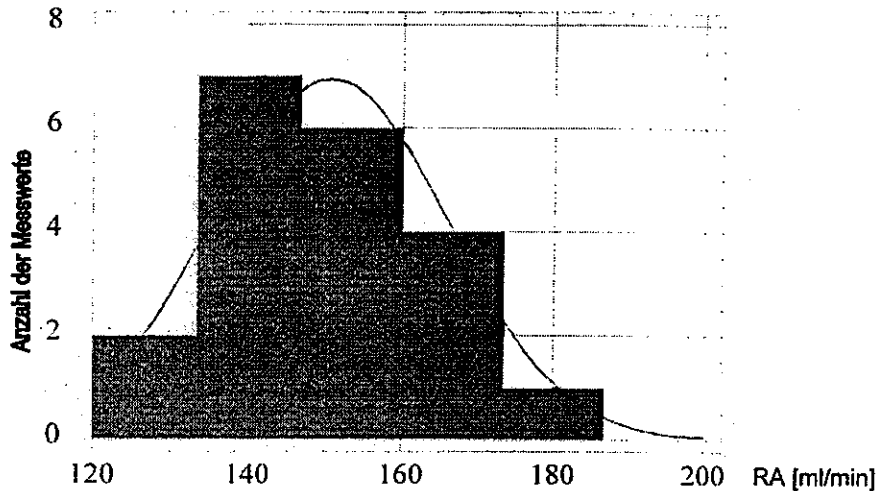


Abbildung 3.4-7: Verteilung der Messwerte des modifizierten Bendtsen-Verfahrens für NKP2 (pL=60 mm WS; pK=0,2 bar)

Das Bendtsen-Gerät wurde so modifiziert, dass man für 150 mm WS -Luftdruck Kufenanpressdrücke im Bereich von 0,2 bar bis 20 bar realisieren kann. In den Abbildung 3.4-8 bis 3.4-11 sind gemessene BEN-Ra-Werte der Papiersammlung A.1.2 dargestellt.

Bei hohen Anpressdrücken liegen die abzulesenden Werte (Luftvolumenstrom BEN-RA in ml/min) in dem unteren Anzeigebereich des vorliegenden Geräts. Hier ist der Einfluss der Luftdurchlässigkeit der Papiere besonders kritisch zu bewerten. Im Bereich niedriger Anpressdrücke stimmen dagegen BEN-Ra-Werte bei 150 mm WS mit BEN-Ra-Werte bei 60 mm WS und Traceit-R_{a, opt} gut überein (s. Kapitel 3.5)

Jeder Mittelwert besteht aus 20 Einzelwerten. Ein Einzelwert ist, wie in der Betriebsanleitung beschrieben, nach 3 – 5 Sekunden bestimmt worden. In dieser Zeit beruhigte sich die Anzeige und pendelte in der Regel leicht um einen Punkt.

Um eine einheitliche Messwerterfassung zu ermöglichen, wurde speziell bei nichtgestrichenen und bei gestrichenen Papieren die Oberseite und somit die Unterseite selbst definiert. Die Oberseite ist die Seite die beim Öffnen der Verpackung nach unten zeigt, gleich-bedeutend mit der Verpackungsoberseite.

Die Messung bei 0,2 bar Anpressdruck mit Bekk-Gummi als Unterlage war nicht durchführbar, da die Rauheit des Gummis den Wert der Oberflächenrauheit des Papiers stark beeinflusste. Versuche mit einem weicherem Gummi wurden nicht durchgeführt, es war aber festzustellen, dass beim Bespannen der Gummioberfläche mit einer handelsüblichen Haushaltsfolie die Nullstellung des Messgerätes erreicht werden konnte und somit eine einfache und schnelle Messung möglich ist.

3.4.2.2 Naturkopierpapiere (NKP)

Wie in allen Diagrammen (Abbildung 3.4-8 bis Abbildung 3.4-11) zu erkennen ist, verringert sich die Oberflächenrauheit der Kopierpapiere mit Erhöhung des Anpressdruckes von 0,2 bar bzw. 1 bar auf 20 bar etwa um die Hälfte. Diese starke Verringerung der Rauheit ist bei allen Papieren zu erkennen.

Ebenfalls ist eine Zweiseitigkeit bei den Papieren zu beobachten. Bei den Messungen konnte festgestellt werden, dass nach unserer Definition die Oberseite (OS) eine geringere Rauheit, als die Unterseite (US) hat.

Die Abbildungen 3.4-8 und 3.4-11 zeigen:

- Bei Anwendung des Standard-Bendtsen-Verfahrens, das für die Qualitätskontrolle von Naturkopierpapieren geeignet ist und deshalb bevorzugt wird, reduziert eine Steigerung des Anpressdruckes von 1 bar auf 10 bar, also dem niedrigsten empfohlenen Anpressdruck der PPS-Methode, die Rauheit BEN-Ra um ca. 2 µm von Ausgangswerten BEN-Ra ca. 10 µm (US) und ca. 9 µm (OS). Verringert man den Anpressdruck von 1 bar auf 0,2 bar, dann erhöht sich die Rauheit BEN-Ra um etwas 1 µm.
- Bei logarithmischer Steigerung des Anpressdruckes von 0,2 bar auf 20 bar sinkt die Rauheit BEN-Ra in µm etwa linear ab. Dies gilt besonders für den Druckbereich von 1 bar bis 10 bar.
- Die Unterschiede der Rauheitswerte für die Standard-Naturkopierpapiere NKP2,3 und 4 nehmen erwartungsgemäß mit steigendem Anpressdruck ab. Die mit OS bezeichneten Papierseiten haben Rauheitswerte, die bis zu 1 µm geringer sind, als die mit US bezeichneten Seiten.
- Das satinierte NKP 6 weist keine signifikante Zweiseitigkeit auf und hat bei 1 bar Anpressdruck einen BEN-Ra-Wert von 6 µm gegenüber 10 µm für die Papiere NKP 2,3 und 4.

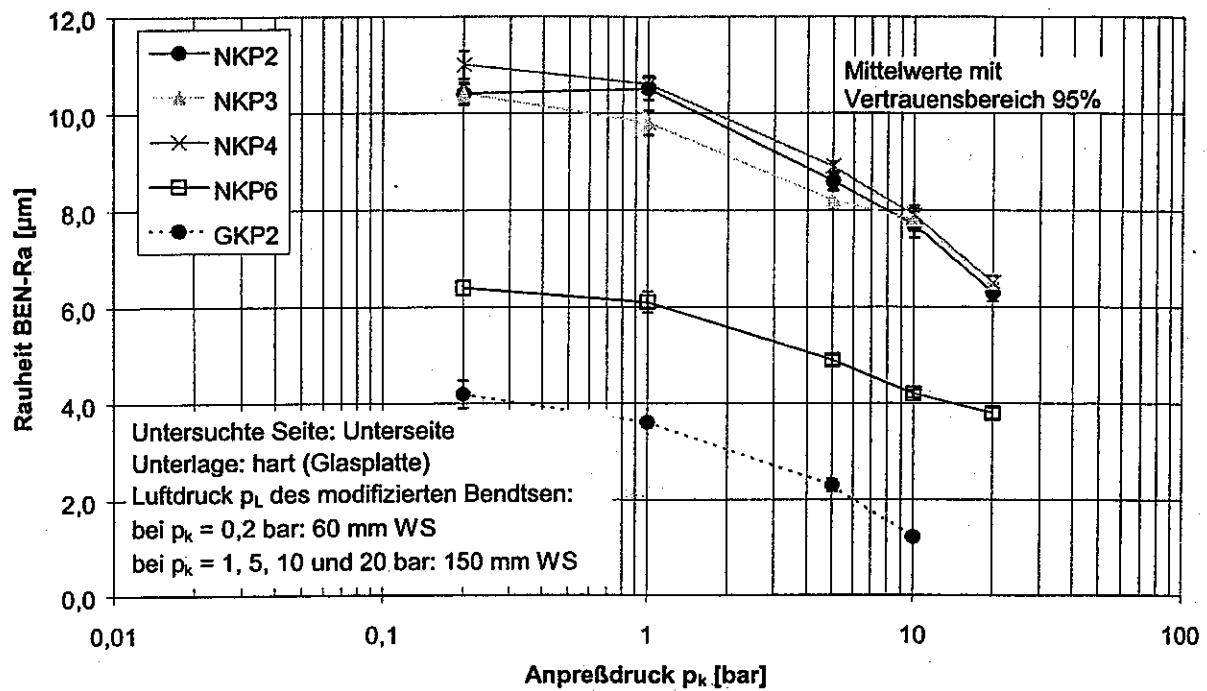


Abbildung 3.4-8: BEN-Ra, US hart

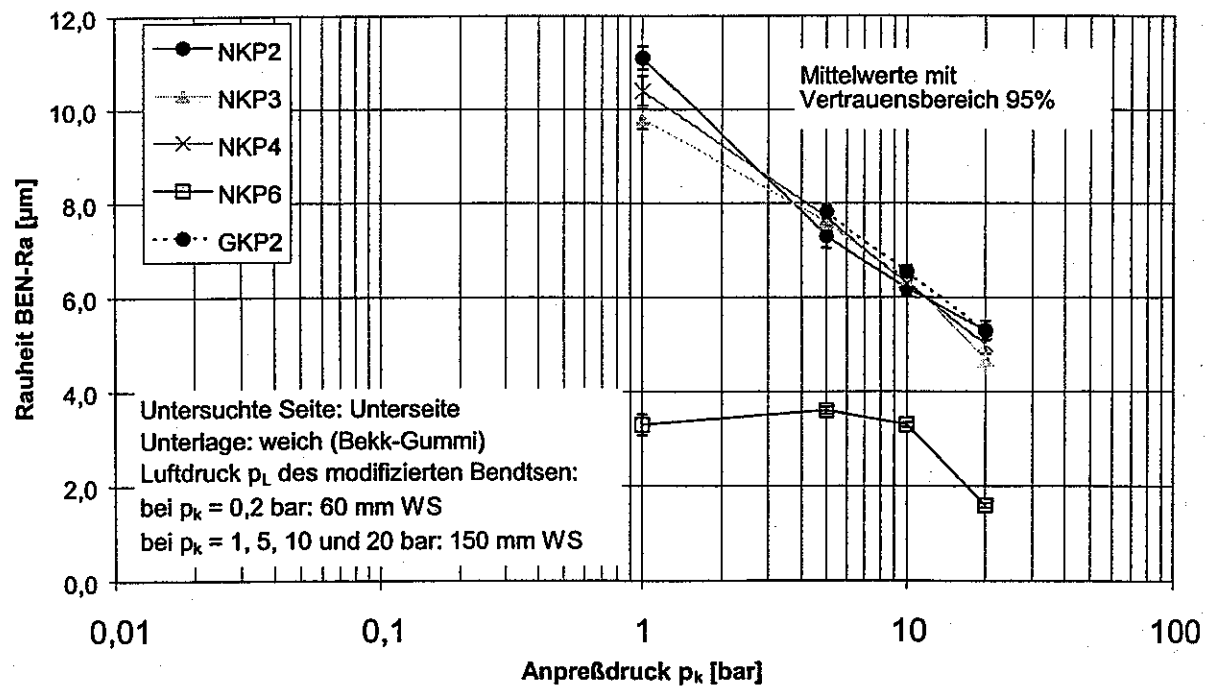


Abbildung 3.4-9: BEN-Ra, US weich

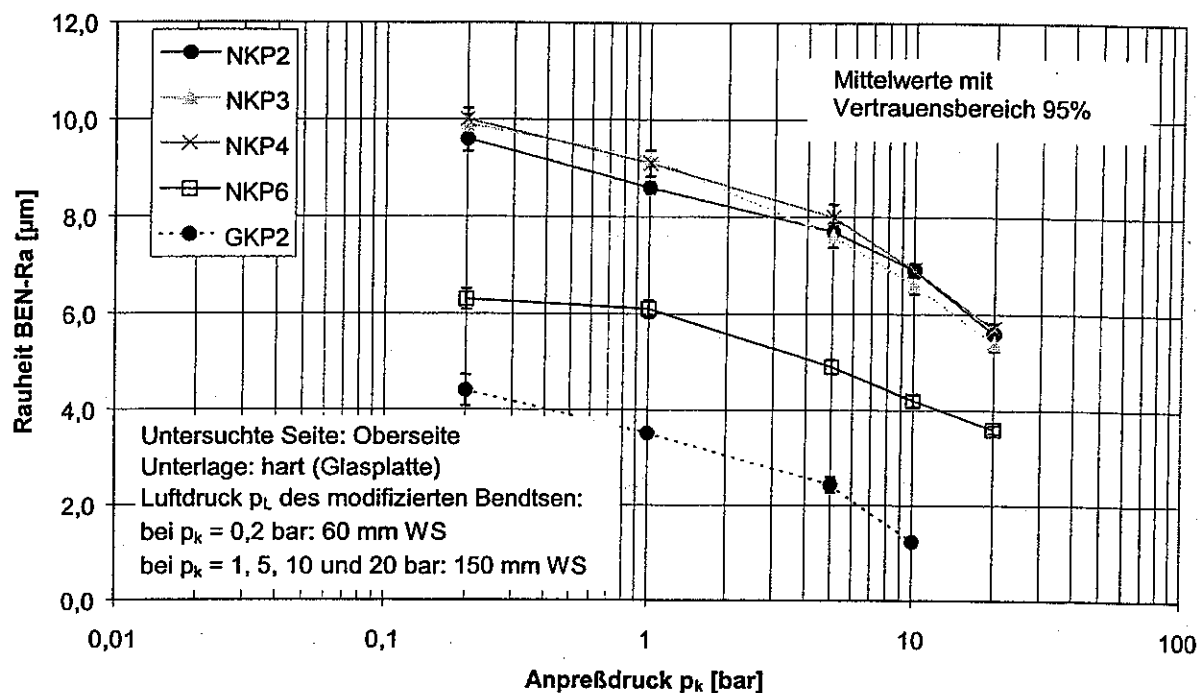


Abbildung 3.4-10: BEN-Ra, OS hart

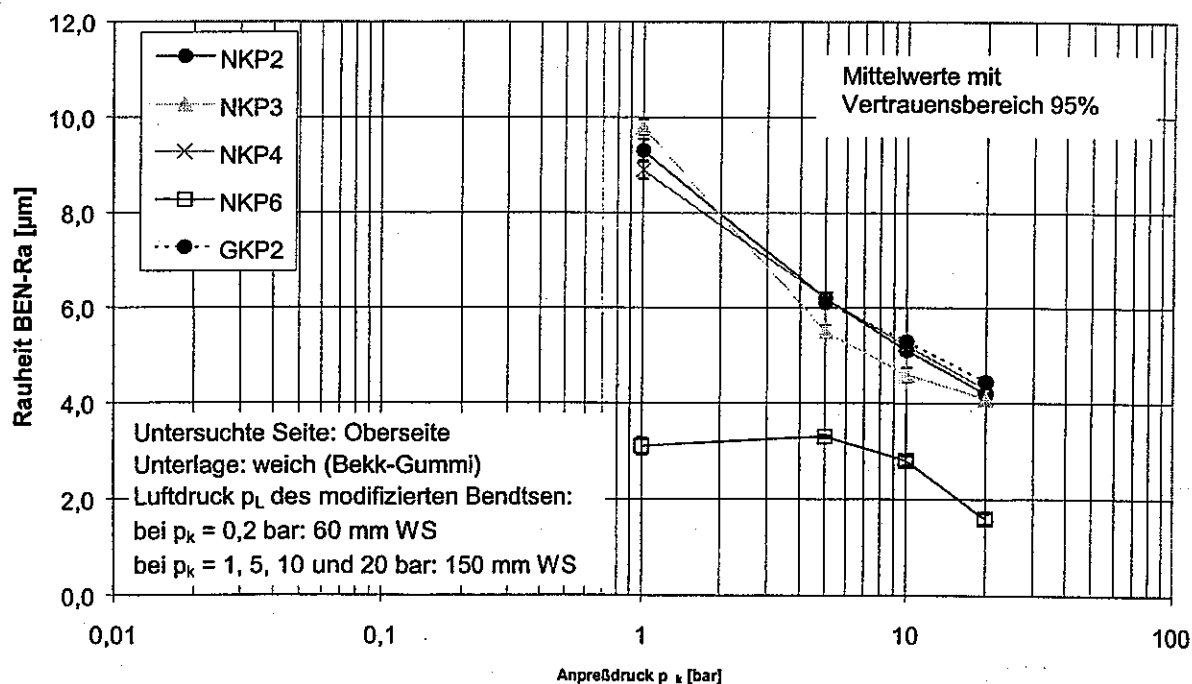


Abbildung 3.4-11: BEN-Ra, OS weich

Die Abbildungen 3.4-9 und 3.4-11 zeigen:

- Bei Anwendung des modifizierten Bendtsen-Verfahrens mit Ersatz der Glasplatte durch die weiche Bekk-Gummiplatte reduziert eine Steigerung des Anpressdruckes von 1 bar auf 10 bar die Rauheit BEN-Ra der Naturkopierpapiere NKP 2,3 und 4 von Ausgangswerten BEN-Ra ca. 10 μm (US) und ca. 9 μm (OS) um ca. 4 μm . Bei 1 bar Anpressdruck ist der Einfluss der Gummiplatte auf die Rauheit nur gering, bei hohen Drücken reduziert die Gummiplatte die Rauheit stark.
- Bei logarithmischer Steigerung des Anpressdruckes von 1 bar auf 20 bar sinkt die Rauheit BEN-Ra linear ab.
- Das satinierte NKP 6 weist auch auf der weichen Gummiplatte keine signifikante Zweiseitigkeit der BEN-Ra-Werte auf, obwohl die BEN-Ra-Werte im Anpressdruck-Bereich von 1 bar bis 20 bar um 1 bis 2 μm geringer sind als die auf der Glasplatte gemessenen Werte.

Die bereits erwähnten Probleme verhindern die Rauheitsmessungen auf der Bekk-Gummiplatte mit Anpressdrücken von 0,2 bar.

3.4.2.3 Gestrichene Kopierpapiere (GKP)

Die Messungen bei den gestrichenen Kopierpapieren ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Gemessen werden konnte nur GKP 2 (mit Einschränkung) und GKP 5. Die anderen Papiere ließen sich aufgrund der geringen Oberflächenrauheit gar nicht oder nur zum Teil mit dem zu dieser Zeit am Lehrstuhl für Papiertechnik verfügbaren Bendtsen-Gerät messen. Bei der Auswertung dieser Ergebnisse war festzustellen, dass die Werte einer sehr großen Streuung unterlagen.

Nicht eindeutig erklärbar ist die deutliche Erhöhung der BEN-Ra-Werte für das gestrichene Kopierpapier GKP 2 nach Austausch der Glasplatte (Abbildung 3.4-8 und 3.4-10) gegen die Bekk-Gummiplatte (Abbildung 3.4-9 und 3.4-11). Mit den während des Projektes gesammelten Erfahrungen ist es möglich, durch Modifizierung des Bendtsen-Messkopfes das Bendtsen-Messverfahren auch für BEN-Ra-Werte bis 0,5 μm einzusetzen.

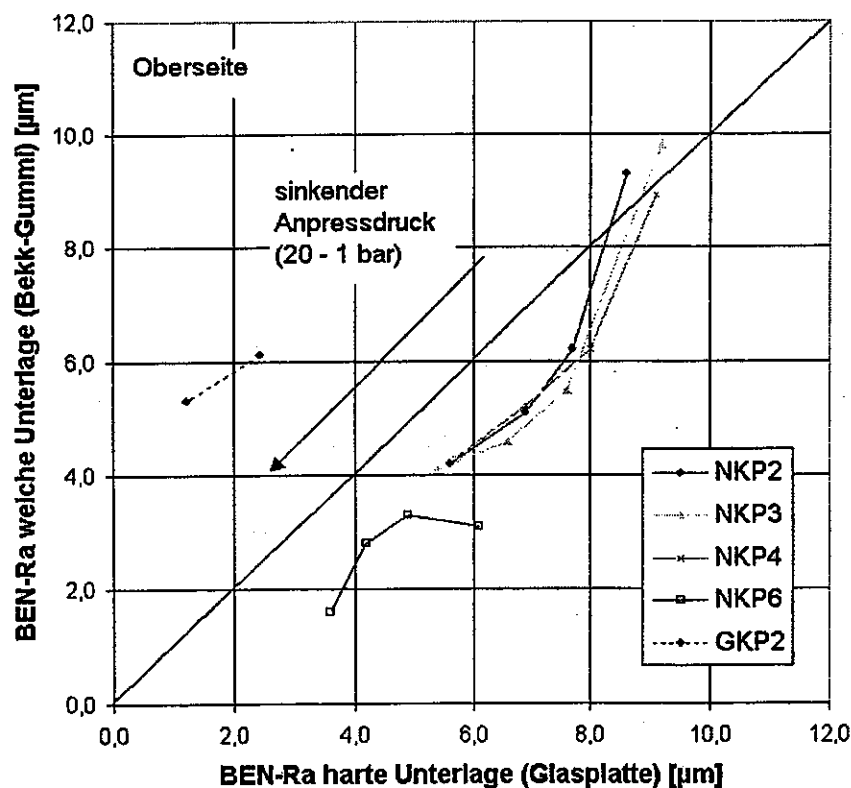


Abbildung 3.4-12: Gegenüberstellung BEN-Ra (150 mm WS) für weiche und harte der OS

3.4.2.4 Vergleich der BEN-Ra- und PPS-Werte

Die Rauheit der Naturkopierpapiere NKP 1 bis 6 wurde mit dem Bendtsen-Gerät bei einer Luftdruck-Differenz 150 mm WS mit Bekk-Gummiplatte (IRHD=40) und mit dem PPS-Gerät bei Luftdruck-Differenz 2000 mm WS und mit weicher Unterlage (IRHD=83) jeweils auf der Unter- und Oberseite mit 5, 10 und 20 bar Anpressdruck gemessen.

Die Abbildungen 3.4-13 und 3.4-14 zeigen eine erstaunlich gute Übereinstimmung der BEN-Ra[μm]- und PPS[μm]-Werte. Die deutlich weichere Bekk-Gummiplatte sorgt mit steigendem Anpressdruck für geringere BEN-Ra[μm]-Werte als PPS[μm]-Werte.

Das wird besonders deutlich an dem satinierten NKP 6-Muster mit PPS-Werten zwischen 2,5 μm und 3,5 μm . In die gleiche Richtung wirkt auch der 150 μm breite Messring des Bendtsen-Gerätes im Vergleich zu dem 51 μm breiten Messring des PPS-Gerätes.

Auch dieser Vergleich der Rauheit in μm als BEN-Ra- und PPS-Werte bestätigt, dass es sinnvoll ist, die Bendtsen-Werte von ml/min in μm umzurechnen. Es ist schwer zu verstehen, weshalb dies nicht für die Bendtsen- und Bekk-Werte seit langem geschieht.

Hinzu kommt der erneute Hinweis, dass harte Unterlagen insbesondere bei höheren Anpressdrücken die Rauheit der Papiere und ihre Glättbarkeit im Messgerät deutlicher unterscheiden als weiche Unterlagen.

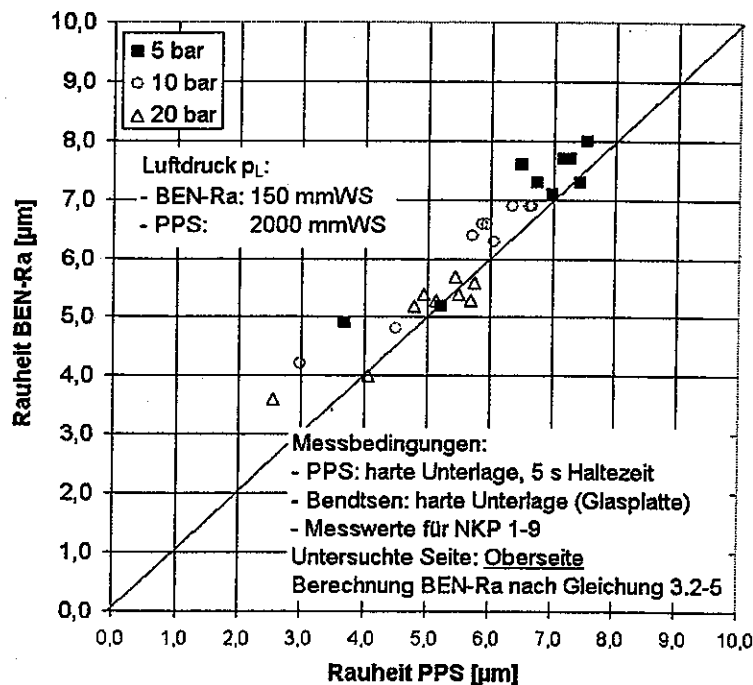


Abbildung 3.4-13: Gegenüberstellung BEN-Ra (150 mm WS) und PPS (2000 mm WS) der OS mit harter Unterlage – wobei die harte Unterlage PPS eine mit Polyethylen-Folie überzogene Korkplatte ist, und den erwarteten Trend einer niedrigeren Rauheit im Vergleich zu Bendtsen-Rauheit verfälscht

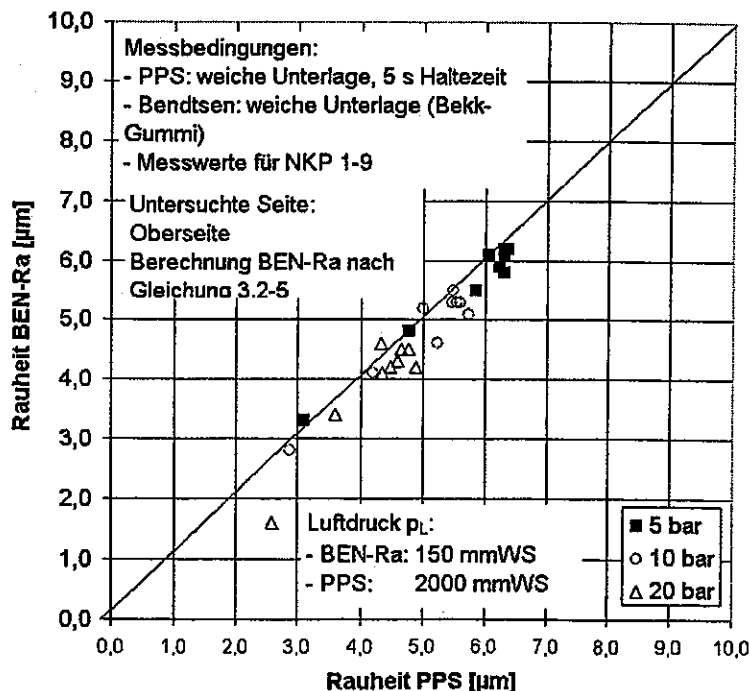


Abbildung 3.4-14: Gegenüberstellung BEN-Ra (150 mm WS) und PPS (2000 mm WS) der OS mit weicher Unterlage

3.4.3 Druckvariabler Kontaktanteil (KAM)

3.4.3.1 Einführung

Das Kontaktanteil-Messgerät wurde mit einer Zusatz-Druck-Einrichtung versehen, die Anpressdrücke von (0,2) 0,4 – 2,5 bar ermöglicht - zusätzlich zu den üblichen Anpressdrücken von 10, 25 und 50 (75) bar. Nach Einbau eines Digitalvoltmeters gelingt es auch, KAM-Werte ab 0,1% zu messen.

Neben der üblichen Kontaktflächen-Mikroformations-Darstellung kann zusätzlich die Kontaktflächen-Mikroformation mit einer Auflösung von 10 µm analysiert werden.

Die Ursachen für die Ausbildung von Mikro-Kontaktflächen-Strukturen eines Papiers können durch Vergleich mit bekannten Strukturen von Papiermaschinen-Bespannungen - z. B. PM-Sieben - oder mit ihren Mikro-Kontaktflächen-Strukturen - z. B. von PM-Pressfilzen - oder durch Vergleich mit den Strukturen der Papierstoffe, der Transparenz- und Flächenmassen-Mikroformation analysiert werden.

Zusätzlich soll die Abhängigkeit des KAM-Wertes und seiner Mikroformation von harten und weichen Unterlagen - auch von (unendlich dicken) Stapeln aus dem jeweiligen Papier - untersucht werden.

3.4.3.2 Kontaktanteil bei den üblichen Anpressdrücken

Für die Glättebestimmung als Kontaktanteil nach FOGRA wurden die Anpressdrücke von 10 bar, 25 bar, 50 bar und 75 bar (wobei 1 bar = 1 kp/cm²) gewählt. In den Abbildungen 3.4-15 bis 3.4-18 ist die Zunahme des Kontaktanteils-Wertes für 6 Naturkopierpapiere und 4 gestrichene Kopierpapiere mit der Steigerung des Anpressdruckes von 10 bar bis 75 bar dargestellt. Der Kontaktanteil steigt im Regelfall bis zu Werten von 60% streng linear mit dem Anpressdruck. Bei höheren Kontaktanteil-Werten nimmt ihre Steigerung als Funktion des Anpressdruckes ab, so dass eine asymptotische Annäherung an den KAM-Wert = 100% deutlich wird.

Die Kontaktanteil-Werte der Naturkopierpapiere betragen bei 10 bar Anpressdruck 2-5% und wachsen dann linear an, um bei 75 bar Werte zwischen 14-25% zu erreichen. Die höchsten KAM-Werte weist in den Abbildungen 3.4-15 und 3.4-18 das NKP 6 auf, also das satinierte Papier mit 100 g/m² (alle anderen Papiere haben eine Flächenmasse von ca. 80 g/m²).

Das zweiseitig gestrichene und hochsatinierte GKP 1 mit 210 g/m² erreicht bei 75 bar Anpressdruck KAM-Werte von über 90% - vgl. Abbildung 3.4-17 und 3.4-18. Nur die gussgestrichene Seite des GKP 2, die schon bei 10 bar Anpressdruck fast 70% KAM aufweist, übertrifft das GKP 1 mit

einem KAM-Wert bei 75 bar von über 95%. Die ungestrichene Seite des GKP 2 - vgl. Abbildung 3.4-18 - weist ähnliche KAM-Werte wie die Naturkopierpapiere auf.

Die Glanzmesswerte in % können als Anteil der Mikroglanzfläche interpretiert werden. Nach dieser Definition soll die Mikroglanzfläche den Glanzwert 100 % besitzen, der restliche Flächenanteil den Glanzwert 0 %. Eine Beziehung mit dem Kontaktanteil nach FOGRA ist besonders bei niedrigem Anpressdruck zu erwarten. Die Abbildungen 3.4-19 und 3.4-20 zeigen diesen Zusammenhang am Beispiel der Kopier-, Ink-Jet- und Laserdruckpapiere (Muster A.1.2).

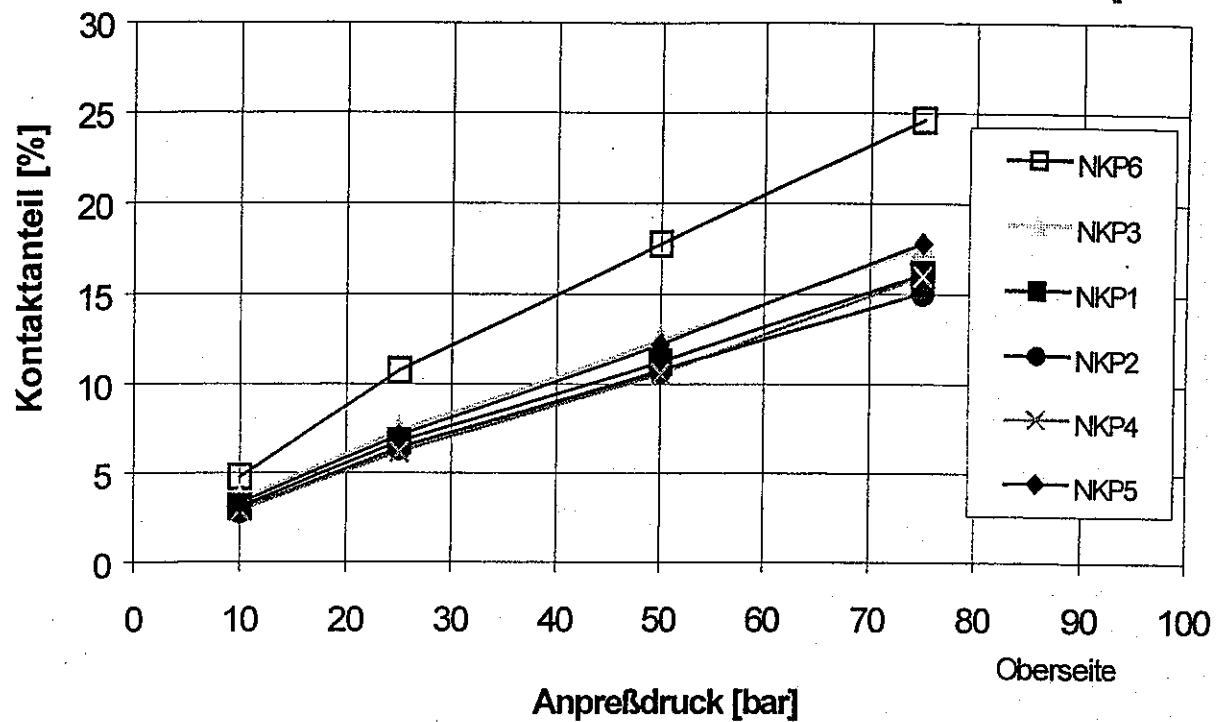


Abbildung 3.4-15: KAM-Werte der Oberseite (OS) der Naturkopierpapiere NKP1 bis NKP6

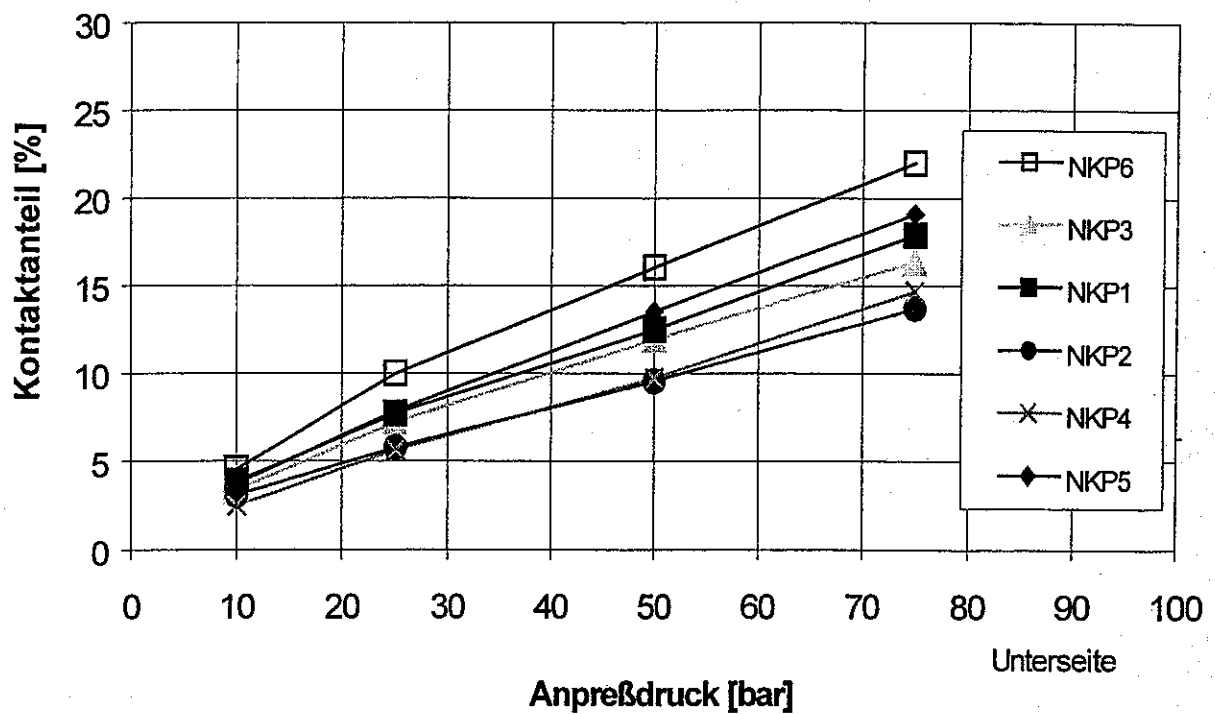


Abbildung 3.4-16: KAM-Werte der Unterseite (US) der Naturkopierpapiere NKP1 bis NKP6

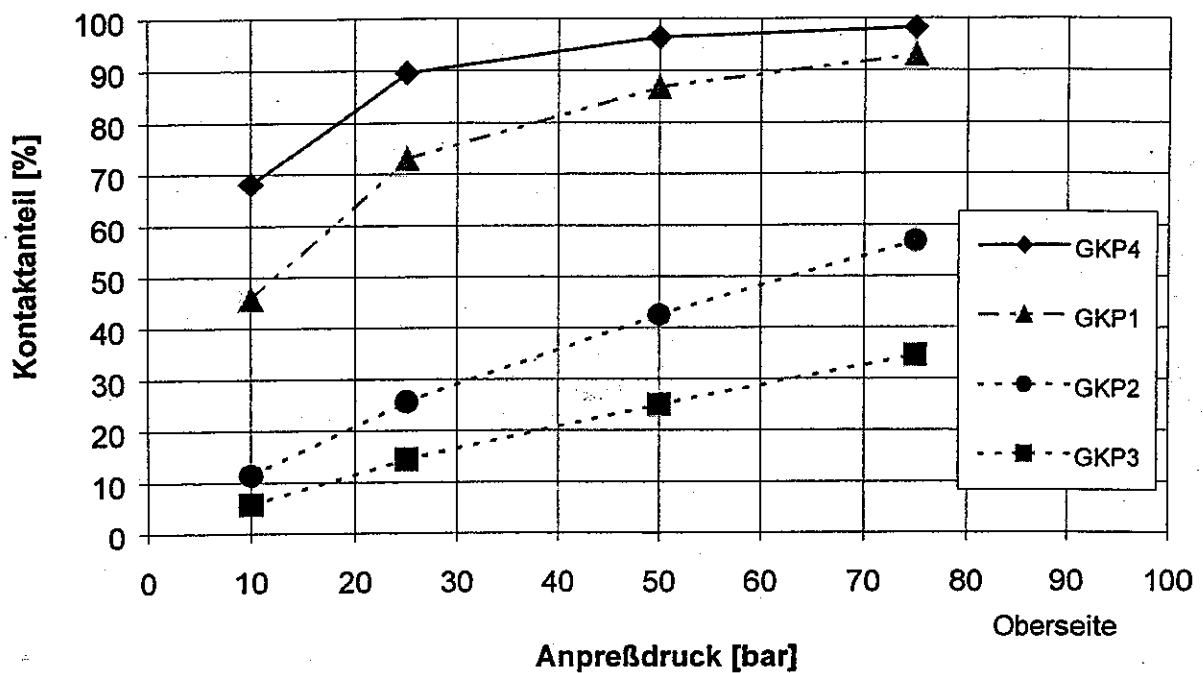


Abbildung 3.4-17: KAM-Werte der Oberseite (OS) der gestrichenen Kopierpapiere GKP1 bis GKP4

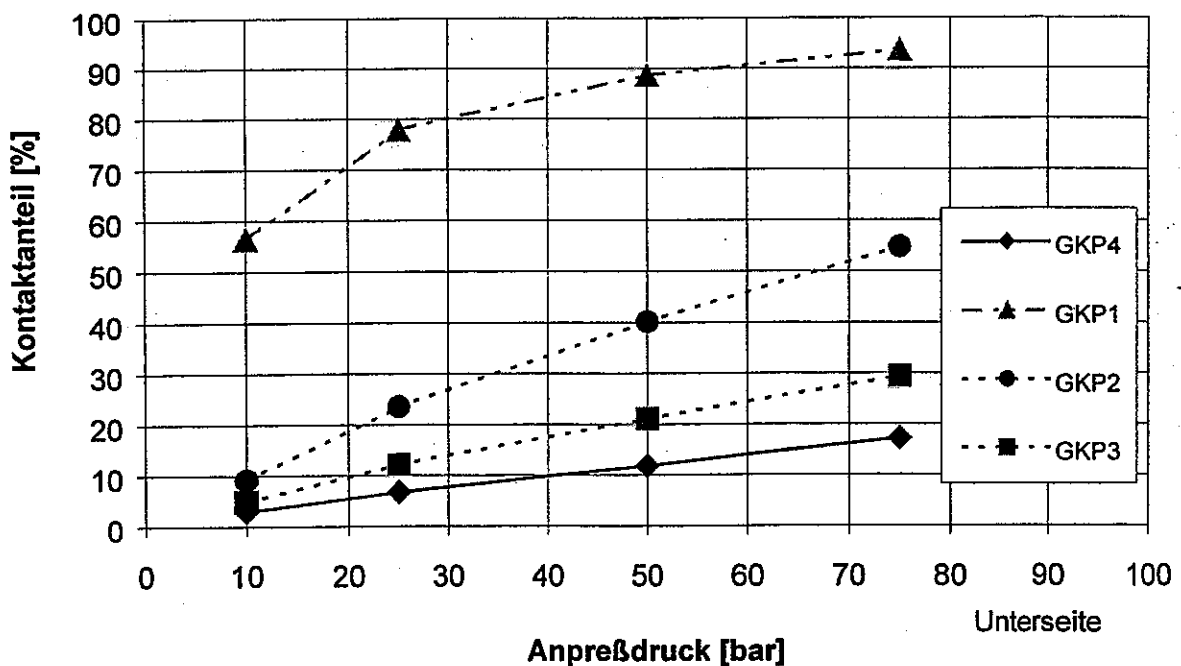


Abbildung 3.4-18: KAM-Werte der Unterseite (US) der gestrichenen Kopierpapiere GKP1 bis GKP4

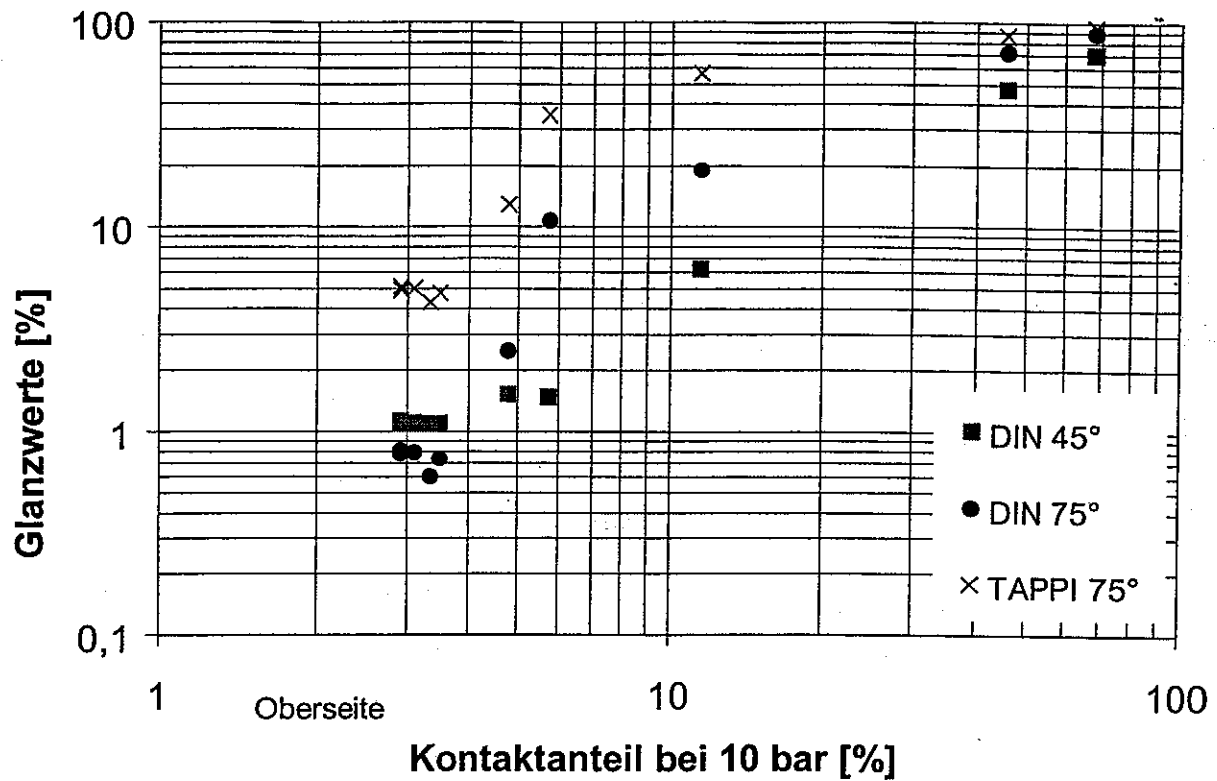


Abbildung 3.4-19: Beziehung zwischen KAM-Wert und verschiedenen Glanzwerten der Oberseite (Muster A.1.2, NKP1-NKP6, GKP1-GKP4)

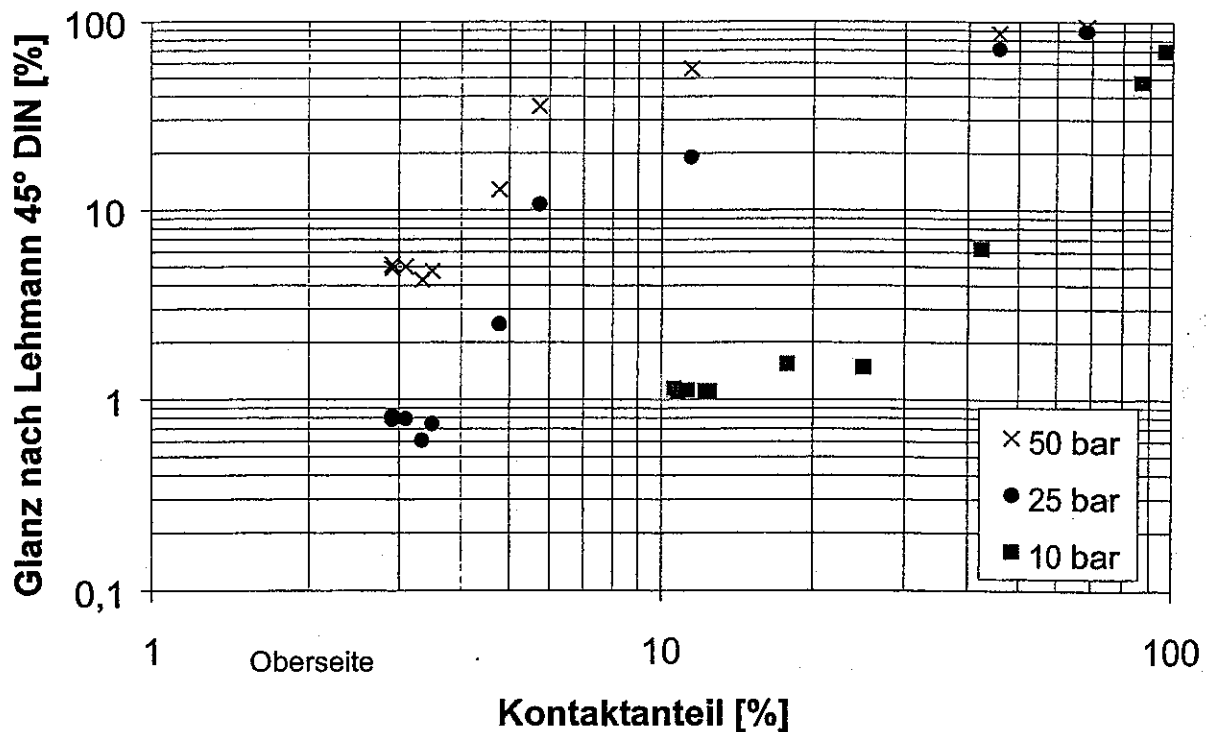


Abbildung 3.4-20: Beziehung zwischen KAM-Werten bei verschiedenen Anpressdrücken und den Glanzwerten nach DIN 45° der Oberseite (Muster A.1.2, NKP1-NKP6, GKP1-GKP4)

3.4.3.3 Druckvariabler Kontaktanteil mit Einfluss der Probenunterlage

Die Abbildungen 3.4-21 und 3.4-22 geben für die Oberseite (OS) von jeweils 3 ausgewählten Naturkopierpapieren (NKP2, NKP3 und NKP7-sat), sowie ein gestrichenes Kopierpapier (GKP3) die Kontaktanteil-Werte zwischen 0,15% bis 30% wieder, die annähernd proportional mit den Anpressdrücken von 0,4 bar bis 75 bar steigen. Im Regelfall haben die gestrichenen Papiere höhere KAM-Werte als die ungestrichenen Papiere.

