
**Verbesserte Bedruckbarkeit von beschichteten
Kartons mit wasserbasierten Inkjet-Tinten**
Untersuchung zu Benetzung, Haftung und Wechselwirkung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

An der
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von Frau
Sandra Rosalen, M.Sc.
geboren in
Sao Paulo

Datum der Einreichung: 08. April 2021
Datum der mündlichen Prüfung: 07. Juli 2021

Referent: Professor Dr.-Ing. Johannes Backhaus
Koreferent: Professor Dr.-Ing. Peter Urban

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20210812-101813-3

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20210812-101813-3>]

DOI: 10.25926/2e9p-se61

[<https://doi.org/10.25926/2e9p-se61>]

Danksagung

Es gibt eine unwahre Geschichte über das Wachstum eines chinesischen Bambus, die in Motivationsworkshops gerne erzählt wird. Ich habe etwas recherchiert und genau diese Informationen über Bambus nicht finden können, aber die Geschichte illustriert doch so gut den Prozess einer Doktorarbeit. Man erzählt, dass ein chinesischer Bambus, nachdem er gepflanzt wurde, fünf Jahre in der Erde verbogen bleibt, seine Wurzeln ausbreitet und stärker wird. Im fünften Jahr wächst er dann auf einmal 20 Meter hoch. In diesen Jahren, in denen ich meine Wurzeln ausbreiten und stärker werden konnte, habe ich das Vertrauen und die Unterstützung vieler Menschen erfahren und ich möchte mich an dieser Stelle bei Ihnen bedanken.

Meinem Doktorvater und Professor Dr.-Ing. Johannes Backhaus danke ich von Herzen für diese Jahre der gemeinsamen Arbeit mit wichtigen Fachgesprächen, Impulsen, Diskussionen und Verbesserungen. Ich danke ihm für das Vertrauen und für diese Gelegenheit in meiner Karriere. Ich wünsche ihm alles Gute für seinen Ruhestand.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Jung und Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Urban danke ich für die Fachgespräche, Hinweise und Ratschläge, die mir in mehreren Phasen meiner Arbeit geholfen haben. Ich möchte auch Dr. Jens Simon und Dr. Samuel Michael für die Bereitstellung von Materialien und für die technische Unterstützung danken.

Danke an meine Kolleginnen und Kollegen des Studiengangs Druck- und Medientechnologie Dr.-Ing. Daniel Bohn, Christiane Freyer und Sarah Patejdl für den freundlichen und kollegialen Austausch von Informationen, Büchern und Tipps zur Laborarbeit und an meine Assistentin Vanessa Duwe für ihre Hilfe bei den Recherchen und Experimenten. Danke auch an Meray Macit, die mir bei den administrativen Abläufen im Forschungsalltag sehr geholfen hat.

Meinen Freundinnen und Freunden, die 9.847 km entfernt leben und diejenigen, die nicht so weit weg sind, danke ich herzlich, dass sie für mich da sind.

Aos meus pais, muito obrigada pela vida e por toda ajuda e apoio.

Meine Caro, seit ich dich kenne, trage ich Glück im Blick. Danke für Alles.

*„isso de querer
ser exatamente aquilo
que a gente é
ainda vai
nos levar além“*

*„Wenn wir wirklich sein wollen
was wir sind,
werden wir über uns
hinauswachsen“*

in: Toda Poesia, S. 228

Paulo Leminski (brasilianischer Schiffsteller und Dichter, *1944 - †1989)

Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz des Inkjet-Druckverfahrens, vor allem im industriellen Bereich, ist unter anderem auf seine Modularität, seine Modifikationsmöglichkeiten für verschiedene Arten von Substraten und seine besondere Eignung für Kleinauflagen zurückzuführen. Der Druck von beschichteten Kartons erfolgt heute überwiegend mit UV-Tinten in Inkjet *Drop-on-Demand*-Drucksystemen oder mit kohlenstoffhaltigen, lösemittelbasierten Tinten in *Continuous*-Drucksystemen. Oberflächenmodifikationen von beschichteten Kartons werden, aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Tinten, in der Regel für einen Typ von Tintenfarbmittel (Pigment oder Farbstoff) entwickelt. Wasserbasierte Inkjet-Tinten und die Pigmentstriche der Kartons sind oft chemisch inkompatibel, da beide einen anionischen Charakter aufweisen können. Außerdem ist die Kartonoberfläche hydrophob, mit geringer Permeabilität und Rauheit.

Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Modifizierung der Oberfläche von beschichteten Kartons – zum einen mittels eines Primers auf Polyvinylalkoholbasis zur Erhöhung der Tintenhaftung und zum anderen mittels einer Nachbehandlung mit mittelwelliger Infrarotstrahlung zur Fixierung der Tinte – welche der Inkompatibilität von Substrat und Tinte entgegenwirken. Die Anwendung dieses Verfahrens zeigte eine Erhöhung der Haftung und Fixierung von farbstoffbasierten und pigmentbasierten Tinten und damit eine Reduzierung des Ablegens beim Stapeln der Kartonbogen und des Schmierens bei Berührung. Der Einfluss des Verfahrens auf die Druckqualität ist abhängig vom Tintentyp. Primer und IR-Bestrahlung erhöhten die optische Dichte, den Punktzuwachs, die Linienbreite und die Linien-Dunkelheit. Die Bewertungen der Homogenität, der Auflösung, der Kantenglätte und der Kantengeradheit von Linien ergab uneinheitliche Ergebnisse.

Darüber hinaus wurde die Wechselwirkung zwischen wasserbasierten Inkjet-Tinten und beschichteten Kartons anhand des Spreitens der Tinte in Abhängigkeit von modifizierten Stoffeigenschaften der Tinten und der Substrate analysiert. Die mit einem Videosystem durchgeführte Analyse des Tintenspreitens zeigt, wie die Oberflächenspannung der Tinten und die Grenzflächenenergie der Substrate das Spreiten beeinflussen und wie die Erhöhung der Viskosität sich aufgrund verringerter Absorption durch das Substrat indirekt auf ein stärkeres Spreiten der Tinten auswirkt. Korrelationsanalysen zeigen, dass die Oberflächenspannung und die Viskosität die entscheidenden Einflussgrößen für das Spreiten der Tintentröpfchen sind; der Einfluss anderer Parameter wie Rauheit oder Permeabilität des Substrats ist uneinheitlich und steht hinter den beiden Einflussgrößen Oberflächenspannung und Viskosität weit zurück. Diese beiden Parameter zeigen erwartungsgemäß eine negative Korrelation mit dem Spreiten (Erhöhung der Parameter reduziert das Spreiten). Interessanterweise beschleunigen jedoch erhöhte Oberflächenspannung und Viskosität die Ausbreitung der Tröpfchen (positive Korrelation).

Generell haben diese Untersuchungen im Labormaßstab gezeigt, dass eine Vorbehandlung von beschichteten Kartons die Bedruckung mit wasserbasierten Inkjet Tinten wesentlich verbessert, wobei nicht alle Einflüsse und scheinbar widersprüchliche Phänomene ursächlich zu klären waren. Dies speziell zu fokussieren obliegt weiterführenden Forschungsarbeiten mit dafür angepassten Laborausstattungen sowie auch der industriellen Umsetzung der Laborerkenntnisse.

Schlüsselwörter: wasserbasierte Inkjet-Tinte, beschichtete Kartons, Druckqualität, Wechselwirkung Tinten-Substrat

Abstract

The increasing use of the inkjet printing process, especially in the industrial sector, is due among other things to its modularity, its modification possibilities for different types of substrates and its particular suitability for short runs. Nowadays, coated cardboards are printed predominantly with UV inks in Inkjet-Drop-on-Demand printing systems or with solvent-based inks in Inkjet-Continuous printing systems. Surface modifications of coated cardboards are usually developed for one type of ink colourant (pigment or dye), due to the different behaviour of the inks. Water-based inkjet inks and the coatings of the cardboards are chemically incompatible, as both may have an anionic character. In addition, the surface of coated cardboards is hydrophobic, with low permeability, porosity and roughness.

The subject of the present research is the modification of the surface of coated cardboard – firstly, by means of a polyvinyl alcohol-based primer to increase ink adhesion and secondly, by means of post-treatment with mid-wavelength infrared radiation to fix the ink – which counteracts the incompatibility of substrate and ink. Application of this process showed an increase in adhesion and fixation of dye-based and pigment-based inks, i.e. reduction in set-off during the stacking and the smearing on contact. The final quality of pre and post-treated cardboards varied depending on the ink type. Primer and IR irradiation increase optical density, dot gain, line width and line darkness. The assessments of homogeneity, resolution, blurriness and raggedness of the lines had partly non-uniform results.

In addition, the interaction between water-based inkjet inks and coated cardboards was analyzed based on ink spreading as a function of modified properties of the inks and substrates. Ink spreading analysis shows how the surface tension of the inks and the interfacial energy of the substrates affect spreading, and how increasing viscosity indirectly affects ink spreading due to reduced absorption by the substrate. Correlation analyses show that surface tension and viscosity are the decisive influencing variables for the spreading of the ink droplets; the influence of other parameters such as roughness or permeability of the substrate is inconsistent and ranks far behind the two influencing variables surface tension and viscosity. As expected, these two parameters show a negative correlation with spreading. Interestingly, however, increased surface tension and viscosity accelerate droplet spreading.

In general, these laboratory-scale studies have shown that pretreatment of coated cardboards significantly improves printing with water-based inkjet inks, although not all influences and seemed contradictory phenomena could be causally clarified. It is up to further research work with laboratory equipment adapted for this purpose and also the industrial implementation of the laboratory findings to focus on this specifically.

Key words: water-based inkjet ink, coated boards, print quality, ink-substrate interaction

Inhaltsverzeichnis

1. Notationen und Abkürzungen	1
2. Einleitung	4
2.1. Motivation und Ziele	4
2.2. Aufbau der Arbeit	5
3. Grundlage	6
3.1. Verwendete Druckverfahren, Tinten und Substrate	6
3.1.1. DOD - Thermal Inkjet (TIJ)	7
3.1.2. Wasserbasierte Inkjet-Tinten	9
3.1.3. Substrate	13
3.1.4. Primer	21
3.2. Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten	25
3.2.1. Kenngrößen von Inkjet-Tinten	26
Viskosität	26
Oberflächenspannung	27
Dimensionslose Kennzahlen	29
Weitere Kenngrößen	30
3.2.2. Kenngrößen von Substraten	31
Porosität, Permeabilität und Tortuosität	31
Grenzflächenenergie	37
Rauheit	40
3.2.3. Wechselwirkung zwischen Phasen: relevante Modelle und modell- hafte Beschreibungen	44
Absorption, Penetration, Imbibition, Diffusion und Quellung	46
Spreiten	50
Trocknung	54
3.3. Qualitative Analyse eines Ausdrucks	56
3.3.1. Standards	58
3.3.2. Attribute	60
Optische Dichte	60
Tonwertzunahme	60
Linienwiedergabe	62
Homogenität	63
Auflösung	65
4. Stand der Forschung	67
5. Verwendete Materialien, Planungen und Methoden	73
5.1. Verwendete Materialien und Auswahlkriterien	75
5.1.1. Substrate	75
5.1.2. Tinten	76

5.1.3.	Polymere	77
5.2.	Planungen der Experimente und Auswahl der Methode	78
5.2.1.	Planung - Experimente zur Eingrenzung des Problems	78
	1. Vorversuch - Farben und Primer	79
	2. Vorversuch - Trockenschrank	80
	3. Vorversuch - Infrarot-Strahlung und Auftragung des Primers	81
5.2.2.	Planung - Experimente zur Validierung des Lösungsansatzes	84
5.2.3.	Planung - Experimente zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes	86
	Optische Dichte und Tonwertzunahme	86
	Linienwiedergabe	87
	Homogenität	89
	Auflösung	91
5.2.4.	Planung - Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten	92
5.3.	Charakterisierung - Messparameter, Laborumgebung und Geräteeinstellungen	97
5.3.1.	Charakterisierung der verwendeten Substrate	97
	Permeabilität	97
	Rauheit	100
	Grenzflächenenergie	104
5.3.2.	Charakterisierung der verwendeten Tinten und Primer	105
	Viskosität	105
	Oberflächenspannung	106
6.	Ergebnisse und Diskussion	108
6.1.	Experimente zur Eingrenzung des Problems	108
6.2.	Experimente zur Validierung des Lösungsansatzes	115
6.3.	Messungen zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes	119
	Gesamtbewertung	134
6.4.	Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Substrate	137
6.5.	Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Tinten und Primer	145
6.6.	Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten	147
	Gesamtbewertung	159
7.	Resümee und Ausblick	170
A.	Einstellung Drucker Canon	174
B.	Ergänzende Tabellen - Diagramme Kapitel 6	176
C.	Validierung Matlab-Routine - Siemensstern	187
D.	Validierung des Package Tools ISO/IEC 24790:2017	190

E. Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson	192
F. Draufsicht Tintentropfen	194

Kapitel 1

1. Notationen und Abkürzungen

Tab. 1.1: Notationen und Abkürzungen

Zeichen / Abk.	Bedeutung / Erklärung	Einheit
A	Fläche	m ²
AZ	gussgestrichener Zellstoffkarton	-
Ca	Kapillarzahl	-
CC	Calcium Carbonate	-
CD	<i>Cross Direction</i>	-
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>	-
CIJ	<i>Continuos Inkjet</i>	-
CMC	Carboxymethylcellulosen	-
CMYK	<i>Cyan, Magent, Yellow und Black</i>	-
D	Konzentrationsgradient nach Fick	-
D	optische Dichte	-
d, ø	Durchmesser	m
D50	Lichtart	-
D65	Lichtart	-
DIN	Deutsches Institut für Normung	-
D _o	Tropfendurchmesser vor dem Aufprall	m
DOD	<i>Drop on Demand</i>	-
E	Schichtdicke	-
EB	<i>Electron Beam</i>	-
F	Kraft	N
FBB	<i>Folding Box Board</i> (s. GC, Faltschachtelkarton)	-
FIR	fernes Infrarot	-
FWA	<i>Fluorescent Whitener Additive</i>	-
g	Gewichtskraft	N
GC	Chromokarton, Holzschliffkarton	-
GCC	<i>Ground Calcium Carbonate</i>	-
GZ	Zellstoffkarton	-
h	Höhe, Steigung	m
I	Intensität (Lichtstahlung)	-
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	-
IR	Infrarot	-
IRL	<i>Ink-Receiving Layer</i>	-
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	-
K	Darcy-Koeffizient	-
k.A.	Keine Angabe	-
L	Länge	m
L-W	Lucas-Washburn	-
max	Maximum	-

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Zeichen / Abk.	Bedeutung / Erklärung	Einheit
MD	<i>Machine Direction</i>	-
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems	-
min	Minimum	-
MIR	mittleres Infrarot	-
MTF	Modulationsübertragungsfunktion	-
nan	<i>not a number</i>	-
NIR	nahes Infrarot	-
OBA	<i>Optical Brighteners Agent</i>	-
OECF	<i>Opto-Electric Conversion Function</i>	-
Oh	Ohnesorge-Zahl	-
P	Druck	Pa
PCC	<i>Precipitated Calcium Carbonate</i>	-
PEG	Polyethylenglycol	-
PolyDADMAC	Polydiallyldimethylammoniumchlorid	-
PPS	Parker Print-Surf	-
PVA, PVAc	Polyvinylacetat	-
PVOH	Polyvinylalkohol	-
PVP	Polyvinylpyrrolidon	-
Pw	Polymerisationsgrad	-
Q	Volumendurchfluss durch das Medium (Darcy)	Darcy
r	Radius	m
\bar{r}	Rauheit	μm
Re	Reynolds-Zahl	-
ROI	<i>region of interest</i>	-
s	Standardabweichung	-
SA-Latex	Styrene Acrylic Latex	-
SBS	<i>Solid Bleached Board</i> (s. GZ)	-
SEM	Rasterelektronenmikroskop	-
SOHO	<i>Small Office Home Office</i>	-
t	Zeit	s
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
Tg	Glasübergangstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
TIJ	<i>Thermal Inkjet</i>	-
TS	Technischen Spezifikation (ISO)	-
TWZ	Tonwertzuiname	%
U_o	Geschwindigkeit des Tropfens vor dem Aufprall	m/s
UV	Ultraviolett	-
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m^3
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i>	-
V_p	poröses Volumen	-
V_t	Gesamtvolumen (Porosität)	-
W_A	Adhäsionsarbeit	J/m^2
We	Weber-Zahl	-
W_K	Kohäsionsarbeit	J/m^2

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Zeichen / Abk.	Bedeutung / Erklärung	Einheit
β	Remission (optische Dichte)	-
β	Spreitenkoeffizient einer Flüssigkeit	-
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	1/s
Δ	Unterschied, Gradient, Differenz	-
η	Viskosität	Pa·s
φ	Luftfeuchtigkeit	%
θ	Kontaktwinkel	°
θ_e	Kontaktwinkel in equilibrium	°
κ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
λ	Wellenlänge	nm
ρ	Dichte (Fluid)	-
ρ	Reflexionsgrad	-
σ	Oberflächenspannung (Fluid)	N/m
σ_L	Grenzflächenenergie (Liquid)	N/m
σ_{SL}	Grenzflächenenergie (Solid - Liquid)	N/m
σ_S	Grenzflächenenergie (Solid)	N/m
σ_{SV}	Grenzflächenenergie (Solid - Vapor)	N/m
σ_L^p	Grenzflächenenergie (Liquid) polarer Anteil	N/m
σ_L^d	Grenzflächenenergie (Liquid) disperser Anteil	N/m
σ_S^p	Grenzflächenenergie (Solid) polarer Anteil	N/m
σ_S^d	Grenzflächenenergie (Solid) disperser Anteil	N/m
τ	Schubspannung (3.2.1)	Pa
τ	Tortuosität (3.2.2)	-
Φ	Porosität	-

Zeichen / Abk.	Bedeutung / Erklärung	siehe
B01 bis B07	Karton Kennung	Tabelle 3.3
A	Experiment/ Messungen an Kartons ohne Vorbehandlung	Tabelle 5.9
B	Experimente/ Messungen an Kartons mit Primer Vorbehandlung	Tabelle 5.9
C	Experimente/ Messungen an Kartons nach IR-Strahlung	Tabelle 5.9
D	Experimente/ Messungen an Kartons mit Primer Vorbehandlung und nach IR-Strahlung	Tabelle 5.9
Kp-T	Pigmentbasierte Tinte - Farbe Schwarz - Industrielle Inkjet-Tinte	Tabelle 5.3
Kf-T	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Schwarz - Industrielle Inkjet-Tinte	Tabelle 5.3
Kp-C	Pigmentbasierte Tinte - Farbe Schwarz - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
Kf-C	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Schwarz - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
C	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Cyan - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
M	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Magenta - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
Y	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Gelb - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
Stab-W	Drahtrakel - Übertragung von ca. 0,6 g/m ²	-
Stab-G	Drahtrakel - Übertragung von ca. 1,2 g/m ²	-
Stab-R	Drahtrakel - Übertragung von ca. 1,8 g/m ²	-
P01 bis P12	Primer Kennung	Tabelle 5.6

Kapitel 2

2. Einleitung

2.1. Motivation und Ziele

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist die Absicht, beschichtete Kartons mit wasserbasierten Inkjet-Tinten und ohne Vorbehandlung in Drop-on-Demand Inkjet-Druckverfahren zu bedrucken. Auf einer beschichteten Kartonoberfläche weisen wasserbasierte Inkjet-Tinten vielfach eine geringe Haftung und eine ineffiziente Trocknung bzw. Festigkeit, aufgrund ihrer morphologischen und chemischen Eigenschaften, auf.

Zunächst wurde auf der Grundlage früherer Studien [137] [87] [88] eine Vorbehandlungsmethode zur Erhöhung der Adhäsion und anschließenden Fertigkeit von wasserbasierten Inkjet-Tinten auf diesen Oberflächen entwickelt. Dieser erste Schritt, eine angewandte Untersuchung, zielt darauf ab, Kenntnisse über die Anwendung dieses Substrat – beschichtete Kartons – zu gewinnen, was im Zusammenhang mit Inkjet-Druckverfahren noch wenig erforscht ist. Ziel war es, nicht nur die Haftung und Festigkeit der Tinten zu verbessern, sondern auch die Druckqualität im Resultat zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden mehrere qualitative Auswertungsverfahren angewendet. Zur Druckqualität gehört die Vorhersage des Druckergebnisses. Es ist gewünscht, die Material- und Systemparameter so zu steuern, dass Druckdatei und Druckerzeugnis eine minimale Differenz aufweisen. Die Ergebnisse dieser ersten Phase der Arbeit führten anschließend zu weiteren komplexeren Fragen, vor allem über Materialparameter, die das Verhalten der Tinten auf einer Oberfläche und letztendlich die Druckqualität beeinflussen.

Im Gegensatz zum Offsetdruck, bei dem mehrere Bedruckstoffe oder Farben auf verschiedenen Druckmaschinen eingesetzt werden können, arbeitet das Inkjet-Druckverfahren quasi als geschlossenes System. Druckmaschine, Tinten und Substrate werden in koordinierter Weise entwickelt. Sie sind alle aufeinander abgestimmt, so dass das Endergebnis vorhersehbar ist. Die Steuerung der Materialparameter kann mit einem Netzwerk verglichen werden. Jeder Knoten (i.e. Parameter) ist mit mehreren anderen Knoten verbunden. Die Verschiebung oder Veränderung eines Parameters bedeutet, andere Parameter zu beeinflussen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist, einen Teil dieser Parameter näher zu verstehen oder anders gesagt, einen Teil dieses Netzes zu beschreiben. Dafür wurden die Auswirkungen von Viskosität, Oberflächenspannung, Permeabilität, Grenzflächenenergie und Rauheit auf das Spreiten von wasserbasierten Inkjet-Tinten auf beschichteten Kartons analysiert.

Die Relevanz dieser Themen liegt in der zunehmenden Verwendung von Inkjet-Druckverfahren beim Bedrucken von Verpackungen, wie z.B. von Codes (Strich-, QR-Codes, DataMatrix) oder anderer variabler Elemente bei der Herstellung von z.B. Schachteln

für Medikamente. Die zentrale Idee ist, den Einsatz anderer Verfahren und Tinten als *Continuous-Inkjet* oder UV-Tinten, die heute bereits für solche Anwendungen eingesetzt werden, zu erforschen.

2.2. Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel.

Kapitel 1 - Notationen und Abkürzungen (Seite 1) enthält Erklärungen und Bemerkungen über Notationen und Abkürzungen, die in dieser Arbeit verwendet werden.

In **Kapitel 3 - Grundlagen** (Seite 6) werden die wesentlichen Verfahren und Modelle, auf die zurückgegriffen wird, dargelegt. Es ist in drei Teile gegliedert: 1. **Verwendete Druckverfahren, Tinten und Substrate**, 2. **Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten** und 3. **Qualitative Analyse eines Ausdrucks**. In **Verwendete Druckverfahren, Tinten und Substrate** werden die Inkjet-Drucksysteme, -Tinten, -Substrate und technische und verfahrenstechnische Informationen über die Materialien und das Drucksystem beschrieben, die in dieser Arbeit benutzt werden. Der Teil befasst sich auch mit Sonderbeschichtungen (Vorbehandlungen bzw. Primer). Im Teil **Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten** werden Begriffe und Parameter von Inkjet-Tinten und porösen Substraten dargestellt, deren Interaktionen sowie auch einige Theorien und Gleichungen, die diese Interaktionen modellieren. Der letzte Abschnitt **Qualitative Analyse eines Ausdrucks** enthält einen Überblick über die qualitativen Methoden für die Auswertung von Digitaldruck.

Das **Kapitel 4 - Stand der Forschung** (Seite 67) präsentiert Studien zu den Hauptthemen dieser Arbeit: Forschungen zum Bedrucken beschichteter und unbeschichteter Bedruckstoffe mit wasserbasierten Inkjet, sowie ihre qualitative Auswertung, Verwendung von PVOH zur Verbesserung der Haftung von Inkjet-Tinten und relevante Untersuchungen über die Wechselwirkung von wasserbasierten Inkjet-Tinten auf porösen Oberflächen.

In **Kapitel 5 - Methodischer Teil** (Seite 73) werden die Methoden der Untersuchungen, die Vorgehensweise der Experimente dargestellt und die Materialien und Laborumgebung ausführlich beschrieben.

In **Kapitel 6 - Ergebnisse und Diskussion** (Seite 108) werden die Forschungsergebnisse präsentiert, kritisch betrachtet und diskutiert. Relevante Probleme oder Einschränkungen, die während der Experimente auftraten, werden ebenfalls in diesem Kapitel behandelt.

Abschließend wird die Arbeit in **Kapitel 7 - Zusammenfassung und Ausblick** (Seite 170) zusammengefasst und werden noch offene Fragen zu des behandelten Themen aufgezeigt.

Kapitel 3

3. Grundlage

3.1. Verwendete Druckverfahren, Tinten und Substrate

Inkjet ist ein digitales Druckverfahren mit Variationen, die nach der Methode, wie Tröpfchen¹ erzeugt werden, kategorisiert. Die kommerziell relevanten Varianten sind *Continuous Inkjet* (CIJ) mit kontinuierlicher Generierung von Tröpfchen und *Drop-on-Demand* (DOD) mit einer Generierung von Tröpfchen nach Bedarf. Im CIJ gibt es Variationen, die hauptsächlich mit der Form der Ablenkung nicht benötigter Tröpfchen und der daraus resultierenden Rezirkulation der Tinte im System zusammenhängen. DOD wird nach der Art der Technologien der Tröpfchengenerierung unterteilt, wobei die häufigsten sind: thermisch (Canon, Hewlett-Packard), piezoelektrisch (Fujifilm, Epson, Konica Minolta, Xaar), akustisch (Xerox) und MEMS (Fujifilm, Xaar, Kodak) [98, S.10] [55, S.50]. Die Druckmaschinen teilen sich hauptsächlich auf kleine Heim- und Bürodrucker (SOHO) sowie mittelgroße und große Drucksysteme, die in der Druckindustrie als Produktionsdrucker bezeichnet werden. Großformatdrucker und Etikettendrucker sind Varianten, die auf bestimmte Produktsegmente ausgerichtet sind. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Experimenten wurde die Thermal Inkjet DOD Technologie verwendet, die in Unterabschnitt 3.1.1 vertieft wird.

Inkjet-Tinten werden nach dem Träger oder Medium (Wasser, Lösungsmittel, Öl, Polymere), der Art der Fixierung (Wegschlagen, Erstarrung, Polymerisation, Oxidation, Sintern, Verdampfung, chemische Aushärtung) und nach der Art der farbgebenden Komponenten, nämlich Farbstoff oder Pigment, kategorisiert. In Unterabschnitt 3.1.2 werden die technischen Eigenschaften und Prozessparameter von Pigment- und Farbstofftinten auf Wasserbasis vertieft.

Ein Grund für den zunehmenden Einsatz des Inkjet-Druckverfahrens, insbesondere im industriellen Bereich, ist seine Modularität und Modifikationsmöglichkeiten für verschiedene Arten von Medien bzw. Substraten. Zunächst für Papier verwendet, eignet sich Inkjet heute für ein breites Spektrum von Substraten, darunter Glas, Kunststoff, Holz, Keramik, Metall bis hin zu Lebensmittel.

Spezielle Inkjet-Papiere werden üblicherweise in zwei Kategorien unterteilt: *swellable* (dt: „quellfähig“) und *microporous* (dt: „mikroporös“). Diese Substrate werden im Unterabschnitt 3.1.3 eingehend behandelt. Daneben enthält dieser Unterabschnitt technische und verfahrenstechnische Informationen über den beschichteten Karton, das Substrat, das im Fokus dieser Arbeit steht. Für Substrate, die nicht für Inkjet entwickelt wurden, sind Alternativen zur Vorbehandlung der Oberfläche vorhanden, um auch solche

¹In dieser Arbeit wird den Begriff „Tröpfchen“ für was aus der Düse eines Inkjet-Druckers herauskommt und den Begriff „Tropfen“ für was größer ist z.B. mit einer Pipette oder Kanüle erzeugt wird.

Substrate bedruckbar zu machen. Diese Sonderbeschichtungen bzw. Primer werden ebenfalls beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf Primer aus PVOH liegt.

3.1.1. DOD - Thermal Inkjet (TIJ)

Inkjet ist ein digitales Druckverfahren, bei dem Tintentröpfchen auf eine Oberfläche kontaktlos innerhalb einer zweidimensionalen Matrix aufgebracht werden. Die Positionierung dieses Tröpfchen gibt den Inhalt einer digitalen Datei wieder. Nur ein Element dieser Datei, in Form von Text, Bild oder Layout Vorgaben, oder sogar das gesamte Produkt² kann variieren. Diese Variation kann in kleinen Chargen oder mit jedem neuen Produkt erfolgen. Das ermöglicht, die Vielfalt der Produkte, die Strategien zur Marktpositionierung und den Vertrieb zu erweitern. Ein zusätzlicher Vorteil ist die Rationalisierung der Produktion und Logistik.

Die folgenden zwei Abbildungen veranschaulichen die technologische Entwicklung und Positionierung der Inkjet-Druckverfahren zu anderen Drucktechnologien. Die erste (Abb. 3.1) zeigt die Beziehung zwischen Produktionsleistung und Punktgröße, einem qualitativen Faktor in der Druckindustrie. Die zweite (Abb. 3.2) zeigt die Entwicklung von Inkjet-Systemen nach Anwendungsbereichen in den letzten Jahrzehnten, von einfacher Kennzeichnung und Codierung, noch heute primär mit Inkjet gedruckt, bis zum industriellen Druck, mit zunehmender Relevanz ab 2000.

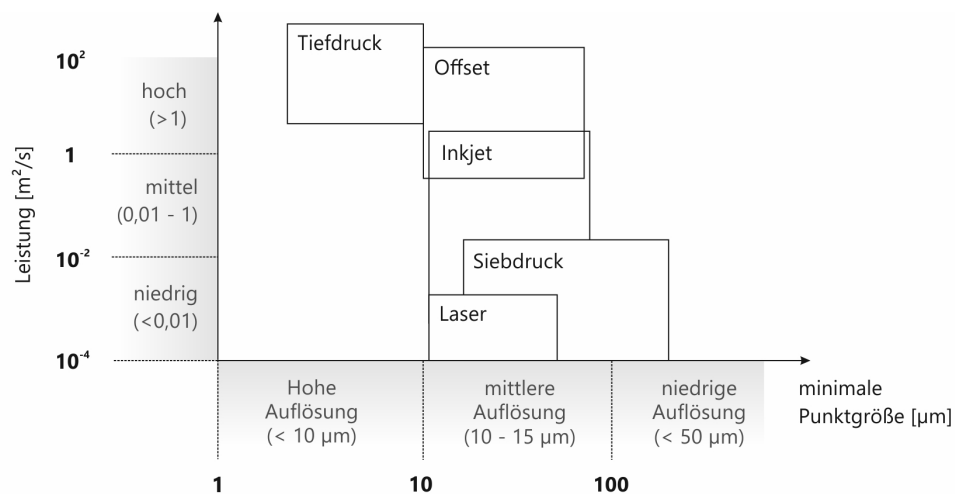


Abb. 3.1: Produktionsleistung und Punktgröße nach Druckverfahren [151, S.11] - modifiziert

Ein Inkjet-Drucker besteht in vereinfachter Form aus einer Druckeinheit und einem System für die Bewegung entweder des Substrats oder der Druckeinheit. Das für den Ausstoß des Tintentröpfchens auf das Substrat maßgebliche Bauteil ist der Druckkopf. Bei Thermal Inkjet (TIJ) basiert der Tinten-Ausstoß auf dem schnellen Sieden der Tinte (0 auf 100 °C in weniger als 10 µs). Die Tinte ist in einer kleinen Kammer und in Kontakt mit einem Widerstandsheizkörper. Mittels eines elektrischen Impulses erreicht dieses Heizelement 200 bis 300°C. Nach dem elektrischen Impuls (2 bis 5 µs) bildet

²Produkt bedeutet hier eine Verpackung, ein Buch, eine Anleitung, ein Werbezettel usw.

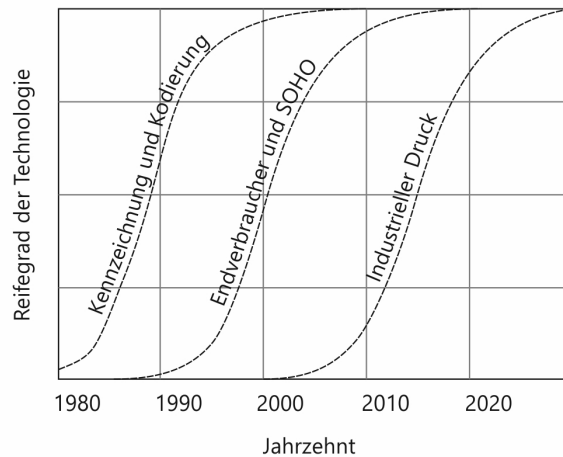


Abb. 3.2: Anwendungsbereiche des Inkjet-Druckverfahren [56, S.2] - modifiziert

sich eine Dampfblase. Der Druck in der Kammer steigt rapide an. Dabei kann sich der Druckkopf selbst sogar leicht verformen. Die Dampfblase drückt Tinte durch die Öffnung der Kammer (Düse \varnothing ca. 10 - 50 μm [98, S.124-127]) und der elektrische Impuls wird dann unterbrochen. Die Dampfblase kühlt ab, zieht sich zusammen und die Bindung zwischen der Tinte und dem Tröpfchen bricht ab. Die Tinte wird dann durch Kapillarwirkung aus einem Reservoir gezogen, um die Kammer wieder zu füllen (Dauer: 80 bis 200 μs) [56, S.348] [53, S.58-59]. Dieses System ist in der Lage, etwa 10.000 bis 30.000 Tröpfchen je Düse pro Sekunde auszustößen [98, S.124-127]. Die Temperatur innerhalb des Druckkopfes verändert sich mit Ablauf dieses Zyklus (Abb. 3.3). Es gibt verschiedene technische Architekturen für den Druckkopf eines TIJ: *Roof-Shooter*, *Side-Shooter*, *Back-Shooter* und *Floating*, deren Details hier im Weiteren nicht von Bedeutung sind. Der in dieser Studie verwendete Drucker ist ein Canon Pixma IX 6850 mit einer *Roof-Shooter*-Druckkopfarchitektur [76, S.44].

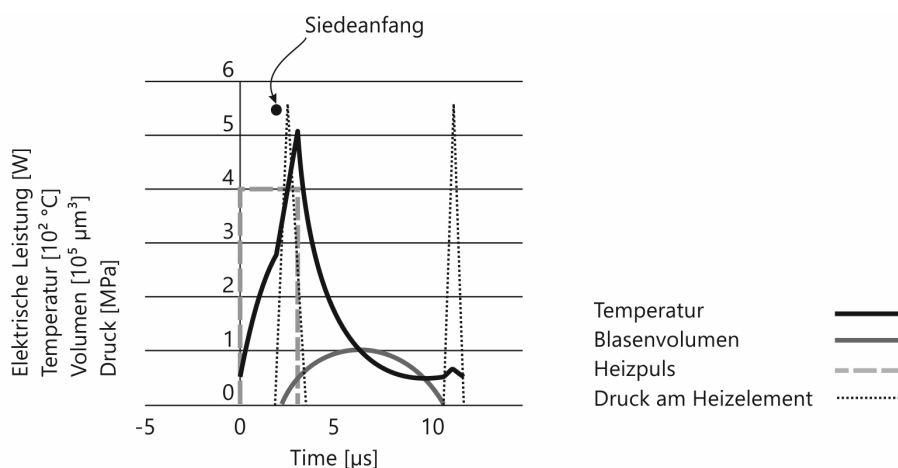


Abb. 3.3: Temperaturen während eines Tröpfchenbildungszyklus | TIJ [76, S.47] - modifiziert

Ein technischer Vorteil des TIJ ist die hohe Düsendichte, was eine kompakte Druckkopfarchitektur ermöglicht. Nachteilig gegenüber einem Piezo Inkjet (PIJ) ist beim Thermal Inkjet der engere Viskositätsbereich für die Tinten und die Einschränkung auf

verdampfbare Flüssigkeiten, die hohen Temperaturen standhalten. Diese beiden Faktoren allein schließen das Drucken eine breite Palette von Polymeren und Lösungsmitteln aus [98, S.7]. Außerdem können, wenn die Flüssigkeit nicht für den Druckkopf entwickelt wurde, Effekte wie Kogation, d.h. die Bildung einer dünnen Schicht trockener Tinte auf der Düse, [115, S.159], Satelliten-Tröpfchen oder unregelmäßige Tröpfchenbildung auftreten. Kogation tritt auch deshalb auf, weil ein Teil der verdampften Flüssigkeit nicht vollständig ausgestoßen wird (etwa 0,02 ng von 20 ng, 1 Tröpfchen) und auf der Düse zurück bleibt [98, S.128]. Fehler bei der Tröpfchenplatzierung auf dem Substrat können wegen Geschwindigkeitsschwankungen verursacht werden, wenn ein neuer Zyklus der Tröpfchenbildung (Abb. 3.4) beginnt, bevor der vorherige beendet wurde [29, S.533]. Trotz dieser Einschränkungen ist TIJ ein bevorzugtes Drucksystem für Forschungszwecke [56, S.280].

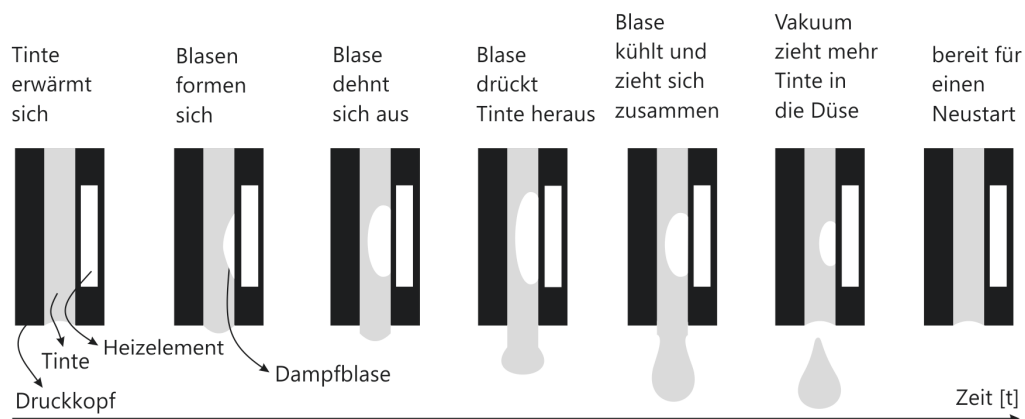


Abb. 3.4: Zyklus der Tröpfchenbildung | TIJ [29, S.533] - modifiziert

3.1.2. Wasserbasierte Inkjet-Tinten

Hutchings definiert, welche Faktoren bei der Entwicklung einer Inkjet-Tinte beachtet werden sollten: Chemie der Tinte, Tintenfluss innerhalb des Druckkopfes, Erzeugung eines stabilen Meniskus an der Düse, Strahlstabilität, Tröpfchenbildung und Tröpfchen-Substrat-Wechselwirkung. Daher sind bei der Tinte korrekte Morphologie und physikalische Eigenschaften erforderlich [56, S.95]. Die Entwicklung von Tinte ist sehr komplex und erfolgt in der Regel gleichzeitig mit der Entwicklung des Druckers. Ohne Kenntnis der Druckkopfgeometrie, Daten über den elektrischen Impuls und die Betriebstemperatur, die der Druckkopf erreicht, basiert die Entwicklung einer Tinte für ein bestehendes System nur auf den Tintendaten wie Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung. Magdassi nennt weitere relevante Aspekte bei der Entwicklung einer Tinte: Anwendungsleistung, Druckqualität, Trocknungs- und Härtingszeit, Haftung und Festigkeit (Wasser, Gas, Licht und Abrieb), Strahleigenschaften (Viskosität, Oberflächenspannung, Partikelgröße), Haltbarkeit, Herstellung (Materialien und Kosten), behördliche Vorschriften und Anforderungen an die Nach- oder Vorbehandlung [98, S.17].

Eine Tinte für einen SOHO-Drucker kann bis zu 20 Komponenten enthalten [137, S.6]. Wasserbasierte Tintenformulierung besteht hauptsächlich aus demineralisiertem Wasser

(Trägerflüssigkeit oder Carrier genannt). Das hält die Tinten in einem flüssigen Zustand und transportiert das Farbmittel. Dazu wird häufig ein Co-Träger verwendet, um die Trocknungsdauer, sowie physikalische Größen wie z.B. Viskosität zu steuern. Andere Komponenten sind Additive, die die Tröpfchenbildung, Druckkopfkorrosion, pH-Wert und Verblässungsbeständigkeit beeinflussen [137, S.26]. Wasserbasierte Inkjet-Tinten haben im Vergleich zu organischen Lösungsmittel-Tinten weniger oder keine flüchtigen, organischen Bestandteile (VOC) [56, S.96]. Sie sind umweltfreundlich [98, S.11] und haben eine niedrige Toxizität [137, S.7], was für Anwendungen wie z.B. Verpackungen, ein Vorteil sein kann.

Hoath teilt die Tintenkomponenten in zwei Kategorien, basierend auf ihrer Rolle im System, ein. Die erste Kategorie umfasst Träger, Tenside, Lösungsmittel und Feuchthaltemittel. Diese sind maßgeblich für die Eigenschaften des Lebenszyklus der Tinte (z.B. Lagerung, Verwendung und Qualität). Die zweite Kategorie umfasst Bestandteile wie Pigmente, Farbstoffe und Polymere, die auf dem Substrat verbleiben [53, S.142]. Diese Aufteilung der Einflusssphären zwischen den Komponenten ist wichtig, denn obwohl Pigmente und Farbstoff z.B. das Eindringen der Tinten in den Bedruckstoff beeinflussen, spielen Feuchthaltemittel, Tenside u.a. eine Schlüsselrolle bei der Tintenbewegung, da sie die physikalischen und thermodynamischen Größen der Tinten wie Viskosität, Dichte, Oberflächenspannung definieren. Im Folgenden werden einige Hauptbestandteile von Tinten (Tab. 3.1) kurz beschrieben³:

- Träger: Farbmittelträger zur Lösung (bei Farbstoff) oder Suspension (bei Pigment) der Farbmittel
z.B.: Wasser
- Co-Träger: können ein Befeuchtungsmittel oder Benetzungsmittel sein und werden verwendet, um einige Eigenschaften des primären Trägers wie Viskosität, Verdampfungsrate oder Oberflächenspannung zu modifizieren.
z.B.: Ethylenglykol, Propylenglykol, Trimethylenglykol, Glycerin, Propanol, Butanol, Dimethylsulfoxid, Mineralöl, Aceton, Epoxidharze, Methylcellosolve
- Tenside: sind grenzflächenaktive Stoffe, verringern die Oberflächenspannung der Tinte und erhöhen die Benetzbarkeit von niederenergetischen Feststoffen. Dies kann die Geschwindigkeit des Eindringens in das Substrat und das Spreiten der Tinten erhöhen. Dies wirkt sich auf qualitative Aspekte wie optische Dichte und Auflösung aus. Bei Tinten auf Pigmentbasis verhindern Tenside die Partikelaggregation durch Modifikation der Pigmentoberfläche.
z.B.: Nonyl-phenoxypolyethoxyethanol, Fluorochemical FC170C[®], Tergitol 15-S-5[®]
- Befeuchtungsmittel: zur Reduzierung der Verdampfungsgeschwindigkeit der Tinte. Diese können zur Verlängerung der Trocknungsdauer eingesetzt werden.
z.B.: Propylenglykol, Glycerin, Ethylenglykol, 2-Pyrrolidon, Polypropylenglykol

³Beispiele [90, S.206-211], außer bei Träger und Durchdringungsmittel

- Dispergiermittel: unterstützt die kolloidale Suspension von Pigmenten
z.B.: Disperse-Ayd W-22 dispersant, Triton X-100® dispersant, Tamol® SN dispersant, Emulgen®420
- Durchdringungsmittel: dienen der Beschleunigung der Trocknung und Vermeidung von Verschmierern
z.B.: Isopropanol

Tab. 3.1: Literaturangaben für die Zusammensetzung wasserbasierter Inkjet-Tinten

Komponente	Konzentration [%]		
	Magdassi [98, S.124]	Pond [115, S.161-163]	Hutchings [56, S.96]
Träger		35 - 80	60 - 90
Farbmittel	0,5 - 10		1 - 10
Co-Träger	5 - 50		
Befeuchtungsmittel		10 - 30	5 - 30
Tenside	0 - 2	0,1 - 2	0,1 - 10
Dispergiermittel		3 - 8	
Durchdringungsmittel		1 - 5	
Farbstofflösungsmittel		2 - 5	
Polymere Bindemittel	0 - 10		
Zusatzstoffe	Biozid, Anti-Korrosionsschutz, Chelatisierungsmittel, Viskositätsmodifikator, Fixiermittel, Anti-Kogation, Nukleationshilfe, pH-Puffer		

Farbmittel wurden bisher noch nicht erwähnt. Als signifikanter Bestandteil einer Tinte stellen sie auch einen relevanten Punkt dieser Arbeit dar und werden daher im nächsten Abschnitt explizit vertieft.

Farbstoff- und Pigmentbasierte Tinten

Farbmittel in wasserbasierten Tinten sind Pigmente, Farbstoffe oder eine Kombination von beiden [151, S.163].

Farbstoffbasierte Tinten weisen einen größeren Farbraum (*Gamut*) als Pigmenttinten auf, aber eine schlechtere Bildhaltbarkeit sowie Wasser-, Licht- und Witterungsbeständigkeit. Diese Tinten sind einfach zu formulieren, löslich im Träger und im getrockneten Zustand scheuerfest. Pigmentbasierte Tinten sind in Träger dispergiert und haben eine hohe Farbtintensität sowie eine gute Wasser- und Lichtbeständigkeit. Die Pigmente sind ca. 50 - 100 nm groß und erzeugen dadurch eine gute kolloidale Stabilität. Im Vergleich zur Größe der Pigmente – Cluster, die aus Tausenden von Molekülen bestehen – sind Farbstoffmoleküle klein (ca. 1,4 bis 4 nm) [66, S.147]. Entsprechend neigen die Düsen von Druckköpfen weniger zu Verstopfungen. Allerdings kann die geringere Stabilität der Farbstoffmolekülen von Nachteil sein. Ihre elektronische Struktur ist der Grund für ihre geringere Beständigkeit gegen Belichtung und Oxidation. Außerdem haben Tinten auf Farbmittelbasis eine geringe Beständigkeit gegen Wasser [144, S.28-29] [66, S.148].

Die Abb. 3.5 veranschaulicht das Größenverhältnis zwischen Pigment und Farbstoff und in Relation zur Größe einer Düse. Rechts ist ein Foto der Düsen des in dieser Arbeit verwendeten Druckers.

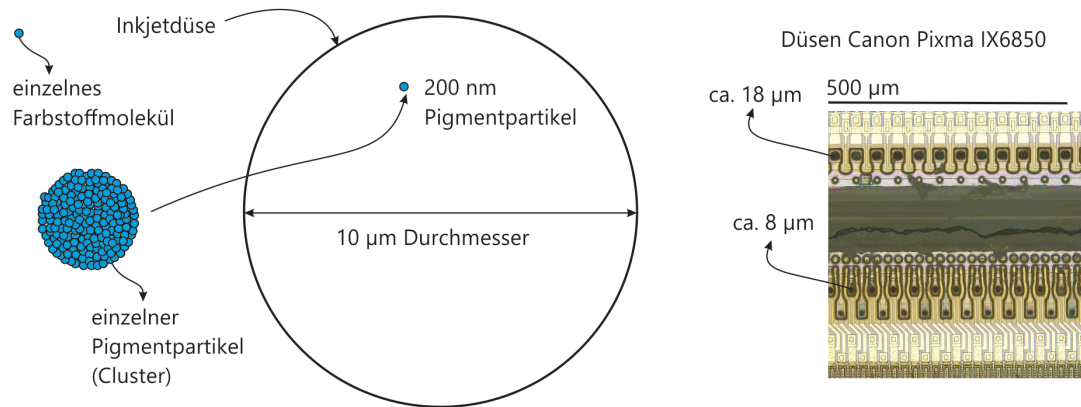


Abb. 3.5: Farbstoff-, Pigment- und Düsengröße | TIJ [66, S.147] - modifiziert

Weitere Vorteile von farbstoffbasierten Tinten sind eine größere Auswahl an verfügbaren Chromophoren und damit eine Feineinstellung der gewünschten Farbtöne. Auch die Morphologie dieser Tinte weist wenig oder keinen Glanz auf. Aufgrund der Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Faktoren mag pigmentbasierte Tinte als die beste Wahl erscheinen, sie weist jedoch Nachteile wie Metamerismus und Bronzierung auf. Zudem dringen Pigmente nicht in das Papier ein, sondern bleiben auf dessen Oberfläche, was sich auf die Morphologie in Form von Unregelmäßigkeit und Lichtstreuung auswirkt. Auf beschichteten Oberflächen, ohne jegliche Behandlung, verschmiert die Tinte besonders in dunklen Bereichen [66, S.148-149]. Magdassi bestätigt das, „*Depositing pigment particles on the paper surface creates many problems related to the penetration, adhesion and cohesion of these particles, and sometimes results in poor highlighter smear resistance*“. [98, S.103] Pond behauptet, wasserbasierte Tinte mit Farbstoff als Farbmittel kann auf beschichteten Papieren angewendet werden, jedoch Tinte auf Pigmentbasis nur auf ungestrichenen Papieren.

Derzeit verwenden 85% der SOHO-Drucker, aufgrund der hohen Dichte und Scharfkantigkeit, schwarze Tinten auf Pigmentbasis [151, S.167]. Allerdings sind farbstoffbasierte Tinten aufgrund des großen Farbraums weit verbreitet bei CMYK-Wiedergabe. Der in dieser Arbeit verwendete Drucker ist mit beiden Typen von Tinte zu betreiben. In der Tab. 3.2 sind Informationen über die wichtigsten physikalischen Größen von Farben auf Wasserbasis zusammengefasst.

Bestimmte Inkjet Tinten auf Wasserbasis können auch zum Bedrucken von Polymeren eingesetzt werden. Diese Tinten enthalten Latex und sind z.B. in Druckern für Großformate üblich. Eine weitere Variante, die sogenannten „Hybrid-Tinten“, ist ebenfalls wasserbasiert. Sie tragen zusätzlich UV-Oligomere bzw. -Monomere und können auf beschichtete Faltschachtelekkartons aufgetragen werden. Diese beiden Arten Tinte werden hier nicht behandelt.

Tab. 3.2: Physikalische und thermodynamischen Größe von Inkjet-Tinten

Quelle	η [mPa·s]	σ [mN/m]	v [m/s]	Tröpfchen \varnothing [μm]	pH
Zapka [151]	3 - 10	30			6 - 11
Magdassi [98]	1 - 5	20 - 50	5 - 15		
Hoath [53]	1 - 50	20 - 50		10 - 100	
Hutchings [56]	2 - 20				
Lee [90]				15 - 40	

3.1.3. Substrate

Substrate für Inkjetdruck

Nach Diamond besteht ein „Inkjetempfänger“ aus drei Hauptteilen (Abb. 3.6): einem Substrat, einer Tintenaufnahmeschicht und einer Rückseitenbeschichtung. Das Substrat ist in der Regel ein Papier, das nach den folgenden Eigenschaften gewählt wird: Steifigkeit, Opazität, Stabilität, Glätte u.a. [29, S.606]. Die Tintenaufnahmeschicht, in der Literatur allgemeine als *Ink-Receiving Layer* (IRL) bezeichnet, kann je nach Anwendung in mehrere Kategorien eingeteilt werden.

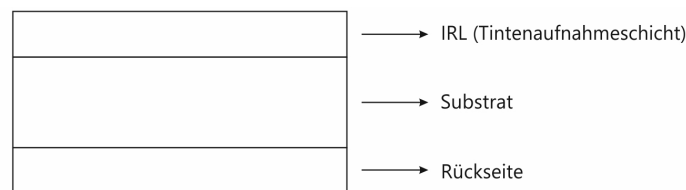


Abb. 3.6: Modell eines Substrates für Inkjet-Druckverfahren [29, S.606] - *modifiziert*

Holik ordnet die Inkjet-Substrate in drei Kategorien: mit einer einfachen Oberflächenleimung, mit einer speziellen Oberflächenleimung und beschichtet. Diesen ordnet er bestimmte Anwendungsklassen zu. (Abb. 3.7).

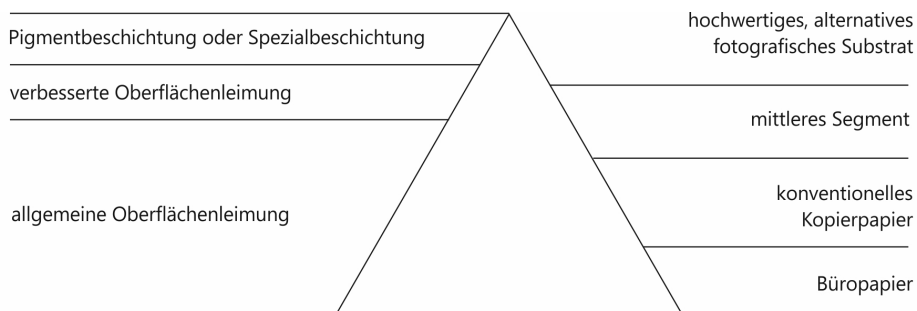


Abb. 3.7: Anwendungen der Inkjet-Substrate nach Holik [54] - *modifiziert*

Diamond kategorisiert die Substrate für Inkjet nach Rohstoffen (Abb. 3.8). Die meisten davon sind Nischenprodukte. Überwiegend sieht die ausgewertete Fachliteratur im

Wesentlichen zwei Hauptkategorien: *Microporous* und *Swellable*. Die Funktion des IRL besteht darin, den Tintenträger aufzunehmen sowie das horizontale und vertikale Spreiten von Träger und Farbmittel zu kontrollieren. Die o.g. IRLs werden aus verschiedenen Materialien hergestellt, die diese Funktionen auf unterschiedliche Weise erfüllen.

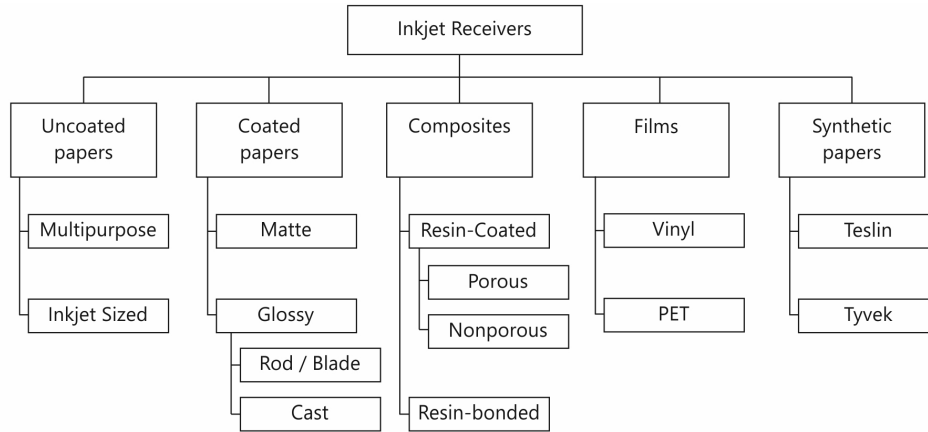


Abb. 3.8: Inkjet-Substrat kategorisiert nach Rohstoffen [29]

Swellable war eine der ersten IRL für Inkjet und besteht aus organischen Polymeren (PVOH, PVP), die in Kontakt mit den flüssigen Teilen der Tinte (Träger, Co-Träger, Befeuchtungsmittel), aufquellen und gleichzeitig das Farbmittel absorbieren [53, S.399]. Die Beschichtungsschicht beträgt etwa 20 μm , kann aber größer sein, je nach der Flüssigkeitsmenge, die aufgenommen werden soll. Durch die Absorption hat das Farbmittel wenig Kontakt mit Luft, was die Haltbarkeit der Farbe erhöht. In der Regel glänzend, kann die Tintenaufnahmeschicht auch Mattierungsmittel enthalten, um den Glanz zu reduzieren. Der Nachteil der *Swellable*-Beschichtung ist die langsame Trocknung durch molekulare Diffusion [98, S.79]. Sie ist für farbstoffbasierte Tinten auf Wasserbasis besser geeignet [137, S.11] [66, S.160]. Bei der Verwendung von PVOH sind der Hydrolysegrad und das Molekulargewicht wichtige Aspekte aufgrund ihres Einflusses auf die Druckqualität [91, S.22-23].

Microporous wurde später als die *Swellable*-Beschichtung entwickelt, um das Problem der langsamen Trocknung zu lösen. Die Beschichtung enthält Teilchen aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumdioxid (SiO_2) und Calciumcarbonat (CaCO_3), die an der Oberfläche Leerräume schaffen, durch die die Tinte eindringen kann. Diese kleinen anorganischen Partikel sind in synthetischen Bindemitteln wie PVOH dispergiert. Die *Microporous*-Beschichtung ist für pigmentbasierte Tinten besser geeignet [137, S.11], „because the ionic nature of the inorganic particles, the penetration and spread of the dyes were inhibited“. Die Farbmittel werden nicht absorbiert und bleiben daher in Kontakt mit der Luft, was ihren Verfall beschleunigt und „even ozone levels as low as 0.1 ppm can produce a rapid loss of color“ [98, S.78]. Ein bedeutender Vorteil ist die Trocknung der Tinte unmittelbar nach dem Druck [29, S.612]. Ein weiterer Vorteil ist haptischer Art, da diese Beschichtung wie traditionelles Photopapier wirkt. Zwar weisen Aluminiumoxid und Siliziumdioxid eine gute Qualität auf, sind jedoch mit bis zu 6000 Euro pro Tonne

relativ teuer [137, S.14] [38, S.448]. Die morphologischen Eigenschaften dieses Substrats sind durch die Verfeinerung der anorganischen Partikel gegeben, wobei diese ca. 0,1 - 1 μm groß sind und damit Form und Porosität definiert werden [98, S.78-79]. Weitere Modifikationen der Ladung beider Beschichtungen, *Swellable* und *Microporous*, werden durch die Verwendung von z.B. PolyDADMAC oder kationischem PVOH erreicht [29, S.612] [53, S.399].

Holik fasst die notwendigen Eigenschaften für Inkjet-Substrate zusammen: Sie sollten eine gleichmäßige Porosität mit kleinen Poren aufweisen, die Tinte schnell absorbieren und die Neigung zur Ausbreitung vermeiden. Darüber hinaus müssen sie eine gute dimensionale Stabilität aufweisen [54, S.1047]. Diamond konstatiert, dass die Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung von IRLs der Unterschied zwischen pigmentbasierten und farbstoffbasierten Tinten ist [29, S.604], da ihre physikalischen und morphologischen Eigenschaften unterschiedliche Oberflächen erfordern.

Karton

Karton ist ein „allgemeiner Begriff, angewendet für bestimmte Papierarten, die häufig durch ihre relativ hohe Festigkeit charakterisiert sind“ [33]. Er wird nach Oberflächenbehandlung und Stoffeintrag kategorisiert. Die vollständige Kennzeichnung eines Kartons wird durch zwei Buchstaben und eine Ziffer angegeben. Diese Daten sind in Tab. 3.3 zusammengefasst.

Tab. 3.3: Allgemeine Kennzeichnung von Karton [33]

Buchstabe	Oberflächenbehandlung	
A	gussgestrichen	
G	pigmentgestrichen	
U	ungestrichen	
Buchstabe	Stoffeintrag	
Z	gebleichte Primärfasern (Zellstoff)	
N	ungebleichte Primärfasern (Zellstoff)	
C	Holzstoff	
T	Sekundärfaser, Karton mit weißer, gelber oder brauner Rückseite	
D	Sekundärfaser, Karton mit grauer Rückseite	
Ziffer	Farbe und Volumen	
	<i>Für alle Sorten, mit Ausnahme von GD und UD Farbe der Rückseite</i>	<i>Spezifisches Volumen für GD und UD [cm³/g]</i>
1	weiß	> 1,45
2	hell (gelb)	1,3 bis 1,45
3	–	<1,3
4	braun	–

Aufgrund der Vielfalt, die sich aus eine Kombination von Oberflächenbehandlung,

Stoffeintrag und Farbe ergibt, werden hier nur die Eigenschaften der im Folgenden verwendeten Varianten, nämlich GZ, AZ und GC, vorgestellt.

GC (auch Chromokarton, Holzschliffkarton, *Folding Box Board* oder *Coated FBB*) hat eine zentrale Schicht aus Holzstoff zwischen zwei Schichten gebleichtem, chemischem Zellstoff. GZ (auch Zellstoffkarton, *Solid Bleached Board* oder *Coated SBB*) wird ausschließlich aus gebleichtem, chemischem Zellstoff hergestellt (Abb. 3.9). GC und GZ werden häufig für die Herstellung von Schachteln⁴ oder Faltschachteln⁵ für z.B. Tabakwaren, Kosmetika, Medikamente und Lebensmittel verwendet [69, S.59]. Der Unterschied zwischen AZ und GZ ist nur durch ihre Oberflächen gegeben. Gussgestrichener Zellstoffkarton wird für hochwertige Verpackungen, für Faltschachteln und Feinkartonagen verwendet [54, S.1052]. „Faltschachtelkarton ist der Oberbegriff für alle Kartonsorten, die zur Herstellung von Faltschachteln geeignet sind“ [72] und wird im Folgenden auch in diesem Sinne verwendet.

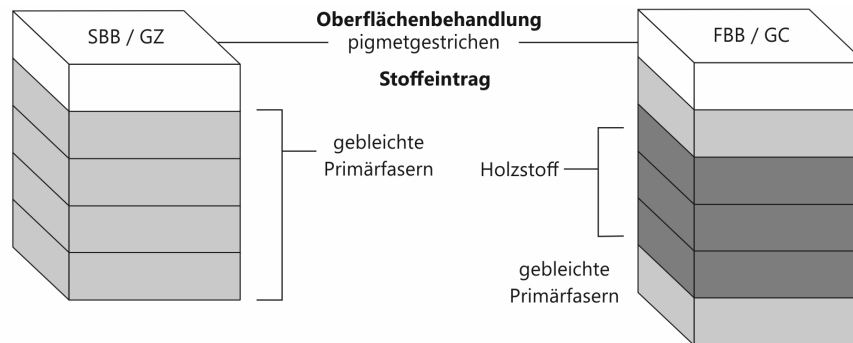


Abb. 3.9: Schichten eines GC- und GZ-Karton [73, S.23 u. 25] - *modifiziert*

Der Stoffeintrag ist für die Weiterverarbeitung von größerer Bedeutung, da, je nach Faserart, Lagen und Zusammensetzung, bei einer mechanischen Bearbeitung wie Rillen und Falten unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Dieser Unterabschnitt über Kartons fokussiert die Oberflächenbehandlungen, nämlich die gussgestrichenen und pigmentgestrichenen Variationen, weil sie eine direkte Interaktion mit der Tinte haben.

Englischsprachige Autoren nennen diese Oberflächenschicht *coating color* [54, S.235], *coating* [73, S.92] [40, S.232] [1, S.673] und *pigment coating* [40, S.232]. Pigmentstrich und Streichfarbe sind die deutschen Begriffe für diese Oberflächenbehandlungen [72, S.127]. Im Folgenden wird der Begriff Pigmentstrich verwendet.

Holik fasst einige Merkmale und Funktionen von Pigmentstrichen zusammen: Anpassung auf Weißgrad, Helligkeit, Farbumfang, Glanz und Ton; Schutz von Verpackungsgütern durch Bildung von Barrieren für Sauerstoff, Wasserdampf, Fette, Öle; Verbesserung

⁴Ein- oder mehrteiliges, meist quaderförmiges, verschließbares Packmittel in verschiedenen Bauarten, Ausführungen und Lieferformen als Grund-(Einzel-), Sammel-, Versand-, Verkaufs- oder Mehrzweckverpackung [69, S.59]

⁵Faltbare Schachtel, die aus einem Faltschachtelrumpf (Zarge) mit seitlicher, parallel zur Höhe verlaufender (Fabrikanten-)Verbindung und anhängenden Boden- und Deckelklappen bzw. anhängendem Einsteckboden und -deckel besteht. [69, S.59]

der Lackierbarkeit; weniger Staubentwicklung; Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch niedrigere Herstellungskosten (Preise für Pigmente sind geringer als für Fasern), geringerer Druckfarbenbedarf und bessere Bedruckbarkeit wegen gleichmäßiger Oberfläche, insbesondere in Bezug auf Glätte und Penetration der Tinten. Zu diesem letzten Punkt ergänzt er, dass diese Oberfläche auch „*to protect the coating base: for example, for preventing interactions with fluids*“ ist [54, S.754]. Pigmentstriche sind daher für den Offsetdruck sehr gut geeignet, da in diesem Druckverfahren das Feuchtmittel Wasser auf das Substrat aufgebracht wird. Da das Feuchtmittel lediglich als Hilfsmittel für den Druckprozess und nicht als Träger der Farbkomponente dient, ist es wünschenswert, dass das Substrat kein oder zumindest sehr wenig Wasser absorbiert.

Die Haftung und Festigkeit der Tinte auf der Substratoberfläche wird sowohl durch physikochemische Effekte als auch durch ihre Morphologie (Struktur, Form) bestimmt. Abhängig von der chemisch gegebenen Hydrophobie/Hydrophilie, der Porosität und der Rauheit, ergeben sich für die Tintenbewegung sowohl seitlich als auch quer zur Oberfläche Unterschiede. Diese sind auf die verwendeten Materialien für die Herstellung des Pigmentstriches und auf seine Zusammensetzung zurückzuführen.

Eine bekannte Schwierigkeit bei der Zusammensetzung ist z.B. die ausgewogene Abstimmung zwischen Porengrößenverteilung, Hydrophobie, Druckglanz und Trocknungsdauer. Die Verwendung von mehreren Pigmentstrichlagen ist eine gängige Alternative, um einen Teil dieser Schwierigkeiten zu reduzieren [54, S.270-271]. Diese Entwicklung im Laufe der Zeit ist in Abb. 3.10 dargestellt. Fünf von sieben Kartons, die für den experimentellen Teil dieser Arbeit ausgewählt wurden, haben 2 oder 3 Pigmentstriche, wobei die Oberflächenleimung⁶, die als Barriere wirkt und das Eindringen von Flüssigkeit in die unteren Schichten erzwingt [54, S.745], nicht berücksichtigt ist. Lee beschreibt, dass Pigmentstriche aus Kaolin und Calciumcarbonat einen unzureichenden Leerraum (*voids*) aufweisen, um übermäßige Ausbreitung vor der Tintenaufnahme zu verhindern [91, S.37-38]. Dies erhöht die Druckqualität, da eine übermäßige Ausbreitung der Tinte z.B. Dichte und Auflösung reduziert, kann aber der Grund für eine langsame Trocknung sein.

Abb. 3.11 veranschaulicht den Unterschied in der Porosität eines Kartons mit Pigmentstrich und eines Kopierpapiers. Die Porosität von unbeschichteten und beschichteten Kartons liegt in Größenordnungen von Dutzenden Mikrometern bzw. Dutzenden oder sogar Hunderten Nanometern [1, S.674].

„Pigmentstriche bestehen aus mehreren Komponenten, wobei Weißpigmente und Bindemittel hinsichtlich Volumen und Kosten die wichtigsten sind. Weitere spezifische Additive beeinflussen und steuern den anwendbaren Feststoffgehalt, die Rheologie, das Wasserrückhaltevermögen und die Immobilisierung der Pigmentstriche während des

⁶Engl.: *Surface Sizing*, Funktionen: Verbesserung der Festigkeit, Reduzierung der Faserspaltung und kann auf eine oder beide Seite aufgetragen werden [73, 18]

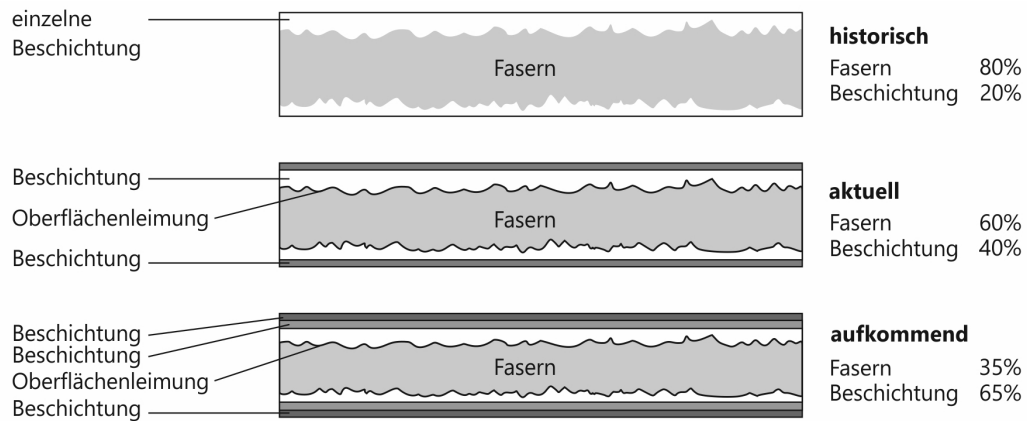


Abb. 3.10: Unterschiedliche Kartonbeschichtungen [54, S.237] - modifiziert

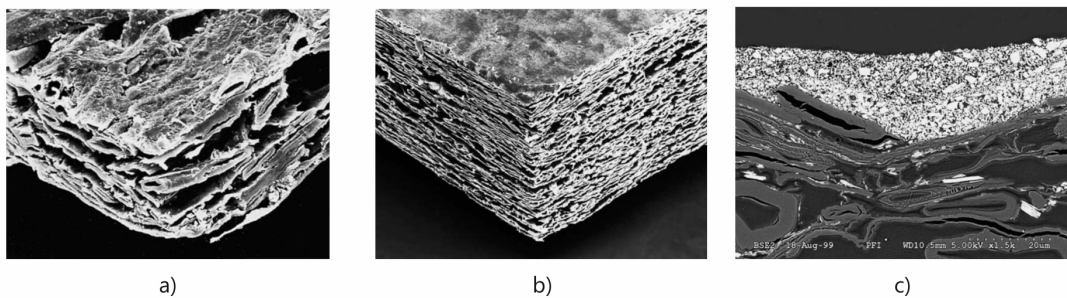


Abb. 3.11: (a) Kopierpapier | (b) Karton mit Beschichtung, Draufsicht | (c) Karton mit Beschichtung, Querschnitt [40, S.19 u. 20]

Streichprozesses (z.B. Dispergiermittel, Co-Bindemittel und Verdicker), und andere beeinflussen die physikalische und optische Oberflächenstruktur und Eigenschaften dieser Schicht (z.B. assoziative Verdicker, Gleitmittel, Härter, fluoreszierende Weißmacher (FWAs), Entschäumer und Entgasungsmittel)“ [94, S.20–22].

Die meisten der oben genannten Materialien werden sowohl bei der Herstellung der unteren/ mittleren Schichten als auch bei der Herstellung von Pigmentstrichen verwendet. Die weißen Pigmente sind für die Helligkeit, den Weißgrad, die Opazität und Deckkraft der Fasern ursächlich und machen 80-95% des Gesamtrockengewichts der Beschichtung oder, als Volumenanteil, 70-80% des festen Materials der Beschichtung aus. Drei Merkmale der Pigmente bestimmen die endgültigen Eigenschaften der Beschichtung: Seitenverhältnis (Form), Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung. Abb. 3.12 zeigt eine kumulative Massenverteilungskurve nach Partikelgröße. Die Grafik zeigt die große Variation der Pigmentgröße, die durch den Mahlprozess der Mineralien beeinflusst werden kann. Kleine Partikel können z.B. die Räume zwischen größeren Partikeln ausfüllen und die Durchlässigkeit einer Flüssigkeit verringern [54, S. 238-243].

Lee [91, S.37-38] und Souza [94, S.20-22] stellen fest, dass Kaolin und Calciumcarbonat einen unzureichenden Hohlraumanteil und kleine Porendurchmesser für Flüssigkeitsströmung haben, um Tröpfchen oder übermäßige Ausbreitung vor der Tintenaufnahme zu verhindern. Lamminmäki [88, S.22] unterscheidet die Pigmentporen zwischen inneren

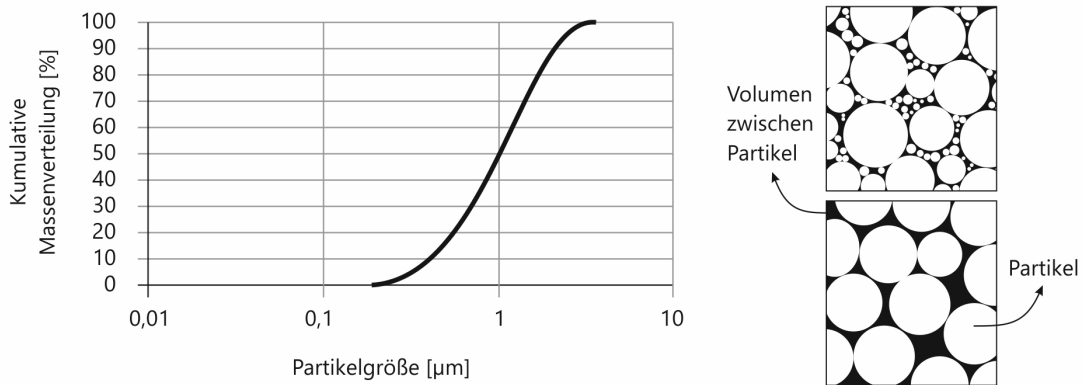


Abb. 3.12: Kumulative Massenverteilungskurve nach Partikelgröße (links) | Enge (oben rechts) und breite (unten rechts) Partikelgrößenverteilung [54, S.241-243] - *modifiziert*

Poren (intrapartikulär) und Poren zwischen den Partikeln (interpartikulär). Der erste Typ besteht aus großen, miteinander verbundenen Poren mit hoher Permeabilität (>100 nm) und der zweite Typ aus kleinen Poren, bei denen die Kapillarität die vorherrschende Kraft für die Absorption ist.

Ein wichtiger Punkt bei Pigmenten sind die Dispergiermittel (oder Tenside). Sie werden auch in Tinten auf Pigmentbasis verwendet und bewirken eine Individualisierung der Pigmentteilchen, um Aggregation oder Agglomeration zu vermeiden. Diese Mittel können die Oberfläche der Kartons positiv (kationisch) oder negativ (anionisch) laden [54, S.248-249]. Die meisten Pigmentstriche liegen im pH-Bereich von 7,5 - 11,5 und sind für das Offsetdruckverfahren geeignet, dessen oxidativ trocknende Farbe bei höherem pH-Wert schneller trocknet [54, S.273].

Bindemittel sind der zweitwichtigste Bestandteil im Pigmentstrich und bewirken die Bindung der Pigmentteilchen untereinander und die Füllung (partiell) der Hohlräume zwischen den Teilchen. Sie beeinflussen wesentlich das Wasserrückhaltevermögen und die Viskosität der Pigmentmasse, während des Herstellungsprozesses eines Kartons. Sie sind ebenfalls in 3 Gruppen unterteilt: Bindemittel (zur Bindung), Co-Bindemittel (zur Beeinflussung der Fließeigenschaften und der Wasserrückhalteigenschaften) und *Sole*-Bindemittel, das kein Co-Bindemittel benötigt und allein eingesetzt wird. Oft bestehen die Bindemittelsysteme aus einer Kombination von zwei Bindern, deren Klassifikation nach Herkunft (synthetisch oder organisch) und Wasserlöslichkeit gegeben ist:

- wasserlöslich: Stärken, Proteine, Cellulosederivate: Ether, zum Beispiel Carboxymethylcellulose Poly(vinylalkohol) (PVA, PVOH) → erhöhte Wasserrückhaltung
- wasserunlöslich: Carboxylierte Styrol-Butadien-Latizes (XSB-Latex), Styrol-Acrylat-Latexe (SA-Latex), Poly(vinylacetat)-Latizes (PVAc-Latex) → niedrige Wasserrückhaltung

Synthetische Bindemittel werden gegenwärtig bevorzugt. Es handelt sich dabei um polymerisierte Erdölprodukte wie Styrol-Butadien-Latizes, Acrylsäureester und Polyvinylacetat [54, S.765]. Die Einflüsse von Bindemittel und Co-Bindemittel auf einige

Eigenschaften der Kartons sind in Abb. 3.13 dargestellt.

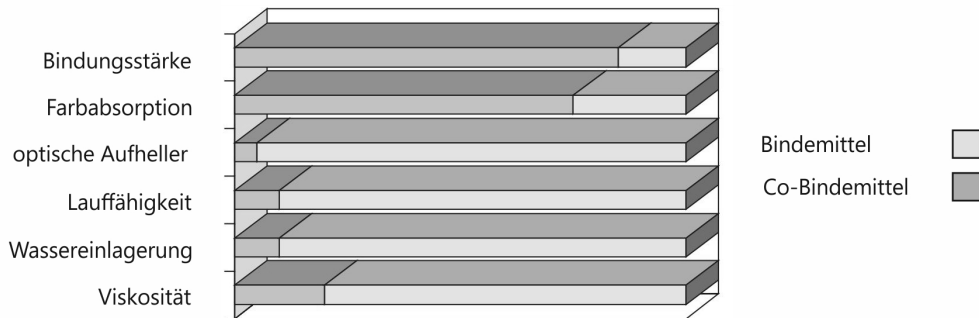


Abb. 3.13: Auswirkung von Bindemittel und Co-Bindemittel bei den Eigenschaften der Beschichtung [54, S.766] - modifiziert

Einige Additive, die in die Formulierung der Pigmentstriche eingesetzt werden, um Produktionsparameter der Kartons zu beeinflussen, wirken sich auch auf die spätere Wechselwirkung mit Flüssigkeiten aus, insbesondere Wasser. Verdickungsmittel, wie CMC, PVOH, Acryl-Copolymere, verhindern das Eindringen von Wasser in unteren Schichten. Assoziative Verdickungsmittel, „im wesentlichen hydrophiles, wasserlösliches Polymer mit stark hydrophoben Endgruppen oder Seitenketten“ [54, S.258-267] verleihen der Kartonoberfläche Wasserfestigkeit [54, S.260].

Die exakte Rezeptur eines Pigmentstrichs ist stets ein Betriebsgeheimnis. Sie kann mehr als 10 Komponenten enthalten. Dies ist ein Komplexitätsfaktor bei der Forschung mit marktüblichen Kartons. Dennoch wurden auf dem Markt erhältliche Kartons ausgewählt, um die Forschungsarbeit so realitätsnah wie möglich durchzuführen. Ein gebräuchliches Rezept besteht in der Regel aus den Komponenten in Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Standardkomponenten von Pigmentstrichen [54, S.768]

Teile	Komponenten	Beispiele
100	Pigmente	GCC, Kaolin , PCC, Talkum, TiO2
0 – 0,3	Dispergiermittel	-
5 – 12	Bindemittel	Bindemittel: XSBRSA Co-Bindemittel: Starch, CMC, and PVOH
0 – 1	Verdickungsmittel	CMC, PVOH, Acryl-Copolymere, assoziierte Verdickungsmittel
0 – 1	Schmiermittel	Stearate, PEG, Wachsemulsionen und Sojalecitin
0 – 1	optischen Aufhellern (OBA)	4 4'-diamino-2 2'-stilben disulfonsäure
0,01 – 0,05	Schattierungsfarbstoffe	Basis-, Substantiv- und Pigmentfarbstoffe
0,01 – 0,1	Entschäumer/Entlüfter	Tenside und unlösliche, hydrophobe Zusätze

Schließlich ist der Begriff Filterkuchen durch die Form der Pigmentschicht gegeben und hat einen Einfluss auf die ineffiziente Absorption von Inkjet-Tinten. Der Prozess ist in Abbildung 3.14 dargestellt: Das Auftragen der Beschichtung mit Pigmentpartikeln, Bindemittel und hauptsächlich Wasser (links), das Eindringen von Wasser in die Faserschicht und die Bildung des Filterkuchens (Mitte) und schließlich die Endtrocknung, bei der das Wasser verdunstet oder verdunstet. In der zweiten Phase kann IR-Radiation zur Immobilisierung des Bindemittels eingesetzt werden [54, S.714]. Weitere Aspekte der Anwendung von IR-Strahlung in Kombination mit Bindemittel (PVOH als Primer) werden in den Ergebnissen dieser Arbeit diskutiert.

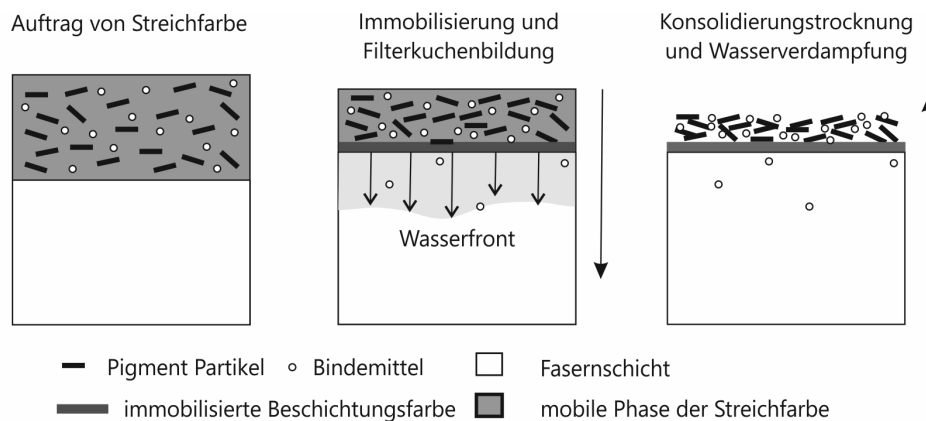


Abb. 3.14: Illustrative Darstellung: Auftragen und Trocknung der Kartonbeschichtung

3.1.4. Primer

In den vorherigen Abschnitten wurde erklärt, dass eine gegenseitige Anpassung zwischen Drucksystem, Tinte und Substrate notwendig, aber komplex ist. In der industriellen Praxis werden daher Materialien verwendet, die zuvor als miteinander kompatibel angegeben wurden. Dadurch reduziert sich die Wahl an Substraten für ein Inkjet-Drucksystem. Die Forschung zum Thema Substrate für Inkjet-Druckverfahren, insbesondere an graphischen Papieren, liefert Erkenntnisse über die Entwicklung neuer Oberflächen, die sich auf Karton zumindest teilweise übertragen lassen. PVOH ist z.B. in der Regel ein Bestandteil der Formulierung von *Swellable*-Inkjet-Substraten. Eine andere Alternative für Modifizierung der Oberfläche von Substraten ist die Verwendung von Primern oder *bonding agent*. Ein Primer ist kein Pigmentstrich, sondern eine Grundierung zur Verbesserung der Benetzung und Haftvermittlung, meistens ein dünnflüssiger, farbloser Lack [72, S.1164]. Zapka erklärt:

„In the majority of commercialized applications involving paper, such as those from the home-office market, there is a large amount of IP on how to formulate inks with penetrants to control print quality, but the best print results tend to be achieved with specific media, which are chemically pretreated. Microporous coated papers for printing photographs is one specific example of this. Similar priming approaches in single-pass production print applications

have been disclosed recently, and the HP⁷ solution for in-line pretreatment by ink jetting a “bonding agent” is well known. It is fully expected that such approaches will continue to underpin the print quality optimization process in industrial printing in a variety of applications, including flexible packaging film.“ [151, S.45-46]

Das Thema Primer ist immer noch weitgehend durch Patente und Geschäftsgeheimnisse beschränkt⁸. Beispiele von Patenten von Grundierungen mit z.B. PVOH sind:

- US 005662997A (02.09.1997), Seiko Epson Corporation; PVOH 5 - 20 Gew.-%, kann Harze oder kolloidale Kieselsäure enthalten
- WO 2017/039582 A1 (09.03.2017), Hewlett-Packard Development Company: PVOH mindestens 10 Gew.-%), ein kationisches Salz (mindestens 15 Gew.-%) und Wasser
- EP 3 265 318 B1 (02.10.2019), Hewlett-Packard Development Company: 5 Gew.-% bis 70 Gew.-% eines Bindemittels einschließlich: 1 Gew.-% bis 40 Gew.-% PVOH, 1 Gew.-% bis 20 Gew.-% Stärke-Nanopartikel, 10 Gew.-% bis 70 Gew.-% Polymerlatex, b) 1 Gew.-% bis 20 Gew.-% eines Wachses und c) 10 Gew.-% bis 50 Gew.-% eines kationischen Salzes und d) Wasser

Andererseits ist Fachliteratur über die Herstellung oder Modifikation von Pigmentstrichen für Inkjet verfügbar, sowohl über *Swellable* als auch *Microporous*. Hierüber wird im Kapitel Stand der Forschung berichtet.

Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol (PVOH, PVA oder PVAL) ist eine wichtige Komponente im Kontext dieser Arbeit. Dieses Polymer wird sehr oft als Bindemittel für Inkjet-Beschichtungen als Komponente für nicht poröse IRL (*Swellable*) verwendet [75, S.604]. Dies ist auf seine hohe Adhäsionskraft zurückzuführen [88, S.19]. In diesem Kapitel werden die physikalisch-chemischen Eigenschaften, sowie Produktions- und Nutzungsparameter vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf Anwendungen für das Inkjet-Druckverfahren liegt. Im Kapitel ‘Stand der Forschung‘ werden relevante Arbeiten zum Einsatz von PVOH im Zusammenhang mit Inkjet vorgestellt.

PVOH (C₂H₄O), zuvor erwähnt als Co-Bindemittel bei der Herstellung von Pigmentstrichen für Kartons, ist ein synthetisches Polymer, wasserlöslich, ungiftig, mit einer hohen Sauerstoff- und Aromabarriere, beständig gegen Öl, Fett und organische Lösungsmittel. Seine Eigenschaften hängen von der molekularen Masse, Hydrolysegrad, Wassergehalt,

⁷HP PageWide Industriedruckmaschinen in <https://www8.hp.com/de/de/commercial-printers/pagewide-industrial/ink-media.html>

⁸Neben dem Primer von HP gibt es noch ein Produkt von Spring Coating Systems (wasserbasierter Primer für Ink Jet IJC-10551). Andere marktgängige Produkte wurden nicht gefunden (Stand April 2020).

Anwesenheit von Additiven (z.B. Weichmachern) und eingeschränkt auch vom Herstellungsverfahren ab [111, S.54-55] [84, S.1]. PVOH kann ebenfalls als Klebstoff zur Modifizierung von Dispersionsklebstoffen, als Schutzkolloid und Bindemittel für Textilien verwendet werden [81].

Für die Herstellung von PVOH sind unterschiedliche Verfahren bekannt und „aus industrieller Sicht stellt sich die derzeitige Hauptproduktionsmethode (...) wie folgt dar. Polyvinylacetat wird durch radikalische Polymerisation unter Verwendung von Vinylacetat als Rohmaterial hergestellt und dann unter alkalischen Bedingungen hydrolysiert. Methanol wird hauptsächlich als Lösungsmittel (...) verwendet“ [84, S.3]. Da die PVOH-Grundeinheit Vinylalkohol ist, ein instabiles und nicht isolierbares Monomer, wird das Polymer durch ein Zweiphasensystem synthetisiert, schematisch dargestellt in Abb. 3.15. Zuerst wird das Vinylacetat polymerisiert (radikalische Kettenpolymerisation) und dann das Polyvinylacetat in PVOH hydrolysiert [111, S.55-56].

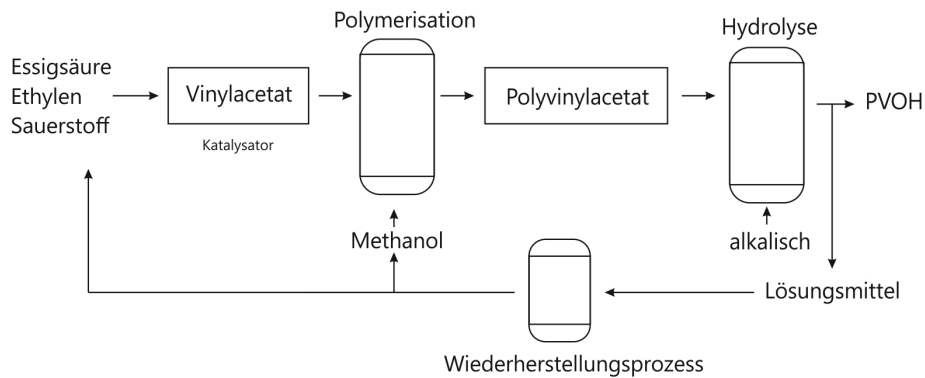


Abb. 3.15: Herstellungsschema von PVOH [111, S.56] - modifiziert

Die Anordnung (Taktizität) der relativ kleinen Seitengruppen des PVOH kann in isotaktischer (gleichseitig) syndiotaktischer (wechselseitig) und ataktischer (stochastisch) Stellung zur *Backbone* auftreten. Die Taktizität hängt von der Art des Vinylester-Monomers ab, das zur Herstellung des PVOH verwendet wird [111, S.63]. Je monotoner die Taktizität des Polymers ist, desto größer ist seine Kristallinität, die wiederum Schmelzpunkt, Härte und Verformbarkeit beeinflusst.

Der Polymerisationsgrad, Anzahl der Wiederholeinheiten von Makromolekülen, variiert bei marktgängigen PVOH zwischen 300 und 44000 [111, S.59-61]. Die molekulare Masse kann aus dem mittleren Polymerisationsgrad berechnet werden, obwohl es sich um einen annähernden Wert handelt. Die PVOH-Viskosität wird konventionell bei einer 4%igen wässrigen Lösung bei 20 °C gemessen [84, S.16]. Referenzdaten von Polymerisationsgrad, molekulare Masse und Viskosität sind in Tab. 3.5 zusammengestellt. Die Zunahme der molekularen Masse erhöht die Viskosität, Zugfestigkeit und die Bindungskapazität von z.B. Pigmenten [84, S.16].

Der Hydrolysegrad, durch Zubereitungsbedingungen steuerbar, ist das Verhältnis von Vinylalkohol- zu Vinylacetat-Einheiten in der Polymerkette und ist in 3 Kategorien

Tab. 3.5: Polymerisationsgrad, molekulare Masse und Viskosität PVOH [111, S.60]

Stufe	Polymerisationsgrad	molekulare Masse	Viskosität [mPa·s]
niedrig	550	22000 - 27000	04-07
mittel	900	35000 - 40000	13-18
medium	1500	75000 - 82000	26-30
hoch	2200	89000 - 100000	48-65

unterteilt, wie in Tab. 3.6 dargestellt. Vollständig hydrolysierter PVOH hat, bei gleichem Polymerisationsgrad, eine höhere Viskosität als teilweise hydrolysierter PVOH [84, S.16]. Die Abb. 3.16 zeigt die Vinylalkohol- und Vinylacetat-Einheiten in der PVOH-Kette.

Tab. 3.6: Hydrolysegrad und Rest von Acetylgruppen PVOH [111, S.59]

Grad	Hydrolysegrad [mol%]	Rest von Acetylgruppen [mol%]
vollständig hydrolysiert	98 - 99	0,6 - 1,5
Zwischenstufe	93 - 97	2,7 - 6,9
partiell hydrolysiert	85 - 90	10 - 15

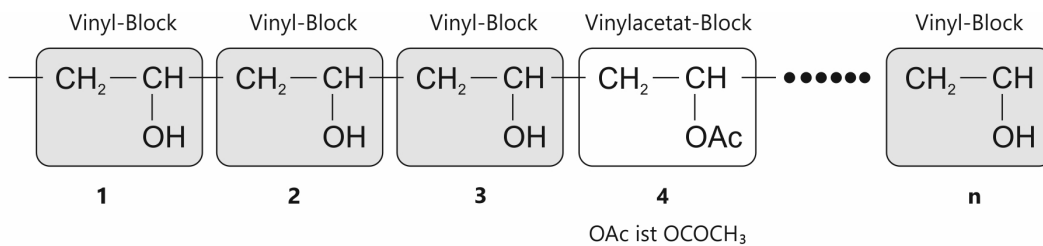


Abb. 3.16: Beispiel von Vinylalkohol- und Vinylacetat-Einheiten in der Polymerkette [106]

Mit zunehmendem Polymerisationsgrad steigt die Viskosität. Daher wird oft in der Fachliteratur anstelle des Polymerisationsgrads die Viskosität eines PVOH verwendet. Die vollständige Bezeichnung wird durch Viskosität und Hydrolysegrad angegeben, zum Beispiel: PVOH 4-98 oder 23-88. Grundlegende Eigenschaften bei der Verwendung von PVOH sind im Wesentlichen durch den Hydrolysegrad gegeben (Abb. 3.17).

Je geringer der Hydrolysegrad (mehr Restacetylgruppen) ist, desto kleiner ist die Oberflächenspannung, insbesondere bei geringeren Hydrolysegraden in syndiotaktischen Strukturen. Im Kontakt mit Lösungsmitteln neigt der PVOH dazu, die Oberflächenspannung der Lösung durch die Bildung von Wasserstoffbrücken zu verringern [111, S.67]. Die Haftung von PVOH hängt hauptsächlich von der Anzahl verfügbarer Acetylsalgruppen (bzw. Hydrolysegrad) und dem Substrat ab, auf das er aufgebracht wird. Der pH-Wert beim vollständigen hydrolysierten PVOH ist ca. pH 7 und beim partiellen hydrolysierten ca. pH 5 [84, S.20].

Die Löslichkeit in Wasser hängt ebenfalls u.a. vom Hydrolysegrad ab. Hydroxylgruppen ($-OH$) verstärken die inter- und intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen, was

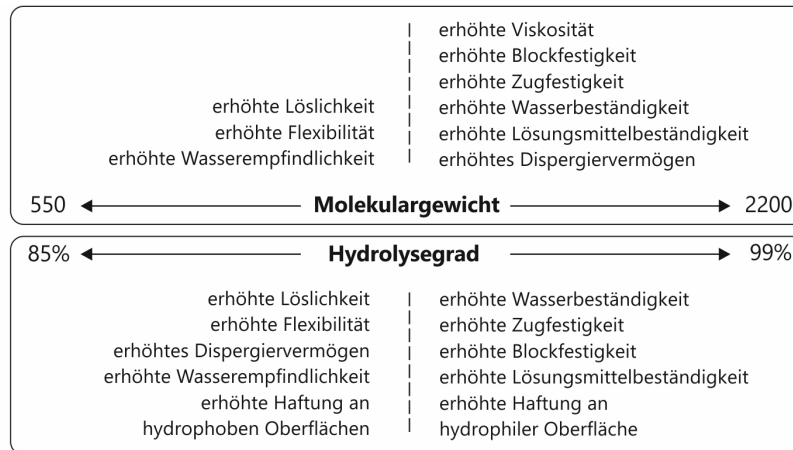


Abb. 3.17: Auswirkung von Hydrolysegrad und Polymerisationsgrad auf PVOH Merkmale [111, S.61] - modifiziert

seine Löslichkeit im Wasser reduziert, wobei restliche Acetatgruppen hydrophob sind. Eine gute Löslichkeit ist durch eine ausreichende Anzahl von Acetatgruppen gegeben [84, S.14]. Für vollständig hydrolysiertes PVOH ist es notwendig, dass die Auflösung unter Temperaturen über 90 °C erfolgt. Lösungen, hauptsächlich aus vollständig hydrolysiertem PVOH, zeigen, wenn sie für längere Zeit unter 50 °C lagern, eine erhöhte Viskosität und können zum Gelieren neigen [84, S.18].

Die thermischen Eigenschaften des PVOH werden auch durch den Hydrolysegrad sowie durch Taktizität, Polymerisationsgrad und Wassergehalt beeinflusst [111, S.66]. Die Daten in der Tab. 3.7 umfassen nur die Bereiche für die wichtigsten thermischen Übergangsphasen und sind je nach PVOH-Lösung individuell zu ermitteln. Schließlich kann PVOH amorph wie teilkristallin auftreten. Der Kristallisationsgrad nimmt mit dem Hydrolysegrad und durch thermische Behandlung zu [41, S.916].

Tab. 3.7: Thermische Übergangsphase PVOH [111, S.54]

Thermische Übergangsphase	Temperatur [°C]
Schmelzpunkt	180 - 240
Siedepunkt	228
Zersetzungspunkt	180
Glasübergangstemperatur	75 - 85

3.2. Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten

In den vorhergehenden Abschnitten über Inkjet-Tinten und -Substrate wurden einige physiko-chemische Eigenschaften dieser Materialien erwähnt, wie z. B. Viskosität, Oberflächenspannung und Porosität.

Hier werden diese Eigenschaften als Kenngrößen vorgestellt, die in den Unterabschnitten

3.2.1 und 3.2.2 beschrieben werden. Diese Kenngrößen beeinflussen die Wechselwirkungsprozesse zwischen der Tinte und dem Substrat, wie z. B. Benetzung, Absorption und Trocknung, die in Unterabschnitt 3.2.3 erläutert werden, ebenso wie relevante Modelle und modellhafte Beschreibungen dieser Interaktionen.

3.2.1. Kenngrößen von Inkjet-Tinten

Viskosität

Zur Messung der Viskosität⁹ sind zwei Größen von Bedeutung: Schubspannung und Schergeschwindigkeit. Diese Größen werden durch das Zwei-Platten-Modell (Abb. 3.18, links) veranschaulicht, welches Wandhaftung an den Platten voraussetzt. Die Platten haben eine Fläche A und sind h von einander entfernt. Die obere Platte wird mit einer Geschwindigkeit v und Kraft F bewegt. Die Schubspannung τ wird durch F/A und die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ durch v/h angegeben. Das Verhältnis von τ zu $\dot{\gamma}$ ist die Viskosität $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ [105, S.23-29]. Das Zwei-Platten-Modell erklärt die Viskosität in einer Schichtenströmung auf makroskopische Weise. Hoath erklärt die Abhängigkeit der Viskosität von dem Aufbau und der Verbindungsstärke der Moleküle auf der mikroskopischen Ebene:

„Viscosity is the fluid property that defines its resistance to shear deformation or flow. The resistance is caused by a cohesive intermolecular force that gives rise to friction between adjacent layers of fluids that are in relative motion as they slide past one another. The viscosity depends on the attractive force between molecules and the momentum interchange between molecules in adjacent layers of fluid as they move relative to one another. Viscosity depends on temperature, but the effect is different for liquids and gases. In a liquid, molecular cohesion dominates the viscosity. As the temperature increases, the molecules in a liquid become more energetic and separated. Thus, the cohesive force decreases, and so does viscosity.“ [53, S.16]

Die Definition des o.g. Fließverhaltens (*flow*) von wasserbasierten Inkjet-Tinten ist nicht einstimmig. Die meisten Autoren geben an, dass die Tinten newtonsches Verhalten¹⁰ aufweisen [53, S.35] [151, S.33] [98, S.25]. Andere Autoren sprechen über einen gewissen Grad an Viskoelastizität [56, S.25], so dass die Inkjet-Tinten nahezu newtonsches sind [151, S.12]. Die Viskosität bei idealviskosen Flüssigkeiten ist eine Stoffkonstante und hängt nur von Temperatur und Druck ab [123, S.232]. Die Fließ- und Viskositätskurve von zwei idealviskosen Fluiden (a) mit niedriger Viskosität und (b) mit höherer Viskosität sind in Abb. 3.18 (rechts) dargestellt.

Magdassi erklärt, dass die Viskosität beim Tintenausstoßen und -spreiten auf der bedruckten Oberfläche von grundlegender Bedeutung ist [98, S.25]. Inkjet-Tinten haben in der Regel eine niedrige Viskosität (s. Tab. 3.2). Die Erhöhung der Tintenviskosität

⁹Es wird hier Viskosität als Scherviskosität angewendet.

¹⁰Schergeschwindigkeitsunabhängiges Verhalten

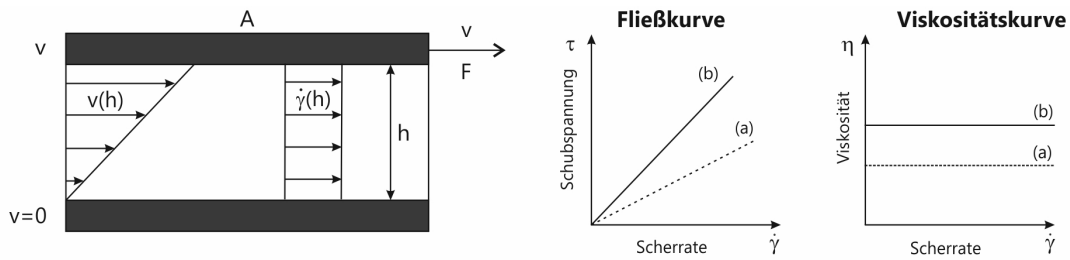


Abb. 3.18: Zwei-Platten-Modell (links) [123, S.230] | Fließ- und Viskositätskurven (rechts) [123, S.232]

führt zu einem geringeren Spreiten des Tintentröpfchens und einer geringeren Penetration [138, S.1702]. Die Viskosität kann den Kontaktwinkel beeinflussen. Je höher die Viskosität, desto größer der Einfluss auf die Benetzung einer porösen Oberfläche [92, S.989].

Numerische Simulationen zur Fluidabsorption in porösen Oberflächen haben gezeigt, dass die Erhöhung der Dichte und Viskosität, um den Faktor zwei, einen marginalen Einfluss auf die Penetration und das Spreiten des Fluids hat. Die Zunahme der Flüssigkeitsmasse führt jedoch zu längeren Penetrationszeiten. Die Autoren dieser Studien bestätigen, dass die Erhöhung der Viskosität sogar vorteilhaft sein kann, da wegen der langsameren Penetration die Farbkomponenten (Farbstoff oder Pigment) nahe der Oberfläche zurückgehalten werden [4, S.86].

Oberflächenspannung

Ein freier Wassertropfen, ohne den Einfluss von Gravitation, aerodynamischen und elektrostatischen Kräften [53, S.30], nimmt die Form einer Kugel an, weil die Kugel, von allen Körpern das geringste Verhältnis von Oberflächen zu Volumen besitzt [105, S.92]. Dieses Phänomen ist als Oberflächenspannung bekannt und beschreibt die natürliche Tendenz eines Körpers, hier als Flüssigkeit definiert, eine Form anzunehmen, um den Energieeinsatz zu minimieren, da eine Formveränderung die Anwendung von Arbeit ($\tau = A \cdot d$) erfordert. Die Messung der Oberflächenspannung ist durch die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit und des äußeren Mediums (z.B.: ein gasförmiges Medium wie Luft) gegeben. Die Wechselwirkung zwischen zwei Phasen wird in Abschnitt 3.2.2 (Grenzflächenenergie) erläutert. Abb. 3.19 zeigt die Kraftvektoren, die im Inneren der Moleküle wirken, wobei die Wirkungsrichtung parallel zur Flüssigkeit ist.

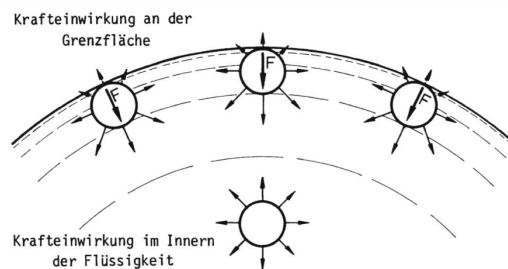


Abb. 3.19: Illustratives Modell der Oberflächenspannung [49, S.338]

Diese Kraft (F), proportional zur Länge der Oberfläche, ist die mechanische Erklärung dieses Phänomens und hat die SI-Einheit N/m . Eine andere Erklärung ist thermodynamisch, wonach die Oberflächenspannung als Energie pro Fläche (J/m^2) gegeben und Oberflächenenergie genannt ist [56, S.52].

Oberflächenspannung ist beim Inkjet Druckverfahren in der Ausstoß- und Flugphase des Tintentröpfchens von grundlegender Bedeutung. Sowohl die Benetzung als auch der Mangel daran ist das Ergebnis eines «Wettbewerbs» zwischen Energien. Je höher die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit oder je niedriger z.B. die Grenzflächenenergie des Substrats ist, desto geringer ist die Benetzung.

Eine Herausforderung für Tintenentwickler besteht darin, eine Tinte mit geringer Haftung auf den verschiedenen Oberflächen der Patrone (Reservoir, Düse) herzustellen, damit die Tinte mit einer ausreichenden Geschwindigkeit ausgestoßen werden kann. Eine geringe Adhäsion¹¹ zwischen der Tinte und der Patronenoberflächen ist durch eine hohe Oberflächenspannung, wie z.B. von Wasser (72 mN/m) gegeben. Eine derart hohe Oberflächenspannung hingegen beeinträchtigt die Benetzung der zu bedruckenden Oberfläche. Ein gängiges Verfahren zur Reduzierung der Oberflächenspannung und der daraus resultierenden erhöhten Benetzung ist die Zugabe von Tensiden zur Tinte.

Es gibt zwei Widerstandskräfte gegen die Kontraktion der Flüssigkeit durch die Oberflächenspannung. Die eine Kraft ist die Massenträgheit, die eine Änderung des Körpermoments ist und mit der Dichte der Flüssigkeit und der angewandten Kraft für die Zustandsänderung zusammenhängt. Die zweite Art Kraft ist der Fließwiderstand, die viskositätsabhängige Kraft (S.26), die vor der Anziehung der Moleküle in der Flüssigkeit abhängig ist [56, S.24]. Oberflächenspannung, Trägheit und Viskosität sind zusammenhängende Größen.

Die Trägheit im Zusammenhang mit Absorption wird in der Fachliteratur relativ wenig thematisiert und vielfach als vernachlässigbar betrachtet. In der Gleichung von Lucas und Washburn (S. 47) sind Porosität (S. 31) und Absorption (S. 46) direkt proportionale Größen, d.h. je größer die Pore, desto schneller wird sie von einer Flüssigkeit gefüllt. Schoelkopf et al. [125] stellen fest, dass, nach dem Kontakt einer Flüssigkeit mit einer porösen Oberfläche, zunächst die dünneren Poren Flüssigkeit absorbieren, weil die Absorption in den größeren Poren eine Trägheitsverzögerung erfährt.

Zwei signifikante, dimensionslose Kennzahlen der Ähnlichkeitstheorie berücksichtigen die Fließ- bzw. Trägheitseigenschaften der Fluide: Die Reynolds- bzw. Weberzahl. Mithilfe derer wird versucht, ein Prozessfenster für Inkjetfähige Tinten einzugrenzen.

¹¹Anziehung zwischen Materialien unterschiedlicher physikalischer und chemischer Zusammensetzung

Dimensionslose Kennzahlen

Die Tinte muss Anforderungen verschiedener Materialien und Prozesse, wie z.B. das Ausstoßen aus der Druckpatrone durch sehr feine Düsen, die Bildung vollständiger Tröpfchen und die ausreichende Benetzung der zu bedruckenden Oberfläche, erfüllen. Da es sich daher um eine mehrdimensionale Aufgabe handelte, wurden die verschiedenen Parameter Viskosität, Oberflächenspannung, Trägheit u.a. in dimensionslosen Gruppen oder Gleichungen kombiniert. Diese Kennzahlen eignen sich auch zur Bestimmung von Prozessfenstern für den Tintenausstoß, helfen aber auch, die Art und Weise, wie ein Tröpfchen mit dem Substrat interagiert (Stoßbedingungen, [56, S.114]), sowie die Erstellung von Satellitentröpfchen oder Tröpfchenbildungsfehler zu beschreiben.

Die drei Hauptkennzahlen sind: Reynolds, Weber und Ohnesorge, die in der Tab. (3.8) dargestellt sind. Sie stellen das Verhältnis zwischen Flüssigkeitseigenschaften wie Viskosität, Oberflächenspannung, Trägheit und Dichte her. Oberflächenspannung

Tab. 3.8: Reynolds-, Weber- und Ohnesorge-Kennzahl [56, S.143]

Reynolds	Weber	Ohnesorge
$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$	$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma}$	$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma \rho d}}$
Verhältnis zwischen Trägheit und viskosen Kräfte	Verhältnis zwischen Trägheit und Oberflächenspannung	Verhältnis von viskosen Kräften zu Trägheit und Oberflächenkräften, unabhängig von der Aufprallgeschwindigkeit

Die Ohnesorge-Zahl kann als $\frac{\sqrt{We}}{Re}$ dargestellt werden und der Kehrwert dieser Zahl, *Z – Zahl* genannt, wird zur Bestimmung der Druckbarkeit verwendet. Morrin und Smith zitieren mehrere Studien über die *Z-Zahl* und berichten über Werten von $4 < Z < 14$ bis $23 < Z < 91$. Die Autoren schließen aus, dass wegen unterschiedlichen Ergebnissen nur allgemeine Aussagen über die *Z – Zahl* gemacht werden können. Sie geben an, dass bei niedrigen *Z*-Werten die Viskosität für die Druckbarkeit der Tinte maßgebend ist. [108, S.23-24].

Die Ohnesorge-Zahl wird üblicherweise zur Beschreibung des Inkjets verwendet, da sie unabhängig von der Tröpfchengeschwindigkeit ist und daher zum Vergleich von Drucksystemen unterschiedlicher Geschwindigkeiten verwendet werden kann [108, S.85]. Referenzwerte in der Fachliteratur für die Kennzahlen sind $0,1 < Oh < 1$ [56, S.90], $Re = 2,5 - 2000$ (laminare Strömung) und $We = 2,7 - 1000$ für ($\varnothing \approx 100 \mu m$) [98, S.62]. Weniger relevant ist hier die Bond-Zahl (Verhältnis zwischen Gravitations- und Oberflächenspannung). Sie hat bei einem Prozessfenster für DOD Inkjet Tinten keine Bedeutung. [138, S.1691].

Die Abb. 3.20 zeigt ein Diagramm, in dem die Ohnesorge- und Reynoldszahlen die Y-

bzw. X-Achse darstellen. Der gelbe Bereich in der Mitte des Diagramms grenzt das mögliche Prozessfenster für den Tintenausstoß ein.

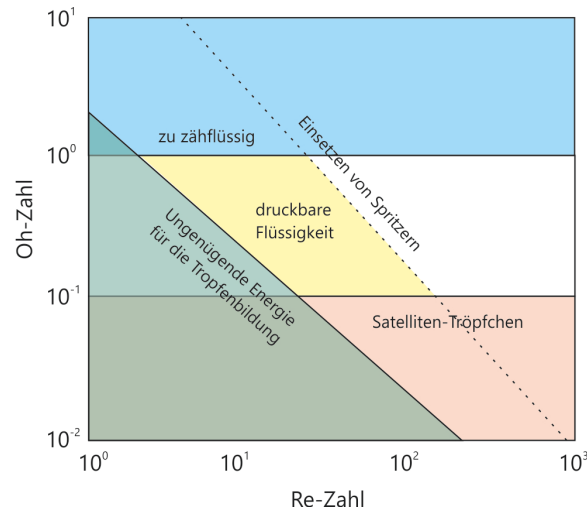


Abb. 3.20: Schematische Darstellung des DOD-Inkjet Betriebsregimes anhand von Oh- und Re-Zahl [56, S.26]

Magdassi zitiert Studien über den Einfluss von Re- und We-Zahl auf den Punktzuwachs. Die Zunahme von Re und We – und einhergehend dazu die Reduzierung des Kontaktwinkels (S.37) – erhöhte $\approx 1,5 - 3$ mal den Punktzuwachs [98, S.132]. Tan erkennt, dass eine Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit¹² des Tröpfchens den Punktradius vergrößert und das Eindringen der Tinte in die Papieroberfläche verringert [138, S.1702].

Weitere Kenngrößen

Neben der Viskosität, der Oberflächenspannung und der Trägheit gibt es weitere empirisch untersuchte Aspekte der Inkjet-Tinten mit Einflüssen auf Druckqualität und die Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten. Diese Aspekte waren in der untersuchten Fachliteratur wenig präsent, sollen hier aber kurz erwähnt werden.

Die Dichte ρ wird durch Masse pro Volumeneinheit definiert [kg/m^3]. Diese Größe hängt mit der Art und dem Volumen der Moleküle zusammen, aus denen ein Material besteht, und wird von Temperatur und Druck beeinflusst [53, S.15]. In den Dutzenden von Artikeln, die für diese Arbeit als Grundlage herangezogen wurden, spielt die Dichte eine eher informative als analytische Rolle und wird nicht als relevanter Faktor gesehen, der die erarbeiteten Ergebnisse beeinflusst.

Im Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung von Inkjet Tinten untersuchten Soleimani-Gorgani und Jalili die Wirkung von Alkohol und Feuchthaltemittel in den Tinten sowie die Morphologie der Inkjet-Papiere auf die optische Dichte und Wasserechtheit. Die Tests zeigten, dass, obwohl die chemische Wechselwirkung zwischen Tinte und Substrat von der Oberflächenspannung und der Porosität stark bestimmt wird, die chemische Zusammensetzung weniger Einfluss auf die untersuchten Quali-

¹²Aufprallgeschwindigkeit < 10 m/s

tätsmerkmale zu haben scheint als die Oberflächenmorphologie [132, S.302]. Kettle et al. finden allerdings heraus, dass die Haftung von Tinten und Substraten mit den chemischen Gruppen von beiden zusammenhängt [70, S.2109]. Die Haftung der Tinte, hauptsächlich aus Farbstoffen, wird durch die Wechselwirkung zwischen anionischen und kationischen Gruppen sowie die Hydrophobie bzw. Hydrophilie des Substrats bestimmt.

Bezüglich der Variationen im Farbvolumen zeigt Tan, dass die Absorption umso schneller erfolgt, je größer der Tropfen ist, da die Kontaktfläche zwischen der Flüssigkeit und der Oberfläche mit der Tropfengröße einher geht [138, S.1670]. Marmur entwickelte ein mathematisches Modell, das nahelegt, dass die Penetrationsrate mit der Größe des Tintentropfens zunimmt [99, 301]. Krainer et al. analysieren die Verwendung von Labormethoden zur Vorhersage der Penetration und des Spreitens von Flüssigkeit. Sie stellen durch experimentelle Daten mit Volumina von 30, 60 pl und von 2 und 4 μl fest, dass für Papiere mit geringer Absorption das Tropfenvolumen nicht relevant ist [77, S.135]

3.2.2. Kenngrößen von Substraten

Porosität, Permeabilität und Tortuosität

Porosität, Permeabilität und Tortuosität sind strukturelle Eigenschaften von Substraten. Es sind drei miteinander verbundene Größen, die zusammen mit der Rauheit die Morphologie eines porösen Materials beschreiben. Deshalb werden sie gemeinsam diskutiert.¹³

Poren sind die leeren Räume in porösem Material. Die Porosität (Φ)¹⁴ ist ein physikalischer Parameter, der das Verhältnis zwischen dem porösen Volumen V_p und dem Gesamtvolumen V_t dieses Materials angibt (Gleichung 3.1), wobei das Gesamtvolumen des Materials die Summe aus dem porösen Volumen und dem festen Teil ist. Die Porosität kann als relative oder absolute Größe angegeben werden. Die absolute Porosität beschreibt das Gesamtvolumen der Poren, auch wenn diese Poren nicht miteinander verbunden sind. Die relative Porosität beschreibt nur die miteinander verbundenen Poren, d.h., die isolierten, nicht zugänglichen Poren bleiben unberücksichtigt. Abb. 3.21 zeigt eine 3D-Simulation von Papierfasern mit einer Porosität von 0,83 [1, S.686] und die Abb. 3.22 zeigt symbolisch Porositätsvariationen wie geschlossene Poren, stark anisotrope, unidirektionale Kapillare mit oder ohne Tortuosität sowie Kombinationen der genannten Möglichkeiten.

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (3.1)$$

¹³Porosität ist ein Bestandteil der Theorien und Berechnungen, die die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeiten und porösen Oberflächen modellieren, jedoch ist sie nicht Gegenstand im experimentellen Teil dieser Arbeit. Die zugehörigen Erklärungen dafür werden hauptsächlich in diesem Kapitel behandelt. Dieser Begriff wird hier, für das Verständnis des Unterabschnitts 3.2.3, vorgestellt.

¹⁴ ϵ ist auch in der Fachliteratur zu finden.

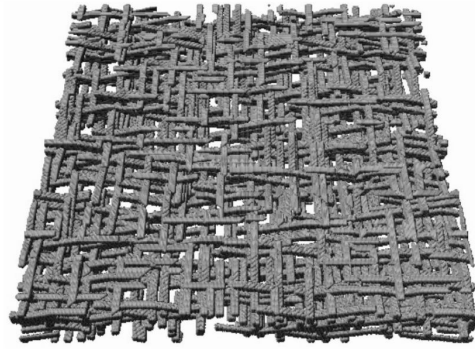


Abb. 3.21: 3D-Simulation von Papierfasern [1, S.686]

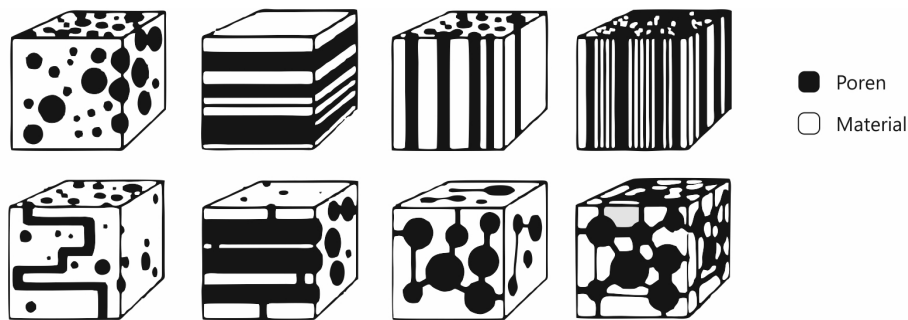


Abb. 3.22: Illustrative Modelle der Porosität [125, S.47]

Permeabilität ist die Fähigkeit eines Materials, eine Flüssigkeit oder ein Gas durch miteinander verbundenen Poren durchzulassen. Die Permeabilität ist bei der Untersuchung von Böden und Gesteinen von großer Bedeutung. Henry Darcy formulierte einen gesetzmäßigen Zusammenhang, der ursprünglich zur Erklärung der Wasserbewegung in sandigem Boden verwendet wurde und die Permeabilität quantifiziert [9, S.119]. Diese Grundgleichung gilt als Ausgangspunkt für Berechnungen der Permeabilität eines Kapillarrohrs [12, S.284]. Sie ist anwendbar bei den laminaren Strömungen mit $1 > Re < 10$ [9, S.126], [7, S.21] und bei homogener Flüssigkeit. Die porösen Medien sollen homogen, isotrop, ohne Tortuosität sein und keine Verbindung zwischen Poren aufweisen.

In Gleichung 3.2 ist Q der Volumendurchfluss durch das Medium, A die Fläche des Mediums, v die Durchflussrate der Flüssigkeit durch das Medium und K der Darcy-Koeffizient. ΔP ist der Druckunterschied, der unter dem Medium entsteht, L die Länge und η die Viskosität der Flüssigkeit. Der Term rechts findet sich ebenfalls mit negativem Vorzeichen, da die Strömung in Richtung des abnehmenden Mitteldrucks (ΔP) verlaufen kann. Eine Erweiterung der Gleichung, falls erforderlich, ist die Ergänzung des Terms relativ zur Schwerkraft (ρg), z.B. bei der Modellierung von Strömungen mit Quellung muss die Flüssigkeit gegen die Schwerkraft aufsteigen [103, S.61]. Nach dem Darcy'schen Gesetz ist die Geschwindigkeit eines Fluids im porösen Medium proportional zur Permeabilität und zum Druckgradienten und umgekehrt proportional zur Viskosität des Fluids. Die Gleichung 3.2 wird sowohl als Funktion von Q als auch als Funktion von v angegeben.

$$\frac{Q}{A} = v = \frac{K \cdot \Delta P}{\eta \cdot L} \quad (3.2)$$

Der Darcy-Koeffizient K , auch hydraulische Leitfähigkeit genannt, wird empirisch je nach Medium berechnet und ist die absolute Permeabilität der festen Phase [113, S.53]. Erweiterungen der Darcy-Grundgleichung verwenden die relative Permeabilität, die durch das Verhältnis der effektiven Permeabilität zur absoluten Permeabilität gegeben ist. Während die absolute Permeabilität eine intrinsische Eigenschaft des Materials ist, ist die effektive Permeabilität gegeben, wenn das Medium im Kontakt mit der Flüssigkeit ist und von dieser beeinflusst wird. Schwankungen der Temperatur und Konzentration der Flüssigkeit beeinflussen η und ρ und somit K . Die Modifizierung der porosimetrischen Matrix durch z.B. Quellung reduziert der Koeffizient K auf Zeit [9, S.135]. Je größer der Druckunterschied, desto höher die Durchflussrate, die je nach den Eigenschaften des Materials, definiert durch K , variiert. Die Verwendung von Darcys Permeabilitätsmodell wird in der Arbeiten von Desie et al. [27, S.776] [28, S.212] und Yip et al. [149] in Bezug auf das Inkjet-Verfahren untersucht.

Masoodi und Pillai schlagen einen neuen Ansatz für Darcy vor, unter Einbeziehung der Dochtwirkung bzw. Quellung (Engl. *Wicking*) einschließlich des Terms ‚Senke‘ (Engl. *sink term*), der sich auf die Absorption von Flüssigkeiten durch trockene Partikel bezieht, und des Terms ‚Quelle‘ (Engl. *source term*), der sich auf die Änderungsrate der Porosität oder den Effekt der Quellung bezieht. In diesem Modell wird die Absorption als linear proportional zur Änderungsrate des Festkörpervolumenanteils angegeben. Die Porosität und Permeabilität werden als gleichwertig im gesamten Medium betrachtet, sie ändern sich mit der Zeit und der Einfluss der Schwerkraft wird vernachlässigt [102, S.2257]. Bei der Dochtwirkung kommt es zu einer spontanen Form der Kapillarkraft. Diese entsteht durch die gegenseitige Anziehung der Moleküle im flüssigen Medium und die Adhäsion von flüssigen Molekülen an denen im festen Medium [102, S.2257].

In verschiedenen Modellen, die Permeabilität oder Porosität erklären, werden Poren als gerade Linien verstanden. Schoelkopf erklärt, dass Tortuosität das Ausmaß der Abweichung von dem geraden Weg ist. [125, S.48]. Bei Analyse der Fasern eines Bogen Papiers ist eine krumme Geometrie deutlich zu beobachten. Obwohl die Tortuosität mehrere Berechnungen und Modelle der Absorption von Flüssigkeiten, einschließlich der Bewertung des Kontaktwinkels innerhalb einer Pore, in Frage stellt, ist dieses Thema experimentell unterrepräsentiert, möglicherweise aufgrund der Schwierigkeit, es messtechnisch zu erfassen. Die von Carman¹⁵ später modifizierte Kozeny-Gleichung¹⁶ fügt die Tortuosität in die Berechnung von K (Darcy) ein. In der Analyse von Daniel und Berg [23, S.450] über die Arbeit von Clarke et al. [22] wird vorgeschlagen, dass bei Untersuchungen der Flüssigkeitspenetration auf porösen Substraten, das Eindringen nicht auf die Probendicke beschränkt sein soll. Sie stellen fest, dass diese Methode

¹⁵Carman, P.C., Fluid flow through granular beds: Transactions IChemE, Vol. 15, S. S32-S44, 1937

¹⁶Kozeny, J., Über kapillare Leitung des Wassers im Boden: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Vol. 136, S. 271-306, 1927

auf stark verbundene und sehr gewundene Porennetze (hohe Tortuosität) zugreift, bei denen die effektive Porenlänge viel länger als die Probendicke ist. Lundberg et al. zeigen, dass Papiere mit ähnlicher Porosität unterschiedliche Penetrationszeit von Flüssigkeiten aufwiesen und vermuten, dass dies auf unterschiedliche Tortuositäten zurückzuführen ist [97, S.150]. Zur Messung der Tortuosität τ gilt die Gleichung $\tau = \frac{L}{E}$, bei der L die effektive Länge einer Pore und E die Schichtdicke ist [12, S.285].

Yasumura erklärt, dass Papier Poren unterschiedlicher Größe, Herkunft und Form hat. Die Poren werden durch die Zwischenräume zwischen den Fasern und sogar zwischen Molekularschlitzen gebildet [146, S.74]. Aslannejad stellt fest, dass Fasern eine Mikroporosität haben, und schlägt einen Ansatz vor, der sowohl die Porosität von Fasern als auch von Zwischenfasern misst [5, S.153]. Diese Aussage wird auch von Borch unterstützt. Er klassifiziert Poren in: „*pore spaces that originally occurred in papermaking fiber or converting materials such as fillers and coating materials*“ und „*pore spaces made by the papermaking or converting process e.g. interfiber gaps, toroidal voids around fiber-fiber bonds or fiber-filler contacts, and pores in coating*“. Dieses Konzept lässt sich für Pigmentstriche ableiten, weil Mineralien eine intrinsische Porosität haben, und die Bereiche zwischen den Mineralpartikeln ebenfalls Poren sind.

Der Zusammenhang zwischen Porosität und Absorption ist nachvollziehbar. Abb. 3.23 zeigt den Unterschied zwischen der Absorption eines Tröpfchens wasserbasierter Inkjet-Tinte auf Farbstoffbasis und auf Pigmentbasis. Während die farbstoffbasierte Tinte vollständig vom Substrat absorbiert wird (links), verbleibt die Pigmenttinte partiell auf der Oberfläche (rechts), da die Pigmentgröße die Porengröße übersteigt.

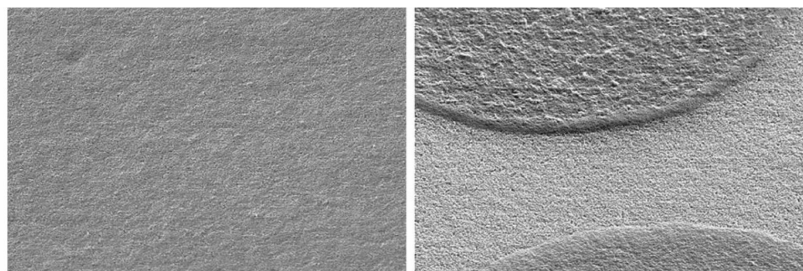


Abb. 3.23: Tröpfchen Inkjet-Tinten | Farbstoffbasis (links) | Pigmentbasis (rechts) [66, S.146]

Svanholm gibt an, dass Poren im Siliciumdioxid, ein Mineral, das üblicherweise für die Beschichtung von Inkjet-Druckpapier verwendet wird, etwa 15,4 nm betragen, während Pigmente etwa 100 nm groß sind. In seinem Beitrag analysiert er Beschichtungen mit verschiedenen Arten von Siliciumdioxid und Anteilen von PVOH als Bindemittel (Abb. 3.24) und stellt fest, dass nicht nur die Art des Siliciumdioxids, sondern auch das Volumen des PVOH die Absorption der Inkjet-Tinten beeinflusst [136, S.225]. Mineralien mit größeren Poren würden mehr Bindemittel benötigen als solche mit kleineren Poren. Dies führt zu einem geringeren, leeren Innenvolumen, geringerer Lösungsmittelaufnahme und reduziertem Farbraum [136, S.221]. Aslannejad bestätigt, dass eine Erhöhung des Bindemittelvolumens die Konnektivität der Poren in der Beschichtung verändert [5,

S.147]. Zhang zeigt, dass Beschichtungen mit PVOH eine niedrigere spezifische Oberfläche und ein geringeres Porenvolumen erzeugen als Beschichtungen mit VAE (Vinylacetat-Ethylen) [153, S.1469].

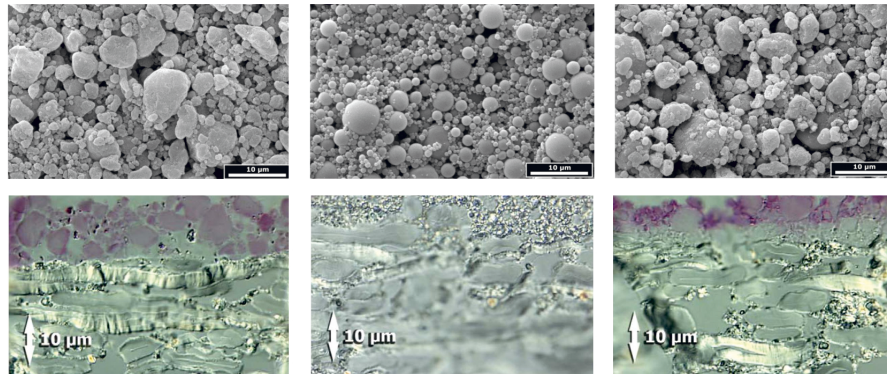


Abb. 3.24: SEM Aufnahme der Beschichtungen (oben) | Querschnitt-Mikrofotografien mit Tintenschicht [136, S.224]

Lamminmäki, Autorin mit umfangreicher Forschung über die Verwendung von PVOH in Beschichtungen, stellt in ihrer Dissertation fest:

„The more highly porous and permeable surfaces made from the speciality pigments absorbed the ink quicker. As the binder amount in the coating layer increased from 7 pph to 12 pph the absorption time became longer. The high binder polymer amount decreases the porosity of the structure, and the PVOH can move into the intra-particle pores, as we have seen in the previous pore analysis studies. However, interestingly, the further increase of binder amount (30 pph) did not change the absorption time any more. In the case of PVOH containing coating, the inkjet ink diffusion into the binder polymer causes the swelling of polymer and this diffusion compensates for the structural impact on penetration rate, keeping the rate on the same level (600 ms) as it was in the 12 pph PVOH containing coating.“ [88, S.92]

Das heißt, die Porosität kann sich in Abhängigkeit von der aufgenommenen Flüssigkeit ändern.

Die traditionell verwendete und am weitesten verbreitete Methode zur Messung der Porosität ist die Quecksilberporosimetrie. Im Vakuum wird die Probe der nicht benetzbaren Flüssigkeit bei zunehmendem Druck ausgesetzt. Wegen der höheren Oberflächenspannung des Quecksilbers ist es möglich, eine Funktion zwischen externem Druck und Porengröße zu ermitteln. Je höher der erforderliche Druck, desto schmaler sind die Poren, weil der Kapillardruck umgekehrt proportional zum Kapillarradius ist (vgl. S.47 - Laplace). Yamasura stellt fest, dass nicht nur dies, sondern andere traditionelle Methoden unzureichende Informationen liefern. Sehr große Poren sind nicht zu finden und die Position sowie auch die Verbindungen zwischen Poren können nicht definiert werden. Darüber hinaus kann das Ergebnis aufgrund der vorhandenen unsichtbaren Füllstoffe und Verunreinigungen in Faserschichten falsch interpretiert werden [146, S.202]. Martic

schlägt vor, dass die Geschwindigkeit der Penetration zur Berechnung der Porengröße verwendet werden kann [101, S.213]. Dies erscheint wegen seiner Einfachheit als ein interessanter Ansatz für eine erste Näherung zur Ermittlung der Porengröße. Allerdings ist stets zu beachten, dass eine solch einfacher Ansatz die Komplexität der hier dargestellten Faktoren unberücksichtigt lässt.

Gane erklärt, dass bei der Quecksilberporosimetrie die Verteilung der Poren manchmal willkürlich ist, weil die Methode voraussagt, dass für einen bestimmten Druck eine entsprechende Porengröße gilt. Allerdings können sowohl die Geometrie als auch die Porenstruktur die Ergebnisse stark beeinflussen. Es wird betont, dass Beschichtungen eine andere Größenordnung der Porosität zeigen als unbeschichtetes Papier. Obwohl ihre Porengrößenverteilung ähnlich ist, sind die Poren bei unbeschichteten Papieren breiter als bei beschichteten [45, S.390].¹⁷

Bei mehreren anderen Methoden, angeführt durch Bear (*Gravimetry, Washburn Bunting porosimeter, gas expansion method and absorption of radioactive particles by a liquid*) [9, S.47-49] und durch Borch (*Capillary Pressure Method, Quantitative Stereology Method, Gas or Vapor Sorption Method*) [12, S.272-276], wird davon ausgegangen, dass die Probe homogen ist. Homogen vereinfacht hier das Papier nicht zu einem monolithischen Material, da selbst einfache Papiere Zellstoff und Füllstoffe enthalten. Bei heterogenen Proben, d.h. mit verschiedenen Schichten, ist es zwar möglich, die Messergebnisse je nach Schicht abzuleiten, doch bleibt dies ein fragwürdiger und nicht reproduzierbares Unterfangen. Aus akademischer Sicht wäre es hilfreich, wenn die Pigmentschicht nachträglich vom Karton getrennt werden könnte, was operativ jedoch kaum möglich ist.

Holik gibt neben dem Kontaktwinkel und der Grenzflächenenergie auch den Cobb-Test zur Messung der Penetration und Sorption an. Diese Methode kann für die Messung der Substratstabilität relevant sein, allerdings, aufgrund des verwendeten Wasservolumens (250 ml) und der Testdauer (60 s.)¹⁸ korrespondiert diese Analyse nicht mit dem Verhältnis zwischen Wasser und Substrat beim Inkjet-Druckverfahren.

Borch erklärt:

„Pore size or pore size distribution would be a very desirable quantity for characterizing pore structure if it could be ascertained with precision. Unfortunately, there is no acceptable experimental method for obtaining a geometrically defined quantity describing the size of an irregularly shaped pore. In spite of this uncertainty, the term pore radius or pore diameter as an expression of pore size is widely used in paper science, with the tacit understanding of the difference from the actual features of pores.“ [12, S.268]

¹⁷Bemerkung: Ein Teil der Arbeit von Gane basiert auf der Anwendung des Pore-Cor-Systems, einem Softwareprogramm der *Fluid Interactions Group, University of Plymouth UK*, das poröse Medien simuliert.

¹⁸ISO 535

Obwohl die Ermittlung der Porosität komplex und fraglich ist, ist sie ein Bestandteil mehrerer Forschungen auf dem Gebiet der hier vorliegenden Arbeit. Einige in der Fachliteratur vorhandene Referenzwerte sind:

Oberfläche	Poren \varnothing	Porosität	Quelle
Kalandrierte Beschichtungen	0,03 - 1,00 μm		[89, S.3]
Inkjet-Papier		0,5 - 25 cm^3/s	[27, S.777 Abb. 6]
Ungestrichene Papiere	3,9 μm	40,3 %	[78, S.31711]
Niedriges Beschichtungsvolumen ($4\text{g}/\text{m}^2$)	3,2 μm	23 %	[78, S.31711]
Mikroporöse Inkjet-Papiere	15 a 150 μm		[28, S.211]
Beschichtungsschicht (Karton)	180 nm	34 %	[5, S.147]
Rohpapier	12 μm	50 %	[5, S.147]
CC	47,65 nm	27,16 %	[45, S.402]
CC + CMC + 5 pph Latex	68,02 nm	30,32 %	[45, S.402]
CC + CMC + 10 pph Latex	59,75 nm	19,82 %	[45, S.402]
CC + CMC + 15 pph Latex	27,40 nm	9,77 %	[45, S.402]
Beschichtungsschicht (Karton mit GCC)	0,05 - 0,10 μm		[117]
Beschichtungsschicht (Karton mit PCC)	0,10 - 0,25 μm		[117]

Es sind mehrere Gleichungen in der Fachliteratur vorhanden, die Porosität und Permeabilität auf der Grundlage empirischer Studien in Beziehung setzen [103, S.81] [102, S.22621]. Einige Formeln enthalten sogar Terme, um die Werte der Porosität oder Permeabilität je nach Material zu definieren, d.h. eine Materialkonstante, die im Rahmen eines empirischen Modells noch empirisch ermittelt werden muss. Porosität und Permeabilität stehen jedoch möglicherweise in schwachem Zusammenhang.

Angesichts der offenen und teilweise von Hilflosigkeit geprägten wissenschaftlichen Diskussion und mangels fehlender valider Modelle werden die Permeabilitätsmessungen hier in Würdigung aller Einwände nach den standardisierten Luftstrom- Laborverfahren nach Bendtsen, Bekk und Parker Print-Surf durchgeführt. Gerät und Messdaten werden in Unterabschnitt 5.3.1 vorgestellt. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass allein aus dem Wert der Permeabilität nichts Konkretes über die Porosität abgeleitet werden kann.

Grenzflächenenergie

In Unterabschnitt 3.2.1 (S. 27) wurde die Oberflächenspannung besprochen, die durch die Auswirkung von Kohäsionskraft entsteht, d.h. in homogener Umgebung. Die Bildung einer Grenzfläche bzw. Phasengrenzfläche findet z.B. zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper statt und ist durch Wechselwirkung von Adhäsionskräften gegeben, d.h. in heterogener Umgebung. Wenn ein Flüssigkeitstropfen auf eine Oberfläche gesetzt wird, kann er unverändert bleiben, sich wenig oder vollständig ausbreiten. Im ersten Fall kann die Flüssigkeit die Oberfläche nicht benetzen, im zweiten und dritten Fall kann sie es. Die Bedingung für die Haftung einer Flüssigkeit an der Oberfläche ist, dass zunächst eine Benetzung erfolgt. Die Erklärung dieses Phänomens liegt u.a. auf der molekularen

Ebene. Moleküle können nach ihrer chemischen Zusammensetzung polar¹⁹ oder dispers²⁰ sein. Zwischen geladenen und ungeladenen Atomen bzw. Molekülen können verschiedene Interaktionen wie Van-der-Waals- und Coulomb-Wechselwirkungen bestehen. Die Stärke der Haftung hängt von der Übereinstimmung der dispersen (σ_{1d} und σ_{2d}) und polaren Anteile σ_{1p} und σ_{2p} beider Phasen (1 und 2) ab. In der Abb. 3.25 (links) ist eine schematische Darstellung einer idealen Übereinstimmung von polaren und dispersen Anteilen (hohe Haftung). Rechts ist die Haftung niedrig, da die Übereinstimmung kleiner ist.

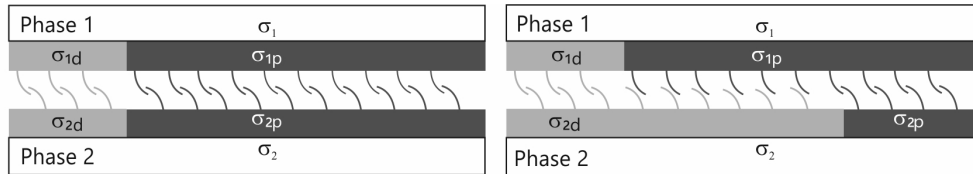


Abb. 3.25: Wechselwirkungen zwischen polaren und dispersen Anteilen von zwei Phasen [25]

Abb. 3.26 zeigt einen Flüssigkeitstropfen auf einer Oberfläche. In diesem Moment wirken σ_L , σ_S und σ_{SL} , wobei L für Flüssigkeit (Engl.: *liquid*), S für Feststoff (Engl.: *solid*) und V für Luft (Engl.: *vapor*) steht und θ_e der Randwinkel, gebildet von Vektor σ_{SL} und Vektor σ_L , der den Tropfen von der Basis aus tangiert. Die Dupré'sche Gleichung während der Benetzung ist gegeben durch die Differenz zu dem Zustand vor der Benetzung und dem Zustand nach der Benetzung (Gleichung 3.3) [67].

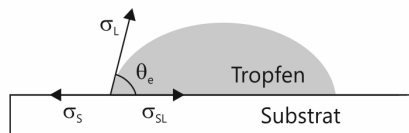


Abb. 3.26: 3 Phasenkontakt eines Tropfens auf einer Oberfläche

$$\omega_{SL} = \sigma_{S(V)} + \sigma_{L(V)} - \sigma_{SL} \quad (3.3)$$

Wenn der Tropfen an dem 3-Phasenkontakt im Kraftgleichgewicht ist, gilt die Young'sche Gleichung (Gleichung 3.4). Die algebraische Kombination von 3.3 und 3.4 ist die Young-Dupré-Gleichung, auch genannt Adhäsionsarbeit ω (Gleichung 3.5).

$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L \cos \theta_e \quad (3.4)$$

$$\omega_{SL} = \sigma_L(1 + \cos \theta_e) \quad (3.5)$$

¹⁹Moleküle mit positiven und negativen Ladungen, z.B. H_2O [67]

²⁰Moleküle mit Atomen ähnlicher oder gleicher Elektronegativität haben ausschließlich disperse Anteile, z.B. CH_4 [67]

Zur Bestimmung der Grenzflächenenergie eines Feststoffs dient die Erweiterung von OWRK²¹ (Gleichung 3.6), die durch die Kombination von dispersen d und polaren p σ -Anteilen kalkuliert wird, wobei die unbestimmbaren Terme der Dupré'sche Gleichung dort entfernt sind. Durch die Umsetzung der Terme in die Young'sche Gleichung ist die Bestimmung der fehlenden polaren m und dispersen c Anteile des Festkörpers - durch die Geradengleichung $y = mx + c$ kalkulierbar. y und x bestehen aus bekannten Größen: gemessenen Kontaktwinkel, die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung einer Testflüssigkeit (Gleichung 3.7). Bekannte Werte sind σ_L^d , σ_L^p und σ_L^{Total} und die unbekanntenen Werte σ_S^d , σ_S^p und σ_S^{Total} [67]. Die Genauigkeit dieser Methode steigt mit der Anzahl der Testflüssigkeiten. Die Bestimmung der Regressionsgeraden ist schon mit zwei Flüssigkeiten möglich, obwohl die Genauigkeit nicht kalkulierbar ist. Um eine valide Regressionsgerade zu ermitteln, werden mindestens drei Testflüssigkeiten empfohlen, wobei eine hochpolare (z.B. Wasser) und eine andere hochdisperse Testflüssigkeit (z.B. Diiodmethan) erforderlich sind. Die Abb. 3.27 veranschaulicht die Ermittlung der Regressionsgerade mit den gemessenen und zu bestimmenden Termen.

$$\sigma_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - 2\sqrt{\sigma_S^d \sigma_L^d} - 2\sqrt{\sigma_S^p \sigma_L^p} \quad (3.6)$$

$$\frac{\sigma_L(1 + \cos \theta_e)}{2\sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^p} \sqrt{\frac{\sigma_L^p}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d} \quad (3.7)$$

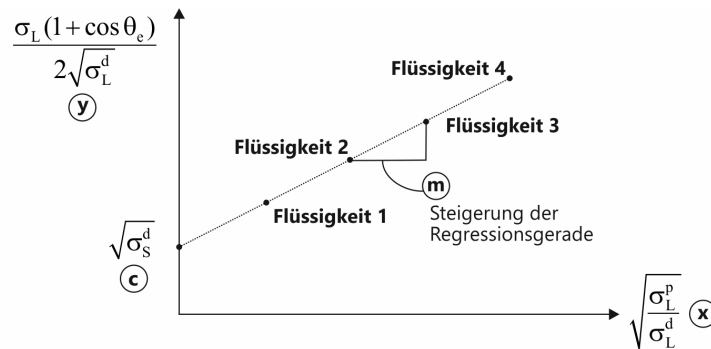


Abb. 3.27: Regressionsgerade zur Bestimmung der Grenzflächenenergie eines Festkörpers [67]

Neben der Bestimmung der Grenzflächenenergie liefert der Flüssigkeitstropfen auf der Oberfläche (Abb. 3.26) auch Informationen über den Kontaktwinkel bzw. Randwinkel θ_e , ein Maß der Benetzung wie bereits erläutert. Je stärker die Benetzung, desto größer die Ausbreitung der Tinte und theoretisch gilt: Je größer die seitliche Ausbreitung der Tinten ist, desto größer sind die Druckpunkte, desto geringer ist die optische Dichte und desto höher ist die Verdunstung der flüchtigen Bestandteile der Tinten (Wasser und Lösungsmittel).

²¹Owens, Wendt, Rabel und Kaelble

Yang stellt fest, dass bei der Wechselwirkung zwischen Substrat und Tinten, neben der Viskosität und der Oberflächenspannung, der Kontaktwinkel ein wichtiger Parameter ist [145, S.269]. Nach Dragoljub sind die Rauheit und Grenzflächenenergie die wichtigsten Merkmale des Substrats, die einen Einfluss auf die Druckqualität haben [39, S.68]. In Gigacs Studien über die Folgen bei der Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Inkjet-Papieren stellt er fest, dass die Zugabe von Oberflächenleimung den Kontaktwinkel vergrößern kann und Substrate mit geringen dispersen Energieanteilen die Benetzung und damit die optische Dichte und den Farbraum negativ beeinflussen können [47, S.778]. In Aslannejads Arbeit über Wasserabsorption in porösen Oberflächen zeigt er, dass je kleiner der Kontaktwinkel ist, das Eindringen und der Ausbreitungsbereich umso tiefer ist [4, S.85]. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Benetzungsregime der Oberfläche in den Poren des Materials dasselbe ist. Diese Aussage wird von Marmor bestätigt, obwohl er davor warnt, dass dies nur für einheitliche (homogene) Materialien gilt [100, S.5959].

Clarke et al.²² stellten fest, dass eine Flüssigkeit mit hoher Oberflächenspannung im Imbibitionregime 2000 bis 3000 mal mehr Zeit einnimmt, um einzudringen, als eine Flüssigkeit mit niedriger Oberflächenspannung. Sie beziehen diesen Effekt nicht nur auf den Kontaktwinkelwert, sondern auch auf die morphologische Struktur des Substrats. Sie legen nahe, dass bei einem größeren Kontaktwinkel weniger Poren gefüllt werden [22, S.2982-2984].

Krainer et al. untersuchen die Auswirkungen von Modifikationen des Substrats auf die Druckqualität. Auf Basis von Experimenten stellen sie fest, dass die Auswirkung auf die Druckqualität durch die Veränderung der Tintenviskosität zwei- bis dreimal stärker ist, als durch die Veränderung der Tintenoberflächenspannung. Die Punktgröße und die Penetration werden durch die Viskosität beeinflusst. In hydrophoben Substraten verringert die hohe Oberflächenspannung von Flüssigkeiten die Punktausbreitung und das Eindringen von Flüssigkeiten, was in eine hohen Farbdichte resultiert. [78, 31710].

Mehrere Faktoren wirken auf den Kontaktwinkel und können den Messwert beeinflussen, wie z.B. Rauheit, Heterogenität, Anisotropie [147, S.255-257]. Das Thema Rauheit wird im Folgenden erörtert.

Rauheit

Trotz einer nicht zu vermeidenden Orientierung durch den maschinellen Herstellungsprozess liegen die Fasern im Papier unregelmäßig miteinander verschränkt und verfilzt vor. Das Ergebnis ist eine unregelmäßige Oberfläche. Diese Unregelmäßigkeit wird je nach Standpunkt als Glattheit (Engl.: *Smoothness*) oder Rauheit²³ (Engl.: *Roughness*) bezeichnet. Holik erklärt, dass die Oberflächenrauheit von dem Fasertyp, der Faser-

²²Untersuchungen über die Ausbreitung und Imbibition (Aufsaugen) von Flüssigkeiten in porösen Oberflächen

²³Der Begriff Rauigkeit ist veraltet und nicht mehr normgerecht.

netzwerkstruktur mit Fein- und Füllstoffen, den Mikrostreifen durch Schrumpfung und dem Kontakt mit den Sieben in der Papiermaschine zusammenhängt. Bei der Rauheit wird zwischen Mikro- und Makrorauheit unterschieden. Sie weist keine Regelmäßigkeit auf [54, S.705-706]. Beschichtete Substrate ($\approx 4 \text{ g/m}^2$) weisen in der Regel eine geringere Rauheit (78 ml/s) im Verhältnis zur Faserschicht (321 ml/s) auf [78, S. 31711]. Dieser Effekt wird durch Kalandrieren potenziert [54, S.111]. In Abb. 3.28 sind zwei mit dem Röntgentomographen erstellte Querschnitt-Abbildungen des Kartons B03 (vgl. S. 76) dargestellt. In den Faserschichten können die Fasern unterschieden werden (links). Bei dem Pigmentstrich ist ein amorpher weißer Bereich ohne Konturen sichtbar (rechts).

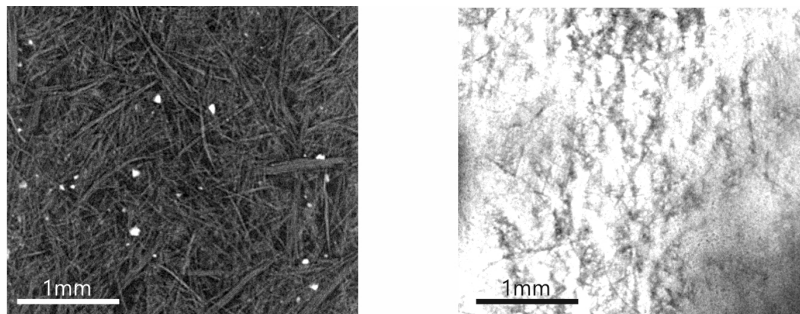


Abb. 3.28: Röntgentomographie eines Kartons | Faserschicht (links) | Beschichtung (rechts)

Ein Rauheitsscore (Mikro, Makro, Mega) wird je nach Einsatzgebiet (Geologie, Metallurgie, Papierherstellung) angegeben, jedoch gibt es für jede Oberfläche 3 Varianten, die für alle Bereiche gelten: die geometrische, die wahre und die wirksame (erreichbare) Oberfläche.

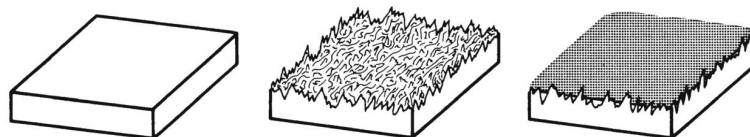


Abb. 3.29: Geometrische Oberfläche (links) | Wahre Oberfläche (mittel) | Wirksame Oberfläche (rechts) [49, S.304]

Es ist möglich, die Oberflächenmorphologie eines beschichteten Kartons in der nm-Größenordnung mithilfe eines Rasterelektronenmikroskop abzubilden (Abb. 3.30), jedoch sind Bereiche in dieser Größenordnung für z.B. Tintenpigmente nicht zugänglich. Hierin zeigt sich der Unterschied zwischen der realen und der wirksamen Oberfläche. Die Poren der beschichteten Substrate sind im Allgemeinen kleiner als die Pigmente. Die festen Bestandteile der Tinte erreichen diese Hohlräume nicht.

Die Erläuterung über Rauheitsmessmethoden und -Parameter sind im Unterabschnitt 5.3.1 vorgestellt. In diesem grundlegenden Teil werden zwei korrelierende Einflüsse der Rauheit vorgestellt: auf das Spreiten bzw. Benetzen der Tinten und auf die Druckqualität.

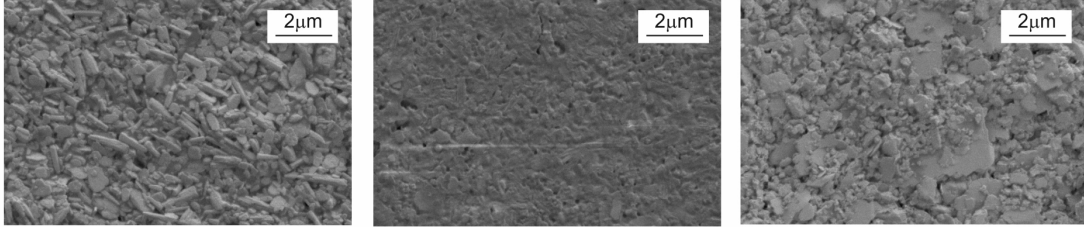


Abb. 3.30: SEM Aufnahmen von beschichteten Kartons

Der Einfluss der Rauheit \bar{r} ²⁴ auf das Spreiten der Tinten ist durch die Veränderung des Benetzungsvermögens gegeben. De Gennes, Brochard-Wyart und Quere behaupten, dass Rauheit die Benetzung erhöht oder verringert [46, S.218]. Die ersten Studien, die diese Wirkungen beschreiben, wurden von Wenzel, Cassie und Baxter erstellt. Sie schlugen Anpassungen im gemessenen Wert (idealer glatter Randwinkel θ_e) aufgrund von Rauheit vor [109, S.89]. Wenzel (1936) führt den Rauheitsfaktor \bar{r} ein, der sich als der Quotient der wahren und der geometrischen Fläche ergibt [142, S.990]. In Gleichung 3.8 ist θ_e der ideale Randwinkel nach der Young-Gleichung und θ_{Wenzel} ist der Wenzel-Winkel. Wenn $\theta_e < 90^\circ \rightarrow \theta_{Wenzel} \leq \theta_e$ und wenn $\theta_e > 90^\circ \rightarrow \theta_{Wenzel} \geq \theta_e$, obwohl diese Aussage nur für geringfügig raue Oberflächen gilt ($1 < \bar{r} \approx 2$)²⁵ [67]. Die Grundidee dieses Modells ist, dass eine wahre Oberfläche mit $\bar{r} > 1$ größer als die Projektion der Oberfläche ist. In einer späteren Veröffentlichung (1949) macht Wenzel eine wichtige Bemerkung zu diesem Korrekturfaktor: „*It is important to recognize, however, that the roughness that modifies wetting characteristics is a ratio of surface areas and cannot be determined by measurement of surface profiles*“ [143, S.1466]. Masoodi und Pillai behaupten, wenn $\bar{r} > 1$ ist, verändert sich nicht die Benetzbarkeit der Oberfläche, stattdessen wird eine hydrophile Oberfläche hydrophiler und eine hydrophobe Oberfläche hydrophober [103, S.19].

$$\cos\theta_{Wenzel} = \bar{r} \cos\theta_e \quad (3.8)$$

Cassie und Baxter beschreiben das Substrat als planar und heterogen. Der Materialanteil ist hydrophil und die Poren hydrophob. Falls $\theta_e < 90^\circ$ wird Gleichung 3.9 angewendet, in der σ_1 und σ_2 die entsprechende Flächenanteile *solid surface area* und *air spaces* sind. θ_1 und θ_2 sind die Randwinkel, in der θ_2 (Poren) gleich null ist [21, S.547]) [67].

$$\cos\theta_{Cassie-Baxter} = \sigma_1 \cos\theta_1 - \sigma_2 \quad (3.9)$$

Eine Erweiterung wurde von Cassie [20, S.12] vorgeschlagen, in der sich der Kontaktwinkel aus der Summe des Produkts des Kontaktwinkels $\cos\theta_1$ und $\cos\theta_2$ und der

²⁴In dieser Arbeit wird das \bar{r} als Symbol für die Rauheit verwendet, da r üblicherweise als Radius einer Kapillare, eines Tropfens usw. verwendet wird.

²⁵Dimensionslos in der Quelle angegeben

entsprechenden Fläche σ_1 und σ_2 von zwei Materialien, aus denen die Oberfläche besteht, ergibt (Gleichung 3.10).

$$\cos \theta_{Cassie} = \sigma_1 \cos \theta_1 + \sigma_2 \cos \theta_2 \quad (3.10)$$

Die Rauheit kann also den Kontaktwinkel beeinflussen. Über das wie und insbesondere über eine formelhafte Beschreibung ist die Fachliteratur uneins und kommt zu durchaus widersprüchlichen Aussagen. Yekta-Fard et al. weisen darauf hin, dass die Hysterese des Randwinkels für Strukturen kleiner als $0,1 \mu\text{m}$ vernachlässigbar sein kann. Sie geben Daten aus anderen Studien an, in denen der Einfluss erst ab $0,5 \mu\text{m}$ bei heterogener Phase auftritt. Die Autoren nutzen eine Abhängigkeit der Tropfengröße und des Kontaktwinkels, um den Einfluss von Rauheit auf Randwinkelhysterese zu belegen [147, 260-274]. Yasumura gibt an, dass die Wenzel- und Cassie-Gleichungen nur dann gültig sind, wenn die Rauheit unter dem Tropfen und an dem Randwinkel gleich ist, d.h. die Rauheit gleichförmig erscheint. Außerdem sind die Gleichungen anwendbar, wenn die Rauheit kleiner als die Tropfengröße ist [146, S.192-193]. Die Rauheit von gestrichene Faltschachtelkartons beträgt ca. $0,5 - 2 \mu\text{m}$. Um eine bedruckte Fläche mit einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ zu bilden, muss nach Lee das Volumen des Tropfens $5,2 \times 10^{-16}$ betragen²⁶. Aus einem Tropfen von $8,2 \text{ pl}$ (10^{-12}) ergibt sich eine bedruckte Fläche mit $25 \mu\text{m}$ Durchmesser [90, S.18]. Das Volumen der Tintentröpfchen, die beim Inkjet-Drucker ausgestoßen werden, erzeugt Tropfen mit einer Fläche, die viel größer ist als die durchschnittliche Rauheit der beschichteten Substrate. Andere von Yasumura zitierte Studien weisen experimentell auf eine Unabhängigkeit von Kontaktwinkel und Rauheit hin, die im Gegensatz zu den Erkenntnissen und Aussagen von Wenzel und Cassie steht [146, S.192-193].

Die Auswirkung der Rauheit auf die Benetzung von nicht absorbierenden Oberflächen wie Glas wurde von Semal et al. nachgewiesen. Die Experimente mit Wasser haben gezeigt, dass die Kontaktwinkelhysterese mit der Mikrorauheit stetig zunimmt [127, S.8765]. Apel-Paz und Marmur stellen fest, dass die kinetische Ausbreitung einer Flüssigkeit auf rauen Oberflächen mathematisch durch ein Potenzgesetz beschrieben werden kann, dessen Koeffizient von der Rauheit des Substrats und der Viskosität der Flüssigkeit abhängt [3, S.277-278].

Der zweite Aspekt, der von der Rauheit beeinflusst wird, ist die Druckqualität. Lopes de Souza behauptet, die Oberflächenstruktur des Papiers diejenige Eigenschaft ist, welche die Druckqualität am meisten beeinflusst [94, S.24]. Dragoljub zeigte, dass die Wolkigkeit des Ausdrucks mit einer zunehmenden Rauheit des Substrats einher geht [39, S.68]. Dieser Effekt wurde auch von Ivana et al. [64, S.22] beobachtet. Dragoljubs Experimente zeigen hingegen, dass Defekte wie Ausbluten und Verzerrungen in der Punktform von Rauheit nicht beeinflusst wurden, allerdings wird der Wert der Kantenglätte kleiner,

²⁶Diese Kalkulation ist auch von Kontaktwinkel abhängig. Die Werten sind daher nur eine Annäherung.

je rauer das Substrat ist. Ivana et al. deuten darauf hin, dass mit der Zunahme der Rauheit der Kontrast ab- und die Homogenität²⁷ zunimmt [64, S.22].

Rauheit bedeutet nicht grundsätzlich auch Qualitätseinbuße. Holik stellt fest, dass beim Tiefdruck weniger *missing dots* bei einer homogenen Mikrorauhigkeit auftreten. [54, S.271]. Yang fasst die verschiedenen Wechselwirkungen der Rauheit im Inkjet-Druck zusammen: sie beeinflusst optische Eigenschaften wie Glanz und reduziert die Kontaktfläche zwischen Tinte und Substrat, wodurch die Tintenausbreitung bei hoher Rauheit vermindert wird und das Eindringen der Tinte und damit die optische Dichte beeinflusst wird [144, S.12].

3.2.3. Wechselwirkung zwischen Phasen: relevante Modelle und modellhafte Beschreibungen

In der folgenden Tab. 3.9 sind einige in der Fachliteratur vorgeschlagene Modelle für über die Interaktionen eines Inkjet-Tintentröpfchens auf einem absorbierenden Substrat, mit den Zeitskalen bzw. Zeitangaben (t), falls vorhanden, synoptisch dargestellt.

Tab. 3.9: Modelle über die Interaktionen Tintentröpfchen und Oberflächen

Quelle	1. Etappe	→	2. Etappe	→	3. Etappe	→	4. Etappe	→	5. Etappe
[151, S.367]	Landung Benetzung	→	Spreiten	→	Absorption	→	Filterung Penetration	→	Trocknung
[98, S.132]			Spreiten	→	statische Form erreichen	→	Penetration Evaporation		
t			10 μ s		100 μ s		10 - 1000 ms		
[70, S.2106]	Benetzung Penetration	→	Trennung kappilare Penetration	→	Adsorption	→	Diffusion	→	Trocknung
t	0,1 ms		ms		s		10 s		h
[138, S.1691]			inertiales Spreiten	→	kapillares Spreiten	→	Adsorption	→	Verdampfung
t			μ s		>50 μ s		ms		s
[146, S.53]			Spreiten	→	Penetration	→	Wanderung entlang der Fasern	→	Wanderung in den Fasern

Diese Modelle helfen bei der Identifizierung möglicher Etappen, die eine Tintentröpfchens nach dem Kontakt mit dem Substrat, wie z.B. Benetzung, Spreiten, Absorption und Trocknung durchläuft. In jeder Phase sind:

- Material-Variablen wie Grenzflächenenergie σ_{SL} , Viskosität η , Dichte ρ , Oberflächenspannung σ_L , Morphologie (Φ , τ , \bar{r}),
- externe Variablen wie Temperatur T , Luftfeuchtigkeit φ und

²⁷Wolkigkeit, Körnigkeit vgl. S. 63

- Prozessparameter wie Druckrichtung, Tröpfchengeschwindigkeit v und -volumen V zu berücksichtigen.

Diese Einflussfaktoren sowie eine idealisierte Darstellung der Etappen – Wechselwirkungen zwischen einem Tintentropfen auf einer porösen Oberfläche in Abhängigkeit von der Zeit – sind in Abb. 3.31 dargestellt.

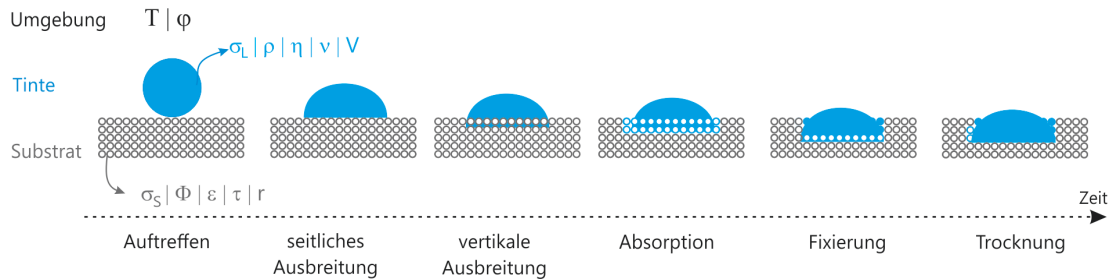


Abb. 3.31: Wechselwirkungen zwischen eines Tintentropfchens auf einer porösen Oberfläche in Abhängigkeit von der Zeit [146, S.53] - *modifiziert*

Um jede Etappe zu definieren, liegen Theorien und Modelle vor, die sogar gegebene Etappenbezeichnungen beeinflussen, wie z. B. Absorption²⁸, Penetration²⁹, Diffusion³⁰ und Imbibition³¹.

Sobald ein Tintentropfen auf einem porösen Substrat auftrifft, sind, unabhängig von der Art der Absorption und Benetzung, zwei Bewegungsrichtungen zu beobachten: lateral zur Substartoberfläche (xy-Ebene) und senkrecht dazu (z-Achse).

Die seitliche Bewegung eines Tropfens bei der Benetzung eines Substrats hängt von der Energiedifferenz zwischen Tinte und Substrat ab. Die Tinte kann sich aufgrund der kinetischen Energie beim Ausstoß auch seitlich ausbreiten. In diesem Fall wird sich ein Tintentropfchen nach dem Aufprall und der Ausbreitung zusammenziehen, falls die Tinte die Oberfläche nicht benetzen kann.

²⁸Als „Absorption (von Materie) versteht man das gleichmäßige Eindringen von Gasen oder Gasmischen (als Absorbat bezeichnet) in Flüssigkeiten oder Festkörper (als Absorbens bezeichnet). Ebenso bezeichnet man das gleichmäßige Eindringen von Flüssigkeiten in Festkörper als Absorption. Sie ist somit eine Form der Sorption – ebenso wie die Adsorption. Im Gegensatz zur Adsorption spielen bei der Absorption Oberflächeneffekte eine geringere Rolle. Absorptionsprozesse sind im Allgemeinen mit einer Volumenvergrößerung des sorbierenden Mediums verbunden.“

²⁹„Ein- oder Durchdringen eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes in einen anderen festen Stoff; Beispiele: Penetration von Farbstoffen oder Hilfsmitteln in Textilien oder Leder.(...). Bei der Einwirkung von kosmetischen oder pharmazeutischen Wirkstoffen auf die Haut unterscheidet man verschiedene Stadien: Adsorption (Haftung an der Hautoberfläche), Penetration (Eindringen in die erste Hautschicht), Permeation (Wanderung durch mehrere Schichten, vergleiche Permeabilität)“

³⁰„Unter Diffusion versteht man die Durchmischung von verschiedenen, sich miteinander in Kontakt befindenden gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen, wie Ionen, Atomen, Molekülen, Ladungsträgern oder Kolloidteilchen. Die zugehörigen Triebkräfte, die Relativbewegungen zwischen den Teilchen und damit Vermischung hervorrufen, sind Konzentrationsunterschiede (gewöhnliche oder Konzentrationsdiffusion), Temperaturunterschiede (Thermodiffusion), Druckunterschiede (Druckdiffusion) oder äußere Feldkräfte.“

³¹„Durchtränken, das heißt Flüssigkeitsaufnahme durch Gele, Festkörper, Körpergewebe usw. Da die Imbibition in der Regel eine Volumenvergrößerung des Sorptionsmittels (schwellen, also Quellung) bewirkt, wird sie häufig mit dieser identifiziert. Es ist eine spezifische Art der Diffusion.“ | Quelle: <https://roemp.thieme.de>

Die Bewegung in das Substrat hinein hängt nicht nur von der Benetzung ab, sondern wird auch von den morphologischen Eigenschaften der Oberfläche sowie der unmittelbar darunter liegenden Schichten wie Porosität, Rauheit, Permeabilität, Tortuosität etc. beeinflusst, sowie von der Trennung der flüssigen und festen Phasen, insbesondere bei Inkjet-Tinten auf Pigmentbasis. Eigenschaften der Tinte, wie Viskosität, Mengenanteile und Größe der unlöslichen festen Partikel, können die Geschwindigkeit der Tröpfchenbewegung verringern oder erhöhen. Eine mögliche Aufwärtsbewegung ist durch die Wechselwirkung der Tinten mit dem Substrat gegeben, eine Quellung z.B. kann die Position des Tröpfchens gegenüber seiner Ausgangsposition anheben. Die Bewegung der Tinte in die verschiedenen Richtungen erfolgt nicht zwangsläufig linear und gleich schnell. Das Füllen oder Verstopfen von Kapillaren zum Beispiel kann die Geschwindigkeit der Tintenbewegung in Richtung der z-Achse verlangsamen.

Absorption, Penetration, Imbibition, Diffusion und Quellung

Lamminmaki fasst die Hauptaspekte der Wechselwirkungen während des Aufsaugens (Engl: *Imbibition*) einer Inkjet-Tinte zusammen und gibt an, welche Kenngröße der Tinten und des Substrats ins Spiel kommen [88, S.22]:

Wechselwirkung	Kenngröße der Tinte	Kenngröße des Substrat
• Benetzung	v, γ^a, η, ρ	Topographie, σ
• Kapillarität	$\gamma, \eta, \rho, \text{Dampfdiffusion, Tensid}$	$\sigma, \text{Polarität, } \Phi, \text{ Bindemittel}$
• Trennung	$\gamma, \eta, \text{Farbkomponente (Art, Ladung)}$	$\sigma, \Phi, \tau \text{ Chemische Gruppen}$
• Adsorption	$\gamma, \rho, M_v^b, \text{Ladung, } D^c, \text{ Löslichkeit}$	$\Phi, T, \tau, \text{Feuchtigkeit}$
• Diffusion	$\gamma, \eta, M_v, \delta D$	$\sigma, T, \tau, \text{Quellung, } \kappa^d$
• Trocknung ^e	Lösungsmittel	$\Phi, \tau, T, \text{ Bindemittel}$

^aDie Autorin nutzt γ statt σ_L .