Bei höheren Anpressdrücken (>10 bar) ist der Kontaktanteil-Wert für Papiere auf der weichen Bekk-Gummi-Unterlage höher als auf der harten Acrylglas-Unterlage – vgl. Abbildung 3.4-23 – 3.4-58. Diese Abbildungen zeigen auch, dass die Kontakt-Anteil-Formation durch eine weiche Unterlage verbessert wird.

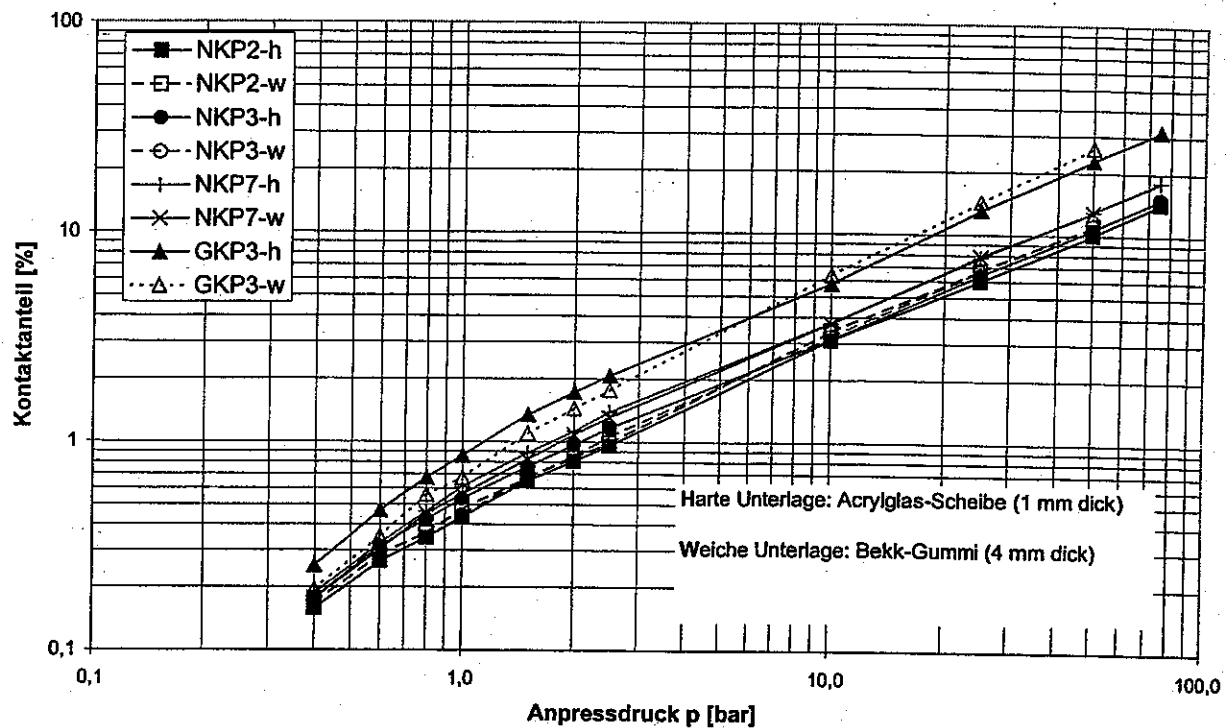


Abbildung 3.4-21: KAM-Werte der Oberseiten (OS) als Funktion des Anpressdruckes

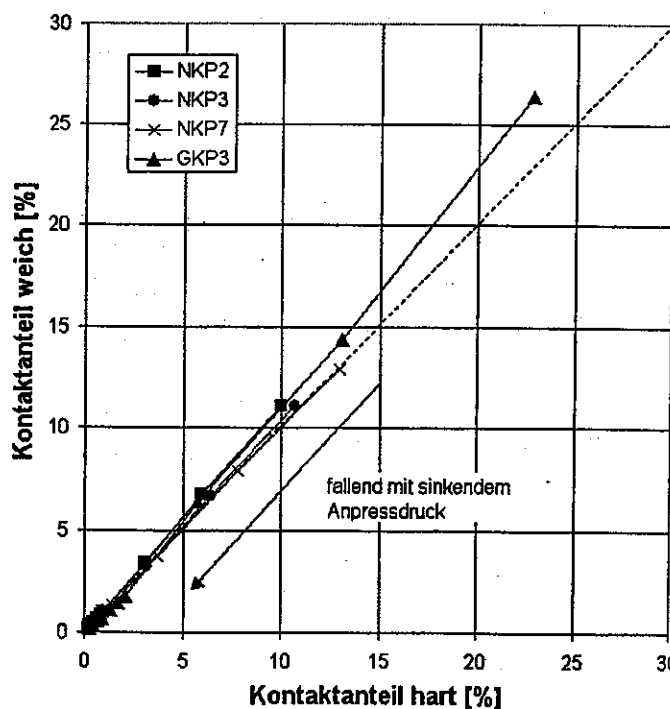


Abbildung 3.4-22: Einfluss der weichen und harten Unterlage auf KAM

KAM – Mikroformation

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)

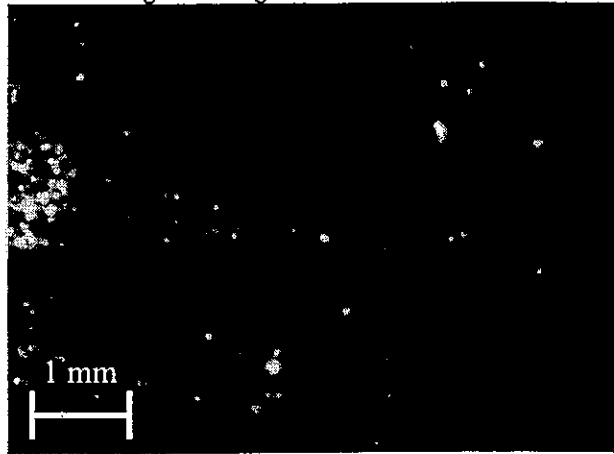
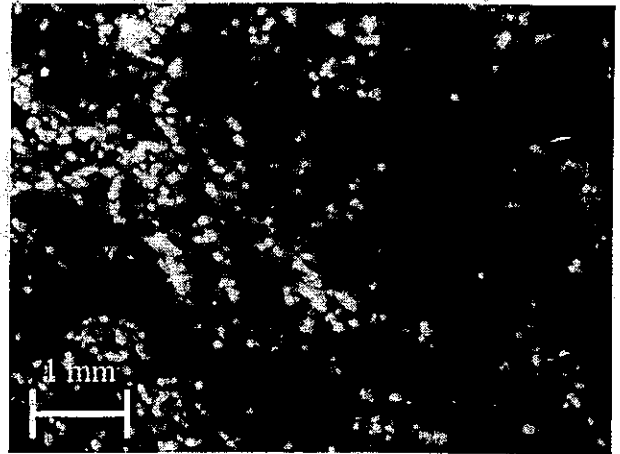
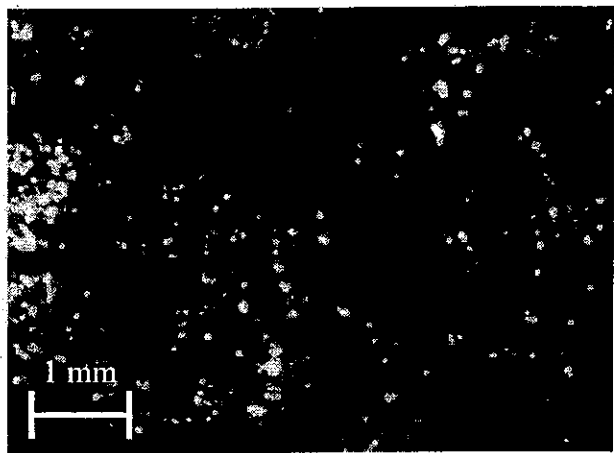
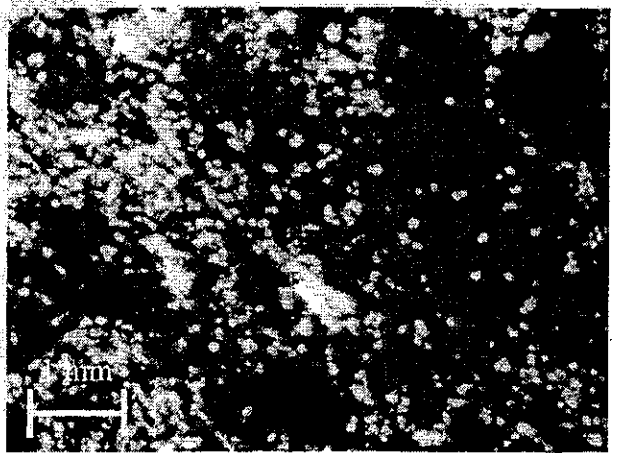
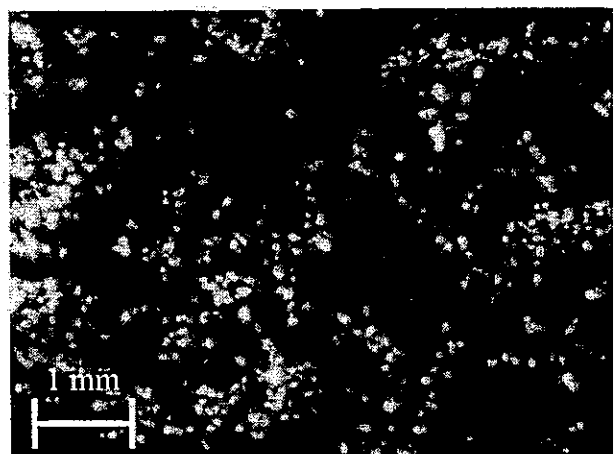
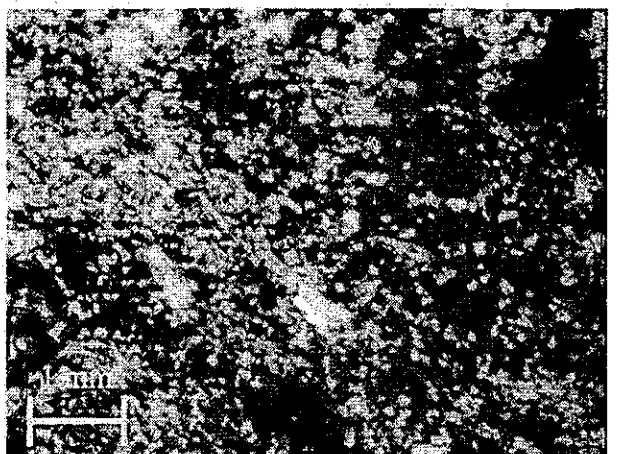
Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglasscheibe

Oberseite

weiße Stellen = Kontaktstelle

Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.

Beleuchtungsrichtung: in MD ←

**Abbildung 3.4-23:** NKP2; 0,4 bar; hart; KAM = 0,16%**Abbildung 3.4-26:** NKP2; 10 bar; hart; KAM = 3,09%**Abbildung 3.4-24:** NKP2; 1,0 bar; hart; KAM = 0,43%**Abbildung 3.4-27:** NKP2; 25 bar; hart; KAM = 5,99%**Abbildung 3.4-25:** NKP2; 2,5 bar; hart; KAM = 0,96%**Abbildung 3.4-28:** NKP2; 75 bar; hart; KAM = 14,24%

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)
 Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglasscheibe
 Oberseite
 weiße Stellen = Kontaktstelle
 Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.
 Beleuchtungsrichtung: in MD ←

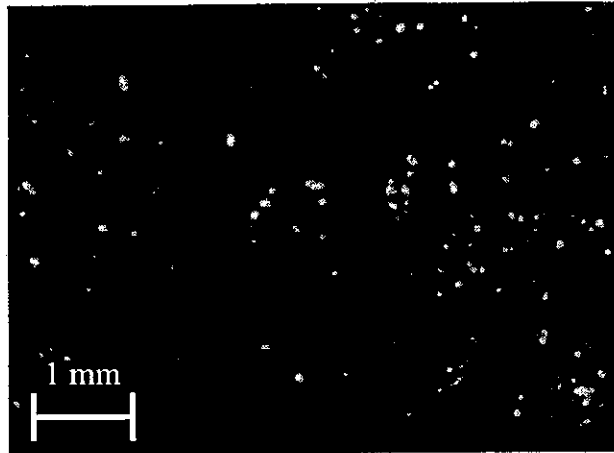


Abbildung 3.4-29: NKP7 (satiniered); 0,4 bar; hart;
 KAM = 0,19%

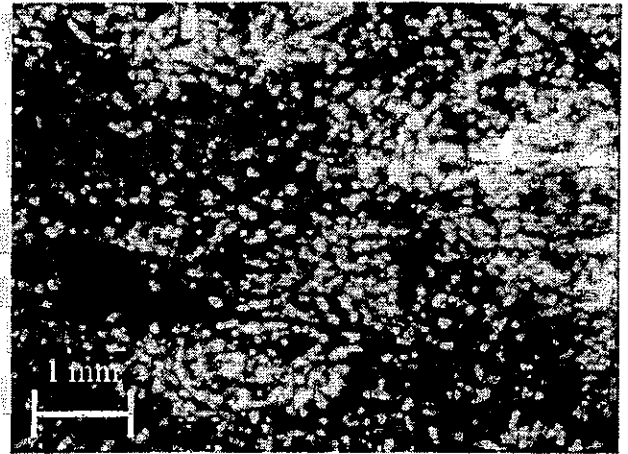


Abbildung 3.4-32: NKP7 (satiniered); 10 bar; hart;
 KAM = 3,74%

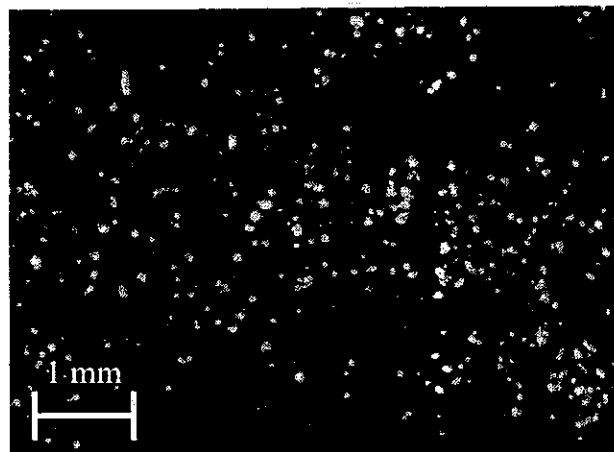


Abbildung 3.4-30: NKP7 (satiniered); 1,0 bar; hart;
 KAM = 0,61%

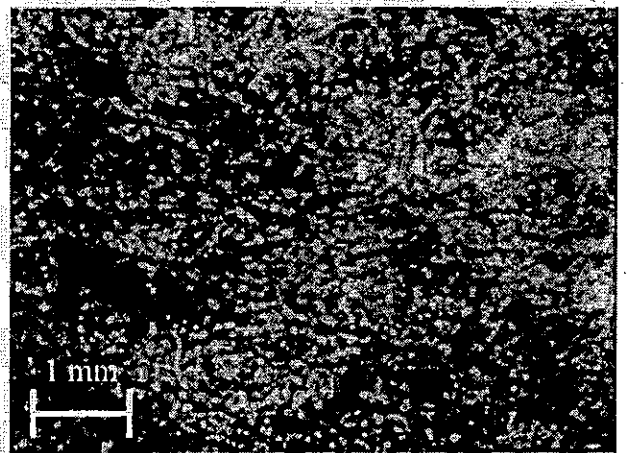


Abbildung 3.4-33: NKP7 (satiniered); 25 bar; hart;
 KAM = 7,80%

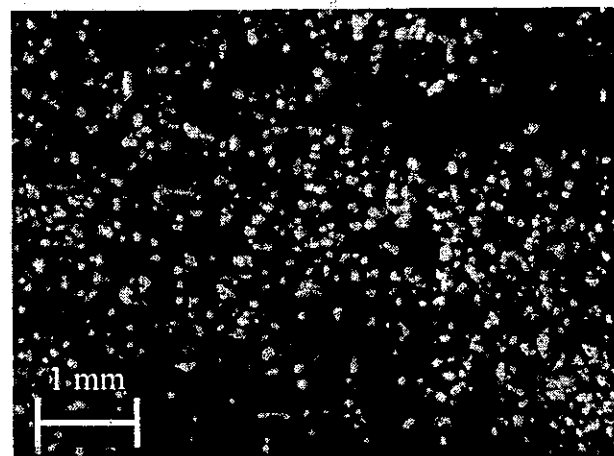


Abbildung 3.4-31: NKP7 (satiniered); 2,5 bar; hart;
 KAM = 1,39%

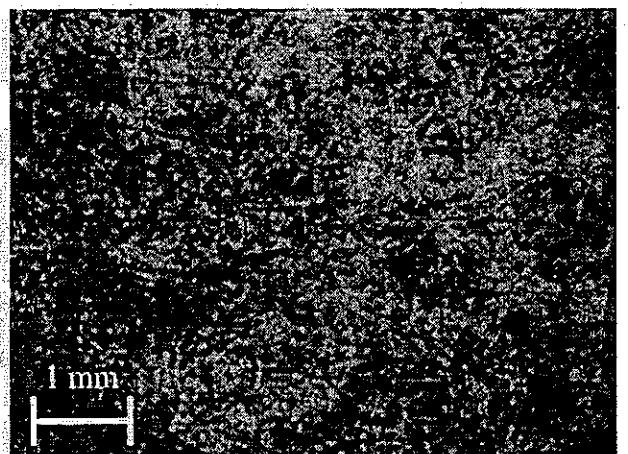


Abbildung 3.4-34: NKP7 (satiniered); 75 bar; hart;
 KAM = 18,16%

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)
 Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglascheibe
 Oberseite
 weiße Stellen = Kontaktstelle
 Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.
 Beleuchtungsrichtung: in MD ←

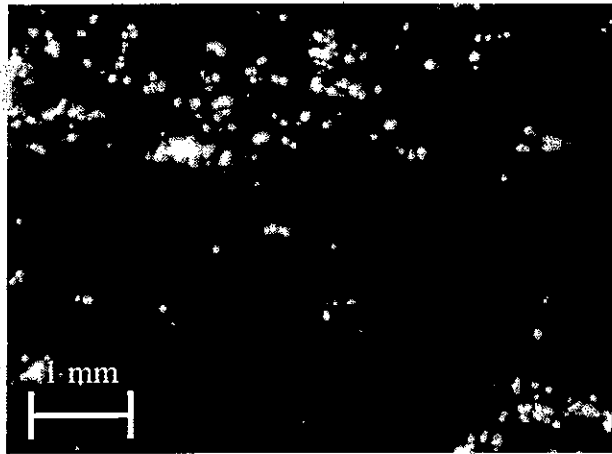


Abbildung 3.4-35: GKP3; 0,4 bar; hart; KAM = 0,25%



Abbildung 3.4-38: GKP3; 10 bar; hart; KAM = 5,77%

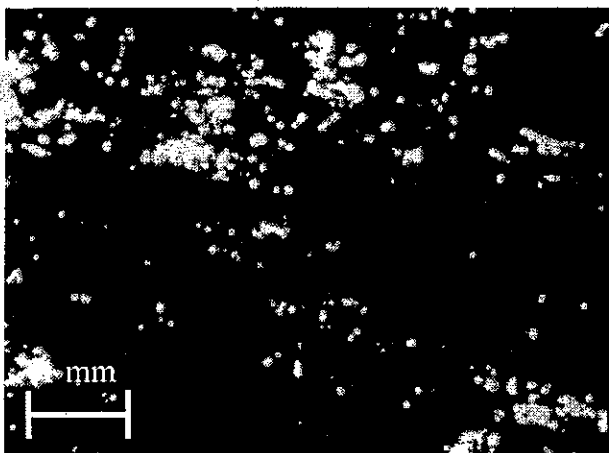


Abbildung 3.4-36: GKP3; 1,0 bar; hart; KAM = 0,86%

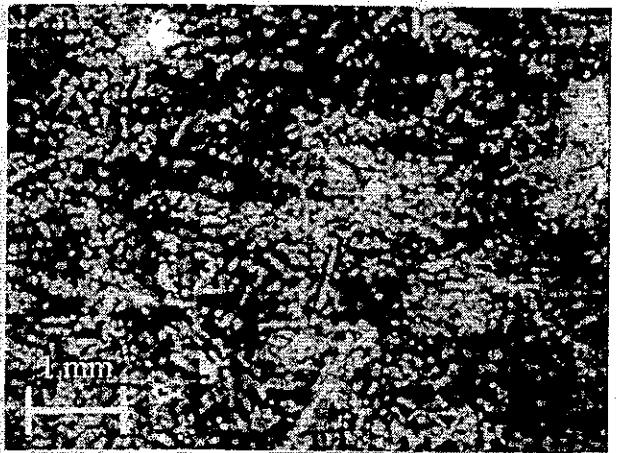


Abbildung 3.4-39: GKP3; 25 bar; hart; KAM = 13,08%

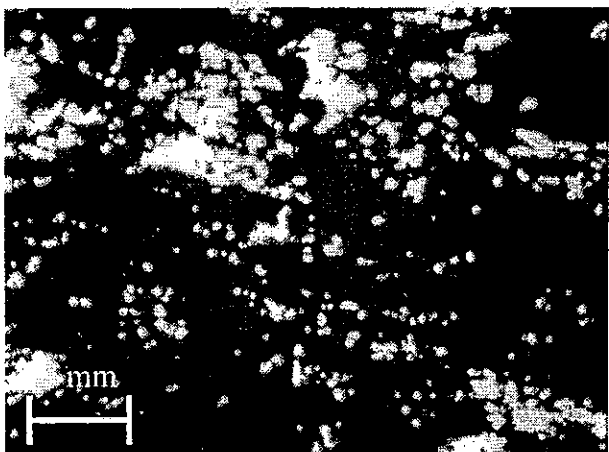


Abbildung 3.4-37: GKP3; 2,5 bar; hart; KAM = 2,07%

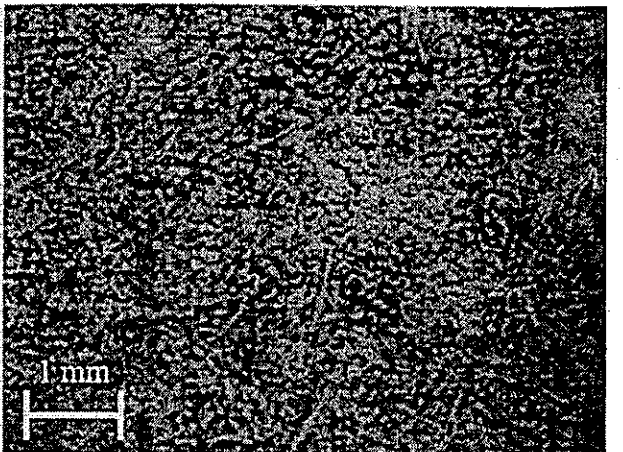


Abbildung 3.4-40: GKP3; 75 bar; hart; KAM = 31,68%

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)
Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglasscheibe
Weiche Unterlage = 4 mm dicker BEKK-Gummi
Oberseite
weiße Stellen = Kontaktstelle
Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.
Beleuchtungsrichtung: in MD ←

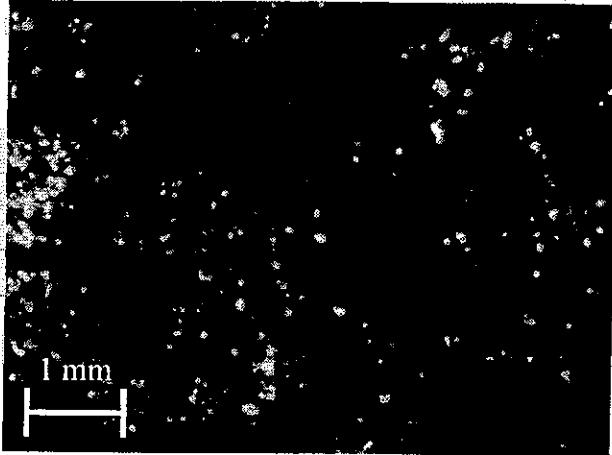


Abbildung 3.4-41: NKP2; 1,0 bar; hart; KAM = 0,43%

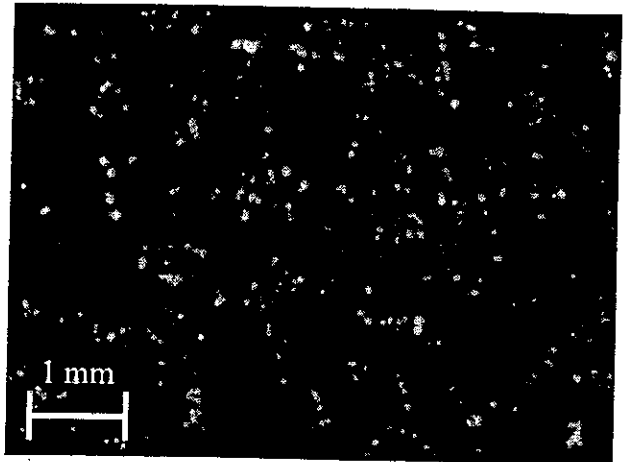


Abbildung 3.4-44: NKP2; 1,0 bar; weich; KAM=0,47%

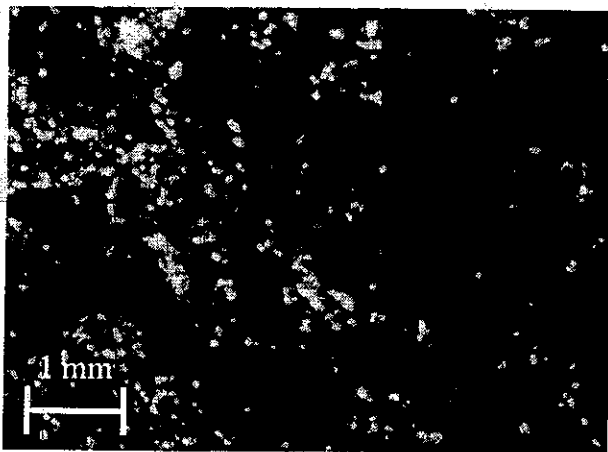


Abbildung 3.4-42: NKP2; 10 bar; hart; KAM = 3,09%

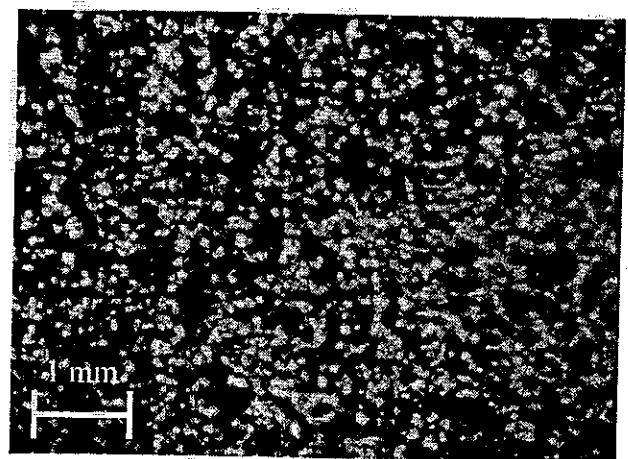


Abbildung 3.4-45: NKP2; 10 bar; weich; KAM=3,40%

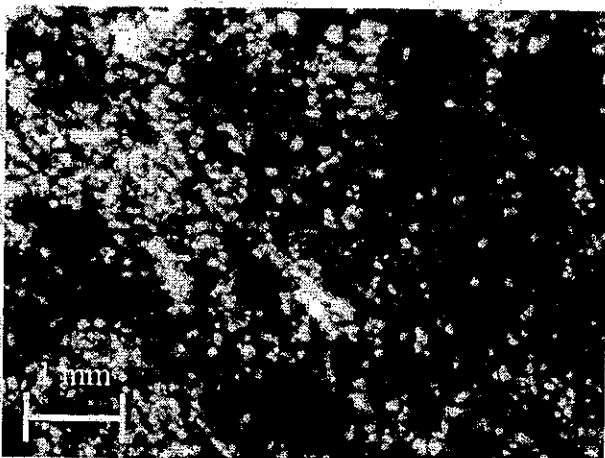


Abbildung 3.4-43: NKP2; 25 bar; hart; KAM = 5,99%

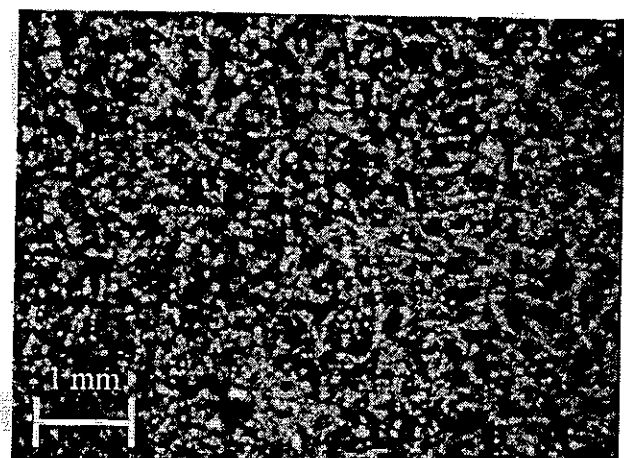


Abbildung 3.4-46: NKP2; 25 bar; weich; KAM=6,75%

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)
 Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglasscheibe
 Weiche Unterlage = 4 mm dicker BEKK-Gummi
 Oberseite
 weiße Stellen = Kontaktstelle
 Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.
 Beleuchtungsrichtung: in MD ←

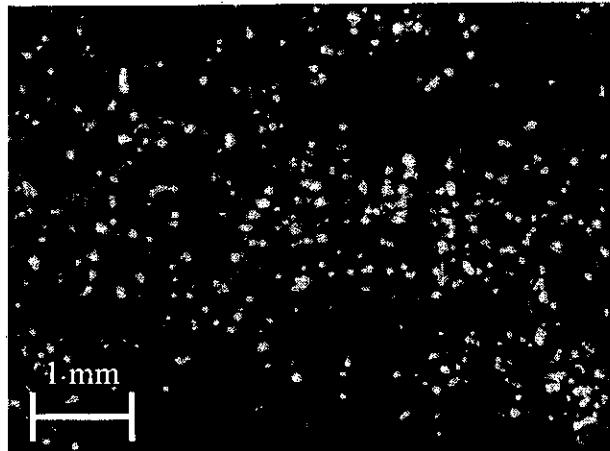


Abbildung 3.4-47: NKP7 (sat); 1,0 bar; hart;
 KAM=0,61%

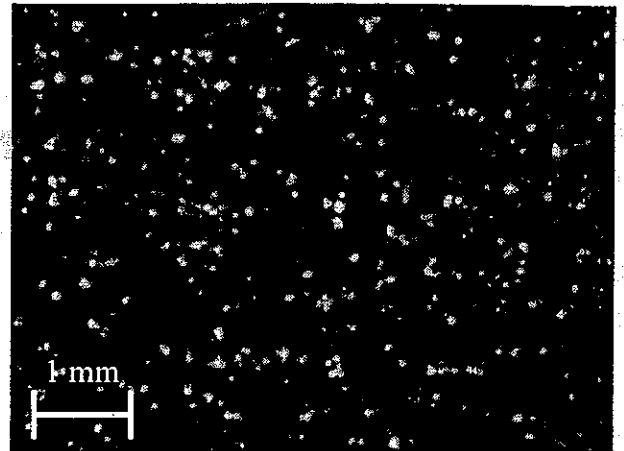


Abbildung 3.4-50: NKP7 (sat); 1,0 bar; weich;
 KAM=0,56%

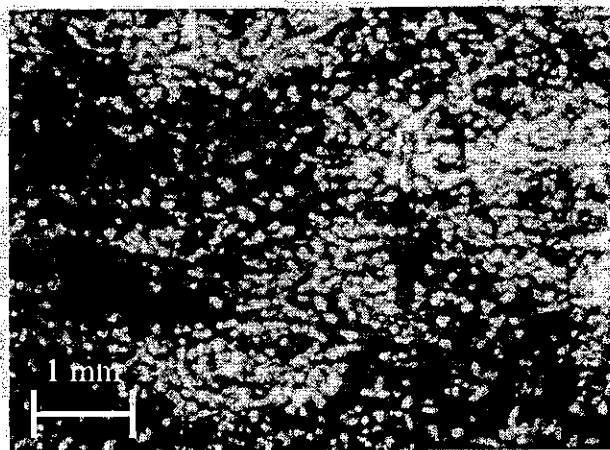


Abbildung 3.4-48: NKP7 (sat); 10 bar; hart;
 KAM=3,74%

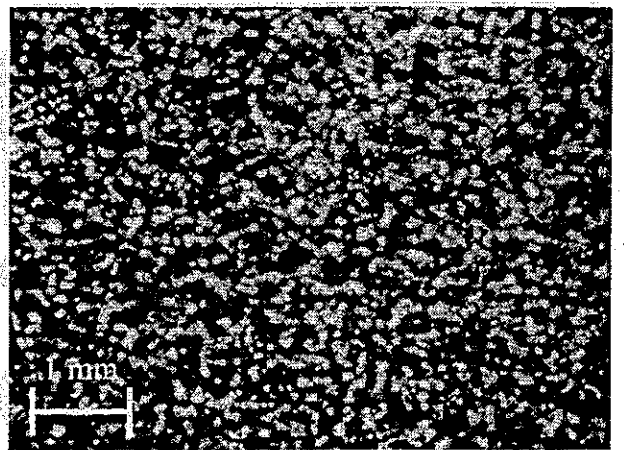


Abbildung 3.4-51: NKP7 (sat); 10 bar; weich;
 KAM=3,72%

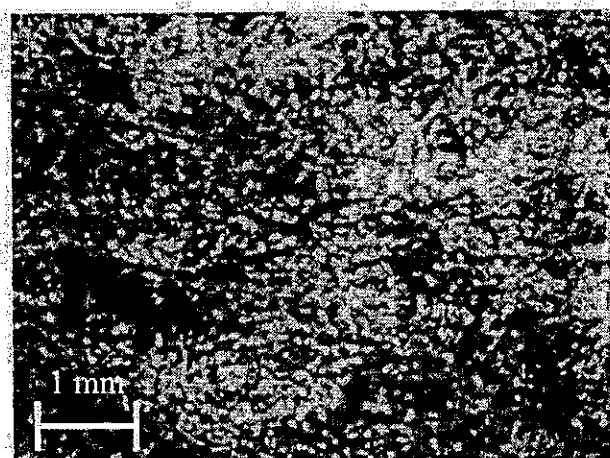


Abbildung 3.4-49: NKP7 (sat); 25 bar; hart;
 KAM=7,80%

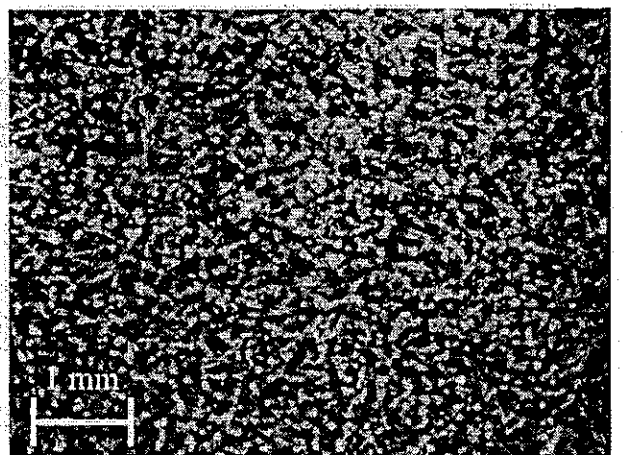


Abbildung 3.4-52: NKP7 (sat); 25 bar; weich;
 KAM=7,87%

Kontaktanteil-Bildaufnahme (5,9 mm x 4,4 mm)
 Harte Unterlage = 1mm dicke Acrylglasscheibe
 Weiche Unterlage = 4 mm dicker BEKK-Gummi
 Oberseite
 weiße Stellen = Kontaktstelle
 Alle Bilder sind in CD↑ und MD↔ ausgerichtet.
 Beleuchtungsrichtung: in MD ←

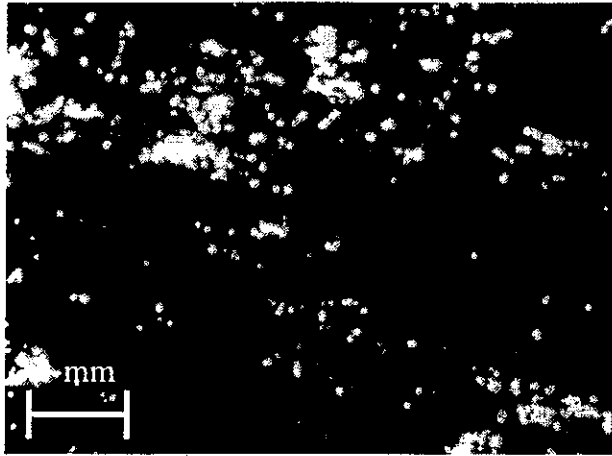


Abbildung 3.4-53: GKP3; 1,0 bar; hart; KAM = 0,86%

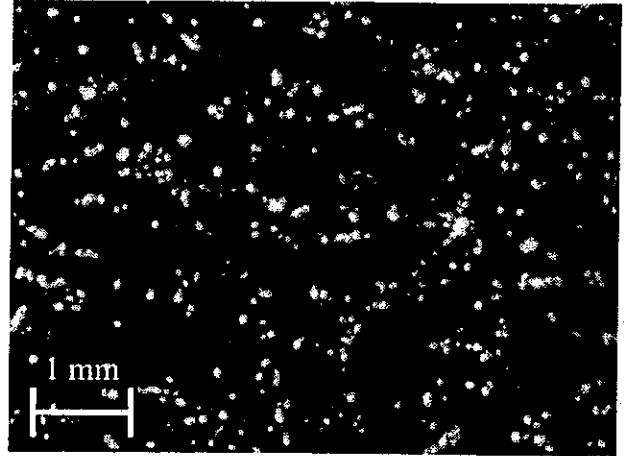


Abbildung 3.4-56: GKP3; 1 bar; weich; KAM = 0,67%

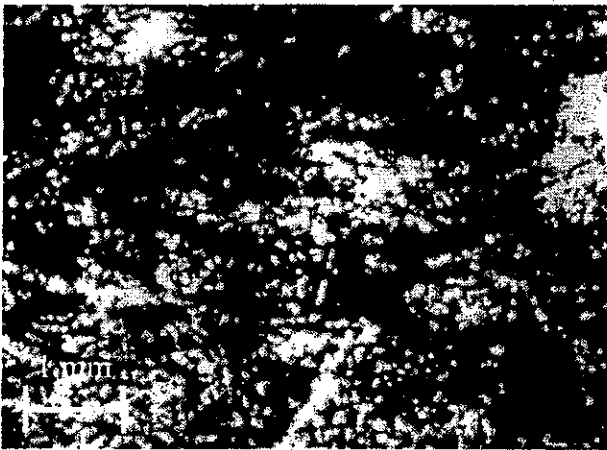


Abbildung 3.4-54: GKP3; 10 bar; hart; KAM = 5,77%

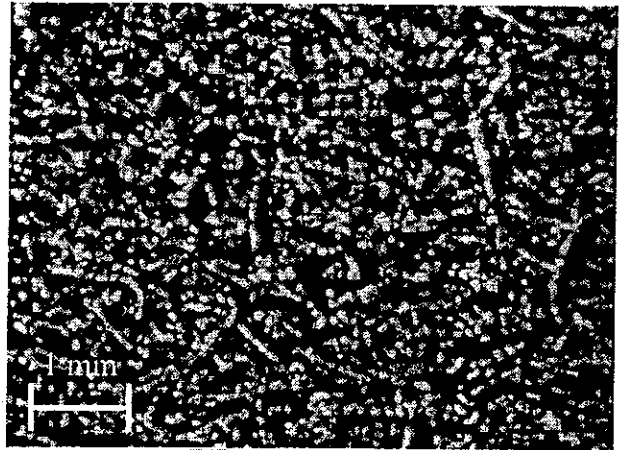


Abbildung 3.4-57: GKP3; 10 bar; weich; KAM=6,35%

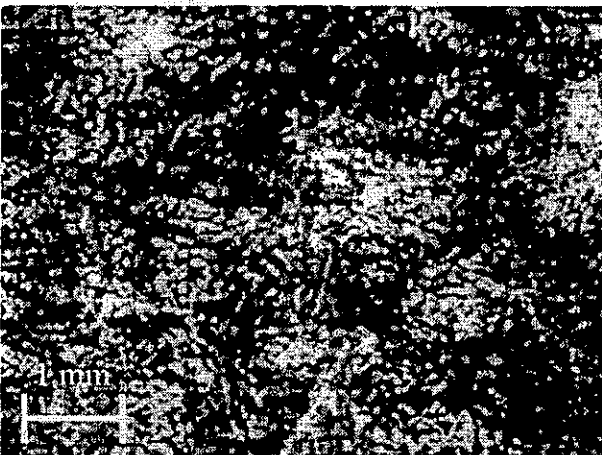


Abbildung 3.4-55: GKP3; 25 bar; hart; KAM = 13,1%

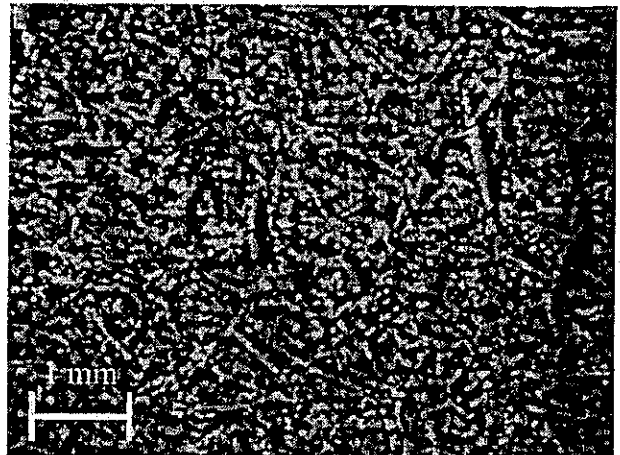


Abbildung 3.4-58: GKP3; 25 bar; weich; KAM=14,4%

3.5 TRACEIT®-Messergebnisse im Vergleich mit Bendtsen und PPS-Werten

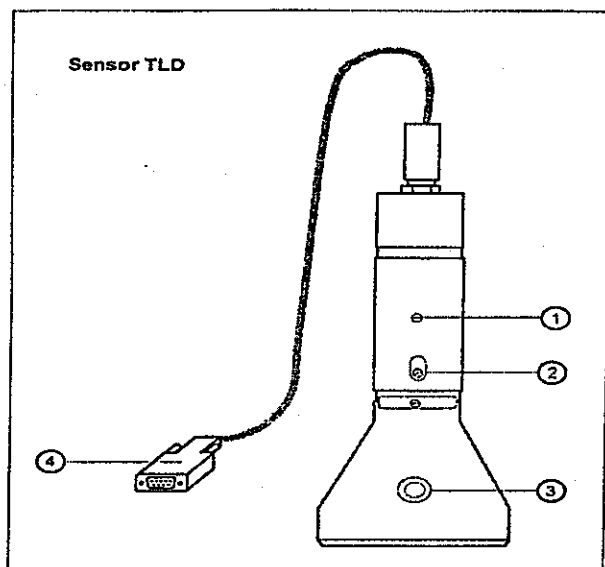


Abbildung 3.5-1: Zeichnung Sensorkopf

Mit dem optischen Oberflächenstruktur-Analysegerät TRACEIT stand ein berührungsloses Rauheitsmessverfahren zur Verfügung. Das Funktionsprinzip sowie wesentliche Eigenschaften des Gerätes sind bereits beschrieben – vg. 3.5-1. Wesentliche Bedeutung für die Rauheitsmessung haben hier die optischen Kennwerte R_a sowie in Grenzen R_z . Diese Werte wurden in MS-EXCEL-Tabellen eingelesen und statistisch weiterverarbeitet.

Die weiteren Kennwerte konnten entweder im Gesamtzusammenhang der Arbeit nicht betrachtet werden oder erschienen vage. Das trifft vor allem auf die ausgegebenen Profilkurven zu, deren Maßstab im wesentlichen unklar blieb. Eine weitere Erkenntnis war, dass sich bedingt durch das Messverfahren Farbabweichungen auf das Messergebnis auswirken. Eine relevante Fehlerquelle war dies vor allem bei den Mustern A.1.1, unter denen auch „braune“ oder gefärbte Papiere waren. Einen weiteren Mangel des Verfahrens bildet die Erkennung von Schmutzpunkten als Erhöhung bzw. Vertiefung. Dies war allerdings, wie auch die Farbabweichung, beim Ausprüfen von „hochweißen“ Kopierpapieren nicht relevant.

Der Durchlicht-Modus wurde genutzt, um Bilder zur Beurteilung der Mikro-Flächenmassenformation anzufertigen. Hier zeigte sich, dass die Messfläche von 4 x 4 mm zur Erkennung wesentlicher Mängel im Papier, wie Filz- oder Siebmarkierungen zu klein ist.

Beim Messen der Rauheitswerte stellte sich heraus, dass streng auf die Messrichtung geachtet werden muss. Das Verhältnis Längs/Quer-Wert der Oberflächenrauheit LQ_{Ra} kann zur Kennzeichnung der Rauheitsformation der Papieroberfläche

genutzt werden. Der Rauheitswert längs wird aus Profillinien entwickelt, die parallel zur Längsachse verlaufen.

Die Bedienungsanleitung des Gerätes enthält keine Angaben zur erforderlichen Anzahl der Messungen. Von den durchgeführten Messungen sind ohnehin aus o.a. Gründen nur die holzfreien, weißen Sorten relevant. Folglich werden nun nur Papiere aus der Sammlung A.1.2 betrachtet. Da jedoch die Längs- und Querrichtung gesondert betrachtet werden muss, sollen die Oberseiten von 3 markanten Beispielen für diesen Zweck Anwendung finden, deren statistische Auswertung in Abbildung 3.5-3 dargestellt ist.

Die Anzahl der Messungen in jeder Reihe betrug 10. Die dargestellten Werte lassen erkennen, dass die durchgeführten 10 Messungen entsprechend dem Vertrauensbereich bei den rauen Naturkopierpapieren nicht ausreichend zur Längs-/Querunterscheidung und sind. Angestrebt werden muss hier erscheint ein Vertrauensbereich von 0,2 μm .

Um die nötige Anzahl der Messungen abzuschätzen, wird die „Längs“-Messung mit dem „normalen“ Kopierpapiers IN06 der Sammlung A.1.1 herangezogen:

Anzahl der Messungen	= 20
Mittelwert $\bar{x}$	= 10,76 μm
Standardabweichung s	= 0,36 μm
Variationskoeffizient v	= 3,4 %
Vertrauensbereich VB	= 0,27 μm

Zusammenfassend ist dazu zu sagen, dass beim System TRACEIT für glatte/sehr glatte Papiere die Durchführung von 10 Messungen in jeweils Längs- und Querrichtung ausreichend ist. Für durchschnittliche Sorten sollten 20 Messungen je Richtung durchgeführt werden, bei rauen Sorten sind 25 oder 30 Messungen angebracht. Von den Papierproben sind je Papierseite die angegebene Anzahl der Messungen in Längs- und Querrichtung durchzuführen, jeweils Mittelwert $\bar{x}$, Standardabweichung s und Variationskoeffizient v zu bilden und gesondert anzugeben. Je Papierseite kann zur Kennzeichnung der Rauheitsverteilung das Längs/Quer-Verhältnis der R_a -Werte bestimmt werden.

Anschließend soll die Normalverteilung der R_a -Werte des TRACEIT-Gerätes nachgeprüft werden. Zur Verfügung standen dafür exemplarisch 50 Messwerte der Oberseite des gussgestrichenen Kopierpapiers GKP 4 (A.1.2), welche in Abbildung 3.5-4 über eine Normalverteilung aufgetragen wurde.

	NKP2		NKP6		GKP4	
	längs	quer	längs	quer	längs	quer
x [μm]	11,02	11,56	6,71	6,84	3,58	3,55
s [μm]	0,56	0,95	0,21	0,24	0,08	0,07
v [%]	5,08	8,22	3,13	3,51	2,23	1,97
VB (95%) [μm]	0,42	0,72	0,16	0,18	0,06	0,05

Abbildung 3.5-3: Statistische Auswertung TRACEIT

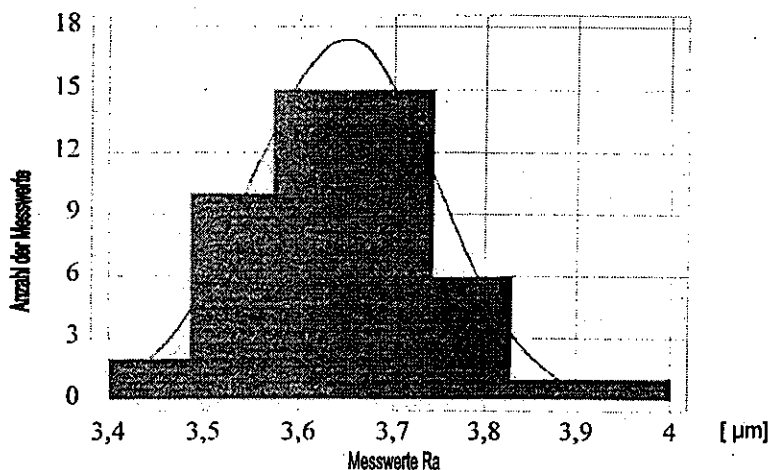


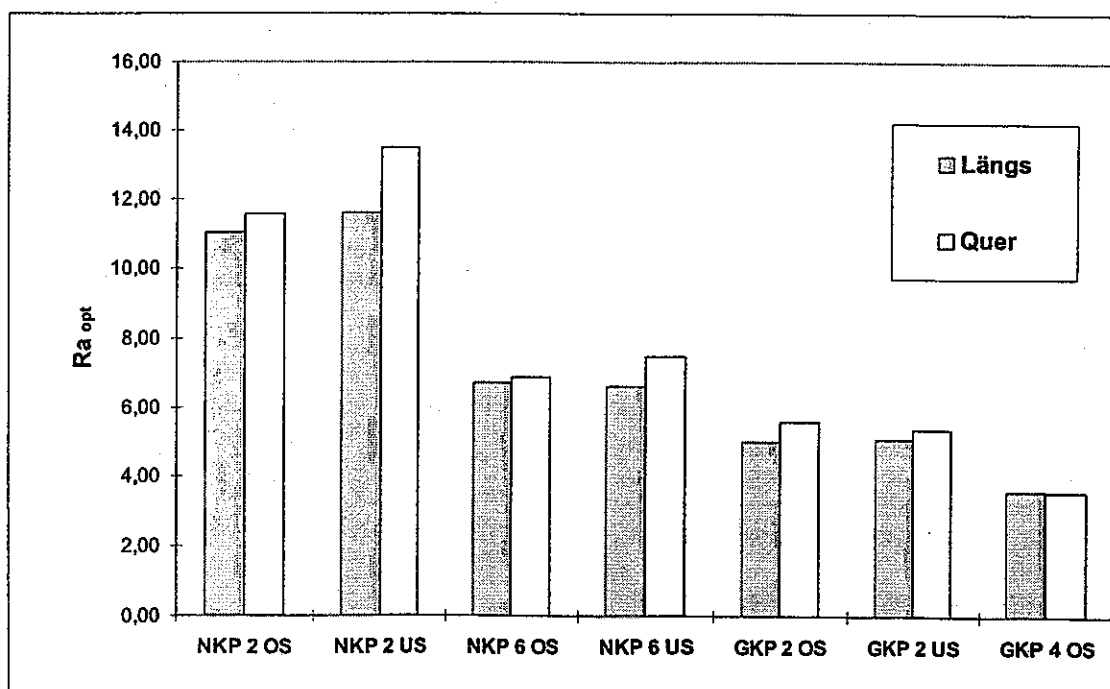
Abbildung 3.5-4: Verteilung der Messwerte des TRACEIT-Verfahrens für GKP 4

Angestrebt wurde eine breite Untersuchung dieser Sorten mit allen hier zur Verfügung stehenden Rauheitsmessverfahren, wobei vor allem die Zusammenhänge zu neuen bzw. modifizierten Verfahren im Vordergrund standen. Zu den durchgeführten Messungen ist im einzelnen anzumerken:

- Verfahren Bendtsen mod.: 20 Messungen je Papier OS/US, 60 mm WS Luftdruck p_L , Kufenanpressdruck p_k 0,2
- Verfahren PPS: 10 Messungen je Papier OS/US bei Messdrücken 5, 10, 20 bar, 5 Sekunden Haltezeit, weiche Unterlage

- TRACEIT: Messung der Rauheitswerte 10 Messungen je längs und quer je OS/US, dabei Anfertigung je eines Schräglichtbildes, deckungsgleich zu Oberseite längs ein Durchlichtbild

Im folgenden Diagramm ist anhand ausgewählter Kopierpapiere die unterschiedliche TRACEIT-Rauheit in Längs- und Querrichtung sowie Ober- und Unterseite dargestellt:


 Abbildung 3.5-2: Rauheit Ra_{opt} [μm] längs/quer

Je ungleichmäßiger die Oberfläche, desto größer scheint der Unterschied zwischen der meist kleineren Längs- und der größeren Quer-Rauheit zu sein. Der größte Unterschied tritt dabei bei NKP 2 auf. Je glatter die Papiere, desto geringer der Unterschied zwischen Längs- und Querwert. Beim gussgestrichenen GKP 4 ist dabei kein Unterschied mehr feststellbar.

Deutlich sichtbar ist die Tatsache, dass sich die Rauheitswerte bei den meisten Natur-Kopierpapieren auf etwa dem gleichen Niveau bewegen. Eine Ausnahme bildet dabei das intensiv satinierte NKP 6 mit 100 g/m², statt der üblichen 80 g/m².

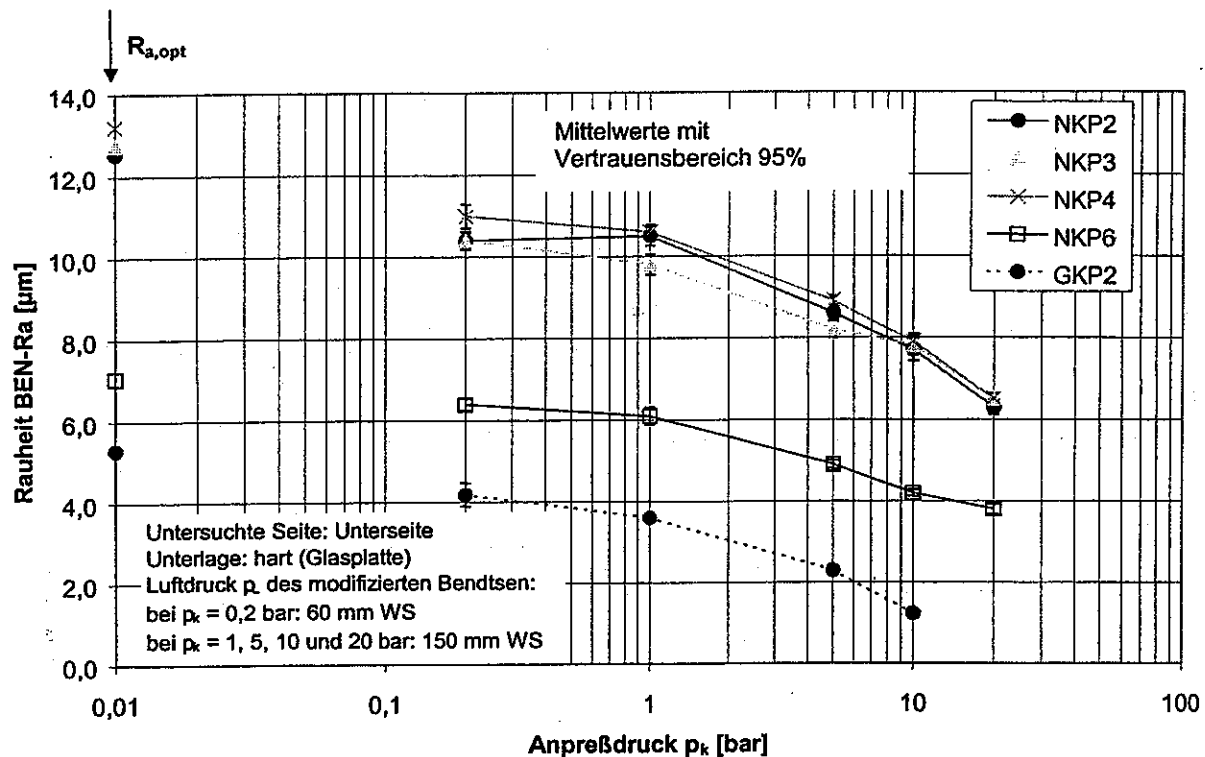


Abbildung 3.5-5: Rauheitswerte der Unterseite (US) auf harter Unterlage gemessen

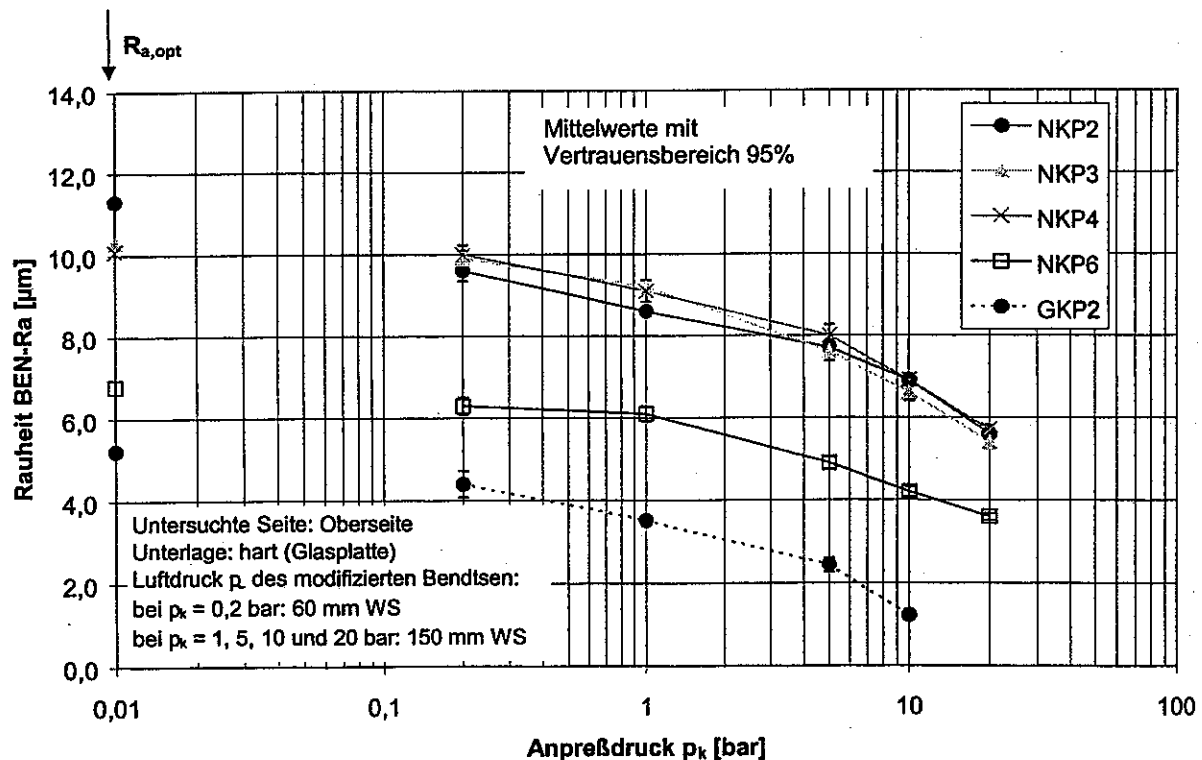


Abbildung 3.5-6: Rauheitswerte der Oberseite (OS) auf harter Unterlage gemessen

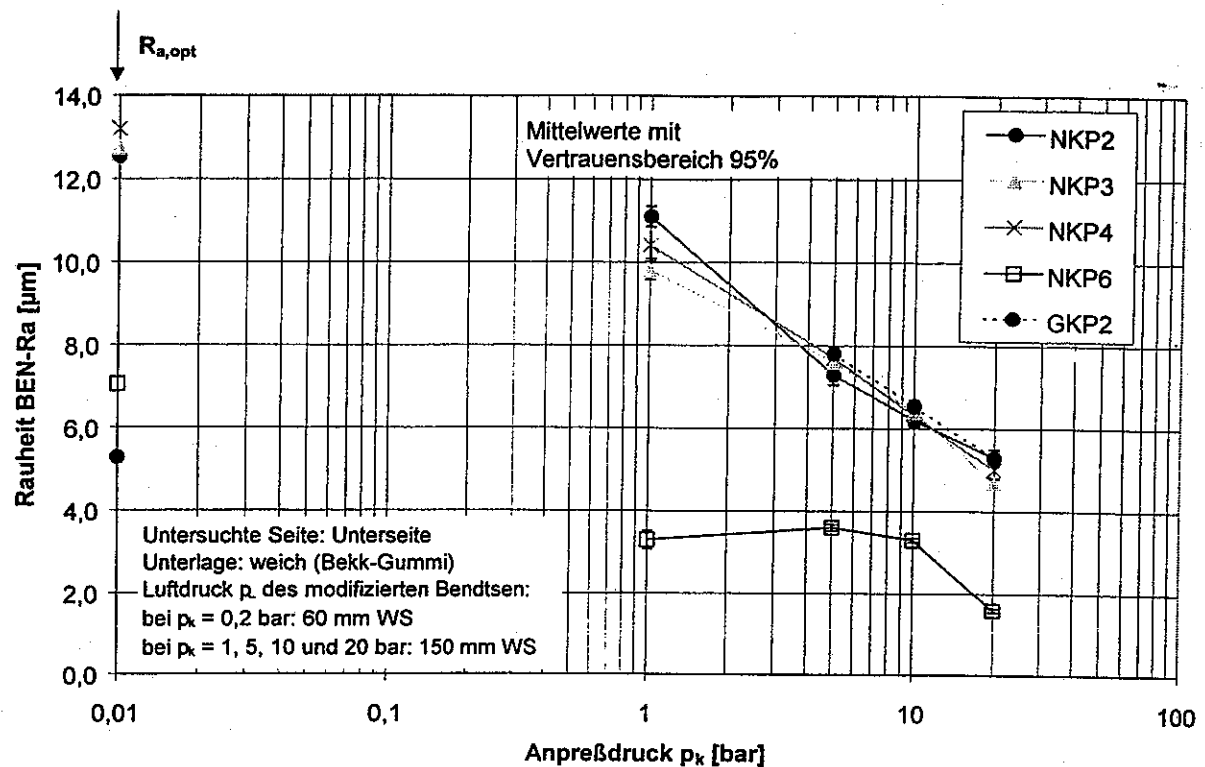


Abbildung 3.5-7: Rauheitswerte der Unterseite (US) auf weicher Unterlage gemessen

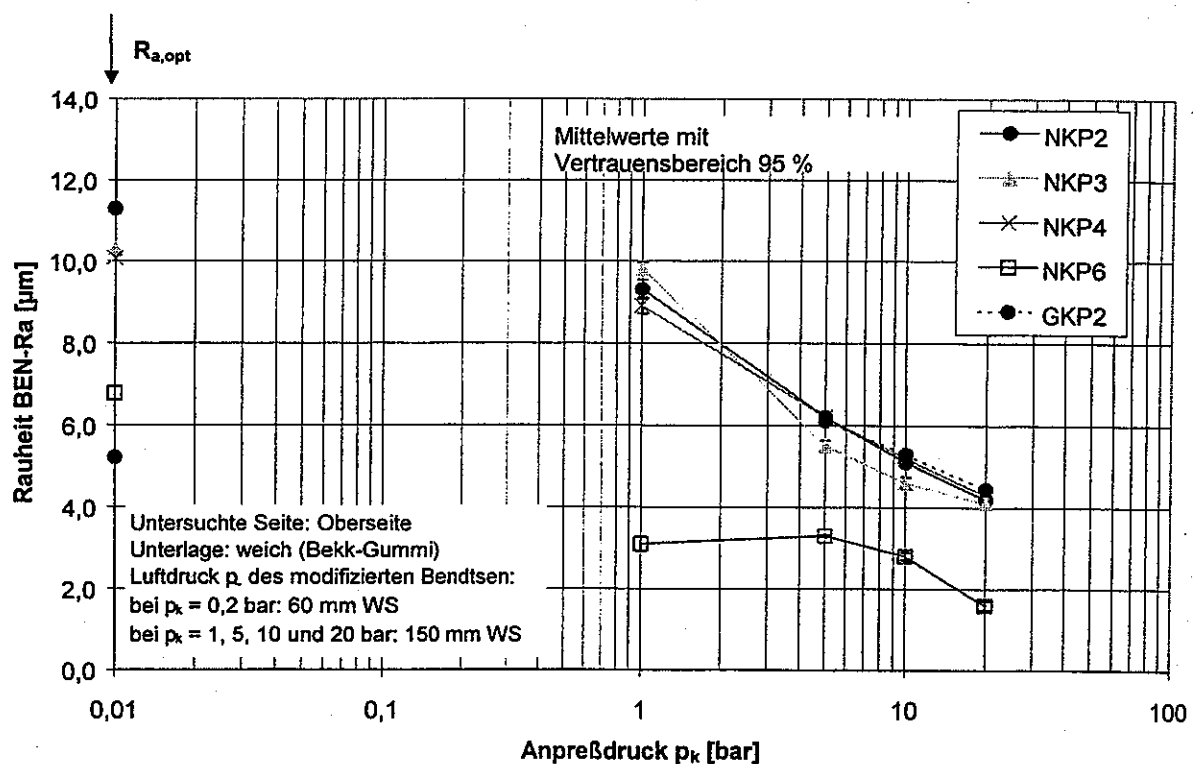


Abbildung 3.5-8: Rauheitswerte der Oberseite (OS) auf weicher Unterlage gemessen

Bekannt ist, dass die Rauheit von Zellstoff-Papieren durch die doppelte Faserwanddicke geprägt wird. Durch den Satinierkalandar können die Oberflächenrauheiten der außen liegenden Faserwände geglättet werden (vgl. Abbildung 3.5-). Entscheidend ist aber die plastische Kompression des Papiers, durch die die Oberseiten vieler außenliegender Fasern in einer Ebene feriert wird – und so die Rauheit verringert und der Kontaktanteil erhöht wird.

Nachhaltig und deutlich verringern lässt sich die Rauheit der Zellstoff-Papiere natürlich durch das Aufbringen der mikroporösen Schicht aus feinteiligen Mineralstoffen mit charakteristischen Abmessungen unter 1 μm .

Für die vorherrschenden nichtsatinierten Naturkopierpapiere gilt:

- Misst man die Rauheit mit den im PPS-Gerät üblichen Anpressdrücken von 10 bzw. 20 bar, so wird die Rauheit um bis zu 4 μm reduziert, gegenüber einer Messung bei 1 bar mit dem Bendtsen-Gerät.
- Reduziert man den Anpressdruck im Bendtsen-Gerät von 1 bar auf 0,2 (0,1) bar, so kann die Rauheit um 1 (2) μm höher gemessen werden.
- Erfreulicherweise ist die Rangfolge der $R_{a_{\text{opt}}}$ -Werte [μm], also der mit dem Anpressdruck 0 bar gemessenen Werte häufig dieselbe, wie die Rangfolge der Bendtsen-Rauheitswerte bei 0,2 (0,1) bar.

- Die $R_{a_{\text{opt}}}$ -Rauheitswerte können genauso groß wie die Bendtsen-Rauheitswerte bei 0,2 bar Anpressdruck sein, bei wenig vorkomprimierten Papieren aber auch bis zu 3 μm größer.
- Die polierte "harte" Glasplatte scheint mit Abstand die bestgeeignete Unterlage für die Rauheits-Messung zu sein, da sie leicht reproduzierbar ist und den geringsten Einfluss auf den Messvorgang ausübt. (Dies gilt nicht im Vergleich mit dem weichen Bekk-Gummi, sondern insbesondere auch mit den PPS-Unterlagen).

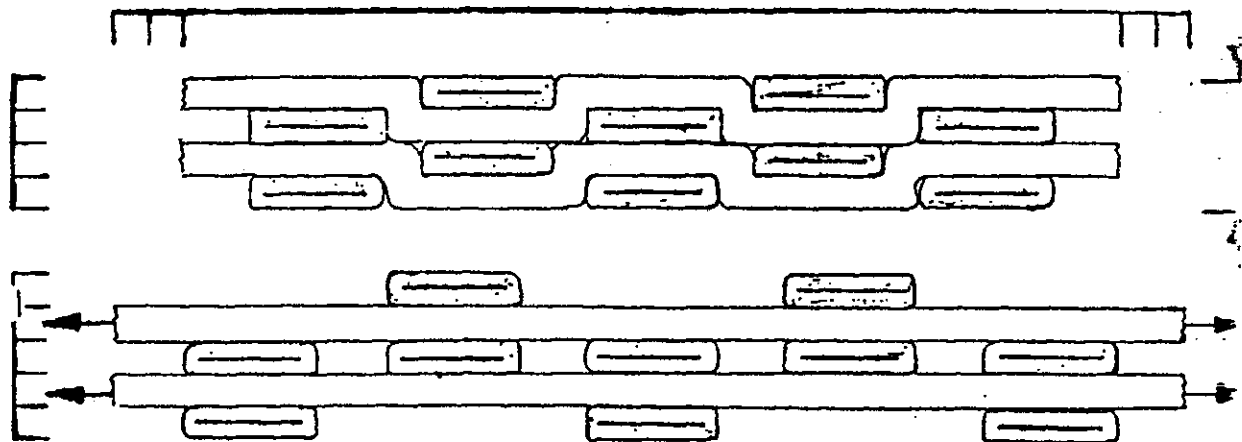


Abbildung 3.5-9: Darstellung Oberfläche mit zunehmender Komprimierung (unten: ohne Komprimierung, hohe Rauigkeit; oben: porenfrei komprimiert in z-Richtung, niedrige Rauheit, Schrumpfung in x- und y-Richtung)

3.6 Glanzmessergebnisse mit OS/US- und MD/CD-Vergleich

Mit dem Glanzmessgerät nach Lehmann wurden die Reflektometerwerte der Papiere bei Einstrahlwinkeln von 45° DIN-Norm, 75° DIN-Norm und 75° TAPPI-Norm ermittelt /8/, /11/, /19/.

Bei einem Messwertevergleich der Längs- und Querrichtung von beiden Seiten für Industripapiere (A.1.1) und Einstrahlungswinkel 45° (DIN-Norm) liegt die Differenz zwischen 0,01 % und 0,16 %. Ausnahmen bilden z.B. gussgestrichenes Papier, Kunstdruckpapier oder Kondensatorpapier, wobei geringe Messunterschiede zwischen den beiden Richtungen bestehen. Hier liegt die Differenz zwischen 0,3 % und 1,7 %.

Bei weiterem Messwertevergleich der längs-quer Richtungen von beiden Seiten für Kopier- und Laserdruckpapiere (A.1.2) besteht eine Differenz von 0,03 % bis 0,34 %.

Die Differenz zwischen den Messergebnissen der Ober- und Unterseiten von allen geprüften Mustern (bei 45°, DIN-Norm) liegt zwischen 0,01 % und 3 %. Eine Ausnahme besteht bei einseitigen Papieren. Wie erwartet, liegen bei dem gussgestrichenen Papier (IN05) die Ergebnisse bei 62,98 % -OS und bei 1,2 % -US, sowie bei dem GKP 4 (ebenfalls gussgestrichen) befinden sich die Ergebnisse bei 69,68 % - OS und bei 1,39 % - US. Ähnliches ist bei dem Messverfahren: DIN-Norm (Einstrahlungswinkel 75°) und TAPPI-Norm (45°) zu beobachten.

In der Abbildung 3.6-1 sind die Glanzwerte nach den genormten Reflektometer-Messverfahren DIN (45° und 75° Einstrahlwinkel), TAPPI (75°) für Oberseite (längs/quer) zusammengefasst.

Für ausgewählte Kopier-, Laserdruck- und Ink-Jet-Papiere (A.1.2) sind in den Abbildungen 3.6-2, 3.6-3 und 3.6-7 die Glanzwerte für die standardisierten Messverfahren DIN 45°, DIN 75° und TAPPI 75° gegenübergestellt. Das Papiermuster mit dem niedrigsten/ höchsten Glanz hatte Werte von 4,0%/95% TAPPI 75°, 0,6%/89% DIN 75° und 1,1%/70% DIN 45° (vgl. Abbildung 3.6-1).

Die Abbildungen 3.6-4 und 3.6-5 zeigen:

- Die Naturkopierpapiere NKP1 bis 5 haben Glanzwerte DIN 75° von 0,6-0,8%. Nur das intensiv satinierte Naturkopierpapier NKP6 erreicht einen Glanzwert DIN 75° von 2,5%.
- Die gestrichenen Papiere GKP1 bis 5 haben Glanzwerte DIN 75° zwischen 11% (GKP3 matt) und 89% (GKP4 gussgestrichen), dazwischen liegen die Glanzwerte DIN 75° für GKP2 (satiniert) mit 19% und für GKP1 (super gloss) mit 72% (vgl. Abbildung 3.6-1).
- Die Glanzwerte DIN 75° MD/längs (Lichteinfall parallel zur MD-Richtung) sind meist größer als CD/quer. Die relative Differenz der MD/CD-Glanzwerke ist bei den nichtgestrichenen Papieren ausgeprägter als bei den gestrichenen Papieren.

In der Abbildung 3.6-6 werden die Glanzwerte DIN 45° und DIN 75° in Abhängigkeit von den Bendtsen-Rauheitswerten (Anpressdruck 0,2 bar, Glasplatte) BEN-Ra in µm dargestellt für die NKP1-9 Muster. Trotz der hohen Bestimmtheitsmaße R^2 sind die Trendkurven wegen der geringen Glanzwert-Unterschiede wenig aussagekräftig.

Sorten	TAPPI 75°		DIN 75°		DIN 45°	
	mittel OS längs	mittel OS quer	mittel OS längs	mittel OS quer	mittel OS längs	mittel OS quer
NKP1	5,01	4,35	0,79	0,72	1,12	1,15
NKP2	4,91	4,32	0,78	0,73	1,10	1,10
NKP3	4,75	4,17	0,74	0,67	1,10	1,10
NKP4	5,13	4,47	0,82	0,76	1,14	1,13
NKP5	4,28	4,00	0,61	0,62	1,10	1,10
NKP6	12,82	11,14	2,49	2,28	1,53	1,53
GKP1	86,65	86,49	71,68	70,97	47,44	47,13
GKP2	56,23	51,41	19,06	16,25	6,22	6,03
GKP3	35,31	34,19	10,73	9,69	1,48	1,51
GKP4	94,72	94,51	89,37	87,73	70,05	69,32

Abbildung 3.6-1: Glanzwerte nach Lehmann in % mit verschiedenen Einstrahlwinkeln

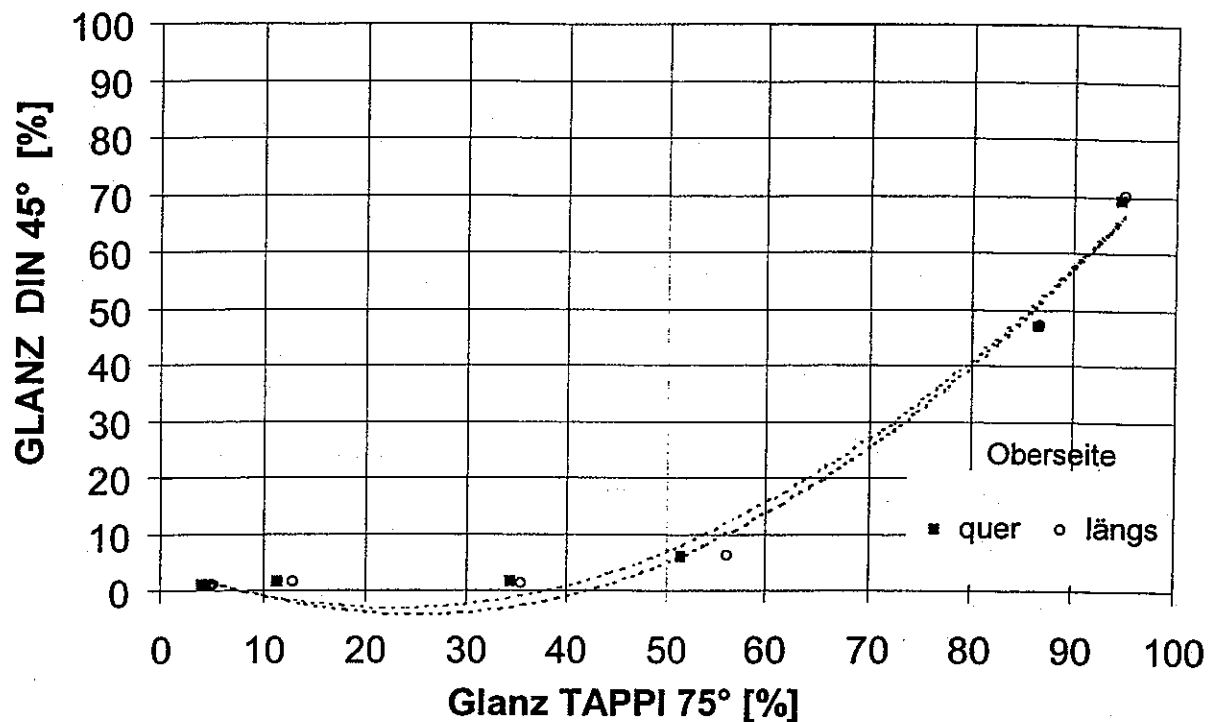


Abbildung 3.6-2: Glanzwerte DIN 45° Als Funktion der Glanzwerte TAPPI 75° für NKP1-6 und GKP1-4 (A1.2)

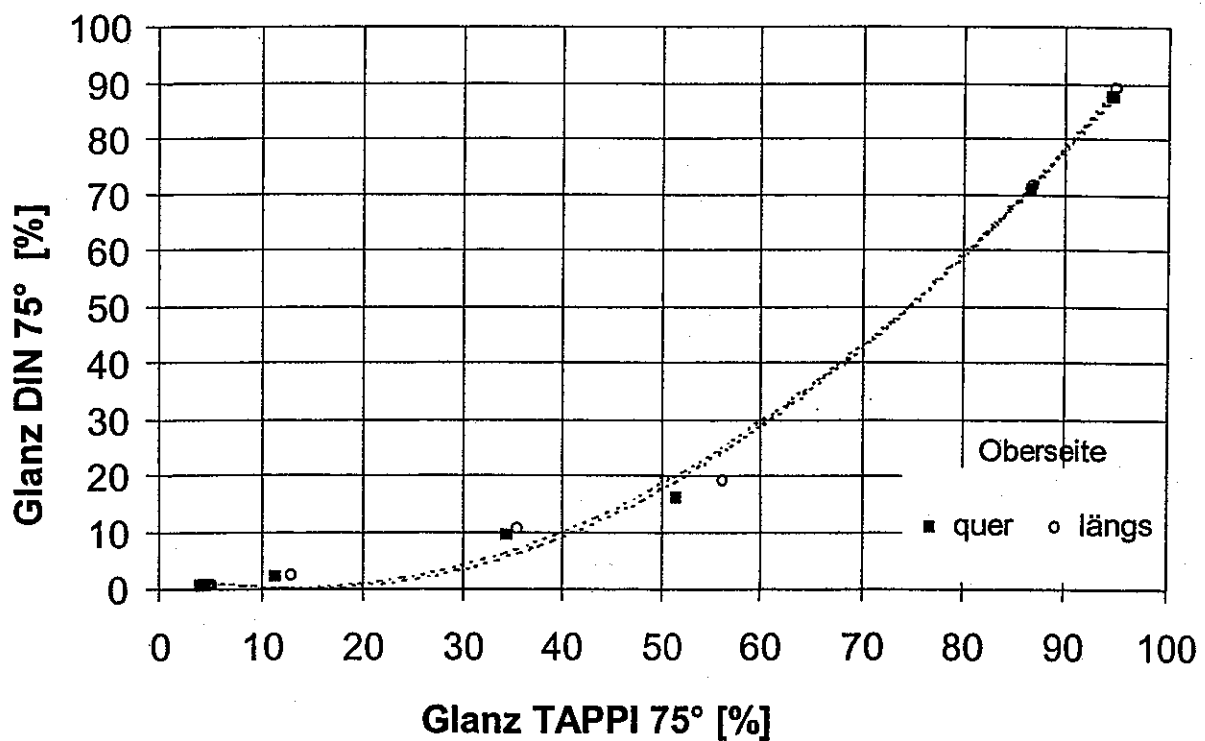


Abbildung 3.6-3: Glanzwerte DIN 75° Als Funktion der Glanzwerte TAPPI 75° für NKP1-6 und GKP1-4 (A2)

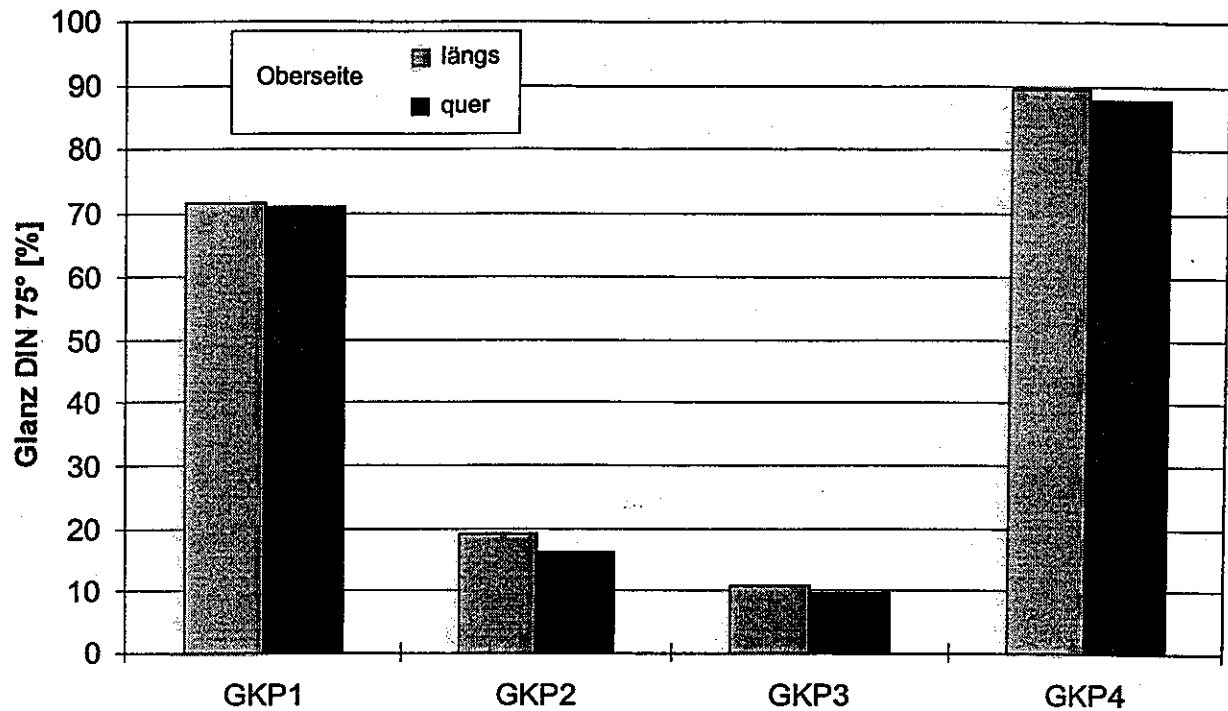


Abbildung 3.6-4: Glanzwerte DIN 75° für die Oberseite (OS) der GKP-Muster (A.1.2)

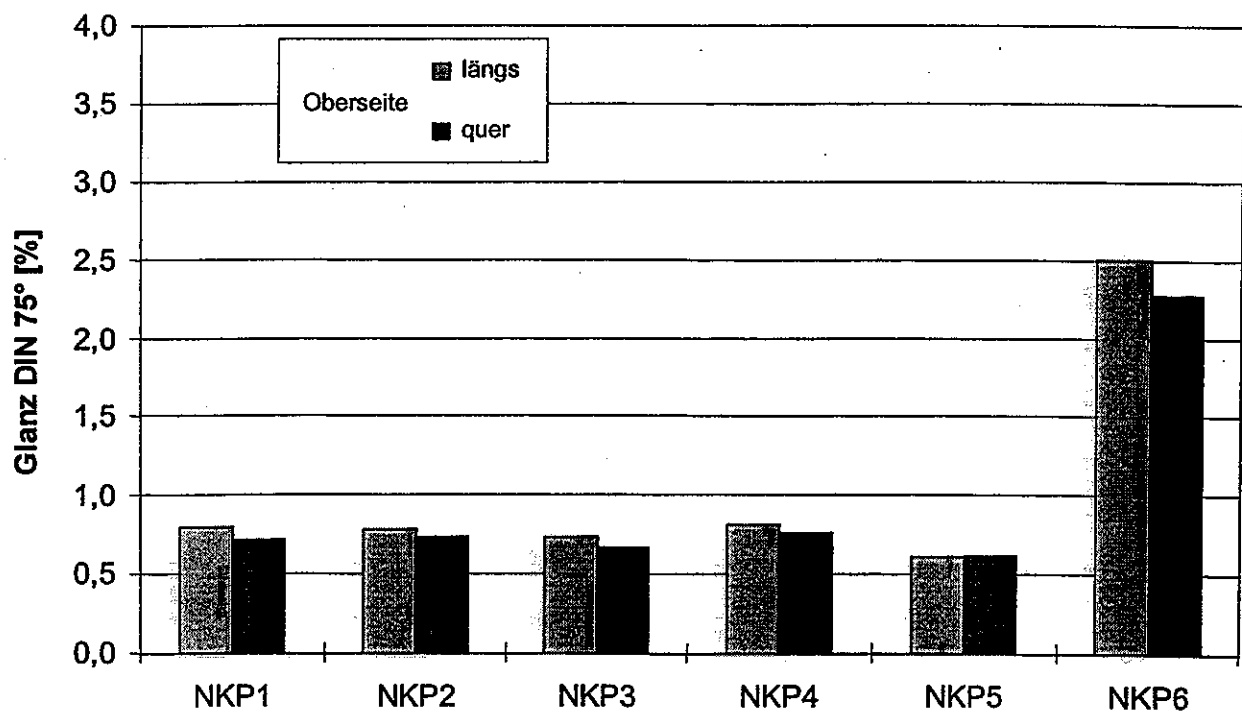


Abbildung 3.6-5: Glanzwerte DIN 75° für die Oberseite (OS) der NKP-Muster (A.1.2)

Ein wichtiges Qualitätskriterium für Druck- und Vervielfältigungspapiere ist ihre sogenannte relative "Zweiseitigkeit" RZW (vgl.3.1-7). Von großem Interesse ist beispielsweise die Zweiseitigkeit des Weißgrades und der BEN-Ra-Werte in μm , aber auch des Glanzes und des Kontaktanteils. Angestrebt wird in vielen Fällen eine möglichst geringe Zweiseitigkeit, also eine möglichst kleine relative Differenz zwischen den Eigenschaften der Ober- und Unterseite.

Die Beziehung zwischen den Glanzwerten und den Kontaktanteilwerten sind in den Abbildungen 3.4-17 und 3.4-18 dargestellt. In den Abbildungen 3.6-8 bis 3.6-11 sind Werte für die relative Zweiseitigkeit (RZW) des Glanzes und des Kontaktanteils zusammengestellt.

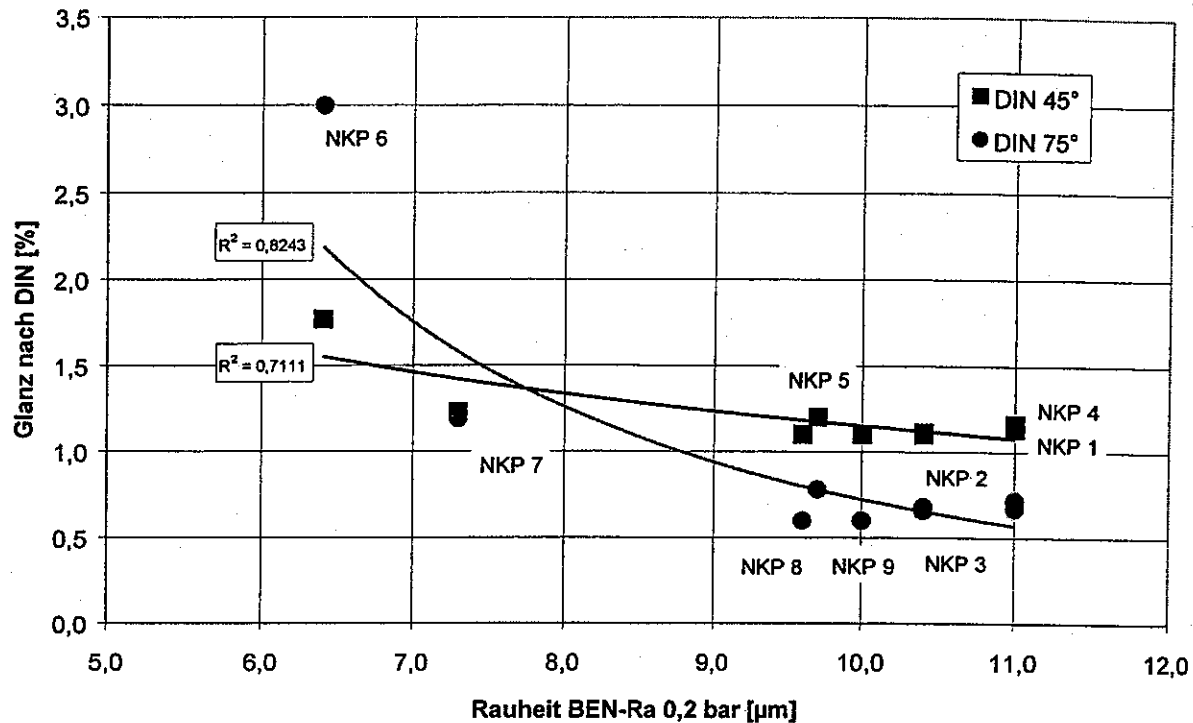


Abbildung 3.6-6: Glanzwerte DIN 45° und DIN 75° als Funktion der BEN-Ra-Werte (0,2 bar, Glasplatte)

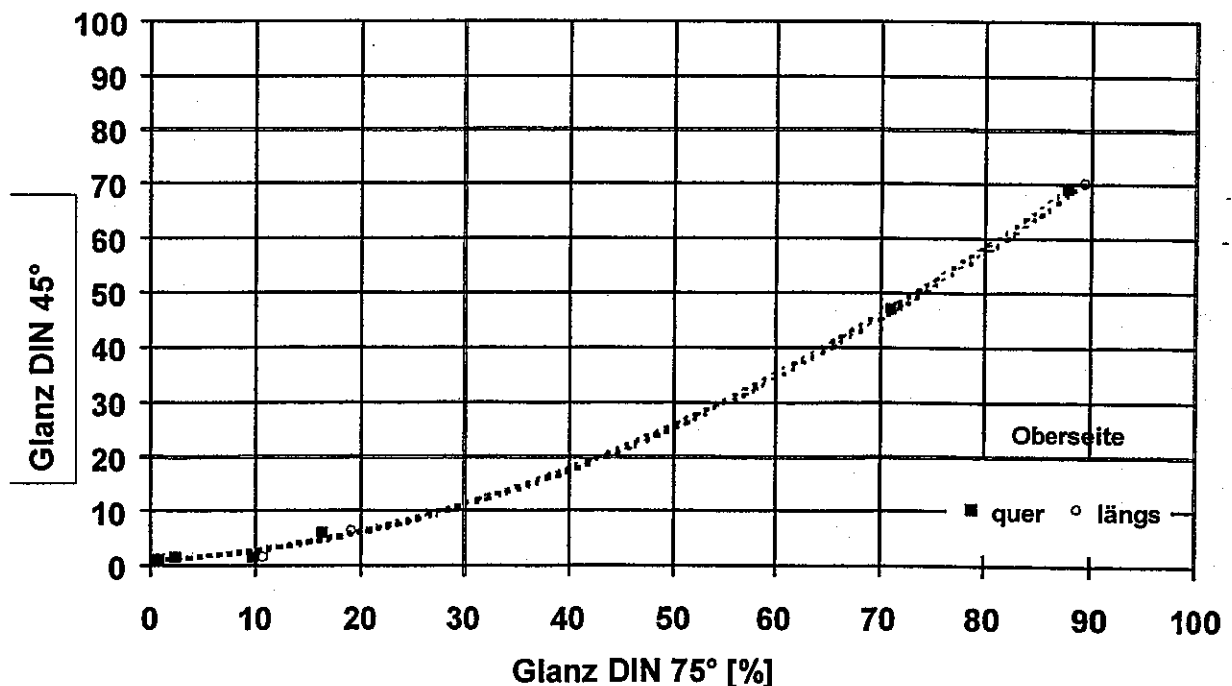


Abbildung 3.6-5: Glanzwerte DIN 45° als Funktion der Glanzwerte DIN 75° für NKP1-6 und GKP1-4 (A.1.2)

4. Messung der Mikroformation zur Strukturanalyse

4.1 Einführung

Die Formation, über die in der Durchsicht einer Papierprobe gegen eine helle Lichtquelle eine erste qualitative Aussage getroffen werden kann, ist heute eine immer bedeutender werdende Einflussgröße auf die Qualität eines Papierproduktes. Die deutsche Norm DIN 6730 (1992) /20/ beschreibt die Formation als räumliche Verteilung von Fasern im Papier. Die oben angesprochene Durchsicht wird hier als Erscheinungsbild der Formation gegen diffuses, durchfallendes Licht betrachtet bezeichnet. In der internationalen Norm ISO 4046 (1978) /21/ wird die Formation als „...the manner in which the fibres are distributed, disposed and intermixed to constitute paper...“ charakterisiert, was eine Analogie zur deutschen Definition darstellt. Zur Durchsicht werden hier folgende Aussagen getroffen: „...structural appearance of a sheet of paper observed in diffuse transmitted light (Note: this is an indication of formation!)“

Beide Definitionen sagen im Prinzip das gleiche aus; allerdings ist die Aussage der ISO 4046 ein wenig präziser. Ein weiterer Ansatz zur Beschreibung der Formation liegt in der Betrachtungsweise als stochastische Masseschwankungen im Papier bis 100 mm Größe. Diese Erklärung geht davon aus, dass es zwischen den dunklen Stellen in der Durchsicht und konzentrierten Ansammlungen von Fasern (Flocken) einen direkten Zusammenhang gibt, was insofern als richtig anzusehen ist, solange die in der betrachteten Probe vorkommenden Fasern die gleiche Färbung aufweisen.

Die im Rahmen des Projektes untersuchten Formationsmessmethoden basieren auf der Auswertung optisch analysierter Papierproben. Die für die Beurteilung der Formation herangezogenen Proben sind mit einem optischen Scanner erfasste Aufsicht- oder Durchsicht-Aufnahmen, welche mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms AdOculos, sowie MS Excel zur Tabellenkalkulation ausgewertet wurden. Somit werden hier keine Masseschwankungen beurteilt, sondern optische Dichteschwankungen.

Da bei dieser genutzten Methode der Bilderfassung mit hohen Auflösungen bis 10,16 µm Auflösungsgrenze gearbeitet wurde, kann man in diesem Zusammenhang auch von einer Mikroformation sprechen.

In den folgenden Ausführungen werden die einzelnen Methoden zur Formationsmessung vorgestellt, sowie die erzielten Ergebnisse angegeben.

4.2 Formationsindex und Grauwertverteilung

4.2.1 Einleitung

Die Bestimmung des Formationsindex zählt zu den Formationsauswertungsmethoden 1. Ordnung. Statistiken 1. Ordnung beschreiben die einzelnen Grauwerte eines in üblicherweise 256 Graustufen digitalisierten Bildes und ihre Verteilung, sodass dadurch eine Differenzierung nach Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient möglich ist. Diese lassen sich relativ schnell berechnen und lassen eine erste Einschätzung der Qualität der Formation zu. Allerdings enthalten sie keine Informationen über die örtliche Verteilung der Graustufen und können daher keine Aussagen zu Strukturparametern liefern. /22/

In der Literatur wird der Variationskoeffizient der Grauwertverteilung auch als Formations-Index bezeichnet. Dabei unterscheidet man zwischen Transparenz-Formations-Index und Opazitäts-Formations-Index.