^bMolekulargewicht

^cKonzentrationsgradient nach Fick

^dWärmeleitfähigkeit

^eVerdunstung

Im Gegensatz zu den Wechselwirkungen, die als Etappen (Benetzung, Trocknung) beschrieben werden können, ist die Kapillarität ein Prozess, der die genannten Etappen beeinflusst. Kapillarität, ist ein physikalisches Phänomen, das sich aus der Wechselwirkung der Oberflächenspannung (flüssige Phase) und der Grenzflächenenergie (flüssige und feste Phase) in Kapillaren (dünne Röhren) ergibt und aber auch für Poren eines Substrats theoretisch gelten kann³². Die Steigung h einer Flüssigkeit mit Oberflächenspannung σ_L und Dichte ρ_L durch ein Rohr mit dem Radius r , wie auch das Eindringen und/oder die Absorption einer Flüssigkeit in eine Pore wird durch das Jurin'sche Gesetz gegeben, abgeleitet vom Young-Laplace-Gesetz [46, S.51] (Gleichung 3.11).

$$h = \frac{2\sigma_L \cos \theta_e}{\rho_L g r} \quad (3.11)$$

³²Die Wechselwirkung zwischen der flüssigen Phase und der festen Phase bleibt in den Poren gleich, wird aber durch die Breite und Länge der Pore beeinflusst.

Eine weitere Gleichung im Zusammenhang mit der Kapillarität ist die Kapillarzahl Ca (Gleichung 3.12), wobei v die mittlere Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Kapillarrohr, η die Viskosität der Flüssigkeit und σ die Oberflächenspannung ist.

$$Ca = \frac{\eta v}{\sigma} \quad (3.12)$$

Nach Hoath wird die Tintenabsorption durch Kapillarkräfte, thermodynamische Wechselwirkungen und unterschiedliche Diffusionsgradienten bestimmt. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsdurchdringung (Penetration als Funktion der Zeit) ist die Lucas-und Washburn-Gleichung (L-W) eines der am häufigsten verwendeten Modelle [53, S.49]. In dieser Gleichung, entwickelt und vorgestellt in den Arbeiten von Lucas [95] und Washburn [140] für die Berechnung der Absorption einer Flüssigkeit, wird die Kapillarität eines Substrats als eine Gruppe horizontaler, zylindrischer Poren mit gleichem Radius beschrieben. Schwer- und Trägheitskraft werden vernachlässigt und der Kontaktwinkel an der Grenzfläche ist konstant. Die Penetrationstiefe als Funktion der Zeit $z(t)$ ist abhängig von 2 Kräften: der Oberflächenspannung, nach Laplace (Gleichung 3.13), und der viskosen Kräfte d.h. der Widerstandskraft nach Hagen-Poiseuille (Gleichung 3.14), wobei das absorbierte Volumen q vom Porenradius r , Porenlänge L , der Viskosität der Flüssigkeit η und der Druckdifferenz ΔP zwischen Anfang und Ende der Pore abhängig ist [146, S.57] [46, S.130-131] [103, S.32] [88, S.39] [124, S.150].

$$p = \frac{2\sigma}{r} \quad (3.13)$$

$$q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L} \quad (3.14)$$

Gleichung 3.15 von Lucas und Washburn (L-W) wurde, wie im Folgenden gezeigt wird, untersucht, kritisiert, reduziert und erweitert.

$$z(t) = \sqrt{\frac{r\sigma t \cos \theta_e}{2\eta}} \quad (3.15)$$

Masoodi und Pillai weisen auf Vereinfachungen des Modells hin: eindimensionale Kapillarität, Vernachlässigung der Porenvernetzung bzw. Tortuosität, konstanter Wert von Porenradius und Kontaktwinkel [103, S.33]. Sie schlagen stattdessen eine Modifikation der Darcy-Gleichung (S. 33) vor, die die Abnahme der Porenweite durch Quellung berücksichtigt [102, S.2257-2258]. Lundberg et al. sagen, dass der Transport von Flüssigkeiten in Papieren zu einer Quellung der Fasern führt und daher durch Diffusion gegeben ist, das Modell von L-W sieht als Transportmechanismus allein die Kapillarwirkung [97, S.149-150]. Die Autoren untersuchten die Penetration von wasserbasierten Inkjet-Tinten (farbstoffbasiert) auf Substraten unterschiedlicher Porosität und Beschich-

tung (Poren zwischen 0,3 nm und 0,35 μm) und Oberflächenspannungen zwischen 32 und 75 mN/m. Die Ergebnisse zeigten, dass die Geschwindigkeit der Penetration als Funktion der Zeit nach L-W zutrifft. Allerdings kritisieren die Autoren die Gleichung: „*equation overestimates the penetration depth and the speed at which the pores are filled*“ [97, S.149].

Daniel und Berg untersuchen die Auswirkungen von Tensiden auf die Ausbreitung und Absorption von Inkjet-Tinten und stimmen dieser Aussage zu. Sie behaupten, dass das Modell trotz der Vereinfachungen eine gute Beschreibung des Eindringens von Flüssigkeiten in poröse Medien ist, auch in Fällen mit Quellung der Fasern. Grenzwertig sei eine anfängliche Verzögerung bei der Benetzung, wenn sich der Flüssigkeitstropfen nicht schnell stabilisiert und seine Höhe, wegen Verdunstung, verliert [23, S.442]. Die Arbeit von Wei Rioux ist fast ausschließlich der Auswertung des L-W Modells gewidmet. Neben vielen anderen Erkenntnissen stellt er fest, dass die Gleichung auf beschichtete Papiere anwendbar ist: „*the absorption volume is directly proportion to the value of $(r\sigma \cos \theta_e/2\eta)^{1/2}$, as the Lucas-Washburn equation predicts*“ [141, S.91].

Batz-Sohn et al. berichten, dass die Absorptionsgeschwindigkeit von Inkjet-Tinte (Tröpfchen $\varnothing=100 \mu\text{m}$, v -(Ausstoß) $\approx 1 \text{ m/s}$) bei laborgefertigten pyrogenen Siliciumdioxidbeschichtungen in Übereinstimmung mit dem L-W-Modell steht [8, S.506]. Die Studie von Hamraoui und Nylander zielt darauf ab, zu verstehen, ob der Penetration durch viskose Dissipation oder durch Reibungsdissipation entgegengewirkt wird. Sie fügen in die L-W-Gleichung einen Verzögerungskoeffizienten β_1 ein, der den dynamischen Charakter des Kontaktwinkels auf einigen Oberflächen darstellt [50, S.415–421]. Lundberg et al. schlagen mehrere Anpassungen im L-W-Modell wie Korrekturen wegen Verdunstung, Berechnung der Porosität und Anzahl der Kapillare vor [97, 142–150].

Studien einer Forschungsgruppe von Omya AG (Gane, Ridgway, Schoelkopf - 2002-2020) zeigen, dass bei der Wechselwirkung von Flüssigkeiten und porösen Oberflächen die Trägheit nicht vernachlässigt werden kann. Schoelkopf et al. verwenden eine Technik, die aus Absorptionsbeobachtungen in gepressten GCC-Platten besteht. Diese Platten simulieren die Pigmentstriche von Kartons, enthalten jedoch keine der darüber hinaus üblichen Komponenten eines Pigmentstriches, z.B. Binder oder Tenside. Die Ergebnisse zeigen eine isolierte Abhängigkeit der Porosität in der Absorptionsdynamik und, dass die L-W-Gleichung bei Proben mit unterschiedlicher Porenverteilung und Porengröße zu keiner Korrelation führt, obwohl die Platten die gleiche chemische Zusammensetzung und Geometrie haben. Die Autoren berichten, dass die Dynamik der Absorption nicht durch den Widerstand von Hage-Poiseuille (S.47) erklärt werden kann. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass die Beschleunigung der Strömung in kleinen Poren durch Trägheit verursacht wird [126, S.453-454]. Schoelkopf vertritt in seiner Dissertation die Verwendung der Bosanquet-Gleichung, die den Trägheitsterm in die L-W-Gleichung einschließt.

Zur Berechnung der Absorption als Funktion der Zeit wird nicht nur das L-W-Modell

verwendet. Yip et al schlagen, basierend auf Darcy, eine Gleichung zur Vorhersage der Zeit für die vollständige Absorption eines Tintentröpfchens von Inkjet-Tinte vor. Das Modell zeigt für poröse Oberflächen an, dass die Absorptionszeit vom Tröpfchenvolumen abhängt. [149, S.391]. Sie unterscheiden Absorptionsmodelle, die durch Kapillarkraft (bei porösen Substraten) oder durch Diffusion (bei nicht porösen Substraten, z.B. nicht geschäumte Polymere) gesteuert werden. Für die hier vorgestellte Arbeit sind beide Wirkprinzipien relevant, da die Beschichtung der Kartons Porosität aufweist und der später aufgetragene Primer auf Polymer-Basis (PVOH) ist. Laut Zhang findet die Diffusion, aufgrund der hohen Hydrophilie bei Beschichtungen auf PVOH-Basis mit größerer Intensität statt [153, S.1473]. Auf sehr kompakten Oberflächen (geringe Porosität) kann die Migration der Tinte auch durch Diffusion statt durch Kapillarwirkung erfolgen [146, S.199].

Oliver et al. vertreten die Ansicht, dass es zwei grundlegende Ansätze gibt, um das Eindringen einer Flüssigkeit in ein poröses Medium zu beschreiben: der Ansatz von Lucas-Washburn und die Fick'sche Diffusion. Ihre Experimente über Absorption und Trocknung mit verschiedenen porösen und nichtporösen Substraten haben gezeigt, dass das Modell von Fick zur Beschreibung des Eindringens mikroskopischer Tröpfchen in poröse Oberflächen geeignet sein kann. Aufgrund von Änderungen der Porengeometrie während der Absorption sind jedoch Modifikationen in der Gleichung erforderlich. Das Modell von Fick ist nach Ansicht der Autoren besser geeignet, da es nicht den Ungenauigkeiten des Kontaktwinkels unterliegt. Sie weisen auch auf Probleme des Fick'schen Modells hin, wie die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten, die von Temperatur und der individuellen Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten abhängt [112, S.213 u. 225-226].

Laut Borch beschreiben die Fick'schen Gesetze die Permeation. In einem Medium mit zwei Substanzen (Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe) mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Konzentrationen kam es zu einem Transfer von Molekülen zwischen den beiden Medien, von der höchsten zur niedrigsten Konzentration kommen. Ein Beispiel für dieses Phänomen ist die Oxidation von Eisen. In Gleichung 3.16 (erstes Fick'sches Gesetz) werden die Moleküle horizontal in der Distanz x übertragen, n ist die Anzahl der Moleküle, die sich in einer gegebenen Zeit von einer Substanz zu einer anderen durch die Fläche A bewegten, und c ist die Konzentration der Substanz. D ist der Konzentrationskoeffizient, definiert durch die Wechselwirkung zwischen den beiden Substanzen [12, S.286].

$$\frac{n}{A} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.16)$$

Wie bereits erwähnt, zeigen farbstoffbasierte und pigmentbasierte Inkjet-Tinten unterschiedliche Absorptionsverhalten. Während die Farbstoffmoleküle durch die Porosität des Materials entlang der z-Achse transportiert werden, bleiben große Pigmentpartikel

auf der Oberfläche zurück. Diese selektive Absorption wird als Filterkuchen bezeichnet und ihr Effekt wird von Desie et al. durch Experimente mit beiden Tinten auf polymerbasierten Inkjet-Substraten demonstriert. Sie weisen darauf hin, dass anfänglich die Ausbreitung bei Farbstoff- und Pigmenttinten ähnlich ist. In der Imbibitionsphase dringen farbstoffbasierte Tinten durch Diffusion in Polymermischungen und durch kapillare Dochtwirkung der mikroporösen Schichten in das Substrat ein. Tinten auf Pigmentbasis folgen diesem Modell wegen des Filterkucheneffekts nicht, der sowohl die Diffusion als auch das Aufsaugen einschränkt. Sie folgen der Durchlässigkeit von Darcy und dann der Diffusion von Fick. Die Autoren bestätigen, dass die Absorptionsphase, die als Kapillarwirkung beschrieben wird, mit dem Modell von Davis und Hocking übereinstimmt [28, S.209] [27, S.778]. Davis und Hocking beschreiben den gleichzeitigen Prozess von Absorption und Spreiten auf porösen Oberflächen. Entsprechende Modelle werden weiter unten diskutiert.

Bessere Techniken und Simulatoren waren vorteilhaft für die Entwicklung neuer Theorien und Modelle zur Erklärung der Absorption, in der Regel jedoch bei sehr speziellen Anwendungen. In den vorausgegangenen Abschnitten wurden die vorherrschenden Theorien und Modelle in Studien über Inkjet-Tinten und papierartige Substrate, ohne Anspruch auf Vollständigkeit vorgestellt. Das Ziel war, die Variablen von Modellen über Absorption, Penetration, Imbibition und Diffusion hervorzuheben. Die gleichen Aspekte gelten für den nächsten Unterabschnitt über das Spreiten.

Spreiten

In einem idealen Szenario, bei dem Flüssigkeit weder verdunstet noch erstarrt und das Substrat keine Verunreinigung, Rauheit oder Porosität aufweist, bewegt sich der Tropfen einer Flüssigkeit (mit einer gegebenen Oberflächenspannung, die niedriger ist als die Grenzflächenenergie des Substrats) lateral zur Oberfläche des Substrats, bis zu dem Radius, wo er sein Gleichgewicht erreicht. Ob und welche Fläche durch den Tropfen benetzt werden, wird aus der Gleichung $\sigma_L/\sigma_V = \sigma_{SV} - \sigma_{SL} - \sigma_L$ bestimmt [23, S.421], wo σ_{SV} , σ_{SL} und σ_L jeweils die Grenzflächen der Fest-Gas und Fest-Flüssig Phasen und die Oberflächenspannung der Flüssigkeit sind.

β , der Spreiten-Koeffizient einer Flüssigkeit (Phase 1) auf einer festen Oberfläche (Phase 2), ist die Differenz zwischen der Adhäsionsarbeit $W_{A1,2}$, zwischen den beiden Phasen und der Kohäsionsarbeit $W_{K1,1}$ der Flüssigkeit. Neben der Oberflächenspannung spielt auch die Viskosität der Flüssigkeit eine wichtige Rolle beim Spreiten, sowohl räumlich als auch zeitlich.³³

Wie in Unterabschnitt 3.1.2 über wasserbasierte Inkjet-Tinten und in 3.2.1 über die dimensionslosen Kennzahlen erläutert wurde, müssen die Tintenkenngößen zwei Anforderungen erfüllen. Sie müssen sowohl das Ausstoßen aus der Druckpatrone ermöglichen

³³Krüss Scientific - <https://www.kruss-scientific.com/de/service/schulung-theorie/glossar/spreitkoeffizient/>

als auch die zu bedruckende Oberfläche benetzen. Daher variiert das Fenster der Prozessparameter bei η von 1 - 20 mPa·s und bei σ von 20 - 50 mN/m. Als zusätzlicher Prozessparameter gibt Magdassi an, dass, wenn die Ausstoßgeschwindigkeit des Tintentröpfchens größer als Null ist, die anfängliche Ausbreitung des Tröpfchens auch durch die kinetische Energie des Aufpralls auf das Substrat beeinflusst wird, wodurch das Spreiten der Tinte sich stärkt [98, S.61].

Die dimensionslosen Kennzahlen, Re , We und Oh stellen einen Zusammenhang zwischen den beteiligten Kräften bzw. Energien dar, z.B., setzt Re die Trägheit in Beziehung zur Viskosität, We setzt die kinetische Energie des Tröpfchens in Beziehung zu seiner Oberflächenspannung und Oh die Viskosität in Beziehung zur Oberflächenspannung und Trägheit. Dijksman gibt die oberen und unteren Grenzen dieser Kennzahlen für das Inkjet-Druckverfahren bei $v \approx 10$ m/s: $5 < Re < 500$, $12 < We < 150$ und $0,7 < Oh < 0,02$ an. Das Volumen des erzeugten Tröpfchens läge danach in der Größenordnung von $4.2 \text{ pl} < V < 113 \text{ pl}$ und das Radius $10 \text{ } \mu\text{m} < r < 30 \text{ } \mu\text{m}$ [30, S.358]. Der Autor bietet noch eine detaillierte Erklärung der Dimensionen des Spreitens (Tröpfchenvolumen, Tröpfchenradius, Spreiten-Koeffizient, Geschwindigkeit), die entweder durch Trägheit oder durch Oberflächenspannung beeinflusst werden, jedoch beziehen sich alle vorgestellten Modelle auf nicht absorbierende Substrate.

Der Spreiten-Koeffizient ist auch über die Tröpfchensgeometrie (Gleichung 3.17) berechenbar, wobei d_0 der Anfangsdurchmesser und d_{\max} der maximale Durchmesser des Tröpfchens ist, der sich sowohl aus dem Ausstoß als auch aus der Oberflächenspannung ergibt [56, S.117].

$$\beta_{\max} = \frac{d_{\max}}{d_0} \quad (3.17)$$

Die Vorhersage des β -Koeffizients beinhaltet die Berechnung einer Energiebilanz (Gleichung 3.18), wobei E_{K0} die kinetische Energie, E_{S0} die Oberflächenspannung, E_{KI} die kinetische Energie und E_{SI} die Oberflächenspannung bei β_{\max} und E_D die verlorene Energie durch Dissipation ist [56, S.117-119]. Die Berechnungen der einzelnen Terme, wie in Dijksman, lassen allerdings die Absorption unberücksichtigt.

$$\beta = E_{K0} + E_{S0} = E_{KI} + E_{SI} + E_D \quad (3.18)$$

Eine andere Gleichung des Spreitens, die auf der zeitlichen Änderung des Kontaktwinkels beruht, basiert auf dem Tappi-Standard T458 om-89 (Gleichung 3.19), wobei θ_5 und θ_{60} der Kontaktwinkelwert nach 5 und nach 60 Sekunden gemessen wird [109, S.91].

$$\text{Benetzungsgeschwindigkeit} [^\circ / \text{sec}] = \frac{\theta_5 - \theta_{60}}{55} \quad (3.19)$$

Kettle et al. sagen, dass Beobachtungen des Kontaktwinkels darauf hindeuten, dass es einen Zusammenhang zwischen Viskosität, Oberflächenspannung und Spreiten-Geschwindigkeit (Kapillarzahl, Gleichung 3.12) gibt und dass in einem Zustand vollständiger Benetzung die Geschwindigkeit durch Gleichung 3.20 [70, S.2105] gegeben ist. Für teilweise Benetzung gilt die Gleichung 3.21 [107, S.642], wobei ν (bzw. β) proportional zur Oberflächenspannung und umgekehrt proportional zur Viskosität ist. θ_d^3 ist der dynamische Kontaktwinkel und θ_e^3 ist der Kontaktwinkel im *equilibrium*.

$$v \approx \frac{\sigma_L}{\eta} \theta_d^3 \quad (3.20)$$

$$\frac{\eta v}{\sigma} \propto \theta^3 - \theta_e^3 \quad (3.21)$$

In Abhängigkeit von der Größe des Kontaktwinkels, der Größe der Kapillaren, der Ausbreitungsgeschwindigkeit und dem Ausbreitungsstadium des Tröpfchens wurden rechnerische und (teilweise experimentell) hydrodynamische Modelle mit unterschiedlichen Proportionalitäten zwischen v und t erarbeitet, wie die Modelle von Voinov, Cox, Tanner, de Gennes, Rujiter, von Bahr, Garnier und Modaresi und Blake u.a..

Abb. 3.32 zeigt den Spreiten-Koeffizient β eines Tropfens auf einer Zeitskala τ^{34} für eine benetzbare Oberfläche (a) und eine andere nicht benetzbare Oberfläche (b). Dieses Modell bietet einen allgemeinen Verlauf des Spreitens. Während der Benetzungsphase ist es möglich, eine umgekehrt proportionale Beziehung zwischen dem β und dem Kontaktwinkel zu erstellen.

Die Gleichungen für die Berechnung der Zeit t je Etappe, sind in der Arbeit von Lim et al. [93, S.432] dargestellt, z.B. Kinetik $t \approx \frac{D_0}{U_0}$, und Benetzung $t \approx \eta D_0 / \sigma$. Tans Arbeit präsentiert die Zeitskalen für Absorption und Verdunstung. Für ein Tröpfchen ($\varnothing=27 \mu\text{m}$, $V \approx 10 \text{ pl}$, $v \approx 10 \text{ m/s}$, Substrat: Photopapier) waren die berechneten Zeiten für wasserbasierte Tinten: Trägheitsstoß $3 \mu\text{s}$, Kapillarspreiten $26 \mu\text{s}$, Viskositäts-Widerstand $262 \mu\text{s}$, Absorption $0,5 \text{ s}$ und Verdunstung 2 s [138, S.1692]. Daraus lässt sich ableiten, dass die Berechnung eines einzigen β bzw. β_{max} eine Vereinfachung impliziert.

Wenn die Zeitskalen der verschiedenen Teilschritte der Absorption und des Spreitens unterschiedlich sind, wenn es Effekte gibt, die diese Bewegungen verzögern oder beschleunigen, ist zu erkennen, dass sich Absorption und Spreiten zeitlich überlappen können. In den Experimenten von Aslannejad et al. wurde die Ausbreitung und Absorption von tintenähnlichen Flüssigkeiten in porösen Papieren beobachtet. Sie zeigten, dass die Erhöhung der Dichte und Viskosität um einen Faktor von zwei einen marginalen Effekt haben. Mit der Zunahme des Tröpfchensvolumens erhöhte sich jedoch die Penetrationszeit erheblich [4].

³⁴ τ ist hier dimensionslos

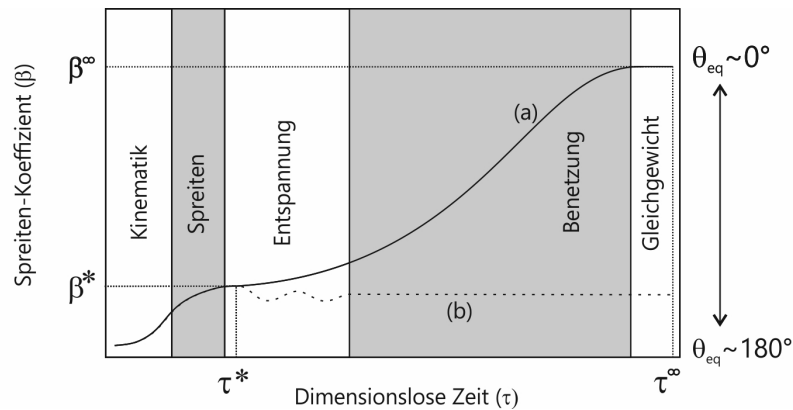


Abb. 3.32: Spreiten-Koeffizient β in Funktion der Zeit τ | a) Verlauf bei einer benetzbaren Oberfläche b) Verlauf bei einer nicht benetzbaren Oberfläche [151, S.165] - *modifiziert*

Starov et al. beobachteten die Kombination von sich ausbreitendem und absorbiertem Silikonöl in teilweise gesättigten Filtermembranen ($\Phi=0,75$, $\varnothing=0,25 \mu\text{m}$) [2, S.087104-2]. Das Modell umfasst mehrere Wirkprinzipien, bei denen gleich nach Beginn der Absorption die Region unterhalb des Tropfens einen Sättigungspunkt erreicht und weiter über den Tropfenradius streckt. Mit der Zeit kann sich der Tropfen sogar zurückziehen, als Folge der Sogwirkung durch andere Poren [23, S.443]. Ein weiteres, von Davis und Hockings entwickeltes, Modell schließt den Effekt der Benetzung innerhalb der Poren aus, wodurch die flüssig-fest Grenzfläche im Fokus ist. Daniel und Bergs Interpretation des Modells von Davis und Hocking legt nahe, dass, in Sonderfällen, teilweise benetzende Tropfen eine endliche Trockenzeit haben und vollständig benetzende Tropfen nicht in ein poröses Substrat komplett absorbiert werden [23, S.443].

Modaressi fand in Absorptionstests an porösen hydrophoben Oberflächen zwei Wirkprinzipien mit unterschiedlichen Zeitskalen: Benetzung und Absorption. Im ersten Regime spreitet der Tropfen auf der Oberfläche, bis das Pseudo-Gleichgewicht θ_e erreicht ist. Das Volumen bleibt dann konstant. Das zweite Regime beginnt nach dem Erreichen des Pseudo-Gleichgewichts. Der Tropfen bleibt stationär und das Volumen sinkt. [107, S.646]

Die Art der Energiedissipation ist ein Aspekt, der mehrere Theorien über Spreiten unterscheidet. Ruijter zum Beispiel schlägt eine Kombination von zwei Dissipationskanälen vor: durch Reibung mit dem Substrat und hydrodynamische Effekte. Er weist auch darauf hin, dass physikochemische Aspekte der Phasen bei der Bewegung des Kontaktwinkels dominant sind. [121, S.2363]

Schließlich zeigt die Arbeit von Daniel und Berg, die ein mathematisches Modell für die gleichzeitige Ausbreitung und Absorption vorstellt, dass: a) Tropfenvolumen, Porengröße, Φ , Dicke des Substrats und β die entscheidenden Parameter sind, um die Dynamik sowohl der Ausbreitung als auch der Absorption zu verstehen und b) die Wechselwirkung zwischen Medium und Fluiden durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Phasen gegeben ist. [23, S.440 u. 467]

Wie oben erläutert, sind die Variablen, die das Spreiten beeinflussen, wichtiger als

die Gleichungen, da diese zum Teil ausschließlich auf die untersuchten Materialien bezogen sind. Es ist möglich, Dutzende andere Modelle zu erwähnen, wie z.B. die Hoffman-Tanner-Gleichung für das Spreiten, die Molekular-Kinetische-Theorie (Blake und Haynes, 1969), die dynamische Benetzung, die durch die von Cox (1986), Voinov (1976), Dussan (1976) (hydrodynamischen Modelle auf der Navier-Stokes Gleichung basierend), die Brinkmans-Gleichung, auf Fick-Energie basierendes Modell u.a.. Wichtig ist zu sagen, dass auch bei dieser großen Vielfalt an Modellen die Einflussparameter bzw. Variablen der Gleichungen weitergehend unverändert bleiben.

Trocknung

Der flüchtige Teil einer Inkjet-Tinte auf einem porösen Substrat bewegt sich in zwei Richtungen: erstens durch Verdunstung aus dem Substrat heraus und zweitens durch Absorption (Wegschlagen) in das Substrat hinein. Laut Zpaka sind dies die beiden Trocknungsmechanismen einer Tinte auf Wasserbasis [151, S.32]. Lösungsmittelbasierte Tinten trocknen hauptsächlich durch Verdunstung, weil sie eine kürzere Verdunstungszeit und damit eine geringere oder vernachlässigbare Absorption aufweisen. Anschließend verdunstet auch die absorbierte Flüssigkeit aus dem Substrat heraus. Ein häufiges Problem beim SOHO-Inkjet-Druckverfahren ist die Verformung des Substrats, wegen Fasersättigung in Bereichen mit großer Farbdeckung. Bei gestrichenen Kartons mit hohem Flächengewicht tritt dieses Problem nicht merklich auf.

Die Verdunstung beim Inkjet-Druck auf flachen Papieren erfolgt innerhalb von Sekunden [76, S.97]. Allerdings, wie weiter unten experimentell nachgewiesen werden wird, werden Inkjet-Tinten auf beschichteten Karton zu langsam absorbiert, was die Verdunstungsrate insgesamt verlangsamt und z.B. Ablagerungen bei Bogenstapeln verursacht. Eine der Lösungen für dieses Problem wurde in Kapitel 3.1.4 vorgestellt: die Anwendung eines Primers, der die morphologischen und/oder chemischen Eigenschaften der Oberfläche verändert. Eine weitere Alternative bzw. Ergänzung von Primern sind geeignete Trocknungsverfahren. Bei vielen Farben ist Trocknung ein Trennungsprozess zwischen Stoffen und erfolgt durch das Umwandeln oder die Verfestigung der flüssigen Phase [67]. In der Druckindustrie sind übliche Techniken zum Trocknen/Aushärten von Druckfarbe und Lacken: Heißluft, UV-, EB- und IR-Strahlung. Die Effekte von Trocknungsverfahren sind: physikalische wie Verdunstung und Wegschlagen und chemische wie Oxidation, Polymerisation des Bindemittels und Vernetzung (z.B. mittels UV-Strahlung).

Bei der Verdunstung überwinden die Moleküle des Lösungsmittels im flüssigen Zustand die Kohäsionskräfte und bewegt sich durch die Grenzfläche in die Gasphase. Dieser Prozess ist durch den Konzentrationsgradienten der Moleküle der beiden Phasen gegeben und daher von der Temperatur, der Feuchte, dem Flüssigkeitsvolumen und der Fläche der Flüssigkeit in Kontakt mit Luft abhängig [108, S.23-24]. Die Verdunstung wird beschleunigt, indem die Umgebungstemperatur erhöht und der Wasserdampf entfernt wird. Das gelingt durch die Konvektionstrocknung bzw. Anwendung von Wärme- und Stofftransport [72, S.177]).

Ein anderer Prozess ist eine Energiezufuhr durch thermische Strahlung bzw. Infrarot-Strahlung (IR), häufig im Offset- und Inkjet- Druckverfahren verwendet. Die Energieübertragung durch elektromagnetische Wellen regt die Moleküle zum Schwingen an, jedoch selektiv, denn je nach Wellenlänge (λ) unterscheiden sich die angeregten Moleküle. Dies ist durch die chemische Zusammensetzung des Objekts gegeben, die definiert, wie viel der Energie absorbiert, reflektiert oder transmittiert wird. Der IR-Spektralbereich liegt zwischen dem sichtbaren und dem Mikrowellenbereich, d.h. λ liegt zwischen 10^{-3} m (1 mm) und 10^{-6} m (1 μ m). Die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche der IR-Wärmestrahlung und ihre Temperaturen³⁵ sind in der Tab. 3.10 zusammengefasst.

Tab. 3.10: Wellenlängenbereich der IR-Wärmestrahlung und Temperatur [14, S.22]

Art	Bezeichnung nach		λ [nm]	Temperatur [°C]
	CIE	ISO 24790		
Near IR	IR-A	NIR	750 - 1400	3591 - 1797
Short IR	IR-B	-	1400 - 3000	1797 - 693
Mid IR	IR-C	MIR	3000 - 8000	693 - 89
Long IR	IR-C	-	8000 - 15000	89 - 80
Far IR	-	FIR	15000 - 1000000	-80,15 - -270,15

Nach Byrnes wird mittleres IR (MIR) vorzugsweise zur Wasserverdunstung verwendet [14, S.22]. Kanzamar erklärt, in seiner Dissertation über die Trocknung während des Papierherstellungsprozesses, dass die Feuchtigkeit eines Blattes die Aufnahme von IR-Strahlung begünstigt. Er gibt an, dass im Bereich von 2 bis 5 μ m Strahlung dieser Wellenlänge fast vollständig absorbiert wird. Außerdem wurden die kurzen Wellen zwischen 0,8 und 2 μ m reflektiert oder transmittiert statt absorbiert [68, S.10]. Die Firma adphos³⁶ hat ein patentiertes System mit NIR (0,8 μ m-Bereich) für Inkjet-Druckverfahren entwickelt.

Abb. 3.33 zeigt zwei Kurven, die sich auf den bei den Experimenten verwendeten IR-Strahler beziehen. Links ist die Absorptionskurve nach Temperatur für Papiers, Lack und die im Strahler verwendete Keramik dargestellt. Rechts sind die Absorptionskurven (nach Wellenlänge) des Wassers und eines Papiers und die Emissionskurve des Geräts (zwischen 2 und 10 μ m) dargestellt. Der höchste Emissionspunkt des Strahlers liegt nach 2 μ m, was nicht ideal für die Auswirkung auf Wasser ist.

³⁵Temperaturberechnung nach Winischem Gesetz. In der Quelle wurde T in Kelvin angegeben. Hier wurde in Celsius, da die Temperatur des in dieser Arbeit verwendeten IR-Strahlers diese Skala nutzt.

³⁶adphos Innovative Technologies GmbH (Bruckmühl Deutschland)

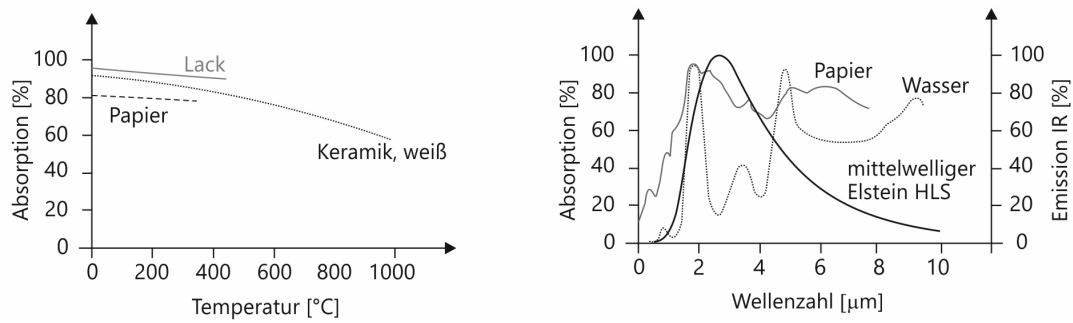


Abb. 3.33: Absorptionskurve nach Temperatur (links) | IR-Absorptionskurve nach Wellenlänge (rechts)
 - [42, S.5-6] - modifiziert | Bemerkung: HLS-Kurve stellt die Emission des Strahlers dar.

Eine der ersten veröffentlichten Arbeiten zur Inkjet-Trocknung stellt eine Zusammenfassung von Kosten, Verbrauch, Größe und Architektur nach Wärmeübertragung (Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung (IR)), sowie technische Daten vor. Gooray und Agbezuge (Xerox Corp.) fokussieren die Studie auf ein Hybridsystem, das sowohl Verdunstungs- als auch Absorptionstrocknung verwendet. In dem System kommen Heißluft und Infrarotstrahlung zum Einsatz. Die Autoren weisen auf die Vorteile der IR-Trocknung hin: 40% Effizienz, Nutzung niedriger Temperaturen, gleichmäßige Wärmeabsorption. Speziell für die IR-Trocknung werden die Prozessparameter aufgelistet: Lampenintensität, Abstand zum Substrat, Trocknungsdauer und Bogengeschwindigkeit. Allerdings ist die IR-Trocknung mit hohen Energiekosten verbunden.

Hasebe et al. haben die Auswirkungen verschiedener Produktionsparameter wie Papiertyp, Tintenmenge, Druckgeschwindigkeit, Temperatur u.a. auf die Druckqualität untersucht. Für die Experimente wurden wasser- und pigmentbasierte Tinten und eine Trocknung mit IR-Strahlung angewendet. Um die Trocknung zu analysieren, bestimmen die Autoren einen „Grad des Verschmierens“ für die gedruckten Proben³⁷. Sie zeigen, dass der Grad des Verschmierens umso größer ist, je größer das Tintenvolumen ist und leicht abnimmt, wenn die Temperatur des Trockners erhöht wird. Ein kleinerer Abstand zwischen Substrat und IR-Strahler verschlechtert die Haftung der Tinten. Zusätzlich haben sie gezeigt, dass das Zeitintervall zwischen Druck und Trocknung und die Menge der aufgetragenen Energie die Tintenabsorption beeinflussen kann. Sie schlagen ein kurzes Zeitintervall und eine durchschnittliche Energiemenge³⁸ vor [51, S.47-50].

3.3. Qualitative Analyse eines Ausdrucks

Die qualitative Analyse eines Ausdrucks erfolgt durch Messmethoden, mit deren Hilfe die Bildelemente quantitativ beschrieben und objektiviert werden können. Diese Beschreibung wird dann mit einer Bewertungsskala verglichen. Dies ist eine absolute Auswertung, bei der der Ausdruck mit einem bestimmten Zielergebnis verglichen wird. Bei einer relativen Auswertung werden Exemplare aus einer Serie, z.B. aus einem Druckauftrag,

³⁷Bei nicht saugfähigen Papieren kann die Tinte, hauptsächlich auf Pigmentbasis, bei Berührung verschmieren.

³⁸Es wurde kein spezifischer Wert berichtet.

miteinander verglichen und Unterschiede festgestellt. Für diese Zwecke steht eine Vielzahl von Messmethoden, Dutzende von Bildattributen und verschiedene numerische Bewertungsskalen zur Verfügung [79]. Diese Komplexität kann auch eine große Anzahl von Messgeräten umfassen, die unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien folgen.

Leitlinie bei den weiter unten vorgestellten Untersuchungen war, dass, wann immer möglich, technische Standards zur Unterstützung von qualitativen Analysen heranzuziehen, um die Reproduzierbarkeit der Messungen und Auswertungen zu gewährleisten. Das Hauptziel dieser Analysen besteht nicht darin, die Qualität des Drucks einem Zielergebnis gegenüberzustellen oder das Drucksystem zu bewerten, sondern Materialien miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus beschränken sich die Analysen hier auf 1 Bit (monochrom) und 8 Bit (Graustufen) Elemente³⁹.

Die Analyse, wie bestimmte Elemente gedruckt wurden, liefert Informationen über die verwendeten Materialien. Tan behauptet, dass die Wechselwirkung zwischen Tinte und Substrat einen erheblichen Einfluss auf die Menge der verwendeten Tinte, die Trocknungsdauer und Druckqualität hat [138, S.1690]. Gane und Kettle zeigen auf, dass die Bedruckbarkeit von gestrichenen Papieren durch die Prinzipien der Flüssigkeitsaufnahme in porösen Medien gesteuert wird. Die Struktur und Verteilung der Poren sowie die chemische Zusammensetzung der Oberfläche sind Parameter, die bei der Entwicklung von Materialien untersucht werden müssen, um eine adäquate Tintenabsorption zu erreichen [45, S.389-390] [70, S.2104].

Holik fasst zusammen:

„The evenness of the printed image is a very important criterion for quality. The acceptance of coated paper by printers depends on its runnability in the printing process and its printability in terms of an even image that is free of defects. (...) The printability of paper is principally determined by the surface of the coating, and its structure and topology, pore size and pore size distribution, chemical nature, and homogeneity all play an important part in influencing the interaction between paper and ink.“ [54, S.271–272]

Daher sollten Tinten, Drucksysteme oder Substrate nicht nur unter produktiven Gesichtspunkten analysiert werden, wie z.B. kürzere Trocknungsdauer, sondern auch unter qualitativen Kriterien wie der Wechselwirkung zwischen Tinten und Substraten. Bei den weiter unten vorgestellten Untersuchungen konzentrieren sich die Analysen auf Elemente, die Informationen über das Spreiten der Tinten auf gestrichenen Kartons liefern. Beispielsweise beeinflussen Füllstoffe, Leimungen und Beschichtung die Kantenschärfe des Druckbildes und sind folglich ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung des Substrats. [91, S.24-25].

In dem ersten Unterabschnitt Standards wird ein Überblick über maßgebliche standar-

³⁹Die Begründung ist im Abschnitt 6.1

disierte Auswerteverfahren gegeben, die die Ziele der Untersuchungen unterstützen. Im zweiten Unterabschnitt Attribute werden einige Qualitätsmerkmale für die Auswertung von Druckergebnissen beschrieben.

3.3.1. Standards

Für die qualitative Analyse von Inkjet Medien⁴⁰ wurde der Standard DIN 53131-3:2010-11 [32] entwickelt. Soweit bekannt ist dies der einzige Standard, der nicht das Drucksystem oder den Ausdruck, sondern das Substrat bewertet. Um ihn zu nutzen, ist eine speziell entwickelte Software zur Auswertung von Bildpunktstörungen und optischer Auflösung notwendig, die laut DIN jedoch aktuell nicht mehr verfügbar ist.

Die während der laufenden Untersuchungen zeitgleich veröffentlichte Technische Spezifikation ISO/TS 15311-2:2018 [60], auch *digital printing production standard* genannt, bietet Metriken zur Auswertung von Druckerzeugnissen, die für den Akzidenzmarkt im Allgemeinen produziert werden. Obwohl der Standard zunächst vorgibt, dass die vorgestellten Metriken für jede Art von Digitaldruck und sogar für analoge Druckverfahren verwendet werden können, relativiert er später seinen grundlegenden Ausgangspunkt zur Qualitätsanalyse:

„Because of the wide range of digital printing devices in terms of speed, quality, run length and sheet or board size, and the equally wide range of quality needs in the various printing market places, there presently is no cross market agreement as to what constitutes “acceptable” quality.“

Außerdem befasst sich diese technische Spezifikation mit der Bewertung des Ergebnisses, den bedruckten Bogen, und berücksichtigt nicht die Entstehung des Ergebnisses, nämlich, wie der Druckprozess der Bögen gesteuert wird. Diese Steuerung ist derzeit nur für analoge Druckverfahren definiert und wird in der ISO 12647 Teil 2 bis 6 beschrieben. In dem ISO/TS 15311-2:2018 wird für Attribute wie Detailwiedergabe und Homogenität auf die ISO/IEC 24790:2017 [63] verwiesen, die jedoch für monochrome Bürodrucker (inklusive Kopierer) ausgelegt ist. Angesichts einer Vielzahl von veröffentlichten Artikeln über die Vorgängerversion (ISO/IEC 13660:2001) wurden vergleichsweise keine Studien zur Anwendung der ISO/IEC 24790 gefunden.

Der Standard ISO/IEC/TS 29112:2012 [62] hat ähnliche Attribute wie ISO/IEC 24790:2017. Beide werden zur Bewertung von monochromen Bürodruckern verwendet, allerdings umfasst ISO/IEC/TS 29112:2012 auch eine Messung der Adressierbarkeit, die hier nicht relevant ist.

Tab. 3.11 liefert eine Zusammenfassung der oben genannten Standards und ihrer Attribute.

⁴⁰In dieser Arbeit wurde definiert, den Begriff Substrat für die zu bedruckende Oberfläche zu verwenden. Ausnahmsweise wurde hier der Begriff Medien verwendet, wie er in dem zitierten Standard steht.

Tab. 3.11: Qualitative Attribute nach Standard

DIN 53131-3:2010-11 [32]	ISO/IEC/TS 29112:2012 [62]
<ul style="list-style-type: none"> - Optische Auflösung - Optische Dichte - Farbwerte - Ausbreitung - Ausfransen - Ausbluten 	<ul style="list-style-type: none"> - Native adressability - Effective addressability - Edge blurriness - Edge raggedness - Printer MTF estimation from edge characteristics - Printer MTF estimations from 1-D repeating patterns
ISO/TS 15311-2:2018 [60] (→ Beschreibung in)	ISO/IEC 24790:2017 [63]
<p>Homogeneity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Banding (monochrome)(→ ISO 24790) - Large area uniformity(→ ISO 24790) - Mottle (monochrome)(→ ISO 24790) - Graininess (monochrome)(→ ISO 24790) - Show through - Colour variation within printed matter <p>Detail rendition capabilities</p> <ul style="list-style-type: none"> - Line width (→ ISO 24790) - Line darkness (→ ISO 24790) - Line raggedness (→ ISO 24790) - Line blurriness (→ ISO 24790) <p>Artefacts</p> <p>Permanence</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indoor light stability - Weathering - Thermal stability - Abrasion resistance 	<p>Large area graphic image quality attributes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Large area darkness - Rmax / Rmin - Background darkness - Graininess - Mottle - Background extraneous mark - Large area void - Banding <p>Character and line image quality attributes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Character and line image Rmax / Rmin - Line width - Character and line darkness - Line blurriness - Line raggedness - Character void - Character surround area extraneous mark - Character surround area haze

Verschiedene Studien mit ähnlichen Untersuchungsgegenständen wie dem hier vorliegenden orientieren sich vorrangig an den gleichen Attributen. Zur Analyse bei Veränderung der chemischen Zusammensetzung oder der Oberflächenmorphologie von Substraten für Inkjet-Druckverfahren werden optische Dichte, Auflösung, Tonwertzunahme, Homogenität, Breite oder Störungen in der Linienwiedergabe am häufigsten herangezogen [153] [38] [48] [43] [8] [47] [39] [64] [109] [52].

Die Studie der FOGRA „Grundlagen zur Etablierung der Normung für den Toner und Inkjet-basierten Digitaldruck“ verwendet folgende Attribute: Bewertung der Homogenität (Körnigkeit und Wokligkeit), der Detailschärfe wie Mangel an Kantengeradheit (Engl.: *Edge Raggedness*), Mangel an Kantenglätte (Engl.: *Edge Blurriness*) und der Anzahl der Tonwertstufen [80].

Die Analyse von Bildelementen basiert auf dem Druckpunkt als Grundelement des Druckbildes, der Linie als kleinste Punktmenge und auf großen Flächen (ganz oder teilweise bedruckt) als größtmögliche Punktmenge.

3.3.2. Attribute

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zu den analysierten Attributen beleuchtet. Die Messprinzipien, Messmethoden, -objekte und -parameter sowie die Laborumgebung sind in Kapitel 5 aufgeführt: Optische Dichte S. 86, Tonwertzunahme S. 86, Linienwiedergabe S. 87, Homogenität S. 89 und Auflösung S. 91.

Optische Dichte

Bei Druckprodukten wird zumeist die optische Dichte als Maß für die Menge der farbgebenden Bestandteile in der übertragenen Druckfarbe herangezogen. Das Verhältnis der remittierten Lichtintensitäten I (Farbschicht) zur I_o (Remission des Weißstandards/Referenzweißes) ist die Remission β . Je dichter (dunkler, dicker) die gedruckte Schicht ist, desto niedriger ist β [72, S.103].

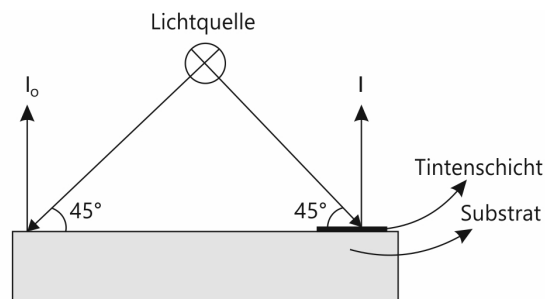


Abb. 3.34: I und I_o Remissionen [72, S.482] - modifiziert

Je größer die Farbschichtdicke ist, desto größer ist die optische Dichte D (Gleichung 3.22 [72, S.103]). Im Vergleich zum Offsetdruck ist die auf dem Substrat aufgetragene Inkjet-Tintenschichtdicke viel dünner⁴¹. Die Tinte dringt in das Substrat ein, während die Offsetfarbe weitgehend auf der Oberfläche des Substrats verbleibt. Jedoch können das Absorptions- und Spreitenverhältnis von Inkjet-Tinten durch optische Dichte indirekt analysiert werden.

$$D = \log \frac{1}{\beta} = \log \frac{I}{I_o} \quad (3.22)$$

Tonwertzunahme

Die Tonwertzunahme (TWZ) ist die Rasterpunktvergrößerung, ein bekanntes Phänomen im analogen Druckprozess. Im Offsetdruck z.B. bewirkt dies u.a. die Farbübertragung von der Druckform mittels eines elastischen Gummituchs auf das Substrat. Durch den "Druck", bei der Farbübertragung nimmt der Druckpunkt in Referenz zur ursprünglichen Größe zu. Daher wird diese Art von Punktvergrößerung geometrische oder mechanische TWZ genannt.

⁴¹Offset: ca. 10 μ m, Inkjet: ca. 1 μ m

Optische TWZ, auch Lichtfangeffekt oder Yule-Nielsen-Effekt genannt, wird durch Lichtstreuung an der Papieroberfläche und im Papier verursacht. Wenn Licht auf ein Substrat trifft, wird es von diesem anteilig gestreut, reflektiert und von der Farbschicht absorbiert [74, S.8]. Dieses Phänomen verstärkt die TWZ. Es hängt zudem von der Frequenz des Punktrasters ab. Die Saugfähigkeit und Rauheit des Substrates, wie auch die Viskosität der Farbe, können die TWZ ebenfalls beeinflussen.

Messtechnisch lässt sich die Flächendeckung mittels eines Densitometers ermitteln. Die Ermittlung der TWZ in % ergibt sich aus dem Δ des gemessenen Rasterwerts im Druck FD , z.B. 24%, und des bekannten Rasterwerts im Film oder Datei FF z.B. 20% (Gleichung 3.23). FD wird mithilfe der Murray-Davies-Formel berechnet (Gleichung 3.24).

$$TWZ = FD - FF \quad (3.23)$$

$$FD = \frac{1 - 10^{-Dr}}{1 - 10^{-Dv}} 100\% \quad (3.24)$$

Klein erläutert: „das Murray-Davies Modell nimmt an, dass sich die Reflexionseigenschaften der Druckpunkte genau wie die des Volltonfeldes verhalten, wobei die Lichtstreuung vernachlässigt wird“ [74, S.8]. Eine Erweiterung dieses Modell besteht darin, den Yule-Nielsen-Faktor n einzuführen. In diesem Modell wird die optische TWZ eliminiert und nur die geometrische TWZ ermittelt. Der Faktor n hängt von der Oberfläche des Substrats ab und liegt zwischen 1 und 3. Die Berechnung von n gelingt dennoch oft ungenau [82]. TWZ kann durch zwei verschiedene Diagramme veranschaulicht werden. In Abb. 3.35 (links) stellt die gepunktete Linie einen idealen Ausdruck ohne Punktzunahme dar und die durchgehende Linie ist die gemessene TWZ. Die gleiche Abbildung (rechts) zeigt die zweite Variation des Diagramms mit nur einer durchgehenden Linie für die TWZ je nach Farbdeckung.

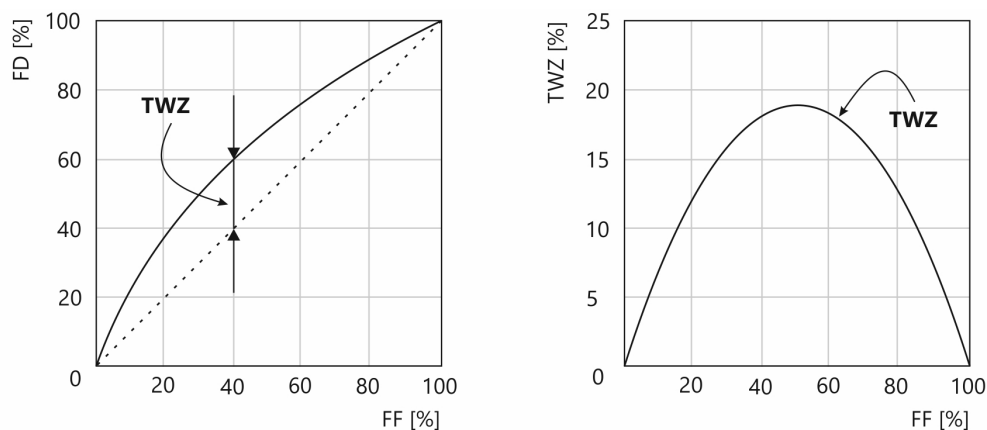


Abb. 3.35: Beispiele von TWZ Diagrammen

Zhang erklärt, dass die TWZ hauptsächlich durch die Ausbreitung der Tinte verursacht wird, weil das Inkjet-Druckverfahren ein *Non Impact Print* Druckverfahren ist [153, S.1470].

Linienwiedergabe

Ausbreitung⁴², Ausfransen (Engl. *Feathering* und *Wicking*)⁴³ und Ausbluten (Engl. *Bleeding*)⁴⁴ sind häufige Störungen beim Inkjet Druckverfahren. Beispiele dieser Defekte sind in Abb. 3.36 dargestellt.



Abb. 3.36: Beispiele von Ausbreitung, Ausfransen und Ausbluten der Inkjet-Tinten [54, S.979]

Obwohl diese Defekte am häufigsten auf ungestrichenen Papieren auftreten, können hauptsächlich Ausbreitung und Ausbluten auch auf gestrichenen Oberflächen erscheinen. Standard DIN 53131-3:2010-11 schlägt Erosions- und Dilatationsmessungen mit Linien und Texten als Bildelementen vor, um diese Defekte auszuwerten. Doch wie bereits erwähnt, steht die Auswertungssoftware nicht zur Verfügung. Hier werden angesichts der Beschränkung auf monochrome Druckprodukte keine Untersuchungen von Ausbluten durchgeführt, denn in der Regel sind zwei unverträgliche Inkjet-Tinten daran beteiligt, weil das Ausbluten durch die chemische Inkompatibilität zwischen Tinten verursacht wird [98, S.134] [151, S.168]. Die Bewertung der Ausbreitung kann mit dem Standard ISO/IEC 24790:2017 durchgeführt werden, dessen Hauptelemente im Folgenden erläutert sind.

Die Auswertung der Linienwiedergabe wird mit Hilfe des Reflexionsgrades ρ (Gleichung 3.25 [72, S.482]) kalkuliert. Der maximale Reflexionsgrad (Substrat) und minimale Reflexionsgrad (100% gedrucktes Schwarz) wird ermittelt, um die Reflexionsgrenzen ρ_{70} und ρ_{10} festzulegen (Abb. 3.37). Diese Daten werden bei der Beschreibung der verschiedenen Reflexionszonen für die Berechnung des Mangels an Kantenglätte entlang der Linie (Engl. *line blurriness*) (Gleichung 3.26⁴⁵ [63, S.19]) und der Linie-Dunkelheit (Engl. *line darkness*) (Gleichung 3.27⁴⁶ [63, S.19]) verwendet. Die Linienbreite ist die durchschnittliche Breite der gedruckten Linie. Die Breite wird entlang der Linie von Rand zu Rand kalkuliert (Gleichung 3.28⁴⁷ [63, S.18]). Die Berechnungen des Mangels an

⁴² „Gleichmäßige Vergrößerung der Fläche eines Druckzeichens bezogen auf die Fläche einer entsprechenden Referenzvorlage“ [32]

⁴³ „Auslaufen der Tinte an der Grenze zwischen bedrucktem und unbedrucktem Papier bezogen auf die Fläche einer entsprechenden Referenzvorlage“ [32], „faserförmiges Auslaufen von Tintenpunkten“ [130]

⁴⁴ „Ineinanderlaufen der Tinten an der Grenze zweier Flächen, die mit verschiedenen Farben gedruckt wurden, bezogen auf die Fläche einer entsprechenden Referenzvorlage“ [32]

⁴⁵ DIS_{70-10} = Entfernung zwischen Reflexionszonen ρ_{70} e ρ_{10} in [mm]

⁴⁶ LID = *line image density* [dimensionlos] | LW = *line width* [mm]

⁴⁷ $LETP$ = *left edge threshold position* | $RETP$ = *right edge threshold position* in [mm] | k = Dotreihe innerhalb eines Messelements (Linie) zur Ermittlung einer lokalen Kantenposition

Kantengeradheit entlang der Linie (Engl.: *line raggedness*) (Gleichung 3.29⁴⁸ [63, S.20]) basieren auf den Restflächen entlang der gedruckten Linie.

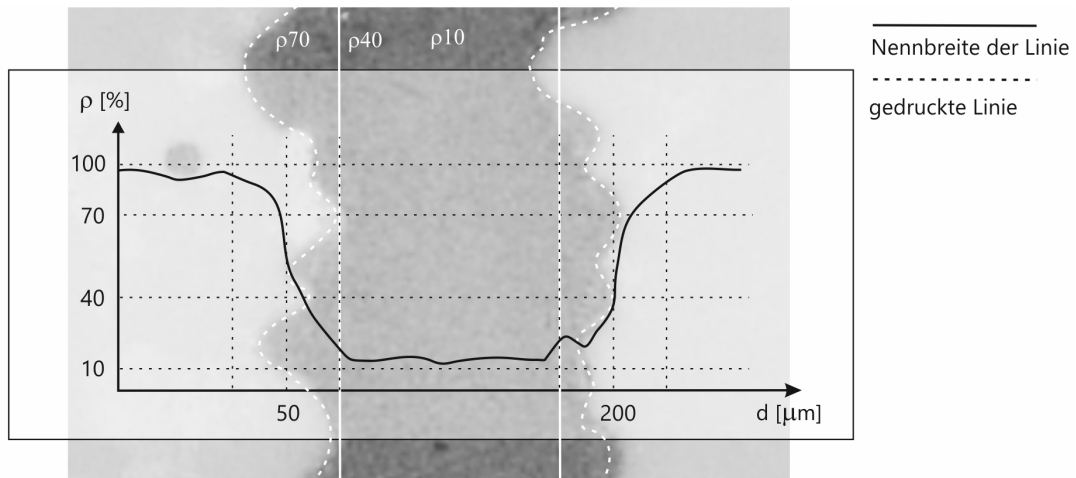


Abb. 3.37: Reflexionsgrenzen einer gedruckten Linie nach ISO 24790 [63, S.58] - modifiziert

$$\rho = \frac{\Phi_R}{\Phi} = \frac{\text{reflektierter Lichtstrom}}{\text{auftreffender Lichtstrom}} \quad (3.25)$$

$$\text{Kantenglätte} = \frac{Dis_{70-10}}{\sqrt{LID}} \quad (3.26)$$

$$\text{Dunkelheit} = LID \times \sqrt{LW} \quad (3.27)$$

$$\text{Linienbreite} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (LETP) - (RETP) \quad (3.28)$$

$$\text{Kantengeradheit} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (RFL)} \quad (3.29)$$

Homogenität

Sowohl während der Papierherstellung als auch während der Oberflächenbeschichtung, durchlaufen Wasser und Fasern strömungstechnische Prozesse wie Suspension, Entwässerung und Filtration sowie Transport-, Druck- und Verdampfungsschritte. Außerdem stehen elektrostatische, kolloidale und mechanische Anziehungskräfte in engem Zusammenspiel miteinander. Die Homogenität eines Drucks hängt mit den daraus resultierenden stochastischen und anisotropen Oberflächen von Substraten und auch, obwohl meistens peripher, mit dem Druckverfahren zusammen [1, S.673–676]. Im Standard

⁴⁸RFL = Residuals from a line in [mm] | n Anzahl der Kanten

15311-2 ist Homogenität durch die folgenden Attribute gegeben: *large area uniformity*, *show through* und *colour variation within printed matter* für mehrfarbige Drucke und Streifigkeit (Engl.: *banding*), Wolkigkeit (Engl.: *mottlem*, *mottling*, *cloudness*) und Körnigkeit (Engl.: *graininess*) für monochrome Drucke [60] [61].

Streifigkeit ist ein periodischer Defekt (Amplitude und Frequenz), der in Form paralleler Streifen im Druckbild erkennbar ist (Abb. 3.38 links). Nichtperiodische Muster werden nach ihren Frequenzen unterteilt. Bei Wolkigkeit (Abb. 3.38 rechts) handelt es sich um niedrige Frequenzen (weniger als 0,4 Zyklen pro Millimeter⁴⁹ in alle Richtungen) und bei Körnigkeit (Abb. 3.38 mittel) geht man von einer Ortsfrequenz über 0,4 Zyklen pro Millimeter in alle Richtungen aus. [61].

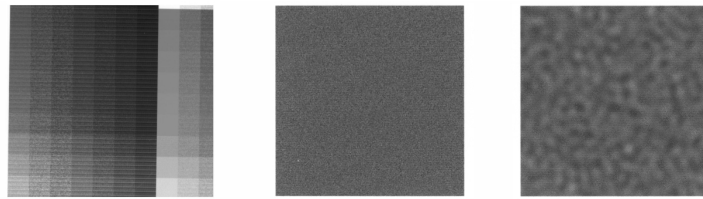


Abb. 3.38: Streifigkeit (rechts) [80, S.20] | Körnigkeit (mittel) [63, S.12] | Wolkigkeit (links) [63, S.14]

Unter diesen Defekten findet Wolkigkeit in der Fachliteratur eine größere Beachtung als Körnigkeit, was eine Auswirkung von qualitativen Messungen bei Offsetdruck, wo dieser Defekt viel untersucht wurden, sein kann. Streifigkeit kann mit der Herstellungsrichtung des Substrats zusammenhängen (MD *machine direction* oder CD *cross direction*), doch hängt sie beim Inkjetdruck eher mit Problemen bei dem Düsenkopf zusammen: Verstopfung oder falsche Ausrichtung der Düsen, mechanischer Fehler bei der Bogenbewegung. Daher wurde aus diesen verschiedenen Varianten, die sich auf Homogenität beziehen, Wolkigkeit für die Analyse großer Druckflächen gewählt.

Holik erklärt, dass bestimmte Bestandteile des Substrats mit einer erhöhten Wasserretention (z.B. Cobinde- und Verdickungsmittel) die Trocknungsdauer verlängern. Bei ungestrichenen Papieren lässt sich die inhomogene Verteilung dieser Bestandteile leicht erkennen, wenn man das Papier gegen eine Lichtquelle hält. Entsprechend der ungleichmäßigen Verteilung werden die verschiedenen Komponenten der Tinten unterschiedlich schnell absorbiert und verursachen Wolkigkeit, denn in der Folge wird es benachbarte Bereiche mit differierenden Konzentrationen von Tintenbestandteilen geben [54, S.271–272]. Zapka fasst *Mottle* als ineffiziente Benetzung und Tintenpenetration zusammen [151, S.169].

⁴⁹Zyklen sind die Linienpaare

Auflösung

Johnshon konstatiert,

„The ability of the human eye to distinguish fine detail is called visual acuity, and it is directly related to distance. As you move farther away from the visual source, you reach a point where you no longer see the detail, and everything merges together. This can be determined scientifically by using alternating black-and-white lines of a specified width and then measuring the angle made from the eye to these lines at the maximum resolvable distance. It has been shown that the visual acuity of a normal eye with 20/20⁵⁰ vision is somewhere between 30 seconds of arc (when lighting is ‚ideal‘) and one minute of arc (when the lighting is ‚ordinary‘). This is the maximum visual resolution possible for most humans.“ [65, S.51]

Die selbe Fähigkeit zur Unterscheidung schwarzer und weißer Linien wird seit vielen Jahrzehnten im Optik- und Photobereich genutzt, um die *spatial frequency response (SFR)* von Kameras (ISO 12233:2017) und Scannern (ISO 16067-1:2003) zu messen, d.h. die Fähigkeit dieser Geräte, die Details eines Bildes aufzulösen. Für Digitaldrucker sind Muster mit diesem Abtastschema (Abb. 3.39) vorhanden, allerdings mit dem Ziel, die Adressierbarkeit und Modulationsübertragungsfunktion (MTF) zu berechnen. Die Auflösung ist die Fähigkeit eines Druckers, feine Details wiederzugeben, während die Adressierbarkeit mit der Genauigkeit der Positionierung und der Anzahl der gedruckten Punkte zusammenhängt. Diese Größen sind miteinander verbunden, aber nicht identisch.

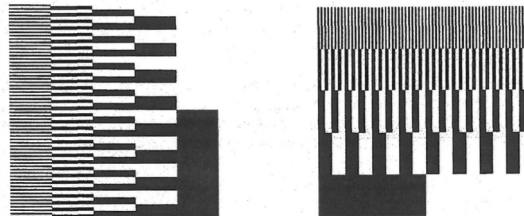


Abb. 3.39: Schwarze und weiße Linien zur Messung der Adressierbarkeit und MTF-Ermittlung [62, S.20]

Der in der Norm ISO 12233:2017 enthaltene Siemensstern ist ein Testmuster (Abb. 3.40), das in den 1930er Jahren zur Überprüfung von Filmkameras entwickelt wurde. In Abb. 3.39 werden verschiedene Ortsfrequenzen durch die unterschiedlichen Abstände zwischen schwarzen und weißen Linien dargestellt. Bei einem Siemensstern sind alle Frequenzen vorhanden. In der Mitte die kleineren und an den Rändern die größeren. Darüber hinaus ist es nicht notwendig, zwei Proben mit unterschiedlichen Druckausrichtungen zu drucken, da die Form des Sterns eine Auswertung in alle Richtungen ermöglicht. Die Ermittlung des Auflösungsvermögens eines Geräts erfolgt bei der Messung des Graurings, d.h. der dunkle Bereich in der Mitte des Sterns, dessen Durchmesser bei geringerer Auflösung zunimmt. Beim Standard DIN 53131-3:2010-11 wird dieses Element

⁵⁰normale Sehschärfe

verwendet, um nicht nur die Auflösung des Substrats, sondern auch Effekte wie z.B. Ausbluten zu messen. Die Herausforderung, feine Speichen (Sektoren) im Zentrum des Sterns zu drucken, kann eine technische Einschränkung des Druckers sein, aber auch, wegen übermäßigen Spreitens der Tinten, ein Merkmal des Substrats.

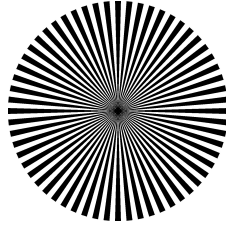


Abb. 3.40: Beispiel eines Siemenssterns mit 60 schwarzen und weißen Sektoren

Kapitel 4

4. Stand der Forschung

Der Stand der Forschung ist fokussiert auf vertiefende Studien, die der vorliegenden Thematik nahe sind: Wechselwirkung zwischen Inkjet-Tinten und porösen Substraten, Verwendung von PVOH zur Verbesserung der Haftung von Inkjet-Tinten und qualitative Auswertung des wasserbasierten Inkjet-Druckverfahrens. Einige Arbeiten präsentieren mehr als eines dieser Themen. Deswegen gibt dieses Kapitel einen chronologischen und keine thematisch geordneten Abriss wieder.

Joachim Schoelkopf | 2002 | Dissertation | University of Plymouth - UK

Observation and modelling of fluid transport into porous paper coating structures [125]

Das Hauptziel der Dissertation von Schoelkopf war die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeiten und porösen Oberflächen, die hauptsächlich aus CaCO_3 bestehen. Inkjet ist eines der diskutierten Druckverfahren, aber in der Analyse sekundär. Schoelkopf verwendet eine neue Methode, die auf Beobachtung der Wechselwirkung von Flüssigkeiten auf gepressten Mineralplatten ohne Bindemitteln beruht. Unter anderem wird gezeigt, dass die Lucas-Washburn-Gleichung nicht zur Erklärung der Flüssigkeitsaufnahme bei den durchgeführten Experimenten herangezogen werden kann. Der Autor schlägt zur Beschreibung seiner Messresultate die Erweiterung der Bosanquet-Gleichung um einen Term, der die Trägheit berücksichtigt, vor.

Er stellt zudem fest, dass in einigen Fällen Oberflächen mit größeren Poren reine Flüssigkeiten langsamer absorbieren als Oberflächen mit kleineren Poren. Diese Erkenntnisse basieren zum Teil auf dem Einsatz von Computersimulationen.

Ran Wei Rioux | 2003 | Masterarbeit | The University of Maine - USA

The Rate of Fluid Absorption in Porous Media [141]

Der Autor untersucht den Einfluss verschiedener Eigenschaften von Inkjet-Tinten (Farbstoff und Pigment) und Substraten (gestrichene und ungestrichene Papiere) auf die Tintenpenetration. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Absorptionsrate von gestrichenen Papieren von der Absorption des Stoffeintrages, der Porengröße, der Art der Beschichtung und der Grenzflächenenergie des Substrats abhängig ist. Rioux beobachtet zunehmende Absorption der Tinte bei erhöhter Saugfähigkeit des Stoffeintrags und bei reduzierter Porengröße, Pigmentstrichmenge und Kontaktwinkel. Der Autor überprüft auch die Verwendung der Lucas-Washburn-Gleichung zur Beschreibung der Absorption und stellt fest, dass sich das absorbierte Volumen proportional zum Term der Gleichung $(\gamma \cos \theta / \mu)^{1/2}$ verhält.

Modelle zur Vorhersage der Absorptionsrate wurden an gestrichenen Papieren getestet

und zeigen, dass ein modifiziertes Modell des Darcy-Koeffizienten bessere Ergebnisse als die anderen getesteten Modelle erzielte. Es ist hier hervorzuheben, dass die Drucktests mit einem Bristow-Absorptionstestsystem durchgeführt wurden, bei dem die Tintensäule auf dem Substrat im Vergleich zu dem Volumen eines Tintetropfens in Inkjet-Druck um ein Vielfaches höher ist.

Erik Svanholm | 2007 | Dissertation | Karlstad University Studies - Schweden
Printability and Ink-Coating Interactions in Inkjet Printing [137]

Svanholm beschäftigt sich mit dem Mechanismen der Sorption und Haftung von Inkjet-Tinten auf beschichteten Papieren, wie auch mit der Bedruckbarkeit und Druckqualität bei diesen Substraten. Darüber hinaus ist diese Arbeit eine Grundlage für die Verwendung von PVOH als Einzelkomponente, aber auch in Kombination mit Siliciumdioxid, zur Herstellung von Feinpapierbeschichtungen. Die Druckqualität von Inkjet-Tinten (Farbstoff und Pigment) wurde durch Messungen von Farbraum, Ausbluten und Textwiedergabe bewertet.

Die Analysen zeigten, dass reine PVOH-Beschichtungen einen großen Farbraum, eine gute Schärfe, eine hohe Glanzvariation, ein stärkeres Ausbluten zwischen den Farben und eine langsame Trocknung bewirken. Bei pigmentbasierten Tinten erscheinen die Druckbilder rissig. PVOH in Kombination mit Siliziumdioxid bildet eine poröse Struktur mit einer größeren Rauheit als die Größe der Pigmentpartikel. Die Tinte dringt schnell in die Poren ein. Die schnellere Aufnahme führt zu weniger Unschärfe und die Rauheit erhöht die Ausbreitung der Tinte, was als Vergrößerung der Linienbreite messbar bzw. sichtbar wird. Weil Farbkomponenten in tiefere Bereiche der Beschichtung eindringen können, ergibt sich der Farbraum tendenziell kleiner. Diese Ergebnisse spiegeln die beschriebenen Eigenschaften für *Swellable* und *Microporous* Inkjet-Substraten in Unterabschnitt 3.1.3 wieder.

Farbstoffbasierte Tinten spannen im Vergleich mit pigmentbasierten Tinten einen größeren Farbraum, wohingegen die letztere zu einer besseren Druckschärfe führen. Querschnittaufnahmen zeigten, dass beide Tintenarten in die Hohlräume zwischen den Partikeln der Beschichtung eindringen, obwohl die farbstoffbasierte Tinte in die Poren des Siliziumdioxids tiefer eindringt und die pigmentbasierte Tinte eher auf der Oberfläche liegt. Svanholm ermittelte, dass die Vergrößerung der Linienbreite (gleichmäßiges Spreiten) von der Grenzflächenenergie beeinflusst wird. Die Unschärfe (ungleichmäßiges Spreiten) wird primär von der Oberflächen-Mikrorauheit bestimmt.

Anna Lundberg | 2011 | Masterarbeit | Mid Sweden University - Schweden
Ink-Paper interactions and effect on print quality in inkjet printing [96]

Lundberg analysiert die Parameter, die die Bewegung von Inkjet-Tinten auf Inkjet-Papieren steuert. Das Ziel ist, die Qualität des Inkjet-Druckverfahrens zu optimieren. Sie schlägt vor, Fixiermittel (Salz, Kalziumchlorid) bei pigmentbasierten Inkjet-Tinten

zu verwenden, um die Aggregation von Molekülen aufzulockern. Sie verwendet die Lucas-Washburn-Gleichung und zeigt, dass die damit kalkulierte Penetrationszeit gut mit ihren Labormessungen korreliert, obwohl die Eindringtiefe überschätzt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenzflächenenergie, die Oberflächenrauheit und die Porosität die Absorption und das Spreiten der Tintentropfen auf Papier beeinflussen. Die qualitativen Tests weisen darauf hin, dass die Detailwiedergabe von der Ausbreitung der Tropfen auf der Oberfläche des Substrats abhängt, welche entsprechend die Druckdichte oder die Schärfe des Ausdrucks begünstigt.

Taina Lamminmäki | 2012 | Dissertation | VTT Technical Research Centre - Finland
The comparative dynamics of bulk liquid flow and interpolymer diffusion during inkjet ink imbibition in porous coating structures [88]

Das Ziel der Arbeit von Lamminmäki bestand darin, die Zeitskalen der physikalischen und chemischen Wechselwirkungen während der Imbibition von farbstoffbasierten Inkjet-Tinten auf verschiedene Beschichtungen aus CaCO_3 , PVOH und Styrolacrylat-Latex (SA) zu bestimmen. Sie beschäftigt sich mit mehreren Aspekten der Wechselwirkung zwischen Inkjet-Tinte und PVOH.

Sie findet heraus, dass, nach dem Kontakt des Tintentropfens mit der porösen Oberfläche, die Kapillarkräfte und die viskose Widerstand der Tinte innerhalb der porösen Struktur konkurrieren. Sie behauptet, dass Kapillare in der Größenordnung von Nanometern den Tintenträger absorbieren und die Aufprallkraft des Tropfens zu einer erzwungenen Benetzung führt.

PVOH absorbiert aufgrund seines hydrophilen Charakters den polaren Träger (z. B. Wasser), allerdings die Quellung des PVOH verringert die Absorptionsrate der Tinte. Lamminmäki zeigt, dass die Absorption des Trägerfluids die Polymermatrix von PVOH öffnet, so dass die Farbstoffmoleküle (ca. 1,3 nm) zwischen den CaCO_3 -Partikeln (ca. 20 - 70 nm) haftet und mit der Verdunstung des Trägerfluids einfach in der Struktur eingeschlossen werden. Im Vergleich ist die Absorptionskapazität von vollständig hydrolysiertem PVOH kleiner (20-30 Gew.-%) als des teilweise hydrolysierten PVOH (30-40 Gew.-%). Von Bedeutung ist auch die Feststellung, dass, in der die amorphen Bereiche des PVOH Wassermoleküle binden können. Die Verbindung erfolgt durch Wasserstoffbrückenbindungen mit den hydrophilen Gruppen des amorphen Bereichs. Die kristallinen Bereiche absorbieren keine Wassermoleküle.

Sónia Cristina Lopes de Sousa | 2012 | Dissertation | University of Beira Interior - Portugal
Studien über die Wechselwirkung zwischen Tinte und Papier beim Inkjet Druckverfahren⁵¹
[94]

In der Arbeit von Lopes de Sousa werden die Einflüsse der chemischen Modifikation der

⁵¹Titel auf Portugiesisch: Estudo da interação tinta/papel na impressão Inkjet

Papier- oberfläche (insbesondere auf Basis von Stärke) auf die Struktur- und Oberflächeneigenschaften der Papiere und die Auswirkung dieser chemischen Veränderung auf die Druckqualität untersucht. Die vorliegende Dissertation greift die Hypothese von Lopes de Sousa auf, dass die Wechselwirkungen zwischen Tinte und Papier von den Eigenschaften des Papiers wie Topographie, Porosität, Grenzflächenenergie und chemischer Zusammensetzung abhängen. Die Eigenschaften der Tinte, wie Oberflächenspannung, Viskosität und die farbgebenden Komponenten (Pigment oder Farbstoff) sind gleichermaßen relevant. Final beeinflussen ebendiese Wechselwirkungen die Druckqualität

Die Ergebnisse von Lopes de Sousa deuten darauf hin, dass Substrate mit einer hochpolaren Komponente einen günstigen Einfluss auf die Druckqualität mit Tinten auf Farbstoffbasis und einen weniger günstigen Einfluss auf Tinten auf Pigmentbasis haben, wie die z.B. Reduzierung des Farbraum. Darüber hinaus wird die Druckqualität bei farbstoffbasierten Tinten stark durch physikalisch-chemische Parameter des Papiers beeinflusst, aber nicht bei pigmentbasierten Tinten. Diese vorteilhafte Wechselwirkung zwischen Farbstofftinten und polaren Oberflächen kann möglicherweise ebenfalls ein Effekt des kationischen Charakters der Oberfläche und daher ein elektrostatischer Effekt mit den anionischen Gruppen der Tinte sein. In diesem Fall bleiben die Farbstoffmoleküle näher an der Oberfläche.

Papiere mit einer geringeren Grenzflächenenergie haben die Ausbreitung der Tinten verringert und damit die optische Druckdichte erhöht. Diese Papiere begünstigen die Wiedergabe feiner Details, wie Linien und Punkte. Die Messungen der Rauheit zeigten, dass eine höhere Rauheit (R_a , R_q) das ungleichmäßige Spreiten der Farbe zu benachteiligt scheint, wodurch die Dichte erhöht und die Unregelmäßigkeit der Linienkontur verringert wurde. Substrate mit geringerer Permeabilität begünstigen langsames und konstantes Eindringen der Tinten. Eine Korrelation zwischen porosimetrischen Eigenschaften und Absorptionsparametern konnte nicht nachgewiesen werden. Lopes de Sousa legt nahe, dass die Porenkonnektivität für die Tintenabsorption von größerer Relevanz ist als die Gesamtporosität oder durchschnittliche Porengröße.

Patricia Kaji Yasumura | 2012 | Dissertation | University of São Paulo (USP) - Brasilien
Charakterisierung der Papiereigenschaften für den Inkjet-Druck⁵² [146]

Yasumura präsentiert eine Studie zur Charakterisierung von Substraten für den Inkjet-Druck, mit Schwerpunkt auf der Rauheit, Porosität und den chemischen Eigenschaften der Oberfläche. Aus den Ergebnissen wurden die Eigenschaften des Papiers quantifiziert und seine Einflüsse auf das Spreiten und die Absorption von Flüssigkeiten identifiziert. Sie behauptet, dass es nicht möglich ist, den Einfluss der vielfältigen Papiereigenschaften auf das Verteilen und Absorbieren von Tinte allein in isolierter Form zu bewerten, sondern stets nur unter Berücksichtigung der der Interdependenzen der Papiereigenschaften.

⁵²Titel auf Portugiesisch: Caracterização de propriedades de papel para impressão por jato de tinta

Sarah Krainer, Chris Smit und Ulrich Hirn | 2019 | Artikel | RSC Advances

The effect of viscosity and surface tension on inkjet printed picoliter dots [78]

In diesem Artikel untersuchen die Autoren den Einfluss unterschiedlicher Viskositäten und Oberflächenspannung auf die Ausbreitung von Flüssigkeiten (Mischungen aus Wasser, Glycerin, Hexandiol und Farbstoff). Die Analyse des Spreitens erfolgt durch die geometrische Veränderung bedruckter Punkte über gestrichene und ungestrichene *High-Speed-Inkjet-Papiere*. Die Untersuchung zeigt empirisch, dass die Variation der Flüssigkeitsviskosität einen 2-3-mal größeren Einfluss auf das Spreiten der Tinten als die Oberflächenspannung hat. Durch die Analyse von Druckpunkten, Penetration und Farbdeckung wurde gezeigt, dass die Oberflächenspannung der Tinte nur auf hydrophoben Substraten eine wichtige Rolle spielt.

Vor dem Hintergrund der hier beschriebenen Arbeiten sowie den angeführten Artikeln in Literaturverzeichnis zeigt sich ein Mehrwert dieser Dissertation in folgenden Aspekten:

- a) Die Untersuchungen zur Modifikation von Substraten für den Inkjet-Druck und die qualitative Analyse der Veränderung der Oberfläche wurden bisher unter Verwendung von Rohpapieren mit quellfähigen oder mikroporösen Beschichtungen durchgeführt. Hier wird gestrichener Karton untersucht, der in Verpackungen hauptsächlich für Pharmazeutika und Kosmetika verwendet wird. Der mehrschichtige Charakter dieses Materials stellt bei verschiedenen Analysen eine Schwierigkeit dar.
 - b) Die in mehreren Studien vorgeschlagenen Modifikationen der Oberfläche für Inkjet-Druck verändern die Beschichtung von Rohpapieren industriell. Dabei handelt es sich um Veränderungen in der Zusammensetzung der Streichmasse. Diese Studie schlägt eine Veränderung der Kartonoberflächen durch eine Vor- und Nachbehandlung vor, die sowohl für pigmentbasierte Tinten als auch für farbstoffbasierte Tinten anwendbar ist.
 - c) Die Studien konzentrieren sich auf Tinten die entweder pigment- oder farbstoffbasiert sind. Hier wird eine Analyse beider Tintentypen durchgeführt, die sowohl in SOHO-Druckern als auch in industriellen Inkjet-Drucker anwendbar sind. Diese Studie umfasst: Validierung bei der Modifizierung der Substrate, qualitative Analyse und Untersuchungen der Interaktion mit den Kartons für 4 verschiedene Tinten.
-

Die vorliegende Dissertation stützt sich auf eine Vielzahl von Artikeln der einschlägigen Fachliteratur, die sich mit Substrat- und Tintenparametern sowie deren Einfluss auf die Benetzung und Haftung befassen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden besonders in Abschnitt 3.2 zitiert. Um die Recherche von zukünftigen Arbeiten zu unterstützen, ist ein Teil dieser Artikel nachfolgend aufgelistet:

Jahr	Autoren Titel
2006	Alava, Mikko ; Niskanen, Kaarlo: The physics of paper
2005	Anderson, Daniel M. Imbibition of a liquid droplet on a deformable porous substrate
1999	Apel-Paz, Meirav ; Marmur, Abraham Spreading of liquids on rough surfaces
2010	Batz-Sohn, Christoph ; Lembach, Andreas ; Nelli, Leo ; Müller, Astrid ; Roisman, Ilia ; Tropea, Cam Speed of Ink Absorption on Modified Paper Surfaces
2002	Clarke, A. ; Blake, T. D. ; Carruthers, K. ; Woodward, A. Liquid Droplets on Porous Surfaces
2003	Desie, G. ; Pascual, O. ; Pataki, T ; de Almeida, P. ; Mertens, P. ; Allaman, S. ; Soucemarianadin, A. Imbibition of Dye and Pigment-Based Aqueous Inks into Porous Substrates
2005	Gane, P. A. C. Absorption Properties of Coatings: A Selected Overview of Absorption Criteria Derived from Recent Pore Network Modelling
2014	Gigac, Juraj ; Stankovská, Monika ; Letko, Michal ; Opálená, Elena The effect of base paper properties on inkjet print quality
2014	Gigac, Juraj ; Stankovská, Monika ; Pažitný, Andrej Influence of the coating formulations and base papers on inkjet printability
2015	Hasebe, Satoshi ; Uesaka, Tomozumi ; Tanaka, Kumiko ; Sekimoto, Masahiko ; Nakao, Motoharu ; Hamazaki, Toshinobu ; Kurihara, Eizo Effects of Ink-Paper Interaction and System Parameters on Drying Quality in High-Speed Color Inkjet with Infrared Ray Heater
2014	Ivana, Juric ; Danijela, Ranelovic ; Igor, Karlovic ; Ivana, Tomic Influence of the surface roughness of coated and uncoated papers on the digital print mottle
2015	Kraushaar, Andreas ; Oberhollenzer, Berthold Grundlagen zur Etablierung der Normung für den Toner und Inkjet-basierten Digitaldruck
2010	Kettle, John ; Lamminmäki, Taina ; Gane, Patrick A review of modified surfaces for high speed inkjet coating
2000	Ruijter, Michel J. ; Charlot, Magali ; Voué, Michel ; Coninck, Joël de Evidence of Several Time Scales in Drop Spreading
2014	Soleimani-Gorgani, A. ; Jalili, M. Effect of Ink Formulation and Paper Surface Morphology on Ink-jet Printing Properties
2017	Tan, Hua Absorption of picoliter droplets by thin porous substrates
2003	Yang, Li A study in ink-jet color reproduction
2003	Yip, Kwok L. ; Lubinsky, Anthony R. ; Perchak, Dennis R. ; Ng, Kam C. Measurement and Modeling of Drop Absorption Time for Various Ink-Receiver Systems

Kapitel 5

5. Verwendete Materialien, Planungen und Methoden

Entsprechend Abschnitt 2.1 werden bei den Forschungsarbeiten zwei primäre Ziele verfolgt.

Das erste Ziel, die Haftung und Festigkeit der Inkjet-Tinten auf beschichteten Kartons zu verbessern und die daraus resultierende Druckqualität zu untersuchen, wurde in drei Teilen durchgeführt.

Für die Experimente zur Eingrenzung des Problems wurden zuerst die verwendeten Materialien (Substrate, Tinten, Polymere) und ihre entsprechenden Auswahlkriterien definiert, die in Abschnitt 5.1 beschrieben werden. Drei Vorversuche (Drucktests) wurden durchgeführt, deren Ablauf in Unterabschnitt 5.2.1 erklärt wird. Die Ergebnisse dieses ersten Teils, «Lösungsansatz» genant, förderten die Planung und Entwicklung der zwei weiteren Teile. In dem zweiten Teil wurden Experimente zur Validierung des Lösungsansatzes durchgeführt, um den vorgeschlagenen Ansatz zur Erhöhung der Haftung und Festigkeit der Inkjet-Tinten auf beschichteten Kartons zu validieren (Planung und Methode in Unterabschnitt 5.2.2 und Ergebnisse in Abschnitt 6.2). In dem dritten Teil wurden Experimente zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes realisiert, mit dem Vorhaben, anhand qualitativer Attribute wie optische Dichte, Tonwertzunahme, Linienwiedergabe, Homogenität und Auflösung, den vorgeschlagenen Lösungsansatz zu bewerten (Planung in Unterabschnitt 5.2.3 und Ergebnisse in Abschnitt 6.3).

Das zweiten Ziel, die Auswirkung von Viskosität, Oberflächenspannung, Grenzflächenenergie, Permeabilität und Rauheit auf das Spreiten von wasserbasierten Inkjet-Tinten auf beschichteten Kartons zu analysieren, wurde ebenfalls in drei Teile gegliedert.

Zuerst wurden Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Substrate und Charakterisierung der verwendeten Tinten und Primern durchgeführt. Die Messungen wurden auf der Grundlage beschriebenen Kenngrößen dieser Materialien ausgewählt (Unterabschnitten 3.2.2 bzw. 3.2.1). Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.4 (Substrate) und 6.5 (Tinten und Primer) präsentiert. Der letzte Teil der Arbeit stellt die Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten vor (Planung in Unterabschnitt 5.2.4 und Ergebnisse in Abschnitt 6.6).

Die Planung der Experimente und Auswahl der Methoden sind in Abschnitt 5.2 erhalten. Die Laborumgebung und Versuchsdaten für die Charakterisierung von Substraten, Tinten und Primer sind in Abschnitt 5.3 beschrieben. Die Abb. 5.1 fasst diese gesamte Vorgehensweise zusammen.

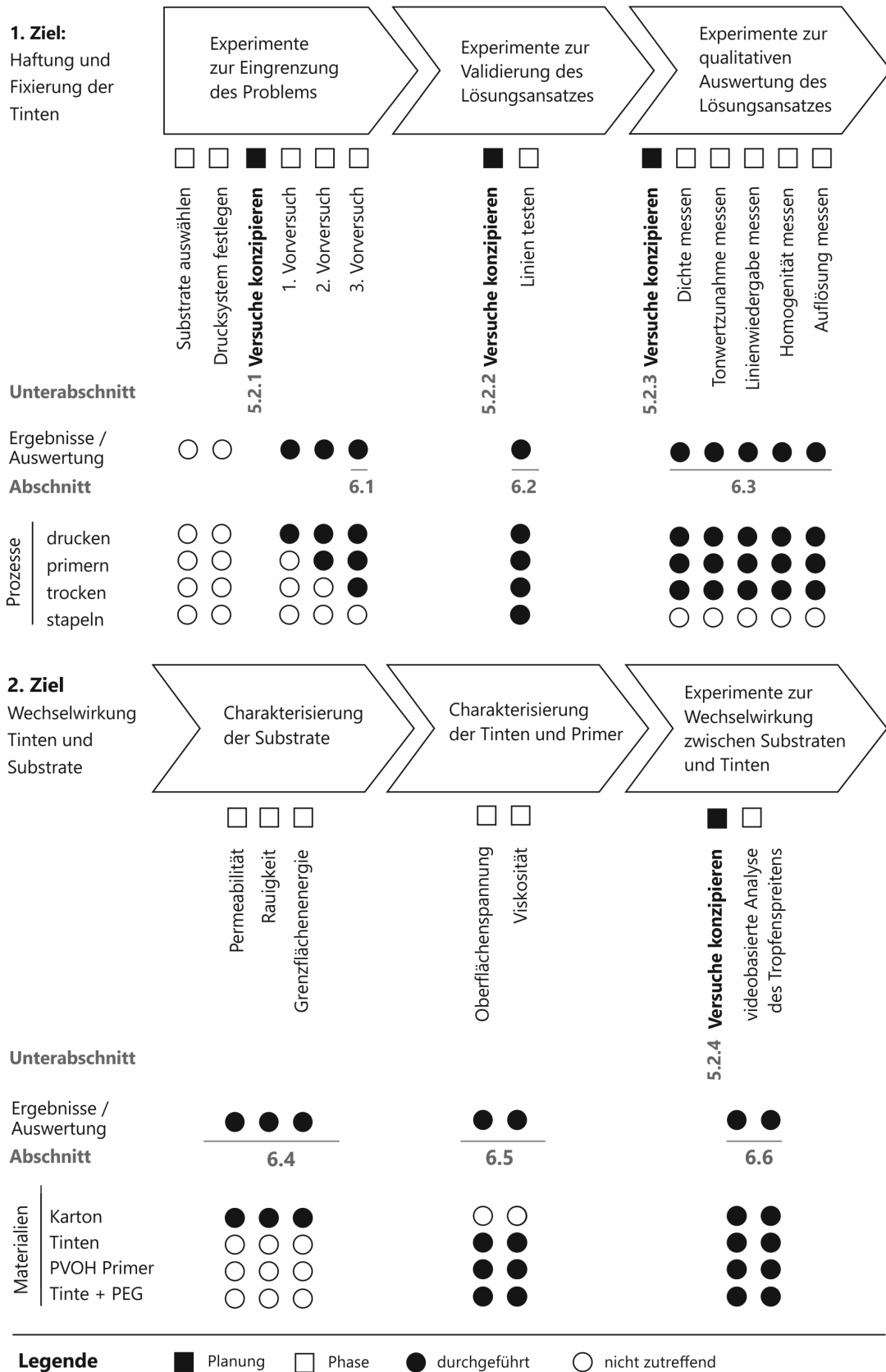


Abb. 5.1: Vorgehensweise der Arbeit

5.1. Verwendete Materialien und Auswahlkriterien

5.1.1. Substrate

Im ersten Schritt wurde das Angebot von beschichtetem Karton vieler einschlägiger Anbieter im europäischen Markt sondiert: Smurfit Kappa, Mondi, Sappi, International Paper, Stora Enso, Zanders, Billerudkorsnäs, Metsä Board und Iggesund. Daraus entstand eine Long List mit 217 Produkten⁵³. Diese Liste wurde auf der Basis folgender Kriterien reduziert: a) Hauptsächlich werden die Kartons, nach Angaben der Hersteller, für die Herstellung von Faltschachteln für pharmazeutische und kosmetische Verpackungen verwendet. b) Zu Vergleichszwecken sollten die Kartons einige gemeinsame Merkmale aufweisen, nämlich Zellstoffkarton (GZ) oder Chromokarton (GC) mit ca. $300 \text{ g/m}^2 \pm 5$, nicht ultraweiss, satiniert, extra gebleicht, ungebleicht oder farbig (z.B. Mappenkarton). c) Der Vertrieb ist auf dem deutschen Markt.

Die Short List enthielt noch 17 Kartons, aus denen die endgültige Auswahl von 6 Kartons nach Quellungs- bzw. Verformungs-Tests getroffen wurde. Beschichtete Kartons sind bis zu einem gewissen Grad hydrophob, da sie für den Einsatz im Offsetdruckverfahren hergestellt werden, in dem Wasser zum Bildübertragungsprozess beiträgt, aber von der Kartonbeschichtung nicht absorbiert werden sollte. In Kontakt mit Wasser ist der Quellungseffekt dieser Substrate relativ gering. Andere Lösungsmittel können jedoch die Oberfläche der Kartons angreifen. Ein geplantes Kriterium zur Charakterisierung der Substrate ist die Messung der Grenzflächenenergie. Beim Kontakt mit Testflüssigkeiten zur Kontaktwinkelmessung wie Formamid, Ethylenglykol und Diiodmethan zeigten einige Kartons starkes Schwellverhalten und eine Deformation der Oberfläche. Dies macht die qualifizierte Ermittlung der Grenzflächenenergie mittels der Randwinkelmethode unmöglich. Entsprechend wurden für die weiteren Untersuchungen nur die Kartons aus der Short List ausgewählt, die kein bzw. sehr geringes Quell- und Deformationsverhalten zeigten.

Zusätzlich wurde ein Karton ausgewählt, auf den die beschriebenen Merkmale nicht zutreffen: Chromolux 700, mit gussgestrichener Hochglanzbeschichtung (AZ). Er unterscheidet sich von den anderen 6 ausgewählten Kartons durch die Oberfläche. Bei den Messungen und Experimenten zeigte sich Chromolux 700 vielfach uneinheitlich gegenüber den anderen Materialien und bot somit eine Referenz für die Eignung der gewählten Messmethode. Die Liste mit den Hauptmerkmalen der 7 Kartons, mit denen die Experimente durchgeführt werden, zeigt Tab. 5.1.

⁵³Stand: Juni 2016

Tab. 5.1: Technische Daten | Verwendeten Kartons

Karton Kennung	Produktbezeichnung	Bezeichnung (S.Tab. 3.3)	Grammatur	Dicke	Feuchtigkeitsgehalt	Glätte	Wasseraufnahme Oberseite	Anzahl Beschichtungen Oberseite	
			[g/cm ²]	[μ m]	[%]	[μ m]	[g/m ²]		
B01	Algro Design Duo	GZ	300 ±5%	365 ±5%	5,5 ±1%	1,8 ±6%	31 ±3%	2	[122]
B02	Arktika	GC	300 ±4%	474 ±5%	8,2 ±1%	< 1,3 k.A.	< 55 k.A.	2	[58]
B03	Carta Solida	GC	295 ±2%	505 ±3%	8,1 ±1%	1,0 max. 1.3	40 k.A.	3	[104]
B04	Chromolux 700	AZ	300 k.A.	345 ±3%	k.A. k.A.	1,0 k.A.	32 k.A.	1	[150]
B05	Ensocoat	GZ	300 ±4%	365 ±4%	6,5 k.A.	0,9 max. 1.4	30	2	[134] [133]
B06	Invercoat G	GZ	300 ±4%	395 ±4%	6,0 ±1%	0,9 ≤ 1,4	30 ≤ 40	3	[57]
B07	Performa Bright	GC	295 +3% / -5%	505 ±5%	8,2 ±1	1,0 max. 1,7	30 max. 60	3	[135]

5.1.2. Tinten

Bei den Experimenten wurden zwei Tintensätze verwendet. Der erste Tintensatz „C“ sind SOHO-Tinten und ihre Daten sind in der (Tab. 5.2)⁵⁴. Dies sind die original Tinten des Herstellers für den bei den Experimenten eingesetzten Drucker. Der Auswahl des Druckers lagen folgenden Kriterien zugrunde: für den Transport von Substraten mit Dicke von 500 μ m geeignet, für das Drucken mit Tinten auf Farbstoffbasis als auch Pigmentbasis geeignet, Druckpatronen können durch wiederbefüllbare Patronen ersetzt werden. So lassen sich auch andere als die original Tinten untersuchen. SOHO Drucker verdrucken im Allgemeinen keine reinen Farben wie aus den Tintenpatronen. Vielmehr steuert ein implementiertes Farbmanagementsystem, das sich nicht abschalten lässt, die Farbe jedes Dots aus dem Zusammendruck mehrerer Tinten. Durch Einsetzen leerer Tintenpatronen in die übrigen Positionen kann das Farbmanagementsystem und der Zusammendruck unterlaufen und eine Farbe unverfälscht gedruckt werden.

Der zweite Tintensatz „T“ besteht aus zwei Tinten für industrielle Inkjet-Drucker,

⁵⁴Die genaue Tintenrezeptur wird von Herstellern nicht offengelegt.

eine auf Pigmentbasis und die andere auf Farbstoffbasis. Beide wurden eigens für die durchzuführenden Untersuchungen entwickelt. Die „T“-Tinten (Tab. 5.3) haben einen Träger (Wasser) und einen Co-Träger (2-Methyl-1,3-Propandiol), der für beide Formulierungen identisch ist. Die Tinten sind Schwarz. Diese Farbe wurde angesichts der Experimente zur Eingrenzung des Problems (Unterabschnitt 5.2.1) ausgewählt.

Tab. 5.2: Zusammensetzung und pH | Tinten „C“

		PGI-550 [19] Pigment K (Kp-C)	CLI-551 [15] Farbstoff C	CLI-551 [17] Farbstoff M	CLI-551 [18] Farbstoff Y	CLI-551 [16] Farbstoff K (Kf-C)
Ethylene urea	[%]			5 - 10	5 - 10	5 - 10
Thiadiazole Azo dye	[%]				1 - 5	
Pyridine Azo dye	[%]			1 - 5		
Substituted phthalocyanine salt	[%]					1 - 5
Glycerin	[%]	10 - 15	5 - 10	1 - 5	5 - 10	5 - 10
Glycol	[%]	5 - 10	15 - 20		10 - 15	10 - 15
Lactam	[%]	5 - 10				
Wasser	[%]	60 - 80	60 - 80	60 - 80	60 - 80	60 - 80
2-Pyrrolidinone	[%]		5 - 10		1 - 5	
1,2-benzisothiazol- 3(2H)-one	[%]		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
pH		7 - 9	7 - 8	7 - 9	7 - 8	7 - 9

Tab. 5.3: Zusammensetzung und pH | Tinten „T“

	Pigment K (Kp-T) VP TH-C-K RI-NIN-21	Farbstoff K (Kf-T) VP TH-C-K RI-NIN-22
Wasser [%]	76	72
2-Methyl-1,3-Propandiol [%]	18	22
pH	9,5	9,5

5.1.3. Polymere

Aufgrund seiner Eigenschaften (Unterabschnitt 3.1.4) und angesichts seiner in der Fachliteratur umfassend beschriebenen Eigenschaften im Zusammenhang mit Inkjet-Druckverfahren wurde PVOH als Basismaterial für die Entwicklung einer Grundierung

(Primer) ausgewählt. Normalerweise ist PVOH Bestandteil von industriell hergestellten Beschichtungen für Inkjet-Druck Substrat (*Swellable*-Typ) und Bindemittel für Pigmentstriche von beschichteten Kartons. In dieser Arbeit wurde PVOH als Polymerlösung auf Wasserbasis auf die Kartons (vgl. Tab. 5.1.1) mittels Draht rakel aufgetragen. Die Eigenschaften der 4 PVOH-Varianten⁵⁵, die in den Tests verwendet wurden, sind in Tab. 5.4 beschrieben. Das PVOH war im Anlieferungszustand jeweils schuppenförmig und wurde mit Wasser in Lösung gebracht.

Tab. 5.4: Technische Daten des verwendeten PVOH | [83] [85]

Bezeichnung	Viskosität (4%iger H_2O -Lösung) [mPa·s]	Hydrolysegrad [mol%]	pH	Mw [g/mol]	Pw
6 - 88	5,0 - 6,0	86,7 - 88,7	4,5 - 7,0	37000	750
23 -88	20,5 - 24,5	87,0 - 89,0	5,0 - 7,0	150000	3100
4 - 98	4, 0 - 5,0	98,0 - 98,8	4,5 - 7,0	31000	630
20 - 98	18,5 - 21,5	98,0 - 98,8	4,5 - 7,0	125000	2800

Für die Erhöhung der Viskosität der Tinten bei den Experimenten zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten (in Unterabschnitt 5.2.4) wurde Polyethylenglycol (PEG) ausgewählt. PEG ist ein ungiftiges, wasserlösliches Polymer. Selbst in hohen Konzentrationen und hoher molarer Masse kann es vollständig gelöst werden. Die Schuppenform (statt flüssig) wurde gewählt, um eine Kontamination mit anderen, vom Hersteller zugesetzten Additiven, z.B. Konservierungsmittel, zu vermeiden. Eine hohe molare Masse ($M = 8.000 \text{ g/mol}$ ⁵⁶) wurde gewählt, um die Polymerkonzentration in den Tinten so niedrig wie möglich zu halten.

5.2. Planungen der Experimente und Auswahl der Methode

5.2.1. Planung - Experimente zur Eingrenzung des Problems

Im ersten Schritt sollen Probleme identifiziert⁵⁷ und eingegrenzt sowie Lösungsansätze überprüft werden. Dafür wurden drei Vorversuche konzipiert, die die folgenden Fragen beantworten sollten:

- a) Gibt es Auffälligkeiten hinsichtlich Haftung und Trocknung bei den SOHO Tinten (Tab. 5.2)? → 1. Vorversuch
- b) Besteht die Möglichkeit, den unter a) auffällig identifizierten Problemen mit einem Primer aus einer wässrigen Lösung aus PVOH entgegenzuwirken? → 1. Vorversuch
- c) Werden die ggf. unter a) und b) identifizierten Probleme durch den Einsatz von

⁵⁵Firma: Kuraray Europe GmbH - Hattersheim am Main, Deutschland

⁵⁶Firma Merck KGaA - Darmstadt, Deutschland (früher Sigma-Aldrich)

⁵⁷Der Ausgangspunkt dieser Arbeit sind die Aussagen von Lopes de Souza [94] und Svanholm [137] und Pond [115] über die ineffiziente Haftung bzw. Festigkeit von wasserbasierten Inkjet-Tinten auf beschichteten Kartons und über die qualitativen und verfahrenstechnischen Unterschiede zwischen pigment- und farbstoffbasierten Tinten.

Trocknungsassistenten (Wärme und Lüftung) reduziert? → 2. Vorversuch

d) Werden die ggf. unter a) und b) identifizierten Probleme durch den Einsatz von Trocknungsassistenten (IR-Strahlung) reduziert? → 3. Vorversuche

e) Können die ggf. unter a) und b) identifizierten Probleme durch ein größeres Auftragsvolumen von PVOH-Primer reduziert werden? → 3. Vorversuch

Das verwendete Testchart für den 1. und 2. Vorversuch ist in Abb. 5.2 gezeigt und hat folgende Elemente: vier Felder mit den Grundfarben C, M, Y und K (f = farbstoffbasiert, p = pigmentbasiert) in Flächendeckungen von 20, 50 und 100%, vier Felder von Flächendeckungskombinationen (CY, YM und CM) in Flächendeckungen von 20, 50 und 100%. Dieser Satz von Feldern wurde 4 Mal auf einen Karton im A4-Format gedruckt. Die technischen Daten des Druckers, der für alle Drucktests dieser Arbeit verwendet wurde, sind in der Tab. 5.5 gelistet.

Tab. 5.5: Technische Daten | Drucker Canon IX6850

Parameter	Einheit	Daten
Druckgeschwindigkeit SW	Seite/Min	14,5
Druckgeschwindigkeit farbig	Seite/Min	10,4
Auflösung	dpi	9600 x 2400
Tintentröpfchengröße	pl	ca. 1
Farben	-	farbstoffbasis: C M Y Kf pigmentbasis: Kp

Eine Besonderheit des Canon Druckers ist das Farbseparationsprofil. Die PDF-Datei sollte ein Ausgabeprofil in RGB anstelle von CMYK haben. Dieses Merkmal wird in Appendix A (vgl. S. 174) illustriert und erläutert.

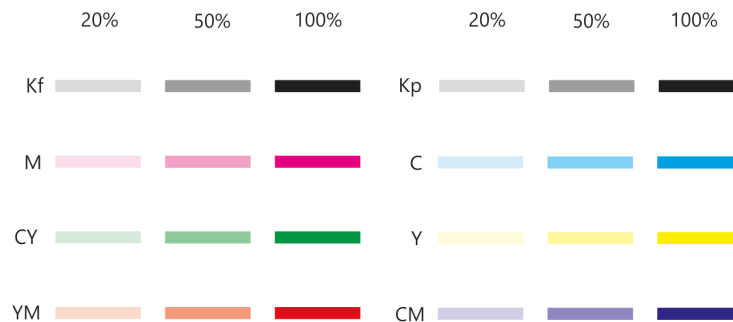


Abb. 5.2: Testchart zur Eingrenzung des Problems | 1. und 2. Vorversuchen | Kf = farbstoffbasierte, schwarze Tinte und Kp = pigmentbasierte, schwarze Tinte

1. Vorversuch - Farben und Primer

Von jedem Karton (B01...B07) wurden sechs A4-Bogen mit dem Testchart gedruckt: drei Bogen ohne Primer und drei Bogen mit Primer (insgesamt 36 Bogen mit jeder

der 12 entwickelten Primers). Die 12 Rezepturen (Tab. 5.6) mit drei unterschiedlichen PVOH-Anteilen (1, 2 und 4 Gew.-%) in destilliertem Wasser wurden auf der Grundlage der Herstellerangaben gemischt. Die Mischungen wurden mit Hilfe eines Magnetrührers mit Temperaturkontrolle vorbereitet. Die Primer wurden mit einem Drahttrinkel (Engl: *mayer-bar, wire wound rod*) auf die Kartons aufgetragen ($V \approx 0,6 \text{ g/m}^2$).

Tab. 5.6: Rezepturen Primer

Primer Kennung	PVOH-Bezeichnung (vgl. Tab. 5.4)	PVOH [Gew.-%]	Wasser [Gew.-%]
P01	6 - 88	2	98
P02	23 - 88	2	98
P03	20 - 98	2	98
P04	4 - 98	2	98
P05	6 - 88	4	96
P06	23 - 88	4	96
P07	20 - 98	4	96
P08	4 - 98	4	96
P09	6 - 88	1	99
P10	23 - 88	1	99
P11	20 - 98	1	99
P12	4 - 98	1	99

Nach 5, 10, 60 Sekunden und einem Tag nach dem Druck wurde mit einem Kartonstreifen über die Felder des Testcharts (Abb. 5.2) gewischt (Wisch-Test). Der 1. Vorversuch zeigte, dass die Felder C, M und Y sowie die Farbmischungen CY, YM und CM bei einigen der Primer Vorbehandlungen innerhalb von 5 Sekunden akzeptable Haftung und Festigkeit erreichten. Im Gegensatz dazu wiesen Kf-C und Kp-C bei 100% Flächendeckung keine Verbesserungen von Haftung und Festigkeit auf. Auch nach 24 Stunden war die Tinte Kp-C noch nicht wischfest.

2. Vorversuch - Trockenschrank

Eine weitere Serie von Testcharts mit den 4 Primer-Rezepturen, die im 1. Vorversuch die schnellste Haftung und Festigkeit zeigten (Wisch-Test) – nämlich P01, P03, P06 und P07 – wurde durchgeführt. Die Bogen wurden nach dem Druck in einem Trockenschrank (Technische Daten in der Tab. 5.7) bei der Temperatur von $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ für 10, 30 und 60 Sekunden gelagert, in einem Fall ohne und im einem weiteren Fall mit konstanter Belüftung. Beim anschließenden Wischtest konnte keine Veränderung zur Haftung und Festigkeit bei Raumtemperatur festgestellt werden.

Tab. 5.7: Technischen Daten | Trockenschrank Memmert UL 30

Paramter	Einheit	Daten
Max. Temperatur	°C	220
Abweichung	°C	± 2%
Auflösung Temperatur	°C	1

3. Vorversuch - Infrarot-Strahlung und Auftragung des Primers

Einige vorausgelaufene Tests haben gezeigt, dass IR-Strahlung zusammen mit dem Primer die Tintenhaftung signifikant erhöhen könnte. Die Temperatur des IR-Strahlers wurde schrittweise (100 °C) angehoben. Ein vorgegebenes Zeitfenster für das bestrahlen des Substrats betrug ca. 2 Sekunden. Für dieses Zeitfenster lag die Temperatur, die signifikante Ergebnisse zeigte (vgl. Tab.: 6.2 - Gruppe C und D), bei 500 °C. Diese Temperatur ist die Heizflächentemperatur (Strahler), das Substrat bzw. die Tinte kann nur einen Teil der Energie absorbieren.

Auf der Grundlage dieser Tests wurde der 3. Vorversuch konzipiert und durchgeführt. Das Ziel war, zu untersuchen, ob die IR-Strahlung, der Primer oder die Kombination von beiden zur Verbesserung der Tintenhaftung beigetragen hat. Zusätzlich wurden die Auftragsvolumina des Primers variiert. Die technischen Daten des IR-Strahlers, der für die Experimente verwendet wurde, sind in der Tab. 5.8 dokumentiert.

Tab. 5.8: Technischen Daten | Infrarotstrahler Elstein T-HTS 800 [42, S.3]

Paramter	Einheit	Daten
Leistung	W	800
Temperatur	°C	bis 860
Heizflächen	cm ²	144
Wellenlängen	µm	2 - 10
Abstand Strahler	mm	38 ± 1

Zwischen den vier Primern, die dieses Versuchs waren, gab es wenige Unterschiede in den Ergebnissen. Der Primer P07 zeigt marginal bessere Ergebnisse als die anderen drei, d.h. das Schmieren wurde reduziert und er hat eine gleiche Auswirkung bei allen Kartons, während die Ergebnisse von P01, P03 und P04 je nach Karton stark variieren. P07 wurde für die weiteren Experimente ausgewählt.

P07 wurde mittels drei Drahrakel mit verschiedenen Volumina aufgetragen: Stab⁵⁸-W: $V \approx 0,6 \text{ g/m}^2$ (zuvor verwendet), Stab-G: $V \approx 1,2 \text{ g/m}^2$ und Stab-R: $V \approx 1,8 \text{ g/m}^2$. Ab dieser Stelle wurden die Parameter reduziert und die Experimente nur noch mit schwarzer Tinte, sowohl pigmentbasiert als auch farbstoffbasiert, fortgeführt, um auf die

⁵⁸Stab ist hier das Werkzeug (Drahrakel) für die Übertragung der Primer auf das Substrat.

Unterschiede zwischen Tinten auf Pigmentbasis und auf Farbstoffbasis zu fokussieren. Das Testchart nur mit schwarzen Feldern (100% Farbdeckung) ist in der Abb. 5.3. Die CMY-Tinten wurden lediglich in den 1. und 2. Vorversuchen verwendet, um zu überprüfen, ob die Verwendung des Primers einen besonderen Einfluss auf sie haben würde, was nicht der Fall war.

Die sieben Felder im Testchart wurden in Zeitintervallen (unmittelbar, 5, 10, 15, 30, 60 und 120 Sekunden nach dem Druck bzw. nach der IR-Bestrahlung) mit einem Kartonstreifen abgewischt. Das Ziel war, zu analysieren, ob eine erhöhte Auftragsmenge des Primers einen Einfluss auf die Haftung und/oder auf die Festigkeit⁵⁹ gegen Abrieb hat und in welchem Zeitintervall.

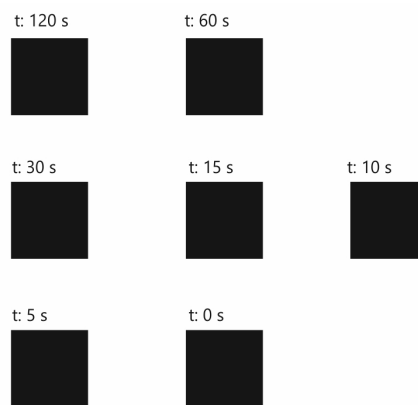


Abb. 5.3: Testchart zur Eingrenzung des Problems (3. Vorversuch) und zur Validierung des Lösungsansatzes (vgl. S. 84 - t: Zeit nach dem Druck)

Das Experiment wurde in vier Versuchsgruppen (vereinfacht: Gruppen) durchgeführt (Tab. 5.9). In Gruppe A wurde keine Vorbehandlung (Primer) oder Nachbehandlung (IR-Strahlung) angewendet. Bei den Kartons in der Gruppe B wurden drei verschiedene Volumina von Primer aufgetragen, jedoch ohne IR-Behandlung. Die Kartons der Gruppe C wurden mit IR bestrahlt, erhielten aber keine Vorbehandlung. Die Kartons der Gruppe D wurden mit drei verschiedenen Volumina Primer vorbehandelt und nach dem Druck mit IR gestrahlt. Die Ergebnisse dieser Experimente wurden bereits in dem Paper „*Cardboards printed with water based inkjet inks*“ [119] vorgestellt.

Tab. 5.9: ABCD-Versuchsgruppen

Gruppe	Vorbehandlung mit Primer P07	Nachbehandlung mit IR-Strahlung
A	nein	nein
B	ja, in 3 Volumina	nein
C	nein	ja
D	ja, in 3 Volumina	ja

⁵⁹Dass die Tinten auf dem Substrat fixiert ist, wird im Weiteren mit dem Begriff *Festigkeit* beschrieben.

Zudem wurde die Möglichkeit, Primer mittels Draht rakel aufzutragen, experimentell untersucht.

Die Anwendung eines Draht rakel zur Papierbeschichtung im Labormaßstab ist ein gängiges Verfahren. Es können jedoch Schichtdickenschwankungen auftreten. Schon bei geringen Mengen verändert ein Auftragen von Primer die Oberfläche der Kartons optisch (Zunahme des Glanzes). Minder- und Überschuss Mengen des Auftrags sind visuell leicht auszumachen. Diese Abweichungen treten hauptsächlich auf der Ober- und Unterkante des Bogens auf. Im Druckbereich (Mitte des Bogens) ist es weder visuell noch haptisch möglich, die Dicke der aufgetragenen Schicht zu bewerten.

Entsprechen werden die aufgetragenen Schichten von Primer mittels eines Spektralphotometers numerisch bewertet. Das Prinzip dieser Methode beruht darauf, dass PVOH die Wirkung von optischen Aufhellern (OBA) erhöht. Holik erklärt: „*Optical brighteners work only when they are fixed to a carrier. A good carrier is linear and contains OH- or other hydrophilic groups*“. Die Zugabe von Stärke, Carboxymethylzellulose (CMC) oder PVOH erhöhen die Wirkung von optischen Aufhellern [54, S.270]. Dieser Erklärung wurde von Bohn wiedergelegt, der als Grund für die erhöhte Emission in blauer Richtung eine Verzögerung der Fluoreszenzlebensdauer angibt [11, S. 131-132].

Der Standard ISO 13655:2017 [59] spezifiziert für die Druckindustrie vier Mess- und Beleuchtungsbedingungen unter Berücksichtigung optischer Aufheller in Papier (Tab. 5.10 ⁶⁰), deren typische Anwendungen in der Tab. 5.11 beschrieben sind.

Tab. 5.10: Mess- und Beleuchtungsbedingungen für die Druckindustrie [79, S.37] [59]

Messmodi	Anregung	UV-Anteil	Pol-Filter	UV-Cut Filter	Bezug	Messunterlage
M0	Glühlampe	gering	nein	nein	D50/2°	wb / bb
M1	D50	hoch	nein	nein	D50/2°	wb / bb
M2	D50	keiner	nein	ja	D50/2°	wb / bb
M3	D50	keiner	ja	ja	D50/2°	wb / bb

Die Papierindustrie verwendet D65/10° als Lichtart/Standardbeobachterwinkel zur Messung des UV-Anteils im Substrat. Diese Anregung in Spektralphotometern für die Druckindustrie ist allerdings nicht üblich. Fogra schlägt daher eine alternative Methode – unter Verwendung der D50/2° sowie den beiden Messbedingung M1 und M2 – vor. Diese Methode misst nicht das Aufhellen des Substrats, sondern ihre Verblauung, da beide Effekte durch OBAs verursacht werden. In der Gleichung 5.1 wird die Berechnung

⁶⁰Bei M2: Anregung mit D50 nicht zwingend, es reicht eine kontinuierliche Verteilung im sichtbaren Bereich [79, S.37] | wb/bb: *white backing* / *black backing*

Tab. 5.11: Messmodi bei spektralphotometrischer Messung | Typische Anwendung [13, S.48]

Messmodus	Typische Anwendung
M0	„Konventionelle Farbmessung in Vorstufe und Druck, Erstellung ICC Profile“ Er wird zwar immer noch verwendet, ist aber ein obsoleter Messmodus.
M1	„Physikalisch korrekte Farbmessung in Vorstufe und Druck, Erstellen hochwertiger ICC-Ausgabeprojile unter Berücksichtigung der Aufhellung“
M2	„UV-freie Farbmessung unter Ausblenden des UV-Anteils im Messlicht“
M3	„Farbdensitometrie für Nass-Trocken-Kompensation und selektive Densitometrie (CMYK); Spektraldensitometrie für Sonderfarben“

dazu vorgestellt, wobei der Δb^* -Anteil⁶¹ der Aufheller-Index ist, berechnet durch die Differenz des b^* -Anteils bei Messmodus M1 und bei Messmodus M2 [13, S.48] [79, S.37] nach [59].

$$\Delta b^* = CIEb_{M1}^* - CIEb_{M2}^* \quad (5.1)$$

Zur Ermittlung des Δb^* -Anteils wurden an 100 Feldern (Bereich: 10 x 10 mm xy-Abstand: 5 mm gleichmäßig auf einen Bogen in A4-Format verteilt Abb. 5.4) farbmimetrische Messungen mithilfe des Spektralphotometers Konica Minolta FD-9 durchgeführt und die $CIEL^*a^*b^*$ -Koordinaten verrechnet. Drei unbedruckte Bogen je Karton ohne Primer und drei unbedruckte Bogen je Karton mit Primer P07 beschichtet wurden gemessen.

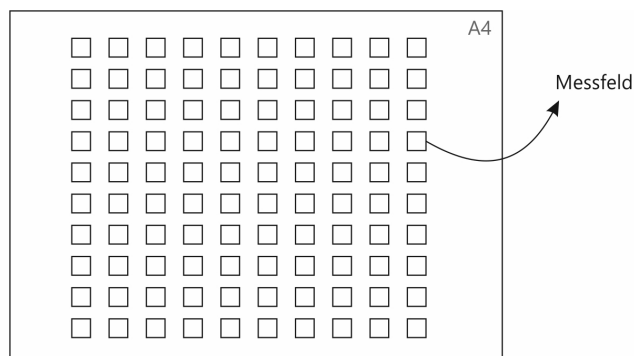


Abb. 5.4: Testchart | Ermittlung Δb^*

Für weitere Messungen mit dem Spektralphotometer wurde der Messmodus M1 festgelegt. Aus den Messungen von Δb^* wurde ermittelt, dass alle Kartons außer B04 einen sehr hohen Anteil an optischen Aufhellern aufweisen.

5.2.2. Planung - Experimente zur Validierung des Lösungsansatzes

Basierend auf dem Ergebnis des 3. Vorversuchs wurde ein Test zur Validierung des Lösungsansatzes konzipiert und durchgeführt.

⁶¹ $CIEL^*a^*b^*$ -Farbraum, in dem b^* die Gelb-Blau-Achse, mit Werten von -100 bis +150, ist.

In einem Gedankenmodell wurde eine Produktionslinie analog zu industriellen Inkjet-Druckmaschinen entworfen (Abb. 5.5). In dieser Linie durchlaufen die Bogen eine Druckmaschine mit zwei Einheiten: das Inkjet-Druckwerk für den Druck und ein IR-Bestrahlungsstation. Das Lackierwerk für die Primerauftragung ist in diesem Fall offline. Die Option eines Inline-Lackierwerks - bei industriellen Anlagen durchaus üblich - wurde hier nicht betrachtet.

Der Übergang der Bogen von einer Einheit zur anderen dauerte 2 Sekunden. Dieses Zeitintervall ergibt sich aus der Transportgeschwindigkeit des verwendeten Druckers, welche vom Anwender nicht zu beeinflussen ist. Sie ist mit der Durchschnittsgeschwindigkeit von industriellen Inkjet-Druckmaschinen für Bogen des Formats B2 bzw. B1 vergleichbar. Nach dem Druck werden die Bogen gestapelt. Bei dieser Fertigungsleistung dauerte der Druck einer Auflage von 200 Bogen etwa 6,6 Minuten. In dem Gedankenmodell dauert der Transfer der Druckbogen von der Druckmaschinenauslage zum nächsten Bearbeitungsschritt fünf Minuten.

Dieser Ablauf benötigt zwei Referenzpunkte. Zum einen muss die Tinte beim Erreichen des Auslagestapels soweit getrocknet sein, dass sie nicht auf der Unterseite des folgenden Bogens ablegt. Zu diesem Zeitpunkt sollte das Blatt daher „bereit zum Stapeln“ sein. Zum anderen erfordert der nächste Verarbeitungsschritt, dass die Tinte schmierfest ist. Zu diesem Zeitpunkt sollte das Blatt daher „bereit zur Weiterverarbeitung“ sein.

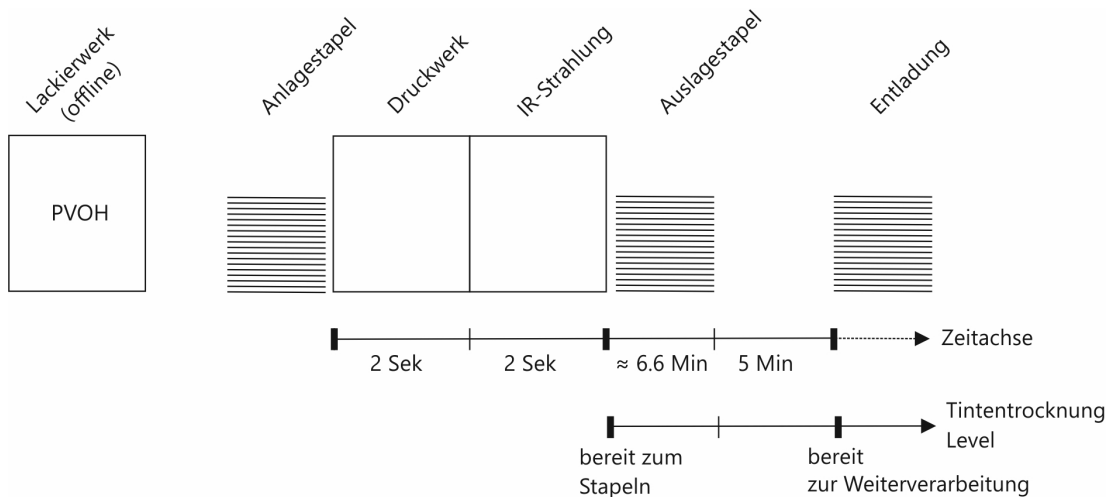


Abb. 5.5: Konzeptionelle Linie zur Validierung des Lösungsansatzes

A5-Bogen, vorbehandelt mit Primer P07 und nicht vorbehandelt wurden gedruckt (Testchart - Abb. 5.3, S. 82), für ca. 2 Sekunden unter dem IR-Strahler gelegt und gestapelt. Die Rückseiten der unteren Bogen im Stapel wurden auf Ablegen von Farbe untersucht (Abb. 5.6, Kontrollbogen 1). Fünf Minuten später wurde der bedruckte Bereich der oben liegenden Bogen mit dem Finger überstrichen, um zu prüfen, inwieweit die Tinte schmiert und daher ungenügende Haftung zur Weiterverarbeitung aufweist (Abb. 5.6, Kontrollbogen 2).

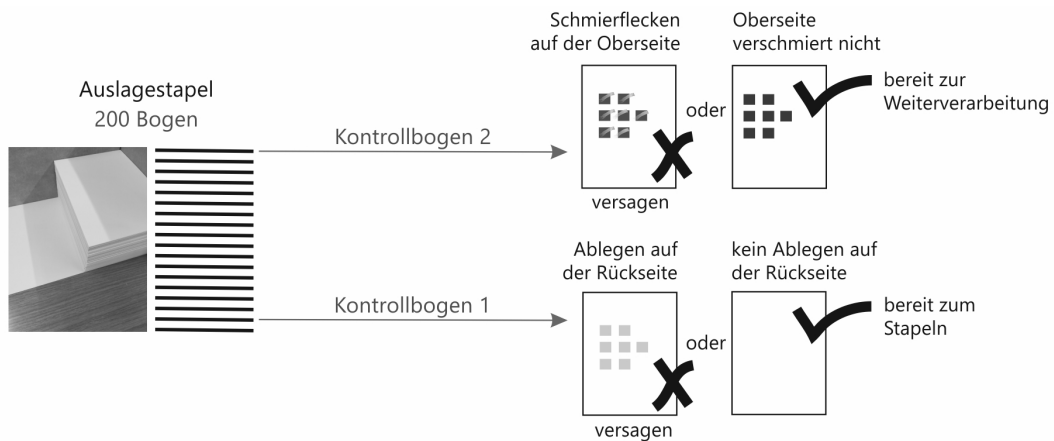


Abb. 5.6: Methode zur Validierung des Lösungsansatzes

5.2.3. Planung - Experimente zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes

Im Folgenden werden die Messmethode, die Messumgebung sowie die Messparameter und -objekte (Testchart) für die qualitative Auswertung des Lösungsansatzes beschrieben.

Optische Dichte und Tonwertzunahme

Die Messung der optischen Dichte und TWZ wurde mit dem Spektraldensitometer (Tab. 5.12) auf einem standardisierten *White Backing* nach ISO 13655 [59] durchgeführt. Die Messungen basieren auf den in Unterabschnitt 3.3.2 erläuterten Prinzipien für die Messung der optischen Dichte und repräsentieren ein in der Druckindustrie übliches Vorgehen. Das Testchart (Abb. 5.7) besteht aus 5 Volltonfeldern mit 8 x 8 mm und 100% Farbdeckung (Schwarz). Zwei Zeilen von Rastertonfeldern mit 10 bis 90% Farbdeckung (Grautöne), jeweils mit 8 x 8 mm, sind für die Messungen der TWZ vorgesehen. Von jedem Karton (B01 ... B07) wurden 20 Bogen gedruckt und gemessen, davon 10 Bogen Gruppe A und 10 Bogen Gruppe D, Stab G (vgl. Tab. 5.9 S. 82). Bogen der Gruppe B und C wurden diesen Tests nicht mehr unterzogen, da sich bei diesen Kartons Vor- und Nachbehandlung mit Primer bzw. IR-Strahlung als wenig effizient herausgestellt hatten. Das Testchart wurde mit farbstoff- und pigmentbasierter schwarzer Tinte gedruckt. Messbedingungen und Einstellungen der Spektraldensitometer sind in der Tab. 5.13⁶² notiert.

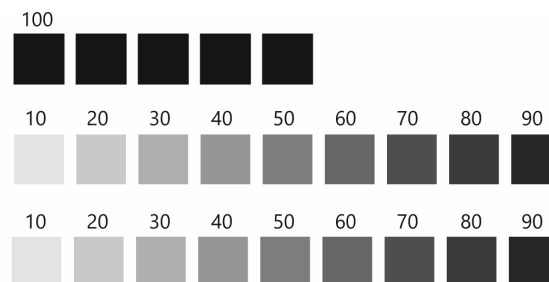


Abb. 5.7: Testchart | Messung von optischer Dichte und TWZ

⁶²Relativ: Kalibrierung auf Papierweiß, um Einflüsse der Kartonfärbung zu berücksichtigen.

Tab. 5.12: Technische Daten | Spectralphotometer SpectroDens

Information	Einheit	Daten
Hersteller	-	Techkon
Modell	-	SpectroDens
Messverfahren	-	Spektrale Remissionsmessung und Farbdichtemessung nach ISO 5-3/4
Messgeometrie	-	0/45° optik nach DIN 5033
Spektralbereich	[nm]	400 - 700
Spektrale Auflösung	[nm]	10
Dichtemessung	-	0,00 - 2,50
Reproduzierbarkeit	-	0,01 D; 0,03 CIE $\Delta E^*a^*b^*$

Tab. 5.13: Einstellungen | Spectralphotometer SpectroDens | Optische Dichte und TWZ-Messungen

Messbedingung	Einstellung
Messmodus	M1
Weißbezug	relativ
Dichtefilter	ISO E
Yule-Nielson-Faktor	1,0

Linienwiedergabe

Die Analyse der Linienwiedergabe als Alternativmethode für die Messung der Tinten- ausbreitung, wurde mit dem Standard ISO/IEC 24790:2017 realisiert. Das *Package Tool*, eine Qualitätsanalysoftware von der Arbeitsgruppe 4 (ISO/IEC JTC 1/SC 28) entwickelt, wurde verwendet. Die Messungen wurden in Übereinstimmung mit dem Standard durchgeführt (Abschnitt: B.1 bis B.4.5, B.4.6.1 und B.4.6.2)

Das gedruckte Testchart ist in Abb. 5.8 dargestellt. Dessen Elemente basieren auf der Spezifikation der ISO/TS 15311-2:2018 [60, S.26]: parallele und senkrechte Linien zur Druckrichtung mit einer Dicke ab 0,100 mm. Der Standard ISO/IEC 24790:2017 empfiehlt, dass die ROI (*Region of Interest*) mindestens 2 mm breit und 5 mm hoch sein muss. Das Testchart wurde mit 1200 dpi 8 Bit erstellt und als unkomprimierte TIFF-Datei gespeichert. Für jede Linienbreite, mit 5 Dots ($\approx 0,108 \text{ mm}^{63}$) bzw. 6 Dots ($\approx 0,126 \text{ mm}$), gibt es zehn Linien parallel und zehn Linien senkrecht zur Druckrichtung (Länge 400 Dots), die ausgemessen werden. Für die Ermittlung der unteren Reflexionsgrenze R_{min} (bedruckte Bereiche) und der oberen Reflexionsgrenze R_{max} (Substrat) gibt es zehn viereckige Bereiche (10 x 10 mm).

⁶³Bei 1200 dpi \rightarrow Dot- bzw. Punktgröße $\approx 21,16 \mu\text{m} \times 21,16 \mu\text{m}$

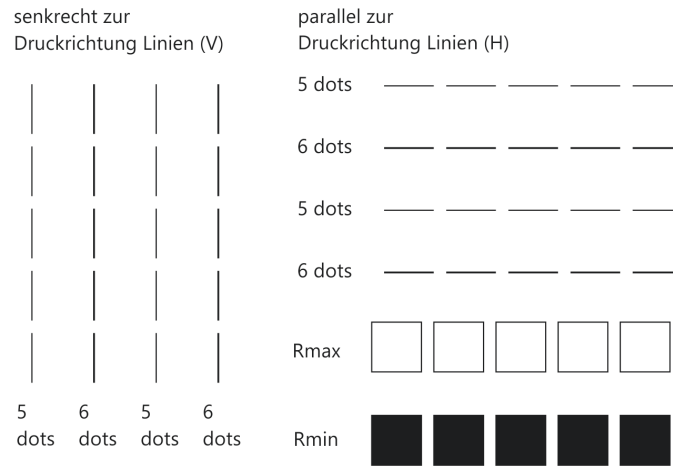


Abb. 5.8: Testchart | Messung Linienwiedergabe nach ISO 24790

Von jedem Karton (B01 ... B07) wurden zehn Bogen bedruckt, davon fünf Bogen Gruppe A und fünf Bogen Gruppe D, Stab G. Alle gedruckten Elemente wurden zunächst gescannt und in das *Package Tool* importiert.

Nach dem Standard ISO/IEC 24790:2017 soll die Reproduziergenauigkeit des Scanners zuerst überprüft werden. Entsprechend wurde ein *System Conformance Test Chart* der JBMIA⁶⁴ (Abb. 5.9) angefertigt. Während des Einscannens der zu untersuchenden Charts wurde das *System Conformance Test Chart* in unterschiedlichen Zeitintervallen untergemischt und mit verschiedenen Auflösungen gescannt, um anschließend mit dem *Package Tool* im Hinblick auf die Reproduziergenauigkeit des Scanners ausgewertet zu werden. Die technischen Daten des verwendeten Scanners sind in Tab. 5.14 dokumentiert.

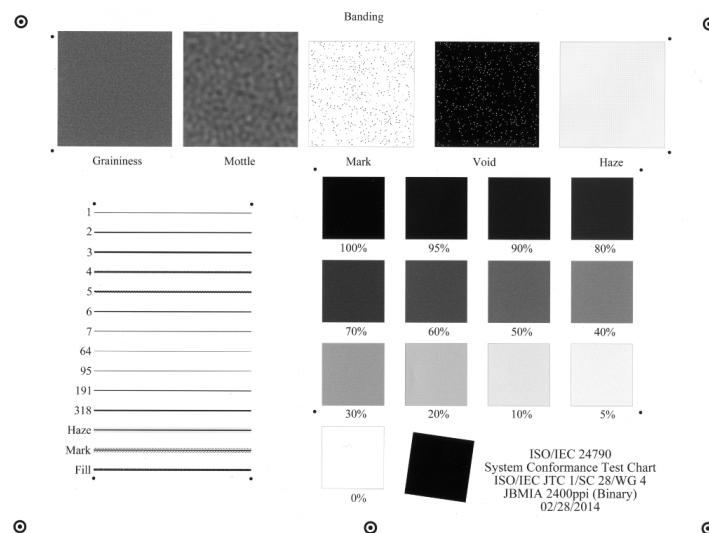


Abb. 5.9: JBMIA-Testchart zur Messung der Reproduziergenauigkeit eines Scanners

⁶⁴ Japan Business Machine and Information System Industries Association

Tab. 5.14: Technische Daten | Scanner Epson Perfection 4990 Photo

Paramter	Einheit	Daten
Typ	-	Flachbett-Farbbildscanner
Optische Auflösung	ppi	4800
Optische Auflösung - Teilbereich	ppi	9600
Optische Dichte (Dmax)	-	4
Ausgabeauflösung	ppi	50 - 6400, 9600 und 12800
Farben (Eingang)	bit	48
Farben (Ausgang)	bit	48, 24 (RGB)
Graustufen	-	bis 16

Das Verfahren zur Messung der Linien folgt diesem Ablauf: Maximale (R_{max}) und minimale (R_{min}) Reflexion mit Spectralphotometer messen \rightarrow Testchart scannen (1200 dpi) \rightarrow Linien (ROI) croppen (Abb. 5.10) \rightarrow OECF Dateien erstellen \rightarrow MTF Dateien erstellen \rightarrow ROI in *Package Tool* ablesen \rightarrow Ergebnisse exportieren. Die OECF (optoelektronische Übertragungsfunktion) ist eine Eigenschaft digitaler Kameras oder Scanner, Helligkeiten in digitale Werte (Bild) umzusetzen, und die MTF (Modulationsübertragungsfunktion) ist in diesem Fall ein Maß für den Detailkontrastverlust. Beide Werte werden von der Software unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Reflexionswerte ermittelt. Der maximale Reflexionswert wird auf einem nicht bedruckten Bereich des Kartons gemessen und der minimale Reflexionswert wird auf einem bedruckten Bereich (100% Farbdeckung) gemessen.

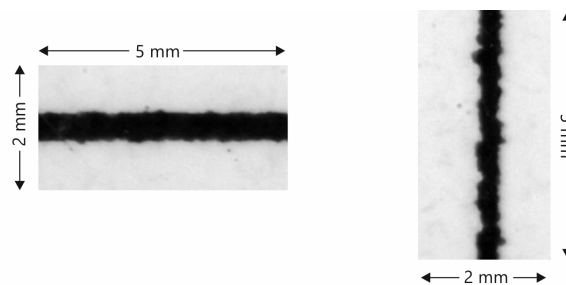


Abb. 5.10: Beispiel ROI | 5 Dots-Linie | parallel (links) und senkrecht (rechts) zur Druckrichtung

Homogenität

Wie in Unterabschnitt 3.3.2 (vgl. S. 63) erläutert, beschränken sich die Untersuchungen der vorliegenden Forschungsarbeiten zur nichtperiodischen Inhomogenität auf die Ausprägungsform Wolkigkeit. Der Standard ISO/IEC 24790 [63] ist im ISO 15311-1:2019 [61] für die Auswertung der Wolkigkeit vorgesehen und wurde hier als Referenz verwendet. Entsprechende Vorversuche wurden durchgeführt, bei denen die Auswertung nach ISO/IEC 24790, die Auswertung nach Fogra (M-Score) für Wolkigkeitsmessung und visuelle Bewertungen durch zwei Gruppen von Beobachtern verglichen wurde. Die

Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bereits im Paper *Mottle evaluation of coated cardboards printed in inkjet* [118] veröffentlicht. Den weiteren Untersuchungen wird der ISO Standard zugrunde gelegt. Die Auswertungen nach dieser Methode zeigen tendenziell die stärkere Korrelation mit den Bewertungen der Beobachter. Zudem basiert das Messverfahren nach Fogra auf einem vierfarbigen Testchart (CMYK) und ist nicht für monochrome Druckbilder geeignet.

Das gedruckte Testchart (Abb. 5.11, links) wird mittels geprüfter Scanner (vgl. S. 88) eingelesen. Die drei auf einem A5 Kartonbogen gedruckten Quadrate entsprechen den hellen, mittleren und dunklen Bereichen, mit jeweils 20%, 40% und 70% Flächendeckung. Der auszuwertende Bereich sollte eine Kantenlänge von 25,4 mm, sowie eine Auflösung von 1200 dpi aufweisen. Die gleiche Software wie für die Auswertung von Linienwiedergabe ist hier im Einsatz. Durch das *Package Tool* wird die gesamte Testfläche in 10 x 10 Kacheln mit je 14400 Messwerten (1200 x 1200 Dots) unterteilt und für jede Kachel eine Dichtmessung durchgeführt. Die Reflexionsfaktoren $R(x, y)$, $G(x, y)$ und $B(x, y)$ aller Dots, unter Verwendung eines roten, grünen und blauen Filters, werden anhand der Dichtmessungen ermittelt. Für jeden Dot pro Kanal liegt ein diskreter Wert zwischen 0 und 255 und das RGB-Farbbild wird in ein Graustufenbild transformiert, da die weitere Berechnung eine eindimensionale Helligkeitsverarbeitung einschließt. Unter Berücksichtigung der Farbempfindlichkeit erfolgt die Farbtransformation zu Graustufenwerten (Gleichung 5.2 - Gewichtung der jeweiligen Kanäle R,G und B)⁶⁵ [152, S.21] nach [63, S.13-14].

$$Y(x, y) = 0,2126R(x, y) + 0,7152G(x, y) + 0,0722B(x, y) \quad (5.2)$$

Um den Betrachtungsabstand zu simulieren, werden bestimmte Frequenzbereiche gefiltert und anschließend 1,27 mm (60 Pixel) auf jeder Seite des Bildes unberücksichtigt gelassen. Der auszuwertende Bereich hat 9 x 9 Kacheln jeweils mit einer Fläche von 2,54 mm² (Abb. 5.11 rechts). Die Reflexionsvarianz $v_{i,j}$ (Spalte j und Zeile i) wird mithilfe der Gleichung 5.3 ermittelt.

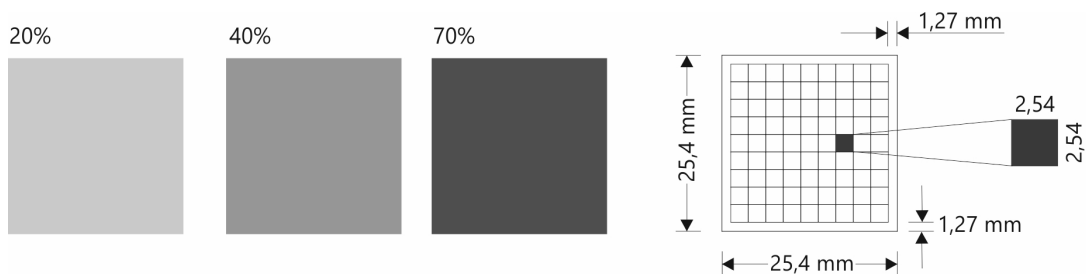


Abb. 5.11: Testchart Wolkigkeit nach ISO 15311-2 (links) | Auszuwertender Bereich nach ISO 24790 (rechts)

⁶⁵Die Felder sind monochrom, aber nicht unbedingt in schwarzen Abstufungen. Sie können auch in Magenta oder Cyan sein. Daher ist diese Transformation bzw. Berechnung durchgeführt, auch wenn das Feld nur aus Graustufen besteht.

$$v_{i,j} = \frac{1}{120 \times 120 - 1} \sum_{x=1}^{120} \sum_{y=1}^{120} [Y_{i,j}'] (x, y) - \bar{Y}' \quad (5.3)$$

Der Wolkigkeit-Score ist die Quadratwurzel der Reflexionsvarianz aller Kacheln nach der Gleichung 5.4.

$$\text{Wolkigkeit - Score} = \sqrt{\frac{1}{9 \times 9} \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^9 v_{i,j}} \quad (5.4)$$

Ein Auswertungsschema (Tab. 5.15) wird in dem Standard nach Anwendungsfällen vorgeschlagen.

Tab. 5.15: Vorgeschlagener Wolkigkeit-Score nach Anwendungsfällen [60, Anhang C und D]

Wolkigkeit-Score	Anwendungsfälle
$\leq 0,5$	Ganzseitige Farbanzeige, großformatige professionelle Studiofotos oder ähnliches
≤ 1	Produktwerbung, Werbematerial, Printprodukte mit ästhetischen Anwendungen wie Kultur, Mode, Kunst und Architektur
≤ 2	nicht ästhetischer Produktionsdruck oder redaktionelle Teile von Zeitschriften und Publikationen
$0 < \text{Score} \leq 4$	Allgemeiner Toleranzbereich für alle digital gedruckten Produkte

Auflösung

Die Auflösung des Drucks wird mithilfe des Elements ‚Siemensstern‘ ermittelt (vgl. S. 65). Diese Methode wird für diesen Zweck im DIN 53131 [32] empfohlen und ist eine Standardmethode zur Auswertung der Auflösung von Kameras. Die Auswertung der Siemenssterne erfolgt mittels einer Software, die in [116] beschrieben und dokumentiert ist. Die Validierung dieser Software ist in Anhang C (vgl. S. 187) gezeigt. Die Sterne werden in Matlab mit 60 Sektoren, $\varnothing = 27 \text{ mm}$ erzeugt, gedruckt und mit 1200 dpi⁶⁶ gescannt. Von jedem Karton (B01 ... B07) wurden vier Bogen mit jeweils zwölf Siemenssternen bedruckt und ausgemessen, davon zwei Bogen Gruppe A und zwei Bogen Gruppe D, Stab G. Die Auflösungsrechnung von Prinzmeier (Gleichung 5.5) basiert auf dem Radius des grauen Rings r in der Bildmitte. In Abb. 5.12 wurden zwei Stufen von Unschärfe auf die Sterne angewendet. Das Messobjekt links wurde um 1 Pixel und das Messobjekt rechts um 9 Pixel unscharf gestellt. Der Grad der Unschärfe erzeugt einen Verlust an Auflösung. Die Auflösung und der Radius des grauen Rings stehen in direktem Bezug: Je niedriger die Auflösung, desto größer ist der Radius des grauen Rings. Die Anzahl der Sektoren und die Auflösung des Scanners (Ausgabeauflösung) bleiben bei allen Proben und Messungen unverändert.

⁶⁶Nach Software-Handbuch

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Sektoranzahl} \times \text{Ausgabeauflösung}}{\pi \times r} \quad (5.5)$$

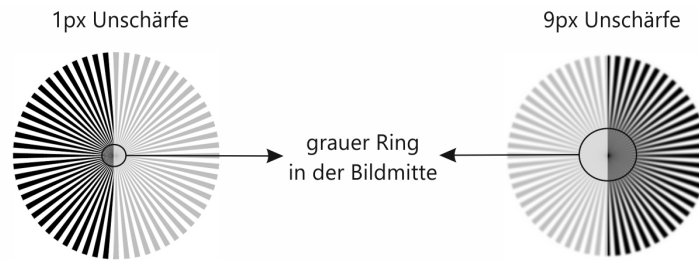


Abb. 5.12: Unterschiedliche Auflösungsverluste am Siemensstern

5.2.4. Planung - Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten

Laut Hutchings sind zwei physikalische Kenngrößen der Inkjet-Tinten grundlegend für das Ausstoßen und die Bildung von Tropfen: Oberflächenspannung und Viskosität [56, S.52]. Wie im Unterabschnitt 3.2.1 erläutert, definieren diese Größen die Druckbarkeit einer Tinte. Ein wenig erforschter Aspekt ist jedoch der Einfluss dieser Kenngrößen auf die gedruckten Punkte, d.h. das Bildelement, das sich aus dem Kontakt des Tropfens mit dem Substrat ergibt.

In der Theorie lässt sich dieser Einfluss in zwei Aussagen zusammenfassen. Je niedriger die Oberflächenspannung der Tinte, mehr Fläche kann sie durch Spreiten auf dem Substrat bedecken, wie in Unterabschnitt 3.2.1 dargelegt, und je niedriger die Viskosität der Tinte, desto größer ist die Geschwindigkeit des Spreitens, da die Fließgeschwindigkeit newtonscher Fluide umgekehrt proportional zur Viskosität ist. Zunächst wird analysiert, wie sich Veränderungen bei der Viskosität und der Oberflächenspannung der Tinten auf ihr Spreiten auswirken.

Für das Experiment wurde ein Kontaktwinkelmessgerät und Konturanalysesystem OCA50 (DataPhysics Instruments) verwendet. Die wichtigsten Teile des Geräts sind in der Abb. 5.13 beschrieben. Die Flüssigkeitsdosierung erfolgt über ein motorisch in drei Achsen verstellbares System, auf dem Einwegkanülen mit der Testflüssigkeit positioniert werden können. Unterhalb des Dosiersystems befindet sich ein Probenstisch, der sich ebenfalls in drei Achsen bewegt, zur Positionierung und Befestigung des Substrats mittels Klammern. An der Rückseite des Tisches befindet sich eine Lichtquelle und an der Vorderseite ein optisches System mit Hochgeschwindigkeitskamera- und Linsensystem zur Bilderfassung.

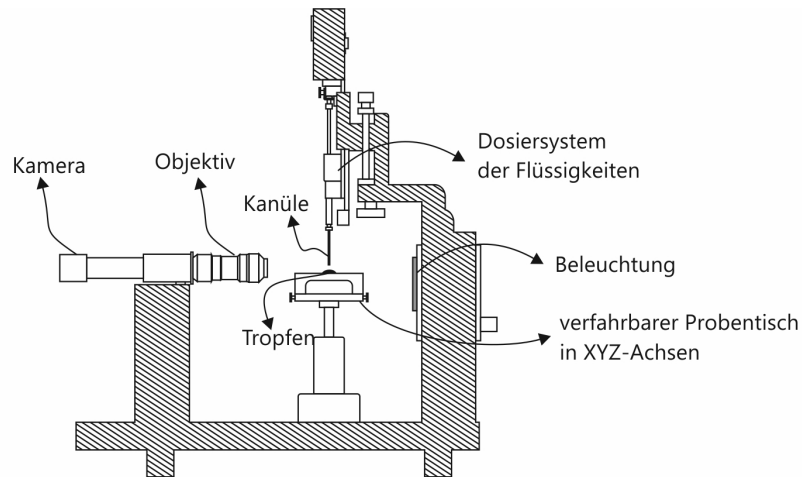


Abb. 5.13: Wichtige Komponenten eines Kontaktwinkelmessgeräts - [26]

Über eine Steuersoftware (SCA 20) wird die Messung anhand von Vorgabewerten wie Flüssigkeitsvolumen, Abstand zwischen den Tropfen, Geschwindigkeit der Flüssigkeitsaufbringung, Form und Geschwindigkeit der Bildaufnahme u.a. ausgeführt.

Während der Applikation auf dem Substrat kann ein Tropfen wahlweise fotografiert oder gefilmt werden. Das SCA20-System extrahiert aus dem erfassten Bild bzw. Video die geometrischen Werte des Tropfens, wie Basisdurchmesser, Höhe und Kontaktwinkel. Diese Daten werden aus der Basislinie und der Konturlinie des Tropfens berechnet, die aus den Kontrastdaten zwischen dem Tropfen und der Umgebung definiert sind (Abb. 5.14).

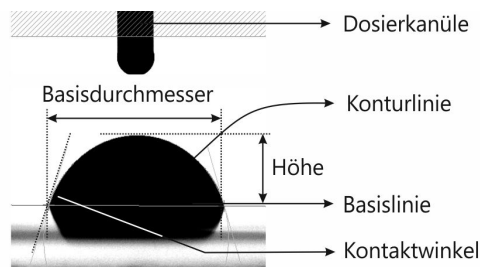


Abb. 5.14: Geometrie eines liegenden Tropfens im Kontaktwinkelmessgerät

Eine Inkjet-Düse eines Druckers stößt Tröpfchen in der Größenordnung von Pikolitern aus. Kontaktwinkelmessgeräte mit Dosierung durch Einwegkanülen ermöglichen im günstigsten Fall eine Tropfenbildung in der Größenordnung von Mikrolitern. Dieser Unterschied kann im Hinblick auf das Verhalten der Tropfen sowohl während des Fluges als auch bei der Ausbreitung auf dem Substrat von Bedeutung sein, insbesondere im Hinblick auf das maximale Tintenvolumen, das von der Oberfläche des Substrats – in einem bestimmten Zeitfenster – absorbiert werden kann. Hier geht es primär jedoch darum, das Verhalten der Tinte auf bestimmten Substraten zu verstehen, unabhängig von den Parametern des Inkjet-Drucks.

Die Definition eines geeigneten Tropfenvolumens, das auf das Substrat aufgebracht

werden soll, gelingt nicht ohne Weiteres. Die Wiederholbarkeit und Volumenabweichung bei der Tropfenbildung wurden mit drei verschiedenen Dosierkanülen (Innendurchmesser von 0,25, 0,61 und 1,36 mm) getestet. Aufgrund ihrer geringen Oberflächenspannung neigt die Tinte bei dünnen Dosierkanülen dazu, den Auslauf der Kanüle vollständig zu umhüllen und an der Außenwand hochzukriechen. Auf diese Weise bildet sich überhaupt kein Tropfen, der qualifiziert appliziert werden kann. Das Wasser zeigt diesen Effekt nicht, sondern bildet aufgrund seiner hohen Oberflächenspannung am Kanülenauslauf annähernd kugelförmige Tropfen, die nicht in geringem Volumen, z.B. $1 \mu\text{l}$, ausgestoßen werden. Die Auswurfgeschwindigkeit kann eingestellt werden, z.B. $0,5 \mu\text{l}$ pro Sekunde, um die Dosierung zu steuern. Entsprechend sind Kanülengröße und Auslaufparameter für die jeweilige Testflüssigkeit nach der *Trial-and Error* Methode zu bestimmen. Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität und niedriger Oberflächenspannung, wie z.B. Diiodmethan 99,5%, neigen dazu, schneller zu tropfen oder sogar zu fließen, bevor das vorgegebene Volumen erreicht ist.

Obwohl die Tinten ähnliche Viskositäten (Bandbreite ca. $0,80 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) und Oberflächenspannungen (Bandbreite ca. 11 mN/m) aufweisen, zeigen sie unterschiedliches Verhalten in Bezug auf die Tropfenform. Das ideale Volumen zum Auftragen ist gegeben, wenn die Tropfen die in Abb. 5.15 dargestellte Form aufweisen, oval mit einem Hals. Diese Tropfenform verbleibt am ehesten bis zum Aufsetzen auf dem Substrat stabil am offenen Ende der Kanüle hängen.

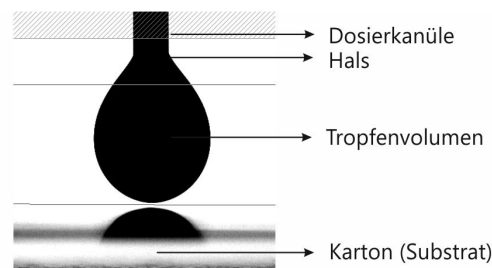


Abb. 5.15: Ideale Form eines Tropfens zum Abfangen

Der Tropfen kann entweder mit der Kanüle abgesetzt oder vom Probestisch aufgenommen werden, entsprechend dem technischen Standard für „Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels“ [36]. Je mehr jedoch die Flüssigkeit an der Kanülenoberfläche haftet, desto mehr kinetische Energie wird auf die Flüssigkeit bei der Abholung des Tropfens übertragen. Dies kann die Einstellung des Gleichgewichts des Tropfens auf der Substratoberfläche verzögern und das Ergebnis des Experiments verfälschen. Der Abstand zwischen dem Tropfen und dem Substrat ist relativ klein, die kinetische Energie ist jedoch tendenziell größer, wenn die Flüssigkeit abgetropft wird und fliegt, als wenn der Tropfen aufgesetzt wird. Daher wurde die Methode mit der Aufnahme des Tropfens mit dem Probestisch gewählt⁶⁷. Das optimale Volumen für die Flüssigkeiten wurde zu $3 \mu\text{l}$ ermittelt. Die beim Experiment

⁶⁷Diese Methode wird auch im Prüflabor des Geräteherstellers angewendet.

verwendeten Dosierkanülen haben aus besagten Gründen einen Innendurchmesser von 1,36 mm, und außen 1,83 mm. Sie wurden vor der Messung mit Chlorodimethylsilan für ca. 20 Sekunde behandelt, um die Benetzbarkeit (Wandhaftung) der Kanüle zu reduzieren⁶⁸.

«Spreiten» ist das zentrale Thema dieses Experiments. Hier wird Spreiten in Bezug auf die seitlich-radiale Bewegung, mit der sich der Tropfen in einem bestimmten Zeitfenster über die Oberfläche des Substrats ausbreitet, analysiert. Die geometrischen Elemente des Tropfens (Basisdurchmesser, Kontaktwinkel und Höhe) ändern sich der Theorie folgend proportional zueinander, in der Praxis werden Abweichungen von dieses Proportionalitäten beobachtet. Um die Tangente in Bezug auf die Basis des Tropfens zu definieren, wird ein Tropfenuriss festgelegt. Im allgemeinen werden Tropfen mit Tangenten unter 90° als Ellipsen und über 90° als Kreise konturiert. Einige Tropfen variieren jedoch zwischen mehr als 90° und weniger als 90° während einer Messung. Dadurch ändert sich der Kontaktwinkel im Verhältnis zum Basisdurchmesser nicht proportional. Außerdem werden sowohl der Kontaktwinkel als auch die Höhe des Tropfens durch den Quelleffekt beeinflusst, der bei absorbierenden Oberflächen auftritt, wobei dieser Effekt zwischen den Kartontypen variiert. Diese störenden Effekte beeinflussen den Basisdurchmesser weniger intensiv. Daher wurde dieser als geometrisches Bezugsmaß für das Experiment ausgewählt.

Um die laterale Bewegung des Tropfens zu bestimmen, wurde ein Zeitfenster von 8 Sekunden festgelegt und das Video mit 25 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet (insgesamt 200 Bilder). Die Dauer der Aufnahmen wurde durch die maximale Zeit vor einer sichtbaren Verformung (Quellung) der Substrate bestimmt. Die übrigen Messparameter sind in Tab. 5.16 beschrieben.

Das Spreiten der Tinten wird hier durch die Differenz Δ der Basisdurchmesser zwischen dem ersten Bild des Tropfens auf dem Substrat und dem hundertsten Bild bestimmt (nach 4 Sekunden) (Abb. 5.16). Im ersten Beispiel hat das Spreiten von der C-farbstoffbasierten Tinte mit (Kf-C) 5% PEG auf dem Karton B06 ohne Primer (Gruppe A) ein Δ von 1,88 mm. Im zweiten Beispiel mit der T-pigmentbasierten Tinte (Kp-T) mit 5% PEG auf dem Karton B05 mit Primer (Gruppe B) hat ein Δ von 4,54 mm. Bei einigen Kombinationen von Tinte und Karton war der Spreitvorgang bereits vor Ablauf des Beobachtungszeitraums von 8 s abgeschlossen. Der besseren Vergleichbarkeit werden deswegen bei allen Proben lediglich die ersten 4 Sekunden des Spreitens zur Ermittlung der Basisdurchmesser herangezogen (a 25 fps, insgesamt 100 Bilder).

⁶⁸Dieser Vorgang heißt Silanisierung. Der Effekt ist sichtbar, d.h. die Tinte haftet weniger am Kanüle, aber der Effekt ist nicht dauerhaft. Bei längeren Behandlungen griff Chlordimethylsilan das Metall an und machte die Kanüle unbrauchbar. Es ist notwendig, die Kanüle vollständig trocknen zu lassen, da Chlordimethylsilan im Kontakt mit Wasser sich zersetzt.

Tab. 5.16: Einstellungen | Kontaktwinkelmessgerät OCA50 | Messung Tropfen-Spreiten

Bild		Dosierung	
Helligkeit	45	Dosiervolumen [μl]	3
Kontrast	90	Dosierung [$\mu\text{l/s}$]	1
Gamma	100	Spritze	Einweg 1 ml
Master gain	0	Kanüle	Innerer $\varnothing = 1,36 \text{ mm}$
Black level	0		Äußerer $\varnothing = 1,83 \text{ mm}$
Video		Tropfen Geometrie	
Format [px]	640 x 480	Berechnungsmethode	Liegender Tropfen
Vergrößerung	1	Tropfenform	Ellipsenform
Seitenverhältnis	1	Fitting	Ellipsenform
Aufnahme	konstante Rate		
Nominale Rate [fps]	25		
Länge [ms]	8000		
Beleuchtung			
Typ	LED		
Intensität [%]	70		

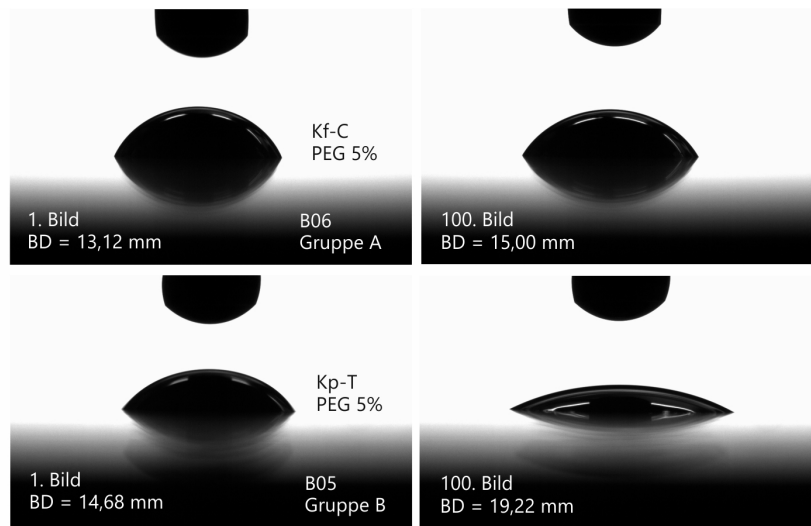


Abb. 5.16: Beispiele Basisdurchmesser (BD)

Um die Wirkung der Viskosität zu analysieren, wurde den 4 getesteten Tinten (Tab. 5.2 und 5.3) Polyethylenglykol 8000 (PEG vgl. S. 78) in 3 verschiedenen Gew.-% (Tab. 5.17) beigemischt.

Tab. 5.17: Bezeichnungen nach PEG-Konzentration

Flüssigkeit Bezeichnung	PEG 8000 [Gew.-%]	Tinte [Gew.-%]
PEG 0%	0	100
PEG 5%	5	95
PEG 10%	10	90
PEG 15%	15	85

Für jede Tinte in 4 PEG-Konzentrationen (0, 5, 10 und 15%) wurden 5 Messungen auf jedem Karton (B01 ... B07) jeweils mit und ohne Primer durchgeführt. Abb. 5.17 zeigt die Kurven der Änderung des Basisdurchmessers mit der Zeit bei der Tinte mit Kf-C auf B01 Gruppe A und B. Die Abweichung zwischen Kurven der selben Gruppe sind klein und repräsentativ für die Mehrheit der Messungen.

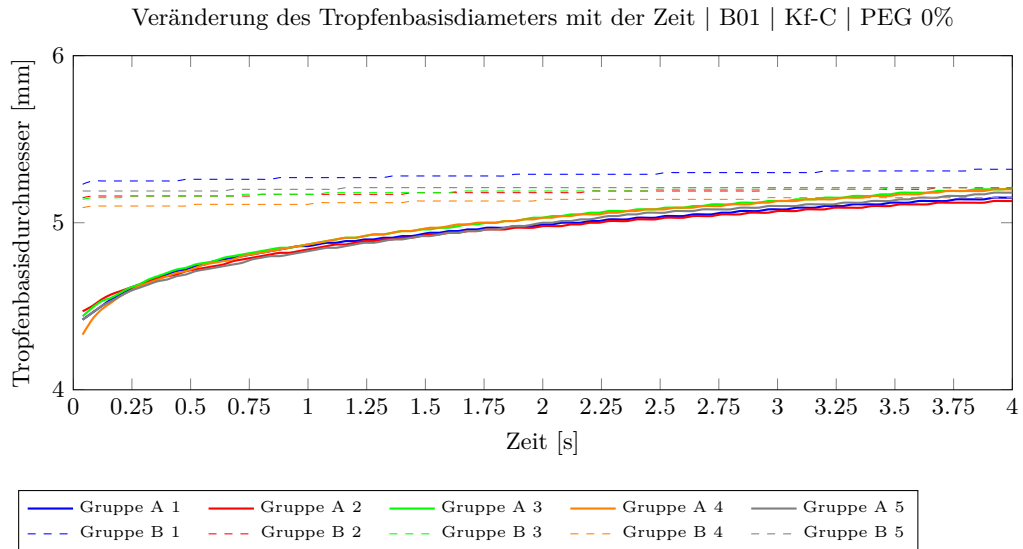


Abb. 5.17: Änderung des Tropfenbasisdurchmessers auf Zeit

5.3. Charakterisierung - Messparameter, Laborumgebung und Geräteeinstellungen

5.3.1. Charakterisierung der verwendeten Substrate

Permeabilität

Wenn die Darcy-Gleichung (vgl. S. 33) auf eine papierartige Probe übertragen wird, ist die Permeanz einer Flüssigkeit (oder eines Gases) proportional zur Druckdifferenz, die auf das Substrat ausgeübt wird, zur Testfläche, zur Zeit und umgekehrt proportional zur Substratsdicke. Darauf aufbauend wurden mehrere Tests entwickelt, die in der Papierindustrie verwendet werden. Sie arbeiten mit unterschiedlichen Druckgradienten, Gas- oder Flüssigkeitsvolumina und weisen folglich unterschiedliche Einheiten auf, die wenig oder nicht miteinander in Beziehung stehen. Ein Ausschnitt einiger Testdaten ist in Tab. 5.18 wiedergegeben.

Tab. 5.18: Unterschiedliche Prüfmethode der Luftdurchlässigkeit bzw. Permeabilität [12, S.291]

Methode	Druckgradienten	Einheit
Permeationszeit-Methoden		
• Gurley	1,22 (124 mmH ₂ O)	s/100cm ³
• Bekk	64,3/37,6 (482 - 282 mmHg)	s/100cm ³
Volumetrische Methoden		
• Schopper	0,981 (100 mmH ₂ O)	cm ³ /60s
• Emiel Greiner	5,35 (546 mmH ₂ O)	cm ³ /15s
Durchflussmesser-Methoden		
• Bendtsen	1,47 (150 mmH ₂ O)	cm ³ /60s
• Scheffield	10,3 oder 68,9	Scheffield

Einige dieser Tests sind sowohl für die Messung der Rauheit/Glätte eines Substrats als auch für die Messung seiner Permeanz geeignet [54, S.939], z.B. Parker Print-Surf (PPS). Die Rauheit wird mit diesen Methoden indirekt gemessen. Je größer die Rauheit ist, umso größer wird die Luftdurchlässigkeit, weil bei einer raueren Oberfläche der Luftstrom zwischen den Hohlräumen und den Vertiefungen des Substrats größer ist. In dieser Arbeit wurden 3 Methoden nach den Standards von Bekk (Bestimmung der Glätte) [34], Bendtsen (Bestimmung der Luftdurchlässigkeit) [35] und Parker Print-Surf (Bestimmung der Rauheit/Glätte) [31] durchgeführt.

Bei dem Bekk-Verfahren wird die Probe zwischen eine Probeneinspannvorrichtung (Druckteller und Gummiplatte) und eine ringförmige Glasplatte gepresst. Unterhalb der Probe befindet sich ein Vakuumbehälter (Abb. 5.18). Der gemessene Wert, angegeben in Bekk-Sekunden, entspricht der Zeit für einen definierten Druckabfall [34]. Je glatter die Probe, desto länger die Zeit für den Druckabfall.

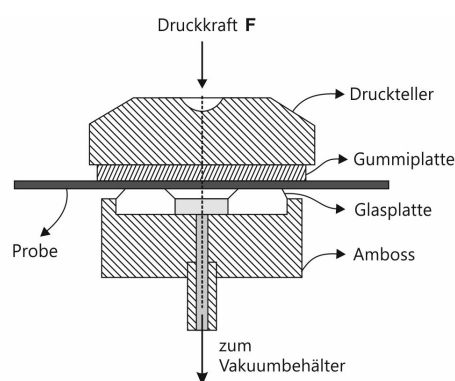


Abb. 5.18: Schematische Darstellung der Bestimmung der Glätte nach Bekk [34]

Die Bendtsen-Methode ist geeignet für Messungen mit Papieren und Kartons mit mittlerer Luftdurchlässigkeit (0,1 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ und 56,7 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$). Sie eignet sich nicht für sehr poröse Untergründe und gekreppte oder gewellte Papiere und Pappen, da der Luftstrom durch Poren oder seitliche Öffnungen das Ergebnis verfälscht. Die Messung erfolgt analog zu Bekk, obwohl die Richtung des Luftstroms umgekehrt und die Luftmenge,

statt Zeit, der gemessene Wert ist. Die Probeneinspannvorrichtung (Abb. 5.19) besteht aus einem Dichtring (Gummi) und einem Einspannring (metallische ringförmige Fläche). Die Probe befindet sich zwischen diesen beiden Elementen eingespannt. Der Kennwert für die Luftdurchlässigkeit nach Bendtsen entspricht Mengenstrom der Luft (ml/min), der bei einseitig konstantem Überdruck durch die Probe fließt. [54, S.1079] [35]

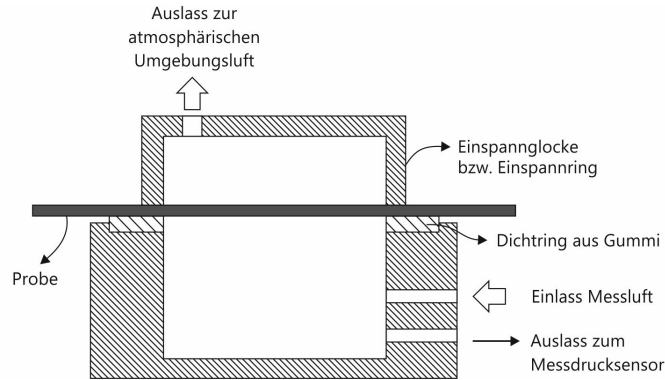


Abb. 5.19: Schematische Darstellung der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit nach Bendtsen [35]

Parker Print-Surf (PPS) ist ebenfalls eine sehr verbreitete Methode zur Messung von Rauheit/Glätte (mittels Luftstromverfahren) in der Papier- und Kartonherstellungsindustrie. In den gleichnamigen Gerät wird niedriger Luftdruck aus einem geregelten Druckluftherzeuger durch einen Kanal injiziert, durchläuft einen Metallring (mit Verbindungen an der Zuleitung für Luftzufuhr, an Durchflussmessgerät und an der Verbindung zur Atmosphäre), durchströmt die Probe, kehrt zum Ring zurück und gelangt durch den parallelen Kanal zum Durchflussmessgerät und danach zur Atmosphäre (Abb. 5.20). PPS ist also eine Widerstandsmessung, die aus dem Druckverlust beim Durchströmen der Probe berechnet wird. PPS gibt die Messwerte in μm an. [54, S.1079] [31]

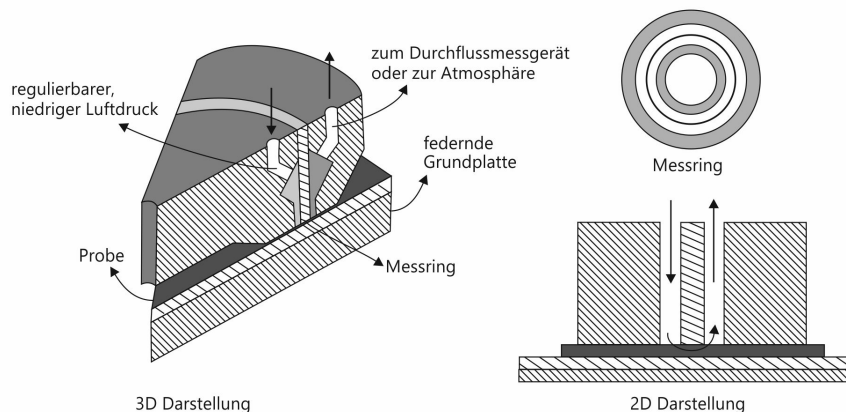


Abb. 5.20: Schematische Darstellung der Bestimmung der Rauheit/Glätte nach Parker Print-Surf [31]

Die Einstellungen der Geräte sowie die Daten zu den Proben sind in Tab. 5.19 zusammengefasst.