Die bei der digitalen Formationsauswertung verwendeten Begriffe Transparenz und Opazität unterscheiden sich von den in der Papier-Materialtechnik üblichen Definitionen. Dort werden diese Größen aus den Messungen der Reflexionsfaktoren nach DIN 53 145 (2000) /23/ ermittelt.

Nach DIN 53 146 (2000) /24/ bezeichnet die Opazität in % den Grad der Lichtundurchlässigkeit und laut DIN 53 147 (1993) /25/ wird die Transparenz in % als Maß für die Lichtdurchlässigkeit eines Papiers definiert.

Bei der Bilderfassung werden selbstverständlich keine Reflexionsfaktoren im Sinne der genannten Normen gemessen. Es wird jedoch weiterhin von Transparenz- bzw. Opazitätsformation gesprochen, da die Digitalisierung nach den Prinzipien der Reflexion bzw. der Transmission erfolgt.

4.2.2 Opazitäts-Formations-Index

Der Opazitäts-Formations-Index ist der Variationskoeffizient der Grauwertverteilung eines im Aufsichtsprinzip gescannten Bildes. Hierbei sind Lichtquelle und Sensor auf der selben Seite der Probe angeordnet (Abbildung 4.2-1). Den Hintergrund der Probe bildet eine schwarze Platte (Weißgrad: 4,55 %) am Deckel des Scanners.

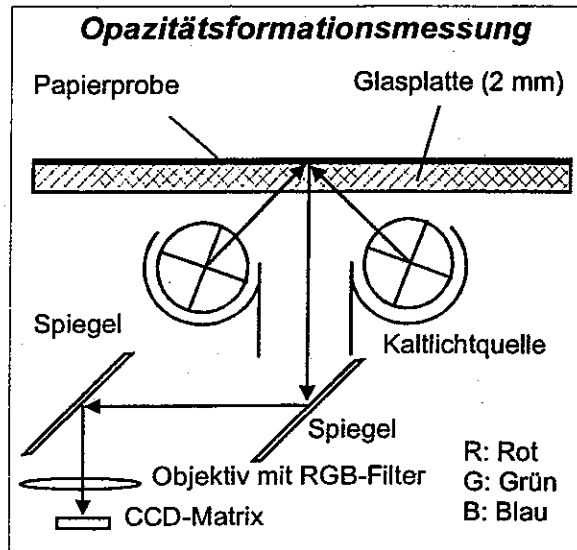


Abbildung 4.2-1: Prinzip der Opazitätsformationsmessung /26/

Eine Opazität von 100 % kennzeichnet eine optisch unendlich dichte Stelle im Papier; ein Messwert von 0 % entspricht dem Helligkeitswert der Deckplatte. Das bedeutet also, dass sich der Hintergrund der Probe bei diesem Verfahren immer auf das Messergebnis auswirkt. Daher werden sich weitere Untersuchungen vorrangig mit der Transparenz-Formation beschäftigen.

4.2.3 Transparenz-Formations-Index

Der Transparenz-Formations-Index ist der Variationskoeffizient der Grauwerte Verteilung eines im Durchsichtprinzip gescannten Bildes. Dabei liegen Lichtquelle und Sensor auf verschiedenen Seiten der Papierprobe (Abbildung 4.2-2). Somit entspricht eine Transparenz von 0 % einer optisch unendlich dichten Stelle, ein Messwert von 100 % einer optisch unendlich dünnen Stelle (z.B. ein Loch). Wie zuvor diskutiert, ist die Transparenz kein Messwert im Sinne der DIN 53 147; sondern wird bestimmt aus dem Verhältnis vom ankommenden Licht am Sensor zur ausgesendeten Lichtmenge an der Beleuchtungseinheit.

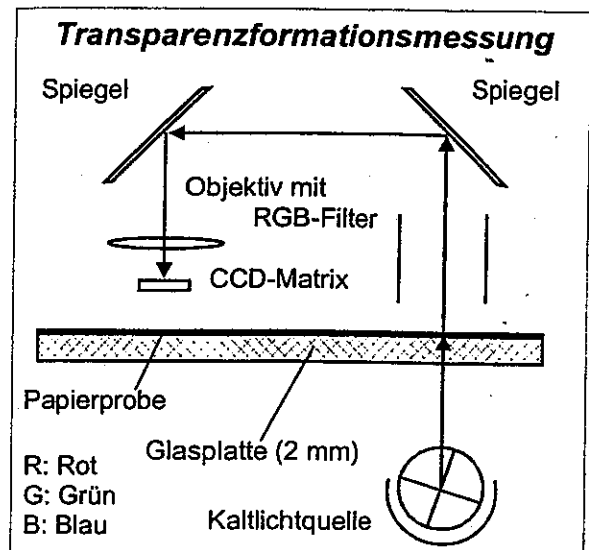


Abbildung 4.2-2: Prinzip der Transparenzformationsmessung /26/

4.2.4 Berechnung des Formations-Index

Die notwendigen Eingangsdaten zur Berechnung des Formations-Index liefert eine Histogrammtabelle. Diese wird aus einem Grauwertebild mit der Bildverarbeitungs-Software AdOculus erstellt. Sie liefert Informationen über die Häufigkeit der 256 Graustufen im Bild, d.h. es werden alle Bildpunkte gezählt, die die gleiche Graustufe besitzen.

Aus der Histogrammtabelle werden der Mittelwert, die Standardabweichung, sowie der Variationskoeffizient errechnet. Wie eingangs erwähnt, wird der Variationskoeffizient auch als Formations-Index bezeichnet. Die Berechnungsvorschriften der genannten Werte lauten:

$$M = \left(\frac{\sum_{i=0}^{255} x_i \cdot G_i}{n} \cdot 255 \right) \bmod 255$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{255} (G_i - M)^2 \cdot x_i}{n - 1}}$$

$$FI = \frac{s}{M}$$

mit:

- M - Mittelwert
- s - Standardabweichung
- FI - Formations-Index
- x_i - Anzahl an Bildpunkten der Graustufe i
- $G_i = i$ - Grauwerte (mit $i = 0 \dots 255$)
- n - Gesamtanzahl aller Bildpunkte

Diese Formeln können sowohl für den Transparenz- als auch für den Opazitäts-Formations-Index angewendet werden. Allerdings muss das Ergebnis entsprechend gekennzeichnet sein, da sich die Werte für Durchsicht- und Aufsicht-Aufnahmen voneinander unterscheiden. Somit errechnet man den Transparenz-Formations-Index aus

$$TFI = \frac{s}{M}$$

und den Opazitäts-Formations-Index nach

$$OFI = \frac{s}{M}$$

4.2.5 Ergebnisse

Für die Methode zur Messung des Formations-Indexes, sowie der Grauwertverteilung wurden zahlreiche Untersuchungen zur Genauigkeit der Messung, sowie zur Probengröße durchgeführt /26/. Im folgenden werden die Ergebnisse anhand einiger Beispielmessungen dargestellt.

Bei Betrachtungen der Genauigkeit konnte festgestellt werden, dass durch die Positionierungsgenauigkeit des Scanners bzw. durch elektronisches Rauschen Fehler in die Messergebnisse bei der Formationsuntersuchung eingebracht werden. Bei der Interpretation von Messwerten ist zu beachten, dass schon bei wiederholter Erfassung ein und desselben Bildes Abweichungen der Formationsindexe und des Maximums der Relativen Häufigkeit im Promillebereich auftreten können.

In Tabelle 4.2-1 sind die Ergebnisse von zehn Messungen des Transparenz-Formations-Index an einer Probe eines Kopierpapiers dargestellt. Die Proben wurden bei einer Auflösung von 1200 ppi (21,17 µm) gescannt.

Wiederholung	TFI
01	0,1172
02	0,1166
03	0,1165
04	0,1171
05	0,1167
06	0,1170
07	0,1173
08	0,1173
09	0,1174
10	0,1174
Mittelwert TFI: 0,1170	
Standardabweichung: 0,0003	
Variationskoeffizient: 0,3%	

Tabelle 4.2-1: Transparenz-Formations-Index /26/

Weitere Untersuchungen zur Probengröße sind in Tabelle 4.2-2 dargestellt.

Probenfläche [mm]	Transparenz-Formations-Index		
	M	s	TFI
30 x 30	0,112	0,0034	3,0 %
60 x 60	0,114	0,0022	1,9 %
90 x 90	0,116	0,0016	1,4 %
120 x 120	0,115	0,0018	1,6 %

Tabelle 4.2-2: Schwankungen des TFI bei unterschiedlicher Probengröße /26/

Zur Untersuchung der notwendigen Probengröße wurden mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware AdOculos aus der Original-Durchsicht-Aufnahme (120x120 mm) des Papiers quadratische Proben mit den Kantenlängen 30, 60 und 90mm erzeugt. Die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten für die Kantenlängen 90 und 120 mm liegen auf dem selben Niveau. Für die Ermittlung des Transparenz-Formations-Index ist es deshalb nicht unbedingt notwendig, Probekörper mit einer Größe von 120 x 120 mm zu erfassen. Eine Kantenlänge von 90 mm erfordert ca. 13 MB (ca. 30 %) weniger Speicherplatz pro Bild, was vor allem bei umfangreicheren Probenserien interessant ist.

Probenfläche [mm]	Maximum der Rel. Häufigk. bei			
	M [%]	s [%]	FI [%]	T [%]
30x30	7,85	0,40	5,1 %	18
60x60	7,76	0,37	4,7 %	18
90x90	7,48	0,36	4,9 %	18
120x120	7,55	0,31	4,1 %	18

Tabelle 4.2-3: Schwankung der maximalen Häufigkeit bei verschiedenen Probengrößen /26/

In Tabelle 4.2-3 wurden die Maxima der relativen Häufigkeit in Abhängigkeit der Probengröße dargestellt, wobei die relative Häufigkeit $[H_{i,rel}]$ sich aus der Fläche pro Graustufe bezogen auf die Gesamtfläche ergibt.

Für die Grauwerte Verteilung sind die Unterschiede der Variationskoeffizienten für das Maximum der relativen Häufigkeiten größer; allerdings ist dieser Messpunkt kein Messwert im eigentlichen Sinne. Er stellt den Flächenanteil mit der im Bild am häufigsten vorkommenden Transparenz dar, was allerdings keine Aussagen über die Qualität der Formation liefert. Daher ist eine Probenfläche von 90 x 90 mm vollkommen ausreichend (siehe Abbildung 4.2-3, Abbildung 4.2-4 und Abbildung 4.2-5), zumal der Mittelwert der Transparenz schon bei einer Kantenlänge von 30 mm den gleichen Wert hat, wie bei größeren Probenflächen.

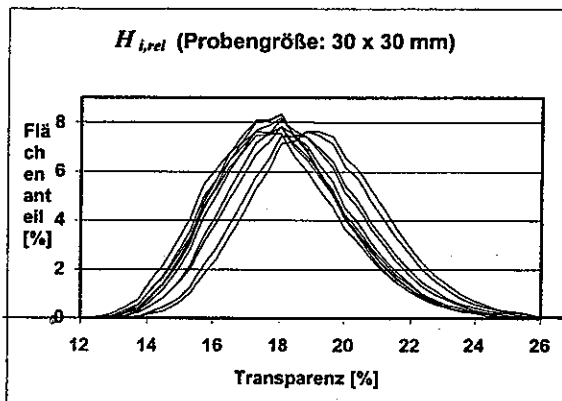


Abbildung 4.2-3: Relative Häufigkeit bei einer Probengröße von 30x30 mm /26/

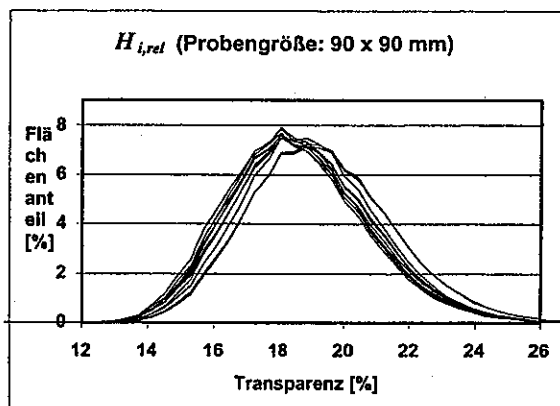


Abbildung 4.2-4: Relative Häufigkeit bei einer Probengröße von 90x90 mm /26/

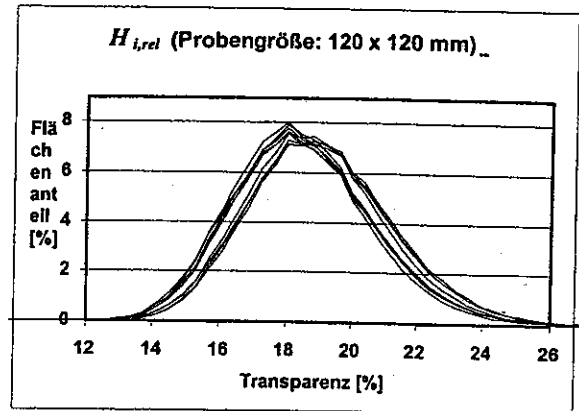


Abbildung 4.2-5: Relative Häufigkeit bei einer Probengröße von 120x120 mm /26/

Bei der Ermittlung der Grauwerte Verteilung und des Transparenz-Formations-Index sind zehn Proben zu untersuchen. Damit wird sichergestellt, dass fehlerhafte Proben mit stark abweichenden Messwerten, sogenannte Ausreißer, erkannt und beseitigt werden können. Fehlerhafte Proben enthalten z.B. Verschmutzungen oder Löcher, die durch unsachgemäße Handhabung hervorgerufen wurden. Da hierdurch das Endergebnis verfälscht würde, sind diese Proben aus der Auswertung zu eliminieren.

In Abbildung 4.2-6 wurde die Rauheit nach Bendtsen bei harter Unterlage und unterschiedlichen Drücken über dem Transformationsindex für alle Naturkopierpapiere (siehe Tabelle 1-1) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Rauheit bei steigendem Transparenzformationsindex unabhängig vom verwendeten Anpressdruck zunimmt. Ein großer Transparenzformationsindex ist ein Zeichen für eine schlechte Formation. Damit gibt die Abbildung 4.2-6 Grund zu der Annahme, dass sich eine schlechte Formation negativ auf die Rauheit auswirkt. Wie zu erwarten zeigen die beiden satinierten Papiere NKP 6 u. 7 eine geringere Rauheit, als die anderen Papiere, während der Transparenzformationsindex im Vergleich zu anderen Papieren nur wenig abnimmt, da durch die Satinage ein größerer Einfluss auf die Rauheit, als auf die Formation genommen wird.

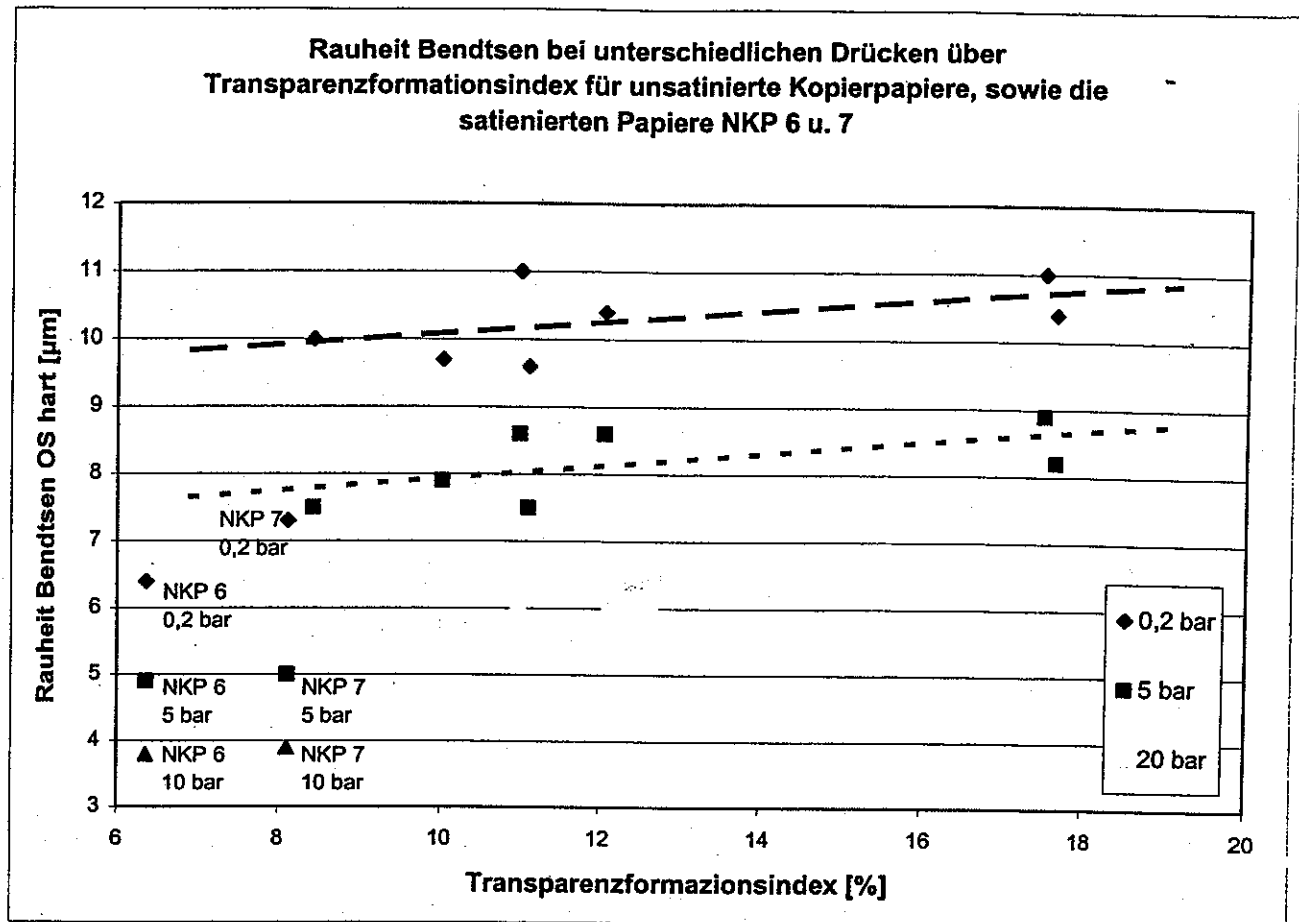


Abbildung 4.2-7: Rauheit Bendtsen in Abhängigkeit vom Transparenzformationsindex

4.3 Flockenverteilung und Nadellöcher

4.3.1 Einleitung

Als Flocken im papiertechnischen Sinne werden Faser- und Füllstoffagglomerate bezeichnet. Diese haben ihren Ursprung in den Bedingungen im Konstantteil der Papiermaschine. Im Stoffauflauf steigt die Berührungshäufigkeit der Fasern mit steigender Stoffdichte; außerdem spielen die Einflüsse der massespezifischen Oberfläche und der Oberflächenaffinität der Fasern eine Rolle. Es werden daher eine niedrige Stoffdichte bei der Bahnbildung sowie eine hohe Verwirbelung der Suspension im Stoffauflauf angestrebt.

In der Siebpartie werden die Flocken fixiert und später in der Trockenpartie getrocknet. Im Papier sind sie dann als dunkle Stellen in der Durchsicht zu erkennen. Allerdings wirkt sich eine Flocke nicht nur optisch auf die Papierqualität aus. Da an diesen Stellen relativ viele Fasern und Füllstoffe konzentriert sind, steigt auch die lokale Flächen

bezogene Masse und die Dicke der Papierbahn, oder anders ausgedrückt, wird die Bahn im Mikrometerbereich uneben.

Ziel der Untersuchung der Flockenverteilung ist eine Charakterisierung der Häufigkeit und der Größe von Flocken. Kenngrößen sind dabei unter anderem der Spezifische Perimeter und die Häufigkeitsverteilung der Flocken.

4.3.2 Spezifischer Perimeter

Der von JORDAN und NGUYEN [27] eingeführte Spezifische Perimeter wird definiert als Länge der Kontur aller Flocken, gemessen an einem beim Medianwert binarisierten Bild, bezogen auf die Gesamtbildfläche).

$$SP = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{a \cdot b}$$

mit:

SP - Spezifischer Perimeter [1/mm]

P_i - Umfang der Flocke i [mm]

n - Summe aller Flocken

a - Höhe der Probe

b - Breite der Probe

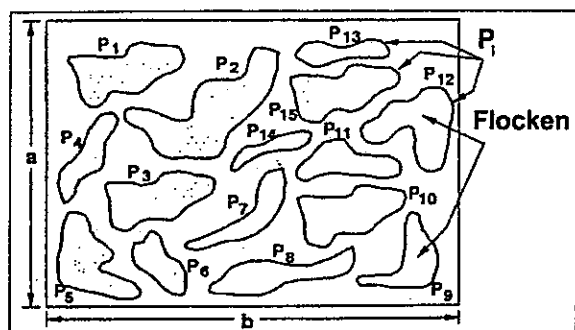


Abbildung 4.3-1: Spezifischer Perimeter /26/

Für ein Papier mit homogener Struktur, d.h. vielen kleinen Flocken, ergibt sich somit ein großer Spezifischer Perimeter. Dagegen ist dieser Wert für eine Probe mit wenigen großen Flocken relativ klein. Kleine Spezifische Perimeter deuten also auf eine schlechte Formation hin.

4.3.3 Flockengrößenverteilung

Zur Bestimmung der Flockengrößenverteilung ist eine Binarisierung beim Medianwert der Durchsichtaufnahme notwendig.

Der Medianwert entspricht dem Grauwert, der in der Mitte der Anzahl der Grauwerte in den nach der Größe geordneten Klassen liegt. Diese Klassen sind bei der digitalen Bildverarbeitung die 256 Grauwerte. Somit ist der Medianwert die Graustufe, in der die Hälfte der Summe aller Bildpunkte überschritten wird.

Durch die Binarisierung werden alle Bildpunkte, deren Graustufen kleiner oder gleich dem Medianwert sind, dem Wert 0 (schwarz) zugeordnet. Die Graustufen aller anderen Bildpunkte werden dabei auf 255 (weiß) gesetzt. Ermittelt wird der Medianwert aus der Grauwerte Verteilung (Histogrammliste) des betrachteten Bildes. Flocken stellen also dunkle Stellen in der Durchsichtaufnahme dar.

Ein Beispiel für eine Binarisierung ist in Abbildung 4.3-2 und Abbildung 4.3-3 dargestellt. Abbildung 4.3-2 zeigt eine Durchsicht-Aufnahme einer Papierprobe. Etwa in der Mitte des Bildes ist eine Flocke zu erkennen. Der Medianwert der Grauwerte in diesem Bild ist 44. Nach Binarisieren bei dieser Graustufe sieht man in Abbildung 4.3-3 die Größe dieser Flocke. Aus diesem Bild lassen sich

nun der Spezifische Perimeter sowie die Flockengrößenverteilung ermitteln.

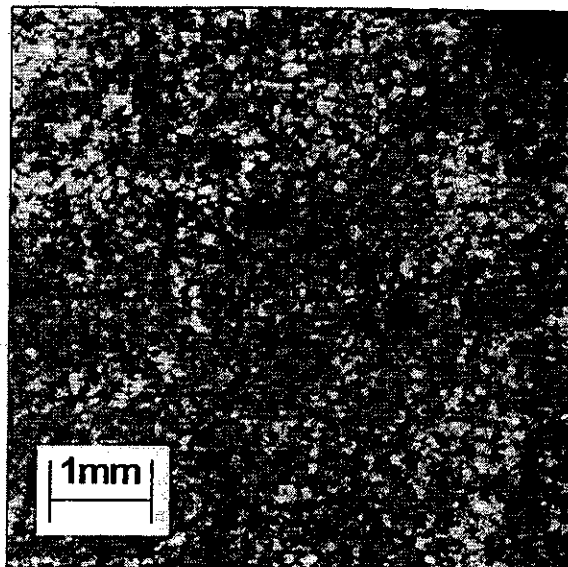


Abbildung 4.3-2: Durchsicht-Aufnahme /26/

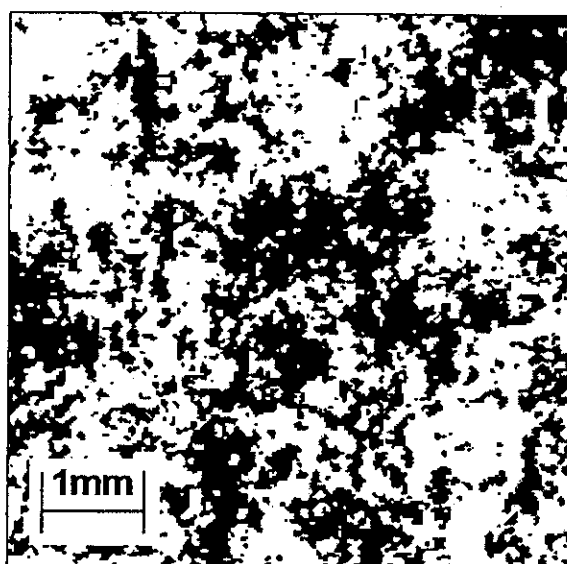


Abbildung 4.3-3: Beim Medianwert binarisierte Durchsicht-Aufnahme /26/

Mit der Bildverarbeitungs-Software AdOculos können die durch die Binarisierung beim Medianwert extrahierten Flocken einer umfassenden Dimensionsanalyse unterzogen werden. Dazu ist allerdings die Invertierung der binarisierten Durchsichtaufnahme notwendig, da AdOculos die weißen Stellen auswertet und somit nicht die nach der Binarisierung schwarz gekennzeichneten Flocken. Nach der Invertierung der Durchsichtaufnahme werden alle weißen Punkte schwarz dargestellt und alle schwarzen Punkte weiß. Diese Auswertung ist Voraussetzung für die Ermittlung des Spezifischen Perimeters und der Flockengrößenverteilung.

Zunächst muss dabei eine sogenannte Komponentenmarkierung durchgeführt werden, d.h. das

Programm analysiert Größe und Position der Flocken, um sie voneinander unterscheiden zu können. Das Bild wird somit in einzelne Bereiche aufgeteilt. Anschließend erfolgt eine Merkmalsextraktion, in welcher für jeden Bereich Positions- und Größenwerte berechnet werden. Dazu gehören:

Fläche:	Anzahl der Pixel innerhalb eines Bereiches
Umfang:	Länge der Konturlinie eines Bereiches
polarer Abstand:	Abstand des Bereichsrandes zum Schwerpunkt in Pixel
Schwerpunkt:	Flächenschwerpunkt des Bereiches
Kompaktheit:	Verhältnis des quadratischen Umfangs zur Fläche einer Flocke

Die Kompaktheit ist das Verhältnis von quadratischem Umfang zur Fläche eines Bereiches. Im Falle eines Kreises nimmt die Kompaktheit den Wert 1 an und wird umso größer, je größer der Umriss eines Bereiches im Verhältnis zu seinem Flächeninhalt wird.

$$\text{Kompaktheit} = \frac{\text{Umfang}^2}{4 \cdot \pi \cdot \text{Fläche}}$$

Der polare Abstand bezeichnet den Abstand des Bereichsrandes vom Schwerpunkt des Bereiches. Dieser Abstand ist bei einem Kreis für alle Winkel konstant, bei allen übrigen Formen ist er variabel und es kann ein Minimal- und ein Maximalabstand angegeben werden. Aus diesen beiden Angaben lässt sich ein grober Überblick über die Form einer Flocke gewinnen.

Wenn diese Parameter für jede Flocke bestimmt sind, kann daraus eine Flockengrößenverteilung ermittelt werden. Dazu wird die von AdOculos ausgegebene Tabelle in eine Excel-Arbeitsmappe eingefügt. Die Daten liegen als Pixelwerte vor, die unter Einbeziehung der Auflösung bei der Bildfassung in metrische Einheiten umgerechnet werden können.

Um die Verteilung der Flockengrößen darstellen zu können, muss zunächst eine Aufteilung der Messwerte in Klassen erfolgen. Als Unterscheidungskriterium wurde der aus der Fläche zu errechnende kreisäquivalente Durchmesser gewählt. Bei den zu dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden die zu analysierenden Proben mit einer Auflösung von 2500 ppi (10,16 µm) erfasst. Die Aufteilung der Flockengrößen erfolgte daher in Durchmesserklassen mit 10 µm Klassenbreite. Als Ergebnis liegen die Häufig-

keits- sowie die Summenhäufigkeitsverteilungen der Flockengrößen vor. Für das Beispiel eines Kopierpapiers sind diese in Abbildung 4.3-4 und Abbildung 4.3-5 dargestellt.

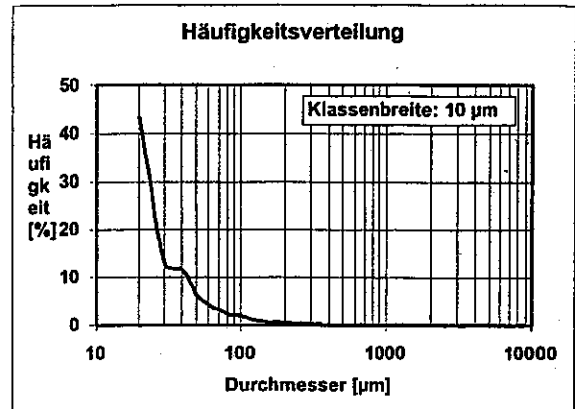


Abbildung 4.3-4: Beispiel für eine Flockengrößenverteilung /26/

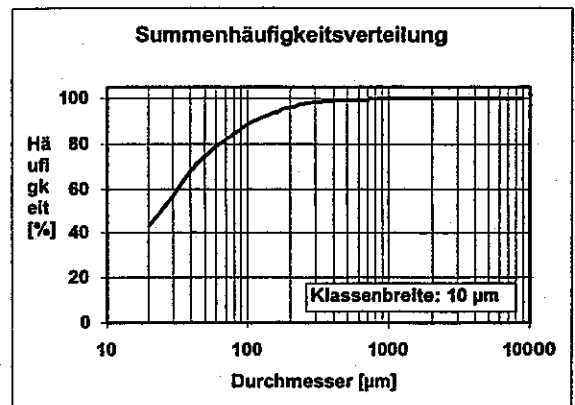


Abbildung 4.3-5: Beispiel für eine Summenhäufigkeitsverteilung /26/

4.3.4 Ergebnisse

Es wurden mehrere Untersuchungen in /26/ zur Probengröße und zum Zeitaufwand, welcher für die Bestimmung der Flockengrößenverteilung notwendig ist, gemacht. In Abbildung 4.3-6 wird die zur Auswertung der Flockengrößenverteilung benötigte Zeit in Abhängigkeit zur Probengröße, sowie der gewählten Auflösung dargestellt.

Die Untersuchungen wurden mit folgenden Hardwarekomponenten durchgeführt:

- Pentium III Prozessor
- 450 MHz
- 256 MB Arbeitsspeicher

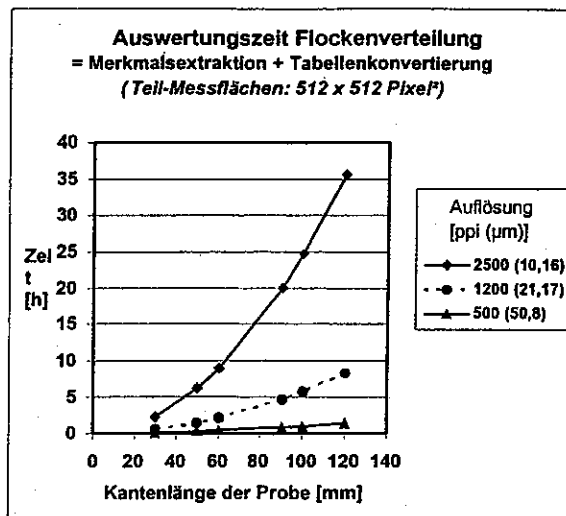


Abbildung 4.3-6: Auswertungszeit als Summe von Merkmalsextraktion und Excel-Auswertung /26/

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Auswertungszeit für die Flockenverteilung mit sinkender Auflösung verringert. Für die Analyse der Flockenverteilung kann allerdings eine Auflösung von 500 ppi als ausreichend betrachtet werden, da bei dieser Betrachtung bereits Flocken > 1mm berücksichtigt werden. Wenn sich eine genauere Auswertung der Flockengrößenverteilung als notwendig erweist, muss der erhöhte Zeitaufwand in Kauf genommen werden, oder es muss der Einsatz von leistungsfähigerer Rechentechnik in Betracht gezogen werden.

4.3.5 Nadellöcher

Im papiertechnischen Sinne betrachtet sind Nadellöcher Positionen im Papier, an denen die Flächenbezogene Masse gleich null ist. Sie treten vor allem bei dünnen, füllstoffarmen Papieren auf, und können in der Durchsicht gegen eine helle Lichtquelle deutlich gesehen werden.

Wirtschaftlich bzw. drucktechnisch betrachtet ziehen Nadellöcher Fehlstellen im Druckbild nach sich, die – ebenso wie die Löcher selbst – auf dem bedruckten Papier zu erkennen sind.

Für die digitale Bildverarbeitung sind Nadellöcher im Durchsicht-Prinzip erfassten Graustufenbilder mit Bildpunkte, welche dem Grauwert 255 (weiß) entsprechen. Um Informationen über Anzahl und Größe von Nadellöchern in einer Papierprobe zu erhalten, kann das Prinzip der Analyse der Flockenverteilung genutzt werden.

4.3.6 Analyse der Nadellochverteilung

Zur Analyse der Nadellochverteilung wird eine bei einer Auflösung von 2500 ppi (10,16µm) gescannte Durchsichtaufnahme der zu untersuchenden Probe wie in 4.3.3 beschrieben binarisiert. Die Binarisierung des zu untersuchenden Grauwertbildes erfolgt dabei nicht beim Medianwert, sondern bei der Graustufe 254. Dadurch werden nur die wirklichen Nadellöcher weiß angezeigt; alle anderen Bildpunkte werden auf 0 (schwarz) gesetzt.

Zur Veranschaulichung wird die Nadellochverteilung eines Hygienepapiers dargestellt. Es wurde eine 30 x 30 mm große, im Durchsicht-Prinzip mit 2500 ppi (10,16 µm) Auflösung erfasste Probe ausgewertet. Aus der von AdOculus ausgegebenen Merkmalsliste wurden die Durchmesser der Nadellöcher in µm berechnet; die Löcher wurden in Durchmesserklassen zu je 10 µm Breite aufgeteilt. Die Verteilung zeigt Abbildung 4.3-7. Es empfiehlt sich, die Anzahl der ermittelten Löcher auf eine vergleichbare Probenfläche hochzurechnen. Eine Vergleichsgröße wäre in diesem Fall die Anzahl der Nadellöcher pro Quadratmeter.

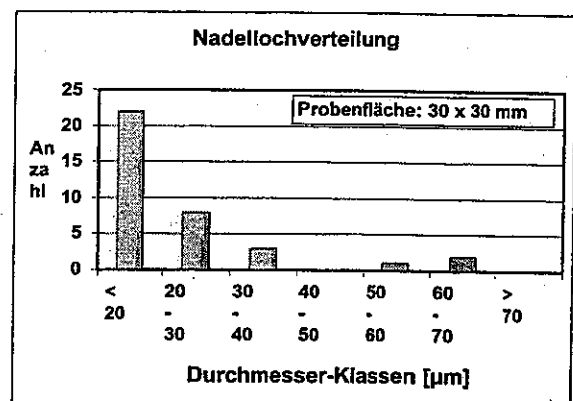


Abbildung 4.3-7: Beispiel für eine Nadellochverteilung /26/

Das gewählte Beispiel wird allerdings in der Praxis keine Anwendung finden, da Hygienepapiere in der Regel nicht auf Nadellöcher geprüft werden. Bei Druckpapieren dagegen ist eine solche Analyse durchaus sinnvoll. Es ist jedoch eine größere Probengröße zu wählen, da nicht mit solch einer hohen Dichte an Löchern zu rechnen ist.

4.4 Fourieranalyse

4.4.1 Einleitung

Siebmarkierungen sind Masse-, Dichte- und/oder Rauigkeitsschwankungen in der Ebene der Papierbahn. Sie entstehen im Papierherstellungsprozess im Strahlauftreffpunkt und auf dem Siebtisch der Papiermaschine. Zusätzlich können Markierungen auch durch den bei der Bahnführung hergestellten Kontakt zu den Filzen entstehen. Über die Intensität der Siebmarkierung entschei-

den die stoffliche Zusammensetzung, die Eigenschaften der Suspension und der hydrodynamische Druck. Von diesen Parametern hängt letztendlich die Eindringtiefe der Fasern in das Siebgewebe ab.

Um nun Siebmarkierungen zu charakterisieren, bedarf es einer Methode, die fähig ist, die regelmäßigen, periodischen Strukturen der Markierungen von den stochastischen Strukturen des Papiers (Formation) zu trennen und diese zu charakterisieren. Es bietet sich die zweidimensionale Fourieranalyse an, die eine Unterscheidung der stochastischen und periodischen Strukturen ermöglicht und durch ihre Koeffizienten die Intensität und Größenverteilung der Siebmarkierungen beschreibt. Näheres zur Entstehung von Siebmarkierungen ist in der Literatur unter /28, /29/ zu finden.

Zur Messung der Siebmarkierung ist es wichtig, ein Bild von der Papierprobe zu erfassen, in dem die periodischen Strukturen gut sichtbar sind; es bieten sich je nach Bedarf die Aufsicht-Erfassung (topographische Markierung) und die Durchsicht-Erfassung (optische Markierung) an.

Ein im Durchsicht-Prinzip gewonnenes Bild stellt Markierungen kleinstflächiger Transparenz dar, die durch, wie oben bereits erwähnt, Masse- und Dichteschwankungen entstehen können. Eine genaue Differenzierung nach Massen- und Dichteschwankungen ist durch den Einsatz der β -Radiographie möglich; diese ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Ein im Aufsicht-Prinzip erfasstes Bild bietet den Vorteil, dass beide Seiten der Papierprobe getrennt voneinander betrachtet werden können und dass keine Grenzen vorhanden sind, die sich in der Durchsicht bei sehr dicken bzw. sehr opaken Papieren gegeben sind.

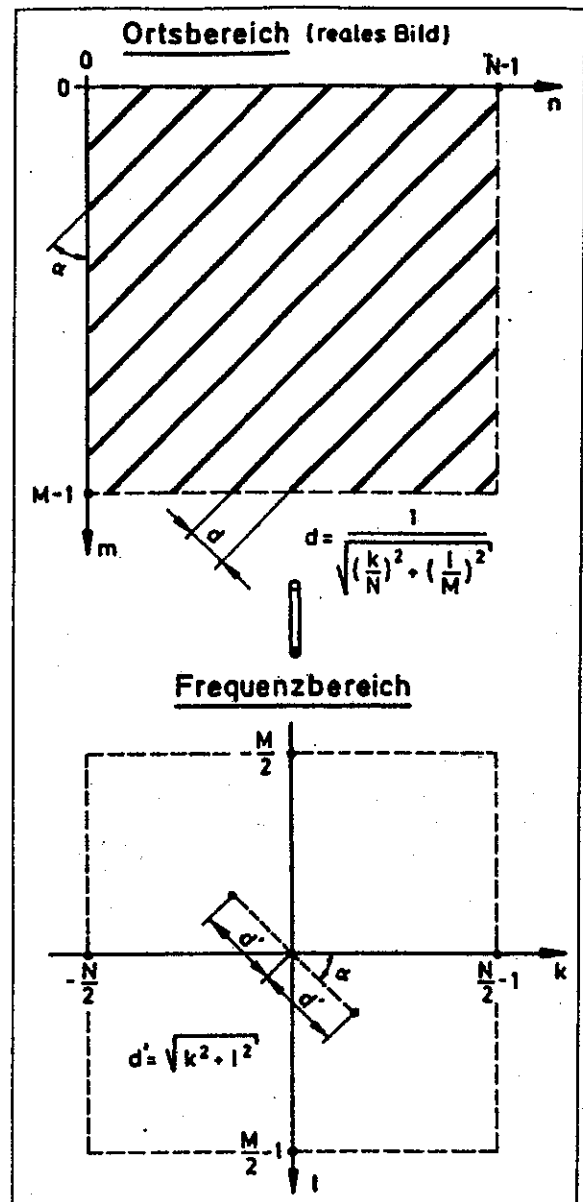


Abbildung 4.4-1: Modell einer Fouriertransformation /26/

4.4.2 Zweidimensionale Fouriertransformation

Periodisch wiederkehrende Markierungen können mit der Zweidimensionalen Fourieranalyse untersucht und dargestellt werden. Die zweidimensionale diskrete Fouriertransformation wird realisiert, indem nacheinander alle Spalten des Bildes und innerhalb dieser Spalten alle Zeilen einer eindimensionalen Fouriertransformation unterzogen werden. Der ausführliche mathematische Hintergrund dieser Operationen ist in /22/ beschrieben.

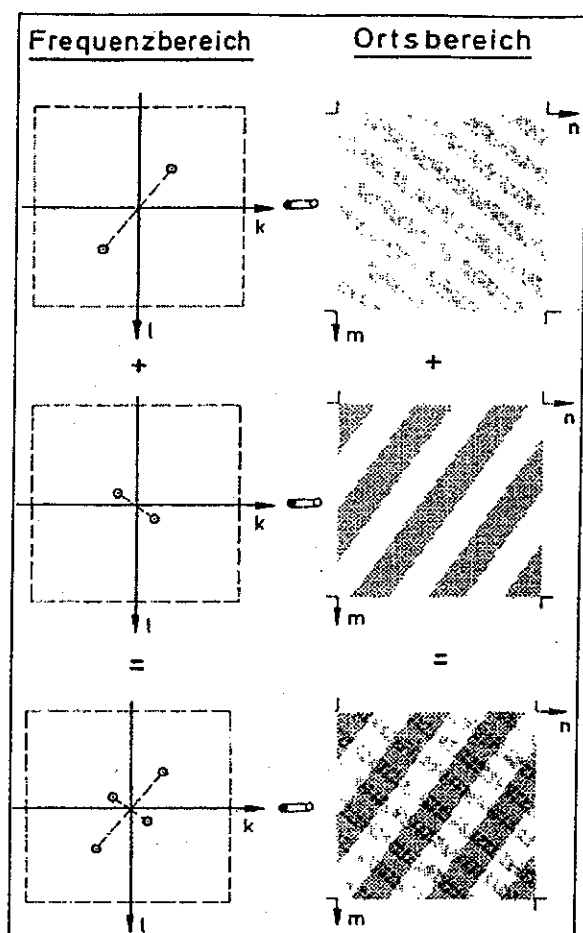


Abbildung 4.4-2: Überlagerung periodischer Strukturen /26/

Mit Hilfe der Fouriertransformation kann ein reales Bild (Ortsbereich) in den Frequenzbereich überführt werden. Abbildung 4.4-1 zeigt ein Beispiel für die Überführung eines mit deutlichen Markierungen versehenen Bildes. Der Abstand d der periodisch wiederkehrenden Linien ist auch im Frequenzbereich wiederzufinden. Eine wichtige Eigenschaft des Frequenzbildes ist zudem, dass die Verbindungslinie eines Punktes zur Bildmitte genau senkrecht auf der zugehörigen Markierungslinie im Ortsbild steht.

Diese Informationen ermöglichen eine relativ genaue Analyse der periodisch wiederkehrenden Strukturen einer Papierprobe. Dabei sind natürlich keine solch klaren Markierungen wie in Abbildung 4.4-1 zu erkennen; vielmehr weist die Oberfläche einer Papierprobe eine Vielzahl von sich überlagernden periodischen Merkmalen auf. Diese überlagern sich im Bild des Frequenzbereiches additiv (Abbildung 4.4-2) und werden als sogenannte Peaks dargestellt; daher können aus einem Bild einer Papierprobe prinzipiell alle Markierungen extrahiert werden. Eine Grenze bildet allerdings die Intensität der Markierungen, die sich wiederum in der Intensität der Peaks äußert. Diese werden als helle Punkte im Betragsspektrum der Fou-

riertransformation dargestellt. Bei geringer Intensität sind sie aber nur schwer zu erkennen.

4.4.3 Anwendung der Fourieranalyse

Wie eingangs erwähnt, ist das Beleuchtungsprinzip bei der Bilderfassung abhängig vom Zweck der Untersuchung. Um den Einfluss von Sieben auf eine Paperoberfläche zu untersuchen, empfiehlt sich die Verwendung von Aufsicht-Aufnahmen, da hierbei Ober- und Unterseite getrennt erfasst werden können. Die Auflösung bei der Bilderfassung beeinflusst die erreichbare Genauigkeit der Fourieranalyse; sie sollte deshalb so hoch wie möglich gewählt werden. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb mit 2500 ppi (10,16 μm) Auflösung gearbeitet.

Für die Fourieranalyse wird die Fast Fourier Transformation (FFT) genutzt. Diese ist ein Spezialfall der diskreten Fouriertransformation und lässt sich relativ unkompliziert berechnen /22/. Bedingung für die Ausführbarkeit ist allerdings, dass das zu untersuchende Bild eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von 2^n Pixel hat. Als zweckmäßig hat sich für die Untersuchung eine Kantenlänge von 512 Pixel erwiesen, was bei einer Auflösung von 2500 ppi (10,16 μm) einer Fläche von 5,2 x 5,2 mm entspricht. Dabei werden die Siebmarkierungen auf jeden Fall deutlich erfasst, da der Abstand von Siebfäden in der Regel wenige 100 μm beträgt.

Über die Auswertung der Fouriertransformation haben GÖTTSCHING und PRAAST /29/ umfangreiche Untersuchungen geführt. Auf die erneute Darlegung der mathematischen Grundlagen wurde in dieser Arbeit verzichtet. Im folgenden soll der Zusammenhang zwischen den im Frequenzbereich zu erkennenden Peaks und den Abständen periodischer Markierungen im Ortsbereich dargestellt werden.

Wie aus der vorangegangenen Diskussion und Abbildung 4.4-1 ersichtlich ist, steht die Verbindungslinie eines Peaks mit der Bildmitte des Frequenzbereichs senkrecht auf den dazugehörigen Markierungslinien. Die erste Messgröße, die aus der Darstellung des Frequenzbereichs entnommen werden kann, ist somit der Winkel der Siebmarkierungen. Um diese Information bewerten zu können, ist selbstverständlich noch die Kenntnis der Lage der Probe bei der Bahnbildung (Maschinenrichtung bzw. Querrichtung) notwendig.

Der Abstand von Markierungen, also die Frequenz ihres Auftretens bzw. die Länge einer Periode

kann mit den in Abbildung 4.4-1 angegebenen Formeln errechnet werden.

$$d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{k}{N}\right)^2 + \left(\frac{l}{M}\right)^2}} \quad \text{Gleichung 4.4-1}$$

bzw.

$$d' = \sqrt{k^2 + l^2} \quad \text{Gleichung 4.4-2}$$

Dabei sind:

- d - Abstand der Markierung im Ortsbereich (Länge einer Periode)
- d' - Abstand des Peaks von der Mitte des Bildes des Frequenzbereichs
- N - Breite des Bildes
- M - Höhe des Bildes
- k, l - Ganzzahlige Multiplikatoren (Ordnungszahlen) der Grundfrequenzen in Breiten- bzw. Höhenrichtung /13/

Im Ortsbereich sind $(k; l)$ beliebige Punkte auf einer Markierungslinie. Mit der Division durch die Bildbreite bzw. Bildhöhe ergibt sich eine dimensionslose Zahl für die Länge einer Periode. Wenn Breite und Höhe des betrachteten Bildes gleich sind – was bei der Fast Fourier Transformation ohnehin zwingend notwendig ist –, können N und M gleichgesetzt werden.

$$N = M \quad \text{Gleichung 4.4-3}$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Auflösung bei der Bilderfassung in Höhen- und Breitenrichtung gleich ist. Diese Bedingung stammt aus der Zeit, als /30/ erfasst wurde und sich die Bilderfassung wesentlich komplizierter gestaltete. Mit der in dieser Arbeit beschriebenen Bilderfassungsmethode ist eine Konstanz der Auflösung selbstverständlich.