Tab. 5.19: Einstellungen | Messungen nach Bekk, Bendtsen und PPS

Einstellung	Einheit	Bekk	Bendtsen	PPS
Luftdruck	[Kpa]	60	1,47	1000
∅(Probe)	[mm]	37,4	31,5	35
∅(Messbereich)	[mm]	13,5 (2x)	0,15	0,061
Anzahl Messungen	[-]	10	10	10

Rauheit

Die traditionellen Methoden zur Messung der Papierrauheit sind, wie oben erwähnt, auf einem Luftstrom basierende Verfahren. Es gibt auch mechanische Methoden mittels Profilometer, Rasterkraftmikroskop und Rastertunnelmikroskop, optisch mittels konfokal Laser-Scanning-Mikroskope (Eng.: *CLSM*), Interferometer, Autofokus (Laser) und auf Elektronen basierende Methoden mittels Rasterelektronenmikroskop [12, S.434]. Hier wird mittels CLSM gemessen und die Analyse der Ergebnisse fokussiert auf die qualitative Druckauswertung. Die Herstellerangaben der hier untersuchten Kartons nennen einen Rauheitsbereich zwischen 0,9 und 1,8 μm , was innerhalb des Messbereichs der CLSM liegt. Diese optische Methode hat gegenüber der Luftstrommethode den Vorteil, dass sie berührungslos arbeitet und die Probe – auch nicht im Mikrobereich – mechanisch belastet. Aufgrund des Drucks, der auf die Probe ausgeübt wird, gelten die Bekk-, Bendtsen- und PPS-Methode als destruktive Verfahren.

Abb. 5.21 veranschaulicht die Größenordnung der Rauheit in Bezug auf die Dicke eines Kartons und seiner Beschichtungsschicht in μm . Auf der linken Seite befindet sich eine Darstellung der Kartonoberfläche mit dem gemessenen Rauheitsprofil und auf der rechten Seite ein mit dem Konfokalmikroskop aufgenommener Querschnitt eines Kartons.

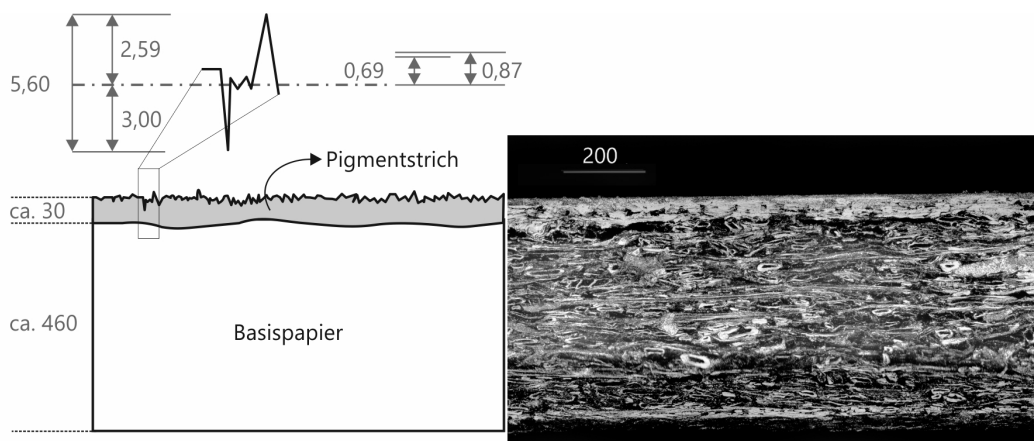


Abb. 5.21: Größenordnung Rauheit, Beispiel Rauheiten eines beschichteten Kartons (links) Werte in μm | Querschnitt des Kartons B07 (rechts)

Das eingesetzte CSLM, bei diesen Untersuchungen verwendet, ist ein Reflexmikroskop, bei dem ein Laserstrahl ($\lambda = 658 \text{ nm}$) ein optisches System durchläuft, das aus einer

Abtasteinheit, Spiegeln und Strahlteilern besteht. Der Laserstrahl wird von der Probenoberfläche reflektiert bzw. gestreut, durchläuft eine Lochblende sowie ein fokussierendes Objektiv zurück, wo einzeln jeder abgescannte Punkt im Fokus erfasst wird und dann den Photodetektor (Photomultiplier) erreicht. Die Probe wird gleichfalls mit einer Weißlichtquelle beleuchtet, deren Reflexion von einer CCD-Kamera erfasst wird (Abb. 5.22 links). Die Intensitätsinformationen jedes Dots sowohl auf der XY-Achse als auch auf der XZ-Achse (Abb. 5.22 rechts) werden gespeichert und in dreidimensionale Bilder umgesetzt (Abb. 5.23).

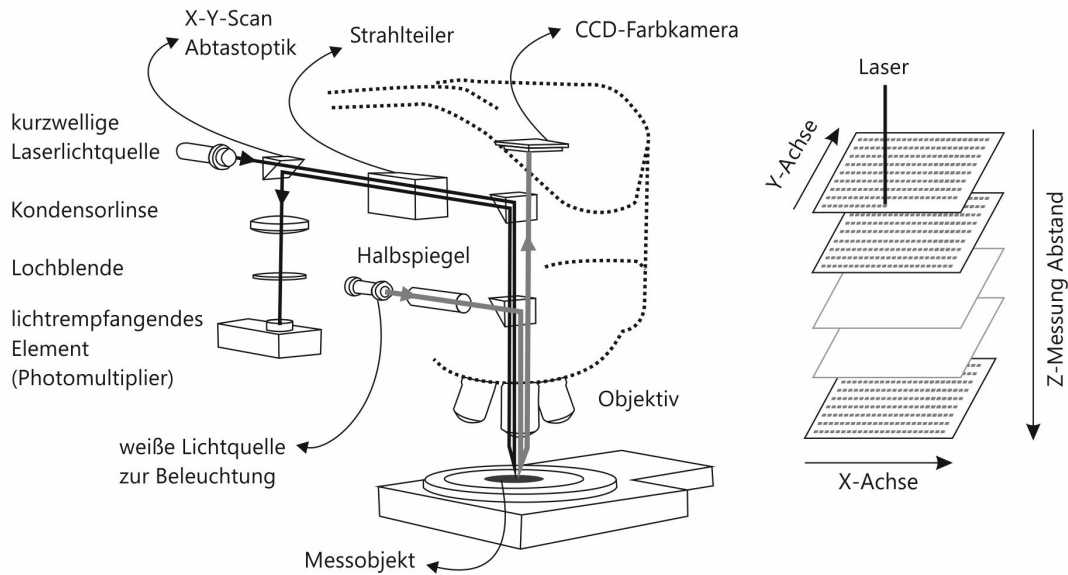


Abb. 5.22: 3D Laser-Scanning-Mikroskop (links) | Ablesung der Intensität in XYZ-Achsen (rechts) - [71] - modifiziert

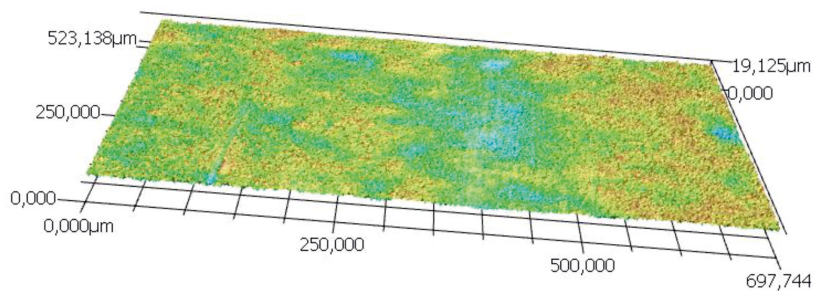


Abb. 5.23: 3D-CSLM Darstellung | Oberfläche eines beschichteten Kartons (farblich: Höhenprofil)

Die Rauheit kann zweidimensional (R-Parameter) und dreidimensional (S-Parameter) dargestellt werden. R-Parameter (2D) können auch mit mechanischen Systemen wie Profilometern erfasst werden, die eine oder mehrere Linien zur Darstellung eines Profils abtasten. Mit der Entwicklung optischer Messsysteme konnte das gesamte Messfeld vermessen werden (3D). Hier werden die Höhe- bzw. Amplituden- und Funktionsparameter (3D) analysiert, in denen Spitzen und Täler gemessen wurden, ohne den Abstand (Frequenz) zwischen den Spitzen oder Tälern zu berücksichtigen. Tab. 5.20 enthält eine Zusammenfassung dieser Parameter. In Abb. 5.24 und Abb. 5.25 sind diese Parameter

schematisch dargestellt.

Tab. 5.20: Beschreibung der R- und S-Rauheitsparameter [71, S.9-4 - 9-13]

Parameter	R (2D)	S (3D)	Beschreibung
arithmetische mittlere Höhe	Ra	Sa	Durchschnittswert des Absolutwertes der Höhe der durchschnittlichen Oberfläche
mittlere quadratische Wurzelabweichung	Rq	Sq	Entspricht der Standardabweichung des Abstands der durchschnittlichen Oberfläche, äquivalent zur Standardabweichung der Höhe
maximale Profilspitzenhöhe	Rp	Sp	Höhe des höchsten Punktes der durchschnittlichen Oberfläche (absolut)
maximale Profiltaltiefe	Rv	Sv	Tiefe des niedrigsten Punktes der durchschnittlichen Oberfläche (absolut)
maximale Höhe des Profils	Rz	Sz	Abstand vom höchsten Punkt zum tiefsten Punkt auf der Oberfläche (absolut)
Kernhöhe	Rk	Sk	Ein Wert, bei dem die minimale Kernhöhe von der maximalen Kernhöhe subtrahiert wird, die aus einer Höhendifferenz zwischen 0% und 100% berechnet wird.
reduzierte Peakhöhe	Rpk	Spk	Durchschnittliche Höhe des reduzierten Peakabschnitts
reduzierte Taltiefe	Rvk	Svk	Durchschnittliche Tiefe des reduzierten Talabschnitts

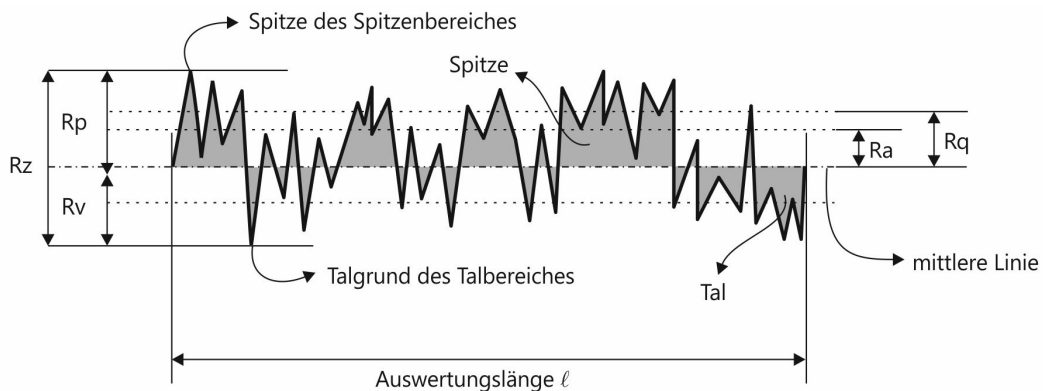


Abb. 5.24: R- und S-Rauheitsparameter | Höhe und Amplitude

Für die Berechnung von R_k/S_k , R_{pk}/S_{pk} und R_{vk}/S_{vk} sollen die Werte des sogenannten Material-Verhältnisses definiert werden. Mr_1/S_{mr1} bestimmt die Schnittlinie, die die hohen Spitzen vom Rauheitskernprofil trennt, wie Mr_2/S_{mr2} die Schnittlinie bestimmt, die die tiefen Täler vom Rauheitskernprofil trennt. Für gestrichene Kartons gibt es keine Referenzwerte für das Material-Verhältnis, daher werden die Standardwerte von 10% resp. 80% beibehalten.

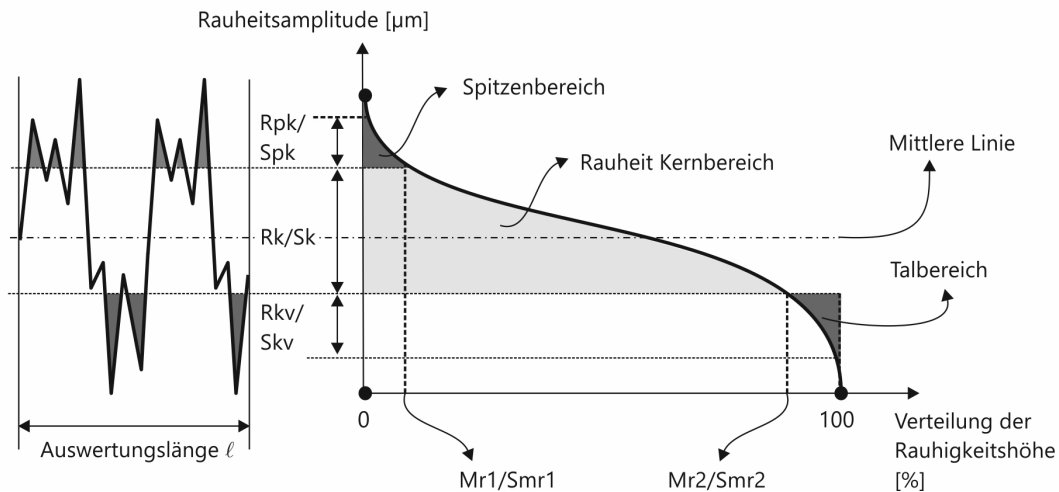


Abb. 5.25: R- und S-Rauheitsparameter | Material-Verhältnissen

Eine Oberfläche kann anhand von drei Kriterien charakterisiert werden: Form, Welligkeit und Rauheit (Abb. 5.26). Bei der Messung einer Wellpappe oder eines Zylinders ist es notwendig, Filter anzuwenden: Tiefpassfilter um die Form und Hochpassfilter um die Welligkeit auszuschließen. Für gestrichene Kartons wurden keine Referenzwerte gefunden. Der stochastische Charakter der Beschichtungsoberflächen legt nahe, keine Filter anzuwenden, um eine Verzerrung des Ergebnisses zu vermeiden.

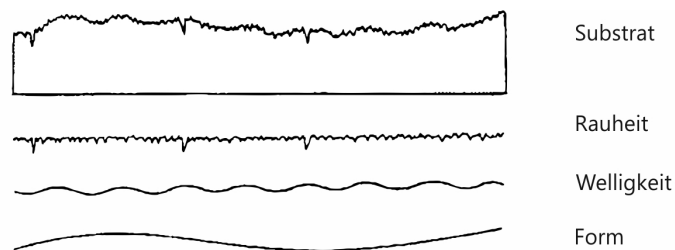


Abb. 5.26: Schematische Darstellung | Form, Welligkeit und Rauheit einer Oberfläche

Für jeden Karton (mit bzw. ohne Primer) wurden 35 Messungen an 7 verschiedenen A4-Blättern durchgeführt. Bei den S-Parametern werden ganze Flächen vermessen und damit eine größere Anzahl von Punkten im Vergleich zu den R-Parameter-Messungen. Deswegen werden hier die S-Parameter verwendet. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass dies auch nachteilig sein kann. Ausreißer, die das Material nicht repräsentieren, können eher in großen Flächen gefunden werden. So wurde eine große Anzahl Messungen durchgeführt, um den Einfluss möglicher Ausreißer zu nivellieren. In Tab. 5.21 sind die Einstellungen des 3D-Laser-Konfokalmikroskops für diese Messungen aufgeführt.

Tab. 5.21: Einstellungen | Messungen Rauheit | 3D-Laser-Konfokalmikroskop Keyence

Einstellung	Daten
Gerät	3D-Laser-Konfokalmikroskop Keyence VKX150
Auflösung [Pixel]	1024 x 728 (Standard)
Laser [nm]	658
Bildgröße [μm]	$\approx 523 \times 697$
Objektiv [x]	20
Zoom [x]	1.0
Modus	Oberflächenprofil
Qualität	hohe Genauigkeit
Mr1 / Smr1 [%]	10
Mr2 / Smr2 [%]	80

Grenzflächenenergie

Unter mehreren Methoden zur Messung der Grenzflächenenergie zwischen einer Flüssigkeit und einer festen Oberfläche wie Steighöhen-Methode, Sorptionsmessung (Washburn-Methode) und Testtinten ist die Kontaktwinkelmessung an liegenden Tropfen eine der am häufigsten angewendeten und diskutierten Methode in der Fachliteratur. Die Menge an Informationen ist vorteilhaft im Hinblick auf Referenzwerte und ein besseres Verständnis der Variablen, die den Test beeinflussen können.

Kontaktwinkelmessgerät und Grenzflächenenergie Theorie wurden bereits in Unterabschnitt 5.2.4 und 3.2.2 beschrieben. In der Tab. 5.22 sind die Vorgabeeinstellungen, basierend auf Teil 2 [36] und 4 [37] des technischen Standards DIN EN ISO 19403 für die Messungen der Grenzflächenenergie der Substrate dargestellt. Die Berechnungsmethode nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) wird hauptsächlich bei hochenergetischen Oberflächen angewendet und liefert auch die polaren und dispersen Anteile der Gesamtenergie. Der Standard schlägt die Verwendung von mindestens 2 Flüssigkeiten mit großen Polaritätsunterschieden (z.B. Wasser und Diiodmethan) vor, um systemische Fehler zu verringern. Zusätzlich wurde Ethylenglykol verwendet. Mit einer dritten Flüssigkeit kann der Messfehler berechnet werden und, falls die Fehlerzahl zu hoch ist, der gemessene Wert verworfen werden. Die Fehlerursachen sind z.B. Verunreinigungen bzw. Verschmutzungen im Substrat oder in der Flüssigkeit.

Mit jeder Flüssigkeit wurden 5 Messungen durchgeführt (insgesamt 15 pro Substrat, mit bzw. ohne Primer). Das Messergebnis ist durch deren arithmetischen Mittelwert gegeben. Effekte wie statische Aufladung oder Verunreinigung auf Oberflächen lassen sich auf den Bildern leicht erkennen, z.B. wenn sich eine Seite des Tropfens viel schneller bewegt als die andere. Gemäß des o.g. Standards sollten diese Messungen gelöscht werden.

Tab. 5.22: Einstellungen | Messungen Grenzflächenenergie | Kontaktwinkelmessgerät Dataphysics OCA 20

Einstellung	Daten
Gerät	Kontaktwinkelmessgerät OCA 20 (DataPhysics)
Prüfflüssigkeiten	Wasser, Ethylenglykol und Diiodmethan
Tropfenvolumen	3 μ l
Tropfenkontur	Kegelschnittgleichung (Ellipse Fitting)
Auswertungssoftware	SCA20 (DataPhysics)
Berechnung	nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble
Beleuchtung	80%

5.3.2. Charakterisierung der verwendeten Tinten und Primer

Viskosität

Inkjet-Tinten sind niedrigviskos (ca. 2 ... 10 mPa·s). Übliche Messgeräte für diesen Viskositätsbereich sind die Rheometer mit koaxialen Zylindersystemen, Doppelspalt-Zylindersystemen und mit Kegel-Platte zur Verfügung⁶⁹. Die ersten zwei haben konstruktionsbedingte Vorteile gegenüber dem Kegel-Platten-System. Die Kontaktfläche von Flüssigkeit und Zylinder ist größer und somit empfindlicher gegenüber kleinen Drehmomentschwankungen, die bei niedrigen Viskositäten auftreten können. Bei Messungen mit einem Kegel-Platte System können diesen Schwankungen lediglich wahrgenommen, jedoch nicht gemessen werden. Das verwendete Rheometer zeigt diese Schwankungen (Fehlermeldung) an, so dass die Messung annulliert werden kann.

Aufgrund von Vorversuchen wurde eine niedrige Schergeschwindigkeit definiert, da bei längeren Messungen die Trocknung der Tinte die Auswertung beeinträchtigt. Zapka erklärt, dass, obwohl beim Inkjet Druckverfahren eine hohe Schergeschwindigkeit erforderlich ist, die meisten Tinten auch bei einer niedrigen Schergeschwindigkeit gemessen werden können [151, S.33]). Das ist insofern einleuchtend, wenn die Tinten wie hier newtonsches bzw. nahezu newtonsches Verhalten zeigen, da dieses Verhalten für eine Viskosität unabhängig von der Schergeschwindigkeit steht.

Der Kegel des verwendeten Rheometers hat einen Winkel von 1°. Hierdurch wird erreicht, dass die Schergeschwindigkeit an jedem Radius im Messspalt identisch ist. Vor jeder Messung wurden die Messflächen mit Isopropanol gereinigt und dann ca. 1 ml des zu messenden Fluids aufgebracht. Die Flüssigkeit muss frei von Luftblasen und Verunreinigungen sein. Die Messung wird gestartet und der Kegel wird abgesenkt. Wenn er 0,3 mm von der Platte entfernt ist, soll die Flüssigkeit bereits in radialer Richtung aus dem Spalt austreten, weil somit der Messspalt vollständig mit dem Fluid ausgefüllt ist. Die Messergebnisse repräsentieren den arithmetischen Mittelwert von 3 Messungen. Die Einstellungen des Rheometers sind in Tab. 5.23 dargestellt und die

⁶⁹Hier werden nur die servomotorischen Systeme betrachtet.

Abb. 5.27 veranschaulicht die oben beschriebene Kegelgeometrie.

Tab. 5.23: Einstellungen | Rheometer Anton Paar | Messungen der Viskosität

Einstellung	Daten
Gerät	Rheometer MCR 101 (Anton Paar)
Außenradius des Kegels [mm]	25
Öffnungswinkel des Kegels [°]	1
Messspalte	0,3 mm
Messpunkte	100
Scherrate [1/s]	1 - 100
Flüssigkeitsvolumen [ml]	ca. 1
Kalibrierung	mit Silikonöl

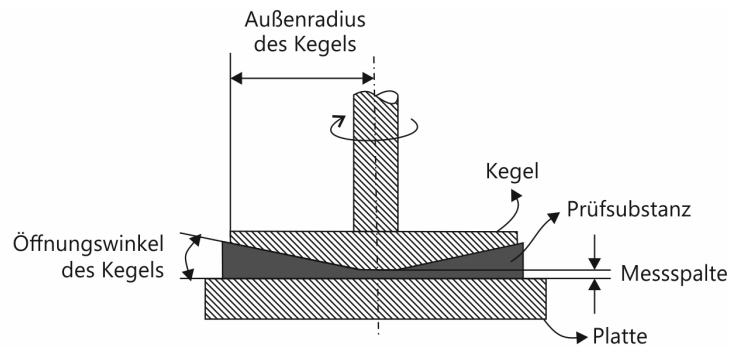


Abb. 5.27: Geometrie der konischen Kegel | Kegel-Platte Rheometer

Oberflächenspannung

Die dynamische Oberflächenspannung der Flüssigkeiten (Tinten, Primer) wurde mit einem Blasentensiometer gemessen. Bei der Blasendruckmethode wird eine Kapillare in die zu messende Flüssigkeit getaucht. Parallel zur Kapillare ist ein Thermometer. Zwar wird die Oberflächenspannung durch die stoffliche Zusammensetzung des Fluids bestimmt, doch auch durch die Temperatur beeinflusst. Die Kapillare befindet sich senkrecht mit einer Öffnung in einem Bad mit dem zu messenden Fluid. Wenn Luft unter Druck in die Kapillare einströmt, bildet sich an deren Austritt in der Flüssigkeit eine Luftblase.

Der Druck innerhalb der Blase steigt. Bei maximalem Druck hat die Blase die Form einer Halbkugel, wobei der Radius der Blase (r_b) gleich dem Radius der Kapillare (r_{kap}) ist. Wenn der Druck abnimmt, nimmt die Blase an Größe zu und löst sich von der Kapillare ab. Die Oberflächenspannung wird durch diesen Zyklus der Variation von Druck und Radius berechnet, der durch das Lapace'sche Gesetz gegeben ist ($p = \frac{2\sigma}{r}$). Die Abb. 5.28 veranschaulicht diesen Verlauf, wobei t_{life} die Druckanstiegsperiode und t_{tod} die Druckabfallperiode ist [131]. Von jeder Flüssigkeit wurden 3 Messung durchgeführt

und pro Messung werden 100 Blasen erstellt. Das Tensiometer berechnet das Ergebnis jeder Messung anhand des arithmetischen Mittelwertes aller 10 Messpunkte. Weitere Einstellungen sind in der Tab. 5.24 zusammengefasst.

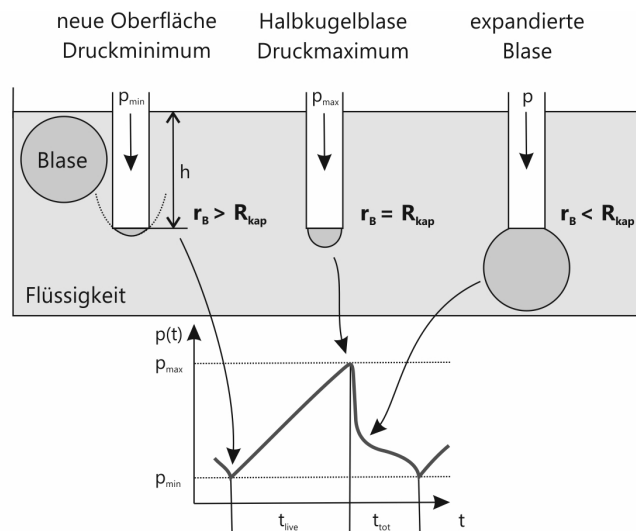


Abb. 5.28: Messprinzip Blasendruck-Tensiometer - [131]

Tab. 5.24: Einstellungen | Messungen Oberflächenspannung | Blasentensiometer SITA

Einstellung	Daten
Gerät	Blasentensiometer Pro Line t15 (SITA)
Blasenlebensdauer [ms]	200
Interval [s]	2
Temperatur [°C]	20
Kalkulation	Mittelwert aller 10 Messpunkte
Kalibrierung	mit Osmosewasser

Kapitel 6

6. Ergebnisse und Diskussion

Die in diesem Kapitel verwendeten und stets wiederkehrenden Bezeichnungen und Abkürzungen sind in Tab. 6.1 dargestellt.

Tab. 6.1: Bezeichnungen und Abkürzungen in Diagrammen und Tabellen

Bezeichnung	Bedeutung	siehe
B01 bis B07	Karton Kennung	Tabelle 3.3
A	Experiment/ Messungen an Kartons ohne Vorbehandlung	Tabelle 5.9
B	Experimente/ Messungen an Kartons mit Primer Vorbehandlung	Tabelle 5.9
C	Experimente/ Messungen an Kartons nach IR-Strahlung	Tabelle 5.9
D	Experimente/ Messungen an Kartons mit Primer Vorbehandlung und nach IR-Strahlung	Tabelle 5.9
Kp-T	Pigmentbasierte Tinte - Farbe Schwarz - Industrielle Inkjet-Tinte	Tabelle 5.3
Kf-T	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Schwarz - Industrielle Inkjet-Tinte	Tabelle 5.3
Kp-C	Pigmentbasierte Tinte - Farbe Schwarz - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
Kf-C	Farbstoffbasierte Tinte - Farbe Schwarz - SOHO-Inkjet-Tinte	Tabelle 5.2
Stab-W	Drahtrinkel - Auftragsmenge von ca. 0,6 g/m ²	-
Stab-G	Drahtrinkel - Auftragsmenge von ca. 1,2 g/m ²	-
Stab-R	Drahtrinkel - Auftragsmenge von ca. 1,8 g/m ²	-
P01 bis P12	Primer Kennung	Tabelle 5.6

Die Ergebnisse der Vorversuchsreihen 1 und 2 wurden in Kapitel 5 (Seite 80) zusammengefasst. In Abschnitt 6.1 werden die Ergebnisse der 3. Vorversuchsreihe zum Einfluss von Primer und IR-Strahlung auf die Haftung und Festigkeit der Tinten auf den Substraten vorgestellt und diskutiert. In Abschnitt 6.2 werden die Ergebnisse des Experiments zur Validierung des Lösungsansatzes und in Abschnitt 6.3 die Messungen zur qualitativen Auswertung des des Lösungsansatzes vorgestellt und kritisch betrachtet. In Abschnitt 6.4 und 6.5 werden die Ergebnisse der Messungen zur Charakterisierung von Karton, Tinten und Primer präsentiert sowie relevante Aspekte in Bezug auf die Messmethoden diskutiert. In Abschnitt 6.6 werden die Ergebnisse der Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten sowie die Korrelationsberechnungen zwischen diesen Ergebnisse und den Charakterisierungen der Materialien präsentiert und diskutiert.

6.1. Experimente zur Eingrenzung des Problems

In der Tab. 6.2 sind die Ergebnisse aus dem 3. Vorversuch (S. 81) zusammengestellt. Das Experiment zielte darauf ab a) den Einfluss von Primer P07 und IR-Strahlung auf die Haftung der Tinten (Beständigkeit gegen Schmierer mittels Wisch-Test) zu bewerten und b) den Einfluss verschiedener Volumina von P07 auf die Haftung der Tinten zu analysieren.

Haftung ist hier nicht mit Trocknung oder Benetzung zu verwechseln. Eine Tinte ist trocken, wenn ihre flüchtigen Teile, wie z.B. Träger (Wasser) und Co-Träger (zweites Lösungsmittel) verdunstet sind. Unter Benetzung ist zu verstehen, dass sich eine Tinte auf dem Substrat – unter bestehenden Differenzen der Oberflächenspannung / Grenzflächenenergie zwischen Tinte und Substrat – lateral ausbreiten kann. Mit der Benetzung setzt auch die Trocknung ein, wobei sich zunehmend Adhäsion zwischen einem Substrat und einer Beschichtung ausbilden kann. Damit die Tinte auf der Oberfläche haftet, ist es essentiell, dass sie die Oberfläche benetzt. Mit dem Spreiten vergrößert sich die Oberfläche der Tinte, wodurch das schnelle abdampfen ihrer flüssigen Bestandteile begünstigt wird. Jedoch verbleiben Pigmente auf der Oberfläche von Substraten, so auch bei beschichteten Kartons. Unter Haftung ist hier ein Zustand zu verstehen, bei dem der farbgebende Teil der Tinte nicht mehr durch Berührung entfernt werden kann. Die beiden in dieser Arbeit verwendeten Tinten auf Pigmentbasis schmiereten noch nach Wochen (RT \approx 23°C, RF = 50%), obwohl die flüssigen Teile verdunstet sind. Die Reduzierung oder Erhöhung der Dauer bis zum den Punkt, an dem die Tinte nicht mehr schmierfähig ist, hier einfach «Haftungszeit» genannt, steht in Referenz zu den Kartons der Gruppe A, die keine Vor- und Nachbehandlung bzw. Primer und IR-Bestrahlung erhielten.

Im Ergebnis steht, dass nur die Auftragung des Primers (Gruppe B) bzw. nur der Einsatz von IR-Strahlung (Gruppe C) marginale oder unzureichende Auswirkungen auf die Haftung der Tinten hat.

In Gruppe B zeigt die farbstoffbasierte Tinte Haftung zwischen 10 und 120 Sekunden nach dem Druck. Die Ergebnisse sind je nach Karton und aufgetragenem Primervolumen unterschiedlich, mit einer leichten Tendenz zu kürzerer Haftungszeit beim höheren Volumen (Stab-R). Bei Gruppe B zeigt die pigmentbasierte Tinte nach 120 Sekunden Haftung. Das ist eine bemerkenswerte Reduzierung der Haftungszeit. Bei der farbstoffbasierten Tinte war je nach Karton die Haftungszeit unter Verwendung des Primers sogar noch länger im Vergleich zu Gruppe A. Bei Gruppe C haften die pigmentbasierten Tinten nicht und bei der farbstoffbasierten Tinte hat die IR-Strahlung die Haftungszeit der Tinte verändert, aber keine gleichmäßige Verbesserung gebracht.

Die Behandlungen der Gruppe D haben sich als wirksam erwiesen, was die Haftung der Tinte betrifft. Bei der farbstoffbasierten Tinte wurde die Haftungszeit bei 5 von 7 Kartons mit dem Primer P07 und zusätzlicher IR-Strahlung reduziert. Die maximale Dauer bis zur Schmierfestigkeit betrug je nach Primervolumen 10 Sekunden. Bei der pigmentbasierten Tinte wurde die Haftungszeit aller Drucke reduziert. Die maximale Zeit betrug 15 Sekunden mit dem Stab-G. Ohne Vor- und Nachbehandlung stellte sich auch nach 24 Stunden keine Schmierfestigkeit ein. Bei Primerauftrag mit Stab-G benötigte die Tinte einheitlich lange bis zur Schmierfestigkeit.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse kann folgendes gesagt werden:

a) Das Volumen des aufgetragenen Primers hat einen Einfluss auf die Haftungszeit der

Tinte. Der Einfluss ist weder linear (z.B. je mehr Primer, desto schneller haftet die Tinte), noch gleich wirksam auf unterschiedlichen Substraten.

b) Eine effektive Reduzierung der Haftungszeit wurde nur bei gleichzeitiger Verwendung von P07-Primer und IR-Strahlung erreicht.

Tab. 6.2: Haftungszeit - Wirkung von Primer P07 und IR-Strahlung [in Sekunden]

Tinten		Kp-C				Kf-C			
Primer		ohne	Stab-W	Stab-G	Stab-R	ohne	Stab-W	Stab-G	Stab-R
-auftrag									
Gruppe	Karton								
A	B01	●	○	○	○	30	○	○	○
	B02	●	○	○	○	5	○	○	○
	B03	●	○	○	○	60	○	○	○
	B04	●	○	○	○	5	○	○	○
	B05	●	○	○	○	60	○	○	○
	B06	●	○	○	○	120	○	○	○
	B07	●	○	○	○	120	○	○	○
B	B01	○	●	120	120	○	60	15	15
	B02	○	●	120	120	○	120	15	15
	B03	○	120	120	120	○	30	60	60
	B04	○	●	120	●	○	30	60	120
	B05	○	120	120	120	○	120	30	10
	B06	○	120	120	120	○	30	15	10
	B07	○	●	120	120	○	120	30	10
C	B01	●	●	●	●	10	●	●	●
	B02	●	●	●	●	5	●	●	●
	B03	●	●	●	●	60	●	●	●
	B04	●	●	●	●	5	●	●	●
	B05	●	●	●	●	120	●	●	●
	B06	●	●	●	●	●	●	●	●
	B07	●	●	●	●	60	●	●	●
D	B01	●	15	10	10	●	5	5	5
	B02	●	10	15	10	●	5	5	5
	B03	●	30	15	30	●	5	10	10
	B04	●	30	15	●	●	5	5	10
	B05	●	15	15	15	●	5	10	5
	B06	●	15	15	15	●	10	5	5
	B07	●	15	15	15	●	10	5	5

● → Tinte ist nach 24 Stunden nicht trocken.

○ → nicht zutreffend

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Primer und die IR-Strahlung komplementäre Wirkungen haben.

Die Verwendung von P07-Primer (Gruppe B) hat zwar die Haftungszeit verkürzt, dennoch dauert diese für eine industrielle Produktion noch unangemessen lange. PVOH

wird, wie im Unterabschnitt 3.1.3 erläutert wurde, bereits für Inkjet-Substrate (*Swellable*) verwendet, da es aufgrund seines hydrophilen Charakters den flüssigen Anteil der Tinte absorbiert.

Der Mechanismus, der die Haftungszeit für Farbstofftinte durch PVOH reduziert, ist bekannt. Lamminmäki beschreibt: „*The addition of binder into the coating colour creates further surfaces, where the ink solvent as well as ink colorant can diffuse and/or adsorb, and in the case of swelling binder interpolymer matrix diffusion also takes place.*“ [88, S.45]. Hier wird davon ausgegangen, dass der Farbstoff und das Lösungsmittel (Wasser) in das Polymer diffundieren und darin verbleiben. Erleichtert wird die Absorption durch die Schwellung, wegen Wasseraufnahme, die die Polymerkette bewegt. Die Autorin bezieht sich auf die Verwendung von PVOH als Bindemittel in der Pigmentstrichmasse, jedoch nicht ausdrücklich als Primer, der über den Pigmentstrich aufgetragen wird. Die Auswirkung kann jedoch bei einer Primerbeschichtung durchaus ähnlich sein.

Neu war in diesem Experiment, die Wirkung des PVOH-Primers bei der Tinte auf Pigmentbasis zu demonstrieren. Es scheint, dass mit der Diffusion des Lösungsmittels in die Polymerenmatrix des PVOH auch die Verkürzung von Haftungszeiten bei Pigmenttinten erklärt werden kann. Ohne jegliche Vorbehandlung des Substrats verbleiben die Pigmente auf der Substratoberfläche und die bedruckten Bereiche verschmieren bei Kontakt noch nach Tagen als Auswirkung des Filterkucheneffekts (vgl. Abb. 3.14, S. 21). Pond stellt fest, dass Tinten auf Pigmentbasis anfälliger für mechanischen Abrieb sind. Um diesen Effekt zu verringern, schlägt er die Verwendung von löslichen Polymeren wie Latex oder PVOH in der Tintenformulierung vor [115, S.194].

Bei ausschließlicher Verwendung von IR-Strahlung (Gruppe C) gibt es weder eine bemerkbare Verbesserung der Haftung bei der farbstoffbasierten Tinte und, noch eine Auswirkung auf die unzureichende Haftung der pigmentbasierten Tinte. Dies deutet darauf hin, dass die beschleunigte Verdampfung des flüssigen Teils der Tinten durch IR-Strahlung nicht ausreichend ist, um die Haftung des farbgebenden Tintenanteils zu erhöhen. Die Arbeit von Hasebe et al. weist jedoch darauf hin, dass je nach Abstand zwischen Substrat und Strahler sowie nach unterschiedlichen Bestrahlungszeiten die Ergebnisse bei Tinten auf Pigmentbasis beeinflusst werden können [51, S.47-50]. Das legt nahe, dass die Thematik IR-Strahlung und Pigmenttinten weiter erforscht werden sollte.

Der Vergleich der Ergebnisse der Gruppen C und D zeigt, dass die Verbesserung der Haftung und Reduzierung der Haftungszeit beider Tinten bei Gruppe D auf die Wirkung der IR-Strahlung auf das PVOH – und nicht alleine auf die Tinte – zurückzuführen ist. Eine plausible Erklärung ergibt sich aus der Glasübergangstemperatur (T_g) des PVOH, die sich zwischen entsprechend der Abkühl-, bzw. Aufheizmessung zwischen 75 °C und 83 °C bewegt (vgl. Tab. 3.7). Es wurde eine dynamische Differenzkalorimetrie Messung⁷⁰

⁷⁰Die Messung wurde in der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Bergischen Universität Wuppertal - Lehrstuhl Makromolekular Chemie durchgeführt. Gerät: Dynamische Differenzka-

für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur des PVOH 20-98 durchgeführt, um den genauen Wert zu ermitteln. Das Ergebnis bestätigt den Referenzwert mit einer Tg von 79,17 °C (Abb. 6.1, 1.Heizkurve, Mittelpunkt ISO).

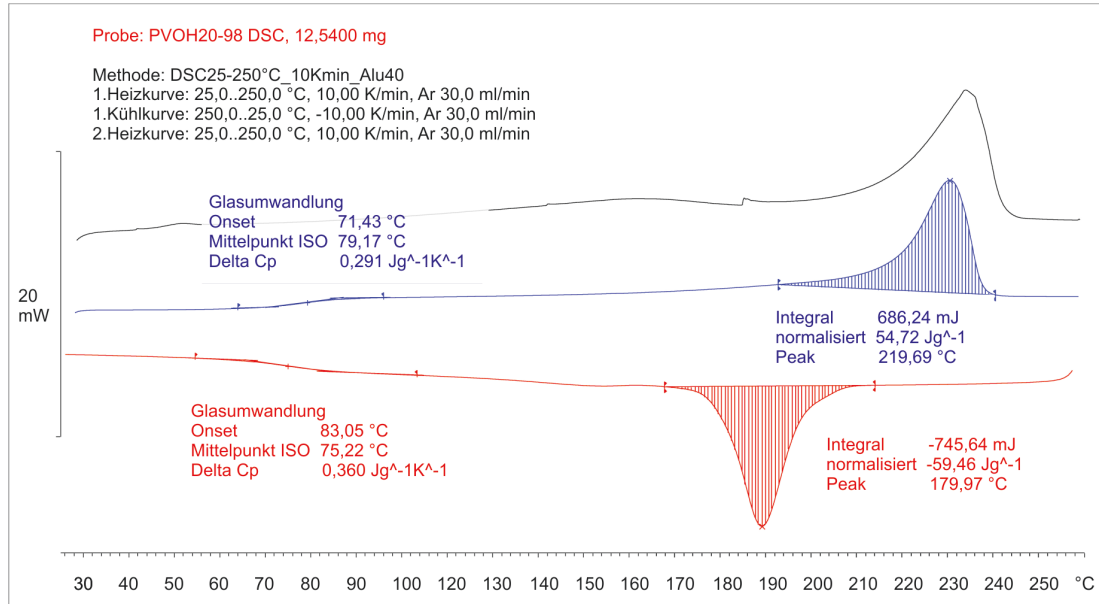


Abb. 6.1: Dynamische Differenzkalorimetrie PVOH 20-98

Die geprimerten Kartons wurden ca. 2 Sekunden lang in 38 mm Abstand unter dem IR-Strahler exponiert. In diesem Zeitintervall ist es nicht möglich, die Temperatur des Kartons ohne den Einfluss der Umgebung zu messen. Es wurde mit einem Laser IR-Thermometer die Temperatur des Kartons unmittelbar nach der Exposition ermittelt. Die Werte lagen bei allen Kartons über 80°C, was als Annäherungswert verwendet werden kann.

Während der Kartonherstellung kann beim Auftrag der Pigmentstreichmasse auf das Basispapier IR-Strahlung zur Immobilisierung von Bindemittel eingesetzt werden [54, S.714]. Dies spricht für einen Einfluss der IR-Strahlung auf Polymere wie PVOH, die bei der Kartonbeschichtung sehr oft als Bindemittel verwendet werden- Die IR-Absorptionskurve von PVOH 20-98 (Abb. 6.2 - rot) wurde mit der IR-Strahler-Emissionskurve (grün) verglichen.

Der ausgedehnte Bereich zwischen ca. 3600 - 2800 cm⁻¹ entspricht der Molekülschwingung der funktionellen Gruppe -OH, wo sich der höchste Absorptionspeak von PVOH 20-98 (außer im *Fingerprint*-Bereich)⁷¹ befindet und auch der höchste Peak der Emission des Strahlers ist.

Wenn das Tintenlösungsmittel (Wasser) die PVOH-Polymerkette öffnet und durch

lorimeter der Fa. Mettler Toledo mit der Auswertesoftware Stare

⁷¹Das FTIR Spektrum von PVOH 20-98 wurde von Dr. Samuel Michel (Senior Manager Waterborne Systems von Kuraray Europe GmbH) zur Verfügung gestellt. Die Messung wurde mit einem Bruker FTIR durchgeführt.

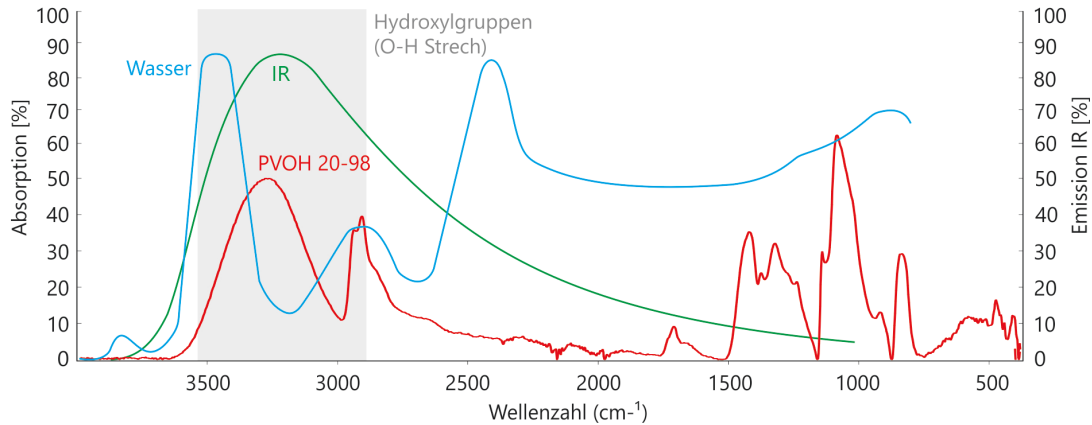


Abb. 6.2: Absorptionskurven der IR-Strahlung von PVOH 20-98 und Wasser und Emissionskurve der IR-Strahler

Diffusion zusammen mit dem Farbstoff zwischen die Polymerenkette eindringt, beschleunigt die IR-Strahlung zusätzlich die Lösungsmittelverdunstung und bewegt die amorphe Phase von PVOH (kurzzeitig über T_g). Das ist der Auslöser einer induzierten Kettenmobilität. Dadurch bewegen sich Farbstoffe und Pigmente zur Polymermatrix.

Sobald die Temperatur des PVOH unter der T_g ist, sind die Farbstoffmoleküle und Pigmentcluster in der Polymermatrix gefangen und nicht mehr schmierfähig. Das hier beschriebene Modell bezieht sich daher nicht auf einen Haftungsmechanismus, sondern auf eine Art Einkapselung. Ein Nebeneffekt der Erhöhung der Temperatur des PVOH ist die Reduzierung des amorphen Anteils des Polymers und die Erhöhung seiner Kristallinität [84, S.4]. Die Wasserpermeation wird dadurch reduziert, was von Nachteil sein kann, da die restlichen Lösungsmittel weniger Mobilität haben und so langsam verdunsten.

Die Verwendung von Primer und IR-Strahlung scheint eine praktikable Lösung zu sein, um die Haftungszeit von farbstoffbasierten und pigmentbasierten Tinten bei den zu testenden Kartons zu reduzieren. Dieser Vorgang wird in dieser Arbeit als «Lösungsansatz» bezeichnet.

Die Anwendung des Heißluftofens (Trockenschrank) war, trotz einer Erhöhung der Temperatur des PVOH, nicht ausreichend, um die Haftungszeit zu reduzieren. Nach Angabe der PVOH-Hersteller kann eine Kettenmobilität auch durch Temperaturen unter der T_g induziert werden, dies ist jedoch zeitintensiv. Dies erklärt sich dadurch, dass die konvektive Energie aufgrund von Wärmeübergang und -leitung (Polymere sind zudem schlechte Wärmeleiter) nur sehr langsam in das PVOH eindringt, während die IR-Strahlung bereits in den oberen Schichten des PVOH absorbiert und in Schwingungsenergie der Moleküle umgesetzt wird.

Aufgrund der Vielfalt der getesteten Materialien wurde nicht näher untersucht, warum ein Typ von PVOH mehr Wirkung als die anderen PVOH im Test zeigte. Es lässt

sich ein Trend zu Primerformulierungen mit einem größeren Volumenanteil von PVOH (4%) statt 1% oder 2%) erkennen. Der Typ 20-98 hat unter den getesteten PVOH das höchste Molekulargewicht (125.000). Höheres Mw erhöht die Filmbildung und steigt die Bindungskraft. Außerdem haben die vollhydrolysierten PVOH-Typen (Hg = 98 und 99) weniger Acetatgruppen und sind daher weniger hydrophob als teilhydrolysiertes PVOH (Hg = 88).

Das zweite Experiment in diesem Unterabschnitt zielte darauf, die Anwendbarkeit von Draht rakel (Stab-G) für den Auftrag von der Primer zu verifizieren. Die auf Seite 83f beschriebene Methode basiert auf dem Δb^* zwischen Messmodi $CIEb^*_{M1}$ und $CIEb^*_{M2}$. Die Ergebnisse sind in Tab. 6.3 dargestellt.

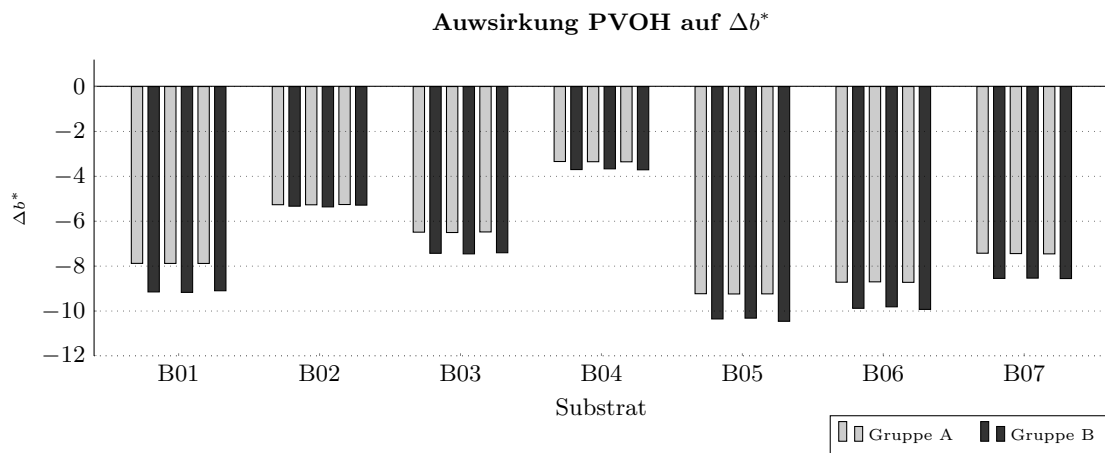


Abb. 6.3: Auswirkung PVOH auf Δb^* | Daten in der Tab. B.1 vgl. S. 176

Nach der Klassifikation unbedruckter Drucksubstrate gemäß ISO 12647-7:2016 – Fluoreszenz in Hinsicht auf Δb^* – weisen alle Kartons, außer B04, einen moderaten ($-6,2 < \Delta b^* \leq -3,7$) bis hohen ($-10,4 < \Delta b^* \leq -6,2$) Aufhellergehalt auf. Hierbei ist auch zu beobachten, dass sich der Δb^* -Wert der Kartons mit der Primerbeschichtung P07 weiter verringert. Diese Methode misst nicht das Aufhellen des Substrats, sondern dessen Verblauung, da beide Effekte durch OBA verursacht werden. Eine Verschiebung auf der b^* -Achse in Richtung $-b^*$ bedeutet eine Verblauung. PVOH ist ein hervorragender Träger von optischen Aufhellern. Aus dieser Beobachtung kann abgeleitet werden, dass bereits PVOH auf die Substrate aufgetragen wurde. Im Verlauf des Experiments hat sich gezeigt, dass weitere PVOH mittels Draht rakel aufgetragen werden konnte.

Die Varianz der Ergebnisse gibt Aufschlüsse über die Gleichmäßigkeit des PVOH-Übertragung. Bei der Gruppe A war die Varianz der b^* -Werte in Messmodus M1 (M1 und M2 vgl. Tab. 5.10, S. 83) zwischen 1% und 4% und in Messmodus M2 zwischen 2% und 7%. Bei der Gruppe B blieb die Varianz in Messmodus M1 zwischen 1% und 8% und in Messmodus M2 zwischen 2% und 9%. Die Extremwerte von 7%, 8% und 9% traten bei M2 und bei M1, in Gruppe B nur bei B02 auf. Die gemessenen b^* -Werte waren niedrig und deswegen erscheinen die Varianz relativ groß. Kartons mit Primer hatten eine Varianz von b^* -Werten, mit Ausnahme von B02, im Durchschnitt unter 2%.

6.2. Experimente zur Validierung des Lösungsansatzes

Auf der Grundlage der in Abschnitt 6.1 vorgestellten Ergebnisse wurden die Versuchsgruppen B und C bei dem Experiment zur Validierung des Lösungsansatzes und seiner qualitativen Auswertung in Abschnitt 6.3 nicht berücksichtigt, da sie sich als ungeeignet erwiesen haben. Außerdem wurde nur der Stab-G zur Auftragung des Primers P07 weiter verwendet, weil die Auftragsmenge von ca. $1,2 \text{ g/m}^2$ augenscheinlich am effizientesten war, um die Haftungszeit der Tinten zu verkürzen, vor allem bei der Tinte auf Pigmentbasis.

Der Wisch-Test, benutzt in den vorherigen Experimenten, ist ein üblicher Praxistest, der von Substrat- und Tintenherstellern angewendet wird. Er bezieht sich lediglich auf die Wischfestigkeit der Tinten, jedoch bezieht er die Produktionsbedingungen nicht mit ein.

In einem Drucker werden die Bogen bedruckt und gestapelt. Bis die Bogen berührt werden, vergeht eine bestimmte Produktionszeit (z.B. ca. 6 Minuten für 200 Bogen bei 2 Bogen/s) und eine Zeit bis der Stapel bewegt wird (z.B. 5 Minuten) (vgl. Abb. 5.5 S. 85). Bei dem 3. Vorversuch variierte die Haftungszeit der Tinten zwischen 5 und 30 Sekunden (Gruppe D). In der Druckmaschine vergehen mehrere Minuten bis den Stapel mit den gedruckten Bogen bewegt wird und daher würden 30 Sekunden als Haftungszeit ausreichend sein. Allerdings ist bei einer Druckleistung von 2 Bogen pro Sekunden dieses Zeitintervall zu lang, weil es im Falle unvollständiger Trocknung und Haftung der Tinte zum Ablegen von Tinte auf der Rückseite des Folgebogens kommen kann. Im diesem Experiment wird nicht nur das Schmieren (mittels Wisch-Test) sondern auch das Ablegen der Tinten analysiert (vgl. Auswertungsschema S. 86). Zusätzlich wurde ab diesem Experiment der zweite Tintensatz „T“ (auf Pigmentbasis und Farbstoffbasis) auch getestet. Die Tinten haben eine Formulierung für industrielle Inkjet-Druckmaschinen.

Scans der gedruckten Felder (K 100%) sind in Abb. 6.5 (T-Tinten) und Abb. 6.6 (C-Tinten) dargestellt. Bei der Auswertung der gedruckten Felder geht es hier nicht um die Druckqualität, wie z.B. Homogenität oder Dichte, die in Unterabschnitt 6.3 vorgestellt wird, sondern um die Beobachtung von Ablegen im Stapel und Schmieren bei Berührung (Abb. 6.4). Diese Mängel werden von langsamer Absorption bzw. Trocknung und ineffizienter Haftung der Tinte auf dem Substrat verursacht.

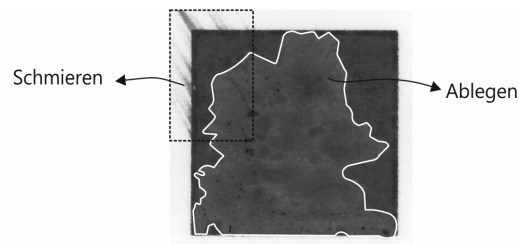


Abb. 6.4: Beispiel von Ablegen und Schmieren

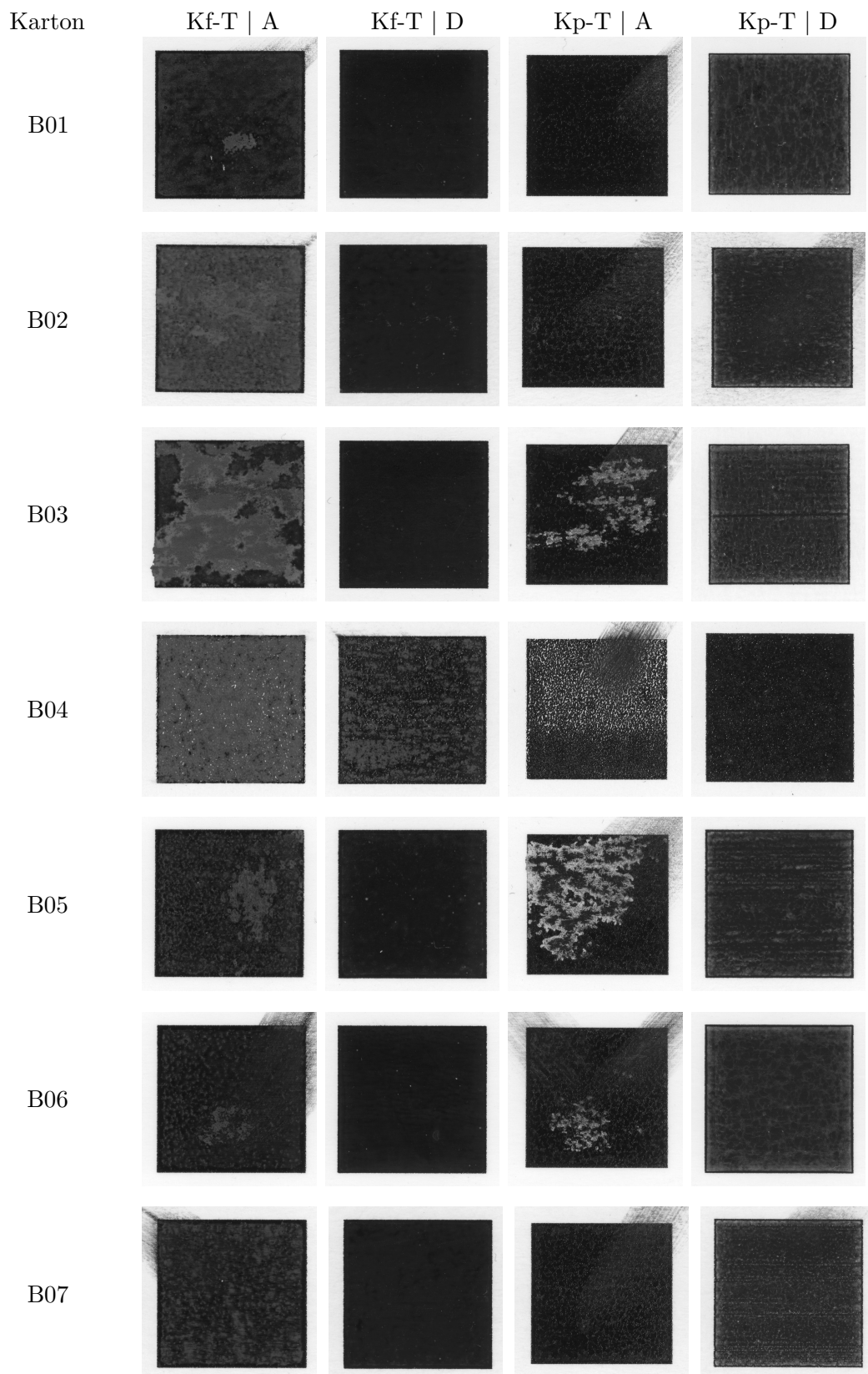


Abb. 6.5: Experimente zum Validieren des Lösungsansatzes | Kf-T und Kp-T | Gruppe A: Karton ohne Vor- und Nachbehandlung; Gruppe D: Karton mit Primer Vorbehandlung und IR-Strahlung

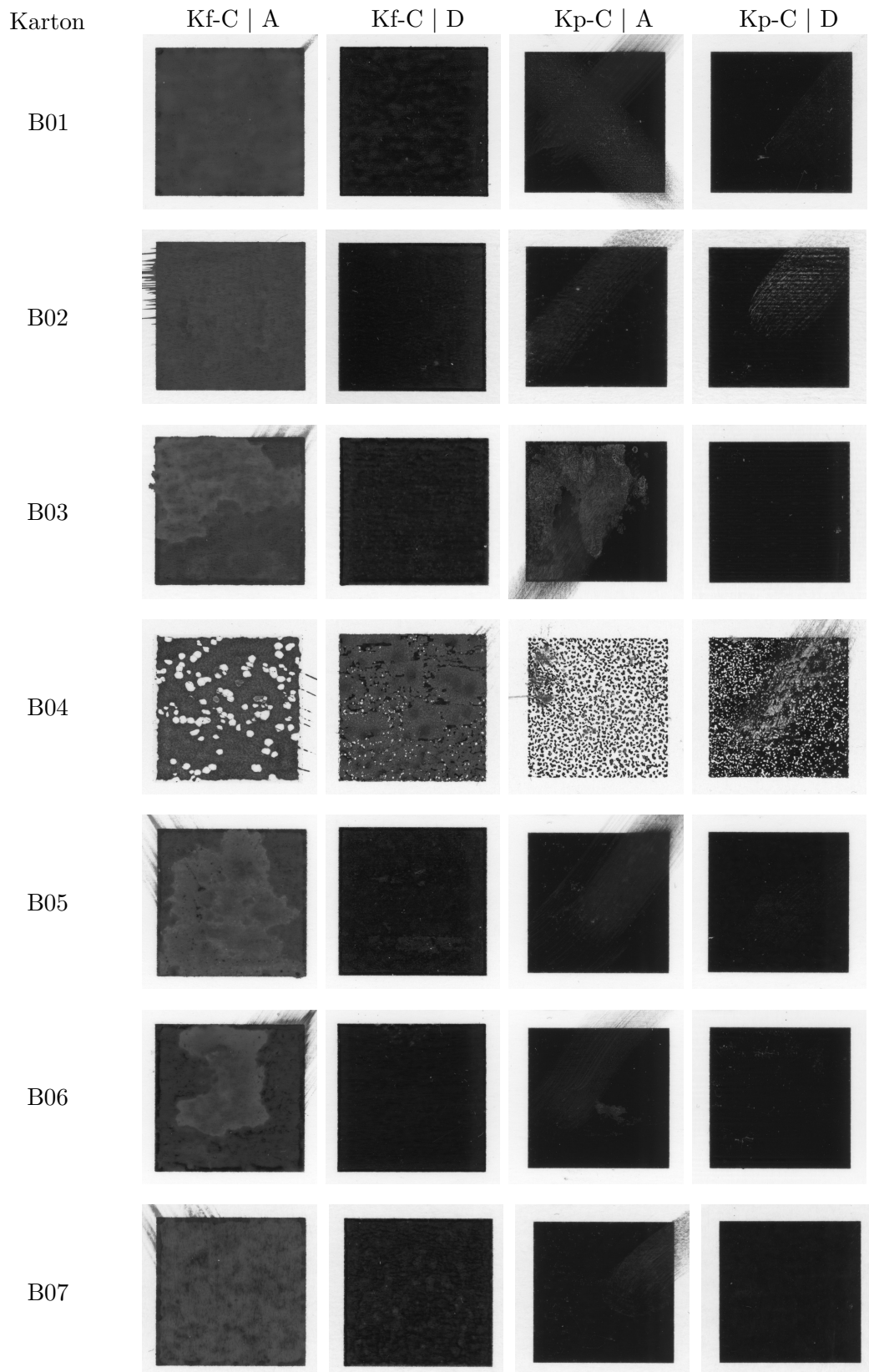


Abb. 6.6: Experimente zum Validieren des Lösungsansatzes | Kf-C und Kp-C | Gruppe A: Karton ohne Vor- und Nachbehandlung; Gruppe D: Karton mit Primer Vorbehandlung und IR-Strahlung

In der Tabelle 6.3 sind die visuellen Auswertungen zusammengefasst, die nach dem Stapeln und dem Wisch-Test durchgeführt wurden.

Tab. 6.3: Visuelle Auswertungen der Felder Abb. 6.5 Abb. 6.6

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Kf-T A	Ablegen	⊗	✓	⊗	✓	⊗	⊗	✓
	Schmieren	⊗	⊗	✓	✓	✓	⊗	⊗
Kf-T D	Ablegen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Schmieren	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kp-T A	Ablegen	✓	✓	⊗	✓	⊗	⊗	✓
	Schmieren	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Kp-T D	Ablegen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Schmieren	✓	⊗	✓	✓	✓	✓	⊗
Kf-C A	Ablegen	✓	✓	⊗	✓	⊗	⊗	✓
	Schmieren	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Kf-C D	Ablegen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Schmieren	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kp-C A	Ablegen	✓	✓	⊗	✓	✓	⊗	✓
	Schmieren	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Kp-C D	Ablegen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Schmieren	✓	⊗	✓	⊗	✓	✓	✓

✓ kein Schmieren oder kein Ablegen
 ⊗ Schmieren oder Ablegen

Bei den Kartons ohne Vor- und Nachbehandlung (Gruppe A) kommt es nach dem Stapeln zu einem Tintentransfer auf der Rückseite der jeweils aufliegenden Bogen (Ablegen), hauptsächlich bei den Kartons B03, B05 und B06, unabhängig vom Tintentyp. Das resultiert aus der geringen Absorptionsrate der Kartons. Das Schmieren bei Berührung tritt bei allen Karton und bei allen Tinten außer B03, B04 und B05 mit Kf-T auf. Das resultiert hauptsächlich aus dem Filterkucheneffekt, aber auch aus der reduzierten Absorptionsrate.

Bei den Kartons mit Vor- und Nachbehandlung (Gruppe D) ist eine deutliche Reduzierung des Schmierens und des Ablegens bemerkbar. Ausnahmen bei dem Wisch-Test sind: B02 (Kp-T und Kp-C), B04 (Kp-C) und B07 (Kp-T).

B04 ist ein gussgestrichener Zellstoffkarton mit niedriger Grenzflächenenergie und geringem polarem Anteil (vgl. Tab. B.18). Die Tinten können B04 nur unvollständig benetzen. Bei Kf-T und Kp-T auf B04 ist die Reduzierung des Schmierens und Ablegens größer als bei Kf-C und Kp-C, obwohl die Oberflächenspannung der C-Tinten sich um nur ca. 11 mN/m von der T-Tinten unterscheidet (vgl. Tab. 6.6). Die pigmentbasierte C-Tinte enthält Lactam, ein Durchdringungsmittel. Das soll die Penetration fördern und die Trocknungszeit reduzieren. Seine Wirkung ist bei dieser Art Oberfläche augenscheinlich jedoch gering. Die geringe Übertragung des PVOH-Primers auf B02 (vgl. Abb. 6.3.) kann eine Erklärung für das Schmieren von beiden Pigmenttinten sein. Trotz dieser

Ausnahmen kann gesagt werden, dass der «Lösungsansatz» die Probleme des Abliegens in 15 von 15 Fällen und die Probleme des Schmierens in 21 von 25 Fällen gelöst hat (vgl. Tab. 6.3).

Bei den gedruckten Feldern mit den C-Tinten konnten keine Probleme festgestellt werden, die durch die Anwendung von PVOH oder IR-Strahlung verursacht wurden. Bei den Kp-T sind jedoch die Ränder der Felder dunkler als die Mitte, was auf den *Coffee-Stain*-Effekt – Trocknungsstrukturen aufgrund von Fließen der Teilchen innerhalb eines Tropfens vom Zentrum zum Rand – hinweist (Abb.6.7, links⁷²). Das wird durch eine schnellere Verdunstung in den Grenzbereichen anders als in der Mitte des Tropfens, verursacht. Außerdem sind unterschiedliche Inhomogenitätsmuster entstanden (Abb.6.7, rechts).

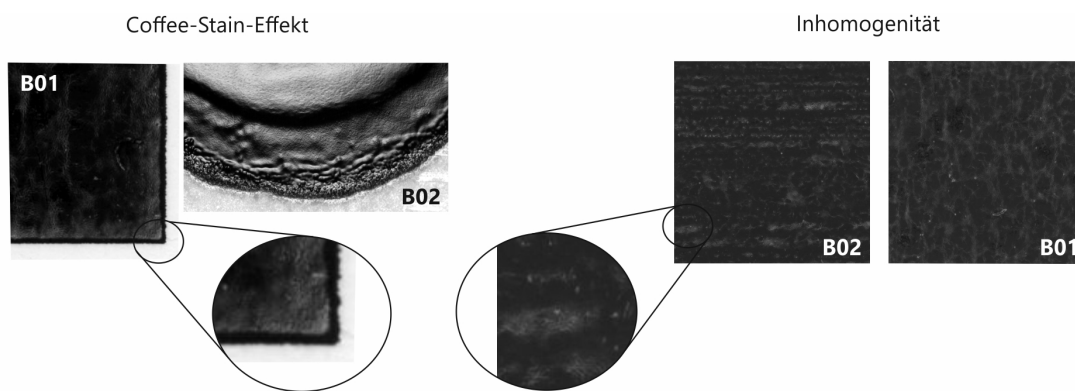


Abb. 6.7: Trocknungsstrukturen bei Kp-T: *Coffee-Stain*-Effekt (links) | Inhomogenität (rechts)

Dieser Effekt, bzw. diese Muster, deutet auf eine inhomogene Trocknung hin, was auf die Verwendung von zwei Lösungsmitteln zurückzuführen sein kann. Dies legt nahe, dass sowohl das Volumen des aufgetragenen Primers als auch die Bestrahlungsdauer und -intensität entsprechend der Tintenrezeptur eventuell nachjustiert werden sollten, insbesondere bei der Tinte auf Pigmentbasis.

6.3. Messungen zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes

Die Ergebnisse der fünf Messungen zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes (Optische Dichte, Tonwertzunahme, Linienwiedergabe, Homogenität und Auflösung) werden im Folgenden dargestellt und analysiert.

Optische Dichte

Im Offsetdruck gibt die optische Dichte Auskunft über die Dicke des Farbfilms auf dem Substrat. Je größer die Farbschichtdicke ist, desto höher ist die optische Dichte. Beim Inkjet-Druck ist die Dicke des Tintenfilms vernachlässigbar. Das Prinzip der optischen Dichte kann aber genutzt werden, um zu messen, wie viel des färbenden Elements -

⁷²Das zweite Bild links wurde nur zur Veranschaulichung aufgenommen. Aufnahme: Mikroskop Zeiss AxioPlan I (20-fache Vergrößerung) von Kp-T(A) auf der B02, Tropfenvolumen ca. 10 μ l

Pigment oder Farbstoff - in der Nähe der Oberfläche des Substrats verblieben ist bzw. in die unteren Schichten des Substrats absorbiert wurde. Diese Analyse erfolgt relativ, d.h. die Messwerte der Gruppe A und D werden miteinander verglichen und nicht absolut ausgewertet. Bei einer absoluten Analyse muss das Volumen, der Farbton und die Lichtbeständigkeit des färbenden Elements in den verschiedenen getesteten Tinten bekannt sein, da die Dichte auch davon abhängig sein kann.

In Anbetracht des Filterkucheneffekts und der unterschiedlichen Absorptionsformen von pigment- und farbstoffbasierten Tinten stimmen die gemessenen Ergebnisse mit den Angaben in der Fachliteratur überein, mit Ausnahme der Tinte Kp-T.

Die Dichtewerte der Gruppen A und D sind bei pigmentbasierten Tinten (Abb. 6.9 und 6.11 stets höher als bei farbstoffbasierten Tinten (Abb. 6.8 und 6.10). Dies ist zu erwarten, da unabhängig von der Primerbeschichtung und der IR-Strahlung die Pigmente nahe an der Oberfläche verbleiben und die Farbstoffe in dem Pigmentstrich absorbiert werden.

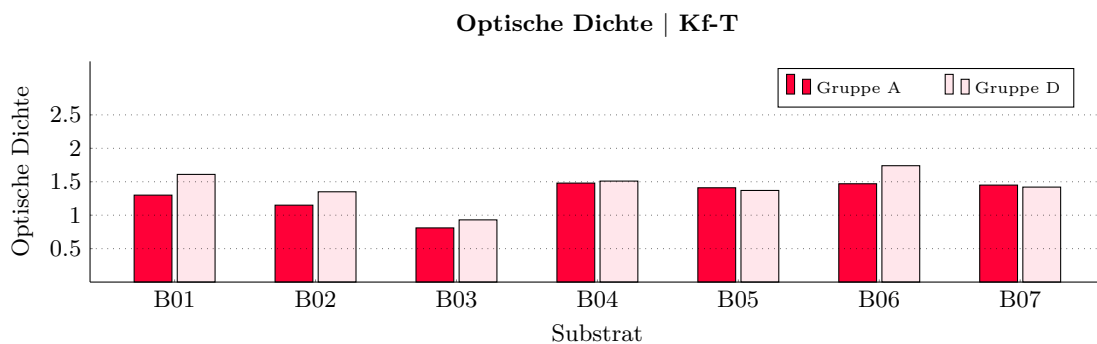


Abb. 6.8: Optische Dichte | Kf-T | Daten in der Tab. B.2 vgl. S. 176

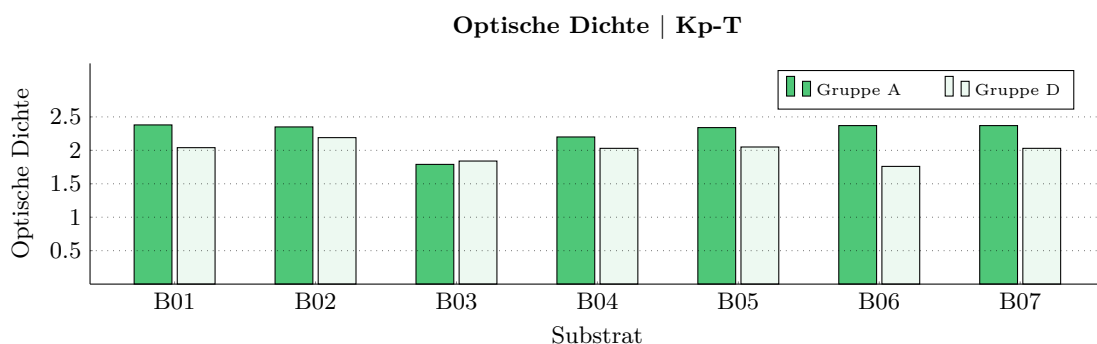


Abb. 6.9: Optische Dichte | Kp-T | Daten in der Tab. B.2 vgl. S. 176

Außerdem steigt die optische Dichte von Kf-T und Kf-C mit der Auftragung des Primers und mit der IR-Strahlung. Dieses Ergebnis wurde aufgrund der Hypothese, dass der Farbstoff in die Polymermatrix diffundiert und nach der IR-Strahlung an der Primerschicht fixiert wird, erwartet. Ohne jegliche Behandlung dringt der gelöste

Farbstoff mit dem Lösungsmittel tiefer in das Substrat ein und wird an der Oberfläche nicht bzw. nur reduziert wahrgenommen.

Der Primer und die IR-Strahlung haben, wie erwartet, bei Kp-C wenig Einfluss auf die optische Dichte zwischen den Gruppen A und D. Die Reduzierung der optischen Dichte von Kp-T (Gruppe B) lässt sich durch den Verlust der Homogenität aufgrund des ungleichmäßigen Trocknens der Tinte erklären, wie in Abb. 6.5 zu sehen ist.

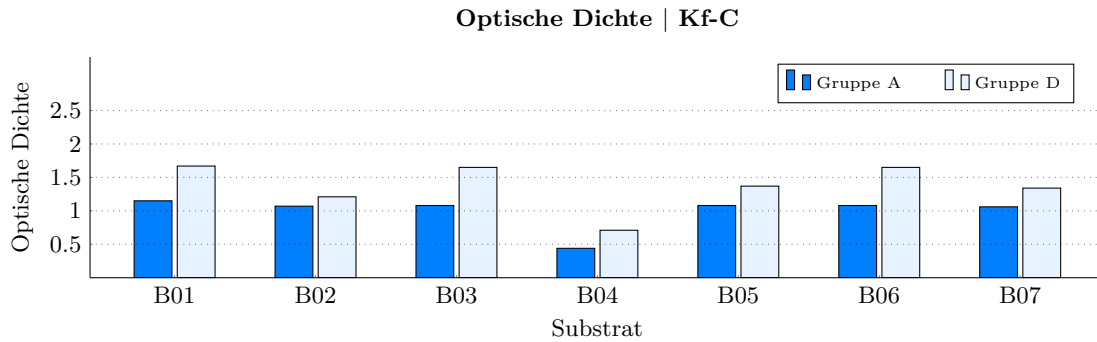


Abb. 6.10: Optische Dichte | Kf-C | Daten in der Tab. B.2 vgl. S. 176

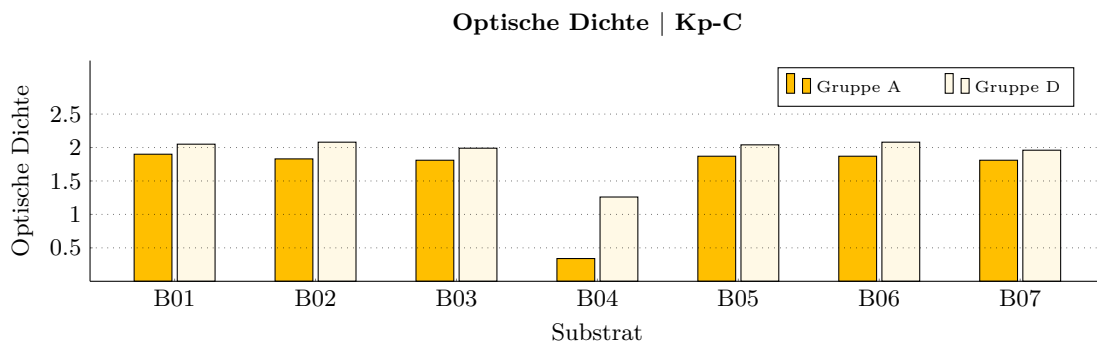


Abb. 6.11: Optische Dichte | Kp-C | Daten in der Tab. B.2 vgl. S. 176

Tonwertzunahme

Beim Offsetdruck ist die TWZ geringer in den Bereichen mit niedriger (10 - 20%) und höherer (80 - 90%) Farbdeckung. Bereiche mit mittlerer Farbdeckung (40 - 60%) können bis ca. 30% TWZ aufweisen. Die TWZ beim Inkjet-Druck entsteht nur durch die seitliche Ausbreitung der Tinte um den gedruckten Punkt herum und bietet somit Informationen darüber, wie stark sich die Tinte auf der Oberfläche ausbreitet. Mit der Anwendung des PVOH-basierten Primers hat sich die Grenzflächenenergie des Substrats erhöht (vgl. Abb. 6.47 und 6.48, S. 140). Es wurde daher erwartet, dass die Tinten auf den Substraten mit Primer (Gruppe D) einem höheren Punktzuwachs als auf den Substraten ohne Primer (Gruppe A) aufweisen.

Die Abbildungen 6.12 bis 6.25⁷³ zeigen die Ergebnisse der TWZ-Messungen der T-Tinten

⁷³Daten sind in der Tab. B.5 vgl. S. 178 und in der Tab. B.6 vgl. S. 179.

und der C-Tinten. Die Abbildung sind nach Karton (B01 ... B07) geordnet. Durch die abgebildeten Kurven können die Unterschiede zwischen Tinten auf Pigmentbasis und Farbstoffbasis, sowie zwischen Gruppe A und D⁷⁴ abgelesen werden.

Die beiden C-Tinten weisen, unabhängig vom Karton-Typ, die gleiche Tendenz auf: höherer Punktzuwachs bei Gruppe D. Es ist auch die leichte Tendenz zu erkennen, dass die Tinte auf Farbstoffbasis bei Farbdeckung um 50% und die Tinte auf Pigmentbasis bei Farbdeckungen zwischen 60 und 70% eine größere Tonwertzunahme aufweist.

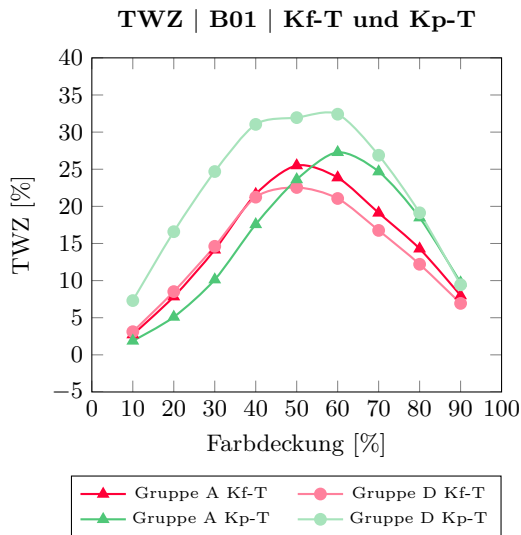


Abb. 6.12: TWZ | B01 | Kf-T | Kp-T

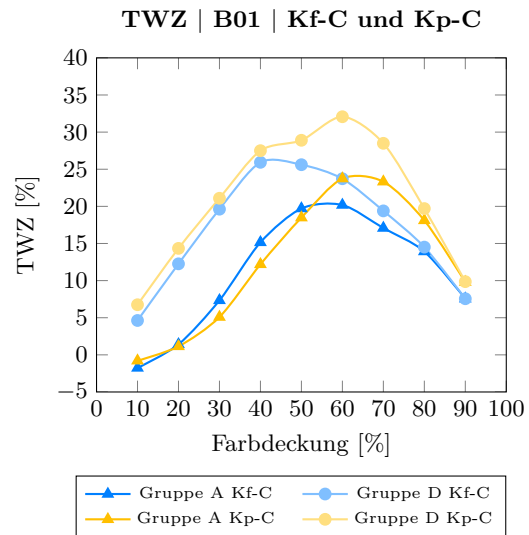


Abb. 6.13: TWZ | B01 | Kf-C | Kp-C

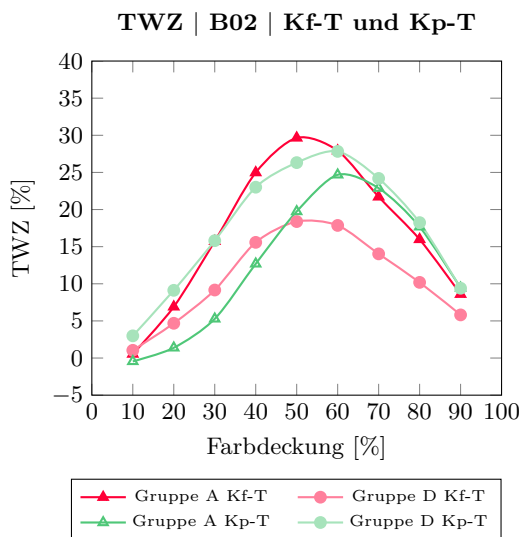


Abb. 6.14: TWZ | B02 | Kf-T | Kp-T

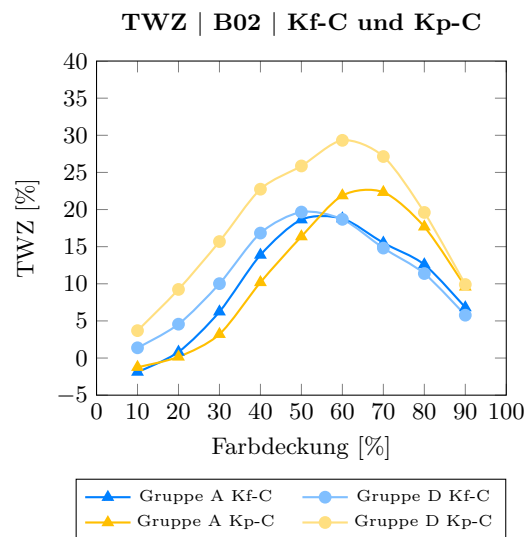


Abb. 6.15: TWZ | B02 | Kf-C | Kp-C

⁷⁴In den Abbildungen wurde der Begriff Farbdeckung beibehalten, obwohl der Begriff Farbe im Offsetdruck und der Begriff Tinte im Inkjet-Druck verwendet wird.

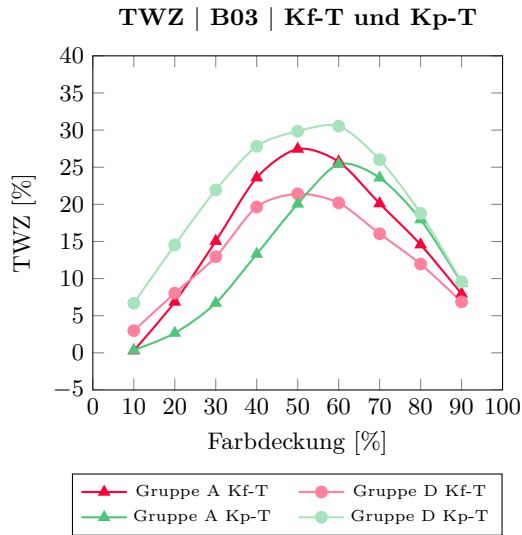


Abb. 6.16: TWZ | B03 | Kf-T | Kp-T

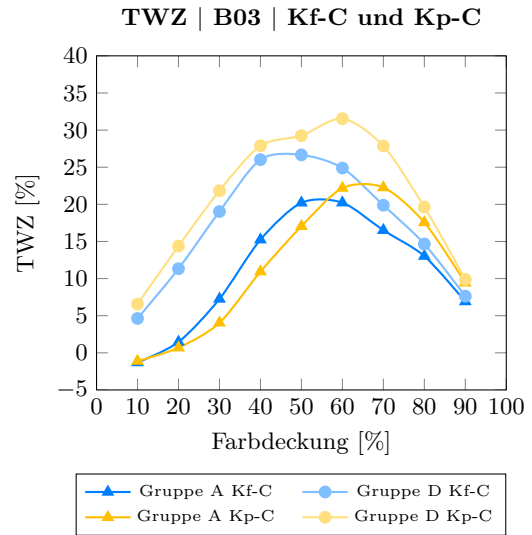


Abb. 6.17: TWZ | B03 | Kf-C | Kp-C

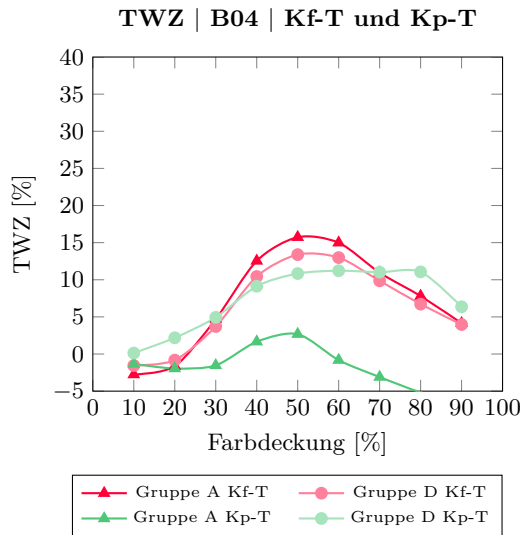


Abb. 6.18: TWZ | B04 | Kf-T | Kp-T

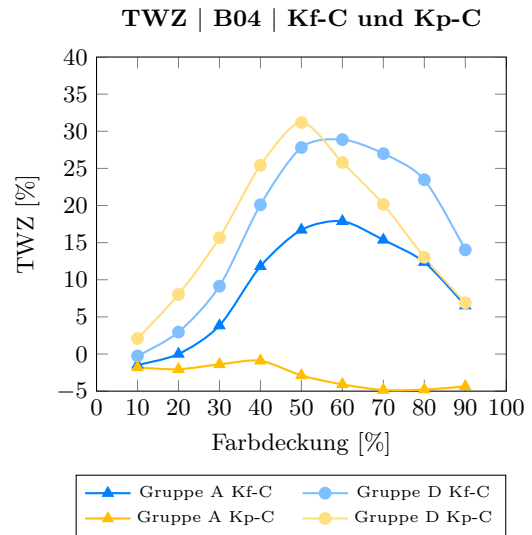


Abb. 6.19: TWZ | B04 | Kf-C | Kp-C

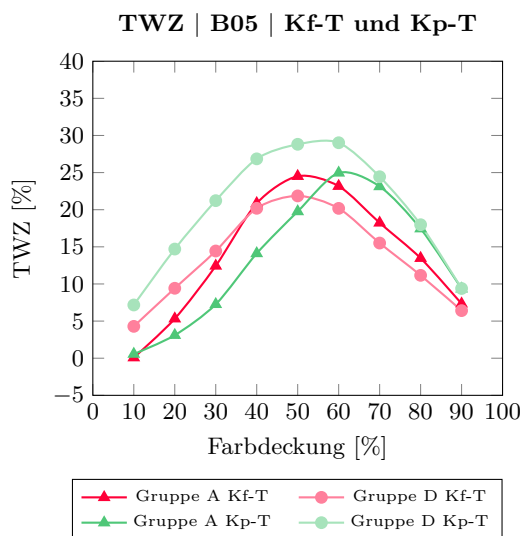


Abb. 6.20: TWZ | B05 | Kf-T | Kp-T

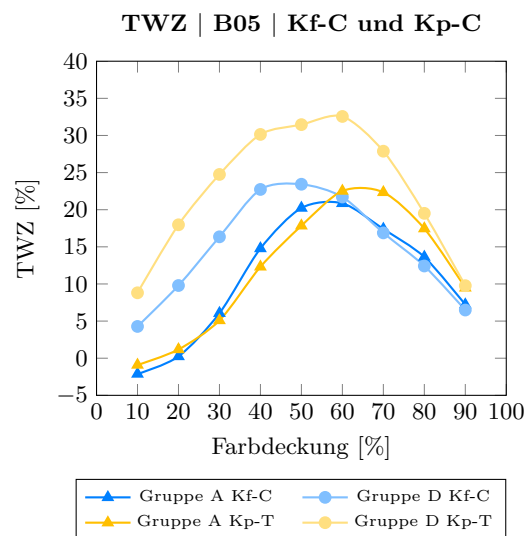


Abb. 6.21: TWZ | B05 | Kf-C | Kp-C

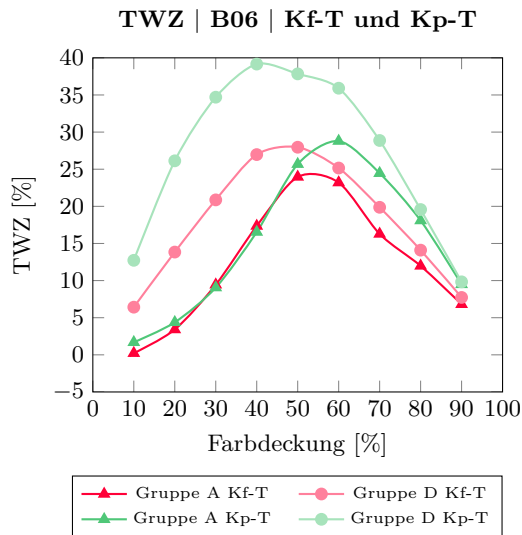


Abb. 6.22: TWZ | B06 | Kf-T | Kp-T

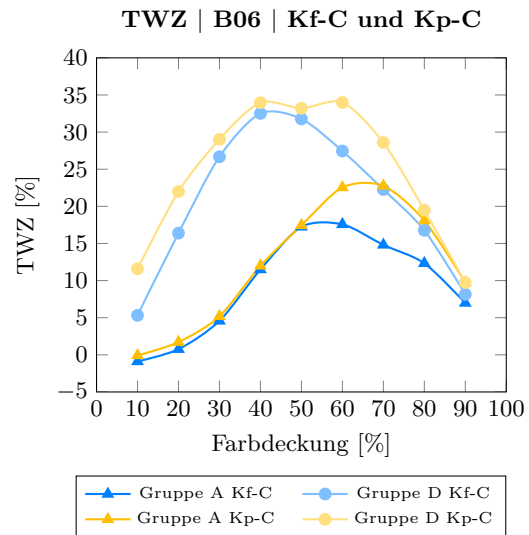


Abb. 6.23: TWZ | B06 | Kf-C | Kp-C

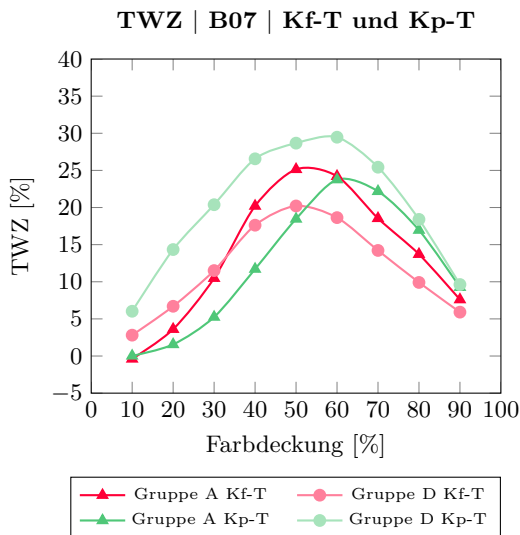


Abb. 6.24: TWZ | B07 | Kf-T | Kp-T

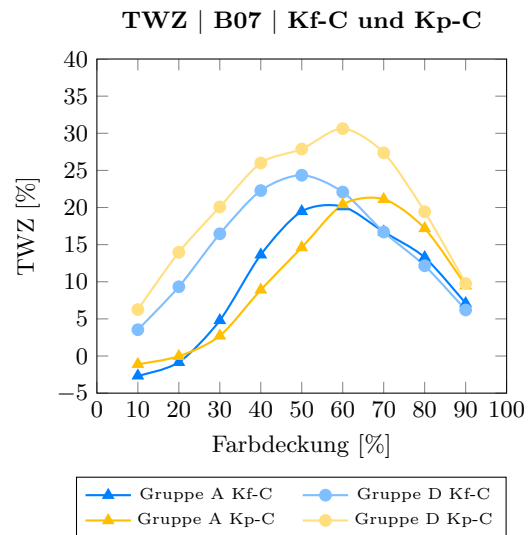


Abb. 6.25: TWZ | B07 | Kf-C | Kp-C

Bei der Gruppe A sind die Unterschiede bei der TWZ beider C-Tinten relativ gering. Daraus lässt sich folgern, dass pigment- und farbstoffbasierte Tinten jeweils unterschiedliches Verhalten hinsichtlich Primer Vorbehandlung und IR-Trocknung zeigen. Die beiden Kurven Kp-C(A) und Kp-T(A) (Karton B04) zeigen einen vollkommen atypischen Verlauf, für den keine plausible Erklärung gefunden wurde, außer dass es sich um Messfehler handeln muss. Diese Kurven werden allein der Vollständigkeit halber dokumentiert und finden bei der Interpretation der Ergebnisse ignoriert. Auf dem Karton B04 weisen die Tinten eine vergleichsweise geringe Benetzung und Haftung auf (vgl. Abb. 6.5, S. 116 und Abb. 6.6, S. 117). Diese Werte können nicht ausgewertet werden. Es ist jedoch möglich, den Einfluss des Primers und der IR-Strahlung auf die Benetzung der Tinte zu beobachten.

Beide Arten der pigmentbasierten Tinte weisen eine höhere TWZ bei den Kartons der Gruppe D als bei der Gruppe A auf. Die Kf-T-Kurven zeigen ein unregelmäßiges Verhalten, allerdings mit einer Tendenz zu geringerer TWZ bei der Gruppe D, was nicht

erwartet wurde.

Hilfsweise und sehr eingeschränkt können die Bilder von Tropfen aller Tinten auf allen Kartons (Anhang F, ab. S. 194) zur Erklärung der TWZ herangezogen werden. Die TWZ wurde an gedruckten Proben gemessen. Bei den Bildern der Tropfen ist zu bedenken, dass es sich um die Kartongruppen A und B (nicht wie bei den TWZ Untersuchungen A und D) handelt, dass die Tropfen mittels Pipette aufgesetzt wurden und nicht von der Düsenaustrittsgeschwindigkeit des Druckers auf Null abgebremst wurden und dass das pipettierte Tropfenvolumen das Volumen der vom Drucker erzeugten Tropfen um zwei Größenordnungen übersteigt. Im Vergleich zu den übrigen Tinten spreitet die Tinte Kf-T in weniger regelmäßiger (Kreis-)Form. Diese Beobachtung ist zumindest ein Hinweis, keinesfalls jedoch ein Nachweis für die Unregelmäßigkeiten in der TWZ.

Ein Vergleich der in Anhang F dokumentierten Tropfenentwicklungen bestätigt, dass alle Tinten dazu neigen, auf den Kartons mit Primer (Gruppe B) weiter und schneller zu spreiten als ohne Primer (Gruppe A). Bei Karton B04, dessen Aufbau von allen übrigen Kartons abweicht, bestätigt sich dieser Effekt der Primer Vorbehandlung nicht. Auf Kartons ohne Primer breiten sich Tropfen aus Kf-T weiter und schneller als die anderen Tinten. Dies könnte eine Erklärung für den höheren Punktzuwachs von Kf-T(A) im Vergleich zu Kf-T(D) sein. Diese Beobachtungen zeigen zwar Tendenzen von Zusammenhängen der TWZ und dem in Anhang F dokumentierten Spreitverhalten von Tintentropfen. Für belastbare und bestätigende Aussagen sind jedoch über die vorliegenden Forschungsarbeiten hinaus weitere Arbeiten erforderlich.

Der *Precursor-Film*-Effekt bei der Benetzung einer Oberfläche beruht auf der Trennung von zwei Lösungsmitteln eines heterogenen Stoffgemisches. Ein Lösungsmittel bewegt sich schneller als das andere Lösungsmittel an der Kontaktlinie (Oberfläche) (Abb. 6.26). Das Ergebnis kann die Koaleszenz erhöhen und den Punktzuwachs beeinflussen [10, S.25].

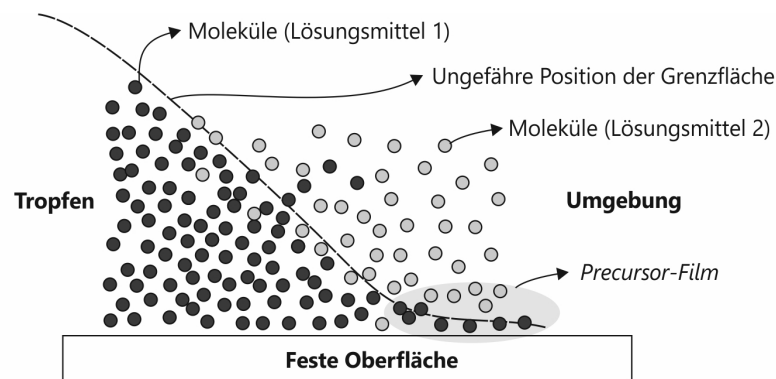


Abb. 6.26: Schematische Darstellung des *Precursor-Films* [10, S.24] - modifiziert

Dieser Effekt ist bereits beim Kontakt des Tropfens mit dem Substrat (Abb. 6.27, links) und nach kurze Zeit nach dem Aufbringen des Tropfens auf dem Substrat (Abb. 6.27, rechts) zu beobachten. Während des Spreitens der Tinte ist der Effekt aufgrund des Farbstoffs bzw. Pigments nicht sichtbar (6.27, mittleres Bild). Dieser Effekt stellte

sich unterschiedlich intensiv ein, ohne dass ein Zusammenhang zwischen Kartontyp oder Tinte festgestellt werden konnte. Ein Einfluss auf den TWZ-Werte ist somit nicht feststellbar.

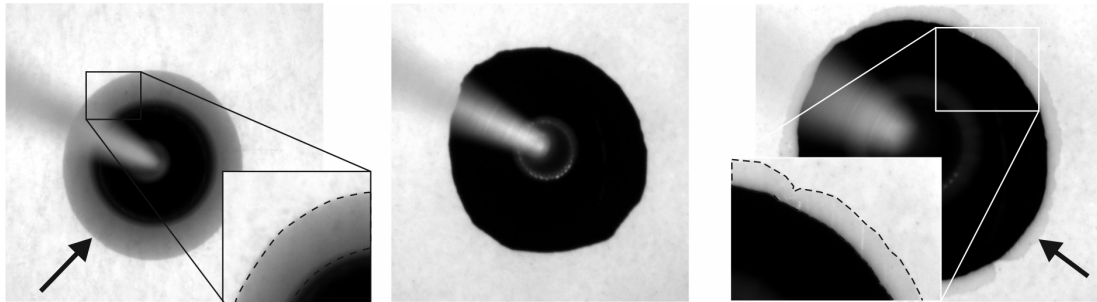


Abb. 6.27: Beispiel des *Precursor Films* | B04 Kp-C Gruppe B

Linienwiedergabe

Die Ergebnisse der Messungen werden als Differenz (Δ) des Messwertes vom jeweiligen Karton der Gruppe A (unvorbehandelt) zum Messwert an dem jeweils korrespondierenden Karton der Gruppe D (Primer Vorbehandlung und IR-Trocknung). Positive Differenzwerte bedeuten in den einzelnen Diagrammen⁷⁵ folgendes:

- Abb. 6.29 und 6.30: Die Linien auf den behandelten Kartons der Gruppe D sind breiter als bei den unbehandelten Kartons der Gruppe A
- Abb. 6.31 und 6.32: Die Linien auf den behandelten Kartons der Gruppe D sind dunkler als bei den unbehandelten kartons der Gruppe A
- Abb. 6.33 und 6.34: Die Linien auf den behandelten Kartons der Gruppe D zeigen geringere Kantenglätte bzw. mehr *Blurriness* als bei den unbehandelten Kartons der Gruppe A
- Abb. 6.35 und 6.36: Die Linien auf den behandelten Kartons der Gruppe D zeigen geringere Kantengeradheit bzw. mehr *Raggedness* als bei den unbehandelten Kartons der Gruppe A.

Hier werden nur die Ergebnisse an horizontalen Linien dargestellt. Bei den senkrechten Linien⁷⁶ wurden viele Verzerrungen festgestellt, die durch die ungleichförmige Bewegung des Druckkopfes verursacht werden (Abb. 6.28). Aus diesem Grund wurden die Proben der senkrechten Linien nicht ausgewertet. Einige Messungen der horizontalen Linien lieferten als Ergebnis nan (*not a number*). Das heißt, es war nicht möglich, die Probe zu messen. 50 Messungen der Kantenglätte an den Linien mit 5 Dots und 6 Dots mit der Tinte T-Tinte (Gruppe A und D) lieferten keine Ergebnisse. Weil bei den C-Tinten dieses Problem nicht aufgetreten ist, ist anzunehmen, dass primär die Tinte und weniger das jeweilige Substrat diese Abweichungen verursacht.

⁷⁵Daten alle Linienwiedergabe-Messungen sind in der Tab. B.7 vgl. S. 180 und in der Tab. B.8 vgl. S. 180

⁷⁶Horizontal und senkrecht zur Druckrichtung

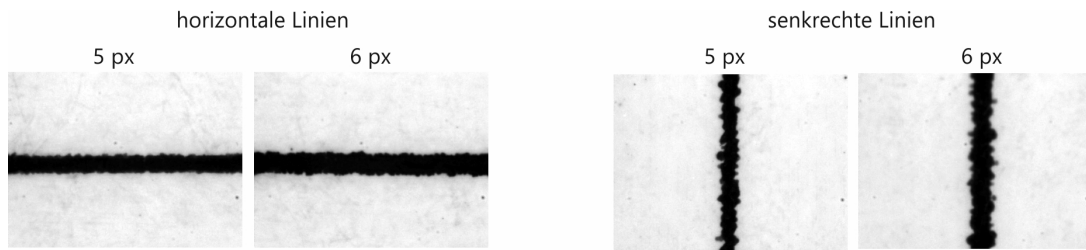


Abb. 6.28: Beispiele von Verzerrungen bei den senkrechten Linien im Vergleich zu den horizontalen Linien | Kp-C

Im Allgemeinen sind die Linien bei der Gruppe D breiter und dunkler als Linien der Gruppe A. Diese Ergebnisse stimmen mit der Zunahme der optischen Dichte und der größeren Ausbreitung der Tinten über die Primerschicht überein. Lediglich die Kp-T-Werte (Linien-Dunkelheit - 6 Dots) bestätigendie Verringerung der optischen Dichte bei Gruppe D im Vergleich zur Gruppe A nicht (vgl. S. 121). Weil die Werte der Linien-Dunkelheit bei 5 Dots nicht gemessen werden konnten, ist es nicht möglich, zu überprüfen, inwieweit die Linienbreite⁷⁷ eine Einfluss auf die optische Dichte hat.

Pigmentbasierte Tinten und farbstoffbasierte Tinten wirken sich unterschiedlich auf die Kantenglätte bzw. die Kantengeradheit aus. Während die Linien aus pigmentbasierten Tinten durch die Behandlung des Kartons an Schärfe und Geradheit verlieren, gewinnen die Linien aus farbstoffbasierten Tinten durch Vorbehandlung und IR-Trocknung. Kp-T und Kp-C zeigen einen größeren Verlust an Schärfe und Geradheit der Linien bei der Gruppe D, und Kf-T und Kf-C bei der Gruppe A. Dies würde bedeuten, dass der Primer Unschärfe und Verzerrungen an den Rändern der Linien auf farbstoffbasierten Tinten reduzieren kann.

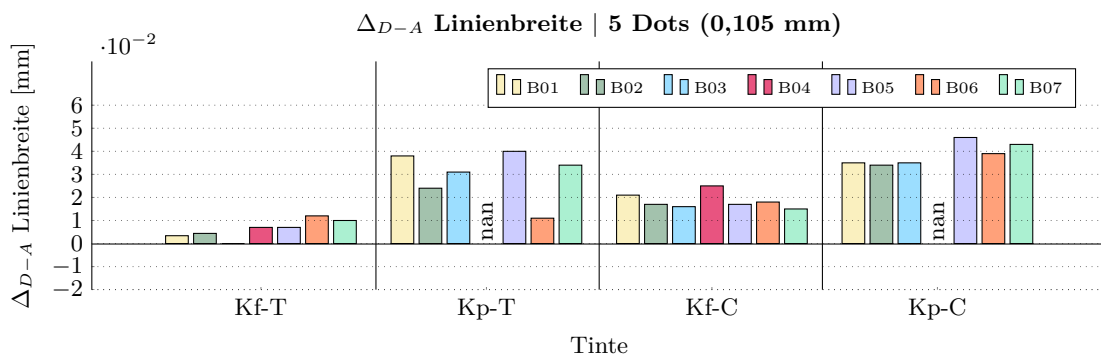


Abb. 6.29: Δ_{D-A} Linienbreite | 5 Dots | Daten in der Tab. B.7 vgl. S. 180 und Tab. B.8 vgl. S. 180

⁷⁷Der Wert von Linien-Dunkelheit wird durch $LID \times \sqrt{LW}$ berechnet, wobei LID die optische Dichte der Linie und LW die Linienbreite ist.

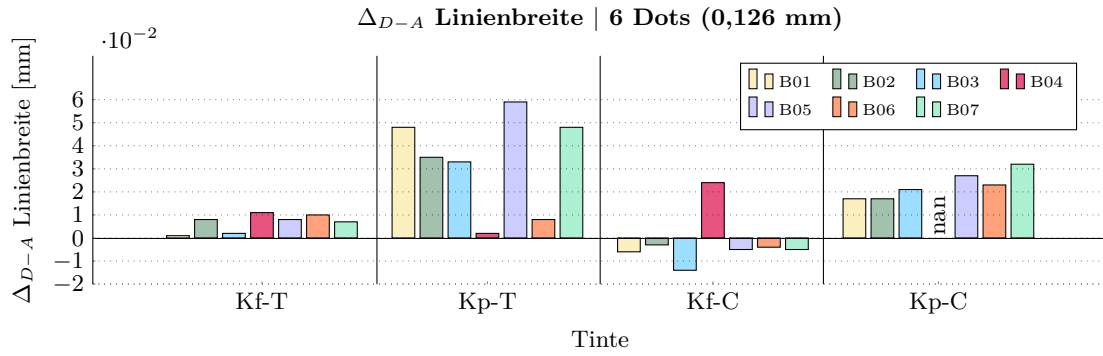


Abb. 6.30: Δ_{D-A} Linienbreite | 6 Dots | Daten in der Tab. B.9 vgl. S. 180 und Tab. B.10 vgl. S. 181

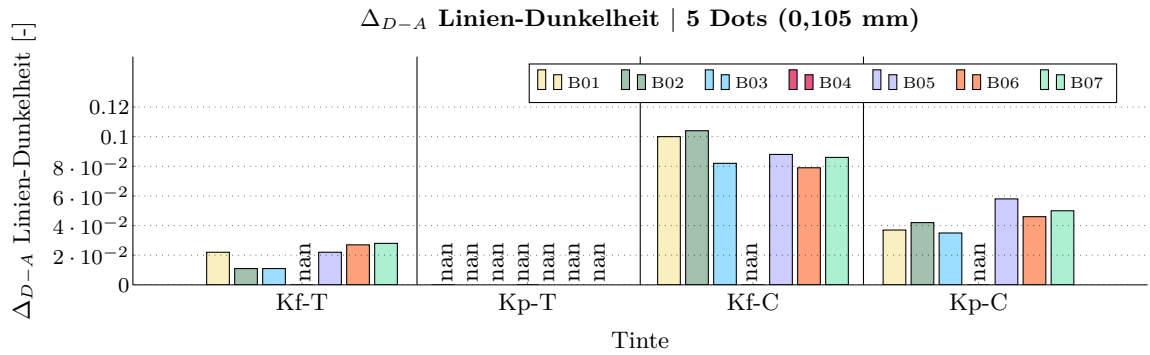


Abb. 6.31: Δ_{D-A} Linien-Dunkelheit | 5 Dots | Daten in der Tab. B.7 vgl. S. 180 und Tab. B.8 vgl. S. 180

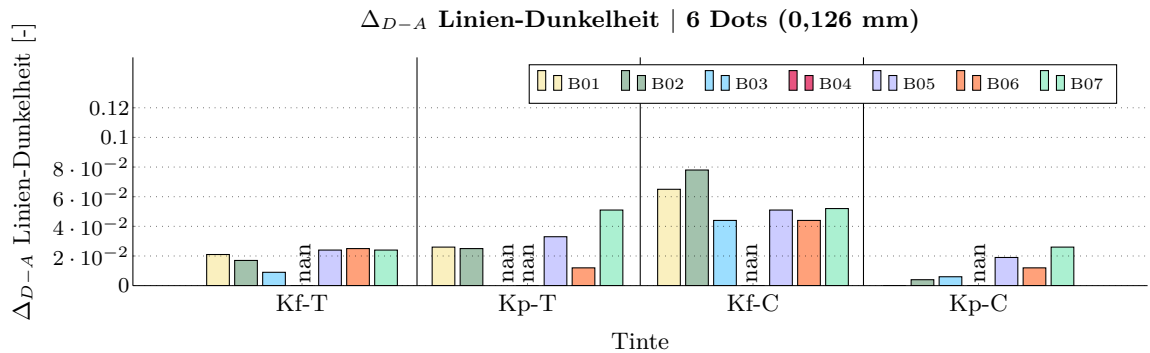


Abb. 6.32: Δ_{D-A} Linien-Dunkelheit | 6 Dots | Daten in der Tab. B.9 vgl. S. 180 und Tab. B.10 vgl. S. 181

Die Ergebnisse der horizontalen Linien mit 5 und 6 Dots hatten generell ähnliche Tendenzen. Nur das Δ_{A-D} der Linienbreite mit 6 Dots (Kf-C) hatte negative Werte und die Linien mit 5 Dots hatten positive Werte. Eine mathematische Erklärung dafür gibt es nicht, da die Remissionswerte (Tab. B.4 vgl. S.177) und Ergebnisse von Linien-Dunkelheit die gleichen Tendenzen aufweisen. Visuell konnten keine Druckfehler festgestellt werden, die die Abweichung begründen. Es wurde eine Validierung für das Package Tool ISO/IEC 24790:2017 (Anhang D, 190) durchgeführt. Die Ergebnisse geben keinen Hinweis darauf, dass die Software bei der Messung von Linien mit unterschiedlichen Breiten, Unschärfen und Druckfehlermustern fehlerhaft war.

Die Berechnung der Kantenglätte hängt von der Ermittlung von ρ_{70} und ρ_{10} zusammen.

Diese Werte wiederum hängen von gemessenen R_{max} des Substrats und R_{min} der Tinte (in der OECF-Datei, vgl. S. 89) ab. Die Remissionswerte stehen in direktem Zusammenhang mit der optischen Dichte. Die Tinten auf Pigmentbasis haben eine höhere Dichte (2 bis 3) als die Tinten auf Farbstoffbasis (1 bis 1,5). Je nach den Remissionswerten und der damit verbundenen Definition von Schattenbereichen (Unschärfe, *blur*) und Vollflächen (Kanten der Linien, *ragged*) können die Ergebnisse variieren. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich die pigmentierten und farbstoffbasierten Tinten auf dem Primer ungleich Verhalten, wie bereits bei den TWZ-Messungen beschrieben wurde, aufweisen.

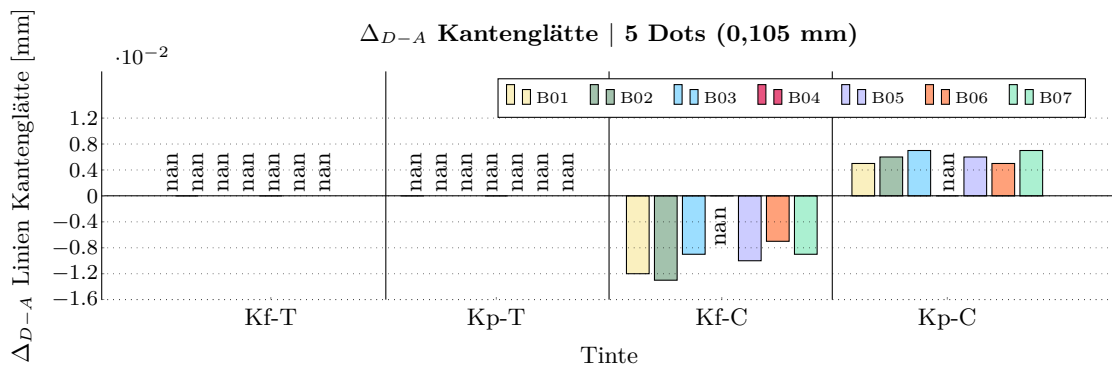


Abb. 6.33: Δ_{A-D} Linien Kantenglätte | 5 Dots | Daten in der Tab. B.7 vgl. S. 180 und Tab. B.8 vgl. S. 180

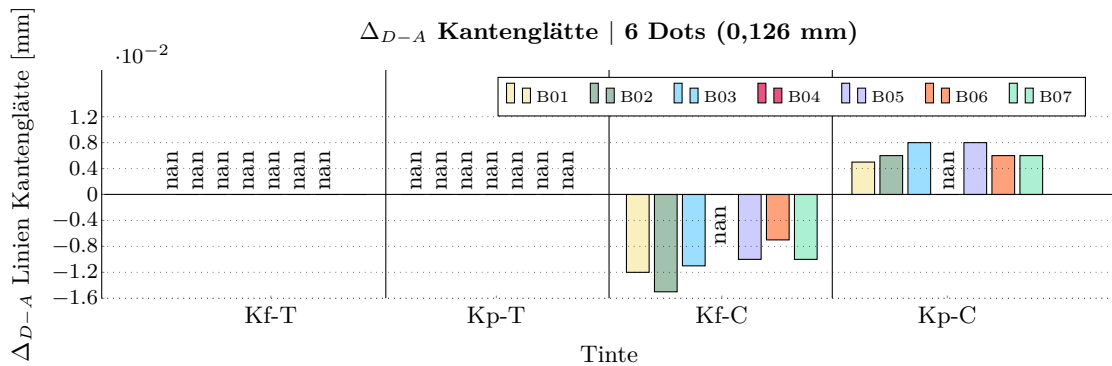


Abb. 6.34: Δ_{D-A} Linien Kantenglätte | 6 Dots | Daten in der Tab. B.9 vgl. S. 180 und Tab. B.10 vgl. S. 181

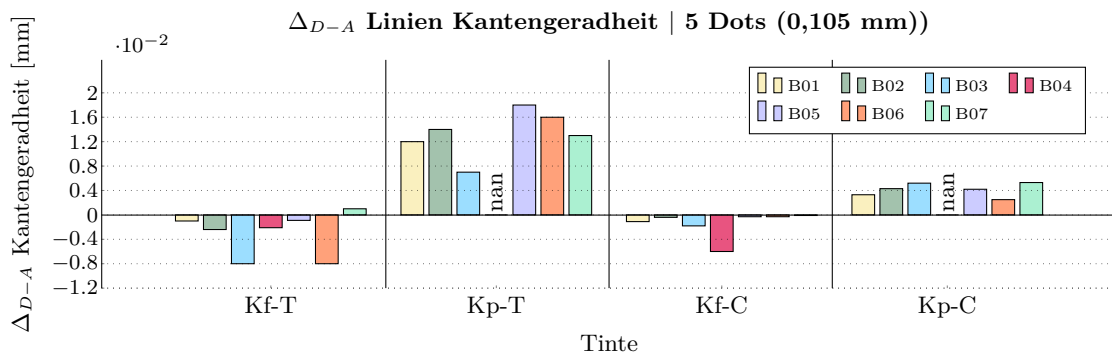


Abb. 6.35: Δ_{D-A} Linien Kantengeradheit | 5 Dots | Daten in der Tab. B.7 vgl. S. 180 und Tab. B.8 vgl. S. 180

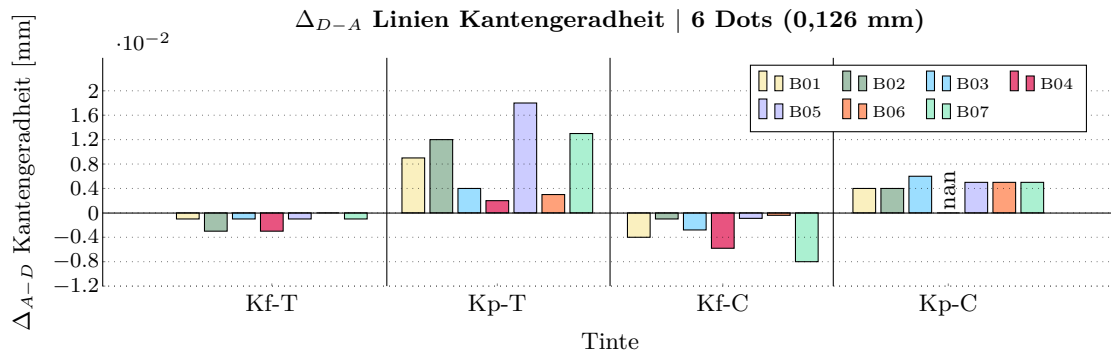


Abb. 6.36: Δ_{D-A} Linien Kantengeradheit | 6 Dots | Daten in der Tab. B.9 vgl. S. 180 und Tab. B.10 vgl. S. 181

Es wurde auch dazu überprüft, ob die Ausbreitung der Linien in einem akzeptablen Bereich liegt. Im Anhang C (Informativ) der ISO/TS 15311-2:2018 [60] sind repräsentative Ergebnisse von FOGRA-Druckqualitätsmessungen aufgeführt. Für ganzseitige Farbanzeigen, großformatige professionelle Studiofotos (Fine Art) sind die typischen gemessenen Abweichungen vom Ziel (digitales Bild): für die Linienbreite $\leq 100 \mu\text{m}$, für die Linienunschärfe $\leq 100 \mu\text{m}$ und für die Linienungeradheit $\leq 50 \mu\text{m}$. Alle Ergebnisse von farbstoffbasierten und pigmentbasierten Tinten (Gruppe A und D) sind innerhalb dieses Abweichungsbereiches.

Homogenität

Nichtperiodische Inhomogenität in der Ausprägungsform Wolkigkeit tritt vor allem durch ungleichmäßige Absorption der Tintenkomponenten auf. Diese Unregelmäßigkeit wird vorwiegend durch die Stochastizität der Substratmorphologie verursacht. Wie im Folgenden zu sehen sein wird, kann eine Primer Vorbehandlung die Permeabilität (vgl. S. 137) und die Rauheit (vgl. S. 140) der Kartons mit der Auftragung des Primers reduziert. Es wurde erwartet, dass die Oberfläche der Kartons durch das Polymer glatter geworden ist. Allerdings neigen Primer auf Polymerbasis (*swellable*) dazu, die Aufnahmegeschwindigkeit der Drucktinte (*ink uptake*) zu verringern [137, S.12] und hinsichtlich eines Kontakts mit Flüssigkeiten werden die Anzahl und der Durchmesser der vorhandenen Poren reduziert, wodurch die Kapillarität mit der Zeit abnimmt [86, S.195].

Die Messungen der Homogenität der T-Tinten bei Gruppe A und Gruppe D (Abb. 6.37⁷⁸) haben eine geringe Wolkigkeit für beide Tinten gezeigt. Primer und IR-Trocknung zeigen keinen Einfluss auf die Homogenität des Ausdrucks (außer bei B04). Diese Auswertung scheint nicht mit den Bildern auf Seite 116 zu korrelieren, wo ein Verlust der Homogenität bei der Gruppe D im Verhältnis zu A sichtbar ist.

⁷⁸Ablesung der Diagramme: Die Ziffern 1, 2 und 3 geben den Grad der Wolkigkeit an (vgl. Tab. 5.15, S. 91), B01 ... B07 sind die Kartons, 20, 40 und 70% beziehen sich auf die Farbdeckung (vgl. Abb. 5.11, S. 90)

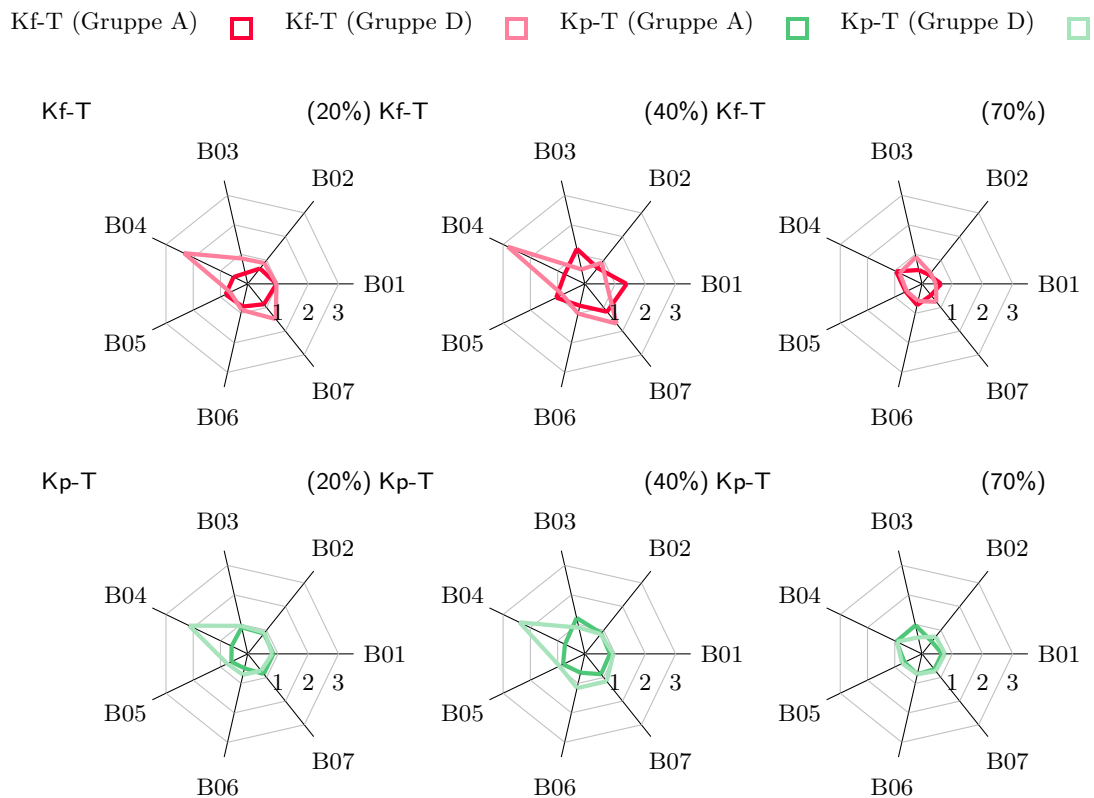


Abb. 6.37: Homogenität nach ISO 24790 | Kf-T und Kp-T | Gruppe A und D | Daten in der Tab. B.11 vgl. S. 181 und in der Tab. B.12 vgl. S. 181

Die Messung der Homogenität bei C-Tinten zeigt eine Reduzierung der Wolkigkeit bei der Gruppe D gegenüber der Gruppe A, sowohl bei der pigmentbasierten Tinte als auch bei der farbstoffbasierten Tinte (Abb. 6.38). Das Ergebnis korreliert mit einer visuellen Auswertung der Bilder auf Seite 117. Optisch scheinen die gedruckten Felder mit C-Farbe, insbesondere Kp-C(A), weniger Wolkigkeit aufzuweisen als Kp-T(D). Vergleicht man die absoluten Ergebnisse dieser beiden Tinten, so entsprechen die Messungen nicht einer visuellen Bewertung.

In der zuvor veröffentlichten Untersuchung zur Bewertung der Wolkigkeit [118], bei der nur die farbstoffbasierte C-Tinte analysiert werden, wurden visuelle Bewertungen und Messungen mit der gleichen Methode und der Software *Package Tool* durchgeführt, die in diesem Experiment verwendet wurde. Die Ergebnisse zeigten eine gute Korrelation zwischen den visuellen Bewertungen und den Messungen mit der ISO 24790-Methode.

Das Ziel war hier vor allem zu beobachten, ob der Primer und die IR-Strahlung die Wolkigkeit erhöhen. Die Druckqualität wurde nach der Wolkigkeit-Score (vgl. Tab. 5.15, S. 91) überprüft. Die Messungen der Gruppe D fallen vorwiegend in die Kategorien „Produktwerbung, Werbematerial, Printprodukten mit ästhetischen Anwendungen wie Kultur, Mode, Kunst und Architektur“ mit Werten ≤ 1 .

Kf-C (Gruppe A) ■ Kf-C (Gruppe D) ■ Kp-C (Gruppe A) ■ Kp-C (Gruppe D) ■

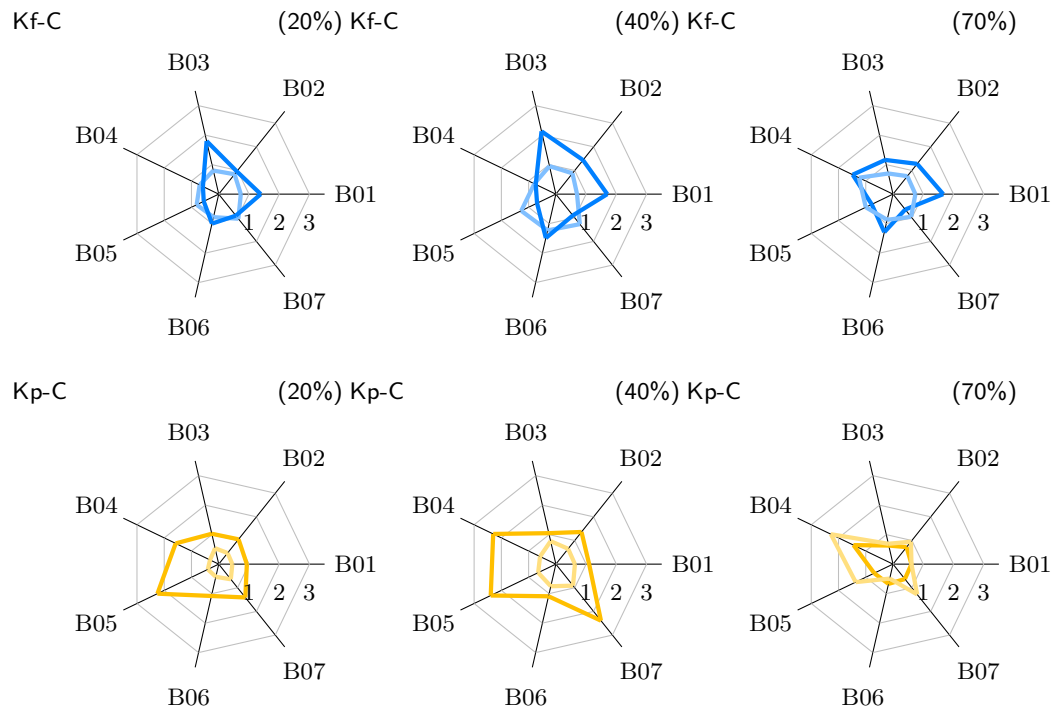


Abb. 6.38: Homogenität nach ISO 24790 | Kf-C und Kp-C | Gruppe A und D | Daten in der Tab. B.13 vgl. S. 182 und Tab. B.14 vgl. S. 182

Auflösung

Linienwiedergabe und TWZ geben Auskunft über die Tintenausbreitung auf kleinen Elementen, bzw. Linien und Punkten. Messungen mit Siemenssternen geben nicht nur Informationen über die Auflösung des Bedruckstoffs, sondern zeigen indirekt die Tintenausbreitung über große Druckflächen an.

Für die farbstoffbasierte Tinten kann festgestellt werden, dass die Vorbehandlung und die IR-Trocknung zu einer erhöhten Auflösung bedingt durch geringeres Spreiten der Tintentröpfchen gegenüber der Auflösung bei unbehandelten Kartons führt (Kf-T, Abb. 6.39 und Kf-C, Abb. 6.40).

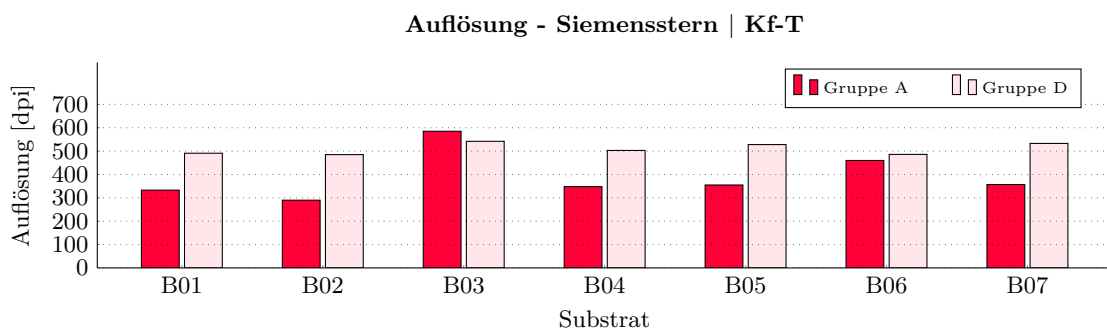


Abb. 6.39: Auflösung | Kf-T | Daten sind in der Tab. B.3 vgl. S. 177

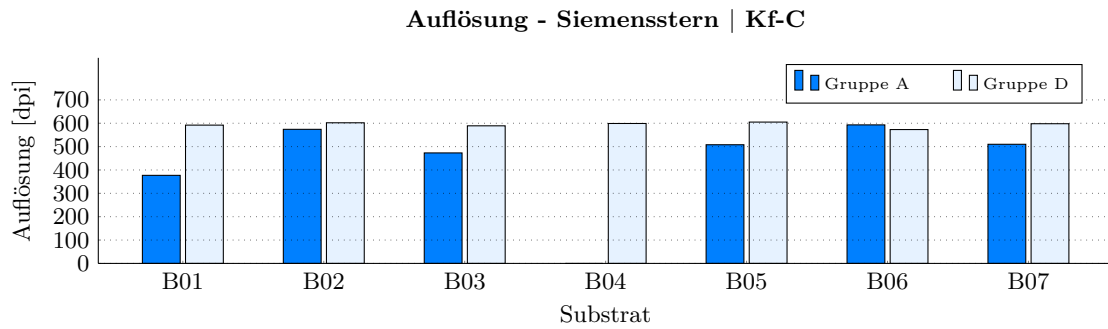


Abb. 6.40: Auflösung | Kf-C | Daten sind in der Tab. B.3 vgl. S. 177

Pigmentbasierte Tinten zeigen gegenläufiges Verhalten: während sich für die industrielle Tinte fast keine Änderung der Auflösung bei behandelten Kartons nachweisen lässt (Kp-T, Abb. 6.41), ist bei der SOHO-Tinte die Auflösung nach Vorbehandlung zwischen um ca. 10% bis 20% reduziert (Kp-C Abb. 6.42).

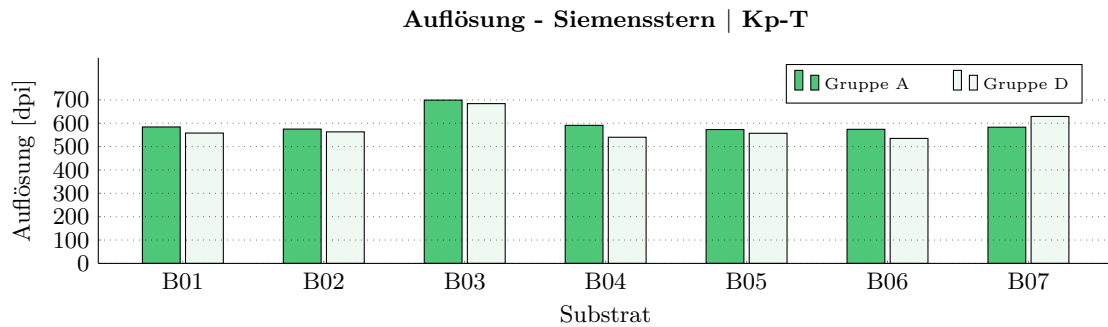


Abb. 6.41: Auflösung | Kp-T | Daten sind in der Tab. B.3 vgl. S. 177

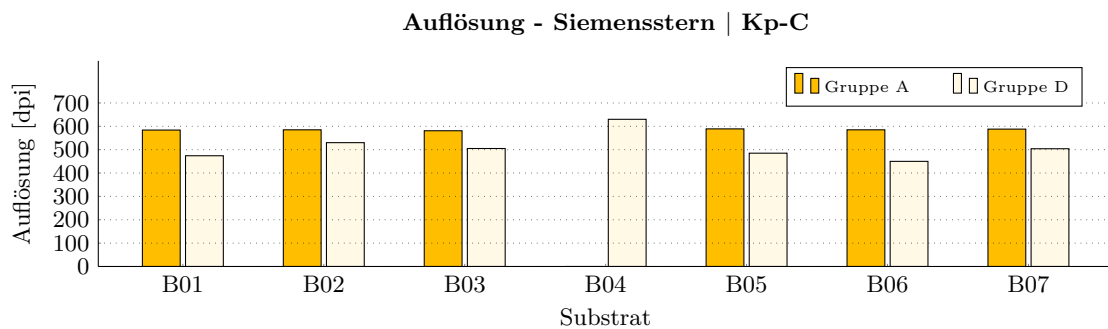


Abb. 6.42: Auflösung | Kp-C | Daten sind in der Tab. B.3 vgl. S. 177

Zwar werden aus der graphischen Darstellung einige Trends augenscheinlich, jedoch lässt die genauere Betrachtung der Messdaten und der Messmethode diese Trends weniger sicher erscheinen. Erstens fällt die Varianz der Messwerte (24 Proben pro Karton, Gruppe und Tinte) in einigen Fällen hoch aus, d.h. der Unterschied zwischen Gruppe A und Gruppe D kann relativiert werden. Zweitens hat die Validierung der Matlab-Routine (vgl. Anhang C, Tab. C.1) gezeigt, dass sich sowohl die künstliche Erweiterung des zentralen Graurings als auch die Erhöhung der Unschärfe nicht linear auf die Reduzierung bzw. Erhöhung der Auflösung auswirken.

Wird beispielsweise der Grauring im Siemensstern mit einer Unschärfe von nur 0,5 mm interpretiert und abgelesen, so wirkt sich dies bei einem Durchmesser des Graurings von 4,0 mm/ 4,5 mm mit einem Unterschied von 123 dpi in der Auflösung aus, beim Durchmesser von 6,5 mm/ 7,0 mm ergibt sich rechnerisch eine um lediglich 9 dpi unterschiedliche Auflösung. Dadurch werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Ergebnissen relativiert. Obwohl sich die Behandlung der Kartons zweifelsfrei tendenziell auswirkt, ist die angesichts der Grenzen der eingesetzten Messtechnik durch Zahlen für Änderungen der Auflösung nicht gesichert zu quantifizieren.

Gesamtbewertung

Die qualitativen Attribute für die Auswertung des Lösungsansatzes können 2 Typen zugeordnet werden. Der erste Typ umfasst die optische Dichte und die Linien-Dunkelheit. Dies hilft bei der Bewertung der Tintenabsorption oder -penetration, die bei den unbehandelten Kartons (Gruppe A) für farbstoff- und pigmentbasierte Tinten jeweils unterschiedlich abläuft. Der Unterschied bezüglich der vertikalen Bewegung der Farbkomponente in Gruppe A und D wurde in Abschnitt 6.1 erläutert. Der zweite Typ der Attribute, zu dem TWZ, Linienbreite und Auflösung gehören, dient zur Bewertung der lateralen Ausbreitung der Tinte, hier Spreiten genannt. Abb. 6.43 zeigt, was auf der Grundlage erwartet wurde.

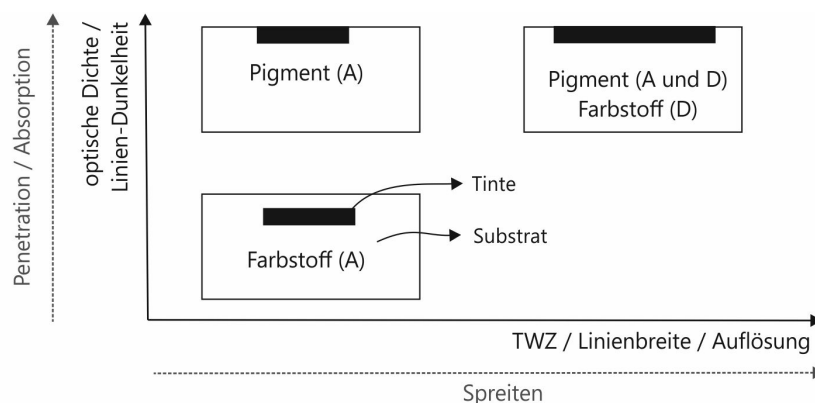


Abb. 6.43: Qualitative Attribute und ihre Beziehung zur Position der Farbkomponente im Substrat | Gruppe (A) und (D)

Für pigmentbasierte Tinten sollten sich bei allen Kartons keine großen Unterschiede zeigen, da die Pigmente weder bei vorbehandelten (Gruppe D) noch bei unvorbehandelten Kartons (Gruppe A) eindringen können, sondern an der Oberfläche verbleiben. Bei den Tinten auf Farbstoffbasis sollte der Primer einen größeren Einfluss auf beide Attribute haben, weil er das Eindringen der Farbstoffmoleküle abschwächt. Eine Primer Vorbehandlung sollte das Spreiten von allen Tinten beeinflussen, allerdings besitzen C-Tinten eine höhere Oberflächenspannung und spreiten daher weniger. Schließlich bestände die Möglichkeit, dass sich durch verstärkte laterale Ausbreitung der Tinte die optische Dichte verringert. Dieses Phänomen wurde jedoch nicht festgestellt.

Die Ergebnisse hinsichtlich der optischen Dichte und der Linien-Dunkelheit sind wie er-

wartet eingetreten, mit Ausnahme von Kp-T, deren Ausdruckverhalten durch den Verlust der Homogenität beeinflusst wurde. Der Einfluss des Primers auf die beiden Attribute war bei Kf-C erwartungsgemäß größer als bei Kp-C, aber bei Kf-T im Vergleich zu Kp-T nicht so signifikant. Bei 75% der Messungen wurde das erwartete Spreitenverhalten der Tinten beobachtet. Die Ausnahmen sind: Kf-C bei der Messung von Linienbreite 6 Dots, Kf-T bei der Messung von TWZ und Kf-T und Kf-C bei der Messung der Auflösung.

In der Tab. 6.4 ist eine Zusammenfassung der qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes dargestellt. Die Pfeile zeigen an, welche Veränderung in den Proben der Gruppe D im Vergleich zu den Proben der Gruppe A aufgetreten ist.

Tab. 6.4: Zusammenfassung - Messungen zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes

Auswertung		Δ_{D-A}			
		Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C
Optische Dichte		↑	↓	↑	↑
Linien-Dunkelheit	5 Dots	↑	nan	↑	↑
	6 Dots	↑	nan	↑	↑
TWZ		↓	↑	↑	↑
Linienbreite	5 Dots	↑	↑	↑	↑
	6 Dots	↑	↑	↓	↑
Auflösung		⊕	↓	⊕	↓
Linien-Kantenglätte	5 Dots	nan	nan	↓	⊕
	6 Dots	nan	nan	↓	⊕
Linien-Kantengeradheit	5 Dots	↓	⊕	↓	⊕
	6 Dots	↓	⊕	↓	⊕
Homogenität (Wolkigkeit)	20%	⊖	⊖	↑	↑
	40%	⊖	⊖	↑	↑
	70%	⊖	⊖	↑	↑

erwartet:

↓ → Abnahme

⊖ → keine Veränderung

↑ → Zunahme

nicht erwartet:

⊖ → Abnahme

⊕ → keine Veränderung

⊕ → Zunahme

Ein Auflösungsverlust der Siemenssterne ist durch das Spreiten der Tinte gegeben, aber auch durch Verlust der Bildgrenzen, entweder in Form von Unschärfe oder Abweichungen der Kantenposition. Daher sollten Auflösung, Kantenglätte und Kantengeradheit ähnliche Tendenzen aufweisen. Die Messungen bei Linien und der Siemenssternen zeigen jedoch keine einheitlichen Ergebnisse.

Der Verlust der Linien Kantenglätte liegt in der Größenordnung von 5% der ursprünglichen Linienbreite (absoluter Wert). Obwohl die relativen Werte (Δ_{D-A}) sehr klein sind, zeigen sie unabhängig vom Substrat die gleichen Tendenzen. Dennoch ist dieses Ergebnis

nur unter Einschränkungen zu werten: Die Validierung des Package Tools (Anhang D) zeigt, das Maß der Kantenglätte nicht unerheblich von der Farbdichte des Graubereichs (ρ_{70} und ρ_{10}) an den Seiten der vermessenen Linie anhängt. Auch die Tendenzen bei den Auflösungsmessungen waren für alle Substrate gleich, allerdings gibt es Einschränkungen bei der Verwendung der Ergebnisse (vgl. S. 6.3). Augenscheinlich stoßen hier die verfügbare Mess- und Auswertetechnik, obwohl durch eine ISO Norm standardisiert, an ihre Grenzen. Insofern erscheint es angezeigt, die gemessenen Ergebnisse lediglich als Trends anzusehen, denn sie als quantitativ belastbar.

Bei Mängeln im Ausdruck wie Wolkigkeit, Banding, Körnigkeit oder Verlust von optischer Dichte sollten messtechnische Ergebnisse eher dazu verwendet werden, die individuellen visuellen Wahrnehmungen tendenziell zu bestätigen. Gerade bei den Veränderungen der Linienbreite und bei Auflösungsverlusten bestehen bei einer visuellen Beurteilung physiologische Grenzen. Variationen in der Linienbreite oder Auflösungsverluste sind visuell schwieriger zu bewerten.

Eine ergänzende Schlussfolgerung zu den qualitativen Auswertungen durch verschiedene Methoden und Verfahren ist die Notwendigkeit eines spezifischen technischen Standards für die Bewertung von Substraten für den Inkjet-Druck. Der Standard ISO/IEC 24790:2017 wurde ursprünglich für die Auswertung von monochromen Drucksystemen wie Laserkopierer entwickelt, deren Druck andere Eigenschaften als der Inkjet-Druck aufweist. Außerdem wird mit diesem Standard, wie auch mit dem ISO/IEC 15311 das Substrat nur indirekt ausgewertet. Darüber hinaus erschwert folgendes die Anwendung des ISO/IEC 24790:2017: die Entwicklung der Testchart für die Systemvalidierung (vgl. Anhang D, S. 190), die Notwendigkeit einer Testform zur Überprüfung der Reproduziergenauigkeit des Scanners (vgl. S. 88) und ein großer Arbeitsaufwand für Auswertungen (vgl. S. 89).

In der Druckindustrie besteht die gängige Praxis zur Bewertung und Auswertung einer Auflage im Vergleich der Auflagenexemplare mit einem freigegebenen Anlaufexemplar. Mögliche Abweichungen dürfen nur innerhalb bestimmter Grenzen liegen, die durch einen Standard vorgegeben werden bzw. mit dem Kunden vereinbart wurden. Für die Attribute Linienwiedergabe und Wolkigkeit wurden die Messwerte sowohl der Gruppe A als auch der Gruppe D gemäß den Referenzdaten des Standards ISO/TS 15311-2:2018 ausgewertet und die liegen in dem Bereich, der hochwertige Druckprodukte qualifiziert. Entsprechend soll hier, noch einmal betont werden, dass die Messergebnisse der Wolkigkeit von Kp-T (Gruppe D) zur visuellen Bewertung erheblich abweichen, ohne dass bisher eine plausible Erklärung gefunden werden konnte.

Für die anderen Attribute gibt es keine Referenzwerte für den Inkjet-Druck. Im Offsetdruck ist die TWZ kein technischer Mangel, sondern verfahrensimmanent und kann durch Anpassungen bei der Herstellung der Druckformen kompensiert werden. Zwar sind in der Fachliteratur mehrere Analysen über die TWZ beim Inkjet-Druck zu finden [94] [74] [148] [128] [154] [110] [129], jedoch fehlen bisher Forschungsarbeiten zu

deren Kompensation. Aufgrund des stochastischen Charakters der Punktanordnung und ihres asymmetrischen Formats (vgl. Anhang A S. 174) führen die im analogen Druckverfahren verwendeten Techniken zur Kompensation der TWZ im Inkjet-Druck unter Umständen nicht zum gleichen Ergebnis.

Unter den Messungen zur qualitativen Auswertung des Lösungsansatzes sind Messverfahren zur Ermittlung des Verlusts von Homogenität eine Schwachstelle, die zu beseitigen ist. Es ist zu bemerken, dass die Vor- und Nachbehandlung nicht zwingend zu einer Verbesserung der Homogenität führt. Die Ursache hierfür kann durchaus in der spezifischen Zusammensetzung der jeweiligen Tinten liegen. Das Problem scheint im Rahmen der durchgeführten Experimente mehr von der Tinte und dem Trocknungsprozess als vom Substrat abzuhängen.

6.4. Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Substrate

Permeabilität

Alle drei Permeabilitätsmessungen⁷⁹, die die Luftdurchlässigkeit des Substrats bewerten, zeigten ähnliche Ergebnisse.

Bei den Messungen nach Bekk zeigen die Kartons mit Primer (Gruppe B) vorwiegend eine Oberfläche mit kleinerer Permeabilität als die ohne Primer (Gruppe A), dies führt zu einem langsamen Rückgang des Prüfdrucks und somit zu einer längeren Zeit, um den Druckunterschied zwischen der Probe und dem Vakuumbehälter auszugleichen. Bei glatten Oberflächen strömt die Luft zwischen Substratoberfläche und Glasplatte hindurchströmen als bei rauen. Karton B01 ohne Primer zeigt eine Varianz von 131 Sekunden (Mittelwert 653 Sekunden). Entsprechend unsicher ist der im Vergleich zu den übrigen Kartons relativ hohe Mittelwert zu betrachten

Bei Messungen mit der Bendtsen-Methode stehen hohe Messwerte für starke Porosität, da glatte Oberflächen den Luftstrom verhindern. An den Proben der Kartons B03 und B06 ließen sich keine Messwerte ermitteln. B04 zeigt ein nicht so erwartetes Ergebnis. In der Fachliteratur wird für superkalandrierte Oberflächen eine geringere Rauheit und damit eine geringere Permeabilität angegeben. Da es sich bei B04 um einen deutlich glatteren Karton im Vergleich zu den übrigen Kartons handelt, deutet der hohe Messwert auf eine mögliche Einschränkung der Messmethode für diese Art von Oberfläche hin.

Die Ergebnisse der Messung nach der PPS-Methode entsprechen den von den Kartonherstellern mitgeteilten Produktdaten (Karton ohne Primer - vgl. Tab. 5.1, S. 76). Alle Messmethoden, Bekk, Bendtsen und PPS unterstreichen, dass die untersuchten Kartons durch Behandlung mit dem polymeren Primer an Rauheit und Luftdurchlässigkeit verlieren.

⁷⁹Die Messungen nach der Bekk- und Bendtsen-Methode wurden im AnalySELabor der Papierfabrik von Stora Enso in Mönchengladbach durchgeführt. Die Messungen nach der PPS-Methode wurden im Papierprüflabor von Bertelsmann Druckerei (Mohn Media) in Gütersloh durchgeführt.

Die Fachliteratur über Permeabilität und Porosität von beschichteten Karton ist beides, überschaubar und widersprüchlich. Die Verschiedenartigkeit des Schichtaufbaus dieser Substrate, die bis zu drei Oberflächenbeschichtungen und drei Schichten von Rohpapiere aufweisen, stellt die Messungen von Sauggeschwindigkeit- und Porosität in Frage [44, S.25-26]. Die PPS-Methode wird von Herstellern beschichteter Karton für Rauheitsermittlung verwendet. Bei diesen beschichteten Kartons spricht einiges dafür, dass der Luftstrom die unteren Schichten unterhalb der Kartonbeschichtung nicht mehr erreicht (nur Karton B04).

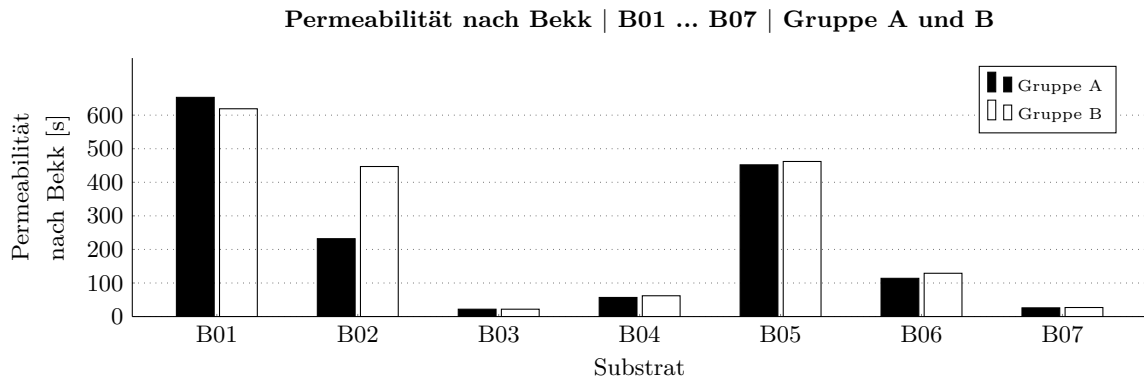


Abb. 6.44: Permeabilität nach Bekk | B01 ... B07 | Gruppe A und B | Daten in der Tab. B.15 vgl. S. 182

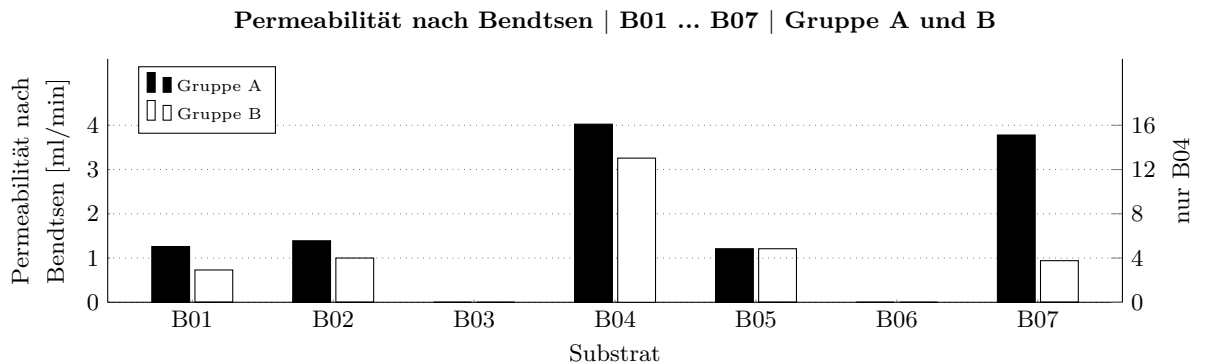


Abb. 6.45: Permeabilität nach Bendtsen | B01 ... B07 | Gruppe A und B | Daten in der Tab. B.16 vgl. S. 182

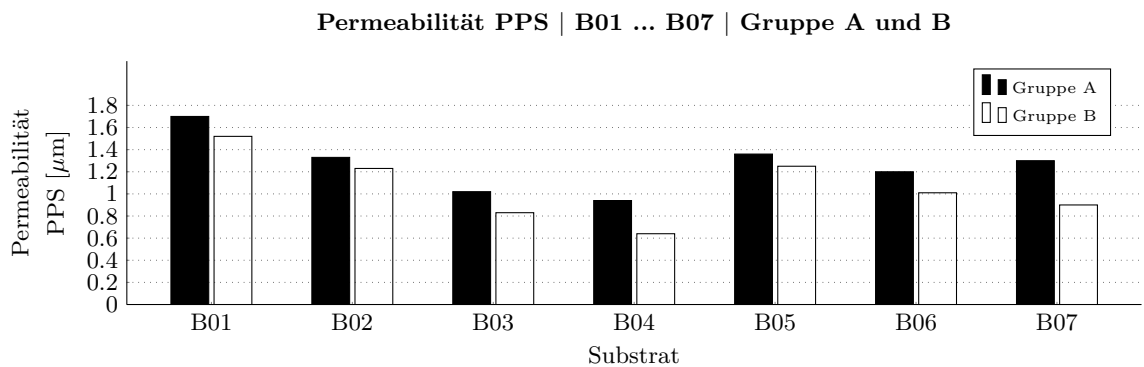


Abb. 6.46: Permeabilität PPS | B01 ... B07 | Gruppe A und B | Daten in der Tab. B.17 vgl. 182

Grenzflächenenergie

Einige Aspekte der Grenzflächenenergie wurden im Kapitel Grundlage nicht behandelt. Diese in der Fachliteratur viel diskutierten Aspekte, beschäftigen sich mit den Wechselwirkungskräften in den Adhäsionstheorien. Es handelt sich um die Wechselwirkungen durch physikalische Kräfte (London, Keesom und Debye) und durch chemische Bindungen (Wasserstoffbrücken⁸⁰, ionische- und kovalente Bindungen). Das thermodynamische Modell der Adhäsion umfasst nur die physikalischen Kräfte und schließt die chemischen Wechselwirkungen als nicht reversibel ein. Auf eine Analyse dieser Aspekte wurde hier verzichtet, zumal die genaue chemische Zusammensetzung der Substrate und der C-Tinte unbekannt sind. Relevant ist hier, die Veränderung der Grenzflächenenergie des Substrats mit dem Primer P07 zu ermitteln.

Die größte Schwierigkeit bei der Kontaktwinkelermittlung mittels „Liegender-Tropfen-Methode“ besteht darin, den Moment zu bestimmen, in dem sich der Tropfen im Gleichgewicht befindet, da die Absorptions- und Ausbreitungsprozesse gleichzeitig stattfinden. Aufgrund der unterschiedlichen polaren und dispersiven Eigenschaften verhalten sich Form und Ausbreitung der Testflüssigkeiten (z. B. Wasser und Diodomethan) unterschiedlich. Dies erschwert es, ein einheitliches Verfahren zur Messung des Kontaktwinkels festzulegen.

Strenggenommen muss die Messung von Kontaktwinkeln zur Bestimmung der Grenzflächenenergie an sauberen, homogenen und glatten Oberflächen, mit homogenen Flüssigkeiten unter kontrollierter Verdunstungsrate durchgeführt werden. Die verwendeten Kartons sowie die Pigmenttinten und zum Teil die Farbstofftinten sind Industrieprodukte und können per se diese idealen Laborbedingungen nicht erfüllen, dennoch wurden sie verwendet um einen realen Bezug herzustellen. Trotz dieser Abweichungen zur Randbedingungen zeigten die Messungen eine deutliche Erhöhung sowohl der Grenzflächenenergie als auch des polaren Anteils bei der Gruppe B im Vergleich zu A.

Wie zuvor gesehen, war der Primer aus PVOH nicht in der Lage, die Festigkeit der Tinten auf dem Substrat in einem kurzen Zeitraum zu erhöhen. Jedoch war die Kp-C Tinten auf geprimerten Kartons nach wenigen Minuten wischfest, während sie auf Kartons ohne Vorbehandlung noch nach Tagen angewischt werden konnte. Es wird angenommen, dass dieser Effekt durch die Erhöhung der mit dem Primer verfügbaren OH-Gruppen zurückzuführen ist. Dazu führt die Erhöhung der Grenzflächenenergie zu einer stärkeren Tintenbenetzung und folglich zu einem stärkeren Spreiten der Tinte. Andere Autoren [137, S.38] [153, S.1471] sind zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Der Effekt ist in den Abbildungen in Anhang F (vgl. S. 194) zu beobachten außer bei dem besonderen Karton B04. Ein zusätzliches Problem mit dieser Art von Messung, das in diesen Draufsicht-Aufnahmen erkennbar ist, ist die ungleichförmige Ausbreitung des Tropfens. Einige haben einen größeren Durchmesser auf einer Achse (Ellipsenform).

⁸⁰Die Fachliteratur gibt die Wasserstoffbrücken auch als physikalische Kraft an.

Entsprechend ist die Form jedes einzelnen Tropfens zu bewerten. Ungleichförmige Tropfen sind für Messungen zu verwerfen.

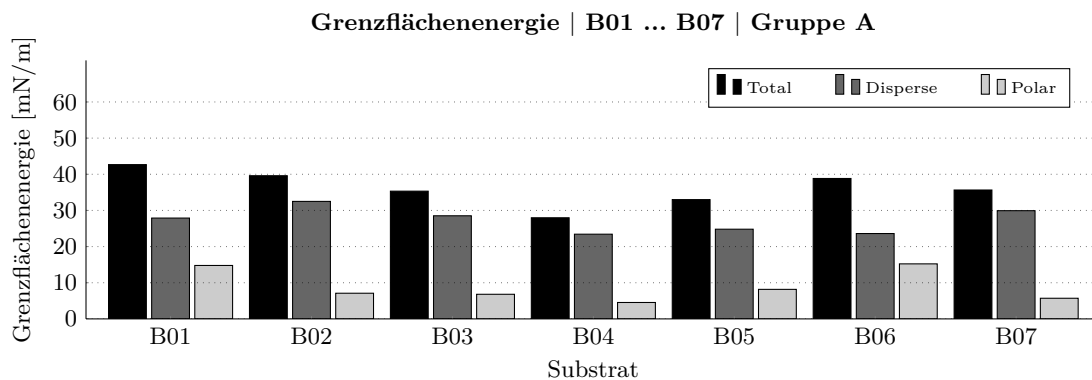


Abb. 6.47: Grenzflächenenergie | B01 ... B07 | Gruppe A | Daten in der Tab. B.18 vgl. S. 183

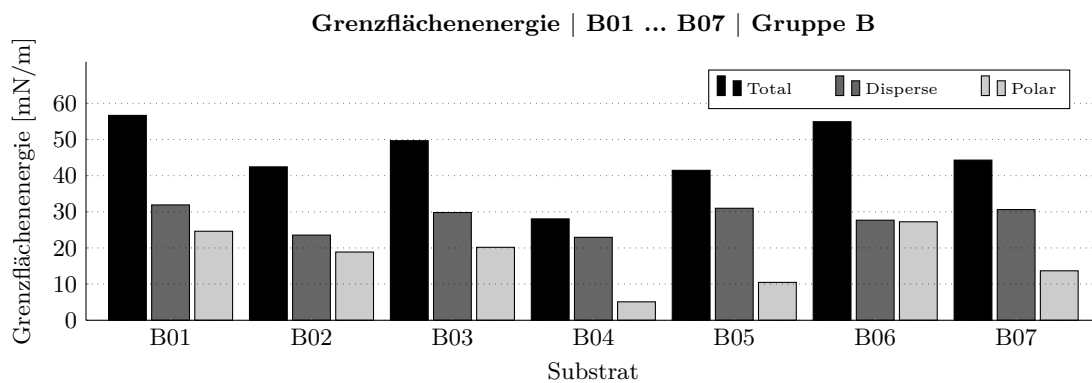


Abb. 6.48: Grenzflächenenergie | B01 ... B07 | Gruppe B | Daten in der Tab. B.18 vgl. S. 183

Rauheit

Bei allen Kartons der Gruppe B (Abb. 6.50) ist eine Reduzierung aller Rauheitsparameter im Vergleich zu Kartons der Gruppe A (Abb. 6.49) festzustellen. Allerdings sind die Reduzierungen der Rauheitsparameterwerte S_a , S_q , S_p , S_k , S_{pk} und S_{vk} (vgl. Tab. 5.20, S. 102) ähnlich den Varianzen der Messungen. Die Reduzierung des S_v -Parameters zeigt eine Verringerung der Taltiefe und die Reduzierung des S_z -Parameter einen geringeren absoluten Abstand zwischen Spitzen und Tälern bei der Gruppe B. Die Reduzierung von S_v und S_z liegt in der Mehrheit der Proben bei ca. 30% der Varianz.

S_a und S_z sind Durchschnittswerte und geben daher wenig Auskunft über das tribologische Funktionsverhalten der Oberflächen. S_p und S_v sind keine Mittelwerte, sondern die absoluten Maximal- (Spitze) und Minimalwerte (Tal), die im Profil gefunden wurden. S_z ist das Delta zwischen diesen Extremwerten. Die Funktionsparameter S_k , S_{pk} und S_{vk} bieten repräsentativere Rauheitswerte. S_{pk} (durchschnittliche Peakhöhe ab S_{mr1} , vgl. Abb. 5.25, S. 103) weist Werte von ca. $1 \mu\text{m}$ auf und S_{vk} (durchschnittliche Tiefe der Täler unterhalb von S_{mr2}) Werte von ca. $1,22 \mu\text{m}$. S_k , der Kern des Substrats, d.h. ein Rauheitswert, der etwa 70% der Oberfläche darstellt, weist Werte von ca. $2,5 \mu\text{m}$ auf.

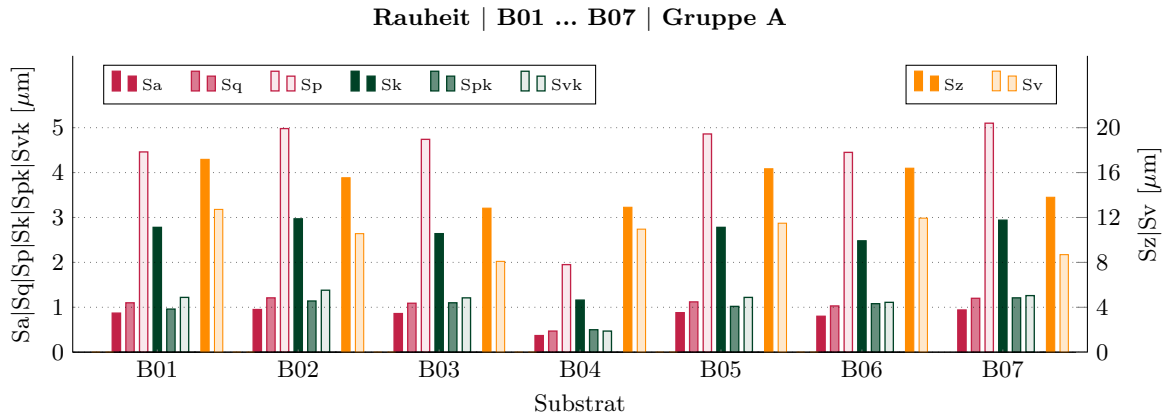


Abb. 6.49: Rauheit | B01 ... B07 | Gruppe A | Daten in der Tab. B.19 vgl. S. 183

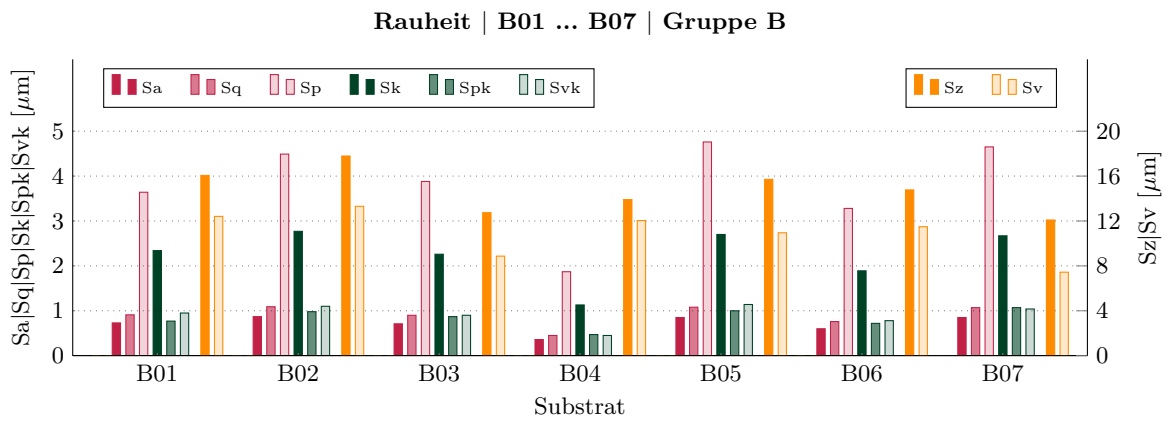


Abb. 6.50: Rauheit | B01 ... B07 | Gruppe B | Daten in der Tab. B.19 vgl. S. 183

Tab. 6.5 zeigt die Abnahme der Spk-, Svk- und Sk-Werte durch Primer Behandlung zwischen A und B (Δ_{B-A}) in absoluten Werten und relativ ($\Delta_{B-A/A}$). Anhand dieser Ergebnisse lässt sich feststellen, dass mit der Auftragung des Primers eine Verringerung der Rauheit stattfindet. Bei Svk ist sie durch das Auffüllen der Täler durch den Primer gegeben und bei Spk wird sie vermutlich mehr durch die Methode der Primerauftragung mittels Drahrtrinkel beeinflusst. Zusätzlich ist zu beobachten, dass die Kartons sehr ähnliche Rauheitsmuster aufweisen und die Werte von Sa und Sq liegen im gleichen Rauheitsbereich wie die PPS-Messungen. Nur B04 (Typ AZ) zeigt generell niedrigere Werte als die anderen Kartons.

Tab. 6.5: Δ_{B-A} und $\Delta_{B-A/A}$ von Rauheitsparameter Spk, Svk und Sk

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Spk	Δ_{B-A} [μm]	-0,19	-0,16	-0,23	-0,03	-0,02	-0,36	-0,14
	$\Delta_{B-A/A}$ [%]	-19	-14	-21	-5	-2	-33	-12
Svk	Δ_{B-A} [μm]	-0,26	-0,28	-0,31	-0,02	-0,08	-0,33	-0,22
	$\Delta_{B-A/A}$ [%]	-22	-20	-25	-5	-7	-30	-17
Sk	Δ_{B-A} [μm]	-0,45	-0,19	-0,38	-0,03	-0,08	-0,58	-0,26
	$\Delta_{B-A/A}$ [%]	-16	-6	-15	-3	-3	-24	-9

Der Einfluss der Rauheit auf den Kontaktwinkel nach Wenzel, Cassie und Baxter ist auf saugfähigen und heterogenen Substraten schwerlich messbar. Der Kontaktwinkel von Tintentropfen (T- und C-Tinten) mit einem Volumen von $3 \mu\text{l}$ variiert je nach Substrat zwischen 30° und 60° . Bei einem solchen θ erreichen Tropfen mit 1 pl (vgl. Tab. 5.5, S. 79) einen Basisdurchmesser von ca. 20 und $28 \mu\text{m}$ (Abb. 6.51). S_a und S_q sind etwa 20-mal kleiner als der Basisdurchmesser des Tropfens. Diese Rauheit kann den Kontaktwinkel beeinflussen [146, S.194]. Der Einfluss der Rauheit auf das Spreiten (Basisdurchmesser des Tropfens) wird in Abschnitt 6.6 analysiert. Es wird zunächst angenommen, dass die hier gefundenen Ergebnisse mit Tropfen von einstelligem μl Volumen auch Tropfen im pl Bereich übertragbar sind. Diese Annahmen können jedoch nur durch weiter Untersuchungen mit ganz speziellem Gerät zur Erzeugung und Vermessung solch extrem kleiner Tropfen verifiziert werden.