Mit der genannten Bedingung vereinfacht sich Gleichung 4.4-4 zu:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{N^2}(k^2 + l^2)}} = \frac{N}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad \text{Gleichung 4.4-4}$$

bzw.

$$d = \frac{N}{d'} \quad \text{Gleichung 4.4-5}$$

Bei Kenntnis der Bildgröße N kann also aus dem Abstand d' eines Peaks vom Ursprung des Bildes im Frequenzbereiches der Abstand oder korrekter ausgedrückt die Periode einer Markierung

d errechnet werden. Um das Ergebnis in metrischen Einheiten angeben zu können, muss nun noch mit dem Abstand zwischen den Bildpunkten, also mit der Auflösung in mm multipliziert werden. Für eine Auflösung von 2500 ppi ergibt sich für die Periode d :

$$d[\mu\text{m}] = \frac{N}{d'} \cdot 10,16 \mu\text{m} \quad \text{Gleichung 4.4-6}$$

4.4.4 Ergebnisse

Mit einer Probe eines Standard-Kopierpapiers wurde eine Fourieranalyse durchgeführt. Aus einer bei 2500 ppi (10,16 μm) Auflösung gescannten Aufsicht-Aufnahme wurde ein 512 x 512 Pixel großer Ausschnitt einer Fast Fourier Transformation unterzogen. Im Originalbild sind mit bloßem Auge keine regelmäßigen Strukturen zu erkennen (Abbildung 4.4-3).

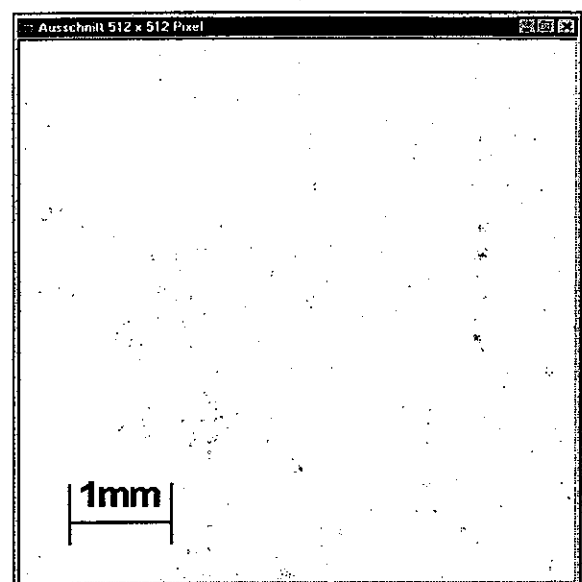


Abbildung 4.4-3: Ausschnitt (512 x 512 Pixel) einer Aufsichtprobe /26/

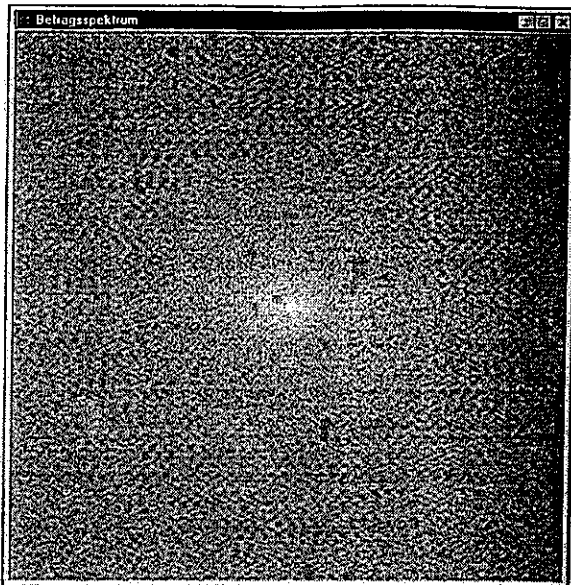


Abbildung 4.4-4: Betragsspektrum /26/

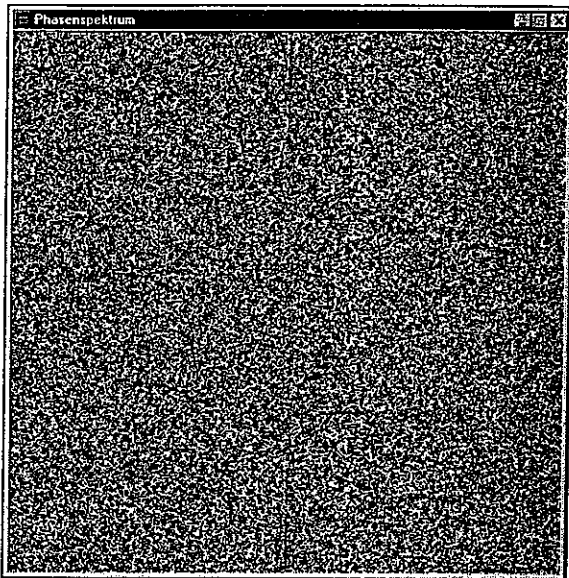


Abbildung 4.4-5: Phasenspektrum /26/

Als Ergebnis der Fourieranalyse werden nun Betragsspektrum und Phasenspektrum der Probe angezeigt. Diese Bilder stellen den Frequenzbereich der Probe dar. Aus dem Betragsspektrum (Abbildung 4.4-4) können nach der oben beschriebenen Berechnungsmethode die Perioden von regelmäßigen Markierungen ermittelt werden. Das zugehörige Phasenspektrum (Abbildung 4.4-5) stellt alle Winkel dar. Diese sind gemäß der Grauwertpalette codiert; schwarz entspricht einem Winkel von $-\pi/2$ (-90°), weiß steht für $+\pi/2$ ($+90^\circ$). Aus diesem Bild können derzeit noch keine relevanten Informationen entnommen werden; die Abbildung dient der Veranschaulichung.

Am Bildschirm können in der Originalgröße noch keine Peaks erkannt werden. Zudem kann das Zentrum des Bildes nur ungenau festgelegt werden. Zur Verdeutlichung wurde deshalb mit einer

XOR-Funktion ein Koordinatenkreuz in das Bild des Betragsspektrums eingefügt. Bei einer XOR-Verknüpfung werden die zu füllenden Bereiche immer mit der entgegengesetzten Graustufe gefüllt, die an dieser Stelle vorkommt. Wenn also die Koordinatenlinie über eine sehr helle Stelle verläuft, wird sie dunkel dargestellt; umgekehrt gilt das selbe. Nur in den Randbereichen des Betragsspektrums funktioniert dies nicht, da die Bildpunkte hier mit einem Grauwert von 128, also genau die Hälfte der 8-bit-Grauwertskala, gefüllt sind. Da diese Bereiche ohnehin nicht ausgewertet werden, kann eine Verknüpfung mit der XOR-Funktion bedenkenlos ausgeführt werden.

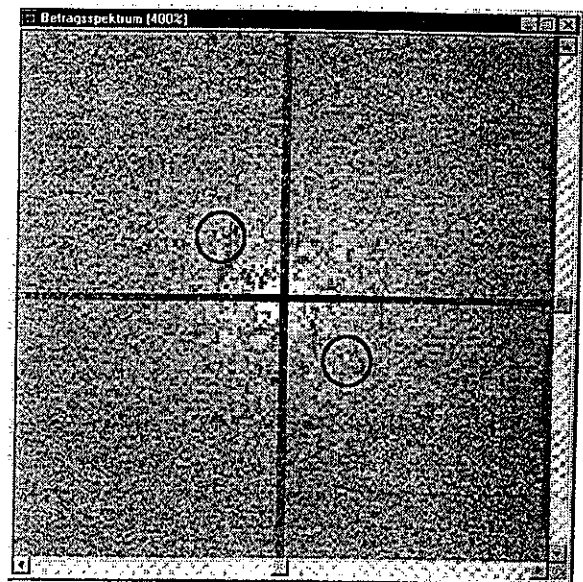


Abbildung 4.4-6: Vergrößertes Betragsspektrum /26/

Nach Einfügen des Koordinatenkreuzes wird die Anzeige des Betragsspektrums vervierfacht, also in AdOculus auf 400 % gesetzt. Dies ist nur eine Darstellungsfunktion und nimmt keinerlei Einfluss auf die Messergebnisse. In diesem Bild sind dann auch Peaks zu erkennen. Diese äußern sich in hellen Punkten im ansonsten grauen Bild (Abbildung 4.4-6). Peaks, die auf dem eingefügtem Koordinatenkreuz, also auf den Längs- bzw. Querachsen des Bildes liegen, werden schwarz oder dunkelgrau dargestellt.

Wie man sieht, sind relativ viele helle Punkte dargestellt. Zur weiteren Untersuchung werden diejenigen ausgewählt, die sich am markantesten zeigen. Für dieses Beispiel wurde auf zwei zusammengehörende Peaks zugegriffen, die zu ein und derselben Markierung gehören. Dies ergibt sich aus der Redundanz der negativen Ortsfrequenzen (Abbildung 4.4-1, 4.4-2).

/22/, /30/

Mit Hilfe der AdOculus-Funktion Messen können die Koordinaten der Peaks festgestellt werden. Mit der Funktion Messen können Strecken festgelegt

werden, deren Längen sowie Anfangs- und Endkoordinaten erfasst und tabellarisch ausgegeben werden.

Die Anzahl der zu messenden Punkte kann dabei nicht beliebig hoch gewählt werden. Da die Daten in Tabellenform ausgegeben werden, würde es sich anbieten, alle signifikanten Punkte in einem Arbeitsgang zu vermessen und diese dann nach Speicherung der Tabelle in Excel auszuwerten.

Die für die markierten Peaks (Abbildung 4.4-6) ermittelten Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Verbindungsgeraden zwischen Peaks und Ursprung sind in Tabelle 4.4-1 dargestellt. Die Reihenfolge und Bezeichnung der Messwerte wurde aus der derzeit angewendeten AdOculus-Funktion Messen übernommen. Es ist zu beachten, dass das Programm den Ursprung des internen Koordinatensystems in die linke obere Ecke des Bildes legt. Positive x-Werte werden nach rechts abgetragen positive y-Werte nach links.

Index	Koordinaten			
	links	oben	rechts	unten
1	270	269	256	256
2	240	241	256	256

Tabelle 4.4-1: Messwerte aus AdOculus /26/

Wie zu erkennen ist, gehören die Koordinaten „rechts“ und „unten“ zum Ursprung; die Koordinaten „links“ und „oben“ stellen die Peaks dar. Wenn man die Koordinaten des Ursprungs auf 0 setzt und die Koordinaten der Peaks darauf normiert, ergibt sich Tabelle 4.4-2 In Abbildung 4.4-7 sind die normierten Daten grafisch dargestellt.

i	x_i	y_i	x_0	y_0
1	14	13	0	0
2	-16	-15	0	0

Tabelle 4.4-2: Auf den Ursprung normierte Messwerte /26/

Der Abstand der Punkte vom Bildmittelpunkt kann berechnet werden nach dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der Koordinaten der Peaks.

$$d'_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

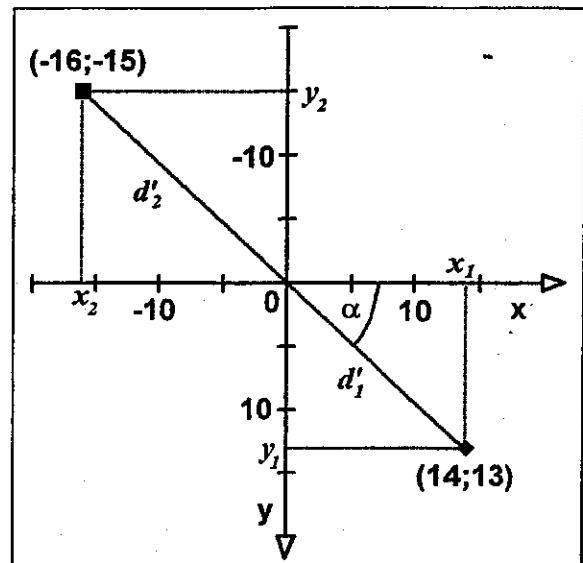


Abbildung 4.4-7: Darstellung der Peaks /26/

Aufgrund der Redundanz der beiden Peaks kann aus den Abständen d'_i ein Mittelwert gebildet werden. Dies gibt zudem die Möglichkeit, die Ungenauigkeit der Ursprungskoordinaten zu korrigieren. Die für dieses Beispiel ermittelten Einzel- und Mittelwerte sind in Tabelle 4.3-3 zusammengefasst. Dabei werden die Abstände in Pixel angegeben. Selbstverständlich können bei der digitalen Bildverarbeitung keine Bruchteile von Bildpunkten verarbeitet werden; die hier angegebenen Zahlen sind reine Rechengrößen.

d'_1	19,10 Pixel
d'_2	21,93 Pixel
Mittelwert: d'	20,52 Pixel

Tabelle 4.4-3: Abstände der Peaks vom Ursprung /26/

Daraus kann nun die Periodenlänge einer Markierung im Ortsbereich berechnet werden.

$$d = \frac{N}{d'} = \frac{512 \text{ Pixel}}{20,52 \text{ Pixel}} = 24,95$$

Unter Einbeziehung der Auflösung bei der Bildfassung (2500 ppi) wird dieser Wert in μm umgerechnet:

$$d[\mu\text{m}] = 24,95 \cdot 10,16 \mu\text{m} = 254 \mu\text{m}$$

Der Winkel α kann aus dem Sinus- bzw. Kosinussatz im rechtwinkligen Dreieck ermittelt werden; nach Umstellung ergibt sich:

$$\alpha = \arctan \frac{y_1}{x_1}$$

Für das betrachtete Beispiel ist $\alpha = 43^\circ$. Wie schon diskutiert und in Abbildung 4.4-1 dargestellt, ist dieser Winkel auch im Ortsbereich, also im realen Bild, wiederzufinden. Da die Höhenausrichtung die Maschinenrichtung (MD) und die Breite die Querrichtung (CD) des Papiers bei der Bahnbildung repräsentieren, kann der ermittelte Winkel α als Markierung im Winkel von 43° längs zur Bahnlaufrichtung und d als möglicher Abstand der Siebfäden interpretiert werden (Abbildung 4.4-8).

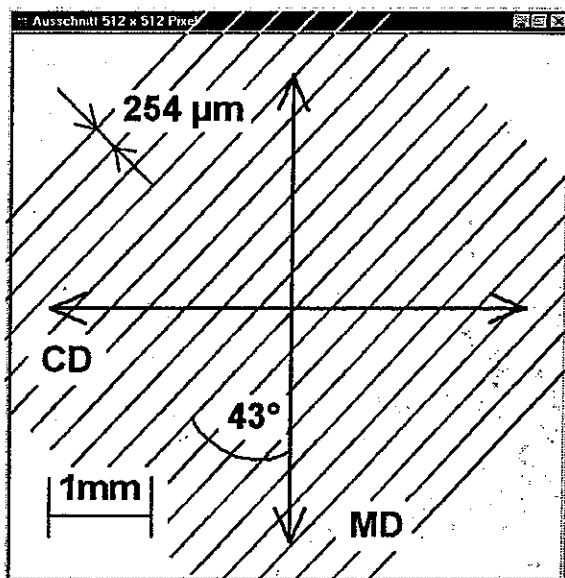


Abbildung 4.4-8: Skizze der ermittelten Markierung /26/

Mit der Fast Fourier Transformation ist es demnach möglich periodisch auftretende Strukturen wie z.B. Siebmarkierungen zu erkennen und zu analysieren.

4.5 Co-Occurrence-Matrix

4.5.1 Einführung

Die Co-Occurrence-Matrix stellt ein Formationsauswerteverfahren 2. Ordnung dar. Bei Verfahren 1. Ordnung, zum Beispiel die Ermittlung des Transparenz-Formations-Index, wird der Mittelwert und die Standardabweichung der Grauwerte verteilt ermittelt. Diese können allerdings für unterschiedliche Texturen gleich sein (Abbildung 4.5-1).

Statistiken 2. Ordnung berücksichtigen die räumliche Verteilung der Grauwerte auf die Bildpunkte.

Die Co-Occurrence-Matrix bietet eine Methode zur Formationsauswertung auf der Basis einer Statistik 2. Ordnung. Das auch als Spatial Gray Level Dependence Method bezeichnete Verfahren er-

möglicht Erkenntnisse über die Beziehungen und Abhängigkeiten von benachbarten Bildpunkten.

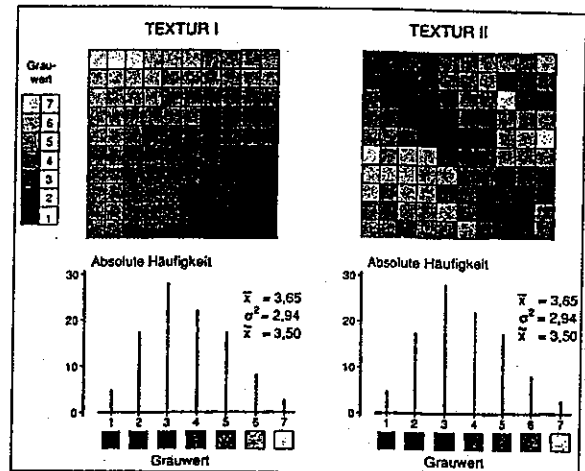


Abbildung 4.5-1: Texturen gleicher Statistik erster Ordnung, aber unterschiedlicher Statistik zweiter Ordnung. /26/

4.5.2 Texturparameter

Für die Auswertung von gescannten 8-bit-Graustufenbildern wird eine 256 x 256 Matrix verwendet. Die Elemente der Matrix geben an, wie viele Bildpunkte einer bestimmten Graustufe mit einer anderen Graustufe benachbart sind. Benachbart bedeutet in diesem Zusammenhang einen definierten Abstand vom Ausgangsbildpunkt; für die durchgeführten Untersuchungen wurde hier der rechte Nachbar verwendet. Abbildung 4.5-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Co-Occurrence-Matrix mit 4 Graustufen (0, 1, 2, 3).

Grauwert							
0 1 2 3							
Grauwert	0	0	0	0	1	2	3
	1	0	0	1	2	3	3
	2	0	1	1	2	3	3
	3	1	2	2	3	3	3
	2	2	3	3	3	3	3

Grauwert					
0 1 2 3					
Grauwert	0	0	4	0	0
	1	0	2	5	0
	2	0	0	2	6
	3	0	0	0	7

Grauwertbild

Co-Occurrence-Matrix (rechter Nachbar)

Abbildung 4.5-2: Berechnungsprinzip der Elemente der Co-Occurrence-Matrix /26/

Aus der Co-Occurrence-Matrix lassen sich eine Vielzahl von Informationen beziehen. Allerdings sind viele dieser Parameter nicht notwendig bzw. sinnvoll für die Charakterisierung einer Papierstruktur. CRESSON und LUNER /31/ haben 5 signifikante Parameter ausgewählt. Diese sind die Energie (ENG), der Kontrast (CON), die Entropie

(ENT), die Homogenität (HOM) sowie die Korrelation (COR). Außerdem kann der Artefact Contrast (AC) ermittelt werden, der Informationen über Kontraste infolge von Nadellöcher bzw. Schmutz gibt.

Die Texturparameter Energie und Entropie stehen dabei in keinem Zusammenhang mit herkömmlichen Definitionen; alle aus der Co-Occurrence-Matrix ermittelten Zahlenwerte sind einheitenfreie Größen. Zu deren Verständnis sollen folgende Erklärungen dienen: /22/

Die Energie (ENG) ist ein Maß für die Verteilung der Einträge in die Co-Occurrence-Matrix und charakterisiert somit die Gleichmäßigkeit der Papierstruktur. Erstreckt sich die Grauwertverteilung des Eingangsbildes über die gesamte Breite der Graustufen (0...255) gleichmäßig, so ist die Auftrittswahrscheinlichkeit aller Matrix-Einträge gleich und es ergibt sich ein niedriger Energiewert. Prüft man dahingegen eine vollkommen einheitlich strukturierte Papierprobe, so ergibt sich ein sehr hoher Energiewert, da sich in diesem theoretischen Fall die Anzahl der Einträge in die Matrix auf eins reduziert. Niedrige Energiewerte deuten daher auf eine schlechte Formation und hohe Energiewerte auf eine gute Formation hin.

Der Kontrast (CON) ist das Trägheitsmoment der Co-Occurrence-Matrix bezogen auf die Hauptdiagonale. Da sich eine gleichmäßige Struktur in wenigen Einträgen in die Matrix ausdrückt, die sich um die Hauptdiagonale anordnen, strebt der Kontrastwert gegen Null. Die Anordnung der Einträge um die Hauptdiagonale bedeutet, dass es nur wenige oder keine Übergänge der Grauwerte gibt, was sich wiederum in einem kleinen oder überhaupt keinem Kontrastwert ausdrückt. Eine weniger homogene Struktur wird mehrere Einträge in die Co-Occurrence-Matrix erlangen, die sich weiter von der Hauptdiagonalen entfernen und somit einen höheren Kontrastwert erzielen. Ein kleiner Kontrast ist daher Merkmal für eine gute Formation und umgekehrt ein hoher Kontrast ein Merkmal für eine schlechte Formation, da es hier viele Grauwertübergänge gibt, die sich auch als lokale Masseschwankungen, Nadellöcher und Streifen auslegen lassen.

Die Entropie (ENT) beschreibt den Grad der Unordnung und den mittleren Informationsgehalt. Ist die Textur von gleichmäßiger, feinflockiger Gestalt, so ergeben sich wenige Einträge in die Matrix und die Entropie ist klein. Große Entropiewerte stehen dahingegen für zahlreiche mögliche Grauwertübergänge und charakterisieren eine schlechte Papierformation.

Die Homogenität (HOM) ist Maß für die Gleichmäßigkeit innerhalb der Textur. Sie drückt den Beitrag der Hauptdiagonaleinträge aus. Papiere mit guter Formation erzielen eine hohe Homogenität, solche mit schlechter Formation eine niedrige Homogenität.

Die Korrelation (COR) ist ein Maß für lineare Abhängigkeiten in Spalten und Zeilen der Matrix. Kleine Werte der Korrelation deuten auf geringe lineare Abhängigkeiten hin, die für gleichmäßige Texturen und kleine Strukturen (kleine Flocken) charakteristisch sind. Hohe Korrelationswerte erzeugen wolkige, grobflockige, ungleichmäßige Papiere. In /32/ wird die Korrelation als sinnvoller Parameter für die Beschreibung der mittleren Flockengröße betitelt. COR stellt einen Zahlenwert dar, den sinngemäß die auf die Gesamtvarianz bezogene Autokovarianzfunktion bei einer durch den Verschiebungsvektor vorgegebenen Verschiebung unter dem entsprechenden Winkel einnimmt /22/. COR und der Integrale Wert haben gleiche Tendenz, und der Korrelationswert zwischen den beiden Parametern liegt nahe eins.

Zur Auswertung der zweidimensionalen Grauwertverteilung wird die Bildverarbeitungssoftware AdOculus genutzt. Mit dem Programm ist es möglich, die Texturparameter nach den folgenden Berechnungsvorschriften zu ermitteln:

Energie:

$$ENG = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c)^2$$

Kontrast:

$$CON = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \cdot (r - c)^2$$

Entropie:

$$ENT = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \cdot \log(f(r, c))$$

Homogenität:

$$HOM = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} \frac{f(r, c)}{1 + |r - c|}$$

mit:

- r - Zeilenindex (Laufvariable)
- c - Spaltenindex (Laufvariable)
- R - Anzahl der Zeilen
- C - Anzahl der Spalten

$$f(r, c) = \frac{a(r, c)}{M}$$

- $a(r, c)$ - Element der Co-Occurrence-Matrix an der Stelle (r, c)
 M - Summe aller Matrixelemente
 N - Differenzwert zwischen dem höchsten und niedrigsten Grauwert

Diese vier Parameter können derzeit ermittelt werden. Auch die Routinen für die Korrelation COR und den Artefact Contrast AC wurden schon implementiert; allerdings sind diese noch fehlerbehaftet und können deshalb nicht zur Diskussion herangezogen werden. Nachfolgend sind die Definitionen dieser noch zu überprüfenden Texturparameter aufgeführt:

Korrelation:

$$COR = \frac{\sum \sum f(r, c) \cdot (r - mr)(c - mc)}{sr \cdot sc}$$

mit:

mr - Zeilenmittelwert

$$mr = \sum_{r=0}^{R-1} r \left[\sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \right]$$

mc - Spaltenmittelwert

$$mc = \sum_{c=0}^{C-1} c \left[\sum_{r=0}^{R-1} f(r, c) \right]$$

sr - Standardabweichung in der Zeile

$$sr = \sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \left[(r - mr)^2 \cdot \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \right]}$$

sc - Standardabweichung in der Spalte

$$sc = \sqrt{\sum_{c=0}^{C-1} \left[(c - mc)^2 \cdot \sum_{r=0}^{R-1} f(r, c) \right]}$$

Artefact Contrast:

$$AC = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} |N - r - c + 1|^2 \cdot f(r, c)$$

mit:

N - Differenzwert zwischen dem höchsten und niedrigsten Grauwert

4.5.3 Messwerterfassung

Für die Untersuchung der Papierstruktur mit Hilfe der Co-Occurrence-Matrix werden Durchsicht-Aufnahmen von Papierproben verwendet. Die Auflösung bei der Bilderfassung beträgt 1200 ppi (21,17 μm). Daher können für die Auswertung auch gespeicherte Bilddateien genutzt werden, mit denen schon die eindimensionale Formationsuntersuchung (Transparenz-Formations-Index) durchgeführt wurde. Dadurch wird nicht nur wertvolle Zeit gespart, sondern auch Speicherplatz auf der Festplatte des Computers oder auf anderen Speichermedien.

4.5.4 Ergebnisse

Unter Verwendung der beschriebenen Methodik können vorerst vier Texturparameter bestimmt werden. Diese werden als Mittelwert von insgesamt je 100 Einzelwerten errechnet. Durch unvermeidbare Fehler wie elektronisches Rauschen werden die Messwerte verfälscht; die Größenordnung dieses Fehlers liegt bei 0,1 bis 1 %.

Die Variationskoeffizienten der Texturparameter liegen im Bereich von 1 bis 12 %. Während man bei einer Ungenauigkeit von 2 % noch zufrieden sein könnte, gibt ein Variationskoeffizient Anlass zu weiteren Diskussionen. Um ihn zu verringern bedarf es einer Vergrößerung der Messfläche. Dazu stehen zwei Möglichkeiten zur Wahl:

Zum einen könnte man die Fläche der Probenausschnitte (Felder), die zur Auswertung herangezogen werden, vergrößern. Allerdings treten dann bei der bisherigen Berechnungsmethode Fehler auf. Die Zahlenwerte werden größer als der ihnen zugewiesene Speicherplatz; infolgedessen werden keine gültigen Messwerte angezeigt. Dies könnte durch Neuprogrammierung der AdOculus-Funktion zur Co-Occurrence-Auswertung vermieden werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Erhöhung der Anzahl der Felder je Probe. Dabei ist zu beachten, dass sich die für die Auswertung in AdOculus und Excel benötigte Zeit ebenfalls erhöht. Bei der bisherigen Systematik mit 10 Ausschnitten je Probe dauern das Ausführen der AdOculus-Funktionen, die Speicherung der ausgegebenen Tabellen sowie deren Einarbeitung in eine vorgefertigte Excel-Arbeitsmappe 60 Minuten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bearbeitungszeit linear mit der Anzahl der Felder ansteigt. Somit muss für den jeweiligen Fall abgeschätzt werden, ob die Reduzierung der Abweichungen um vielleicht nur Bruchteile einen erhöhten Zeitaufwand wert ist.

5. Probe-Laserdruck-, -Ink-Jet- und -Kopier-Verfahren

5.1 Schwarz-Weiß-Probedruck-Verfahren

5.1.1 Gravimetrische (gewogener Andruck) und Densitometrische Bewertung

Ziel der Untersuchungsmethode ist die Beurteilung der Bedruckbarkeit der Kopier- und Laserdruckpapiere in der Schwarz-Weiß Wiedergabe von Vollton- und Halbtonbilder (Rasterdruck). Um die Beziehung des Druckergebnisses mit dem Wirkungsgrad des Toners auf unterschiedliche Papiere untersuchen zu können, wurden Probedrucke mit großen Flächen (etwa 363 cm²) für jeweils eine Graustufe von 25%, 50%, 75% und 100% schwarz erstellt. Durch Wiegen vor und nach dem Druck im klimatisierten Zustand wurde die fixierte Tonermenge ermittelt.

Die übertragene Tonermenge (M) in g/m² berechnet sich nach Formel:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{A} \cdot 10^{-4} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

wobei

M	übertragene Tonermenge [g/m ²]
m ₁	Masse der Probe vor dem Druck [g]
m ₂	Masse der Probe nach dem Druck [g]
A	bedruckte Fläche [cm ²] ,hier: 375 cm ²

Zur Festlegung der Methode gehört die Untersuchung der Versuchsbedingungen. Insbesondere das Erreichen eines stabilen Zustands ist sehr abhängig vom dem Typ des Laserdruckers. Als Probegeräte wurden ein Standard-Laserdrucker HP LaserJet 5/5 und ein Farblaserdrucker QMS Magicolor 330. Die Auflösung des Standarddruckers beträgt 600 dpi (42 µm), die von dem Farblaserdrucker 1200 dpi (21 µm). Im allgemeinen weisen die schwarz bedruckten Flächen bei den Farblaserdruckern ein höherer Glanz im Vergleich zum Standarddrucker auf. Dies ist bedingt durch das Anbringen von Fixieröl (wie im Fall des QMS Druckers) oder durch Lösungsmittel im Toner. Trotzdem wurde eine deutlich höhere Tonermenge mit Standardlaserdrucker als mit Farblaserdrucker festgestellt (4 g/m² gegenüber 1,5 g/m² mit 25% Graustufe auf ungestrichenes Kopierpapier).

Eine Wichtige Kenngröße des Druckergebnisses ist die optische Dichte D, im Fall der Schwarz-Weiß-Bedruckbarkeit auch Schwärzung S genannt:

$$D = \log \frac{R_{\infty}}{R_{\infty p}} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

D	optische Dichte (dimensionslos)
R _∞	Reflexionsfaktor (Weißgrad) des unbedruckten Bereichs, gemessen über einem Stapel des gleichen Papiers
R _{∞p}	Reflexionsfaktor (Weißgrad) des bedruckten Bereichs, gemessen mit Hilfe der gleichen Unterlage

Die Schwärzung quantifiziert die Abnahme des Weißgrads durch die an der Papieroberfläche haftenden Tonerpartikel. Die logarithmische Abhängigkeit entspricht dem psycho-physischen Gesetz der Wahrnehmung [33]. Zur Messung des Weißgrades auf derselben Probe mit 5 Grauwerten im Rasterdruck mit Abstufung 25% (0% = unbedruckt, 100% = Vollton Schwarz) wurden Probedrucke im Format A4 erstellt (Abbildung 5-1).

Für drei repräsentative Kopier- und Laserdruckpapiere (ungestrichen maschinenglatt NKP2, ungestrichen satiniert NKP6, gestrichen glänzend GKP2) wurden gewogene Andrucke bei dem Grauton 25% sowie densitometrische Untersuchungen bei allen Grautönen durchgeführt. Die Proben wurden mit dem Farblaserdrucker QMS Magicolor 330 gedruckt. Die auf den untersuchten Papiere fixierte Tonermenge beim gleichen Grauton steigt mit zunehmender Rauheit (Abb. 5-9). Die Schwärzung weist einen eindeutigen Zusammenhang mit der Tonermenge (Abb. 5-5) auf. Im Fall des Papiers NKP2 wurden zusätzlich dieselben Probedrucke mit dem Schwarz-Weiß-Standard-Laserdrucker HP 5/5 durchgeführt und die Ergebnisse verglichen (Abb. 5-13 bis Abb. 5-17). Beim Grauton 25% ist die fixierte Tonermenge mit dem Standardlaserdrucker 2,5-fach höher als mit dem Farblaserdrucker aber ohne relevante Auswirkung auf die Schwärzung (Abb. 5-13).

Bei den ungestrichenen Papieren nimmt die Schwärzung mit zunehmender Rauheit ab. Bei höherem Glanz (45° DIN) bzw. Kontaktanteil ist die Schwärzung höher. Das gestrichene Papier zeigt einen geringeren Druckkontrast nach der densitometrischen Auswertungsmethode. Auf die wahrgenommene Druckqualität wirken aber weitere Faktoren wie Gleichmäßigkeit und Konturenschärfe der Rasterpunkte. Diese Eigenschaften müssen durch Mikro-Bildanalyse untersucht werden.

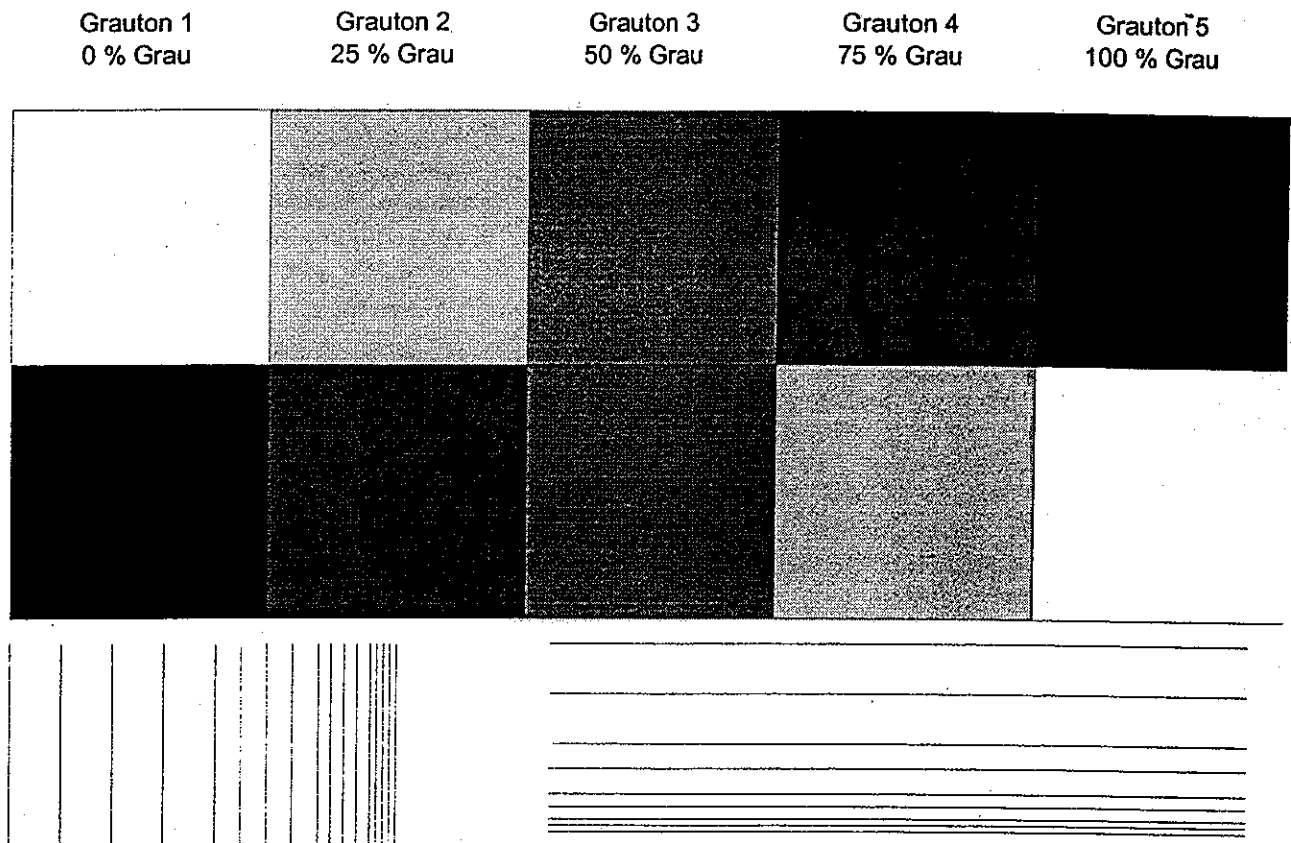


Abbildung 5-1: Laser-Probedruck mit Grauwertabstufungen

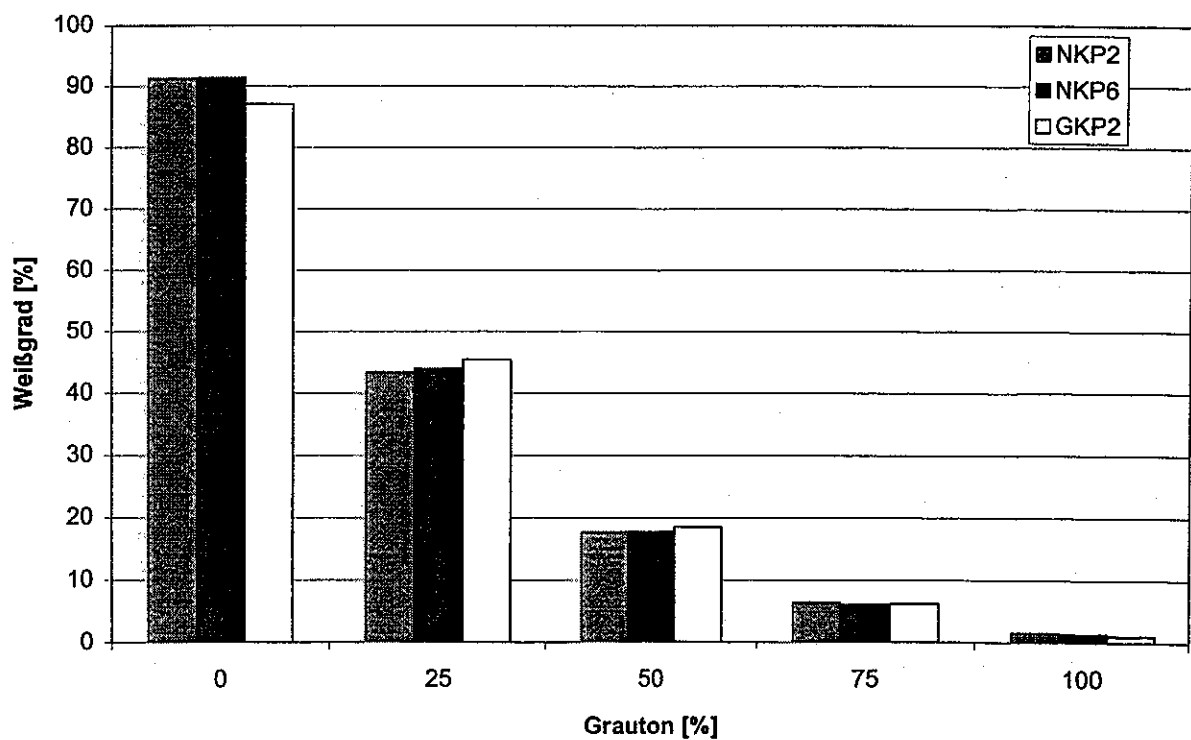


Abbildung 5-2: Grauton vs. Weißgrad (ohne UV) der schwarz bedruckten OS

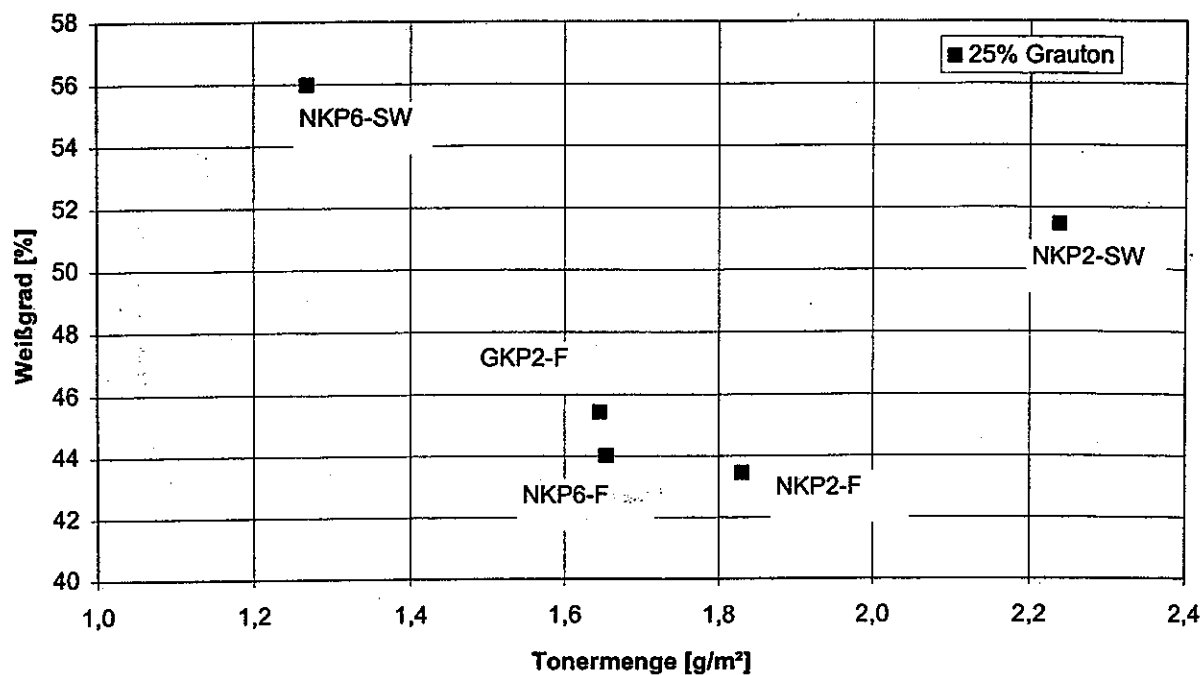


Abbildung 5-3: Vergleich Tonermenge und Weißgrad bei Grauton 25% auf der OS

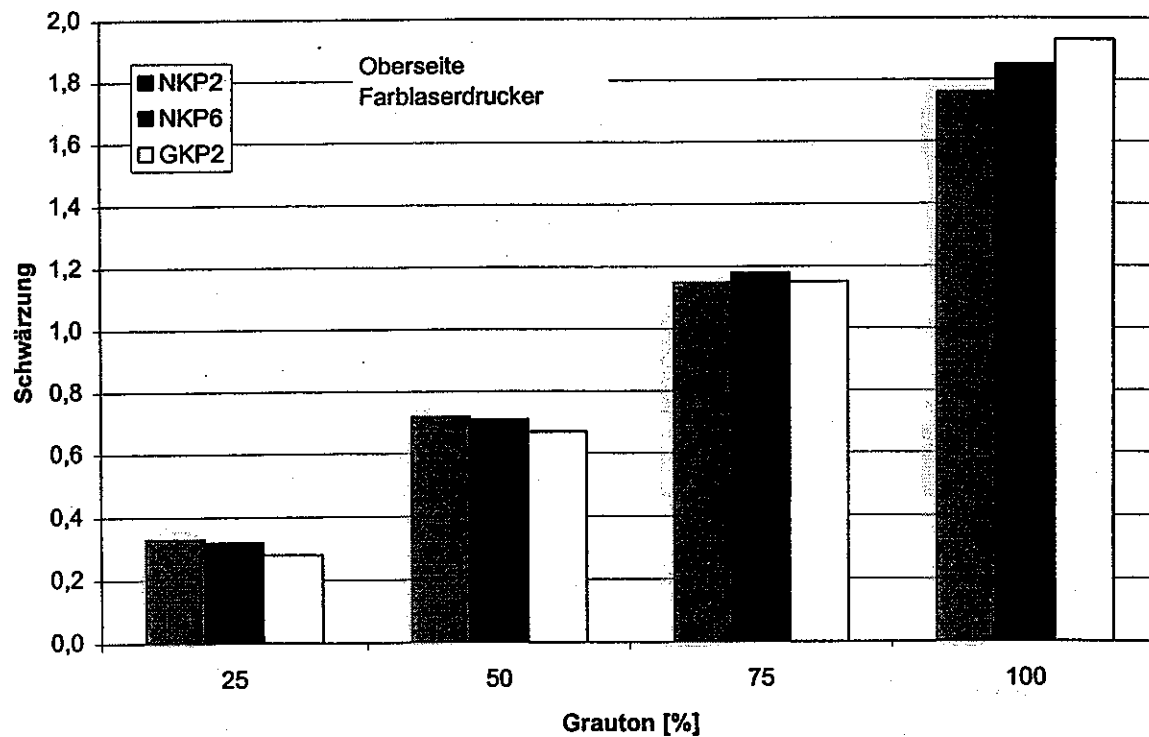


Abbildung 5-4: Grauton vs. Schwärzung

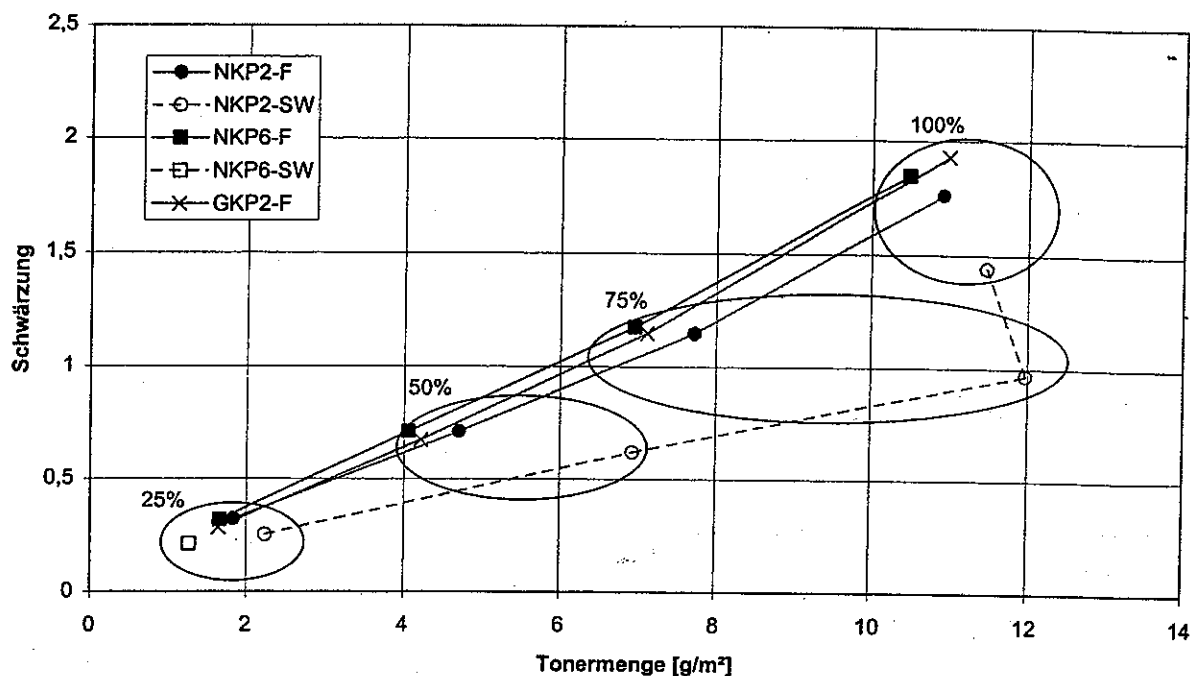


Abbildung 5-5: Tonermenge vs. Schwärzung der schwarz bedruckten OS

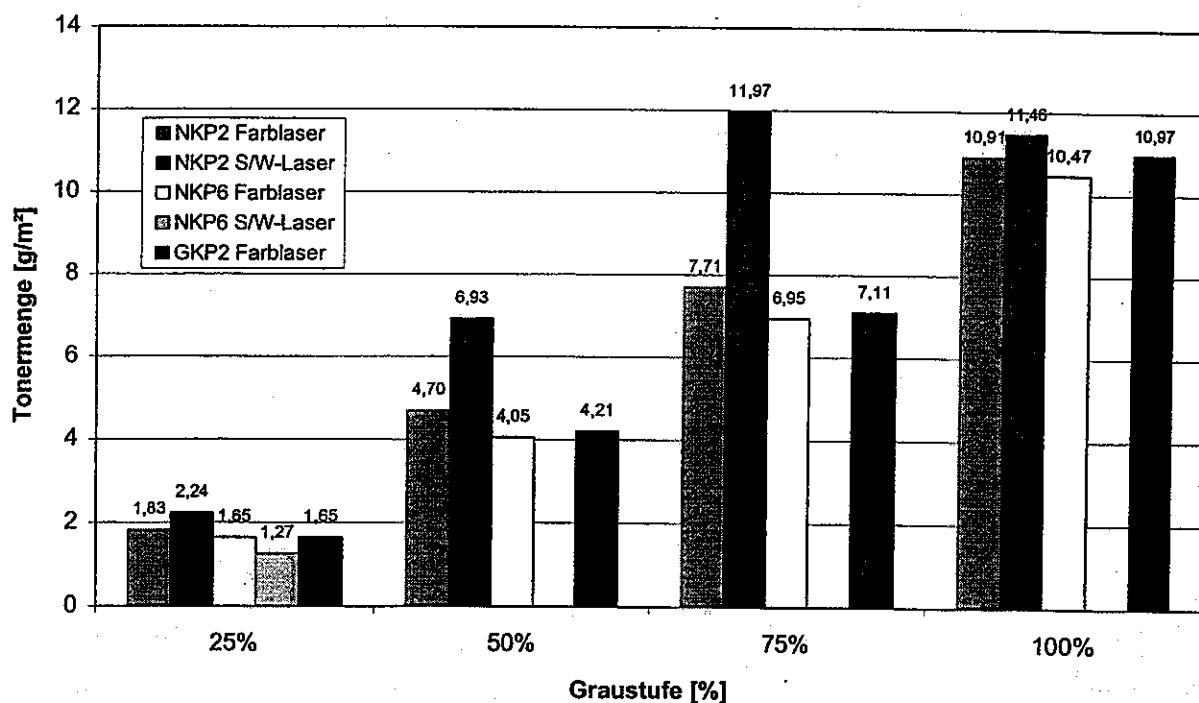


Abbildung 5-6: Vergleich Tonermengen der schwarz bedruckten OS

Es war leider nicht möglich mit dem Schwarz-Weiß-Laserdrucker die Graustufen 50, 75 und 100% auf das NKP6 zu bringen, da die Blätter dann im Drucker einen Papierstau verursachten.