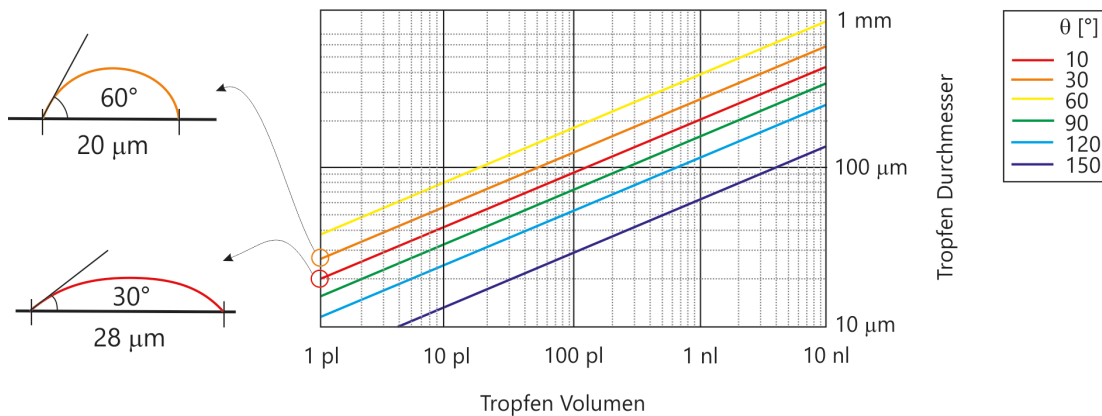


Abb. 6.51: Basisdurchmesser des Tintentröpfchens nach Volumen und Kontaktwinkel [24] - modifiziert

Bei Substraten wie beschichteten Kartons hat die CCD-Kamera des CLSM keine Funktion, da die Oberfläche unter einer Weißlichtquelle homogen aussieht und keine Referenzpunkte wie Rillen, Raster oder Partikel bietet. Die Einstellung des Abstands zwischen Objektiv und Messprobe erfolgt nach der Rückmeldung des Lasersensor über Bereiche mit Über- oder Unterbelichtung. Dieser Vorgang ist fehleranfällig. Zu Kontrollzwecken wurden die 40 Messungen in 4 Chargen an verschiedenen Tagen und randomisiert (unterschiedliche Reihenfolge) durchgeführt. Die Varianz zwischen den Chargen blieb unverändert.

Zusätzlich zu Rauheitsmessungen wurden die Messungen mit einem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Die REM-Aufnahmen der Kartons (Gruppe A und B) sind in Abb. 6.54 dargestellt. Bei den Bildern⁸¹ sind Unterschiede zwischen den Kartons der Gruppen A und B sichtbar. Um diese Unterschiede zu quantifizieren, wurden die Bilder mit der Software ImageJ ausgewertet. Die Auswertung besteht darin, jedes Bild (ⓐ, Abb. 6.52) in 711 Scheiben mit 1 Pixel Breite zu zerschneiden. ImageJ erzeugt eine

⁸¹Die Bilder wurden in der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal - Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente aufgenommen. Gerät: hochauflösendes Elektronenmikroskop | Einstellungen: Vergrößerung 5.000x, Acc. V 1.10 kV, Abstand 3,8 mm, Helligkeit 42,4

3D-Modellierung der Kartenoberfläche (Abb.6.52 ②). Die Höhe der Scheibe (57 Pixel) wird von der Software künstlich vorgegeben. Das Detail innerhalb des weißen Kreises ist eine Vertiefung bzw. ein Tal in der Oberfläche. Das 16-Bit-Bild (eine Scheibe ③) wird binarisiert und invertiert. Nur das erste obere Pixel des binarisierten Bildes wird zur Messung ausgewählt. Aus dem binarisierten und invertierten Bild mit 711 x 1 x 1 Pixel (④, stark vergrößert) werden die weißen und schwarzen Bereiche ausgezählt. Die weißen Linien sind die Hohlräume oder Täler des Bildes. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in der Abb. 6.53. Die Werte stellen den prozentualen Anteil des weißen Bereiches (Talfläche) im Verhältnis zur Gesamtfläche dar.

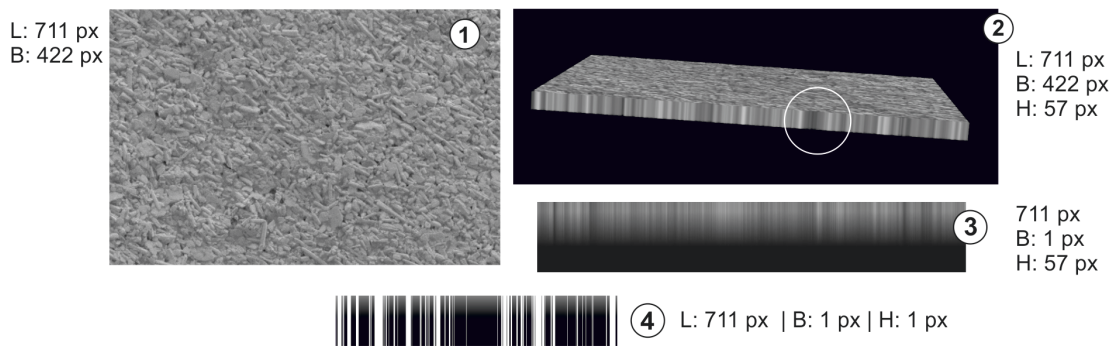


Abb. 6.52: Auswertungsverfahren der REM-Aufnahmen im Software ImageJ | L=Länge, B=Breite und H=Höhe

Die Auswertung zeigt weniger Hohlräume bzw. Täler bei allen Kartons der Gruppe B gegenüber der Gruppe A mit den unvorbehandelten Kartons. Dies bedeutet, dass der PVOH Primer Poren in der Kartonoberfläche verschließt und Täler der Oberfläche nivelliert. Visuell kann auch eine Reduzierung in der Struktur der Kartons beobachtet werden, vor allem bei B06, dessen Reduzierung von Spk und Svk die größte unter allen Kartons war (33% und 30%). Diese Werte zeigen eine klare Tendenz. Dennoch soll nicht verschwiegen werden, dass an die Genauigkeit der messtechnisch ermittelten relativen und absoluten Werte keine hohen Ansprüche gestellt werden dürfen, weil die Abtastung von Polymeren mit einem REM verfahrensbedingt im Allgemeinen relativ schwierig ist.

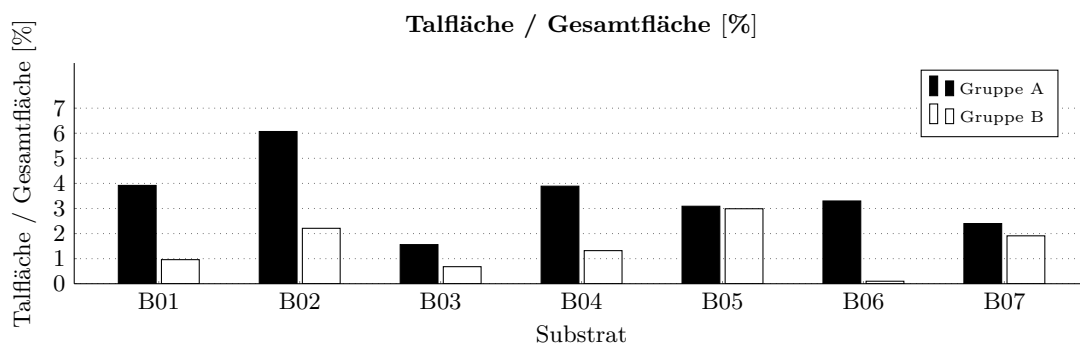


Abb. 6.53: Auswertung Talfläche / Gesamtfläche | Gruppe A und B - Daten in der Tab. B.20 vgl. S. 184

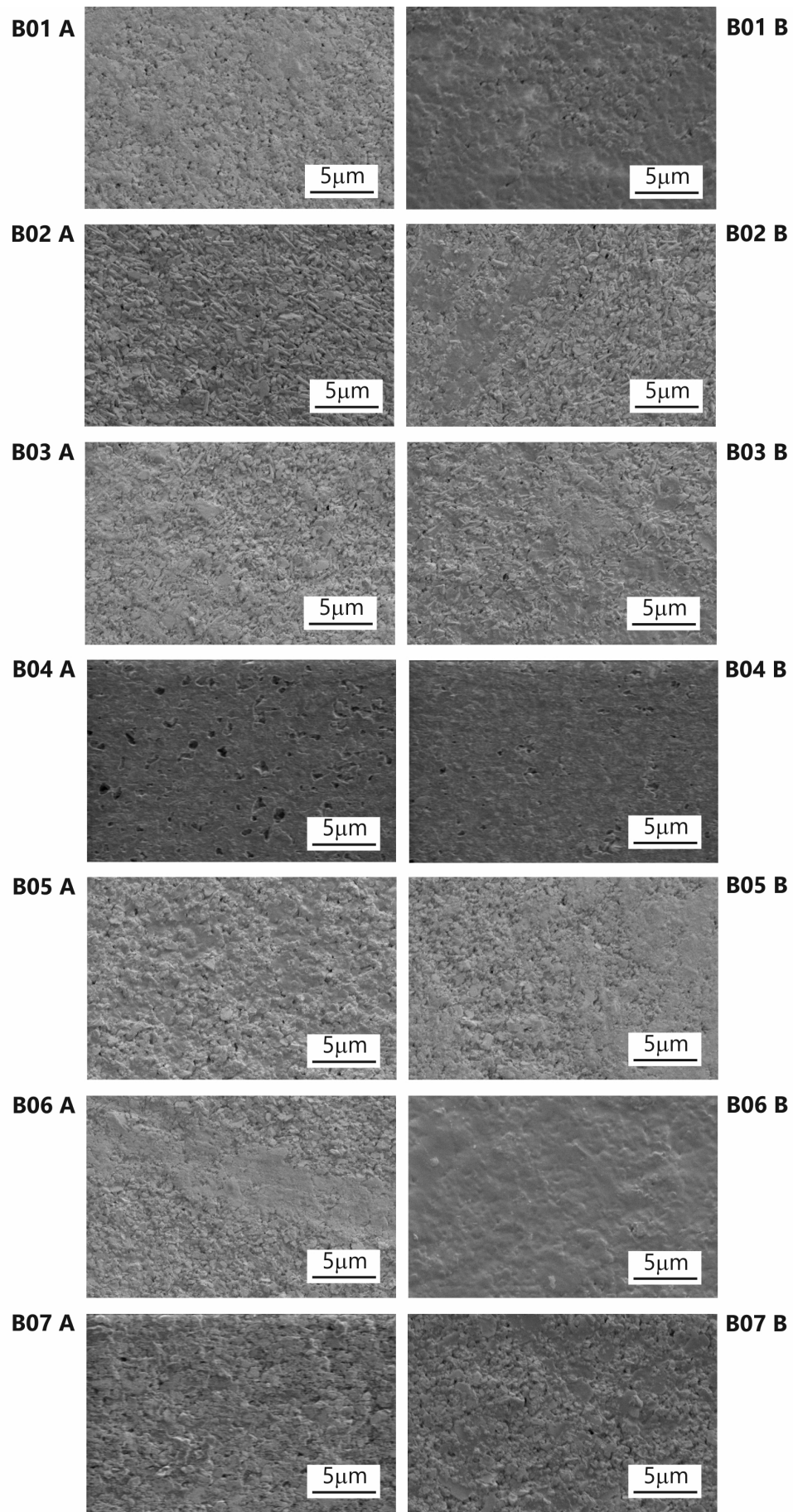


Abb. 6.54: REM-Aufnahme | Kartons B01 ... B07 ohne Primer (A) und mit Primer (B)

6.5. Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Tinten und Primer

Die Oberflächenspannung- und Viskositätsmessungen der Tinten (Tab. 6.6⁸²) wurden durchgeführt, um das Verwenden von T-Tinte mit dem für die Experimente verwendeten Canon-Drucker zu validieren. Dies geschieht auf Basis der dimensionslosen Ähnlichkeitstheoretischen Kennzahlen (Reynolds, Weber und Ohnesorge). Außerdem ist die Charakterisierung der verwendeten Tinten für die Analyse des in Abschnitt 6.6 vorgestellten Experiments relevant.

Tab. 6.6: Oberflächenspannung und Viskosität - T- und C-Tinten

		σ	η			σ	η
		[mN/m]	[mPa·s]			[mN/m]	[mPa·s]
Kf-T	\bar{m}_3	29,40	2,91	Kf-C	\bar{m}_3	41,47	3,02
	s	0,29	0,04		s	0,41	0,04
Kp-T	\bar{m}_3	29,90	3,02	Kp-C	\bar{m}_3	42,48	3,07
	s	0,39	0,09		s	0,41	0,14

Der Werte der Tintendichte wurde näherungsweise abgeschätzt. Der Wert $1,1 \text{ kg/m}^3$ bezieht sich auf das Wasser (Hauptbestandteil der Tinte) und auf andere Komponenten mit höherer Dichte aber mit geringem Volumenanteil, wie bspw. Glycerin. Der Canon Drucker hat zwei unterschiedlichen Düsen mit einem Durchmesser von ca. 8 und 18 μm (vgl. Abb. 3.5, S. 12). Auf die Basis der Kenngrößen der C-Tinten⁸³: $\rho \approx 1,1 \text{ kg/m}^3$, $\eta \approx 0,003 \text{ Ns/m}^2$ und $\sigma \approx 0,041 \text{ N/m}$ (T-Tinten $\approx 0,030 \text{ N/m}$) und mittleren Geschwindigkeit des Volumenstroms (\bar{v}) in der Düse können die relevanten Kennzahlen Re , We und Oh berechnet werden (Tab. 6.7) sein⁸⁴:

Tab. 6.7: Ähnlichkeitskennzahlen der verwendeten Tinten | Daten in der Tab. B.21 und B.22, Berechnungen vgl. S. 184

		Düsen \varnothing [m]	\bar{v} [m/s]	Re	We	Oh
C-Tinten	$0,8 \times 10^{-6}$	min	6,5	19	9	0,15
		max	13,5	40	39	0,15
	$1,8 \times 10^{-6}$	min	5,0	33	12	0,10
		max	9,0	60	40	0,10
T-Tinten	$0,8 \times 10^{-6}$	min	7,0	20	14	0,18
		max	11,6	34	39	0,18
	$1,8 \times 10^{-6}$	min	5,0	33	17	0,12
		max	7,5	50	37	0,12

Die berechneten mittleren Geschwindigkeiten liegen innerhalb der üblichen Werte für Inkjet-DOD-Systeme [98, S.125].

⁸² \bar{m}_3 = Mittelwert aus 3 Messungen und s = Standardabweichung

⁸³Gigac et al. geben Oberflächenspannungswerte der SOHO-Tinten an, die den in dieser Arbeit verwendeten ähnlich sind: CLI-521-Bk mit 39,8 mPa·s und CLI-520-Bk mit 43,6 mPa·s [48, S.918].

⁸⁴Referenzwerte: $10 < Re < 100$, $8 < We < 40$, und $0,1 < Oh < 10$ [67] [56, S.26]

Reynoldszahl (Re) und Ohnesorgezahl (Oh) charakterisieren den Einfluss von Trägheits-, Zähigkeits- und Oberflächenkräften auf das Verhalten von ähnlichen Fluiden. Für alle hier verwendeten Tinten liegen diese Kennzahlen in dem für Inkjet-Tinten qualifizierten Prozessfenster (Abb. 6.55). Dennoch wurden Verstopfungen der Düsen des Inkjet Druckkopfes beobachtet. Angesichts der ausgewiesenen fließtechnischen Eignung der Tinten müssen als Ursache für diese Verstopfungen eher andere Effekte gesehen werden: z.B. große Pigmentpartikel oder kleinste eingetrocknete Tintenreste aus vorhergegangener Benutzung des Druckers. Da die T-Tinten keine Antikogationsadditive enthalten, zeigten die T-Tinten bei den Drucktests mehr Verstopfungen als C-Tinten, und es war erforderlich, die Druckköpfe häufiger zu reinigen. Es wurden keine Jetting-Defekte oder Satelittentröpfchen beobachtet, die angesichts der Werte von Re und Oh im Prozessfenster auch nicht zu erwarten waren. Die exakte Fluidgeschwindigkeit in den Düsen des Druckers kann nicht ohne Weiteres gemessen werden. Die Berechnungen der Kennzahlen mit den mittleren Fließgeschwindigkeiten zeigt jedoch, dass beide T-Tinten innerhalb des Druckbarkeitsfensters des Canon IX Pixma 6850 liegen.

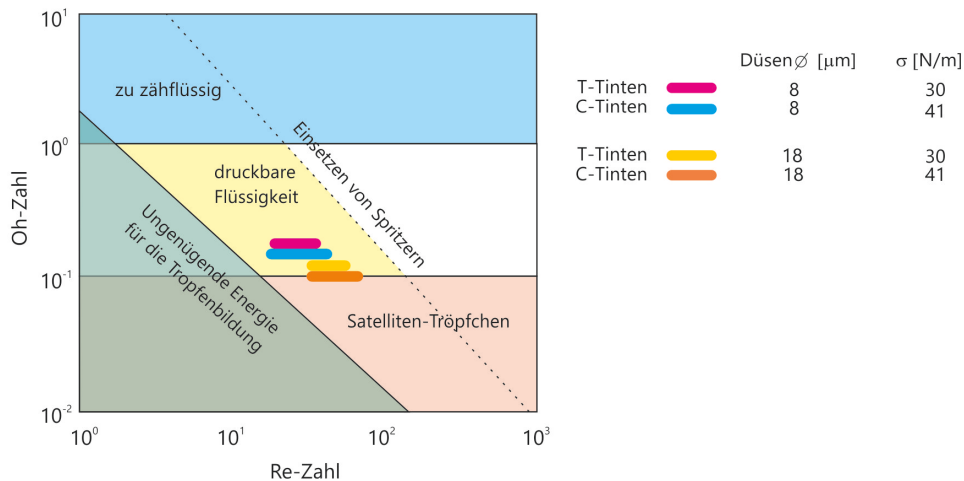


Abb. 6.55: Prozessfenster der T- und C-Tinten in der schematischen Darstellung des DOD-Inkjet Betriebsregimes anhand von Oh- und Re-Zahl nach [56, S.26]

Die Oberflächenspannung- und Viskositätsmessungen der Primer (Tab. 6.8) haben rein informativen Charakter.

Tab. 6.8: Oberflächenspannung und Viskosität der Primer

		σ [mN/m]	η [mPa·s]		σ [mN/m]	η [mPa·s]		σ [mN/m]	η [mPa·s]		σ [mN/m]	η [mPa·s]
\bar{m}_3	P01	50,8	4,5	P04	65,2	4,1	P07	67,6	19,2	P10	59,9	1,5
		1,6	0,20		0,39	0,10		1,12	0,10		1,52	0,10
\bar{m}_3	P02	67,4	5,2	P05	59,8	6,4	P08	66,6	5,4	P11	66,7	1,2
		1,4	0,18		0,80	0,26		1,20	0,09		1,77	0,02
\bar{m}_3	P03	66,6	5,0	P06	65,2	21,5	P09	55,3	1,3	P12	67,2	1,1
		1,9	0,17		1,25	0,26		1,42	0,18		1,89	0,05

6.6. Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten

Das Ziel dieser Experiment⁸⁵ war, das Spreitenverhalten der Tinten von Inkjet Tinten mit erhöhter Viskosität auf der Oberfläche der Kartons zu erforschen. Zur Erhöhung der Viskosität wurden 5, 10 und 15 Gew.% PEG (Polyethylenglykol) den Tinten beigemischt. Die Zugabe von PEG zur Tinte verursacht gleichzeitig auch eine Erhöhung der Oberflächenspannung der Tinten (Abb. 6.56).

Das Spreiten der Tinten, charakterisiert durch den Spreiten-Koeffizienten β (vgl. S. 50f und Gl. 3.17) wurde unter den folgenden Gesichtspunkten analysiert:

- Unterschiede zwischen Substraten ohne Primer (Gruppe A) und mit Primer (Gruppe B)
- Unterschiede zwischen Tinten mit 0, 5, 10 und 15% PEG-Anteil
- Unterschiede zwischen Tinten auf Pigmentbasis und auf Farbstoffbasis
- Unterschiede zwischen T-Tinten und C-Tinten

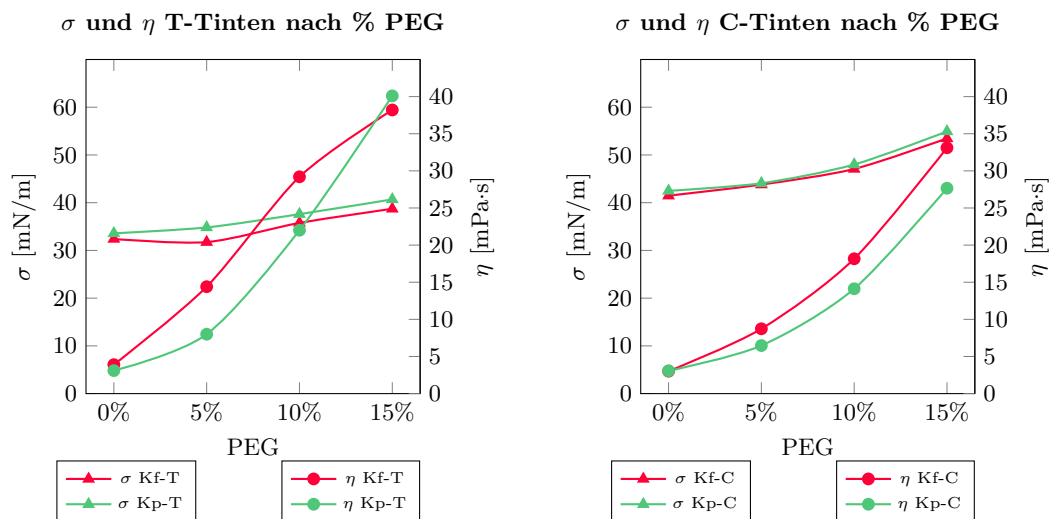


Abb. 6.56: Oberflächenspannung und Viskosität | T-Tinten (links) C-Tinten (rechts) mit PEG
Daten in der Tab. B.23

Tabelle 6.9 zeigt an einigen Beispielen, wie sich die Modifikation der Tinten-Rezepturen durch PEG Zugabe auf das Spreiten der Tintentröpfchen auswirkt. Berechnungsgrundlage sind die Gleichungen 6.1, 6.2 und 6.3. Für jede Tinte auf jedem Substrat und von jedem Volumenanteil von PEG wurden 5 Messungen durchgeführt. Der Term β_t gibt den arithmetischen Mittelwert der fünf Messungen an, z.B. β_{t100} ist der arithmetische

⁸⁵Ein Teil der in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurde im Paper *Influences on spreading of Inkjet inks on coated cardboards* [120] veröffentlicht. Für diese Veröffentlichung wurden die Messungen der T-Tinten im Labor der Fa. DataPhysics Instruments durchgeführt. Die Tests mit den C-Tinten wurden später im Labor der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt. Um Verzerrungen wegen des Gerätetyps, der Nadel und der Handhabung zu vermeiden, wurden die Messungen mit den T-Tinten im Universitätslabor wiederholt. Die Werte einiger Messungen können sich zwischen dem Paper und der vorliegenden Arbeit unterscheiden (Nachkommastellen).

Mittelwert der 5 maximalen Werte (maximales Spreiten in t_{100} bzw. 4 Sekunden nach dem Start der Aufnahme) oder β_{t1} ist der arithmetische Mittelwert der 5 minimalen Werte (minimales Spreiten in $t1$ bzw. 0,04 Sekunde nach dem Start der Aufnahme).

Die Berechnung des Δ^{BA} (Gl. 6.1) repräsentiert den o.g. Punkt a) dieser Analysen. Der Wert Δ^{BA} repräsentiert die absolute Differenz bei maximalem Spreiten der Tropfen auf Substraten B (mit Primer) β_{t100}^B und Substraten A (ohne Primer) β_{t100}^A .

$$\Delta^{BA} = \beta_{t100}^B - \beta_{t100}^A \quad (6.1)$$

Die Berechnungen von $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$ (Gl. 6.2) und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ (Gl. 6.3)⁸⁶, bezogen auf die Substrate der Gruppe A und der Gruppe B, kalkulieren die relative Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Spreiten $\Delta\beta^A$ bzw. $\Delta\beta^B$ im Verhältnis zum minimalen Spreiten β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B . Hierdurch werden die entsprechenden Erkenntnisse zu den Punkten (b), (c) und (d) gewonnen. β ist hier kein Spreiten-Koeffizient nach Unterabschnitt 3.2.3 (S.50) und Gl. 3.17, sondern ein absoluter Messwert zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Messung.

$$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A = \frac{\beta_{t100}^A - \beta_{t1}^A}{\beta_{t1}^A} \quad (6.2)$$

$$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B = \frac{\beta_{t100}^B - \beta_{t1}^B}{\beta_{t1}^B} \quad (6.3)$$

Tab. 6.9: Terme der Gleichungen 6.1, 6.2 und 6.3 und Beispiele von Berechnungen

	Gruppe	β_{t1}^A	β_{t100}^A	$\Delta\beta^A$	$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$	Δ^{BA}
Kf-T 0% B01	A	5,01 mm	7,83 mm	2,82 mm	0,56	-1,04 mm
	B	β_{t1}^B 5,75 mm	β_{t100}^B 6,79 mm	$\Delta\beta^B$ 1,04 mm	$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ 0,18	
Kf-C 10% B01	A	β_{t1}^A 4,21 mm	β_{t100}^A 4,96 mm	$\Delta\beta^A$ 0,75 mm	$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$ 0,17	1,11 mm
	B	β_{t1}^B 4,84 mm	β_{t100}^B 6,07 mm	$\Delta\beta^B$ 1,23 mm	$\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ 0,25	

Aufgrund der Erhöhung der Grenzflächenenergie (total und polar) der Kartons durch das Auftragen von Primer (vgl. Abb. 6.47 und 6.48, S. 140) ist zu erwarten, dass die Tinten auf geprimerten Substraten mehr spreiten als auf nicht geprimerten. Die in den Abb. 6.57, 6.58, 6.59 und 6.60 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass alle Tinten ungeachtet des PEG Anteils mehr auf den geprimerten Kartons (Gruppe B) spreiten, mit Ausnahme von Kf-T 0% und 5%.

Die Tinten Kf-T und Kp-T unterscheiden sich nur sehr wenig in Viskosität und Ober-

⁸⁶Üblicherweise werden diese Werte in % dargestellt, aber im Folgenden werden sie, da es sich um abstrakte Zahlen handelt, in Dezimalbruch angegeben.

flächenspannung (Abb.6.56 links), was keine Erklärung für das abweichende Verhalten von Kf-T liefert. Die beiden T-Tinten sind nur bedingt chemisch vergleichbar. Sie bestehen aus gleichen Komponenten mit ähnlichen Anteilen. Was sie unterscheidet, ist das Farbmittel. Pigmente benötigen einen kolloidalen Stabilisator zur Mizellbildung⁸⁷. Dieser Stabilisator bewirkt allerdings auch, dass die Pigmente im Trägerfluid schweben anstatt zu aggregieren oder sich abzusetzen. Farbstoff benötigt keine Stabilisator⁸⁸. Durch die Bildung oder Auflösung der Mizellen können sich die Kenngrößen – Viskosität und Oberflächenspannung – der Flüssigkeit verändern.

Beim Kontakt mit dem PVOH bzw. mit dem ebenfalls Tenside enthaltenden Pigmentstrich (vgl. Tab. 3.4 S. 20) auf den Oberflächen der Kartons verändert sich die Oberflächenspannung der Tinten. Dieser Vorgang, bei dem sich aus dem Kontakt zwischen verschiedenen Phasen neue Grenzen bilden, weist auf den dynamischen Charakter der Oberflächenspannung hin und kann eine Erklärung für das Verhalten der Kf-T sein. Das gleiche abweichende Verhalten von Kf-T wurde bei den TWZ-Messungen beobachtet, obwohl die Experimente in mehreren Aspekten unterschiedlich sind.

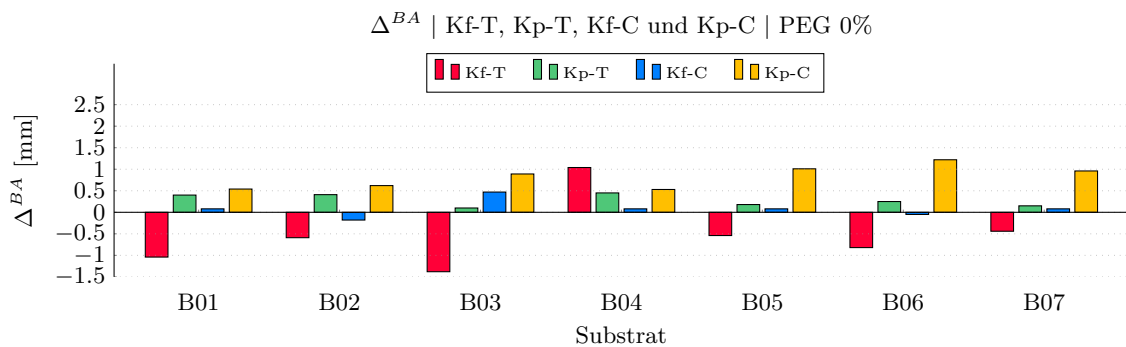


Abb. 6.57: Unterschied zwischen den absoluten Spreiten Gruppe B und A (Δ^{BA}) | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 0% | Daten in der Tab. B.24 vgl. S. 186

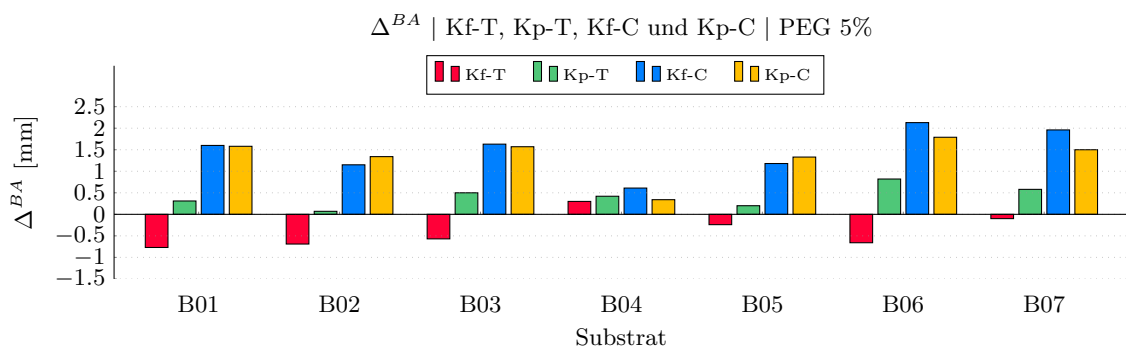


Abb. 6.58: Unterschied zwischen den absoluten Spreiten Gruppe B und A (Δ^{BA}) | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 5% | Daten in der Tab. B.24 vgl. S. 186

⁸⁷Tenside in einer Lösung oder Dispersion bilden ab einer bestimmten Konzentration (kritische Mizellenkonzentration) die Mizellen. Das sind grenzflächenaktive Substanze in globulärer Struktur, die aus Molekülen mit einem polaren und hydrophilen Kopf (der sich mit Wasser verbindet) und einem apolaren und hydrophoben Schwanz (der sich mit dem Pigmentpartikel verbindet) gebildet werden.

⁸⁸Diese Aussage bezieht sich nur auf Pigmentdispersionen mit oberflächenaktiven Bestandteilen. Beide Tinten enthalten 0,2% Gemin tensid, um die Oberflächenspannung der Träger zu senken.

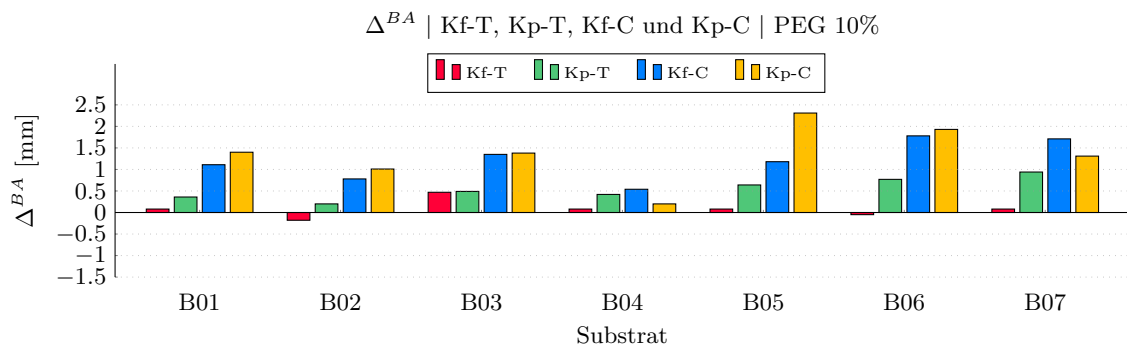


Abb. 6.59: Unterschied zwischen den absoluten Spreiten Gruppe B und A (Δ^{BA}) | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 10% | Daten in der Tab. B.24 vgl. S. 186

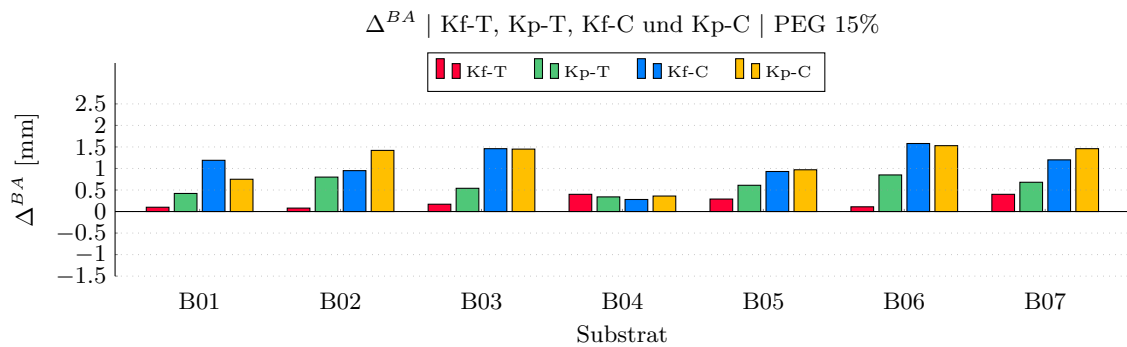


Abb. 6.60: Unterschied zwischen den absoluten Spreiten Gruppe B und A (Δ^{BA}) | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 15% | Daten in der Tab. B.24 vgl. S. 186

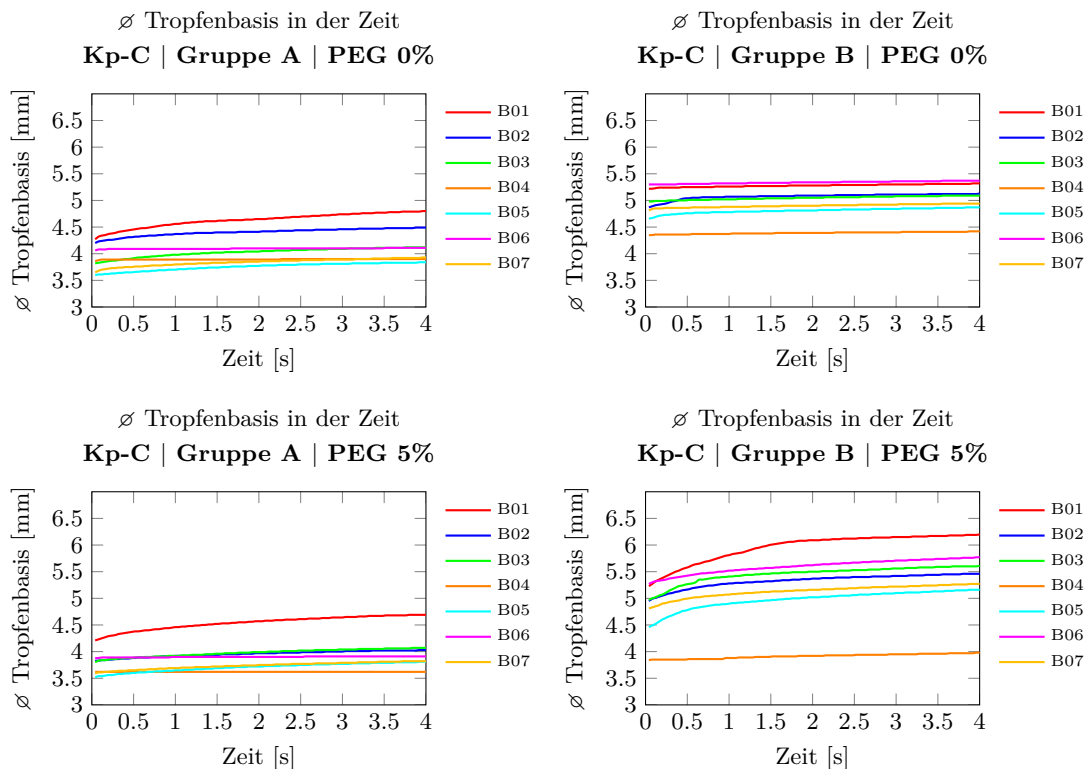
C-Tinten haben, im Vergleich zu den T-Tinten, eine hohe Oberflächenspannung. Die beiden Tinten Kf-C und Kp-C enthalten Glykol (vgl. Tab. 5.2 S. 77). Je nach Art des verwendeten Alkohols kann dieser als ein zweites Lösungsmittel dienen, als ein Durchdringungsmittel, um die Benetzung der Tinten zu verändern oder als eine Ergänzung zu Tensiden, um die Penetration zu reduzieren [53, S.154]. Beide Tinten enthalten ebenfalls Glycerol, um die Viskosität zu erhöhen und dadurch die Verdunstungskurve der Tinten abzuflachen [151, S.165]. Ohne den Zusatz von PEG ist das Spreiten von Kf-C auf den vorbehandelten wie unvorbehandelten Oberflächen quasi identisch. Mit zunehmenden Anteilen PEG vergrößert sich das Δ_{BA} beider Tinten. Dies deutet darauf hin, dass es eine Folge der Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Konzentrationen von Glycerin und Glykol in den Tinten sein kann. Der Einfluss von PEG auf die C-Tinten größer ist als auf die T-Tinten. Das Verhalten der Tinten unterscheidet sich kaum zwischen den verschiedenen Kartons. Es gibt Schwankungen, die aber die hier beschriebenen Trends nicht verändern, außer bei B04.

Die acht Diagramme in Abb. 6.61 zeigen die Veränderung des Basisdurchmessers des Kp-C-Tintentropfens während der ersten vier Sekunden nach dem Aufsetzen. Die Kurven der anderen Tinten zeigen ähnliche Verläufe⁸⁹.

⁸⁹Die Kp-C wurde als Beispiel gewählt, weil bei ihr der hier darzustellende Effekt stärker als bei den anderen Tinten ist. Zur besseren Übersicht wurde nur die dritte Kurve jeder Messreihe dargestellt (vgl. 5.17 S. 97)

Es ist hier die in den Δ^{BA} -Diagrammen beobachtete gegenseitige Abhängigkeit von Tinte und Primer sichtbar, d.h. die Tinte spreiten auf den geprimerten Substrate (Gruppe B) stärker aus als auf Substraten ohne Vorbehandlung. Mit der Erhöhung des PEG-Anteils setzt sich dieser Effekt fort, d.h. das Δ_{BA} bleibt positiv. Jedoch schreitet das Spreiten in der ersten Sekunde nachdem Aufsetzen der Tropfen schneller voran. Während bei den unbehandelten Kartons (Gruppe A) die Zugabe von PEG zur Tinte kaum eine Auswirkung zeigt (geringfügig bei PEG 15%), ist bei den geprimerten Kartons (Gruppe B) zweierlei zu beobachten: Zum einen spreiten die Tropfen zu größeren Durchmessern, zum anderen tritt in der ersten Sekunde nach dem Aufsetzen ein beschleunigtes Spreiten ein. Eine Erklärung für den Effekt ist, dass dies auf die Mischung von PEG und PVOH zurückzuführen ist. Unabhängig von der Beschleunigung ist die β_{t100}^B -Werte immer größer als die β_{t100}^A -Werte, was sich auf den allgemeinen Trend von Δ_{BA} nicht auswirkt.

Für eine Beschleunigung des Spreitens könnte es zwei Erklärungen geben. 1. Sie wurde durch eine Reduzierung der Viskosität der Tinte verursacht. Dies geschieht durch die Wirkung des PVOH plus PEG im Pigmentstabilisator, was die Viskosität der Tinte verändern kann. Es ist aber zu beobachten, dass die Beschleunigung des Spreitens auch bei Kf-C und Kf-T auftritt. 2. Die wurde durch die Reduzierung der Oberflächenspannung der Tinten verursacht. Aber die Beimischung von PVOH wurde das Gegenteil bewirken, d.h. die Oberflächenspannung der Tinte wird erhöht. Also beiden Modelle sind in diesem Fall nicht zwingend plausibel.



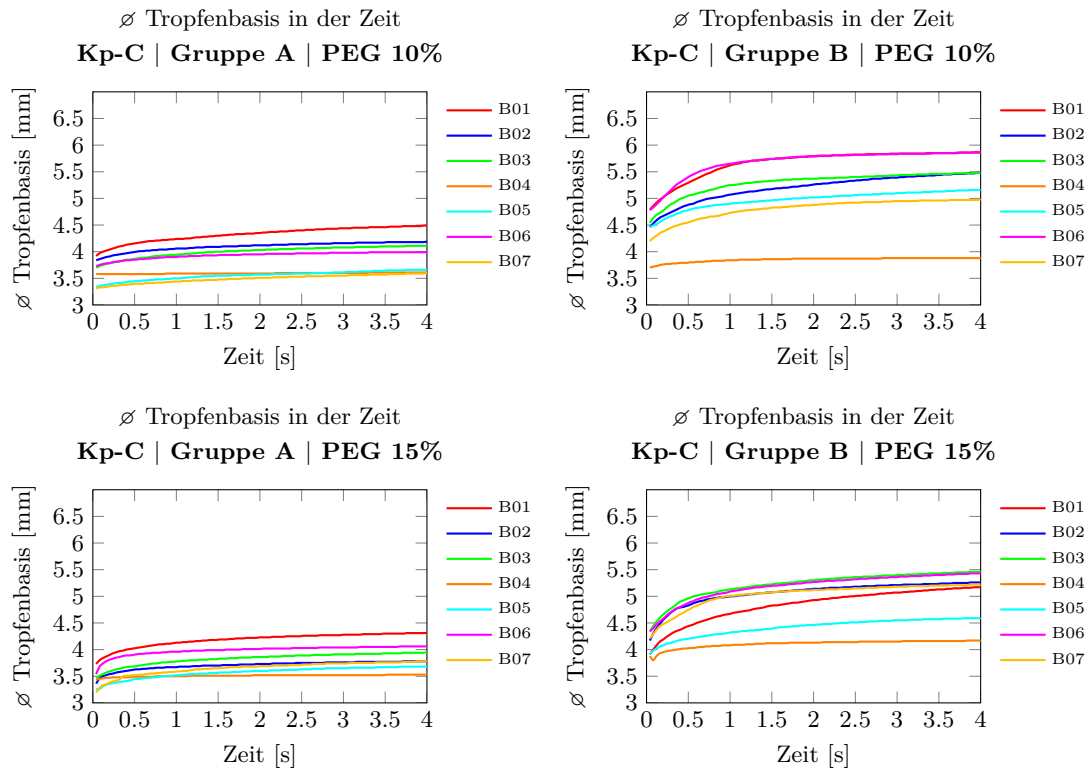


Abb. 6.61: Ø Tropfenbasis in der Zeit | Kp-C | Gruppe A und B | PEG 0%, 5%, 10% und 15%

Zwar wird die Absorption der Tinte hier nicht explizit untersucht, jedoch könnte aus sie einen Einfluss auf den Verlauf des Spreitens haben. Je weiter die Tinte spreitet, desto mehr Oberfläche steht zur Verfügung auf der die Tinte vertikal in den Karton absorbiert werden kann. Eine Vorbehandlung mit PVOH reduziert jedoch die Permeabilität der Substrate und verstopft, anschaulich ausgedrückt, die absorbierenden Poren. Dijksman zeigt, dass bei niedrigviskosen Tinten die Penetrations- und Spreitenzeit eng zusammenhängt, während bei höheren Viskositäten (5 bis 20 mPa·s) die Penetrationszeit länger als die Spreitenzeit ist [30, S.391]. Dieses Modell ist nicht zwangsläufig uneingeschränkt auf beschichteten Karton übertragbar, da der Autor sich auf stark saugende Substrate wie Büropapier bezieht, dennoch dürften die beobachteten Effekt auch hier eine nicht unwesentliche Rolle spielen. Auf Untergründen mit reduzierter Absorption ist das verbleibende Tintenvolumen auf der Oberfläche größer und somit ein Potenzial zum weiteren Spreiten vorhanden.

Bei der Analyse der REM-Bilder zeigt der Karton B06 die größte Reduzierung der Talfläche im Verhältnis zur Gesamtfläche bedingt durch die Auftragung des Primers P07 (vgl. 6.54 S. 144). Um zu überprüfen, ob eine Abhängigkeit von Penetration und Spreiten in dem hier beschriebenen Szenario besteht, wurden das $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ der Kontaktwinkel, Basisdurchmesser, Volumina und Tropfenhöhen aller Tinten auf B06 verglichen (Tab. 6.10).

Tab. 6.10: $\Delta_{(t100 \rightarrow t1)}$ der Kontaktwinkel, Basisdurchmesser, Volumina und Tropfenhöhen | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | B06 | Gruppe A und B

		$\Delta_{(t100 \rightarrow t1)}$				
	PEG[%]		Kontaktwinkel	Basisdurchmesser	Volumen	Höhe
Kf-T	0	A	-0,72	0,54	-0,16	-0,64
	0	B	-0,45	0,22	-0,03	-0,34
	15	A	-0,42	0,34	0,00	-0,41
	15	B	-0,52	0,32	-0,02	-0,42
Kp-T	0	A	-0,12	0,19	0,02	-0,22
	0	B	-0,08	0,03	0,00	-0,04
	15	A	-0,42	0,25	0,00	-0,32
	15	B	-0,54	0,33	-0,04	-0,44
Kf-C	0	A	-0,11	0,06	0,01	-0,07
	0	B	-0,16	0,07	-0,01	-0,13
	15	A	-0,29	0,19	0,02	-0,19
	15	B	-0,54	0,32	-0,06	-0,44
Kp-C	0	A	-0,04	0,02	0,01	-0,02
	0	B	-0,07	0,01	0,01	0,00
	15	A	-0,20	0,13	0,02	-0,13
	15	B	-0,49	0,26	-0,01	-0,40

Hier wurden die schon beobachteten Unstimmigkeiten der Kf-T Tinte festgestellt. Bei Kp-T-, Kf-C- und Kp-C erleiden die Kontaktwinkel und die Tropfenhöhen bei 15% PEG-Konzentration größere Reduzierungen als bei reinen Tinten. Der Basisdurchmesser nimmt bei den Tinten mit 15% PEG stärker zu. Zwischen den Gruppen B06 (A) und B06 (B) gibt es eine Tendenz zu größerem Spreiten (\downarrow Kontaktwinkel, \uparrow Basisdurchmesser und \downarrow Tropfenhöhe) bei der Gruppe B. Hier wirken zwei Faktoren: Die Verringerung der Permeabilität (wegen PVOH) und die Erhöhung der Viskosität (wegen PEG) reduziert die Absorption, was die seitliche Ausbreitung erhöht.

Die 28 Diagramme in Abb. 6.62 zeigen die Ergebnisse des relativen Spreitens der Tinten nach PEG-Anteil, Farbmittel, Karton und Vorbehandlung (Gruppe A und B). Je höher die Werte von $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$ und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ (einfach $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$) sind, desto mehr wird der Tintentropfen spreiten im Verhältnis zu seinem Basisdurchmesser in $t1$. Die Variation der Ergebnisse zwischen den Substraten zeigt, dass die Eigenschaften der Kartons wenig Einfluss auf das Spreiten haben, außer bei dem gussgestrichenen Karton B04.

Von den 112 verglichenen Werten⁹⁰ zeigten 106 (vgl. Tab B.25 und B.26 S. 186), dass die C-Tinten weniger als die T-Tinten spreiten. Dies gilt sowohl für die pigmentbasierte als auch für die farbstoffbasierte Tinte und für Gruppe A und B. Die Viskosität der C-Tinten ist kleiner als die T-Tinten (zwischen 0,03 und 15,78 mPa·s je nach Farbmittel und PEG-Anteil) und die Oberflächenspannung der C-Tinten im Durchschnitt ca. 11,20 mN/m größer als die der T-Tinten ist. Entsprechend liegt es nahe, dass das geringere Spreiten der C-Tinten auf deren höhere Oberflächenspannung zurückzuführen ist.

⁹⁰Z.B.: Kf-T 0% (B01 Gruppe A) und Kp-T 0% (B01 Gruppe A) | Insgesamt: 112 Paare (7 Kartons, 2 Gruppen, 4 Tinten und 4 PEG-Anteil: 224 Einzelwerte)

Überwiegend, bei 98 von 112 Vergleichswerten, spreiten (vgl. Tab B.25 und B.26 S. 186), die Tinten auf Pigmentbasis weniger als die Tinten auf Farbstoffbasis spreiten⁹¹. Die Unterschiede der Oberflächenspannung zwischen den Tinten-Paaren (Kf-T, Kp-T und Kf-C, Kp-C) ist vernachlässigbar (Durchschnitt σ ca 2,04 mN/m s bzw. 0,91 mN/m und die Unterschiede der Viskosität zwischen den Tinten-Paaren schwanken zwischen positiven und negativen Werten ohne dass hierfür eine überzeugende Begründung gefunden werden kann. Daher sind diese Ergebnisse nicht durch die Viskositäts- und Oberflächenspannungsdaten der Tinte nicht ohne Einschränkungen erklärbar.

Wie bereits anhand der Messwerte von $\Delta\beta_A$ beobachtet werden konnte, mit Ausnahme von Kf-T, spreiten die Tinten auf den Kartons mit Primern mehr als auf denen ohne Primer (vgl. Tab. B.24 S. 186).

Bis auf wenige Ausnahmen ist zu beobachten, dass die Erhöhung des PEG-Anteils in den Tinten einen kleineren Einfluss auf das Spreiten der Tinten auf den Kartons ohne Primer im Vergleich zu denen mit Primer haben. Das gleiche ist in den Diagrammen der Abbildung 6.61 zu sehen. Die absoluten $\Delta\beta^A$ für B01 sind 0,5, 0,3, 0,3 und 0,5 mm und die $\Delta\beta^B$ sind 0,5, 1,8, 1,5 und 1,2 jeweils für PEG 0, 5, 10 und 15%.

Mit der Erhöhung von den PEG-Anteilen nehmen die β_{t1} -Werte (200 von 224 Messungen) und β_{t100} -Werte (185 von 224 Messungen) ab. Im Vergleich nehmen die β_{t1} -Werte stärker ab als die β_{t100} -Werte, so dass das $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$ und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ sowie $\Delta\beta^A$ und $\Delta\beta^B$ mit der Erhöhung des PEG-Anteils leicht zunimmt.

In der experimentellen Studie von Krainer et al. wird gezeigt, dass die Viskosität der Flüssigkeit der meist relevante Faktor für die Ausbreitung von Tropfen ist und dass die Oberflächenspannung der Tinte nur bei hydrophoben Substraten auch eine Rolle spielt [78, S.31716]. Diese Untersuchungen wurden in eine *High-Speed-Inkjetsystem* durchgeführt, insofern sind die vorgestellten Ergebnisse mit den hier gefundenen Resultaten nur eingeschränkt vergleichbar.

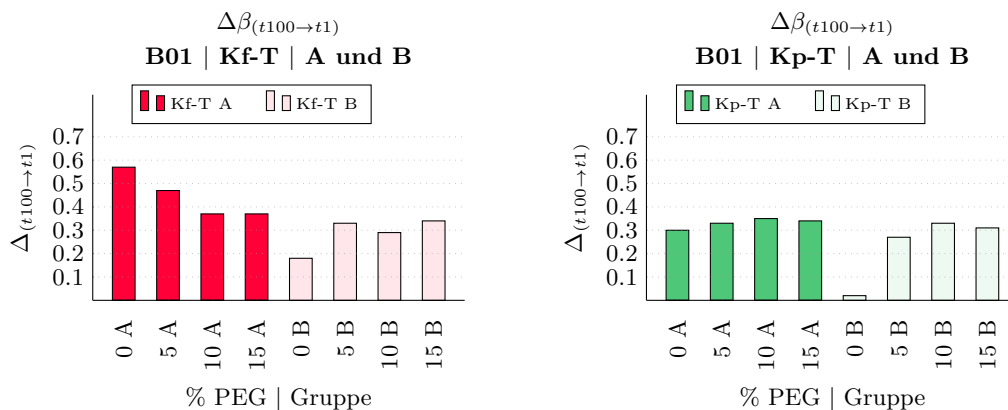
Die wesentlichen Ergebnisse der Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten, abgesehen von dem superkalandrierten Karton B04, sind in den folgenden Punkten skizziert (\uparrow = Erhöhung und \downarrow = Reduzierung):

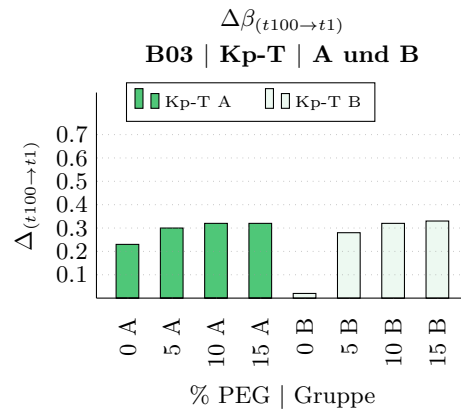
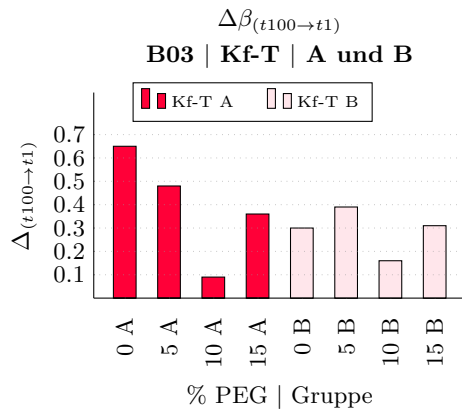
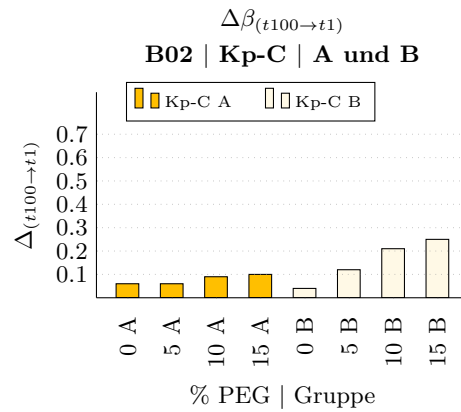
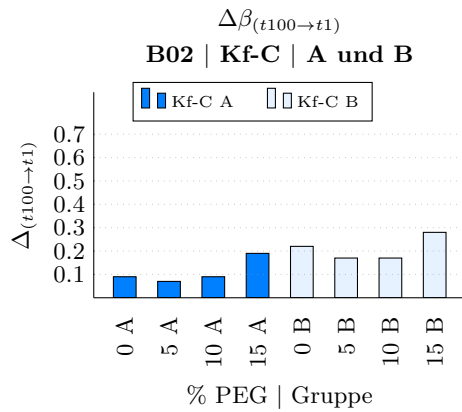
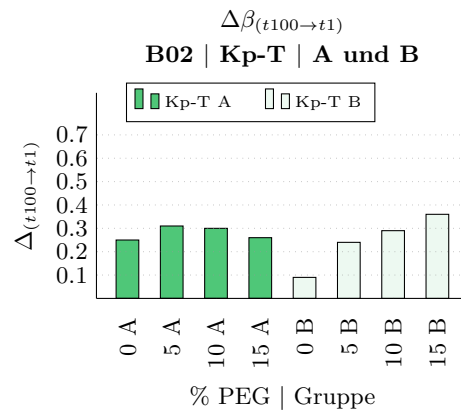
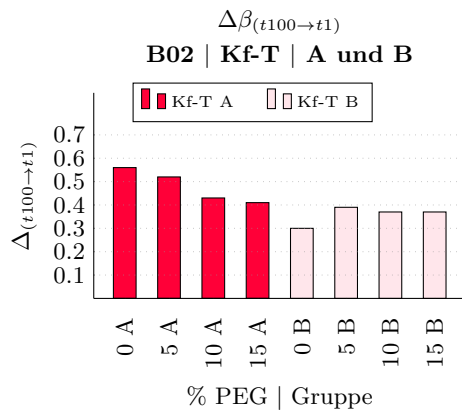
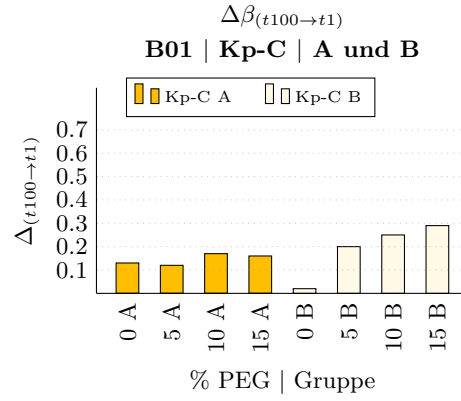
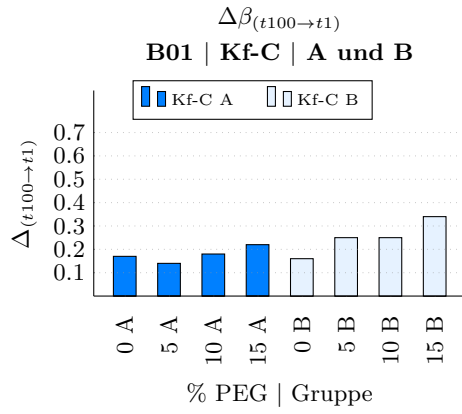
- $\Delta\beta^A < \Delta\beta^B$ resultiert aus $\sigma_{SA} < \sigma_{SB}$ ($\approx 2 - 11$ mN/m).
- $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^C$ -Tinten $<$ $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^T$ -Tinten resultiert aus σ_{LT} -Tinten $<$ σ_{LC} -Tinten (≈ 11 mN/m).
- Das Phänomen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ der Pigmenttinten $<$ $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ der Farbstofftinten ist. Es ist nicht durch $\uparrow \Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)} \Leftrightarrow \downarrow \eta, \downarrow \sigma_L$ und $\uparrow \sigma_S$ erklärbar.

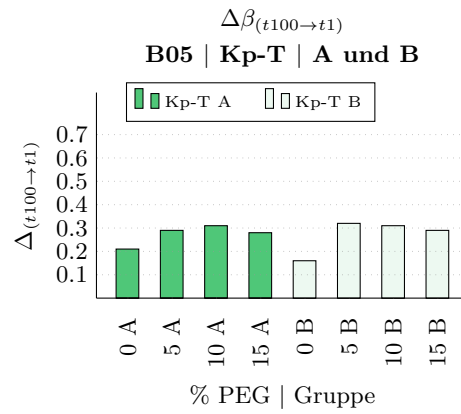
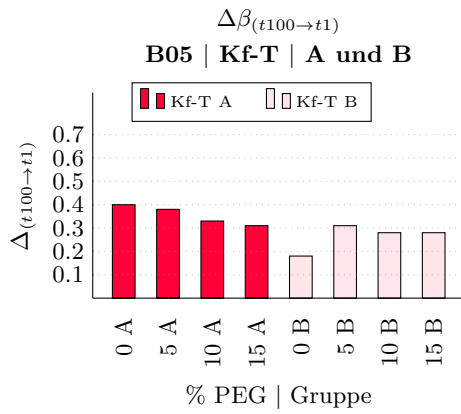
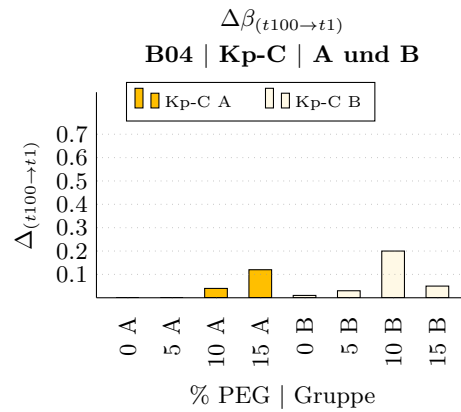
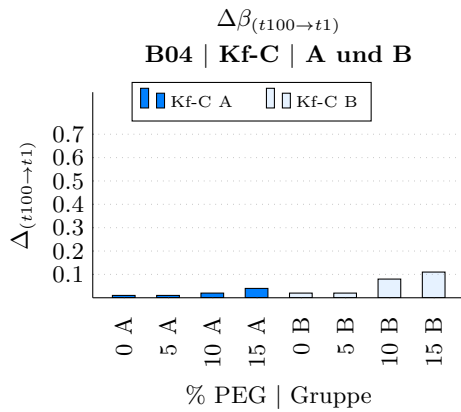
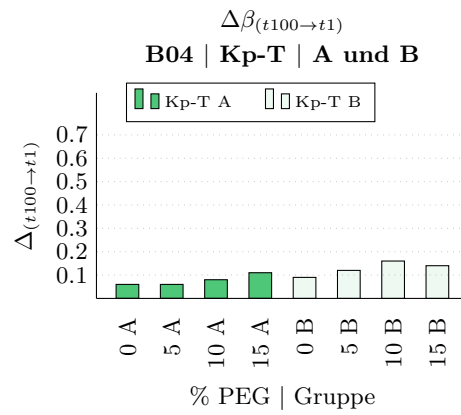
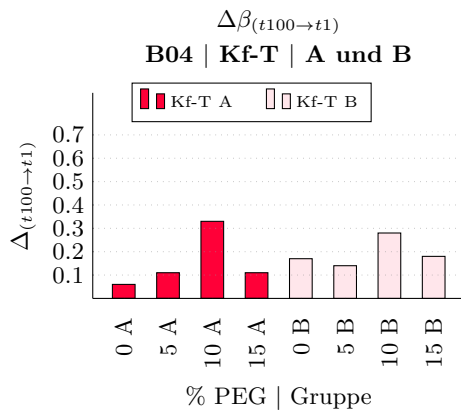
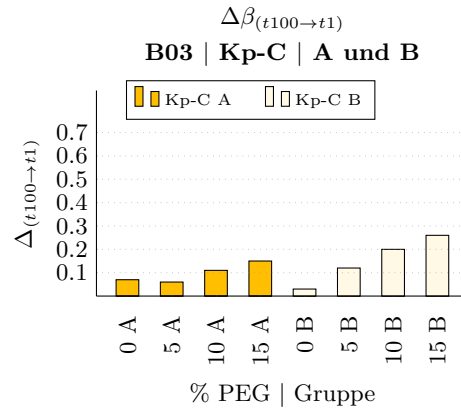
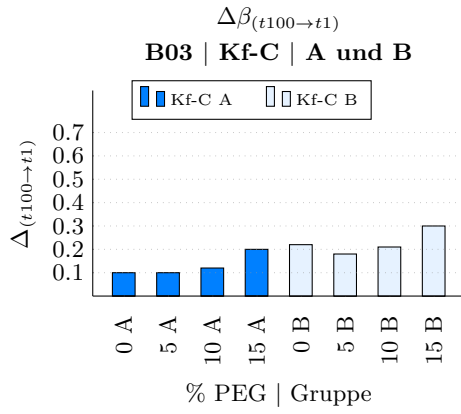
⁹¹Der Vergleich wurde nur zwischen Tinten der gleichen Kategorie durchgeführt: Kf-T versus Kp-T und Kf-C versus Kp-C.

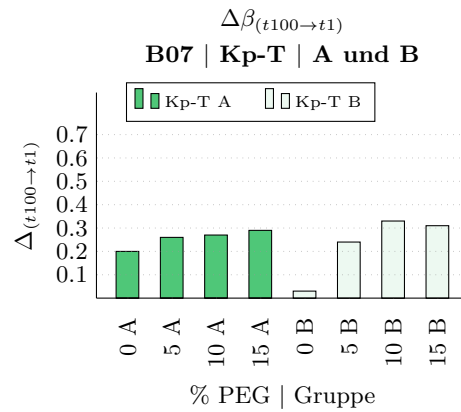
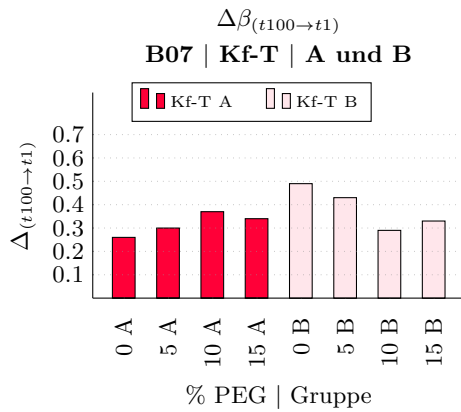
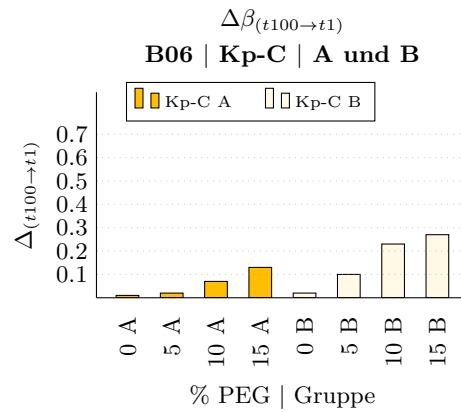
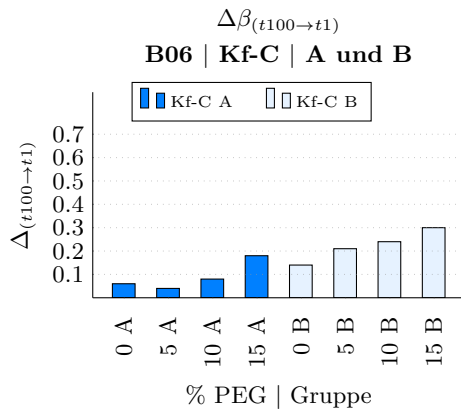
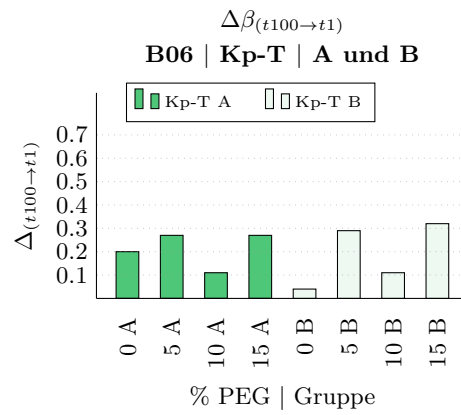
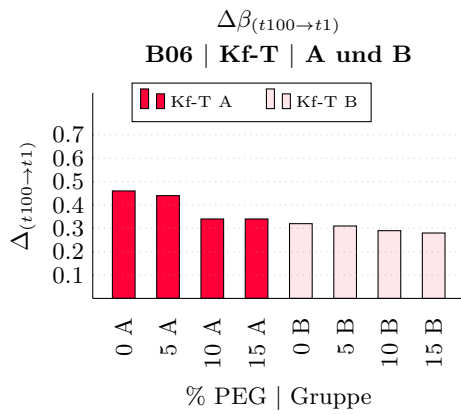
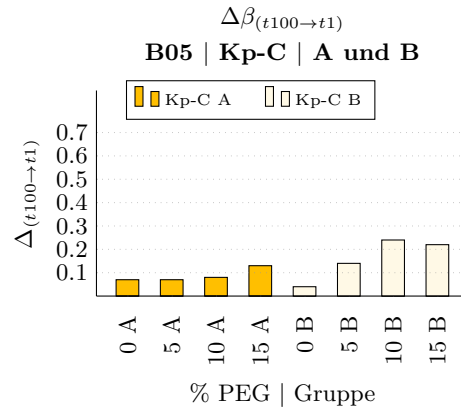
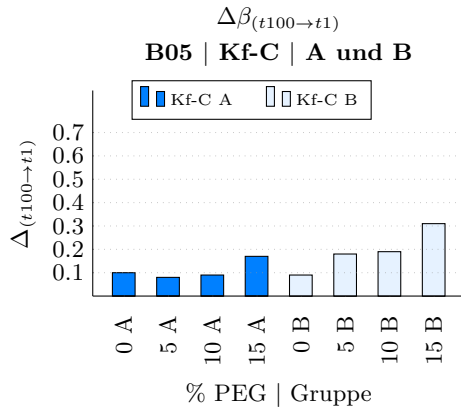
- Die ↑ PEG-Anteil führt häufig zum $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}^B$ $5\% < \Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}^B$ $10\% < \Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}^B$ 15% ist. Möglicherweise ist es zur Mischung von PVOH und PEG zurückzuführen.
- Die ↑ PEG-Anteil führt zur ↓ $\beta_{t_1}^A$ und $\beta_{t_1}^B$ sowie ↓ $\beta_{t_{100}}^A$ und $\beta_{t_{100}}^B$, wegen der ↑ η (Max. ≈ 37 mPa·s) und ↑ σ_L (Max. ≈ 12 mPa·s)
- Die ↑ PEG-Anteil führt zur ↓ $\beta_{t_1} > \beta_{t_{100}}$, was zu $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ PEG 0% $\ll \Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ PEG 15% führt, weil die ↑ η und die ↓ Permeabilität zur ↓ Absorption und ↑ der Volume der Tinten zum Spreiten führt.

In Hinblick auf die Methode und Ausrüstung, die in diesem Experiment verwendet wurde, sind drei Punkte hervorzuheben. Erstens, die Verwendung der Draufsicht-Kamera ist von Bedeutung, um die Form des Tropfens zu beobachten. Einige Bilder in Anhang F zeigen Verzerrungen der Tropfenform. Wenn eine Aufnahme dieser Verzerrung aufwies – und das ist nur mit der Draufsicht-Kamera zu erkennen – wurde keine Messung durchgeführt. Die Radien an verschiedenen Stellen des Umfangs eines Tropfens können um mehr als 1 mm differieren. Zweitens, der Zeitpunkt des ersten Bildes der gesamten Aufnahmesequenz des Spreitens wurde als t_1 für die weiteren Berechnungen und Betrachtungen gesetzt. Diese Entscheidung kann folgende Auswirkungen haben: ein Teil der verbleibenden kinetischen Energie, erzeugt durch die Bewegung der Flüssigkeit bei der Abholung des Tropfens, wird übertragen. Die Festlegung von $t=1$ auf einen späteren Zeitpunkt des Spreitens würde diesen Effekt zwar nicht mehr berücksichtigen, jedoch würde die frühe Bewegung der schnell spreitenden Tinten nicht mehr erfasst. Drittens, zwecks Vermeidung von Kontamination und Verunreinigung wurden Einwegspritzen verwendet. Die Dosierung mit Spritzen erfordert jedoch ein hohes Flüssigkeitsvolumen in Vergleich zu einem Inkjet-Drucker. Dieses Volumen erhöht die Verdunstungszeit, was für dynamische Messungen vorteilhaft ist. Es erhöht aufgrund von Quellung aber auch die Verzerrungen im Substrat das Tropfenvolumen ändert sich innerhalb der ersten 4 Sekunden nur wenig bzw. nur scheinbar ansteigt aufgrund von Quellungen. Das hier verwendete große Tropfenvolumen ist für die beabsichtigte Analyse des Spreitens vorteilhaft. Allerdings ist mit dieser Methode eine gleichzeitige Analyse von Spreiten und Absorption nicht durchführbar.









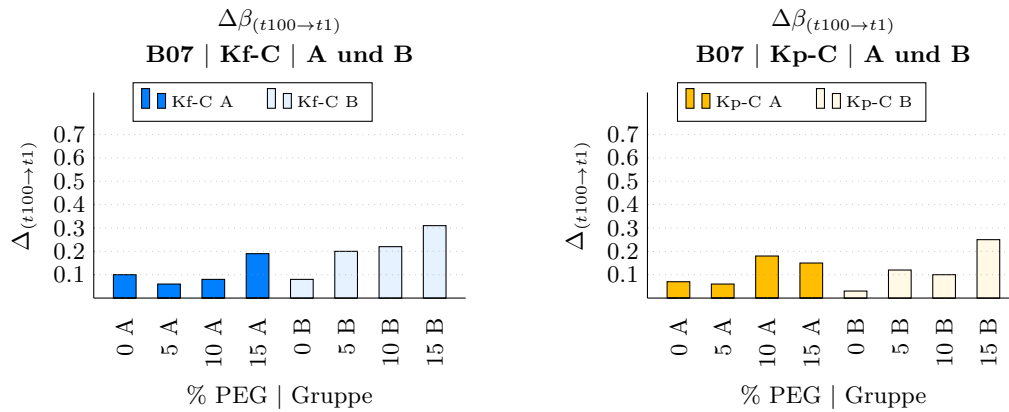


Abb. 6.62: $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ B01 bis B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | Gruppe A und B | PEG 0%, 5%, 10% und 15% | Daten in der Tab. B.25 vgl. S. 186 und Tab. B.26 vgl. S. 186

Gesamtbewertung

Aufgrund der großen Datenmenge ist es visuell nur schwerlich möglich, anhand der Diagramme einen größeren oder geringeren Einfluss von Viskosität, Oberflächenspannung, Rauheit, Permeabilität und Grenzflächenenergie auf das Spreiten zu erkennen. Entsprechende Korrelationskoeffizienten, hier nach Pearson Bravis ermittelt (vgl. Anhang E, S. 192) sind ein Hilfsmittel, eventuelle Zusammenhänge und Nicht-Zusammenhänge numerisch aufzuzeigen. Die Legende der Korrelationskoeffizienten ist in der Tab. 6.11 dargestellt.

Tab. 6.11: Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson (vgl. Tab. E.1, S. 193)

	stark bis perfekt			mittelstark			schwach			keine
negative Korrelation	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
positive Korrelation	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Es wurde erwartet, dass die Erhöhung der Viskosität und der Oberflächenspannung der Tinte aufgrund der Zugabe von PEG das Spreiten reduziert. Die Korrelationsberechnungen belegen diese Aussage mit einer stark negativen Korrelation zwischen Spreiten und Viskosität sowie Spreiten und Oberflächenspannung der Tinten. In der Tab. 6.12 und 6.14 sind die Ergebnisse zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und η in der Tab. 6.13 und 6.15 die Ergebnisse zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und σ_L aufgelistet. Die Korrelation des β mit dem σ_L und dem η ist zumeist bei $t1$ stärker als bei $t100$, insbesondere in Gruppe B. Dies kann auf eine Veränderung der Tinte-Substrat-Wechselwirkung während des Spreitens hinweisen. Im Vergleich unterscheiden sich die Korrelationswerte zwischen Gruppe A und Gruppe B in den Berechnungen bei $t1$ nicht signifikant.

Tab. 6.12: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und η | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und η							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,93	-0,96	-0,79	-0,96	-0,97	-0,99	-0,91
	Kp-T		-0,86	-0,96	-0,97	-0,96	-0,98	-0,39	-0,70
	Kf-C		-0,94	-0,95	-0,93	-0,97	-0,98	-0,98	-0,99
	Kp-C		-0,95	-0,94	-0,98	-0,93	-0,96	-0,97	-0,95
Gruppe B	Kf-T		-0,83	-0,89	-0,91	-0,92	-0,99	-0,85	-0,94
	Kp-T		-0,80	-0,64	-0,97	-0,82	-0,47	0,05	-0,77
	Kf-C		-0,53	-0,99	-0,96	-0,83	-0,97	-0,82	-0,97
	Kp-C		-0,99	-0,92	-0,96	-0,86	-0,81	-0,99	-0,89

Tab. 6.13: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und σ | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und σ							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,62	-0,71	-0,38	-0,86	-0,87	-0,81	-0,94
	Kp-T		-0,88	-0,95	-0,98	-0,97	-0,99	-0,37	-0,72
	Kf-C		-0,96	-0,96	-0,94	-0,97	-0,98	-0,98	-0,99
	Kp-C		-0,95	-0,93	-0,98	-0,93	-0,96	-0,97	-0,94
Gruppe B	Kf-T		-0,92	-0,92	-0,55	-0,95	-0,81	-0,95	-0,91
	Kp-T		-0,78	-0,68	-0,97	-0,86	-0,50	0,10	-0,78
	Kf-C		-0,54	-0,98	-0,96	-0,82	-0,97	-0,82	-0,98
	Kp-C		-1,00	-0,92	-0,96	-0,86	-0,81	-0,99	-0,88

Tab. 6.14: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und η | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und η							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,94	-0,99	-0,79	0,01	-0,99	-1,00	-0,97
	Kp-T		-0,90	-0,92	-0,57	-0,80	-0,91	-0,87	-0,18
	Kf-C		-0,83	-0,22	-0,61	-0,84	-0,75	0,26	-0,37
	Kp-C		-0,96	-0,85	-0,58	-0,72	-0,79	-0,44	-0,69
Gruppe B	Kf-T		-0,87	-0,98	-0,74	-0,57	-0,88	-0,93	-0,94
	Kp-T		0,52	0,36	0,49	-0,92	0,24	0,55	0,62
	Kf-C		0,09	-0,65	-0,88	-0,60	-0,99	0,04	-0,35
	Kp-C		-0,51	0,11	0,42	-0,56	-0,18	0,11	0,29

Tab. 6.15: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und σ | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und β_{t100}^B und σ							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,67	-0,70	-0,44	-0,30	-0,83	-0,72	-0,88
	Kp-T		-0,92	-0,89	-0,52	-0,84	-0,89	-0,88	-0,18
	Kf-C		-0,85	-0,21	-0,64	-0,83	-0,73	0,27	-0,35
	Kp-C		-0,96	-0,85	-0,58	-0,71	-0,79	-0,43	-0,68
Gruppe B	Kf-T		-0,81	-0,86	-0,31	-0,92	-0,38	-0,90	-0,83
	Kp-T		0,57	0,30	0,54	-0,94	0,29	0,59	0,67
	Kf-C		0,08	-0,63	-0,87	-0,61	-0,98	0,04	-0,36
	Kp-C		-0,52	0,10	0,41	-0,55	-0,19	0,10	0,29

Zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und σ_L und η ist die Korrelation stark bis mittelstark positiv bei Kp-T, Kf-C und Kp-T (Tab. 6.16 und 6.17). Das abweichende Ergebnis von Kf-T in Bezug auf die anderen Tinten wird hier numerisch demonstriert. Nach den bereits

vorgestellten Analysen und den Korrelationsberechnungen wird hier die Schlussfolgerung gezogen, dass die Zunahme des relativen Spreitens eine Folge der geringeren Absorption der Tinten aufgrund der Erhöhung der Viskosität durch PEG Zugabe ist. Bei Substraten der Gruppe B wird dieser Effekt durch die Verringerung der Kartonpermeabilität noch verstärkt. Diese Verringerung der Permeabilität unterstützt bei Tinten auf Pigmentbasis zudem den sogenannten Filterkuchen-Effekt ((vgl. S. 21)). Entsprechend sollte Kf-C das gleiche Verhalten wie Kf-T zeigen. Dies wird sowohl in den Analysen über das Spreiten als auch in den Korrelationsberechnungen nicht bestätigt. Kf-C hat eine um ca. 11 mN/m höhere Oberflächenspannung als Kf-T. Im Gegensatz zur Tinte Kf-T enthält die Tintenbasis von Kf-C Glykol und Glycerin. Die genauen chemisch-physikalischen Wechselwirkungen dieser Stoffen einerseits mit dem der Tinte zugesetzten PEG und andererseits mit dem PVOH der Oberflächen bei Kartongruppe B ist im Kontext dieser Arbeiten nicht zu klären.

Das Verhalten der Tinte bei maximalem und minimalem Spreiten wird stark von der Viskosität und der Oberflächenspannung der Tinten beeinflusst. Allerdings scheint das relative Spreiten, das im Verhältnis zur Tropfengröße bei t_1 steht, hier durch die Reduzierung der Absorption wegen Erhöhung der Viskosität und Verringerung der Permeabilität/ Porosität beeinflusst zu werden.

Tab. 6.16: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ und η | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ und η							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,95	-0,99	-0,75	0,47	-1,00	-0,96	-0,99
	Kp-T		0,79	0,12	0,87	0,94	0,57	-0,03	0,91
	Kf-C		0,74	0,71	0,83	0,93	0,65	0,80	0,66
	Kp-C		0,87	0,97	0,91	0,80	0,83	0,92	0,86
Gruppe B	Kf-T		0,75	0,55	-0,21	0,44	0,55	0,75	0,84
	Kp-T		0,84	0,95	0,86	0,83	0,62	0,56	0,88
	Kf-C		0,92	0,40	0,67	0,96	0,92	0,98	0,94
	Kp-C		0,93	0,99	1,00	0,85	0,92	1,00	0,99

Tab. 6.17: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ und σ | Gruppe A und B

		Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ und σ							
		Tinte	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	Kf-T		-0,72	-0,67	-0,41	0,10	-0,69	-0,56	-0,76
	Kp-T		0,65	0,44	0,86	0,62	0,93	0,49	0,92
	Kf-C		0,28	0,51	0,62	0,66	0,47	0,51	0,41
	Kp-C		0,33	0,55	0,49	0,59	0,60	0,56	0,49
Gruppe B	Kf-T		0,98	0,84	0,23	-0,14	0,87	0,97	0,97
	Kp-T		0,85	0,90	0,88	0,54	0,84	0,95	0,82
	Kf-C		0,92	0,22	0,37	0,56	0,89	0,86	0,92
	Kp-C		0,88	0,76	0,80	0,72	0,70	0,72	0,81

Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Grenzflächenenergie (σ_S^{total} , σ_S^p und σ_S^d), gesamt sowie polarer bzw. disperser Anteil, und dem minimalen ($\beta_{t_1}^A$ und $\beta_{t_1}^B$) und maximalen ($\beta_{t_{100}}^A$ und $\beta_{t_{100}}^B$) Spreiten der Tinten (Tab.: 6.18 bzw. 6.19 und 6.20 bzw. 6.21) zeigen bei der Gruppe A eine starke bis mittelstarke Korrelation zwischen σ_S^{total}

und dem β_{t1}^A und β_{t100}^A aller Tinten und eine mittelstarke Korrelation zwischen σ_S^p mit β_{t1}^A und β_{t100}^A bei der Tinte Kf-T.

Die Werte des Kartons B04 fließen in die Berechnung dieser Korrelationen nicht ein. Während die übrigen Kartons einen ähnlichen Aufbau besitzen, weicht B04 durch die Kalandrierung Oberfläche davon entscheidend ab. Dieser Unterschied äußerte sich bereits bei allen Experimenten in dem uneinheitlichen Verhalten von B04. Insofern ist es geboten, den Karton bei der Mittelwertbildung der übrigen Kartons auszuschließen.⁹² Die analogen Berechnungen inklusive B04 zeigen z.B. in ca. 90% der Ergebnisse zwischen σ_S^{total} und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ eine starke Korrelation und in ca. 70% der Ergebnisse zwischen σ_S^d und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ eine mittelstarke Korrelation.

Tab. 6.18: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A und σ_S | Gruppe A

	Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A und σ_S										
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	
Gruppe A	Kf-T	0%	0%	0,76	0,53	0,21	Kf-C	0%	0,91	0,32	0,50
		5%		0,67	0,52	0,16		5%	0,90	0,30	0,52
		10%		0,54	0,51	0,06		10%	0,88	0,39	0,43
		15%		0,72	0,51	0,20		15%	0,81	0,44	0,33
	Kp-T	0%		0,93	0,22	0,60	Kp-C	0%	0,94	0,32	0,53
		5%		0,68	0,39	0,27		5%	0,93	0,02	0,75
		10%		0,70	-0,16	0,71		10%	0,83	0,28	0,47
		15%		0,78	0,14	0,54		15%	0,86	-0,04	0,74

Tab. 6.19: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^B und σ_S | Gruppe B

	Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^B und σ_S										
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	
Gruppe B	Kf-T	0%		0,28	-0,21	0,39	Kf-C	0%	-0,55	-0,54	-0,30
		5%		-0,53	-0,35	-0,36		5%	0,85	-0,05	0,90
		10%		-0,14	-0,53	0,10		10%	0,88	0,02	0,90
		15%		0,02	-0,59	0,31		15%	0,65	-0,45	0,89
	Kp-T	0%		-0,36	-0,79	0,01	Kp-C	0%	0,95	-0,01	0,97
		5%		0,68	-0,25	0,82		5%	0,94	-0,07	0,99
		10%		0,74	-0,17	0,84		10%	0,52	0,35	0,36
		15%		0,48	-0,51	0,74		15%	0,31	-0,52	0,58

Das minimale und maximale Spreiten in Gruppe B zeigt, anders als in Gruppe A, keinen klaren Trend. Die starke Korrelation zwischen σ_S^{total} und β_{t1}^B und β_{t100}^B gilt nur für Kf-C- und Kp-C-Tinten, jedoch mit einigen Einschränkungen. Es gibt in einigen Fällen eine starke Korrelation mit σ_S^d und keine mit σ_S^p .