Der Rückgang der Tonermenge beim Drucken von 100% schwarz auf NKP6 mit dem Standard-Laserdrucker HP 5/5 lässt sich durch eine geringe Tonerhaftung auf dem satinierten Papier erklären.

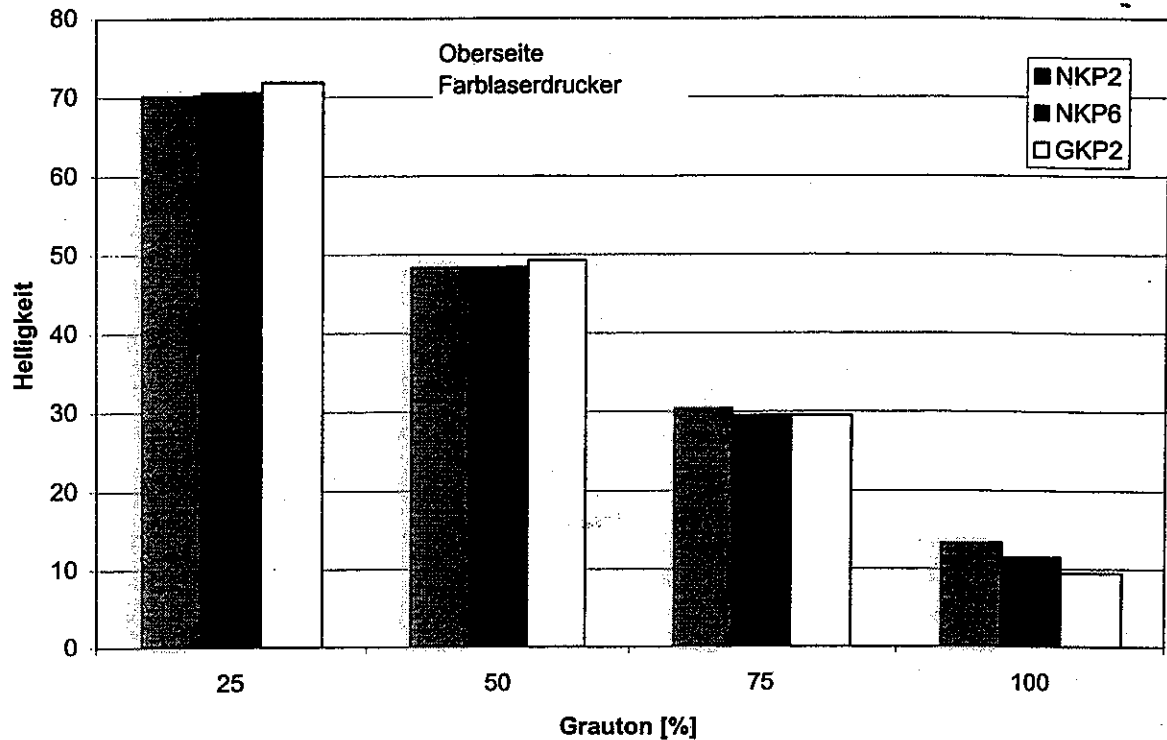


Abbildung 5-7: Grauton vs. Helligkeit

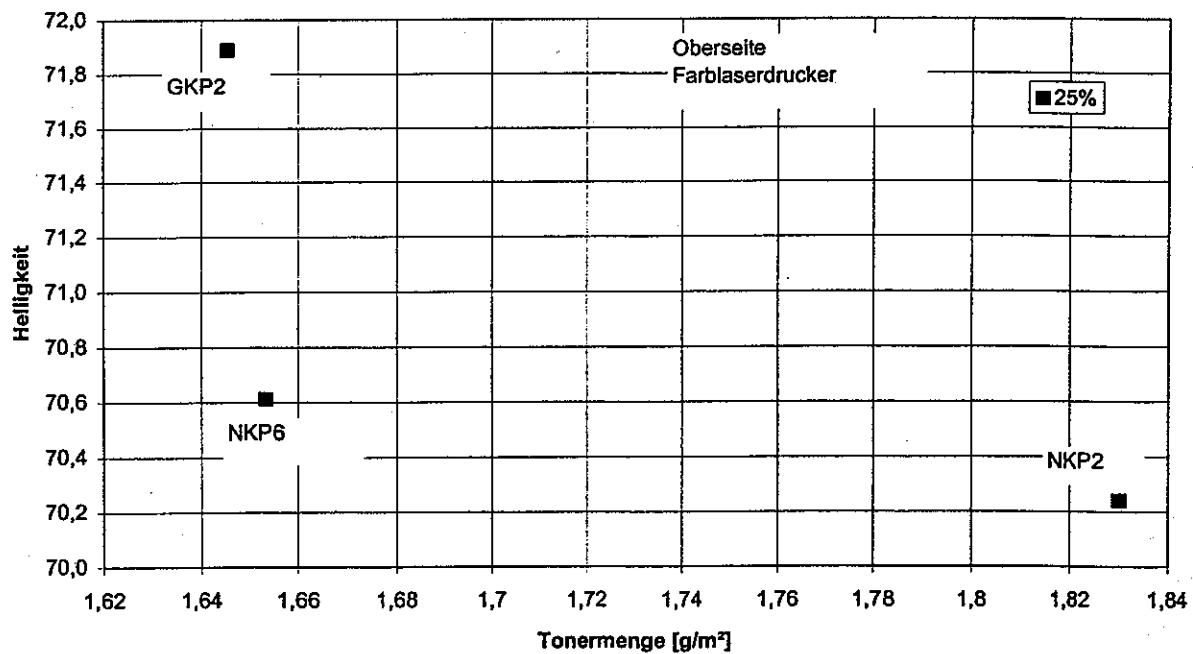


Abbildung 5-8: Tonermenge vs. Helligkeit

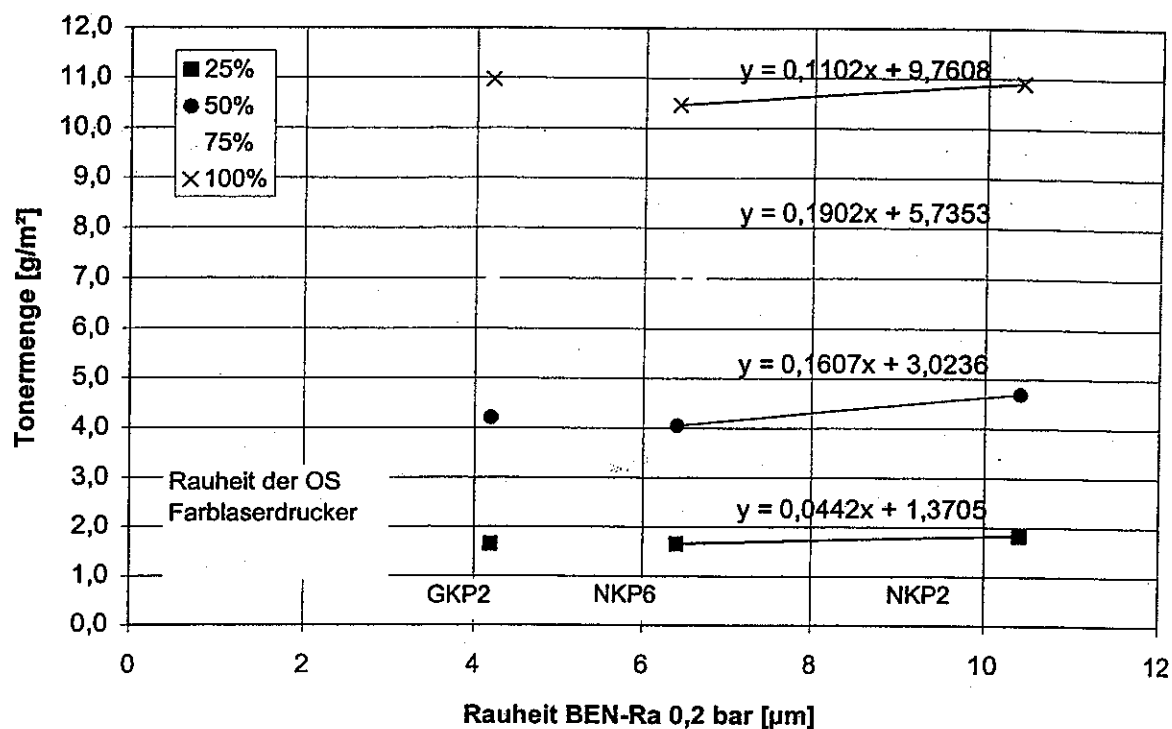


Abbildung 5-9: Beziehung der Rauheit und Tonermenge

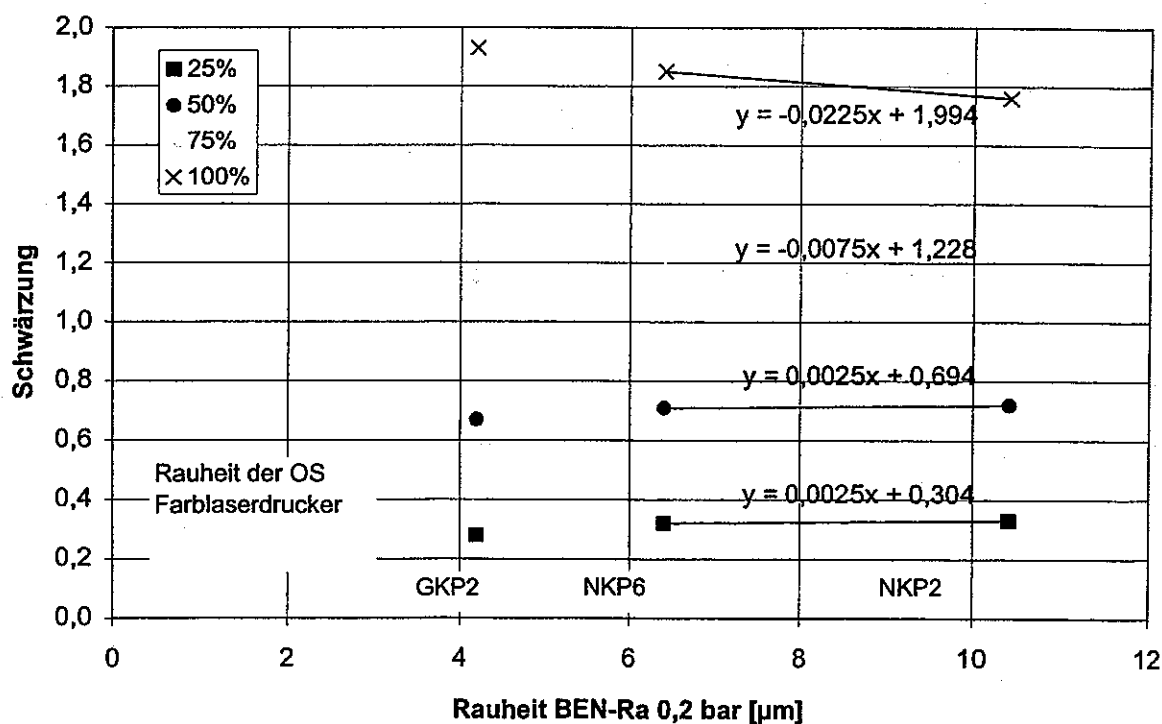


Abbildung 5-10: Rauheit vs. Schwärzung der schwarz bedruckten OS

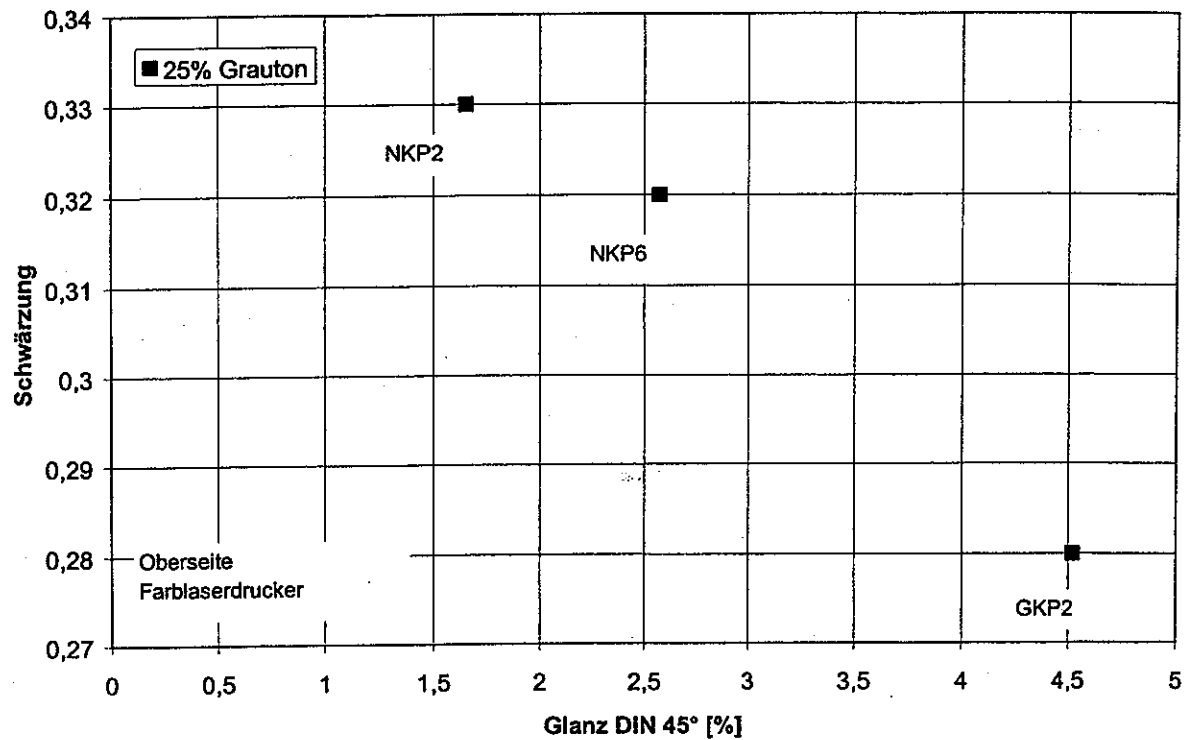


Abbildung 5-11: Zusammenhang Glanz und Schwärzung

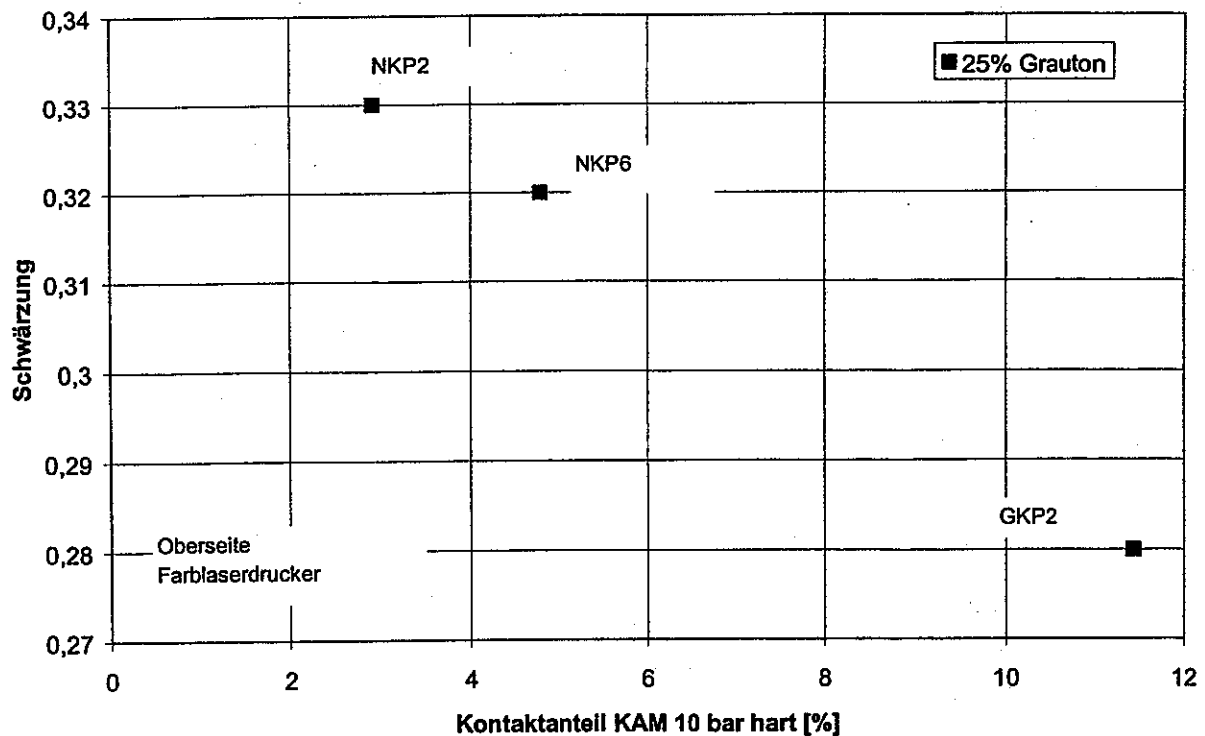


Abbildung 5-12: Zusammenhang Kontaktanteil und Schwärzung

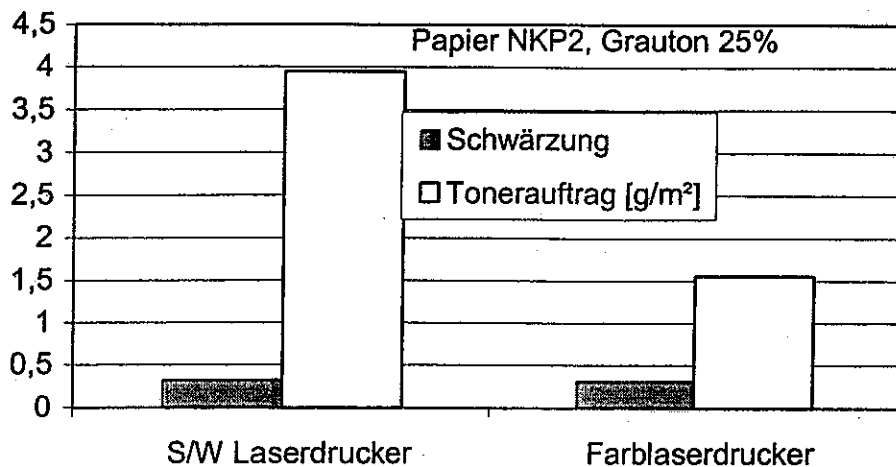


Abbildung 5-13: Vergleich Tonerauftrag (OS)

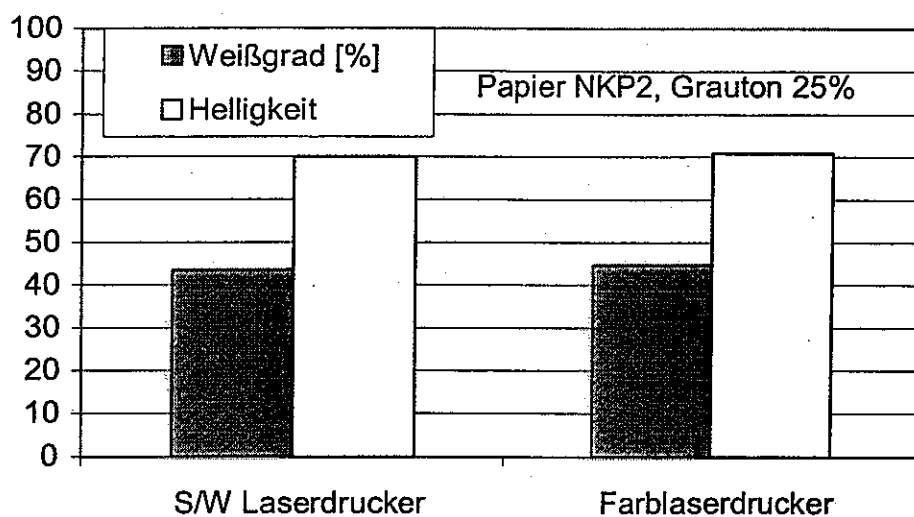


Abbildung 5-14: Vergleich Drucker (OS)

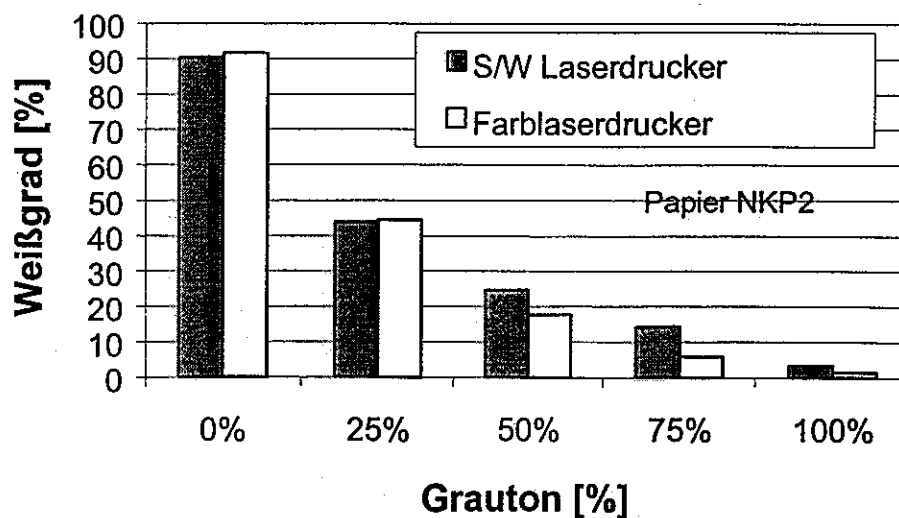


Abbildung 5-15: Vergleich Weißgrad der Drucker

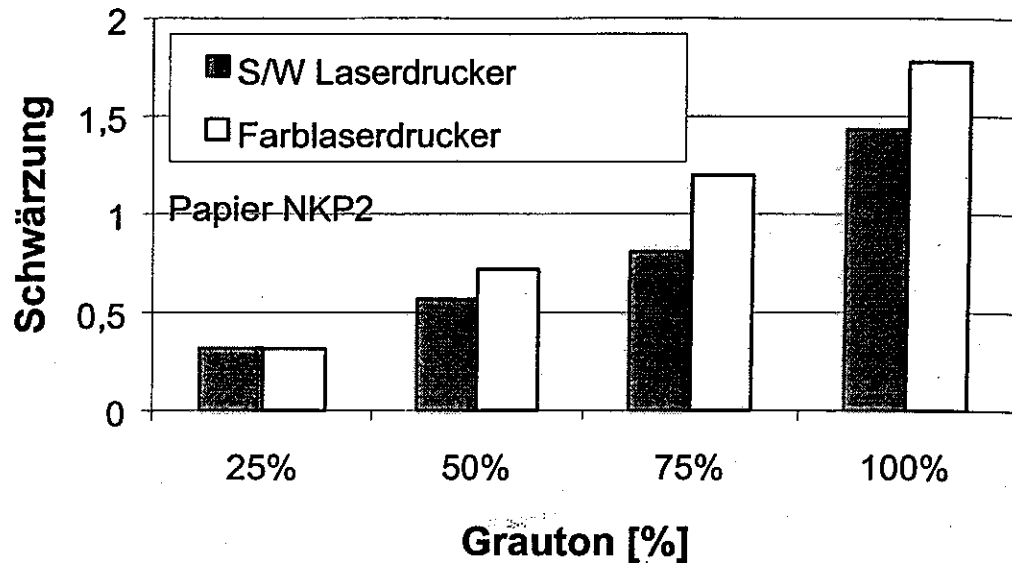


Abbildung 5-16: Grauton vs. Schwärzung (OS)

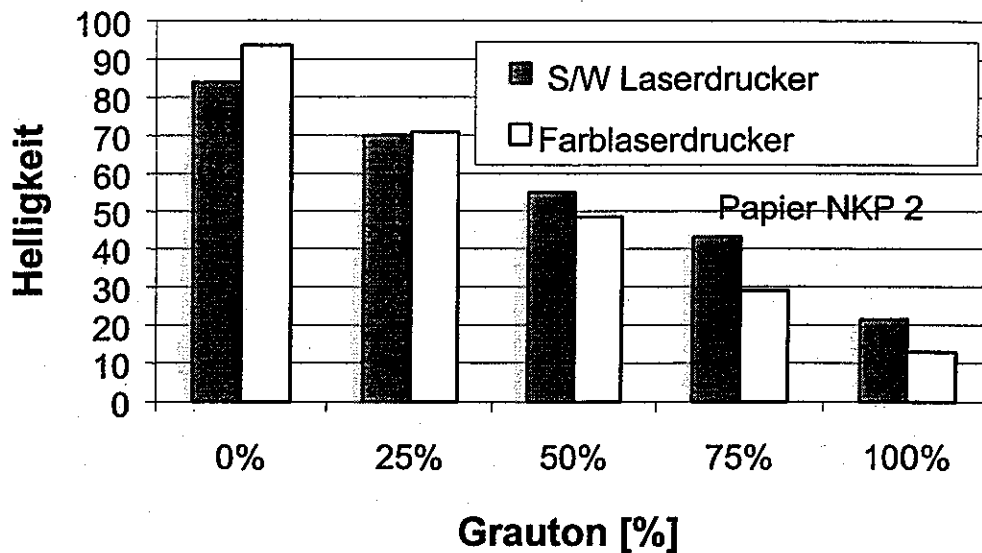


Abbildung 5-17: Grauton vs. Helligkeit (OS)

5.1.2 Mikro-Bildanalyse der Probedrucke

Eine Methode zur Untersuchung der Bildqualität von Raster- und Vollton- Schwarz/Weiß-Bilder wurde mit Hilfe der Bildanalyse-Software DBS AdOculos 3.1 entwickelt. Untersuchungsmaterial sind die Probedrucke für die densitometrische Auswertung (Abbildung 5-1), Linien- und Buchstaben-Probedrucke (Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19).

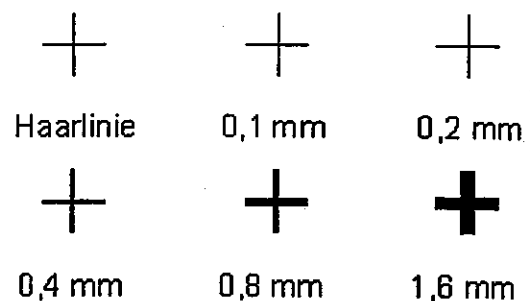


Abbildung 5-18: Probedruck mit definierter Dicke

Test Test Test Test
 Test Test Test Test
 Test Test Test Test
 Test Test Test Test
 Test Test Test Test
 Test Test Test Test
 Test Test Test Test

Abbildung 5-19: Buchstaben-Probedruck

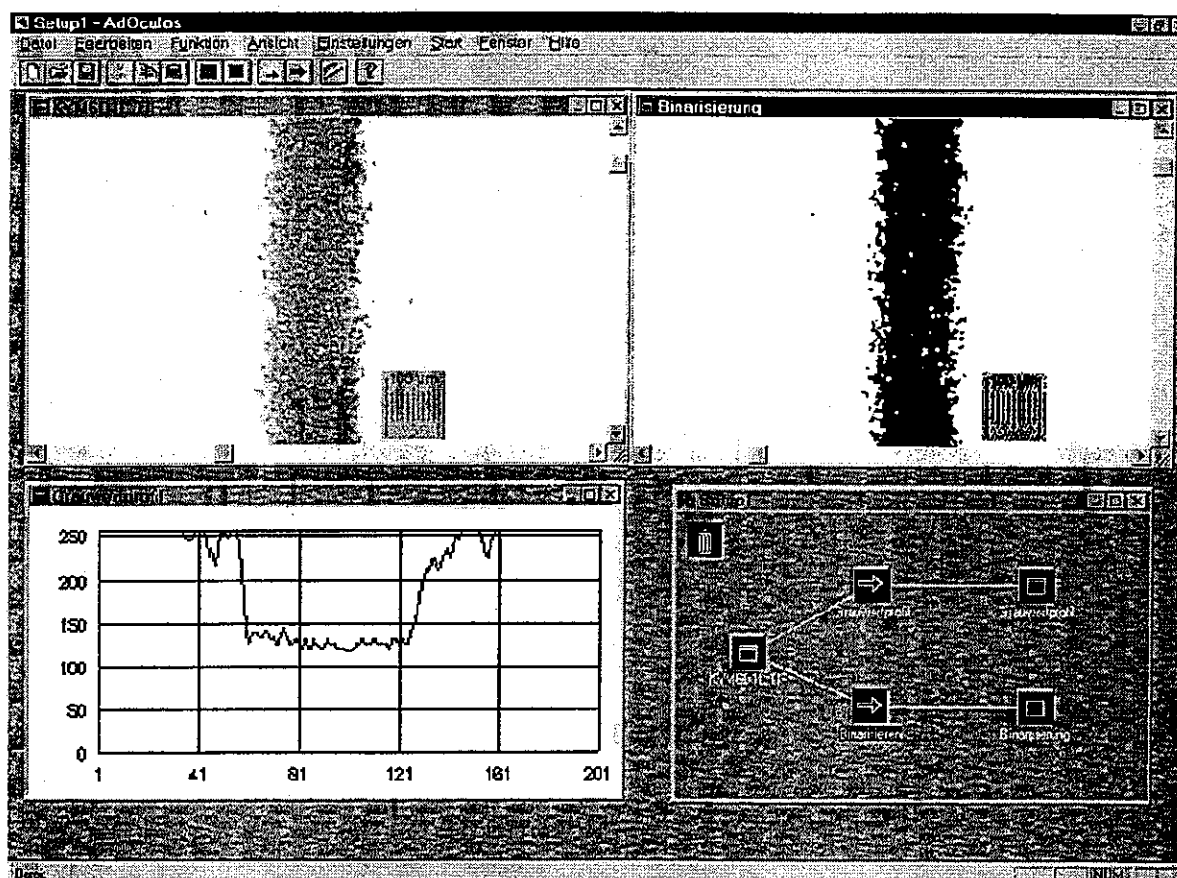


Abbildung 5-20: Bildanalytische Erfassung von Graustufenverteilung

Mit der Software DBS AdOculus wurden Funktionsketten zur Bewertung der Druckqualität programmiert. In Abbildung 5-20 ist die Oberfläche des Programms mit dem Ausgangsbild, der Funktion und den Ergebnissen gezeigt. Eine Linie von definierten nominaler Dicke 100 μm wurde mit Standardlaserdrucker auf satiniertes ungestrichenes Kopierpapier gedruckt. Die Auflicht-Aufnahme der Linie wurde binarisiert mit Hilfe der Grauwertverteilung. Durch die Auswahl des Schwellenwertes wird das Ausgangsbild mit 256 Grauwerten (Ordinate im Diagramm mit 256=Weiß) in ein Schwarz-Weiß-Bild konvertiert.

In der bynarsierten Aufnahme können die Umrisse der schwarzen Elemente isoliert, gezählt und gemessen werden, wie in Abbildung 5-23 im Fall von Rasterpunkten dargestellt. Die statistische Auswertung der Daten für die bedruckte Fläche liefert Kennwerte für die Abweichung der Elemente von der nominalen Form und Größe und deren Verteilung. Die Aussagen der mikroskopischen Bildanalyse werden dann mit der makroskopischen Druckqualität (Schwärzung, bzw. auch optische Dichte genannt) und der fixierten Toner- menge im Verbindung gebracht.

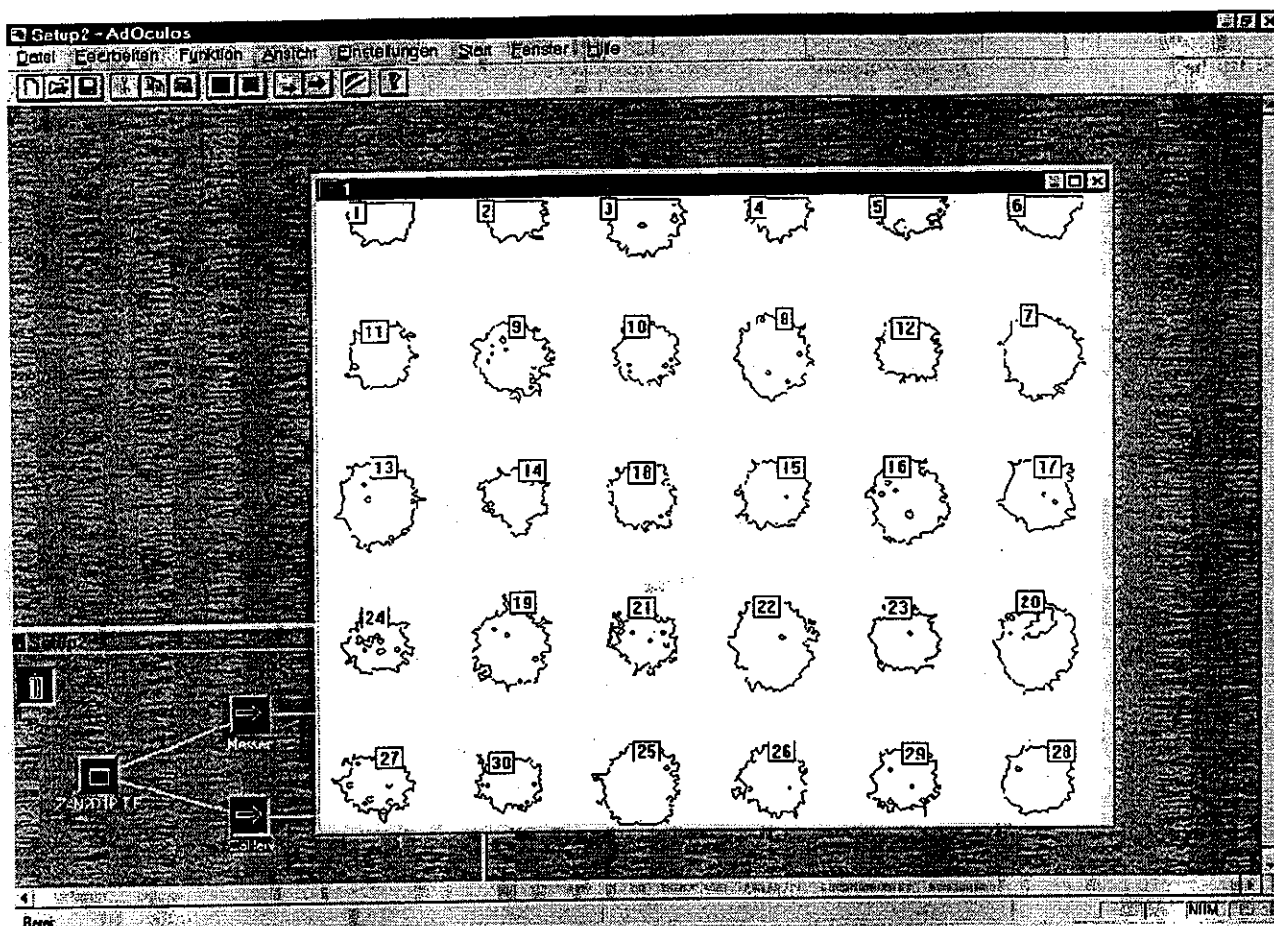


Abbildung 5-21: Bildanalytische Auswertung:
Zählen und Messen von bedruckten Rasterpunkten

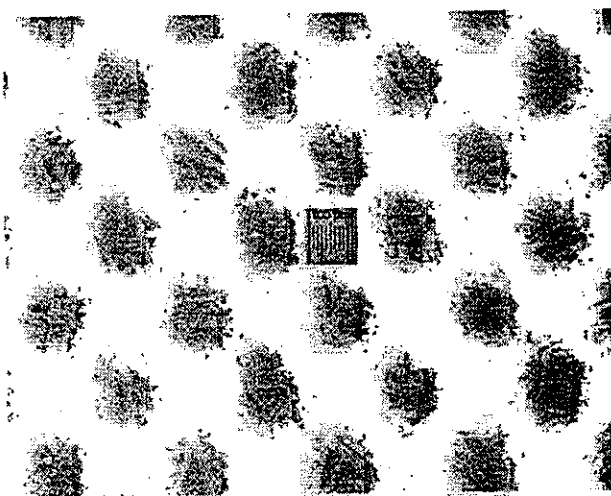


Abbildung 5-22: Auflichtaufnahme, 25% schwarz

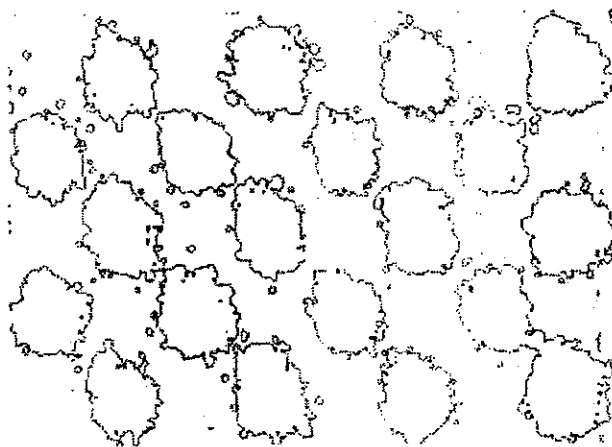


Abbildung 5-23: Erfassung der Umriss zur geometrischen Bewertung der Rasterpunkte

Fläche	Schwerp.	Umfang	Pol.Abst. min/max	Komp.
2	3, 526	6	0 1	14
1	22, 225	4	0 0	12
2	35, 103	6	0 1	14
3	37, 241	8	1 1	16
6	40, 428	10	0 1	13
7	49, 288	12	1 1	16
5	51, 294	12	1 1	22
5	62, 238	10	0 2	15
1	73, 607	4	0 0	12

Abbildung 5-24: Ausschnitt der Merkmalliste der einzelnen Objekte aus Abbildung 5-23

In Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26 ist der Unterschied zwischen den beiden Probe-Laserdruckern beim Druck eines Rasterbildes mit Grauton 25% auf ungestrichenes Papier.

Mit dem Farblaserdrucker sind die Papierfasern unter dem fixierten Toner sichtbar. Die Gleichmäßigkeit der Punkteabmessungen ist besser mit Farblaserdrucker.

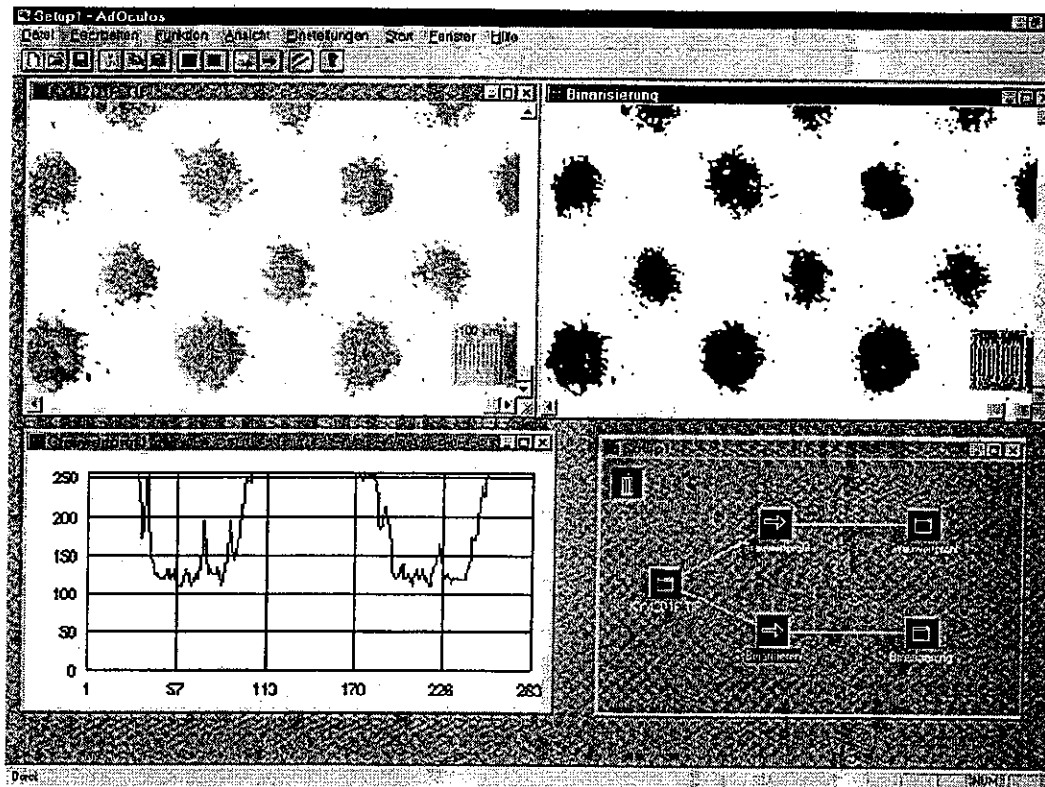


Abbildung 5-25: NKP2, Standardlaserdrucker, Grauton 25%

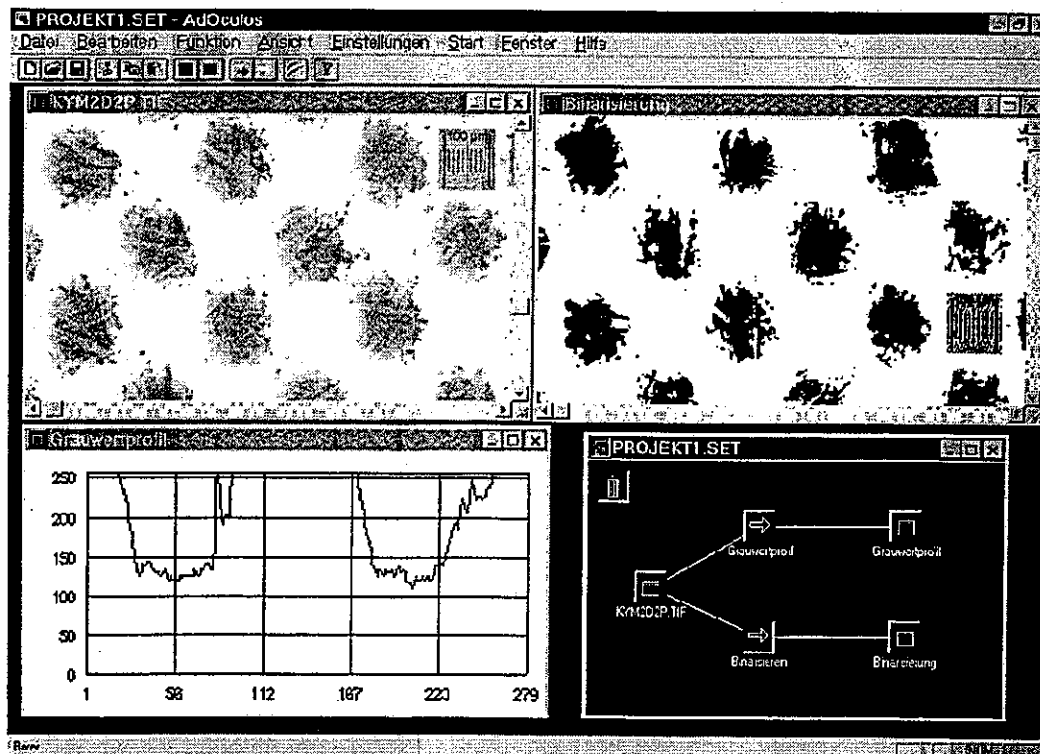


Abbildung 5-26: NKP2, Farblaserdrucker, Grauton 25%

Jedoch nur mit dem gestrichenen Papier (Abbildung 5-28), ist eine gute Konturenschärfe erreicht. Es sind außerdem keine Strukturen unter dem Toner sichtbar.

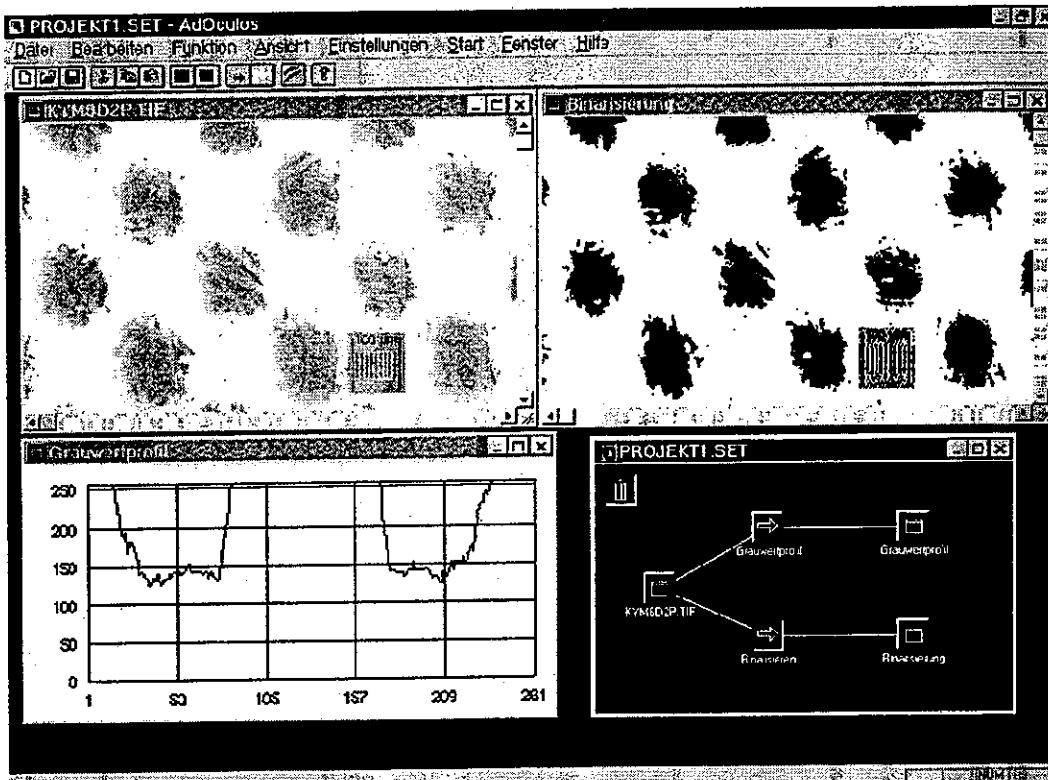


Abbildung 5-27: NKP6 (sat), Farblaserdrucker, Grauton 25%

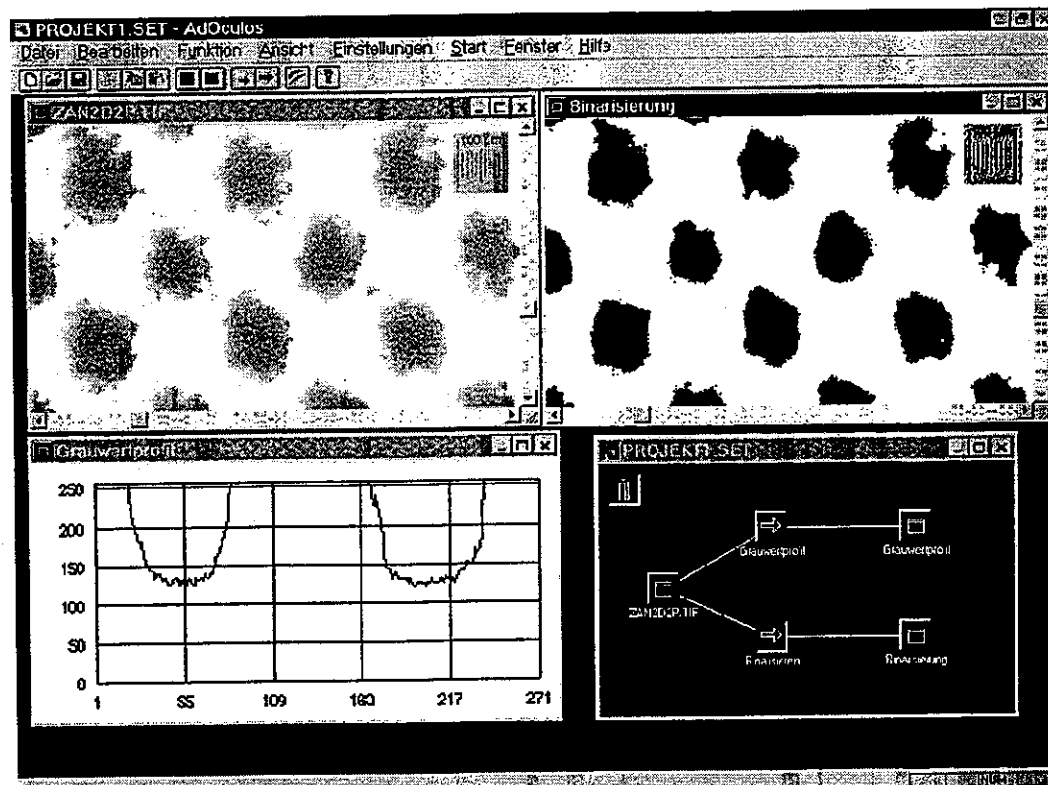


Abbildung 5-28: GKP2 (glänzend), Farblaserdrucker, Grauton 25%

6. Zusammenfassung

Funktionsgerechte Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie und der "Kopierbarkeit" von Kopier- und Laserdruckpapier, sowie der "Mehrfarben-Bedruckbarkeit" von Laserdruck-, Kopier- und Ink-Jet-Druck-Papieren

Ausgangssituation/Problemstellung:

Die großen und weiter rasch expandierenden Sortengruppen "ungestrichene, pigmentierte und gestrichene holzfreie Laserdruck-, Kopier- und Ink-Jet-Druck-Papiere für den Schwarz-Weiß-sowie Mehrfarbendruck" benötigen zur technisch-ökonomischen Optimierung der jeweiligen Kette "Herstellen der Papierprodukte, der Toner und Tinten, der Druck- und Kopiergeräte sowie der Papiere" ein Messmethoden-System:

(A) zur funktionsgerechten Charakterisierung der Oberflächen-Mikrostereometrie der Papiere in der Qualitätssteuerung,

(B) zur Analyse der Beziehungen zwischen der Mikro-Struktur oder Mikro-Formation der Oberfläche der Papiere und der Material- sowie Verfahrenstechnik ihrer Herstellung - Bilden (Formation, Retentions- und Siebstruktur), Pressen (Filz-Struktur), Trocknen (Sieb- und Schrumpfungs-Struktur) - sowie der weitergehenden Veredlung - Oberflächenleimung, Pigmentieren, Streichen und/oder Satinieren; Beispiele sind Methoden zur Bestimmung des Glanzes, des Kontaktanteils, der Opazität, der Zweiseitigkeit, der Unterschiede in Quer- und Maschinenrichtung usw.,

(C) zur Herstellung und densitometrischen sowie gravimetrischen Bewertung von Schwarz-Weiß- und Mehrfarben-Drucken, so dass z. B. der Gesamtkostenaufwand pro Druckprodukt für Papier und Toner optimiert werden kann.

Forschungsergebnisse:

(A) Erarbeitet wurde eine Meßmethode, mit der unter Verwendung unveränderter Bendtsen-Rauheits-Messgeräte, die von den Herstellern der holzfreien, ungestrichenen Kopier- und Laserdruck-Papiere üblicherweise zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden, in Anlehnung an die Parker-Print-Surf-Methode ein Rauheitswert Ra in μm ermittelt werden kann. Angegeben wird auch ein einfaches Verfahren zur Reduzierung des üblichen Anpressdruckes von 1 bar auf den funktionsgerechteren Wert von 0,2 bar.

Damit steht eine Rauheits-Messmethode zur Verfügung, deren Messergebnisse es ermöglichen, die Mikro-Oberflächen-Stereometrie der Papiere in eine maßstäbliche Beziehung mit Papierdicke, Faserwand-Dicke, Sieb-Drahtdurchmessern oder Toner-Schichtdicken zu setzen.

Erprobt wird eine Modifizierung des Bendtsen-Messkopfes für die Messung von Rauheitswerten nach Bendtsen (BEN-Ra) im Bereich unter 3 μm bis etwa 0,2 μm .

Angegeben wird auch die Umrechnung von Bendtsen-Werten im ml/min und von Bekk-Werten in s in den vorgenannten Ra-Wert in μm . Unterstützend herangezogen wurden druckvariabler Kontaktanteil (KAM) und Glanz-Messungen zur Charakterisierung der Mikro-Stereometrie der Papieroberflächen.

(B) Zur Verfügung gestellt wird eine Methode für die Visualisierung und Strukturanalyse der Transparenz-Mikroformation der Kopier-, Laserdruck- und Ink-Jetdruck-Papiere mit dem AGFA-Duo Scanner T 2500 an bis zu DIN A4 großen Papiermustern mit einer maximalen Auflösung von 10 μm .

Diese Methode ermöglicht das Einbeziehen der Nadellöcher als Teil der Mikro-Transparenzformation und ist auch geeignet, die Mikro-Schwärzungsformation sowie die Mikro-Kontaktanteilformation zu analysieren und zu visualisieren.

(C) Entwickelt wurde ein Schwarz-Weiß-Probe-Laserdruck-Verfahren auf der Basis des Standard-Laserdruckers HP Laserjet 5/5M mit den Graustufen 0, 25, 50, 75 und 100 % für DIN A4-Bogen mit densitometrischer und gravimetrischer Auswertung - letztere zur Bestimmung des Toner-verbrauchs in g/m^2 als „gewogener Andruck“.

Dieses Verfahren wurde unter Einsatz des Farblaserdruckers QMS Magicolor 330 für den Mehrfarbendruck angewendet, in dem neben Schwarz auch die Farben Cyan, Magenta und Yellow mit denselben Druckvorlagen jeweils einfarbig gedruckt werden.

Diese Probe-Laserdruck-Verfahren erlauben die Bewertung verschiedener Papiersorten mit dem selben Druck-Toner-System und mit der selben Papiersorte die Bewertung verschiedener Druck-Toner-Systeme. Drei Beispiele sollen das verdeutlichen:

- Die Schwärzung der Naturkopierpapiere steigt mit abnehmenden Bendtsen-Rauheitswerten in μm sowie mit steigendem Glanz und Kontaktanteil.

- Für die Erzeugung eines 25%-Grautones mit gleicher Schwärzung auf einem Naturkopierpapier bringt der Standardlaserdruck mit $4\text{g}/\text{m}^2$ Toner-menge die Zweieinhalbfache Menge wie der Farblaserdrucker auf.

- Ein Laserdrucker erzeugt gleichartige streifenförmige Schwärzungsunterschiede auf verschiedenen Papieren.

Die Druckvorlagen ermöglichen auch die bildanalytische Auswertung der einzelnen Rasterpunkte.

Anwendung/Wirtschaftliche Bedeutung:

Gemeinsames Ziel aller Partner der Industrie-Kette mit der Produktgruppe "Mehrfarbige und schwarzweiße Laser- und Inkjet-Druckprodukte sowie Kopierprodukte" ist die Sicherung und Erhöhung der Druckqualität. Die rasche technologische Entwicklung dieser Industrie-Kette wird in starkem Maße durch die Innovationen der Gerätehersteller geprägt. Die Papierindustrie soll in der Lage sein, ohne wesentliche Kostensteigerung Papiere mit hoher Reproduzierbarkeit und niedrigem Toner- bzw. Farbverbrauch zu liefern. Gerade deshalb hat das angestrebte Meßmethoden-System für das Glied der Industrie-Kette "Herstellung und Veredlung der Papiere" eine besondere Bedeutung, da so eine optimale Verteilung der Gesamt-Wert-Schöpfung auf die Ketten-Glieder mitgestaltet werden kann.

7 Literaturangaben

- 1 ZELLCHEMING-Merkblatt V/24/73, 04.73
Prüfung von Papier, Karton und Pappe
Bestimmung der Rauheit (Glätte) nach Bendtsen
- 2 ISO 8791-2: 1990 (E)
Prüfung von Papier und Pappe
Bestimmung der Rauheit nach Bendtsen
- 3 ZELLCHEMING-Merkblatt V/23/73, 04.73
Prüfung von Papier, Karton und Pappe
Bestimmung der Glätte nach Bekk
- 4 DIN 53107, 05.82
Prüfung von Papier und Pappe
Bestimmung der Glätte nach Bekk
- 5 DIN ISO 8791-4, 06.96
Prüfung von Papier und Pappe
Bestimmung der Rauheit/Glätte
(Luftstromverfahren)
Print-Surf-Verfahren
- 6 TRACEIT
Betriebs- und Bedienungsanleitung
INNOWEP GmbH Würzburg, Januar 1996
- 7 ZELLCHEMING-Merkblatt V / 25 / 74, 12.74
Prüfung von Papier, Karton und Pappe
Bestimmung der Glätte als Kontaktanteil nach FOGRA
- 8 DIN 54502, 03.92
Prüfung von Papier und Pappe
Glanzbeurteilung ebener Papier- und
Pappeoberflächen mit Hilfe von
Reflektometerwerten
- 9 Kunz, W.
Glanz, Glätte und Bedruckbarkeit
Das Papier 37 (1983), 10A, V 189 - V 196
- 10 Hagen, W.
Messung von Glanz und Glätte
Wochenblatt für Papierfabrikation 121 (1993),
8, 294-297
- 11 Zellcheming Merkblatt V/22/72, 03.72
Prüfung von Papier, Karton und Pappe
Messung des Glanzes
- 12 Vogt, M.; Praast, H.; Götsching, L.
Charakterisierung der Rauheit von Paper
mittels eines Lasersensors
Das Papier 49 (1995), 11, 663-671
- 13 DIN EN ISO 4287, 10.98
Geometrische Produktspezifikationen
Oberflächenbeschaffenheit:
Tastschnittverfahren
Benennung, Definitionen und Kenngrößen der
Oberflächenbeschaffenheit
- 14 DIN 4762, Januar 1989
Oberflächenrauheit: Begriffe
Oberfläche und ihre Kenngrößen
- 15 Baumgarten, H.L.; Götsching, L.; Volk, W.
Das Erarbeiten standardisierbarer
Papierprüfmethoden und ihrer
Präzisionsmaße am Beispiel von drei
Glättemeßverfahren
Teil I: Das Papier 34 (1980), 9, 377-389
Teil II: Das Papier 34 (1980), 11, 504-517
Teil III: Das Papier 35 (1981), 1, 13-18
- 16 White, F. M.
Viscous Fluid Flow
Mc Graw-Hill Inc., New York 1991
- 17 Kanis, W.; Nguyen, H.V.; Baumgarten, H.L.
Funktionsgerechte Charakterisierung der
Oberflächen-Mikrostereometrie und
"Kopierbarkeit" von Kopier- und
Laserdruckpapieren
Unveröffentlichter Großer Beleg (Nr. 25),
Lehrstuhl für Papiertechnik, TU Dresden 1999
- 18 Mey, K.; Nguyen, H.V.; Baumgarten, H.L.
Funktionsgerechte Charakterisierung der
Oberflächen-Mikrostereometrie und des
Kompressionsverhaltens von Druckpapieren
Unveröffentlichter Kleiner Beleg (Nr. 557),
Lehrstuhl für Papiertechnik, TU Dresden 2001
- 19 TAPPI-Norm T 480 om-92.
Specular gloss of paper and paperboard at 75
degrees
- 20 DIN 6730 08.92
Papier und Pappe - Begriffe
- 21 ISO 4046 (1978)
Paper, board, pulp and related terms:
Vocabulary
- 22 Endres, I.
Charakterisierung der Formation von Papier
mittels optischer Hochauflösungs-Bildanalyse
Unveröffentlichter Großer Beleg,
Lehrstuhl für Papiertechnik, TU Dresden 2000

- 23 DIN 53145 (März 2000)
Messgrundlagen zur Bestimmung des Reflexionsfaktors
Teil 1: Messung an nicht fluoreszierenden Proben
Teil 2: Messung an fluoreszierenden Proben
- 24 DIN 53146 (April 2000)
Bestimmung der Opazität
- 25 DIN 53147 (Januar 1993)
Bestimmung der Transparenz
- 26 Friedrich, F.; Zelm, R. Baumgarten, H.L.
Charakterisierung der Formation von Papier mittels digitaler Bildverarbeitung
Unveröffentlichter Kleiner Beleg (Nr. 555), Lehrstuhl für Papiertechnik, TU Dresden 2001
- 27 Jordan, B.D. und Nguyen, N.G.
Specific perimeter – a graininess parameter for formation and print mottle textures
Paperi ja Puu 68, 476-482 (1986) Nr. 6-7
- 28 Praast, H. und Götsching, L.
Analyse der Siebmarkierung im Durchlicht
Das Papier, 41, 105-120 (1987), Nr.3
- 29 l'Anson, S.
Identification of periodic marks in paper and board by image analysis using two-dimensional fast Fourier transforms
Part I: The basics
Tappi Journ., 78, 113-119 (1995), Nr. 3
Part II: Forming and press section marks
Tappi Journ., 78, 97-106 (1995), Nr. 7
- 30 Praast, H. und Götsching, L.
Differenzierte Analytik der Geometrie und Intensität von Siebmarkierungen
Das Papier 44, 529-537 (1990), Nr. 10
- 31 Cresson, T. und Luner, P.
Description of the Spatial Gray Level Dependence Method algorithm
Tappi Journ., 220-222 (1990), Nr. 12
- 32 Klein, R. und Mraz, C.
Einsatzmöglichkeiten der digitalen Bildanalyse in der Papiertechnik
Allgemeine und konzeptionelle Aspekte
Wochenblatt für Papierfabrikation, 706-711 (1996), Nr. 16
- 33 Larsson, L.O.
Druckqualität - theoretische und praktische Aspekte
Das Papier 43 (1989), 10A, V 68 - V 79
- 34 N. N.: Verbesserung der Qualität des Mehrfarbendrucks
ifra – Special Report Nr.: 2.2.3 (1989)
- 35 Murray, A.: Monochrome reproduction in Photoengraving
J. Franklin Inst. 221 (1936), Nr.:3, 721 - 744
- 36 DIN 53519-1, (Mai 1972)
Prüfung von Elastomeren; Bestimmung der Kugeldruckhärte von Weichgummi, Internationaler Gummihärtegrad (IRHD), Härteprüfung an Normproben

A Anhang**A.1 Referenz-Papiere****A.1.1 Ausgewählte Kopier-, Laserdruck- und Ink-Jet-Papiere**

Lfd. Nr.	Kurzbezeichnung	Papierart	Flächenmasse [g/m²]
1	NKP 1	ILK	80
2	NKP 2	ILK	80
3	NKP 3	IL	80
4	NKP 4	ILK	80
5	NKP 5	Farb-K; IL	80
6	NKP 6	Farb-K, IL, sat.	100
7	NKP 7	Farb-ILK, sat.	100
8	NKP 8	Farb-ILK	80
9	NKP 9	K	80
10	GKP 1	Farb-K, hgl	210
11	GKP 2	Farb-K, gl	135
12	GKP 3	Farb-K, m	135
13	GKP 4	Farb-KL, gg	160
14	GKP 5	Farb-KL	100

Tabelle A.1.1-1: Übersicht der 14 verwendeten Referenzpapiere

Wobei:

NKP Naturkopierpapier
 GKP Gestrichenes Kopierpapier
 I Inkjetdruck
 L Laserdruck
 K Kopierpapier
 Farb Mehrfarbig bedruckbar bzw. kopierbar
 sat. satiniert
 hgl hochglänzend
 gl glänzend
 m matt
 gg gussgestrichen

Kennzeichnung	Flächenbezogene Masse [g/m ²]	mittlere Einzelblattdicke [μm]	Scheinbare Blattdichte [g/cm ³]	Glätte nach Bekk [s]	BEN-Ra bei 1 bar [μm]	Print-Surf 10 bar hard [μm]	Weißgrad (R ₄₅₇) ohne UV [%]	Glanz nach DIN 45° [%]	Glanz nach DIN 75° [%]	Opazität [%]	Lichtstreuungskoeffizient s [m ² /kg]	Lichtabsorptionskoeffizient k [m ² /kg]	CIELAB-Farbort Helligkeit L [%]	CIELAB-Farbort a* ,	CIELAB-Farbort b*
NKP1	80	103	0,78	19	9,8	6,65	93,3	1,1	0,7	93,3	61,6	0,78	94,2	1,03	-4,61
NKP2	80	94	0,86	33	10,5	6,62	92,0	1,1	0,7	91,1	51,1	0,71	93,9	0,75	-4,19
NKP3	80	97	0,84	35	9,8	5,86	92,2	1,1	0,7	92,9	60,9	0,73	94,3	0,55	-3,71
NKP4	80	102	0,80	20	10,6	6,35	93,0	1,2	0,7	92,3	60,8	0,61	94,8	0,92	-3,53
NKP5	80	104	0,78	40	9,1	5,71	95,9	1,1	0,6	93,2	62,2	0,73	94,4	0,99	-5,39
NKP6	100	95	1,05	196	6,1	2,99	90,7	1,8	3,0	93,2	45,1	0,74	93,4	0,57	-4,05
NKP7	100	109	0,93	69	6,1	4,51	93,8	1,2	1,2	95,9	58,0	0,92	93,5	0,03	-5,62
NKP8	80	102	0,80	30	8,6	6,05	94,7	1,1	0,6	92,5	56,4	0,77	94,0	0,70	-5,56
NKP9	80	100	0,80	36	9,1	5,94	92,4	1,2	0,8	91,9	56,5	0,67	94,4	0,49	-3,91
GKP1	210	205	1,01	106	3,3	1,07	81,9	46,6	70,9	98,3	39,7	0,58	93,6	-0,30	2,41
GKP2	135	106	1,20	469	3,6	1,91	87,8	6,1	18,2	96,8	50,3	0,69	93,8	-0,15	-1,69
GKP3	135	105	1,23	491	3,0	1,60	88,3	1,4	11,0	96,2	51,6	0,52	94,7	-0,45	-0,65
GKP4	160	180	0,87	183	3,2	0,77	86,3	69,2	90,3	97,3	46,8	0,59	94,0	-0,39	1,75
GKP5	100	107	0,95	91	5,8	4,22	89,7	1,2	2,2	93,1	56,4	0,40	95,5	0,89	0,25

Tabelle A.1.1-2: Leiteigenschaften der 14 Referenzpapiere (Oberflächeneigenschaften jeweils nur Oberseite)

Flächenbezogene Masse

Scheinbare Blattdichte

Dicke

Glätte nach Bekk

Rauheit nach Bendtsen

Rauheit Print Surf

Weißgrad ohne UV

Glanz Lehmann DIN 45° und 75°

Opazität, Streu- und Absorptionskoeffizient

Farbort (CIELAB -L, a*, b*)

ISO 536 -95

ISO 534: 1995

ISO 534: 1995

ISO 5627: 1995 Verfahren A

ISO 8791-2 1990

ISO 8791-3 1990

DIN 53145 T1 D65 10°

DIN 54502 (März '92) in Maschinen-Richtung gemessen

DIN 53146-93

DIN 6174 01-79

A.1.2 Ausgewählte Industripapiere

lfd. Nr.	Kennzeichen	Flächenbez. Masse (g/m ²)	Sortenbezeichnung
1	IN01	45	Zeitungsdruckpapier, 100% Altpapierstoff
2	IN02	56	SC-Tiefdruckpapier
3	IN03	60	LWC-Tiefdruckpapier
4	IN04	135	Kunstdruckpapier
5	IN05	80	Gußgestrichenes Papier
6	IN06	80	Kopierpapier, holzfrei
7	IN07	80	Laserdruckpapier, gestrichen
8	IN08	90	Ink-Jet-Papier
9	IN09	90	Plotterpapier
10	IN10	150	Kraftliner
11	IN11	78	Kraftpapier
12	IN12	50	Staubfilterpapier
13	IN13	24	Kabelpapier
14	IN14	11	Kondensatorpapier

Tabelle A.1.2-1: Übersicht der 14 verwendeten Papiere der LPT-Papiermustersammlung

A.1.3 Muster aus Untersuchung /15/

Kennzeichnung der Materialgruppe I

	Flächengewicht g/m ²	Rohdichte g/cm ³	Probenseite	GL (Bekk) s	RA (Bendtsen) ml/min	KAM (FOGRA) ₁₅ %	KAM (FOGRA) ₁₈ %	Glanzzahl h	Glanzzahl g	Probenkennzahl
holzhaltiges Werkdruckpapier	95,4	0,58	OS	7,0	719	7,4	12,5	1,21	0,08	13 g
			SS	7,1	747	7,6	12,9	1,36	0,13	13 u
holzhaltiges Saugpostpapier	67,7	0,51	OS	8,6	632	9,0	15,3	1,22	0,09	2 g
			SS	8,2	673	8,6	14,7	1,38	0,14	2 u
holzhaltiges Werkdruckpapier	62,4	0,54	OS	21,8	312	14,0	21,7	1,28	0,11	1 g
			SS	10,8	545	11,2	17,4	1,43	0,16	1 u
scharf-maschinenglatte, holzfreie Offsetdruck- papier	86,4	0,77	OS	31,3	149	7,4	12,8	1,13	0,05	9 g
			SS	34,0	137	6,8	11,6	1,43	0,16	9 u
Zeitungsdruckpapier	53,2	0,67	OS	62,4	95,6	14,3	21,7	1,53	0,18	6 g
			SS	55,1	112	14,5	22,0	1,61	0,21	6 u
Zeitungsdruckpapier	53,9	0,70	OS	75,8	88,4	13,7	21,3	1,52	0,18	3 g
			SS	61,2	122	13,5	20,3	1,62	0,21	3 u
aufgebessertes Zeitungsdruckpapier	56,1	0,92	OS	216	44,0	17,3	27,2	1,98	0,30	4 g
			SS	182	60,0	16,4	22,5	2,00	0,30	4 u
mattsatiniertes Illustrationsdruckpapier (ungestrichen)	58,6	0,83	OS	243	45,8	18,1	27,9	1,87	0,27	7 g
			SS	232	52,3	15,9	23,9	2,05	0,31	7 u
scharfsatiniertes Illustrationsdruckpapier (ungestrichen)	63,7	1,04	OS	595	30,9	20,8	33,0	2,76	0,44	5 g
			SS	450	40,6	16,5	26,0	2,54	0,40	5 u
Kunstdruckpapier	127	1,24	OS	1434*	12,3	46,9	69,5	18,6	1,27	15 g
			SS	1598*	12,0	44,5	66,3	15,7	1,20	15 u
einseitig gußgestrichenes Papier	76,0	0,84	ug	29,7	240	7,4	12,8	1,14	0,06	14 g
			gg	115	8,2	75,0	86,7	54,3	1,73	14 u
einseitigglattes, holzhaltiges Kurvortpapier	78,8	0,67	uS	7,0	895	7,2	11,8	1,36	0,13	12 g
			eS	64,9	98,5	18,3	24,9	3,77	0,58	12 u
schwachsatiniertes, Registerpapier	38,0	0,91	OS	122	119	4,1	7,6	1,66	0,22	10 g
			SS	120	110	4,2	7,6	1,66	0,22	10 u
hochsatiniertes Kondensatorpapier	21,5	1,13	—	2800*	15,3	7,7	14,3	19,0	1,28	11 g
			—	18303*	5,8	16,1	26,8	25,5	1,41	11 u
ungestrichener Faltschachtelkarton	307	0,73	OS	18,9	270	11,9	18,7	1,71	0,23	16 g
			US	2,7	1538	6,2	11,0	1,38	0,14	16 u
einseitigglatter Karton	155	0,71	eS	27,7	257	16,6	24,4	3,55	0,55	8 g
			uS	3,9	1698	4,6	8,6	1,26	0,10	8 u
gestrichener Faltschachtelkarton	301	0,81	OS	86,1	231	24,2	39,9	2,69	0,43	17 g
			US	2,8	1733	6,4	11,2	1,43	0,16	17 u

Flächengewicht und Rohdichte:
GL (Bekk):

RA (Bendtsen):
KAM (FOGRA):
Glanzzahl h und Glanzzahl g:
Bezeichnung der Probenseite:

gemessen im JFP nach DIN 53 104 und DIN 53 105

Mittelwert aller Laboratorien gemessen nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/23/73 gemäß Prüfverfahren A; *Werte gemessen nach Prüfverfahren B.

Mittelwert aller Laboratorien gemessen nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/24/73

Mittelwert aller Laboratorien gemessen nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/25/74

gemessen im JFP nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/22/72

OS = Oberseite, SS = Siebseite, US = Unterseite, eS = einseitigglatte Seite, uS = ungestrichelte Seite, gg = gestrichene Seite, ug = ungestrichene Seite

Kennzeichnung der Materialgruppe II

Sortenbezeichnung	Flächengewicht g/m ²	Rohdichte g/cm ³	GL (Bekk) s	RA (Bendtsen) ml/min	KAM (FOGRA) %	KAM (FOGRA) %	Glanzzahl h	Glanzmaß g	Probekennzahl
gußgestrichene Papiere	77,8	0,93	361	< 5	84,4	92,9	90,7	1,96	41 g
	86,7	0,86	168*	11,3	77,2	89,7	92,4	1,97	28 g
Kunstdruckpapiere	102,1	1,30	1164	11,4	23,4	39,4	5,91	0,77	48 u
	99,6	1,26	1155	11,3	26,8	42,8	5,42	0,73	51 g
	118,0	1,27	964	10,2	33,1	54,2	7,31	0,86	42 u
	142,7	1,23	879	8,0	39,0	62,2	10,3	1,01	20 u
gestrichene Druckpapiere	84,0	1,32	1214	9,9	22,9	37,9	5,18	0,71	45 g
	60,1	1,26	1352	14,9	39,4	62,4	7,00	0,84	44 u
	89,1	1,39	1439	17,0	21,6	36,4	5,43	0,73	43 g
	80,4	1,23	1400	9,1	29,3	48,0	9,47	0,98	39 g
	60,2	1,22	1205	12,9	31,3	52,1	7,27	0,86	23 g
	101,5	1,16	726	12,3	34,7	54,5	8,04	0,91	40 u
	61,1	1,11	749	18,9	33,4	54,1	4,07	0,61	38 u
	62,4	1,13	687	14,9	38,2	59,8	4,66	0,67	24 u
	62,4	1,16	677	17,0	27,7	46,6	3,47	0,54	27 u
	67,6	1,01	581	22,1	34,8	55,5	4,39	0,64	25 g

Flächengewicht und Rohdichte:

GL (Bekk):

RA (Bendtsen):

KAM (FOGRA):

Glanzzahl h und Glanzmaß g:

gemessen im IFP nach DIN 53 104 und DIN 53 105

gemessen im IFP nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/23/73 gemäß Prüfverfahren B;

*gemessen nach Prüfverfahren A

gemessen im IFP nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/24/73

Mittelwert aller Laboratorien gemessen nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/25/74

gemessen im IFP nach ZELLCHEMING-Merkblatt V/22/72

A.2 Referenz-Laserdrucker

A.2.2 Standard-Schwarz-/Weiß- Laserdrucker

Der schwarz/weiß Laserdrucker besitzt eine Auflösung von bis zu 600 dpi. Er ist geeignet für Standardkopierpapier mit einer Flächenmasse von 80 g/m², sowie zum einseitigen Bedrucken von Folie. Er hat eine Arbeitsgeschwindigkeit von bis zu 12 Seiten/min und verfügt über einen Arbeitsspeicher von 6 MB.

A.2.2 Farblaserdrucker

Der Farb-Laserdrucker besitzt eine Auflösung von bis zu 1200 dpi.

- Color-Laserdrucker mit 1200x1200 dpi
- maximaler Druckbereich bis 320x457 mm
- maximales Papierformat bis 330x483 mm
- Integrierter RIP mit PostScript Level II-Interpreter
- Druckgeschwindigkeit bei A4 bis: 8 Seiten/Minute
- Druckgeschwindigkeit bei A3 bis: 4 Seiten/Minute

Er ist für Papier von 72 g/m² bis 220 g/m² geeignet und besitzt einen Arbeitsspeicher von 192 MB RAM für 1200 dpi.

- mit integrierter IDE-Festplatte
- manueller Duplexdruck für Vorderseite und Rückseite (ohne Beschädigung der zuerst gedruckten Seite!)
- mit komfortabler Farbabstimmungssoftware
- Schnittstellen: parallel, seriell, LocalTalk, Ethernet
- Netzwerkprotokolle: TCP/IP, Novell, EtherTalk, NetBEUI

Dieser Laserdrucker verwendet Zwei-Komponententoner und besitzt zusätzlich noch einen Behälter für überschüssigen Toner der Bildtrommel.

A.3 Methode zur Charakterisierung der Transparenz- und Opazitäts-Mikro-Formation von Laserdruck-, Tintenstrahldruck- und Kopierpapier

A.3.1 Anwendungsbereich

Mit dieser Methode werden die Opazitäts- und Transparenz-Formationen von Papieren mittels digitaler Bildanalyse bestimmt. Mit der *Formation* wird die x-y-Verteilung der Masse im Papier charakterisiert, mit der örtlichen Auflösung von (100 μm) 1 mm - 50 mm Durchmesser. Neben dieser Makro-Formation wird auch die Mikro-Formation im Bereich von 10 μm - 5 mm bestimmt. Die Messung ist für den Bereich der flächenbezogenen Masse von 30 bis 200 g/m² geeignet.

A.3.2 Normative Verweisungen

DIN 6370, 08/1992: Papier und Pappe - Begriffe
 DIN EN ISO 186, 02/1996: Papier und Pappe - Probenahme zur Bestimmung der Durchschnittsqualität
 DIN ISO 187 09/1982: Papier und Pappe - Vorbehandlung der Proben
 DIN EN ISO 536, 08/1996: Papier und Pappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse

A.3.3 Definitionen

Für die Anwendung dieser Methode gelten folgende Definitionen:

A.3.3.1 Transparenz-Formations-Index (TFI)

Der Formationsindex für die Transparenz-Formation wird aus der Beurteilung der Durchsicht mittels digitaler Bildanalyse ermittelt. Dabei erfolgt die Beleuchtung durch die Probe hindurch, d.h. Lichtquelle und Sensor befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten der Probe.

Ein Messwert von 0 % entspricht einer optisch unendlich dichten Stelle, ein Messwert von 100 %

einer optisch unendlich dünnen Stelle (z.B. ein Loch).

Der *Formationsindex* wird durch den Flockenkontrast und die Flockengröße beeinflusst. Als Merkmale des Flockenkontrastes gelten die Höhe (Differenz zwischen Flocken und Umgebung) und der Gradient (Steilheit des Überganges). Als Merkmale der Flockengröße dienen die Größe selbst und die Verteilung (Abstand).

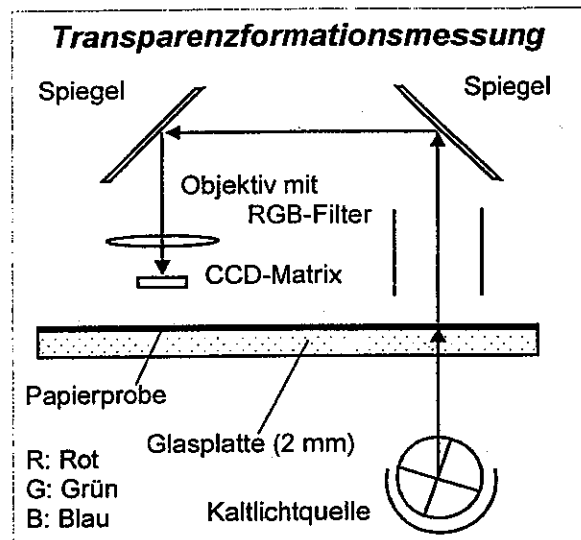


Abbildung A.3.3-1: Transparenzformationsmessung

Die quantitative Bewertung des Flockenkontrastes bei Durchsicht (Transparenz-Formations-Index) basiert auf Aufnahmen mit konstanter mittlerer transmittierter Lichtintensität. Kenngröße ist der Variationskoeffizient der Grauwertschwankungen.

A.3.3.2 Opazitäts-Formations-Index (OFI)

Der *Formationsindex* für die Opazitäts-Formation wird im Gegensatz zur Durchsichtformation am in der Aufsicht aufgenommenen Bild bestimmt. Dabei befinden sich Lichtquelle und Sensor auf der gleichen Seite des Papiers.

Ein Messwert von 100 % entspricht einer optisch unendlich dichten Stelle, 0 % entspricht dem Helligkeitswert der Deckplatte (Weißgrad ca. 5 %; Luminanz ca. 25 %).

Die Berechnung des *Formationsindex* entspricht im weiteren dem gleichen Verfahren wie bei der Transparenz-Formation.

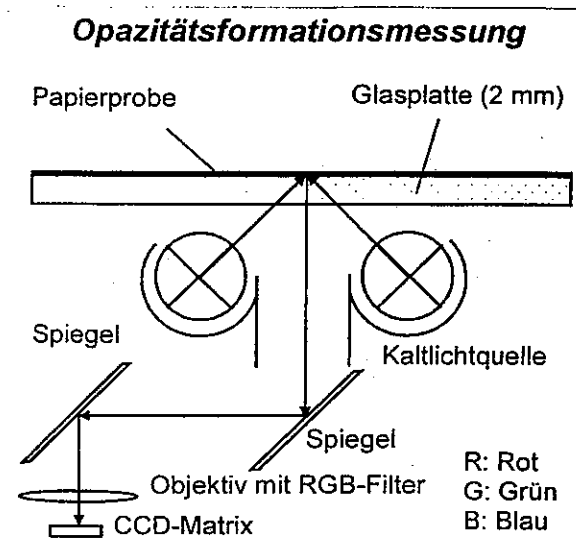


Abbildung A.3.3-2: Opazitätsformationsmessung

A.3.3.3 Flockenverteilung

In der Mikroformation erscheinen Strukturelemente in der Größenordnung von 10 μm bis 5 mm. In der Makroformation erscheinen Flocken und Wolken im Größenbereich von (100 μm) 1 mm bis 50 mm. Die Häufigkeiten der einzelnen Strukturen in diesen Größenspektren werden als Flockenverteilung bezeichnet.

A.3.3.4 Nadellöcher

Als Nadellöcher werden Strukturen im Papier bezeichnet, die eine Flächenmasse von 0 g/m² bzw. eine Opazität von 0 % oder Transparenz von 100 % besitzen. In der Durchsicht sind dies Flächen, durch die das Licht ungehindert hindurchtreten kann. Sie erscheinen im Größenbereich zwischen 10 μm und 200 μm (500 μm).

A.3.3.5 Sieb- und Filzmarkierungen

Siebe und Filze können Abdrücke an der Kontaktfläche zwischen Papier und Sieb/Filz hinterlassen. Diese werden Sieb- bzw. Filzmarkierungen genannt und erscheinen als regelmäßige Strukturen in der Oberfläche bzw. in der Formation.

A.3.4 Prinzip

Die einzelnen Mikro-/Makro-, Opazitäts-/ Transparenz-Formationskennwerte werden mittels optischer Bilderfassung erfasst und rechnergestützter Bildanalyse ermittelt. Dazu werden an jeweils 5 klimatisierte Proben im A4-Format (Höhe: 297 mm, Breite: 210 mm) jeweils 2 Bilderfassungen in der Auf- und Durchsicht durchgeführt. Die Bilder werden anschließend mittels vorgegebener Algorithmen ausgewertet.

An den Proben ist die Längs- und Querrichtung festzulegen und zu kennzeichnen.

A.3.5 Geräte und Hilfsmittel

A.3.5.1 Scanner

Für die *Bilderfassung* wird ein an einem PC angeschlossener Scanner mit max. 2500 ppi optischer Scan-Auflösung eingesetzt (AGFA DUOSCAN 2500). Mit diesem können Aufsicht- und Durchsicht-Scans durchgeführt werden.

A.3.5.2 Ad Oculos

Für die Bildverarbeitung und Bildauswertung wird das modulare Bildbearbeitungssystem *AdOculos* eingesetzt. Zur Bildanalyse werden aus Funktionsbausteinen bestehende Analyseketten eingesetzt, die im weiteren als *Setups* bezeichnet werden.

A.3.5.3 Excel

Einige mit der Bildbearbeitungssoftware erhaltenen Zwischenergebnisse werden in einem Tabellenkalkulationsprogramm in vorgefertigten Arbeitsblättern weiterbearbeitet. Dafür kommt MS Excel zum Einsatz.

A.3.6 Probenahme

Wird die Prüfung mit einem Lieferposten aus Papier oder Pappe durchgeführt, ist dieser in Übereinstimmung mit ISO 186 auszuwählen.

A.3.7 Klimatisierung

Die Proben werden in Übereinstimmung mit ISO 187 klimatisiert.

A.3.8 Durchführung

A.3.8.1 Inbetriebnahme

Einschalten der Geräte in der Reihenfolge:

- 1 Scanner
- 2 Computer
- 3 Starten der Scanner-Software Agfa FotoLook 3.00.08

A.3.8.2 Aufsichtsmessung

Aufsichtproben werden direkt vom Vorlagenglas des Scanners gescannt. Sollen Proben mit hoher Auflösung gescannt werden, muss darauf geachtet werden, dass die Vorlage zwischen den Markierungen für hohe Auflösung (High Resolution), die auf dem vorderen Lineal aufgetragen sind, aufgelegt wird.

Nachdem der Dokumentendeckel des Scanners geöffnet wurde, werden die Proben mit der Bildseite nach unten auf das Vorlagenglas gelegt. Dabei ist die Probe am vorderen Lineal und an der linken Begrenzungskante des Vorlagenglases anzulegen. Danach ist der Dokumentendeckel wieder zu schließen. Bei der Verwendung von A4-Proben aus industrieller Produktion sind die Papiere so ausgerichtet, dass die 297 mm lange Blattkante in Längsrichtung (MD; machine direction) zeigt. demnach sind die gescannten Bilder so ausgerichtet, dass die Querrichtung horizontal und die Längsrichtung vertikal auf dem Bildschirm ausgerichtet ist. Bei Abweichung der Ausrichtung ist dies zu vermerken.

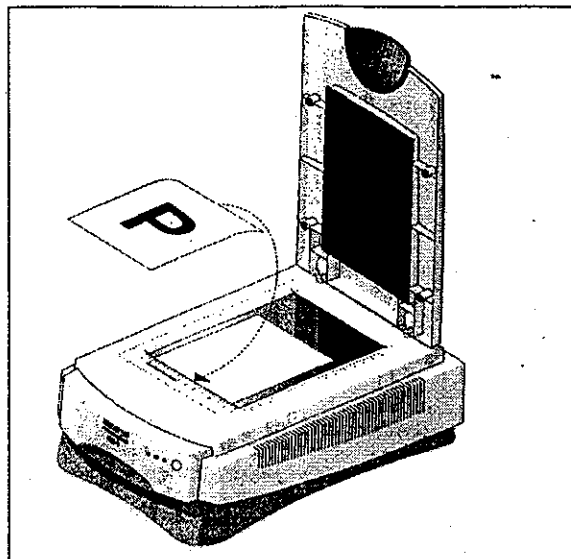


Abbildung A.3.8-1: Einlegen der Probe zur Erfassung von Aufsicht-Aufnahmen

A.3.8.3 Durchsichtsmessung

Zum Messen von Durchsicht-Vorlagen wird der Universal-Glasrahmen verwendet. Auch hier wird die Probe an der vorderen linken Ecke des Rahmens angelegt. Beim Einschieben des Rahmens in den Scanner ist darauf zu achten, dass die Probe nicht verrutscht und dass der Rahmen bis zum Anschlag in den Scanner geschoben wird. Ein Verrutschen lässt sich durch behutsames Beschleunigen des Rahmens verhindern.

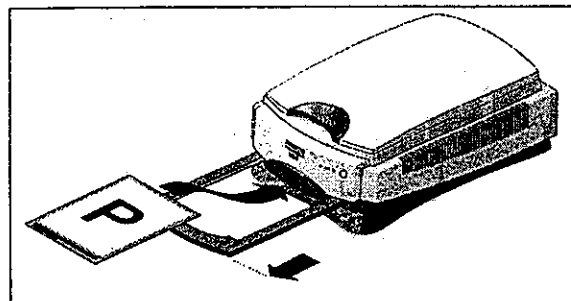


Abbildung A.3.8-2: Einlegen der Probe zur Erfassung von Durchsicht-Aufnahmen

A.3.8.4 Bilderfassung

Die Bilderfassung erfolgt mit der zum Scanner gehörenden Scannersoftware "Agfa FotoLook 3.00.08".

Bei einer Auflösung von 1200 ppi werden 120 x 120 mm große Bilder gescannt; bei einer

Auflösung von 2500 ppi beträgt die Bildgröße 90 x 90 mm. Für die weitere Auswertung werden aus diesen Bildern in den jeweiligen AdOculosSetups Prüfflächen automatisch zugeschnitten. Die Größe und Position dieser Flächen ist bereits gespeichert und muss beim Starten der entsprechenden Funktionskette nur bestätigt werden.

Hierzu stehen folgende Scanner-Einstellungen bereit:

A_1200_oben.agf	D_1200_oben.agf
A_1200_unten.agf	D_1200_unten.agf
A_2500_oben.agf	D_2500_oben.agf
A_2500_unten.agf	D_2500_unten.agf

Dabei bedeuten:

A bzw. D: Aufsicht- bzw. Durchsicht-
 Scan

1200 bzw. 2500: Auflösung in ppi
oben, unten: Position der Prüffläche in
 Bezug auf die beiden Rah-
 men

Für die einzelnen Auswertekriterien gelten folgende Probengrößen:

Transparenz-/Opazitäts-Formation:

Höhe 120 mm, Breite 120 mm

Flockenverteilung¹:

Höhe: 512 Pixel; Breite: 512 Pixel

Nadellöcher:

Höhe: 90 mm x 90 mm

Co-Occurence Matrix:

Höhe: 512 Pixel, Breite 512 Pixel

Fourieranalyse (2ⁿ):

Höhe: 512 Pixel, Breite 512 Pixel

Die Opazitäts-Formations-Untersuchung und die Fourieranalyse werden an den gescannten Aufsicht-Scans durchgeführt.

Die Transparenz-Formation, die Flockenverteilung, die Anzahl der Nadellöcher und die Co-Occurence-Matrix werden mit Hilfe der Durchsicht-Scans untersucht.

Generell gelten folgende Randbedingungen (Einstellungen in den Listefeldern der Software):

Modus:	Graustufen
Bittiefe:	8 Bit
Eingabeauflösung:	1200 ppi für Formations- Index und Co-Occurence- Matrix, 2500 ppi für Flockenverteilung, Nadellöcher und Fourieranalyse
Skalieren:	100 % (Originalbildgröße = Ausgabebildgröße)
Dichte:	Histogramm (Min: 0; Max: 255)
Tonkurve:	ohne
Schärfe:	ohne
Entrastern:	ohne
Farbeffekte:	ohne

Für signifikante Ergebnisse sind mindestens 10 Einzelmessungen durchzuführen. Als Ergebnis der Bilderfassung liegen Aufsicht- und Durchsicht-Bilder vor, die weiterbearbeitet und ausgedruckt werden können. Für den Ausdruck empfiehlt sich das Bild zwischen minimal und maximal erreichtem Grauwert zu spreizen, d.h. den Kontrast zu erhöhen. Hierzu wird das AdOculos-Setup „Auto-Spreizen.set“ verwendet.

A.3.8.5 Bildbearbeitung und -auswertung

Die Bildbearbeitung und -auswertung wird mit vorbereiteten "Setups" im Bildbearbeitungsprogramm "Ad Oculos" und vorbereiteten Excel-Tabellen durchgeführt. Die einzelnen Auswerteschritte werden in den zugehörigen Abschnitten dargestellt.

A.3.8.5.1 Formelzeichen

Für die einzelnen Berechnungsschritte gelten folgende Formelzeichen:

G_i	- Graustufe der Klasse i
H_i	- Häufigkeitsklasse i
$H_{rel,i}$	- relative Häufigkeit

¹

z.Z. technisch bedingt

SH_i	-	Summenhäufigkeit
$SH_{rel,i}$	-	relative Summenhäufigkeit
i	-	Index für Graustufe und Häufigkeitsverteilung
I	-	Index für Grauwert-Pixel
m	-	Median
M	-	Mittelwert
n	-	Gesamtanzahl der Pixel
OFI	-	Opazitäts-Formations-Index
TFI	-	Transparenz-Formations-Index
P	-	Grauwert des Pixels
s	-	Standardabweichung
s^2	-	Varianz
V_K	-	Variationskoeffizient der Grauwertschwankung
x_i	-	Anzahl Pixel/Graustufe i
x_{i-1}	-	Anzahl Pixel/Graustufe $i-1$

A.3.8.5.2 Durchsicht-Formation

Für die Formationsauswertung werden 10 Durchsicht-Scans mit 1200 ppi Auflösung und einer Bildgröße von 120 x 120 mm benötigt. Zur Auswertung dienen das AdOculos-Setup

Formationsindex.set

sowie die Excel-Arbeitsmappe

Transparenzformation_D1200_XXX.xls.

Das Setup beinhaltet die Funktionen *Histogramm* und *AutoSpreizen*. Die Funktion *AutoSpreizen* dient in diesem Setup der Visualisierung der Grauwertverteilung. Das Bild wird dabei nicht mit 256 Graustufen dargestellt, sondern wird zwischen der kleinsten und der größten im Scan auftretenden Graustufe angezeigt, wodurch sich der Kontrast erhöht. Das gespreizte Bild darf nur zur Darstellung verwendet werden, keinesfalls für weitere Messungen. Die Bestimmung der Grauwertverteilung selbst ist Grundlage für die nachfolgende Bestimmung des *Formationsindex*.

Zunächst wird das zu analysierende Bild in das Setup geladen. Das geschieht durch Drücken der rechten Maustaste im Fenster *Eingabebild* und anschließender Auswahl des Befehls *Bild laden*.

Dazu ist die Funktionskette mit dem Button  der Symbolleiste zu starten. Bei der Ausgabeform

für das Histogramm ist die "Werteliste" zu wählen, die für die nachfolgende Weiterverarbeitung benötigt wird. Die *Histogrammliste* wird als Textdatei (*.txt) gespeichert. Dies geschieht entweder durch Drücken der rechten Maustaste im entsprechenden Fenster mit nachfolgender Auswahl des Befehls „Bild speichern unter“ oder durch Wahl dieses Befehls im Menü „Datei“.

Als Dateiname wird der Name der Probe verwendet; die Kennzeichnung als Transparenzformations-Datei erfolgt durch Vorsatz des Kürzels „nt_“. Dadurch wird eine eindeutige Zuordnung möglich.

Beispiel:

Dateiname des Probebildes:

md_D1200_pro06.bmp

Dateiname der Textdatei:

tf_md_D1200_pro06.txt

Hinweis: Um Zeit zu sparen, kann auf eine Ausführung der Funktion *AutoSpreizen* verzichtet werden. Die Funktion *Histogramm* kann durch markieren mit der Maus und drücken des Buttons



der Symbolleiste einzeln gestartet werden.

Zur weiteren Auswertung wird die Excel-Arbeitsmappe

Transparenzformation_D1200_XXX.xls.

geöffnet. Die Arbeitsmappe wird zunächst unter einem anderen Dateinamen gespeichert, wobei XXX durch ein Kürzel ersetzt wird, das die Datei den Proben eindeutig zuordnet.

Beispiel:

Transparenzformation_D1200_md.xls

Danach werden die 10 gespeicherten Histogrammlisten der Reihe nach geöffnet und die Daten in die Spalten C (Feld C3 bis C258) der Arbeitsblätter *scan01* bis *scan10* kopiert. Sollte die Auflösung der gescannten Proben von 1200 ppi verschieden sein, so ist diese im Arbeitsblatt *Formationsindex* im Feld C24 einzutragen. Zudem werden die Probenart und die flächenbezogene Masse in diesem Arbeitsblatt geändert (Feld B21). Im Feld B23 kann die Probengröße bei Abweichungen geändert werden.

In den Arbeitsblättern *scan01* bis *scan10* wird der Median ermittelt und in das Feld *N45* des jeweiligen Arbeitsblattes eingetragen. Der Median entspricht dem Grauwert, der in der Mitte der Anzahl der Grauwerte in der nach der Größe geordneten Klassen liegt. Zur Ermittlung des Medians (*N45*) wird untersucht, bei welchem Grauwert (Spalte *B*) die Hälfte der Summe aller Pixel (Feld *L49*) überschritten wird. Dies geschieht durch Vergleich mit der Spalte *F*. Der Grauwert, bei dem die kumulierte Häufigkeit größer ist als die halbe Pixelsumme (*L49*), ist der Median.

Weitere Änderungen an dieser Arbeitsmappe sollten nicht vorgenommen werden, da die Daten der Arbeitsblätter miteinander verknüpft sind.

Mit diesen Verknüpfungen werden die Häufigkeit und die Summenhäufigkeit der Grauwerte, die Gesamtanzahl der Pixel, der Mittelwert, die Standardabweichung, die Varianz, der Variationskoeffizient und damit der Transparenz-Formations-Index für die einzelnen Proben berechnet.

Dabei werden folgende Rechenoperationen ausgeführt:

Grauwerte:

$$G_i = i \quad \text{mit } i = 0 \dots 255$$

Anzahl der Grauwerte innerhalb einer Klasse:

$$x_i = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} 0, & \text{wenn } P_i \neq i \\ 1, & \text{wenn } P_i = i \end{pmatrix}$$

Mittelwert:

$$M = \left(\frac{\sum_{i=0}^{255} x_i \cdot G_i}{n} \cdot 255 \right) \bmod 255$$

Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{255} (G_i - M)^2 \cdot x_i}{n - 1}}$$

Varianz:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=0}^{255} (G_i - M)^2 \cdot x_i}{n - 1}$$

Der Mittelwert und die Standardabweichung müssen in ganzzahligen Grauwerten angegeben werden, da dies die kleinste zur Verfügung stehende Einheit ist.

Variationskoeffizient (Transparenz-Formations-Index TFI):

$$TFI = \frac{s}{M}$$

Zusätzlich zum Transparenz-Formations-Index werden in den Arbeitsblättern *scan01* bis *scan10* Häufigkeiten und kumulierte Häufigkeiten (Summenhäufigkeit) der Pixel pro Graustufe berechnet, die dann in Diagrammen zur Veranschaulichung der Grauwertverteilung der jeweiligen Probe dienen.

Häufigkeit:

$$H_i = x_i \quad \text{mit } i = 0 \dots 255$$

Relative Häufigkeit:

$$H_{i,rel} = \frac{x_i}{n} \cdot 100 \% \quad \text{mit } i = 0 \dots 255$$

Summenhäufigkeit:

$$SH_i = \sum_{j=0}^i x_j \quad \text{mit } i = 0 \dots 255$$

Relative Summenhäufigkeit:

$$SH_{i,rel} = \frac{\sum_{j=0}^i x_j}{n} \cdot 100 \% \quad \text{mit } i = 0 \dots 255$$

Die Einzelwerte dieser Häufigkeiten werden in den folgenden Arbeitsblättern zusammengefasst:

<i>Tab Fläche</i>	Häufigkeit der Fläche pro Graustufe [mm ²]
<i>Tab Fläche kum</i>	Summenhäufigkeit der Fläche pro Graustufe [mm ²]
<i>Tab Häufigkeit</i>	Relative Häufigkeit der Fläche pro Graustufe bezogen auf die Gesamtfläche [%]
<i>Tab Häufigkeit kum</i>	Relative Summenhäufigkeit der Fläche pro Graustufe bezogen auf die Gesamtfläche [%]

Die Pixel pro Graustufe der Proben werden dabei in Flächeneinheiten (mm²) umgerechnet. Als Ergebnis dieser Zusammenfassungen liegen die Diagrammblätter mit den entsprechenden Histogrammen vor:

Diag Fläche
Diag Fläche kum
Diag Häufigkeit
Diag Häufigkeit kum

Diese Diagramme stellen die Ergebnisse aller 10 Proben dar; sie sind nur bedingt zum Ausdrucken geeignet, allerdings bieten sie eine gute visuelle Vergleichsmöglichkeit für die Verteilung der Messwerte.

Im Arbeitsblatt *Diag Mittelwerte* werden nur die Mittelwerte der Auswertung dargestellt. Dieses Arbeitsblatt ist auszudrucken.

Das Arbeitsblatt *Formationsindex* enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse von Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Grauwertverteilung sowie Transparenz-Formations-Index. Dieser ist als Mittelwert zusammen mit Standardabweichung und Variationskoeffizient im Prüfbericht anzugeben.

A.3.8.5.3 Opazitäts-Formation

Die Opazitäts-Formation wird analog der Transparenz-Formation ausgewertet; es werden 10 Aufsicht-Scans mit 1200 ppi Auflösung und einer Bildgröße von 120 x 120 mm benötigt.

Für die Formationsauswertung werden das AdOculos-Setup

Formationsindex.set

sowie die Excel-Arbeitsmappe

Opazitätsformation_D1200_XXX.xls.

verwendet.

Als Variationskoeffizient der Grauwertverteilung ergibt sich hier der Opazitäts-Formations-Index OFI:

$$OFI = \frac{s}{M}$$

A.3.8.5.4 Flockenverteilung

Für die Untersuchung der Flockenverteilung werden 10 Durchsicht-Scans mit 2500 ppi Auflösung und einer Bildgröße von 15 x 15 mm benötigt. Zur Auswertung dienen das AdOculos-Setup

Flockenverteilung.set

sowie die Excel-Arbeitsmappe

Flockenverteilung_D2500_XXX.xls.

Mit dem Setup *Flockenverteilung.set* wird in Ad Oculos eine Merkmalsextraktion vorgenommen, die aus einem beim Medianwert binarisierten Grauwertbild die Parameter Flächeninhalt, Umfang, Kompaktheit, polarer Abstand und Schwerpunkt berechnet. Die Binarisierung bewirkt, dass ein aus 256 Graustufen bestehendes Bild in ein Bild bestehend aus Schwarz und Weiß umgewandelt wird. Die Werte, die größer als der Medianwert sind, werden auf 255 (weiß) und die Werte, die kleiner oder gleich dem Medianwert sind, werden dem Wert 0 (schwarz) zugeordnet. Der Medianwert wurde hier als Schwellwert herangezogen, da das Bild so zu gleichen Teilen in Schwarz und Weiß aufgeteilt wird.

In einem in der Durchsicht aufgenommenen Bild werden die schwarzen Stellen als Flocken gezählt und die weißen als Hintergrund gewertet. Aus dem binarisierten Bild lassen sich nun die einzelnen Komponenten markieren. Dies ist ein notwendiger Schritt, da der Rechner das binäre Bild zwar als Matrix mit den Werten 0 und 1 aufnimmt, die einzelnen Matrixeinträge jedoch nicht miteinander in Bezug bringen kann, solange keine Objekterkennung (Komponentenmarkierung) gestartet wird. Dann werden die Bezüge zwischen den einzelnen Matrixeinträgen errechnet und bildlich dargestellt. Zusammenhängende Bildelemente sind farblich von anderen zu unterscheiden. Parallel zur Komponentenmarkierung wird eine Zählung der schwarzen Bereiche im Bild vorgenommen und ebenfalls bildlich dargestellt.

Bei der Merkmalsextraktion werden folgende Parameter berechnet:

<i>Fläche:</i>	Anzahl der Pixel innerhalb eines Bereiches
<i>Umfang:</i>	Länge der Konturlinie eines Bereiches
<i>polarer Abstand:</i>	Abstand des Bereichsrandes zum Schwerpunkt in Pixel
<i>Schwerpunkt:</i>	Flächenschwerpunkt des Bereiches

$$Kompaktheit = \frac{Umfang^2}{4 \cdot \pi \cdot Fläche}$$

Die *Kompaktheit* ist das Verhältnis von quadratischem Umfang zur Fläche eines Bereiches. Im Falle eines Kreises nimmt die *Kompaktheit* den Wert 1 an und wird umso größer je größer der Umriss eines Bereiches im Verhältnis zu seinem Flächeninhalt wird.

Der *polare Abstand* bezeichnet den Abstand des Bereichsrandes vom Schwerpunkt des Bereiches. Dieser Abstand ist bei einem Kreis für alle Winkel konstant, bei allen übrigen Formen ist er variabel und es kann ein Minimal- und ein Maximalabstand angegeben werden. Aus diesen beiden Angaben lässt sich ein grober Überblick über die Form des Bereiches (der Flocke) gewinnen.

Die in *Ad Oculos* berechnete *Merkmalsliste* wird als Textdatei in Excel übernommen.

Hierzu wird die Merkmalsliste zunächst in *AdOculos* mit dem Befehl *Bild speichern unter* als .txt-Datei gespeichert. Als Dateiname wird der Name der Probe verwendet; die Kennzeichnung als Flockenverteilungs-Datei erfolgt durch Vorsatz des Kürzels „fv_“ Dadurch wird eine eindeutige Zuordnung möglich.

Beispiel:

Dateiname des Probebildes:

md_D2500_pro06.bmp

Dateiname der Textdatei:

fv_md_D2500_pro06.txt

Beim Öffnen der Datei in Excel wird vom Programm der *Textkonvertierungs-Assistent* geöffnet. Er unterstützt die Umwandlung der .txt-Datei in eine Excel-Arbeitsmappe.

In Schritt 1 wird der Datentyp festgelegt; folgende Parameter sind einzustellen:

<i>Ursprünglicher Datentyp:</i>	Feste Breite
<i>Import beginnen in Zeile:</i>	1
<i>Dateiursprung:</i>	Windows (ANSI)

Mit der Schaltfläche *Weiter* wird zum nächsten Schritt gewechselt.

Im Schritt 2 werden Spaltenwechsel festgelegt. Dies geschieht durch Verschieben von Pfeillinien mit dem Mauszeiger oder Setzen von neuen Linien durch Klicken mit der linken Maustaste an der entsprechenden Stelle. Um die Kompatibilität mit der nachfolgenden Excel-Auswertung zu erhalten, sind an folgende Stellen (Lineal) Spaltenwechsel zu setzen:

8, 9, 18, 19, 24, 30, 31, 40, 42, 56, 61, 63

Wenn diese Einstellungen vorgenommen sind, wird mit der Schaltfläche *Weiter* zum nächsten Schritt gewechselt.

Im Schritt 3 werden die Datentypen der einzelnen Spalten bestimmt. Standardmäßig ist *Standard* eingestellt; diese Einstellung ist beizubehalten.

Außerdem werden Spalten ausgewählt, die nicht importiert werden sollen. Nicht importiert werden die Spalten, die keine Zahlenwerte enthalten, sondern nur Trennzeichen. Im vorliegenden Fall sind das die

2., 4., 7., 9. und 12. Spalte.

Mit der Schaltfläche *Fertig stellen* wird die Konvertierung beendet und die Datei wird als Tabellen mit den Spalten A bis H dargestellt. Mit dem Befehl *Speichern unter* im Menü *Datei* wird die Datei als Excel-Arbeitsmappe (.xls) gespeichert. Der Dateiname wird dabei nicht verändert.

Auf diese Weise werden 10 Proben in AdOculus ausgewertet. Die 10 konvertierten Textdateien, die nun im .xls-Format vorliegen, werden in eine Excel-Arbeitsmappe eingefügt. Dazu wird die Datei *Flockenverteilung_D2500_XXX.xls* geöffnet; der Dateiname wird mit dem Befehl *Speichern unter* im Menü *Datei* geändert. XXX ist dabei durch ein Kürzel zu ersetzen, das die Datei den Proben eindeutig zuordnet.

Beispiel: Flockenverteilung_D2500_md.xls

In die Spalten A bis H der Arbeitsblätter *scan01* bis *scan10* dieser Arbeitsmappe werden nun die AdOculus-Auswertedateien eingefügt. Dazu werden die entsprechenden Dateien geöffnet. Die Spalten A bis H dieser Dateien werden vollständig markiert und mit dem Befehl *Kopieren* (im Menü *Bearbeiten*) in die Zwischenablage kopiert; anschließend werden die Daten in die umbenannte Excel-Arbeitsmappe eingefügt.

Im Regelfall ist die Anzahl der Flocken in den einzelnen Proben unterschiedlich. Daher ist auch die Zeilenanzahl der eingefügten Tabelle verschieden von der der Arbeitsblätter *scan01* bis *scan10*. Deshalb muß die Zeilenanzahl angepasst werden. Es ergeben sich 2 Fälle:

Die eingefügten Daten haben weniger Zeilen als in den Formularen *scan01* bis *scan10* vorgegeben. Daher werden in den letzten Zeilen der Spalten I

bis N Nullen angezeigt. Diese Nullen sind zu markieren und mit der Taste *Entf* zu löschen.

Die eingefügten Daten haben mehr Zeilen als in den Formularen *scan01* bis *scan10* vorgegeben. Daher werden die letzten Zeilen nicht mit in die Berechnungen der Spalten I bis N einbezogen. Da diese Formeln Grundlage für die Berechnung des Spezifischen Perimeters und der Flockenverteilung sind, müssen die Formeln auf alle Zeilen der Spalten A bis H erweitert werden. Die letzte belegte Zeile der Spalten I bis N ist zu markieren, zu kopieren und in die leeren Spalten einzufügen. Die Laufvariable für die Zeilenanzahl wird von Excel automatisch geändert.

Im Arbeitsblatt *Spez. Perimeter* muss im Feld D10 die Probenbezeichnung eingetragen werden.

Weitere Änderungen an dieser Arbeitsmappe sollten nicht vorgenommen werden, da die Daten der Arbeitsblätter miteinander verknüpft sind.

Mit den eingegebenen Daten wird in den Arbeitsblättern *scan01* bis *scan10* automatisch der Spezifische Perimeter berechnet (Feld U4):

$$SP = \frac{\sum_{k=0}^m P_k}{a \cdot b}$$

mit:

SP Spezifischer Perimeter

a · b Bildgröße

P_k Umfang der Flocke

m Flockenanzahl

Außerdem wird in den Feldern P9 bis Q116 die Häufigkeitsverteilung der vorhandenen Flocken berechnet. Im Arbeitsblatt *Gesamt* sind diese Daten zusammengefasst. Es wird der Mittelwert der Häufigkeiten für die verschiedenen Häufigkeitsklassen berechnet (Spalten AP bis AR). Außerdem wird für jede Probe die Abweichung der relativen Häufigkeit vom Mittelwert angegeben. Diese Spalten dienen nur zur Kontrolle.

Im Arbeitsblatt *Spez. Perimeter* werden die berechneten Spezifischen Perimeter aus den Arbeitsblättern *scan01* bis *scan10* zusammenge-

fasst. Es können daraus der Mittelwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient entnommen werden (Feld E6, E7, E8).

Zur Veranschaulichung der Häufigkeitsverteilung dienen folgende Diagramme (Arbeitsblätter):

Histogramm einzeln
Histogramm gesamt
Summenhäufigkeit einzeln
Summenhäufigkeit gesamt
Diagramme

Diese Diagramme geben einen Überblick über die Flockengrößenverteilung der 10 verschiedenen Proben. Das Arbeitsblatt *Diagramme* ist für den Ausdruck bestimmt.

A.3.8.5.5 Charakterisierung der Nadellöcher

Zur Auswertung werden 10 mit einer Auflösung von 2500 ppi gescannte Durchsicht-Aufnahmen benötigt.

Für die Charakterisierung der Nadellöcher einer Papierprobe wird das *AdOculos*-Setup

Nadellöcher.set

eingesetzt. Die Auswertungsmethode ist eine ähnliche wie bei der Untersuchung der Flockenverteilung. Die Binarisierung des zu untersuchenden Grauwertbildes erfolgt dabei nicht beim Medianwert, sondern bei der Graustufe 254. Dadurch werden nur die wirklichen Nadellöcher weiß angezeigt; alle anderen Bildpunkte werden auf 0 (schwarz) gesetzt.

Für die Zusammenfassung der Ergebnisse wird die Excel-Arbeitsmappe

Flockenverteilung_D2500_XXX.xls

genutzt, die dafür allerdings umbenannt wird. Das Einfügen der Daten erfolgt wie bei der Auswertung der Flockenverteilung; die Skalierung der Dia-

gramme kann den Anforderungen der Nadellochanalyse angepasst werden.

Die Anzahl der ermittelten Löcher wird auf eine Fläche von einem Quadratmeter bezogen, d.h. bei einer Probengröße von 90 x 90 mm muss die Anzahl der Löcher mit 1/0,0081 multipliziert werden.

Wenn relativ wenige Nadellöcher in einer Probe enthalten sind (z.B. 10 Löcher auf einer A4-Seite), empfiehlt sich eine andere Vorgehensweise. Die Proben sind dazu gegen eine helle Lichtquelle zu halten, dabei erfolgt eine Markierung (Einkreisen) der gefundenen Löcher. Das Blatt wird in den Scanner eingelegt, und in der Voransicht können die Positionen der markierten Löcher erkannt werden. Nun wird jedes einzelne Loch mit der umgebenden Probe gescannt. Hier kann eine relativ kleine Fläche gewählt werden, solange das betrachtete Loch dabei vollständig erfasst wird. Diese Flächen werden dann einzeln in *AdOculos* nach dem oben beschriebenen Verfahren untersucht. Die Merkmalslisten der einzelnen Löcher, die dann im Regelfall nur einen Eintrag enthalten, werden in einer Excel-Arbeitsmappe zusammengefasst und ausgewertet. Auch in diesem Fall wird das Ergebnis auf eine Fläche von einem Quadratmeter bezogen.

A.3.8.5.6 Sieb- und Filzmarkierungen

Sieb- und Filzmarkierungen, die vorwiegend periodischer Natur sind, lassen sich von der Formation, die vorwiegend stochastischer Natur ist, mit Hilfe der Fouriertransformation trennen.

Für die Bestimmung der Markierungen wird die FFT (Fast Fourier Transformation) angewendet. Darin liegt die Beschränkung der Bildformate auf ganzzahlige 2er-Potenzen begründet.

Für die Analyse der periodischen Strukturen eines Papiers werden jeweils eine mit 2500 ppi Auflösung gescannte Aufsicht-Aufnahme der Vorder- und der Rückseite der Probe benötigt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Laufrichtung der Probe bekannt ist.

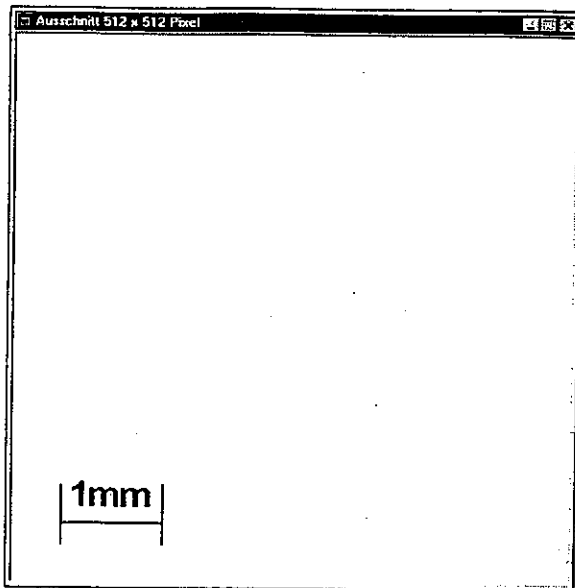


Abbildung 3.8-3: Ausschnitt (512 x 512 Pixel) einer Aufsicht-Probe

Am Beispiel eines Standard-Kopierpapiers soll die Vorgehensweise näher erläutert werden. Aus einer bei 2500 ppi (10,16 μm) Auflösung gescannten Aufsicht-Aufnahme wurde ein 512 x 512 Pixel großer Ausschnitt einer *Fast Fourier Transformation* unterzogen. Im Originalbild sind mit bloßem Auge keine regelmäßigen Strukturen zu erkennen (Abbildung A.3.8-3).

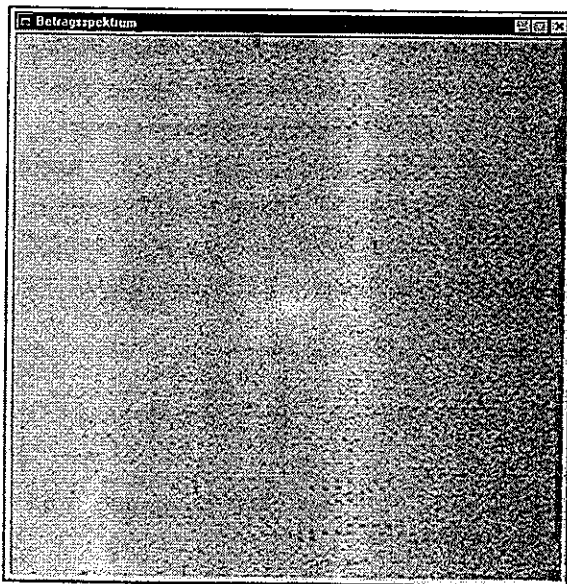


Abbildung A.3.8-4: Betragsspektrum

Als Ergebnis der Fourieranalyse werden nun Betragsspektrum und Phasenspektrum der Probe angezeigt. Diese Bilder stellen den Frequenzbereich der Probe dar. Aus dem Betragsspektrum (Abbildung A.3.8-4) können nach der oben beschriebenen Berechnungsmethode die Perioden

von regelmäßigen Markierungen ermittelt werden. Das zugehörige Phasenspektrum (Abbildung A.3.8-5) stellt alle Winkel dar. Diese sind gemäß der Grauwertpalette codiert; schwarz entspricht einem Winkel von $-\pi/2$ (-90°), weiß steht für $+\pi/2$ ($+90^\circ$). Aus diesem Bild können derzeit noch keine relevanten Informationen entnommen werden; die Abbildung dient der Veranschaulichung.

Am Bildschirm können in der Originalgröße noch keine Peaks erkannt werden. Zudem kann das Zentrum des Bildes nur ungenau festgelegt werden. Zur Verdeutlichung wurde deshalb mit einer XOR-Funktion ein Koordinatenkreuz in das Bild des Betragsspektrums eingefügt. Bei einer XOR-Verknüpfung werden die zu füllenden Bereiche immer mit der entgegengesetzten Graustufe gefüllt, die an dieser Stelle vorkommt. Wenn also die Koordinatenlinie über eine sehr helle Stelle verläuft, wird sie dunkel dargestellt; umgekehrt gilt das selbe. Nur in den Randbereichen des Betragsspektrums funktioniert dies nicht, da die Bildpunkte hier mit einem Grauwert von 128, also genau die Hälfte der 8-bit-Grauwertskala, gefüllt sind. Da diese Bereiche ohnehin nicht ausgewertet werden, kann eine Verknüpfung mit der XOR-Funktion bedenkenlos ausgeführt werden.

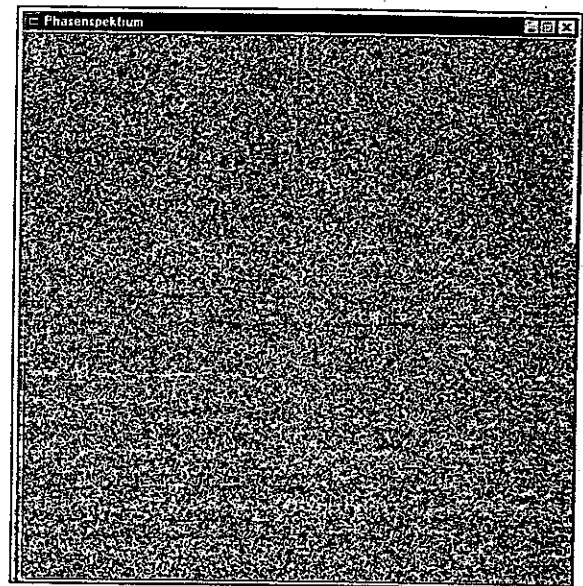


Abbildung A.3.8-5: Phasenspektrum

Nach Einfügen des Koordinatenkreuzes wird die Anzeige des Betragsspektrums vervierfacht, also in *AdOculos* auf 400 % gesetzt. Dies ist nur eine Darstellungsfunktion und nimmt keinerlei Einfluss

auf die Messergebnisse. In diesem Bild sind dann auch Peaks zu erkennen. Diese äußern sich in hellen Punkten im ansonsten grauen Bild (*Abbildung A.3.8-6*). Peaks, die auf dem eingefügtem Koordinatenkreuz, also auf den Längs- bzw. Querachsen des Bildes liegen, werden schwarz oder dunkelgrau dargestellt.

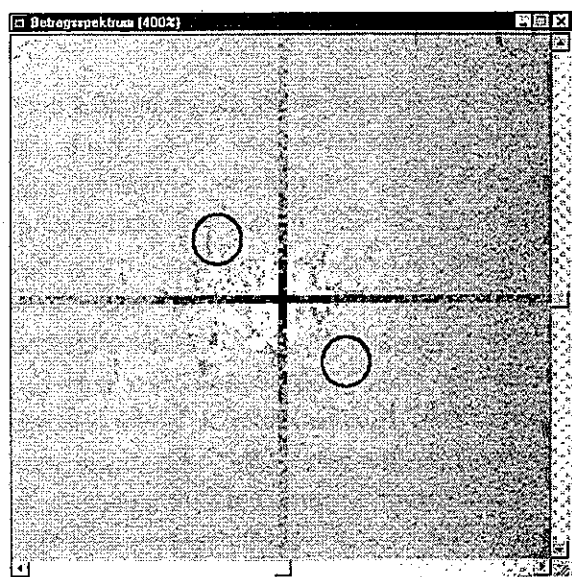


Abbildung A.3.8-6: Vergrößertes Betragspektrum

Wie man sieht, sind relativ viele helle Punkte dargestellt. Zur weiteren Untersuchung werden diejenigen ausgewählt, die sich am markantesten zeigen. Für dieses Beispiel wurde auf zwei zusammengehörende Peaks zugegriffen, die zu ein und derselben Markierung gehören. Dies ergibt sich aus der Redundanz der negativen Ortsfrequenzen.

Mit Hilfe der *AdOculus*-Funktion *Messen* können die Koordinaten der Peaks festgestellt werden. Dies geschieht durch Festlegen von Verbindungsgeraden der Peaks mit der durch das Koordinatenkreuz markierten Bildmitte. Hier muss allerdings ein Kompromiss gemacht werden, da bei einer Bildgröße von $2^n * 2^n$ kein Bildpunkt ausgewählt werden kann, der wirklich in der Mitte liegt. Mit der Funktion *Messen* können Strecken festgelegt werden, deren Längen sowie Anfangs- und Endkoordinaten erfasst und tabellarisch ausgegeben werden.

Anmerkung: Die Anzahl der zu messenden Punkte kann dabei nicht beliebig hoch gewählt werden. Da die Daten in Tabellenform ausgegeben werden, würde es sich anbieten, alle signifikanten Punkte in einem Arbeitsgang zu vermessen und diese dann nach Speicherung der Tabelle in Excel auszuwerten.

Die für die markierten Peaks ermittelten Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Verbindungsgeraden zwischen Peaks und Ursprung sind in Tabelle A.3.8-1 dargestellt. Die Reihenfolge und Bezeichnung der Messwerte wurde aus der derzeit angewendeten *AdOculus*-Funktion *Messen* übernommen. Es ist zu beachten, dass das Programm den Ursprung des internen Koordinatensystems in die linke obere Ecke des Bildes legt. Positive x-Werte werden nach rechts abgetragen, positive y-Werte nach links.

Index	Koordinaten			
	links	oben	rechts	unten
1	270	269	256	256
2	240	241	256	256

Tabelle A.3.8- 1: Messwerte aus *AdOculus*

Wie zu erkennen ist, gehören die Koordinaten „rechts“ und „unten“ zum Ursprung; die Koordinaten „links“ und „oben“ stellen die Peaks dar. Wenn man die Koordinaten des Ursprungs auf 0 setzt und die Koordinaten der Peaks darauf normiert, ergibt sich Tabelle A.3.8-2. In *Abbildung A.3.8-7* sind die normierten Daten grafisch dargestellt.

i	x_i	y_i	x_0	y_0
1	14	13	0	0
2	-16	-15	0	0

Tabelle A.3.8-2: Auf den Ursprung normierte Messwerte

Der Abstand der Punkte vom Bildmittelpunkt kann berechnet werden nach dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der Koordinaten der Peaks.

$$d'_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

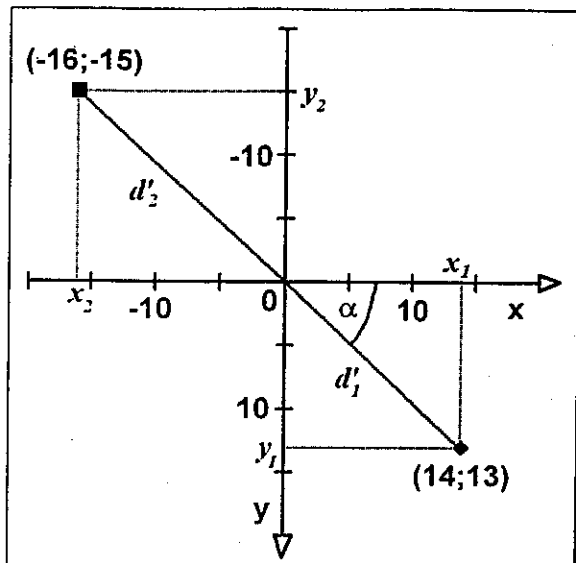


Abbildung A.3.8-7: Darstellung der Peaks

Aufgrund der Redundanz der beiden Peaks kann aus den Abständen d'_i ein Mittelwert gebildet werden. Dies gibt zudem die Möglichkeit, die Ungenauigkeit der Ursprungskoordinaten zu korrigieren. Die für dieses Beispiel ermittelten Einzel- und Mittelwerte sind in Tabelle A.3.8-3 zusammengefasst. Dabei werden die Abstände in Pixel angegeben. Selbstverständlich können bei der digitalen Bildverarbeitung keine Bruchteile von Bildpunkten verarbeitet werden; die hier angegebenen Zahlen sind reine Rechengrößen.

d'_1	19,10 Pixel
d'_2	21,93 Pixel
Mittelwert: d'	20,52 Pixel

Tabelle A.3.8-3: Abstände der Peaks vom Ursprung

Daraus kann nun die Periodenlänge einer Markierung im Ortsbereich berechnet werden.

$$d = \frac{N}{d'} = \frac{512 \text{ Pixel}}{20,52 \text{ Pixel}} = 24,95$$

Unter Einbeziehung der Auflösung bei der Bildfassung (2500 ppi) wird dieser Wert in μm umgerechnet:

$$d[\mu\text{m}] = 24,95 \cdot 10,16 \mu\text{m} = 254 \mu\text{m}$$

Der Winkel α kann aus dem Sinus- bzw. Kosinussatz im rechtwinkligen Dreieck ermittelt werden; nach Umstellung ergibt sich:

$$\alpha = \arctan \frac{y_1}{x_1}$$

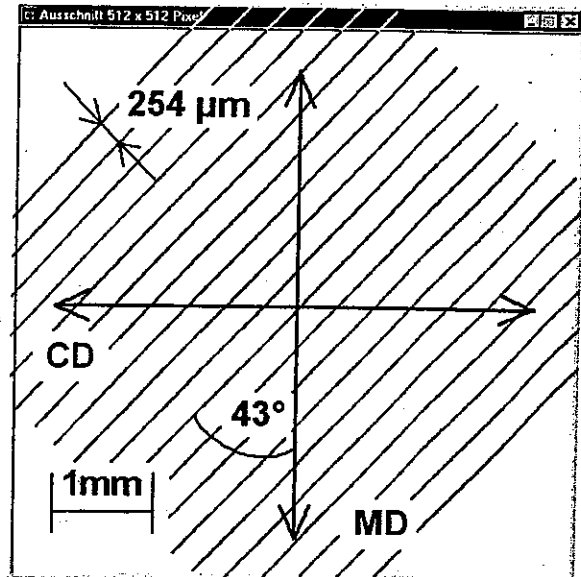


Abbildung A.3.8-8: Skizze der ermittelten Markierung

Für das betrachtete Beispiel ist $\alpha = 43^\circ$. Dieser Winkel ist auch im Ortsbereich, also im realen Bild, wiederzufinden. Da die Höhenausrichtung die Maschinenrichtung (MD) und die Breite die Querrichtung (CD) des Papiers bei der Bahnbildung repräsentieren, kann der ermittelte Winkel α als Markierung im Winkel von 43° längs zur Bahnaufrichtung interpretiert werden (Abbildung A.3.8-8).

Für die vollständige Auswertung der regelmäßigen Strukturen einer Papierprobe muss die beschriebene Vorgehensweise für alle (erkennbaren) Peaks angewendet werden.

Anmerkung: Dies ist mit einem relativ großen Zeitaufwand verbunden, da die Koordinaten jeweils umgerechnet und einander zugeordnet werden müssen.

A.3.8.5.7. Co-Occurrence-Matrix zur Bewertung der Papierstruktur

Der Formationsindex beruhend auf dem Variationskoeffizienten des Grauwertbildes ist auf eindimensionale Zusammenhänge beschränkt.

Mit Hilfe der Co-Occurrence-Matrix kann die Struktur der Papierproben näher untersucht werden.

Hierfür werden das AdOculos-Setup
co-occurrence-setup_2d_10x.set

und die Excel-Arbeitsmappe

Cooccurrence_D1200_XXX.xls

verwendet. Es werden 10 Durchsicht-Aufnahmen mit 1200 ppi Auflösung benötigt.

Im Setup ist zu kontrollieren, ob in den Funktionen *Cooccurrence-Matrix* eine 256 x 256 Matrix eingestellt ist. Das geschieht durch Drücken der rechten Maustaste über der Funktion und Anwahl des Befehls *Parameter*. Im Feld *Größe der Cooccurrence-Matrix* muss 256 eingetragen sein. Nach Überprüfung aller zehn Funktionen ist das Setup mit dem Button *Funktionskette starten* zu aktivieren.

Aus den Proben werden jeweils 10 Felder für die Analyse herangezogen. Das Ausschneiden erfolgt automatisch; beim Ablauf des Setups müssen die Einstellungen lediglich bestätigt werden (Abbildung A.3.8-9).

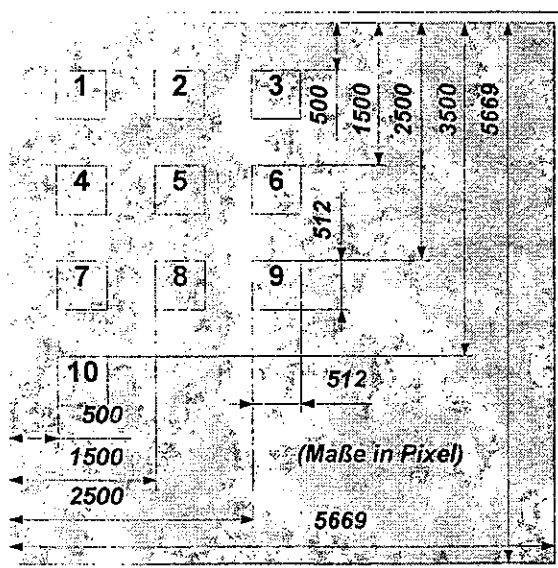


Abbildung A.3.8-9: Verteilung der Felder (Skizze)

Als Ergebnis des Setups werden für jedes Feld folgende Parameter berechnet:

Energie:

$$ENG = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c)^2$$

Kontrast:

$$CON = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \cdot (r - c)^2$$

Entropie:

$$ENT = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \cdot \log(f(r, c))$$

Homogenität:

$$HOM = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} \frac{f(r, c)}{1 + |r - c|}$$

mit:

- r Zeilenindex
- c Spaltenindex
- R Anzahl der Zeilen
- C Anzahl der Spalten

$$f(r, c) = \frac{a(r, c)}{M}$$

$a(r, c)$ Element der Co-Occurrence-Matrix an der Stelle (r, c)

M Summe aller Matrixelemente

N Differenzwert zwischen dem höchsten und niedrigsten Grauwert

Korrelation:

$$COR = \frac{\sum \sum f(r, c) \cdot (r - mr)(c - mc)}{sr \cdot sc}$$

Zeilenmittelwert:

$$mr = \sum_{r=0}^{R-1} r \left[\sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \right]$$

Spaltenmittelwert:

$$mc = \sum_{c=0}^{C-1} c \left[\sum_{r=0}^{R-1} f(r, c) \right]$$

Standardabweichung in der Zeile:

$$sr = \sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \left[(r - mr)^2 \cdot \sum_{c=0}^{C-1} f(r, c) \right]}$$

Standardabweichung in der Spalte:

$$sc = \sqrt{\sum_{c=0}^{C-1} \left[(c - mc)^2 \cdot \sum_{r=0}^{R-1} f(r, c) \right]}$$

Artefact Contrast:

$$AC = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} |N - r - c + 1|^2 \cdot f(r, c)$$

Anmerkung: Zur Zeit ist nur die Berechnung der Parameter Energie, Kontrast, Entropie und Homogenität fehlerfrei möglich. Daher muss die zugehörige AdOculos-Funktion noch einmal überarbeitet werden

Die für jeden Ausschnitt ausgegebenen Werte werden als .txt-Datei gespeichert und in Excel geöffnet. Hier werden sie in die dafür vorgesehenen Felder der Arbeitsblätter *scan01* bis *scan10* eingefügt. Dabei erfolgt eine automatische Mittelwertbildung.

A.3.9 Ergebnisse

A.3.9.1 Bilderfassung

Ergebnisse der Bilderfassung sind Bilder der Transparenz- und Opazitäts-Formation der Proben. Diese werden zur Veranschaulichung der Probe auf eine Größe von 180 mm x 180 mm vergrößert ausgedruckt. Bei einer Bildauflösung von 2500 ppi (10,16 µm) werden Ausschnitte von 15 mm x 15 mm, bei einer Auflösung von 1200 ppi (21,17 µm) werden Ausschnitte von 30 mm x 30 mm ausgewählt. Dies entspricht jeweils einem Vergrößerungsfaktor von 6 bei 21,17 µm Auflö-

sung bzw. einem Vergrößerungsfaktor von 12 bei 10,16 µm Auflösung.

A.3.9.2 Transparenz-Formationsindex

Als Ergebnis der Transparenz-Formationbestimmung ergibt sich der Transparenz-Formationsindex TFI. Dieser ist auf 3 zählende Stellen genau anzugeben. Weiterhin ergeben sich die Häufigkeitsverteilungen der Transparenz-Formationen.

A.3.9.3 Opazitäts-Formationsindex

Als Ergebnis der Opazitäts-Formationbestimmung ergibt sich der Opazitäts-Formationsindex OFI. Dieser ist auf 3 zählende Stellen genau anzugeben. Weiterhin ergeben sich die Häufigkeitsverteilungen der Opazitäts-Formationen.

A.3.9.4 Flockenverteilung

Als Ergebnis der Untersuchung der Flockenverteilung liegen binarisiertes Bild der Probe, ein Umrissbild der Flocken die Häufigkeitsverteilung der Flocken der Probe vor, die in einem Histogramm logarithmisch dargestellt wird und der spezifische Perimeter der Flocken.

A.3.9.4 Nadellochverteilung

Als Ergebnis der Untersuchung der Nadellochverteilung liegt neben dem gespreiztem Ausgangsbild, die Häufigkeitsverteilung der Nadellöcher der Probe vor, die in einem Histogramm logarithmisch dargestellt wird.

A.3.9.5 Sieb- und Filzmarkierungen

Als Ergebnis der Untersuchung der Sieb- und Filzmarkierungen liegt das Betragsspektrum der Fourieranalyse vor. Das Ergebnis des Vergleichs mit der Abb. 7 lässt eine Abschätzung der vorliegenden Markierungen zu.

A.3.9.6 Co-Occurrence-Matrix zur Bewertung der Papierstruktur

Als Ergebnis der zweidimensionalen Auswertung der Papierstruktur ergeben sich folgende Kennwerte:

Texturparameter	Auswertung
Energie	Homogenität
Kontrast	Kontrast
Entropie	Mittlerer Informationsgehalt
Homogenität	Lokale Homogenität
Korrelation	Lineare Abhängigkeit der Grauwerte
Artefact Contrast	Kontrast infolge Schmutz oder Nadellöcher

Tabelle A.3.9-1: Texturparameter

A.3.10 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten:

- a) Hinweis auf diese Methode
- b) Zeit und Ort der Prüfung
- c) Umgebungsklima für die Vorbereitung
- d) alle notwendigen Daten zur Identifikation der Durchschnittsprobe
- e) Größe der Proben
- f) Anzahl der Einzelprüfungen
- g) Mittelwert und Standardabweichung der Ergebnisse jeweils für Transparenz- und Opazitäts-Formation sowie deren Häufigkeitsverteilungen
- h) Bei Bestimmung der Flocken- und Nadelloch-Verteilungen die zugehörigen Histogramme
- i) vergrößerte Bildausdrucke der erfassten Probenflächen
- j) jede Abweichung der festgelegten Durchführung dieser Methode sowie alle Umstände, die die Ergebnisse beeinflusst haben könnten

A.4 Methode zur Bewertung der Probedrucke von Laserdruckern, Kopiergeräten und Tintenstrahldruckern

1. Zweck

Herstellung und Bewertung von Probedrucken als gewogene Andrucke zur Bestimmung der Druckfarbenmenge in g/m^2 und der optischen Farbdichte mit Hilfe von Probedruckgeräten.

2. Anwendungsbereich und normative Verweisungen

Standard-Kopierpapiere für Vervielfältigung mit Trockentoner (ungestrichen, 80 g/m^2 Flächenbezogene Masse), ungestrichene und gestrichene Laser- und Inkjet -Papiere (Bereich von 60 bis 200 g/m^2) in A4-Format, unter Berücksichtigung der Angaben des Herstellers des Druckgerätes.

DIN 53145-1

Prüfung von Papier und Pappe - Messgrundlagen zur Bestimmung des Reflektionsfaktors - Messung an nicht fluoreszierenden Proben

DIN 53145-2

Prüfung von Papier und Pappe - Messgrundlagen zur Bestimmung des Reflektionsfaktors - Messung an fluoreszierenden Proben

DIN 5033 Farbmessung

3. Begriffe

3.1 Vervielfältigung und Druck mit Trockentoner: Druckverfahren mit Trockentoner, der im allgemeinen durch Hitze und/oder Druck auf das Papier aufgebracht wird (Laserdrucker, Kopiergeräte)

3.2 Trockentoner: Pulverisierte Tinte, die für das Vervielfältigen und Drucker benutzt wird.

3.3 Tinte: niedrigviskose alkohol- oder glycolhaltige Tinte für Ink-Jet-Druck-Verfahren oder bei Raumtemperatur feste Tinten für das Hot-Melt-Druckverfahren

3.4 Probedrucke: Drucke und Kopien, die mit reproduzierbaren Bedingungen (Hardware und Software für Drucker) ausgehend aus definierten Druckmustern hergestellt werden.

4. Prinzip

Erzeugen von Halbton- und Vollton-Prüfbereichen mit Kopiergeräten, Laserdrucker und Tintenstrahldruckern. Messung der Gewichtänderungen und der optischen Dichte der gedruckten Flächen.

5. Geräte und Hilfsmittel

5.1 Drucker und Vervielfältigungsmaschine

Jedes handelsübliche Gerät, das mit Trockentoner arbeitet, Tintenstrahldrucker und Hot-Melt-Drucker. Es sind Toner oder Tinten, die entsprechend den Herstellerangaben empfohlen sind, zu gebrauchen.

5.2 Druckvorlage

Eine originale Druckvorlage in A4-Format für Vervielfältigung oder ein entsprechender Datensatz für Drucker. Die Vorlage besteht aus:

Muster 1: Probedruck für optische Prüfungen mit je zwei quadratischen Bereichen (Abmessungen $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) in den folgenden Vollton- und Halbtonstufen:

- unbedruckt
- 25 %
- 50 %
- 75 %
- 100% (Vollton)

Zusätzlich eine Reihe von Linien mit Solldicke $0,1 \text{ mm}$ (Anlage 1)

Muster 2: Je eine im Halbton oder Vollton gedruckte Fläche (400 cm^2 in der Abmessungen $25 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$) als gewogener Andruck (Anlagen 2 bis 5).

5.3 Analysenwaage

Die Wägegenauigkeit der Analysenwaage muss $\pm 0,1 \text{ mg}$ betragen.

5.4 Optisches Farbdichtemessgerät (Reflektometer nach DIN 53145-1/2)

6. Probenvorbehandlung

Die Proben sind nach DIN ISO 187 vor der Prüfung im Normalklima einer Temperatur von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 3)\%$ relativer Luftfeuchte (DIN 50 014) vorzubehandeln und bei diesem Klima zu prüfen.

7. Durchführung der Prüfung

7.1 Zum Erreichen stabiler Prüfbedingungen soll das Kopier- oder Druckgerät eine Stunde vor dem Beginn eingeschaltet werden.

7.2 Die Probebogen, die für den gewogenen Andruck (Muster 2 bis 5) bestimmt sind, werden in Anzahl von 10 pro Muster vor dem Druck auf der Analysenwaage mindestens auf 1 mg genau gewogen und anschließend in das Druckgerät eingesetzt. Die Einfuhr von anderen Papiersorten als Standard-Kopierpapieren soll in der Regel manuell erfolgen und gemäß Herstellerangaben.

7.3 Die Probebogen für optische Prüfungen (Muster 1), werden in Anzahl von 5 entsprechend bedruckt.

7.4 Die Probebogen, die für gewogenen Andruck (Muster 2 bis 5) bestimmt sind, werden nach erfolgter Klimatisierung gewogen und die übertragene Druckfarbenmenge bestimmt.

Die übertragene Druckfarbenmenge (M) in g/m^2 berechnet sich nach der Formel:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{A} \cdot 10^4$$

wobei:

m_1 : Masse der Probe vor dem Druck in g
 m_2 : Masse des Probe nach dem Druck in g
 A : bedruckte Fläche in cm^2

7.5 Bestimmung der optischen Farbdichte Schwarz/Weiß-Probedrucke

Von dem Muster 1 wird für jeden gedruckten und unbedruckten quadratischen Bereich (2 je Tonstufe) die optische Dichte bestimmt.

Die optische Dichte wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$D = \log \frac{R_\infty}{R_{\infty p}}$$

Dabei ist:

R_∞ : Reflexionsfaktor des unbedruckten Bereich, gemessen über einen Stapel von gleichem Papier

$R_{\infty p}$: Reflexionsfaktor des bedruckten Bereich, gemessen mit Hilfe derselben Unterlage

Es werden dabei die Spektralreflektionsfaktoren bei Schwerpunktwellenlänge 457 nm (R_{457}) gemessen, Normlichtart D65.

7.6 Bewertung der Farbproduktion

Die Druckvorlage für optische Messungen (Muster1) wird mit den Arbeitsfarben Cyan, Magenta und Yellow und den Komplementärfarben Grün, Rot und Blau bedruckt. Mit dem Spektralfotometer werden gemäß CIE-L*a*b*-System die Größen a^* und b^* gemessen und im Diagramm eingetragen. Das Ergebnis kann mit einer Referenzvorlage verglichen werden.

8 Auswertung

8.1 Muster1

Für jede Probe wird die optische Dichte aller Tonstufen bestimmt. Aus den 5 Proben werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet.

8.2 Muster 2

Aus den 10 Proben je Tonstufe werden Mittelwert und Standardabweichung der übertragenen Farbenmenge bestimmt.

9 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss enthalte:

a) Ort und Datum der Prüfung

b) Ausführung und andere Informationen zur Identifizierung des benutzten Drucker/Kopiergerät.

c) optische Dichten der einzelnen Tonstufen (dimensionlos) auf drei signifikanten Ziffern

d) übertragene Farbenmengen in g/m^2 auf drei signifikanten Ziffern