⁹²Bei den Korrelationsberechnungen von $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ mit Rauheit und mit Permeabilität nach PPS ebenfalls

Tab. 6.20: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A und σ_S | Gruppe A

	Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A und σ_S									
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d
Gruppe A	Kf-T	0%	0,52	0,60	-0,03	Kf-C	0%	0,83	0,28	0,47
		5%	0,66	0,62	0,07		5%	0,84	0,29	0,48
		10%	0,50	0,36	0,13		10%	0,87	0,30	0,49
		15%	0,73	0,60	0,15		15%	0,87	0,46	0,37
	Kp-T	0%	0,91	0,28	0,54	Kp-C	0%	0,91	0,35	0,48
		5%	0,67	0,39	0,25		5%	0,85	0,12	0,61
		10%	0,80	0,50	0,28		10%	0,86	0,31	0,48
		15%	0,67	0,14	0,45		15%	0,79	-0,09	0,72

Tab. 6.21: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^B und σ_S | Gruppe B

	Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^B und σ_S									
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d
Gruppe B	Kf-T	0%	-0,07	-0,57	0,21	Kf-C	0%	-0,11	-0,70	0,24
		5%	-0,50	-0,65	-0,19		5%	0,92	0,14	0,88
		10%	-0,22	-0,56	0,03		10%	0,94	0,22	0,86
		15%	0,05	-0,61	0,34		15%	0,80	-0,26	0,95
	Kp-T	0%	-0,61	-0,76	-0,26	Kp-C	0%	0,92	-0,07	0,98
		5%	0,80	-0,12	0,88		5%	0,92	0,18	0,85
		10%	0,82	0,35	0,67		10%	0,49	0,33	0,34
		15%	0,34	-0,63	0,65		15%	0,54	-0,39	0,74

Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Grenzflächenenergie (σ_S^{total} , σ_S^p und σ_S^d) und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^A$ bzw. $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}^B$ der Tinten (Tab. 6.22 und 6.23) sind gestreut. Nach den durchgeführten Spreiten-Analysen, die zeigen, dass das Spreiten die Tintentropfen auf den Kartons der Gruppe B stets stärker spreiten als auf den Kartons der Gruppe A – und das ist auf die erhöhte Grenzflächenenergie zurückzuführen –, kann die Variabilität der Ergebnisse durch die nichtlinearen Variationen zwischen dem $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ je nach PEG-Anteilen erklärt werden. Von 448 β_{t1} - und β_{t1} -Werten gibt es 73 absolute Werte, die nicht der Tendenz folgen, je höher der PEG-Anteil ist, desto niedriger ist das Spreiten. Diese Werte sind ungleichmäßig verteilt und beeinflussen die Korrelationsberechnung.

Tab. 6.22: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und σ_S | Gruppe A

	Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und σ_S									
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d
Gruppe A	Kf-T	0%	0,36	-0,14	0,57	Kf-C	0%	0,50	0,28	0,17
		5%	0,63	-0,04	0,73		5%	0,40	0,20	0,16
		10%	0,42	0,20	0,19		10%	0,61	0,46	0,05
		15%	0,72	0,03	0,73		15%	0,71	0,33	0,33
	Kp-T	0%	0,77	0,38	0,34	Kp-C	0%	0,32	0,08	0,24
		5%	0,53	0,17	0,35		5%	0,37	0,12	0,25
		10%	0,14	-0,38	0,64		10%	0,57	0,28	0,25
		15%	0,30	0,16	0,11		15%	0,05	0,19	-0,19

Tab. 6.23: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und σ_S | Gruppe B

	Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und σ_S									
	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d	Tinten	PEG	σ_S^{Total}	σ_S^p	σ_S^d
Gruppe B	Kf-T	0%	-0,38	-0,08	-0,62	Kf-C	0%	0,21	0,48	-0,54
		5%	-0,30	0,08	-0,80		5%	0,80	0,54	0,57
		10%	-0,27	-0,03	-0,54		10%	0,89	0,62	0,59
		15%	0,12	0,42	-0,61		15%	0,63	0,25	0,82
	Kp-T	0%	-0,67	-0,62	-0,17	Kp-C	0%	-0,93	-0,83	-0,25
		5%	0,05	-0,16	0,43		5%	0,34	0,09	0,53
		10%	-0,39	-0,58	0,39		10%	0,35	0,25	0,20
		15%	0,01	0,39	-0,79		15%	0,92	0,88	0,13

Die Korrelationsberechnungen zwischen den Rauheitsparametern und β_{t1}^A , β_{t1}^B , β_{t100}^A und β_{t100}^B sind jeweils in der Tab. 6.24, 6.25, 6.26 und 6.27 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einen ähnlichen Trend zwischen dem maximalen und minimalen Spreiten in Gruppe A. Es besteht eine negative, mittelstarke Korrelation mit den Parametern Sv (Täler) und Sk (Rauheit ohne hohe Spitzen und tiefe Täler) und eine positive, mittelstarke Korrelation mit Sp (Spitzen). Bei Gruppe B hängen die Korrelationen eher mit dem Tintentyp zusammen, mit einer Tendenz zur negativen, mittelstarken Korrelation mit den Parametern Sa, Sq, Sp, Sk, Spk und Svk. Es wurde ein Verlust von Spitzen und Tälern nach der Auftragung des Primers festgestellt, was bedeutet, dass die Oberfläche glatter wurde und somit die Differenz der Werte zwischen den Rauheitsparametern abnahm. Dies kann die Berechnungen beeinflussen. Interessanter ist hier die Differenzierung zwischen C- und T-Tinten, die wahrscheinlich unterschiedlich auf die Grundierung einwirken und von ihr beeinflusst werden.

Tab. 6.24: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A und Rauheit | Gruppe A

	Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A und Rauheit									
	Tinten	PEG	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe A	Kf-T	0%	0,12	0,13	0,12	0,16	-0,04	0,68	-0,56	0,47
		5%	0,09	0,06	0,10	-0,24	0,71	-0,56	0,50	0,50
		10%	0,48	0,34	0,49	0,20	-0,13	-0,98	-0,42	-0,42
		15%	0,03	-0,03	0,04	-0,31	0,74	-0,43	0,56	0,56
	Kp-T	0%	-0,15	0,41	-0,17	-0,61	0,69	-0,64	0,43	0,43
		5%	0,00	0,21	-0,01	-0,39	0,81	-0,38	0,67	0,67
		10%	-0,51	0,36	-0,49	-0,68	0,51	-0,60	0,22	0,22
		15%	-0,31	0,10	-0,32	-0,66	0,78	-0,09	0,67	0,67
	Kf-C	0%	0,06	0,51	0,03	-0,46	0,52	-0,77	0,26	0,26
		5%	-0,07	0,42	-0,08	-0,51	0,64	-0,71	0,37	0,37
		10%	-0,02	0,28	-0,03	-0,46	0,69	-0,62	0,45	0,45
		15%	0,05	0,25	0,06	-0,33	0,58	-0,74	0,31	0,31
	Kp-C	0%	-0,07	0,35	-0,08	-0,51	0,60	-0,71	0,32	0,32
		5%	-0,32	0,51	-0,34	-0,76	0,70	-0,59	0,42	0,42
		10%	-0,13	0,30	-0,13	-0,52	0,75	-0,59	0,51	0,51
		15%	-0,43	0,39	-0,45	-0,81	0,83	-0,34	0,62	0,62

Tab. 6.25: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^B und Rauheit | Gruppe B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^B und Rauheit									
		Tinten	PEG	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe B	Kf-T	0%	0%	0,13	0,59	0,11	0,62	-0,16	0,17	-0,21	0,12
		5%	0,56	0,04	0,56	-0,09	0,49	0,58	0,52	0,48	
		10%	0,37	0,57	0,36	0,50	0,18	0,39	0,17	0,32	
		15%	0,22	0,33	0,20	0,33	-0,02	0,25	0,06	0,09	
	Kp-T	0%	0,47	0,57	0,45	0,48	0,28	0,50	0,27	0,40	
		5%	-0,49	0,13	-0,51	0,31	-0,69	-0,45	-0,62	-0,56	
		10%	-0,88	-0,06	-0,88	0,17	-0,86	-0,88	-0,80	-0,89	
		15%	-0,27	0,47	-0,29	0,59	-0,51	-0,23	-0,49	-0,32	
	Kf-C	0%	0,10	-0,24	0,11	-0,31	0,28	0,07	0,36	0,02	
		5%	-0,77	-0,21	-0,78	0,03	-0,86	-0,75	-0,73	-0,85	
		10%	-0,72	-0,15	-0,74	0,09	-0,85	-0,70	-0,75	-0,79	
		15%	-0,70	0,04	-0,71	0,26	-0,79	-0,68	-0,70	-0,77	
	Kp-C	0%	-0,83	0,18	-0,84	0,43	-0,95	-0,81	-0,95	-0,81	
		5%	-0,84	0,08	-0,86	0,34	-0,96	-0,82	-0,92	-0,85	
		10%	-0,57	0,28	-0,57	0,41	-0,54	-0,57	-0,69	-0,38	
		15%	-0,54	-0,29	-0,54	-0,14	-0,52	-0,54	-0,35	-0,68	

Wie in Abschnitt 6.4 gezeigt, ist der Unterschied zwischen Gruppe A und B für die Mehrheit der Rauheitsparameter kleiner als die Varianz der Ergebnisse und ausschließlich Spk, Svk und Sk sind relevant für die Annahme, dass der Primer bzw. die Auftragung des Primers einen gewissen Einfluss auf die Rauheit hat. Die positive Korrelation mit dem Parameter Sp und die negative mit den Parametern Sv bzw. Sk zeigt an, dass das Spreiten der Tinten umso größer ist, je höher die Spitzen und je niedriger die Täler bzw. die Rauheit ohne die höchsten Täler und höchsten Spitzen sind. Dieses Ergebnis ist partiell nicht nachvollziehbar und kann auf eine der möglichen Verzerrungen der Bravais-Pearson-Korrelation hinweisen. Eine logische Korrelation zwischen Reduzierung der Täler nach dem Auftrag des Primers – auch bei der REM-Aufnahme (Abb.: 6.53) bestätigt – und eine Erhöhung des Spreitens ist plausibel, wurde hier jedoch nicht mathematisch abgebildet.

Tab. 6.26: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A und Rauheit | Gruppe A

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A und Rauheit									
		Tinten	Tinten	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe A	Kf-T	0%	0%	0,11	-0,31	0,12	-0,26	0,14	0,73	-0,13	0,67
		5%	0,18	-0,03	0,20	-0,14	0,64	-0,56	0,44	0,44	
		10%	0,50	0,54	0,49	0,20	-0,43	-0,91	-0,68	-0,68	
		15%	0,15	0,00	0,16	-0,22	0,64	-0,53	0,45	0,45	
	Kp-T	0%	-0,04	0,44	-0,07	-0,54	0,69	-0,63	0,45	0,45	
		5%	0,05	0,25	0,03	-0,36	0,77	-0,34	0,65	0,65	
		10%	0,09	0,14	0,08	-0,36	0,71	-0,42	0,55	0,55	
		15%	-0,27	0,03	-0,29	-0,60	0,74	0,23	0,75	0,75	
	Kf-C	0%	0,09	0,50	0,04	-0,44	0,48	-0,64	0,29	0,29	
		5%	-0,03	0,41	-0,06	-0,52	0,76	-0,51	0,56	0,56	
		10%	-0,06	0,33	-0,09	-0,54	0,77	-0,48	0,58	0,58	
		15%	0,06	0,25	0,06	-0,37	0,59	-0,69	0,34	0,34	
	Kp-C	0%	0,03	0,37	0,00	-0,48	0,61	-0,62	0,39	0,39	
		5%	-0,12	0,50	-0,16	-0,62	0,81	-0,52	0,59	0,59	
		10%	-0,07	0,32	-0,09	-0,53	0,79	-0,48	0,59	0,59	
		15%	-0,44	0,33	-0,47	-0,81	0,83	-0,02	0,71	0,71	

Tab. 6.27: Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^B und Rauheit | Gruppe B

		Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^B und Rauheit									
		Tinten	PEG	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe B	Kf-T	0%	0%	0,28	0,32	0,26	0,30	0,06	0,32	0,12	0,17
		5%	0,58	0,46	0,57	0,33	0,42	0,61	0,41	0,52	
		10%	0,40	0,65	0,39	0,56	0,23	0,42	0,20	0,38	
		15%	0,18	0,36	0,17	0,37	-0,05	0,22	0,02	0,06	
	Kp-T	0%	0,63	0,72	0,62	0,56	0,50	0,65	0,42	0,63	
		5%	-0,66	0,17	-0,67	0,39	-0,82	-0,62	-0,80	-0,66	
		10%	-0,54	-0,33	-0,56	-0,14	-0,67	-0,53	-0,56	-0,62	
		15%	-0,19	0,45	-0,21	0,55	-0,41	-0,14	-0,38	-0,26	
	Kf-C	0%	-0,11	0,16	-0,12	0,19	-0,14	-0,09	-0,10	-0,17	
		5%	-0,75	-0,17	-0,76	0,07	-0,86	-0,73	-0,76	-0,80	
		10%	-0,77	-0,22	-0,78	0,02	-0,87	-0,75	-0,78	-0,82	
		15%	-0,77	0,01	-0,78	0,25	-0,88	-0,74	-0,80	-0,82	
	Kp-C	0%	-0,79	0,23	-0,80	0,48	-0,93	-0,76	-0,93	-0,76	
		5%	-0,64	0,21	-0,65	0,42	-0,82	-0,60	-0,83	-0,60	
		10%	-0,49	0,39	-0,49	0,50	-0,48	-0,48	-0,66	-0,29	
		15%	-0,67	-0,28	-0,67	-0,08	-0,69	-0,66	-0,53	-0,80	

Die einzige starke Korrelation zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und den Rauheitsparametern (Tab. 6.28 und 6.29) innerhalb einer Serie⁹³ ist bei Kp-T und Kp-C (Gruppe B PEG 0%).

Die gleichen nichtlinearen Variationen des $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ nach den PEG-Anteilen, die in den Korrelationsberechnungen zwischen Grenzflächenenergie und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ beobachtet wurden, sind auch hier vorhanden. Wenn eine Tinte (unabhängig vom PEG-Anteil) oder ein Substrat die gleichen Korrelationstendenzen aufweist, könnte dies als plausible Korrelation interpretiert werden. Hohe Korrelationswerte allein in einer Serie deuten nicht auf eine Abhängigkeit der x- und y-Merkmale hin.

Tab. 6.28: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und Rauheit | Gruppe A

		Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und Rauheit									
		Tinten	PEG	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe A	Kf-T	0%	0%	0,09	-0,51	0,11	-0,46	-0,08	0,05	0,10	0,26
		5%	0,30	-0,18	0,32	-0,16	-0,01	0,25	0,18	0,53	
		10%	0,45	0,64	0,43	0,56	0,17	0,50	0,02	0,40	
		15%	0,39	0,04	0,40	0,04	-0,01	0,36	0,09	0,62	
	Kp-T	0%	0,13	0,42	0,09	0,44	-0,38	0,24	-0,59	0,29	
		5%	0,30	-0,18	0,32	-0,16	-0,01	0,25	0,18	0,53	
		10%	0,45	0,64	0,43	0,56	0,17	0,50	0,02	0,40	
		15%	0,39	0,04	0,40	0,04	-0,01	0,36	0,09	0,62	
	Kf-C	0%	0,14	0,35	0,08	0,36	-0,28	0,29	-0,61	0,12	
		5%	0,05	0,22	0,00	0,25	-0,32	0,18	-0,67	0,11	
		10%	-0,14	0,31	-0,19	0,36	-0,55	-0,01	-0,68	-0,09	
		15%	0,39	0,04	0,40	0,04	-0,01	0,36	0,09	0,62	
	Kp-C	0%	0,25	0,19	0,20	0,19	-0,11	0,39	-0,51	0,20	
		5%	0,26	0,30	0,20	0,29	-0,13	0,41	-0,58	0,25	
		10%	0,09	0,20	0,04	0,23	-0,33	0,21	-0,53	0,09	
		15%	-0,20	-0,11	-0,24	-0,06	-0,29	-0,11	-0,32	-0,41	

⁹³Serie bedeutet hier eine Gruppe von Koeffizienten, die sich auf einen Karton (B01 ... B07)), auf eine Tinte (z.B. Kf-T 0% PEG) oder auf einen Rauheitsparameter (z.B. Sa, Sp) beziehen.

Tab. 6.29: Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und Rauheit | Gruppe B

		Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und Rauheit									
		Tinten	PEG	Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk
Gruppe B	Kf-T	0%	0,28	-0,16	0,27	-0,22	0,24	0,28	0,39	0,10	
		5%	0,41	0,81	0,39	0,73	0,21	0,44	0,14	0,40	
		10%	0,41	0,69	0,40	0,60	0,27	0,42	0,21	0,41	
		15%	0,11	0,38	0,09	0,40	-0,13	0,14	-0,06	-0,01	
	Kp-T	0%	0,53	0,52	0,54	0,34	0,60	0,52	0,42	0,67	
		5%	-0,22	0,10	-0,21	0,11	-0,08	-0,24	-0,24	-0,03	
		10%	0,68	-0,12	0,68	-0,28	0,60	0,69	0,59	0,66	
		15%	0,00	0,32	-0,01	0,35	-0,16	0,03	-0,09	-0,10	
	Kf-C	0%	-0,20	0,34	-0,21	0,43	-0,35	-0,16	-0,35	-0,23	
		5%	-0,46	-0,02	-0,46	0,14	-0,58	-0,44	-0,59	-0,41	
		10%	-0,72	-0,35	-0,72	-0,14	-0,74	-0,72	-0,69	-0,71	
		15%	-0,28	-0,12	-0,28	-0,02	-0,36	-0,27	-0,40	-0,20	
	Kp-C	0%	0,94	0,11	0,94	-0,14	0,93	0,94	0,92	0,89	
		5%	0,12	0,32	0,10	0,32	-0,07	0,15	-0,18	0,21	
		10%	-0,22	0,65	-0,22	0,71	-0,29	-0,20	-0,50	-0,02	
		15%	-0,71	-0,12	-0,72	0,12	-0,85	-0,69	-0,77	-0,76	

Die Korrelationsberechnungen zwischen der Permeabilität nach dem PPS Messverfahren und β_{t1}^A , β_{t1}^B , β_{t100}^A , β_{t100}^B und $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ sind in der Tab. 6.30, 6.31 und 6.32 dargestellt. Die errechneten Werte indizieren fast ausschließlich nur schwache Korrelationen. Jedoch lässt sich feststellen, dass bei den nicht geprimerten Kartons (Gruppe A) die Korrelation zwischen Permeabilität und Spreiten umso geringer wird, je zähflüssiger die Tinte durch die Zugabe von PEG ist. Dieser Trend ist bei den geprimerten Kartons (Gruppe B) nicht zu beobachten. Insofern spricht wenig für eine Annahme, dass zwischen dem Spreiten der Tintentropfen und der Permeabilität des Substrats ein Zusammenhang bestehen könnte, zumal sich die Werte der Permeabilität der beiden Gruppen A und B nur wenig unterscheiden, vgl. Abb. 6.46. Es ist möglich, dass die Permeabilität während der Benetzung so stark beeinflusst wird, dass eine Korrelation zwischen dem gemessenen statischen PPS-Wert und dem Spreiten kein plausibles Ergebnis liefert.

Tab. 6.30: Korrelationskoeffizient zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und PPS | Gruppe A und B

Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t1}^A bzw. β_{t1}^B und PPS						
Gruppe A	Kf-T	0%	0,20	Gruppe B	0%	0,76
		5%	0,05		5%	-0,16
		10%	0,27		10%	0,37
		15%	0,06		15%	0,20
	Kp-T	0%	0,45	0%	0,13	
		5%	0,27	5%	0,24	
		10%	-0,03	10%	-0,15	
		15%	0,25	15%	0,38	
	Kf-C	0%	0,64	Gruppe B	0%	-0,89
		5%	0,39		5%	0,00
		10%	0,35		10%	0,15
		15%	0,19		15%	-0,13
Kp-C	0%	0,37	0%	0,36		
	5%	0,48	5%	0,24		
	10%	0,24	10%	0,40		
	15%	0,36	15%	-0,61		

Tab. 6.31: Korrelationskoeffizient zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und PPS | Gruppe A und B

Korrelationskoeffizienten zwischen β_{t100}^A bzw. β_{t100}^B und PPS						
Gruppe A	Kf-T	0%	-0,07	Kf-T	0%	0,17
		5%	0,03		5%	0,07
		10%	0,50		10%	0,37
		15%	0,11		15%	0,22
	Kp-T	0%	0,58	Kp-T	0%	0,16
		5%	0,36		5%	0,32
		10%	0,36		10%	0,25
		15%	0,30		15%	0,25
	Kf-C	0%	0,77	Kf-C	0%	-0,39
		5%	0,56		5%	0,21
		10%	0,50		10%	0,20
		15%	0,29		15%	0,03
	Kp-C	0%	0,58	Kp-C	0%	0,39
		5%	0,70		5%	0,61
		10%	0,45		10%	0,51
		15%	0,42		15%	-0,43

Tab. 6.32: Korrelationskoeffizient zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und PPS | Gruppe A und B

Korrelationskoeffizienten zwischen $\Delta\beta_{(t100 \rightarrow t1)}$ und PPS						
Gruppe A	Kf-T	0%	-0,21	Kf-T	0%	-0,54
		5%	-0,01		5%	0,33
		10%	0,63		10%	0,37
		15%	0,20		15%	0,23
	Kp-T	0%	0,71	Kp-T	0%	0,11
		5%	-0,01		5%	0,12
		10%	0,63		10%	0,29
		15%	0,20		15%	-0,09
	Kf-C	0%	0,81	Kf-C	0%	0,07
		5%	0,62		5%	0,64
		10%	0,65		10%	0,25
		15%	0,20		15%	0,66
	Kp-C	0%	0,72	Kp-C	0%	-0,14
		5%	0,77		5%	0,92
		10%	0,68		10%	0,75
		15%	0,32		15%	0,27

Anhand der rein mathematisch ermittelten Korrelationswerte lässt sich annehmen, dass bei diesen Substraten das absolute minimale und maximale Spreiten der Tinten entscheidend von der Viskosität und der Oberflächenspannung abhängt. Das relative Spreiten scheint jedoch eher durch die verringerte Absorption der Tinten beeinflusst zu werden, die durch die erhöhte Viskosität und die verringerte Permeabilität gegeben ist. Mit Ausnahme von dem superkalandrierten Karton B04 gibt es bei den sechs übrigen Kartons, die in ihrem Aufbau und in ihren Eigenschaften weitgehend ähnlich sind, allenfalls marginale Unterschiede im Spreiten der Tinten. Die gilt bei einem Tropfenvolumen von 3 μl . Zwar sind die untersuchte Tropfen schon relativ klein, ob die Ergebnisse jedoch tatsächlich auch für Tintentropfen aus den Düsen von Inkjet Druckern mit einem Volumen im Pikoliter-Bereich gelten, wird angenommen, kann aber mangels geeigneter Messtechnik nicht ohne Weiteres nachgewiesen werden.

Bei ähnlichen Analysen zwischen *Swellable*- und *Microporous*-Substraten oder zwischen saugfähigen und nicht saugfähigen Papieren kann das Spreiten mit der Permeabilität und der Rauheit durchaus stärker korrelieren. Durch eine detaillierte Analyse der Tintenbestandteile wurde z.B. gezeigt, dass die Druckergebnisse bei farbstoffbasierten Tinten mit den physikochemischen Parametern der Tinte zusammenhängen, bei pigmentbasierten Tinten jedoch eher mit den physikochemischen Eigenschaften des Papiers [94, S.124].

Zusätzlich zur obigen Erklärung bezüglich der Erhöhung der Viskosität und Reduzierung der Permeabilität, kann das Beschleunigungsphänomen durch den dynamischen Charakter der Wechselwirkung zwischen Tinte und Substrat interpretiert werden. Dies kann nicht allein durch die statischen Werte von Viskosität und Oberflächenspannung vorhergesagt werden. Insbesondere diese Experimente zeigen, wie die Wechselwirkung zwischen den Tensiden in Tinte und Substratoberfläche sowie zwischen PVOH und PEG sich auf das Spreiten der Tinte auswirken. Dies dokumentiert, wie die Oberflächen und Flüssigkeiten während der Benetzung und des Spreitens gegenseitig beeinflussen und verändern.

Kapitel 7

7. Resümee und Ausblick

Ausgangspunkt für diese Arbeit war die Beobachtung, dass wasserbasierte Inkjet-Tinten auf einer beschichteten Kartonoberfläche vielfach eine geringe Haftung, eine ineffiziente Trocknung und Festigkeit gegen Abrieb aufweisen. Die Ursachen dafür werden in der Morphologie der Substrate sowie in den physikalischen und chemischen Eigenschaften von Substraten und Tinten vermutet.

Um dies zu verstehen, wurde ein Lösungsansatz gesucht. Der Weg dahin führte über die Erforschung der Eigenschaften des Drucksystems, der Kartons und der Tinten, die einen Einfluss auf dieses unerwünschte Verhalten haben könnten, sowie über die Identifizierung der Prozesse, die während und nach der Übertragung der Tinte auf das Substrat ablaufen, wie Benetzung, Spreiten, Absorption und Trocknung. Methoden zur Auswertung und Validierung des Lösungsansatzes wurden ebenfalls ermittelt und getestet. Die natur- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, auf denen die Ansätze, Methoden und Vorgehensweisen in dieser Arbeit aufbauen, sind in **Kapitel 3** beschrieben und diskutiert. Bisher bekannte Studien, die die beschriebenen Probleme identifizierten, Lösungen vorschlugen, Verfahren zur Auswertung der Druckqualität in Inkjet-Druckverfahren oder die Wechselwirkung zwischen Inkjet-Tinten und papierartigen Substraten erforschen, werden in **Kapitel 4** vorgestellt und diskutiert. Die Materialien, Methoden und Planungen der Experimente wurden in **Kapitel 5** umfassend beschrieben.

Dem Lösungsansatz zugrunde liegt die Intention, mittels eines Primers die Tinten besser an die Oberflächen der Substrate zu binden und gleichzeitig die Poren der Oberflächen zu verstopfen. Letzteres um, insbesondere bei farbstoffbasierten Tinten, dem Eindringen von Tinten samt Farbstoff in tiefere Schichten des Kartons entgegenzuwirken, so dass das Farbmittel möglichst an der Oberfläche und damit sichtbar bleiben. Die weitere Intention des Lösungsansatzes zielt darauf, das Trocknen/ Aushärten der Tinten zu beschleunigen. Hierfür wurde energiereiche IR-Strahlung gewählt, die einerseits das Verdampfen von Wasser und schnell-flüchtigen Lösungsmitteln und möglicherweise auch die Adhäsions- und Kohäsionsprozesse der Tinten fördert.

Der Lösungsansatz für die oben beschriebenen Probleme war der kombinierte Einsatz eines Primers auf Basis von PVOH und mittelwelliger Infrarotstrahlung. PVOH wird bereits in *Swellable*-Papieren und in der Kartonbeschichtung eingesetzt, jedoch nicht als Primer. Die isolierte Verwendung von PVOH zeigte eine Verbesserung der Haftung der Tinten, löste aber nicht das Problem des Schmierens nach der Trocknung, insbesondere von pigmentbasierten Tinten. Das Problem konnte mit der Anwendung von IR-Strahlung gelöst werden, die eine Erhöhung der Mobilität der PVOH-Polymerkette auslöst, was die Diffusion des Farbmittels in den Primer und die Verdunstung des Trägerfluids begünstigt.

Beim Abkühlen verkapselt der polymere PVOH die Pigmente und Farbstoffe, wodurch das Schmieren und das Ablegen vermieden wird.

Das Verfahren wurde in einem Gedankenmodell – eine Produktionslinie analog zu industriellen Inkjet-Druckanlagen – validiert. Durch Anwendung des Lösungsansatzes konnte hinsichtlich des Ablegens in 15 von 15 Modellfällen und hinsichtlich des Schmierens in 21 von 25 Modellfällen Abhilfe geschaffen werden. Zudem wurde die Druckqualität anhand ausgewählter Kriterien betrachtet. Die qualitative Auswertung zielte nicht nur darauf ab, mögliche Defekte zu beurteilen, die durch die Verwendung von PVOH und IR-Strahlung auf den Drucken erzeugt wurden, sondern auch das Spreiten der Tinten auf verschiedenen Substraten, und damit die Größe der mit Farbträgern benetzten Fläche, zu analysieren. PVOH und IR-Bestrahlung wirken sich vorteilhaft auf die optische Dichte, die Linien-Dunkelheit und Linienbreite aus.

Ein Verlust an Homogenität (Wolkigkeit) trat bei der pigmentbasierten T-Tinte (multi-solvente Tinte für industrielle Anwendungen) auf. Bemerkenswert ist, dass die Messergebnisse den visuell festgestellten Homogenitätsverlust nicht bestätigen können. Die verwendeten Messmethoden zur Bestimmung der Auflösung mittels Siemensstern und der Linienwiedergabe (ISO/IEC 24790:2017) reichten zum Teil hier für belastbare quantitative Ergebnisse nicht aus. Die Validierungen zeigten numerische Abweichungen vom erwarteten Ergebnis. Die Auswertung der Auflösung, Wolkigkeit, Linien-Kantenglätte und Linien-Kantengeradheit sind daher nicht absolut interpretiert worden. Mit diesen Ergebnissen wurde das erste Ziel dieser Arbeit erreicht. Die detaillierte Darstellung findet sich in **Kapitel 6**, Abschnitte 6.1, 6.2 und 6.3. Die hier dargelegten Arbeiten und Ergebnisse können ex post als ein umfassender erster Schritt zur Bewertung des Inkjet Drucks auf beschichteten Kartons mit wasserbasierten Inkjet-Tinten betrachtet werden. Nicht alle Kriterien konnten anhand objektiverer und belastbarer Messwerte beurteilt werden, in einigen Fällen wurde dies durch vergleichende Betrachtung kompensiert. Entsprechend müssen in den nächsten Schritten zunächst verfeinerte Messverfahren gefunden bzw. entwickelt werden.

Zur Analyse der Tinten-Substrat-Wechselwirkung wurden zunächst Charakterisierungen beider Partner durchgeführt: Permeabilität, Rauheit und Grenzflächenenergie der Substrate (Abschnitt 6.4) sowie Viskosität und Oberflächenspannung der Tinten (Abschnitt 6.5). Außerdem wurde ein Verfahren zur Beobachtung und Auswertung des Tintenspreitens mittels eines videobasierten Kontaktwinkel-Messsystems entwickelt. Untersuchungen der Permeabilität der Substrate (nach den Standardverfahren Bekk, Bendtsen und PPS) zeigen, dass eine Primerbeschichtung mit PVOH die Permeabilität von Luft nur geringfügig verringert. Entsprechend sind die Ergebnisse nur bedingt auf die Permeabilität von niedrigviskosen Flüssigkeiten zu übertragen. Der Einfluss des Primers auf die Rauheit der Substratoberflächen wird nur bei den Tal- und Spitzenbereichen deutlich. Es ist naheliegend, dass der Primer die Täler der Substratoberflächen gefüllt und bei der Primerauftragung (Drahtrakel) die höchsten Spitzen abgeschliffen

hat. REM-Aufnahmen zeigen, dass offene Bereiche der Substratoberfläche (Täler) durch den Primer befüllt und nivelliert wurden. Darüber hinaus wurde eine Erhöhung der Grenzflächenenergie der Substrate nach der Auftragung des Primers ermittelt. Anhand der dimensionslosen Kennzahlen der Ähnlichkeitstheorie Re , Oh wurde nachgewiesen, dass die verwendeten Tinten sich in dem Prozessfenster für ähnliche Fluide für den DOD-Inkjetdruck befinden. Den Kennzahlen zugrunde liegen Messungen von Viskosität und Oberflächenspannung der Tinten sowie Daten für die Geometrien und Strömungsgeschwindigkeiten in dem verwendeten Drucker.

Bei den Experimenten zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten (Abschnitt 6.6) wurde durch Beimischung von PEG die Viskosität der Tinten stufenweise erhöht. Dies führte auch zur Erhöhung der Oberflächenspannung der Tinten. Alle Tinten spreiten ausgeprägter auf den geprimerten Kartons, mit Ausnahme der farbstoffbasierten multisolvent Tinte Kf-T bei PEG Anteilen von 0% und 5%. Dieses unerwartete Verhalten der Tinte kann auf die Wechselwirkung zwischen den Tensiden der verschiedenen Phasen (Pigmentstrich, Primer und Tinte) beruhen, die die Oberflächenspannung der Tinte dynamisch verändern können. Das besondere Verhalten von Kf-T bestätigt sich auch in der Tonwertzunahme (TWZ) und in den mit der Draufsicht-Kamera aufgenommenen Bildern der Tropfenform.

Es wurden Phänomene wie die Beschleunigung des initialen Spreitens auf dem geprimerten Substrat beobachtet, die möglicherweise mit dem Verlust der Permeabilität bei der Auftragung des Primers und/oder mit der Wechselwirkung zwischen PEG und PVOH zusammenhängen könnte. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass a) die SOHO-Tinten weniger als die industriellen Inkjet-Tinten spreiten, b) die Tinten auf Pigmentbasis weniger als die Tinten auf Farbstoffbasis spreiten, c) die Erhöhung des PEG-Anteils in den Tinten einen kleineren Einfluss auf das Spreiten der Tinten auf den Kartons ohne Primer im Vergleich zu denen mit Primer hat und d), obwohl eine Erhöhung des PEG Anteils sich in einer höheren Oberflächenspannung und entsprechend in einem geringeren Durchmesser des initialen Tropfens auf dem Substrat äußert, dennoch in den meisten Fällen weiteres Spreiten beobachtet werden konnte.

Es wurde zuletzt eine Korrelationsanalyse zwischen dem absoluten bzw. relativen Spreiten und den Kenngrößen der Tinten (Viskosität, Oberflächenspannung) und der Substrate (Grenzflächenenergie, Rauheit und Permeabilität nach PPS) durchgeführt. Die Korrelationsberechnungen nach Bravais-Pearson zeigten, dass sowohl die Oberflächenspannung als auch die Viskosität der Tinte eine stark negative Korrelation zum absoluten Tintenspreiten und eine stark positive Korrelation zum relativen Tintenspreiten aufweist. Die Ergebnisse des absoluten Spreitens konnten erwartet werden, doch der Mehrwert der Analyse liegt darin, festzustellen, wie stark diese Werte korrelieren. Die plausible Interpretation für die positive Doppelkorrelation von η und σ mit dem relativen Spreiten (außer bei Kf-T) ist, dass mit zunehmender Viskosität die Absorption abnimmt und das Spreiten zunimmt. Im Fall von Substraten, wie die beschichteten

Kartons mit hydrophobem Charakter, scheint trotz der starken Korrelation die Erhöhung der Oberflächenspannung der Tinte eine untergeordnete Rolle beim Spreiten zu spielen. Statistisch gesehen wurden keine erwähnenswerten Korrelationen zwischen der Grenzflächenenergie, der Permeabilität nach PPS und der Rauheit mit dem relativen Spreiten der Tinten festgestellt. Mit diesen Ergebnissen wurde das zweite Ziel dieser Arbeit erreicht und vervollständigt.

Angesichts der herstellerseits lediglich rudimentär veröffentlichten Stoffdaten über die genaue Zusammensetzung der C-Tinte und der Pigmentstriche der Kartons können einige Ergebnisse zwar unter Annahmen erklärt werden, allerdings nicht erschöpfend. Die Entscheidung für die Verwendung von marktgängigen Materialien impliziert einerseits Lücken bei der Interpretation der Ergebnisse, die auf den chemischen Zusammensetzungen der Materialien basieren, andererseits gewinnen die Ergebnisse so einen anwendungsnahen Bezug.

Das Bedrucken von beschichteten Kartons mit Inkjet ist bisher nur wenig erforscht. Ebenso wenig existieren vielerorts diesbezüglich qualifizierte Messverfahren. Im Fokus dieser Untersuchungen stand weniger die Entwicklung von geeigneten Messverfahren sondern vielmehr das operative Ziel eines Lösungsansatzes für eine verbesserte Bedruckbarkeit. Vielfach wurden Messmethoden für andere Arten des Analog- und Digitaldrucks adaptiert und die Messergebnisse hinsichtlich der Eignung dieser Verfahren relativiert. Weiterführende Untersuchungen mit zum Teil heute nicht zur Verfügung stehender hochspezialisierter Messtechnik können zu einem tieferen Verständnis der Tinten-Substrat-Wechselwirkung führen. Dies betrifft insbesondere die Messtechnik für die Porosität von mehrschichtigen Substraten wie beschichtete Kartons sowie Präparation und visuelle Untersuchungen an Tintentröpfchen im Pikoliter-Bereich. Die Entwicklung von neuen Methoden für diese Art von Material kann von großem wissenschaftlichem Interesse sein, um die hier vorliegenden qualitativen Ergebnisse auch quantitativ zu manifestieren und fortzuschreiben.

Anhang A

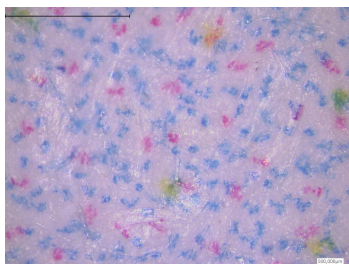
A. Einstellung Drucker Canon

Wie im Abschnitt 5.1.2 erläutert, wurde der Drucker Canon Pixma IX6850 nach technischen Kriterien ausgewählt, jedoch waren Anpassungen im Profil der Dateien bei den Experimenten mit dem CMYK-Testchart erforderlich.

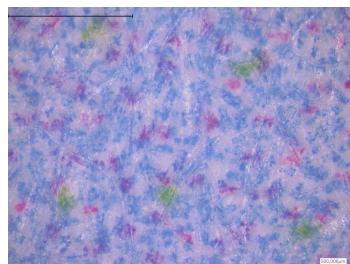
Die erzeugten Bilder im üblichen CMYK-Profil werden durch das Farbmanagementsystem des Druckers beeinflusst und die gedruckten Farben an das vom Hersteller vorgegebene *Profil* angepasst. Da dieser Drucker für den SOHO-Bereich entwickelt wurde, spielt farbliche Wiedergabetreue eine untergeordnete Rolle für die Qualität des Druckers. Bei gedruckten Feldern mit unterschiedlichen Gradienten von C, Y und M im CMYK-Profil generiert das Farbmanagement des Druckers auch Punkte anderer Farben. Die Abbildungen zu diesem Effekt befinden sich im ersten Bildblock unter „Ausgabeprofil CMYK,,.

Nach verschiedenen Tests mit anderen Ausgabeprofilen – mit keinem dieser Profile lassen sich Sekundärfarben, die hier als „Verschmutzungen“ zu sehen sind, vollständig unterdrücken – wurde ein RGB-Profil getestet. Das Resultat ist im zweiten Bildblock „Ausgabeprofil RGB,, zu sehen. Die bedruckten Felder nur mit z.B. Cyan 20, 50 und 100% weisen keine Punkte von M oder Y auf. Das galt auch für die anderen Farben (M und Y). Daher wurde das RGB-Profil für die Drucktests mit CMYK-Feldern verwendet. Bei den Tests mit schwarzen Patches, sowohl Kf (Farbstoff) als auch Kp (Pigment), reine Farben zu verdrucken, wurden anstelle von C, M und Y leere Tintenpatronen eingesetzt. So wurde reine Schwarztinte verdruckt und farbliche Kontaminationen durch das Farbmanagementsystem ausgeschaltet.

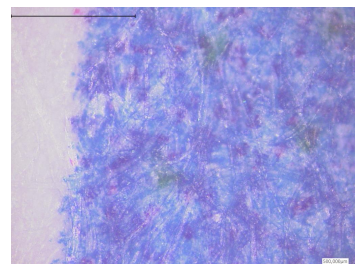
Ausgabeprofil CMYK



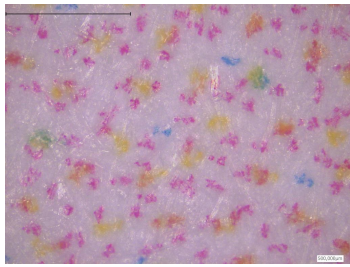
Cyan 20%



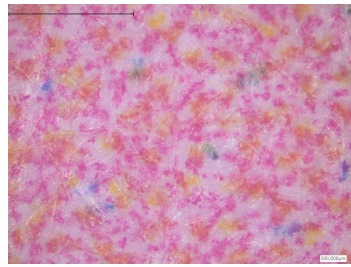
Cyan 50%



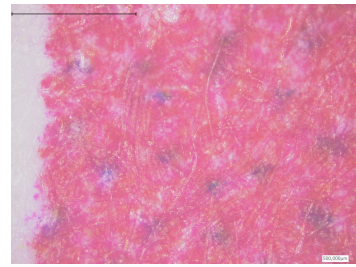
Cyan 100%



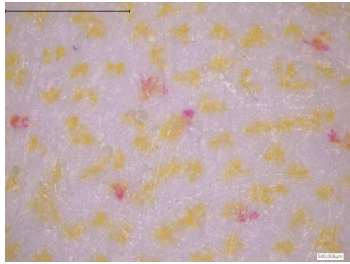
Magenta 20%



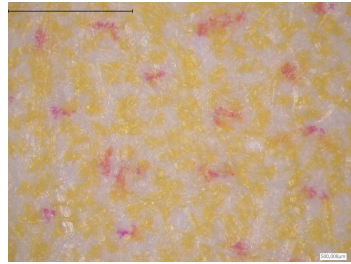
Magenta 50%



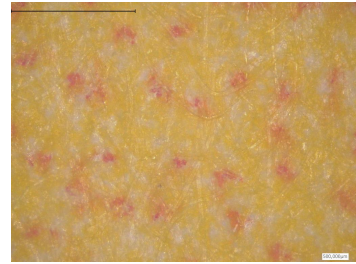
Magenta 100%



Gelb 20%

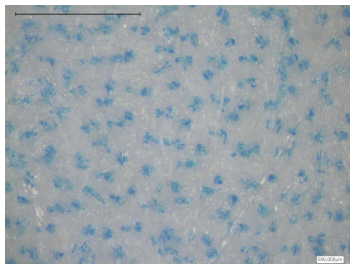


Gelb 50%

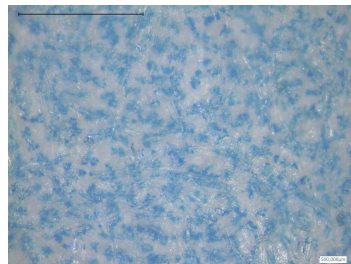


Gelb 100%

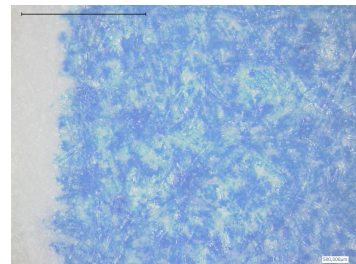
Ausgabeprofil RGB



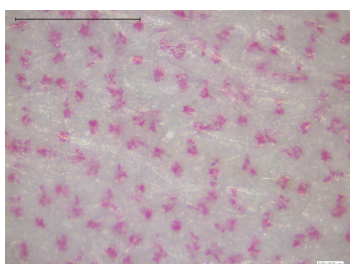
Cyan 20%



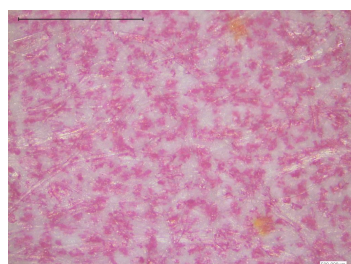
Cyan 50%



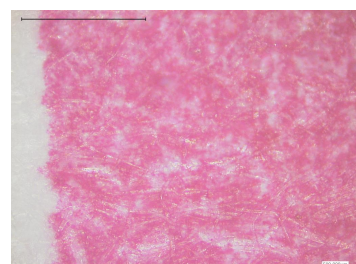
Cyan 100%



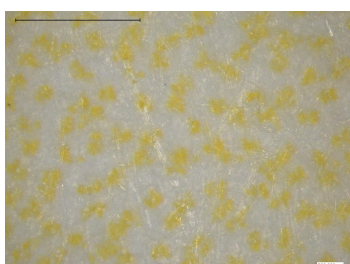
Magenta 20%



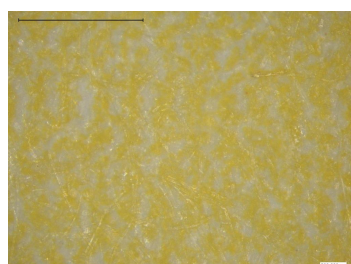
Magenta 50%



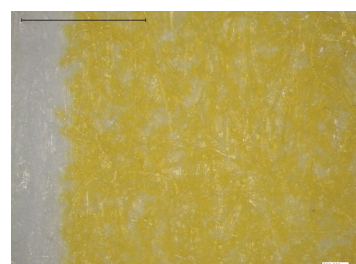
Magenta 100%



Gelb 20%



Gelb 50%



Gelb 100%

Anhang B

B. Ergänzende Tabellen - Diagramme Kapitel 6

Legende

- $\bar{m}_{(x)}$ Mittelwert_(Messpunkte)
 s Standardabweichung ($\sqrt{Var(x)}$)
 1,2,3 Bogen Nr. / Probe Nr.

Experimente zum Validieren der Problemlösung

Tab. B.1: $CIE\{b\}^*M1$ und $CIE\{b\}^*M2$ | B01 - B07 | Gruppe A und B

		Gruppe A				Gruppe B			
		$CIE\{b\}^*M1$		$CIE\{b\}^*M2$		$CIE\{b\}^*M1$		$CIE\{b\}^*M2$	
		$\bar{m}_{(100)}$	s	$\bar{m}_{(100)}$	s	$\bar{m}_{(100)}$	s	$\bar{m}_{(100)}$	s
B01	1	-8,723	0,064	-0,854	0,063	-9,973	-0,826	-0,826	0,066
	2	-8,724	0,062	-0,844	0,003	-10,011	-0,835	-0,835	0,068
	3	-8,735	0,059	-0,850	0,059	-9,949	-0,829	-0,829	0,065
B02	1	-2,548	0,167	2,716	0,148	-2,574	0,180	2,770	0,143
	2	-2,589	0,167	2,679	0,004	-2,524	0,180	2,835	0,144
	3	-2,567	0,178	2,690	0,148	-2,384	0,180	2,901	0,153
B03	1	-3,898	0,143	2,583	0,059	-4,759	0,139	2,668	0,070
	2	-3,932	0,142	2,570	0,006	-4,769	0,139	2,685	0,061
	3	-3,914	0,153	2,563	0,067	-4,697	0,139	2,708	0,058
B04	1	-1,571	0,032	1,744	0,026	-2,049	0,053	1,672	0,046
	2	-1,759	0,031	1,589	0,002	-1,934	0,052	1,732	0,048
	3	-1,699	0,032	1,654	0,032	-1,993	0,046	1,715	0,042
B05	1	-8,240	0,069	0,968	0,081	-9,126	0,075	1,157	0,084
	2	-8,110	0,067	1,129	0,003	-9,092	0,061	1,224	0,079
	3	-8,080	0,068	1,156	0,070	-9,295	0,082	1,161	0,076
B06	1	-6,122	0,127	2,601	0,116	-7,076	0,134	2,821	0,125
	2	-6,072	0,132	2,628	0,004	-6,992	0,130	2,819	0,124
	3	-6,098	0,121	2,624	0,106	-7,095	0,106	2,833	0,110
B07	1	-4,942	0,163	2,434	0,171	-5,941	0,201	2,599	0,232
	2	-4,995	0,181	2,447	0,005	-5,930	0,194	2,615	0,203
	3	-4,987	0,159	2,467	0,161	-5,958	0,179	2,595	0,168

Messungen zur qualitativen Auswertung der Problemlösung

Tab. B.2: Optische Dichte | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | Gruppe A und D

		Gruppe A				Gruppe D			
		Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C	Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C
B01	$\bar{m}_{(40)}$	1,30	2,38	1,15	1,90	1,61	2,04	1,67	2,05
	s	0,03	0,08	0,02	0,02	0,05	0,12	0,13	0,05
B02	$\bar{m}_{(40)}$	1,15	2,35	1,07	1,83	1,35	2,19	1,21	2,08
	s	0,01	0,06	0,02	0,04	0,04	0,12	0,10	0,04
B03	$\bar{m}_{(40)}$	0,81	1,79	1,08	1,81	0,93	1,84	1,65	1,99
	s	0,02	0,14	0,02	0,01	0,03	0,11	0,07	0,04
B04	$\bar{m}_{(40)}$	1,48	2,20	0,44	0,34	1,51	2,03	0,71	1,26
	s	0,03	0,08	0,01	0,02	0,03	0,11	0,02	0,36
B05	$\bar{m}_{(40)}$	1,41	2,34	1,08	1,87	1,37	2,05	1,37	2,04
	s	0,02	0,07	0,01	0,01	0,08	0,19	0,04	0,04
B06	$\bar{m}_{(40)}$	1,47	2,37	1,08	1,87	1,74	1,76	1,65	2,08
	s	0,03	0,05	0,06	0,02	0,04	0,08	0,31	0,04
B07	$\bar{m}_{(40)}$	1,45	2,37	1,06	1,81	1,42	2,03	1,34	1,96
	s	0,02	0,05	0,02	0,01	0,08	0,12	0,08	0,03

Tab. B.3: Auflösung | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | Gruppe A und D

		Gruppe A				Gruppe D			
		Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C	Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C
B01	$\bar{m}_{(24)}$	333	584	377	584	491	558	592	474
	s	39	30	14	28	52	50	22	28
B02	$\bar{m}_{(24)}$	290	575	574	585	485	563	602	530
	s	17	29	30	26	42	28	19	34
B03	$\bar{m}_{(24)}$	585	649	473	581	542	684	589	505
	s	170	144	40	32	33	211	22	52
B04	$\bar{m}_{(24)}$	348	591	nan	nan	503	540	599	630
	s	21	38	nan	nan	74	65	19	117
B05	$\bar{m}_{(24)}$	355	573	508	589	528	557	605	485
	s	25	30	25	32	62	39	17	64
B06	$\bar{m}_{(24)}$	460	574	593	585	486	535	573	450
	s	57	30	17	27	65	37	28	37
B07	$\bar{m}_{(24)}$	357	583	510	588	533	629	598	504
	s	33	40	44	29	44	180	27	55

Tab. B.4: Remission (OECF ISO 24790 Linienwiedergabe und Wolkigkeit)

	Gruppe		Rmax	Rmin (550 nm)			
			Substrat	Kf-T	Kp-T	Kf-C	Kp-C
B01	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,8613	0,0649	0,0566	0,0939	0,0113
		s	0,0013	0,0090	0,0131	0,0053	0,0007
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8480	0,0361	0,1007	0,0256	0,0141
		s	0,0019	0,0021	0,0190	0,0052	0,0016
B02	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,8672	0,1226	0,0726	0,0927	0,0121
		s	0,0021	0,0066	0,0139	0,0021	0,0007
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8576	0,0385	0,0807	0,0247	0,0138
		s	0,0022	0,0030	0,0114	0,0029	0,0006
B03	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,8959	0,0529	0,0953	0,0781	0,0119
		s	0,0016	0,0024	0,0117	0,0029	0,0005
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8851	0,0381	0,0988	0,0209	0,0175
		s	0,0024	0,0041	0,0095	0,0019	0,0016
B04	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,8864	0,1504	0,1958	0,1500	-
		s	0,0007	0,0029	0,0192	0,0028	-
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8853	0,1321	0,1222	0,1146	0,0317
		s	0,0008	0,0038	0,0143	0,0032	0,0071
B05	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,9047	0,0568	0,0699	0,0752	0,0107
		s	0,0013	0,0023	0,0127	0,0032	0,0006
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8953	0,0440	0,0965	0,0184	0,0317
		s	0,0014	0,0032	0,0114	0,0046	0,0071
B06	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,9078	0,0426	0,0654	0,0502	0,0113
		s	0,0012	0,0024	0,0111	0,0024	0,0008
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8912	0,0391	0,1547	0,0142	0,0225
		s	0,0015	0,0040	0,0375	0,0017	0,0017
B07	A	$\bar{m}_{(25)}$	0,8737	0,0723	0,1023	0,0954	0,0123
		s	0,0012	0,0056	0,0121	0,0042	0,0004
	B	$\bar{m}_{(25)}$	0,8662	0,0434	0,1060	0,0208	0,0226
		s	0,0019	0,0019	0,0138	0,0027	0,0030

Tab. B.5: Tonwertzunahme [%] | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | Gruppe A

Soll [%]	Kf-T		Kp-T		Kf-C		Kp-C		
	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	
B01	10	2,73	0,39	1,88	0,39	-1,76	0,43	-0,79	0,85
	20	7,84	0,41	5,10	0,57	1,41	0,48	1,14	1,34
	30	14,15	0,66	10,13	0,75	7,34	0,55	5,09	1,87
	40	21,64	0,82	17,57	0,44	15,15	0,55	12,19	2,14
	50	25,50	0,97	23,62	0,70	19,71	0,78	18,48	2,00
	60	23,87	0,94	27,28	0,46	20,18	0,73	23,74	1,70
	70	19,12	1,35	24,68	1,32	17,08	0,57	23,32	0,95
	80	14,29	0,91	18,48	0,49	13,92	0,34	18,11	0,42
	90	7,99	0,87	9,72	0,10	7,56	0,28	9,80	0,14
B02	10	0,54	0,61	-0,45	0,36	-1,88	0,46	-1,23	0,75
	20	6,90	0,71	1,38	0,39	0,82	0,27	0,16	1,40
	30	15,73	0,56	5,28	0,37	6,24	0,31	3,21	1,81
	40	24,98	0,55	12,69	0,51	13,88	0,30	10,19	2,14
	50	29,65	0,62	19,74	0,55	18,64	0,28	16,36	1,91
	60	27,92	0,98	24,68	0,55	18,78	0,33	21,88	1,87
	70	21,71	0,67	22,88	1,45	15,51	0,33	22,33	1,08
	80	15,98	0,29	17,68	0,48	12,59	0,23	17,68	0,38
	90	8,60	0,20	9,44	0,16	6,80	0,31	9,59	0,19
B03	10	0,29	0,49	0,36	0,45	-1,30	0,35	-1,11	0,95
	20	6,86	0,72	2,66	0,59	1,46	0,52	0,69	1,56
	30	15,04	0,88	6,70	0,67	7,26	0,53	4,04	2,05
	40	23,59	0,79	13,30	1,54	15,24	0,57	10,93	2,26
	50	27,45	0,73	20,06	1,28	20,21	0,62	17,04	2,09
	60	25,74	0,71	25,40	0,83	20,22	0,72	22,19	1,86
	70	20,11	0,82	23,57	1,59	16,51	0,68	22,26	1,14
	80	14,57	0,82	17,95	0,59	13,03	0,45	17,56	0,53
	90	7,94	0,62	9,54	0,16	6,91	0,24	9,44	0,31
B04	10	-2,76	0,31	-1,33	0,42	-0,26	0,55	2,09	1,90
	20	-1,63	0,60	-1,95	0,95	2,95	0,69	8,02	3,24
	30	4,70	0,52	-1,53	0,67	9,14	0,72	15,66	3,99
	40	12,54	0,76	1,66	0,93	20,10	1,23	25,41	3,89
	50	15,73	0,82	2,68	0,80	27,81	1,76	31,18	3,52
	60	14,99	1,09	-0,82	0,80	28,88	1,66	25,80	4,73
	70	10,95	1,27	-3,10	2,74	26,99	2,30	20,15	4,32
	80	7,81	1,05	-5,16	1,98	23,47	1,74	13,03	4,61
	90	4,14	1,17	-6,54	3,93	14,03	1,48	6,90	4,76
B05	10	0,08	0,31	0,56	0,20	-2,12	0,48	-0,91	1,04
	20	5,32	0,51	3,10	0,54	0,24	0,46	1,18	1,68
	30	12,43	0,50	7,26	0,70	6,06	0,34	5,09	1,96
	40	20,86	0,53	14,11	1,17	14,78	0,50	12,31	2,23
	50	24,51	0,59	19,76	1,42	20,23	0,42	17,84	1,85
	60	23,17	0,51	24,96	1,00	20,86	0,41	22,52	1,74
	70	18,23	0,46	23,13	1,51	17,40	0,45	22,34	1,04
	80	13,47	0,29	17,45	0,82	13,63	0,32	17,46	0,39
	90	7,33	0,32	9,35	0,21	7,21	0,13	9,48	0,15
B06	10	0,22	0,31	1,69	0,46	-0,89	0,65	-0,08	0,86
	20	3,41	0,69	4,38	0,68	0,76	0,79	1,71	1,33
	30	9,44	0,78	9,06	0,74	4,58	0,82	5,19	1,74
	40	17,35	1,01	16,54	1,00	11,49	0,79	11,99	2,01
	50	23,96	2,20	25,68	0,72	17,24	1,28	17,44	1,87
	60	23,20	2,49	28,79	0,59	17,57	1,20	22,54	1,53
	70	16,28	0,58	24,46	1,25	14,81	0,95	22,76	0,82
	80	11,98	0,58	18,09	0,57	12,33	0,79	18,09	0,32
	90	6,81	0,54	9,49	0,16	6,98	0,49	9,74	0,10
B07	10	-0,39	0,30	0,02	0,19	-2,66	0,72	-1,10	0,80
	20	3,61	0,60	1,56	0,41	-0,84	0,56	-0,03	1,32
	30	10,48	0,83	5,25	0,50	4,80	0,25	2,72	1,69
	40	20,20	1,18	11,71	0,54	13,64	0,41	8,91	2,26
	50	25,14	1,37	18,46	0,94	19,48	0,42	14,61	1,94
	60	24,21	1,13	23,76	0,51	20,13	0,43	20,41	1,54
	70	18,54	1,00	22,18	1,58	16,73	0,52	21,12	0,90
	80	13,71	0,64	16,96	0,85	13,28	0,36	17,19	0,35
	90	7,60	0,35	9,27	0,13	7,09	0,33	9,48	0,09

Tab. B.6: Tonwertzunahme [%] | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | Gruppe D

Soll [%]	Kf-T		Kp-T		Kf-C		Kp-C		
	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	$\bar{m}_{(s)}$	s	
B01	10	3,12	0,58	7,31	0,96	4,63	1,69	6,75	1,06
	20	8,52	0,60	16,59	1,56	12,26	2,91	14,34	2,11
	30	14,62	0,88	24,69	2,14	19,62	2,39	21,09	2,45
	40	21,24	1,20	31,04	2,11	25,93	2,01	27,50	2,42
	50	22,54	0,86	31,95	2,61	25,61	2,05	28,90	2,64
	60	21,06	1,52	32,41	2,00	23,72	1,80	32,07	1,71
	70	16,76	1,81	26,88	1,51	19,39	1,45	28,49	0,46
	80	12,20	1,54	19,13	0,19	14,51	1,00	19,70	0,10
	90	6,93	0,62	9,44	0,18	7,56	0,78	9,86	0,08
B02	10	1,04	1,29	2,99	1,57	1,38	1,38	3,69	1,66
	20	4,68	1,61	9,12	1,49	4,56	1,21	9,24	2,05
	30	9,16	1,42	15,81	1,62	10,02	1,23	15,69	2,12
	40	15,58	1,18	23,01	1,98	16,83	1,09	22,74	1,98
	50	18,38	0,90	26,32	2,19	19,66	0,94	25,87	2,03
	60	17,86	0,62	27,83	1,82	18,68	0,61	29,32	1,99
	70	14,03	0,57	24,19	1,80	14,81	0,73	27,14	0,88
	80	10,19	0,52	18,24	0,45	11,38	0,79	19,61	0,15
	90	5,81	0,43	9,40	0,18	5,77	0,79	9,90	0,10
B03	10	2,99	1,28	6,69	0,98	4,63	0,71	6,56	1,53
	20	8,04	2,49	14,53	1,31	11,33	1,41	14,38	2,30
	30	12,94	2,48	21,93	1,44	19,03	2,42	21,84	2,80
	40	19,64	1,23	27,82	1,38	26,02	2,46	27,89	2,25
	50	21,41	1,13	29,85	1,63	26,66	2,27	29,25	1,82
	60	20,20	0,97	30,53	1,47	24,89	1,91	31,54	1,35
	70	16,04	1,18	26,01	1,17	19,88	1,33	27,86	0,68
	80	11,96	0,99	18,79	0,53	14,66	0,79	19,64	0,11
	90	6,87	0,63	9,57	0,45	7,63	0,47	9,89	0,10
B04	10	-1,55	0,50	0,13	1,10	-1,46	0,81	-1,81	0,66
	20	-0,82	1,25	2,19	1,78	0,00	1,06	-2,05	1,20
	30	3,71	1,31	4,94	2,21	3,83	1,32	-1,39	1,32
	40	10,44	1,01	9,13	2,55	11,81	1,26	-0,91	1,43
	50	13,39	1,09	10,84	1,61	16,72	1,38	-2,89	1,23
	60	12,99	0,92	11,22	2,04	17,88	1,18	-4,09	1,25
	70	9,86	1,41	11,02	2,22	15,37	1,52	-4,85	2,13
	80	6,72	1,40	11,06	0,89	12,37	1,33	-4,79	2,65
	90	3,97	1,57	6,36	1,30	6,52	1,67	-4,36	3,09
B05	10	4,29	1,58	7,17	1,83	4,28	1,38	8,81	1,72
	20	9,42	1,44	14,70	2,57	9,79	1,25	17,97	3,28
	30	14,44	2,05	21,22	2,61	16,35	1,48	24,75	3,38
	40	20,19	1,55	26,85	2,54	22,73	1,46	30,14	2,02
	50	21,86	1,19	28,81	2,40	23,43	1,96	31,46	2,87
	60	20,18	1,08	29,02	2,15	21,71	1,48	32,56	2,10
	70	15,51	0,94	24,44	1,95	16,88	0,77	27,88	0,82
	80	11,16	0,61	17,98	0,64	12,42	0,77	19,51	0,13
	90	6,41	0,50	9,39	0,22	6,49	0,76	9,77	0,09
B06	10	6,42	0,64	12,73	0,86	5,32	1,43	11,58	0,87
	20	13,84	0,90	26,13	0,99	16,39	1,63	21,99	1,15
	30	20,87	1,47	34,70	1,41	26,68	1,97	29,03	1,15
	40	26,97	1,28	39,16	1,54	32,51	1,80	33,96	1,05
	50	27,96	1,34	37,84	2,07	31,77	1,76	33,21	1,52
	60	25,16	1,25	35,91	1,39	27,45	1,74	33,99	0,90
	70	19,87	1,03	28,87	0,53	22,27	1,91	28,59	0,22
	80	14,10	0,93	19,57	0,33	16,77	1,01	19,49	0,13
	90	7,73	0,68	9,83	0,24	8,15	1,22	9,73	0,11
B07	10	2,81	0,75	6,03	2,45	3,54	0,76	6,26	2,11
	20	6,70	1,38	14,34	3,34	9,33	0,69	13,97	2,97
	30	11,51	1,59	20,38	2,53	16,46	2,03	20,08	2,99
	40	17,62	2,01	26,56	2,38	22,28	2,27	26,00	2,81
	50	20,21	1,69	28,67	2,01	24,35	2,07	27,88	2,62
	60	18,64	1,64	29,47	1,96	22,08	1,84	30,63	1,77
	70	14,22	1,51	25,43	1,75	16,70	1,27	27,37	0,63
	80	9,91	1,51	18,40	1,07	12,16	1,21	19,44	0,13
	90	5,91	1,04	9,63	0,17	6,21	1,00	9,76	0,13

Tab. B.7: Linienbreite, Linien-Kantenglätte, Linien-Kantengeradheit und Linien- Dunkelheit
 Δ_{A-D} Kf-T und Kp-T | 5 Dots

		Kf-T 5 Dots Δ_{A-D}				Kp-T 5 Dots Δ_{A-D}			
		Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit	Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit
B01	$\bar{m}_{(50)}$	0,0034	nan	-0,0010	0,022	0,038	nan	0,012	nan
B02	$\bar{m}_{(50)}$	0,0044	nan	-0,0024	0,011	0,024	nan	0,014	nan
B03	$\bar{m}_{(50)}$	0,0003	nan	-0,0008	0,011	0,031	nan	0,007	nan
B04	$\bar{m}_{(50)}$	0,0068	nan	-0,0021	nan	nan	nan	nan	nan
B05	$\bar{m}_{(50)}$	0,0074	nan	-0,0009	0,022	0,040	nan	0,018	nan
B06	$\bar{m}_{(50)}$	0,0115	nan	-0,0008	0,027	0,011	nan	0,016	nan
B07	$\bar{m}_{(50)}$	0,0101	nan	-0,0003	0,028	0,034	nan	0,013	nan

Tab. B.8: Linienbreite, Linien-Kantenglätte, Linien-Kantengeradheit und Linien- Dunkelheit
 Δ_{A-D} Kf-C und Kp-C | 5 Dots

		Kf-C 5 Dots Δ_{A-D}				Kp-C 5 Dots Δ_{A-D}			
		Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit	Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit
B01	$\bar{m}_{(50)}$	0,021	-0,012	-0,0002	0,100	0,035	0,005	0,0033	0,037
B02	$\bar{m}_{(50)}$	0,017	-0,013	-0,0004	0,104	0,034	0,006	0,0043	0,042
B03	$\bar{m}_{(50)}$	0,016	-0,009	-0,0018	0,082	0,035	0,007	0,0052	0,035
B04	$\bar{m}_{(50)}$	0,025	nan	-0,0060	nan	nan	nan	nan	nan
B05	$\bar{m}_{(50)}$	0,017	-0,010	-0,0003	0,088	0,046	0,006	0,0042	0,058
B06	$\bar{m}_{(50)}$	0,018	-0,007	-0,0003	0,079	0,039	0,005	0,0025	0,046
B07	$\bar{m}_{(50)}$	0,015	-0,009	-0,0001	0,086	0,043	0,007	0,0053	0,050

Tab. B.9: Linienbreite, Linien-Kantenglätte, Linien-Kantengeradheit und Linien- Dunkelheit
 Δ_{A-D} Kf-T und Kp-T | 6 Dots

		Kf-C 6 Dots Δ_{A-D}				Kp-C 6 Dots Δ_{A-D}			
		Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit	Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit
B01	$\bar{m}_{(50)}$	0,001	-0,001	nan	0,021	0,048	0,009	nan	0,026
B02	$\bar{m}_{(50)}$	0,008	-0,003	nan	0,017	0,035	0,012	nan	0,025
B03	$\bar{m}_{(50)}$	0,002	-0,001	nan	0,009	0,033	0,004	nan	nan
B04	$\bar{m}_{(50)}$	0,011	-0,003	nan	nan	0,002	0,002	nan	nan
B05	$\bar{m}_{(50)}$	0,008	-0,001	nan	0,024	0,059	0,018	nan	0,033
B06	$\bar{m}_{(50)}$	0,010	0,000	nan	0,025	0,008	0,003	nan	0,012
B07	$\bar{m}_{(50)}$	0,007	-0,001	nan	0,024	0,048	0,013		

Tab. B.10: Linienbreite, Linien-Kantenglätte, Linien-Kantengeradheit und Linien- Dunkelheit
 Δ_{A-D} Kf-C und Kp-C | 6 Dots

		Kf-C 6 Dots Δ_{A-D}				Kp-C 6 Dots Δ_{A-D}			
		Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit	Linienbreite [mm]	Kantenglätte [mm]	Kantengeradheit [mm]	Dunkelheit
B01	$\bar{m}_{(50)}$	-0,006	-0,004	-0,012	0,065	0,017	0,004	0,005	0,000
B02	$\bar{m}_{(50)}$	-0,003	-0,010	-0,015	0,078	0,017	0,004	0,006	0,004
B03	$\bar{m}_{(50)}$	-0,014	-0,028	-0,011	0,044	0,021	0,006	0,008	0,006
B04	$\bar{m}_{(50)}$	0,024	-0,058	nan	nan	nan	nan	nan	nan
B05	$\bar{m}_{(50)}$	-0,005	-0,009	-0,010	0,051	0,027	0,005	0,008	0,019
B06	$\bar{m}_{(50)}$	-0,004	-0,004	-0,007	0,044	0,023	0,005	0,006	0,012
B07	$\bar{m}_{(50)}$	-0,005	-0,008	-0,010	0,052	0,032	0,005	0,006	0,026

Tab. B.11: Homogenität (Wolkigkeit) nach ISO/IEC 24790 | Kf-T | Gruppe A und D

			Kf-T						
			B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,95	0,65	0,36	0,52	0,81	0,77	0,86
		s	0,04	0,03	0,02	0,07	0,06	0,05	0,09
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	1,38	0,67	1,19	0,74	1,05	0,74	1,18
		s	0,07	0,11	0,09	0,06	0,04	0,06	0,06
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,63	0,38	0,47	0,95	0,60	0,72	0,48
		s	0,11	0,06	0,12	0,06	0,07	0,12	0,07
Gruppe D	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,95	0,88	0,86	2,34	0,64	0,89	1,49
		s	0,11	0,11	0,01	0,20	0,03	0,03	0,11
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	0,72	0,90	0,49	2,83	0,82	1,01	1,68
		s	0,02	0,08	0,05	0,08	0,07	0,02	0,02
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,46	0,46	0,91	0,82	0,56	0,58	0,76
		s	0,07	0,07	0,10	0,03	0,06	0,07	0,09

Tab. B.12: Homogenität (Wolkigkeit) nach ISO/IEC 24790 | Kp-T | Gruppe A und D

			Kp-T						
			B01	B02	B03	B01	B01	B01	B01
Gruppe A	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,85	0,86	0,90	0,59	0,60	0,49	0,85
		s	0,03	0,10	0,07	0,04	0,09	0,05	0,01
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	0,83	0,87	1,22	0,73	0,80	0,64	0,86
		s	0,06	0,05	0,08	0,02	0,02	0,02	0,02
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,66	0,52	0,97	0,94	0,64	0,69	0,65
		s	0,03	0,04	0,05	0,05	0,08	0,09	0,02
Gruppe D	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,81	0,90	0,95	2,15	0,75	0,71	0,71
		s	0,05	0,04	0,04	0,12	0,09	0,06	0,06
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	0,94	0,84	0,89	2,40	0,93	1,16	1,16
		s	0,09	0,02	0,02	0,10	0,10	0,14	0,12
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,76	0,73	0,56	0,92	0,73	0,69	0,73
		s	0,21	0,20	0,08	0,07	0,17	0,02	0,18

Tab. B.13: Homogenität (Wolkigkeit) nach ISO/IEC 24790 | Kf-C | Gruppe A und D

			Kf-C						
			B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,73	0,84	0,80	0,70	0,81	0,78	1,04
		s	0,10	0,06	0,09	0,08	0,12	0,13	0,15
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	0,70	0,88	0,95	0,79	1,27	1,23	1,27
		s	0,07	0,09	0,11	0,08	0,11	0,20	0,19
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,74	0,76	0,70	1,25	1,00	0,87	0,96
		s	0,03	0,07	0,10	0,10	0,10	0,11	0,16
Gruppe D	20%	$\bar{m}_{(3)}$	1,39	0,96	1,80	0,58	0,55	1,00	0,91
		s	0,14	0,08	0,06	0,03	0,02	0,09	0,06
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	1,70	1,44	2,13	0,74	0,69	1,49	0,90
		s	0,13	0,13	0,03	0,02	0,03	0,12	0,02
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	1,66	1,28	1,16	1,48	0,78	1,29	0,65
		s	0,07	0,05	0,06	0,16	0,03	0,03	0,01

Tab. B.14: Homogenität (Wolkigkeit) nach ISO/IEC 24790 | Kp-C | Gruppe A und D

			Kp-C						
			B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,93	1,05	1,03	1,58	2,25	1,08	1,41
		s	0,15	0,17	0,08	0,12	0,11	0,01	1,05
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	1,10	1,36	1,05	2,30	2,39	1,09	2,39
		s	0,04	0,28	0,04	0,05	0,33	0,11	0,10
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,61	0,95	0,69	2,28	1,37	0,49	1,28
		s	0,02	0,07	0,10	0,15	0,09	0,12	0,41
Gruppe D	20%	$\bar{m}_{(3)}$	0,45	0,47	0,54	0,32	0,40	0,43	0,64
		s	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03
	40%	$\bar{m}_{(3)}$	0,63	0,65	0,78	0,58	0,65	0,75	0,91
		s	0,06	0,06	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01
	70%	$\bar{m}_{(3)}$	0,61	0,72	0,63	1,45	0,69	0,67	0,63
		s	0,02	0,06	0,08	0,68	0,03	0,03	0,04

Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Substrate

Tab. B.15: Permeabilität nach Bekk [Bekk Sek] | B01 ... B07 | Gruppe A und B

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	$\bar{m}_{(10)}$	653	232	22	57	452	114	26
	s	131	7	0	1	34	5	1
Gruppe B	$\bar{m}_{(10)}$	619	447	22	62	462	129	27
	s	17	9	1	12	36	4	0

Tab. B.16: Permeabilität nach Bendtsen [ml/min] | B01 ... B07 | Gruppe A und B

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	$\bar{m}_{(6)}$	1,26	1,39	0,00	16,10	1,21	0,00	3,78
	s	0,03	0,01	0,00	0,95	0,03	0,00	0,07
Gruppe B	$\bar{m}_{(6)}$	0,73	1,00	0,00	13,03	1,21	0,00	0,94
	s	0,04	0,06	0,00	0,52	0,03	0,00	0,06

Tab. B.17: Permeabilität nach PPS [μm] | B01 ... B07 | Gruppe A und B

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Gruppe A	$\bar{m}_{(10)}$	1,70	1,33	1,02	0,94	1,36	1,20	1,30
	s	0,09	0,04	0,04	0,04	0,07	0,16	0,31
Gruppe B	$\bar{m}_{(10)}$	1,52	1,23	0,83	0,64	1,25	1,01	0,90
	s	0,13	0,04	0,01	0,05	0,07	0,07	0,13

Tab. B.18: Grenzflächenenergie und Kontaktwinkel | B01 ... B07 | Gruppe A und B
(Bemerkung: In Software SCA20 wird r^2 statt s als Abweichung kalkuliert.)

		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	
Gruppe A	Total	[mN/m]	42,67	39,60	35,33	27,97	32,99	38,84	35,65
	Disperse	[mN/m]	27,89	32,50	28,52	23,43	24,81	23,61	29,93
	Polar	[mN/m]	14,78	7,10	6,81	4,54	8,17	15,22	5,71
	r^2		0,79	0,74	0,76	0,51	0,64	0,77	0,75
	Diiodmethan (\bar{m}_5)	[°]	50,56	50,04	51,64	55,38	52,72	57,16	49,76
	Wasser (\bar{m}_5)	[°]	62,66	74,9	77,42	87,24	77,36	65,32	79,08
	Ethylene glycol (\bar{m}_5)	[°]	44,46	56,04	56,34	72,34	63,58	52,98	56,04
Gruppe B	Total	[mN/m]	56,52	42,43	49,67	28,04	41,47	54,92	44,30
	Disperse	[mN/m]	31,90	23,56	29,80	22,94	30,98	27,68	30,62
	Polar	[mN/m]	24,62	18,87	20,18	5,10	10,48	27,24	13,68
	r^2		0,87	0,97	0,98	0,69	0,93	0,92	0,99
	Diiodmethan (\bar{m}_5)	[°]	40,56	51,98	54,90	51,68	58,70	50,76	54,86
	Wasser (\bar{m}_5)	[°]	42,92	63,68	53,56	83,40	71,24	42,62	63,68
	Ethylene glycol (\bar{m}_5)	[°]	15,96	23,88	15,02	71,52	20,02	17,08	26,52

Tab. B.19: Rauheit [μm] | B01 ... B07 | Gruppe A und B

		Sa	Sz	Sq	Sv	Sp	Sk	Spk	Svk	
Gruppe A	B01	$\bar{m}_{(35)}$	0,87	17,18	1,10	12,72	4,46	2,78	0,96	1,22
		s	0,06	4,22	0,08	4,22	0,08	0,46	0,11	0,09
	B02	$\bar{m}_{(35)}$	0,95	15,54	1,21	10,56	4,98	2,97	1,14	1,38
		s	0,09	4,03	0,11	4,00	0,36	0,29	0,10	0,21
	B03	$\bar{m}_{(35)}$	0,86	12,83	1,09	8,09	4,74	2,64	1,10	1,21
		s	0,05	4,33	0,06	4,37	0,38	0,17	0,09	0,09
	B04	$\bar{m}_{(35)}$	0,37	12,91	0,47	10,96	1,95	1,16	0,50	0,47
		s	0,02	4,45	0,02	4,47	0,17	0,06	0,03	0,02
	B05	$\bar{m}_{(35)}$	0,88	16,34	1,12	11,49	4,86	2,78	1,02	1,22
		s	0,07	4,68	0,08	4,70	0,53	0,24	0,12	0,12
	B06	$\bar{m}_{(35)}$	0,80	16,39	1,03	11,94	4,45	2,48	1,08	1,11
		s	0,03	5,63	0,03	5,68	0,26	0,11	0,05	0,06
	B07	$\bar{m}_{(35)}$	0,94	13,80	1,20	8,69	5,10	2,94	1,21	1,26
		s	0,10	4,43	0,12	4,47	0,52	0,34	0,13	0,18
Gruppe B	B01	$\bar{m}_{(35)}$	0,73	16,06	0,91	12,41	3,64	2,34	0,77	0,95
		s	0,06	2,81	0,07	2,86	0,29	0,19	0,08	0,12
	B02	$\bar{m}_{(35)}$	0,87	17,79	1,09	13,31	4,49	2,77	0,98	1,10
		s	0,11	3,83	0,13	3,86	0,50	0,38	0,13	0,14
	B03	$\bar{m}_{(35)}$	0,71	12,74	0,90	8,87	3,88	2,26	0,87	0,90
		s	0,07	4,27	0,08	4,41	0,46	0,24	0,11	0,09
	B04	$\bar{m}_{(35)}$	0,36	13,91	0,45	12,04	1,87	1,13	0,47	0,45
		s	0,02	3,26	0,02	3,21	0,18	0,05	0,03	0,02
	B05	$\bar{m}_{(35)}$	0,85	15,71	1,08	10,95	4,76	2,70	1,00	1,14
		s	0,08	4,36	0,10	4,34	0,56	0,25	0,14	0,17
	B06	$\bar{m}_{(35)}$	0,60	14,77	0,76	11,49	3,28	1,89	0,72	0,78
		s	0,03	3,58	0,04	3,56	0,28	0,10	0,06	0,07
	B07	$\bar{m}_{(35)}$	0,85	12,09	1,07	7,44	4,65	2,67	1,07	1,04
		s	0,11	3,77	0,13	3,94	0,56	0,38	0,15	0,12

Tab. B.20: Talfläche / Gesamtfläche | REM | B01 ... B07

		Gruppe A [%]	Gruppe B [%]
B01	$\bar{m}_{(3)}$	3,9	1,0
	s	0,2	0,2
B02	$\bar{m}_{(3)}$	6,1	2,2
	s	1,2	0,4
B03	$\bar{m}_{(3)}$	1,6	0,7
	s	0,1	0,2
B04	$\bar{m}_{(3)}$	3,9	1,3
	s	0,8	0,3
B05	$\bar{m}_{(3)}$	3,1	3,0
	s	0,2	0,1
B06	$\bar{m}_{(3)}$	3,3	0,1
	s	0,6	0,1
B07	$\bar{m}_{(3)}$	2,4	1,9
	s	0,3	0,4

Messungen zur Charakterisierung der verwendeten Tinten

Beispiel Berechnung ($\rho = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$ | $\eta = 3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ | Düsen $\varnothing \approx 0,8 \times 10^{-6} \text{ m}$ | $\sigma \approx 30 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ | $\bar{v} = 5 \text{ m/s}$):

$$\text{Re} = \rho \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d \left[\text{m} \right] \cdot \eta \left[\frac{\text{m}^2}{\text{N}\cdot\text{s}} \right] = \frac{1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 5 \text{ m} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 3 \text{ m}^2}{\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}} \approx 14$$

$$1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 10^3 \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{We} = \rho \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d \left[\text{m} \right] \cdot \sigma \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right] = \frac{1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 5^2 \text{ m} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{N}} \approx 7$$

$$\text{Oh} = \frac{\sqrt{\text{We}}}{\text{Re}} \approx 0,18$$

Tab. B.21: Berechnungen der dimensionslosen Kennzahlen (We, Re und Oh) für Prozessfenster von $\bar{v} = 5$ bis 15 m/s | Düsen $\varnothing \approx 0,8 \times 10^{-6}$

\bar{v} [m/s]	$\sigma \approx 30$			\bar{v} [m/s]	$\sigma \approx 41$		
	Re	We	Oh		Re	We	Oh
5,0	15	7	0,18	5,0	14	5	0,15
5,5	16	9	0,18	5,5	16	7	0,15
6,0	17	10	0,18	6,0	17	8	0,15
6,5	19	12	0,18	6,5	19	9	0,15
7,0	20	14	0,18	7,0	20	10	0,15
7,5	22	17	0,18	7,5	22	12	0,15
8,0	24	19	0,18	8,0	24	14	0,15
8,5	25	21	0,18	8,5	25	15	0,15
9,0	27	24	0,18	9,0	27	18	0,15
9,5	28	26	0,18	9,5	28	19	0,15
10,0	29	29	0,18	10,0	29	22	0,15
10,5	31	33	0,18	10,5	31	24	0,15
11,0	32	36	0,18	11,0	32	26	0,15
11,5	34	39	0,18	11,5	34	29	0,15
12,0	35	42	0,18	12,0	35	30	0,15
12,5	37	46	0,18	12,5	37	34	0,15
13,0	39	51	0,18	13,0	39	37	0,15
13,5	40	54	0,18	13,5	40	39	0,15
14,0	41	58	0,18	14,0	41	43	0,15
14,5	42	61	0,18	14,5	42	45	0,15
15,0	44	67	0,18	15,0	44	49	0,15

Tab. B.22: Berechnungen der dimensionslosen Kennzahlen (We, Re und Oh) für Prozessfenster von $\bar{v} = 5$ bis 15 m/s | Düsen $\varnothing \approx 1,8 \times 10^{-6}$

\bar{v} [m/s]	$\sigma \approx 30$			\bar{v} [m/s]	$\sigma \approx 41$		
	Re	We	Oh		Re	We	Oh
5,0	33	17	0,12	5,0	33	12	0,10
5,5	37	21	0,12	5,5	37	15	0,10
6,0	41	25	0,12	6,0	41	19	0,10
6,5	43	28	0,12	6,5	43	20	0,10
7,0	46	31	0,12	7,0	46	23	0,10
7,5	50	37	0,12	7,5	50	27	0,10
8,0	54	43	0,12	8,0	54	32	0,10
8,5	55	47	0,12	8,5	55	34	0,10
9,0	60	55	0,12	9,0	60	40	0,10
9,5	62	58	0,12	9,5	62	43	0,10
10,0	66	66	0,12	10,0	66	48	0,10
10,5	70	74	0,12	10,5	70	54	0,10
11,0	73	80	0,12	11,0	73	58	0,10
11,5	77	89	0,12	11,5	77	65	0,10
12,0	79	94	0,12	12,0	79	68	0,10
12,5	83	108	0,12	12,5	83	76	0,10
13,0	87	115	0,12	13,0	87	84	0,10
13,5	89	120	0,12	13,5	89	88	0,10
14,0	93	131	0,12	14,0	93	96	0,10
14,5	95	137	0,12	14,5	95	100	0,10
15,0	100	151	0,12	15,0	100	110	0,10

Experimente zur Wechselwirkung zwischen Substraten und Tinten

Tab. B.23: Oberflächenspannung und Viskosität | B01 ... B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 0, 5, 10 und 15%

T-Tinten			C-Tinten			
	$\bar{m}_s^{(3)}$	$\frac{\sigma}{\eta}$ [mN/m] / [mPa·s]		$\bar{m}_s^{(3)}$	$\frac{\sigma}{\eta}$ [mN/m] / [mPa·s]	
Kf-T 0% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	32,40 0,29	3,90 0,04	Kf-C 0% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 41,47 0,41	3,02 0,04
Kf-T 5% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	31,74 0,12	14,40 0,13	Kf-C 5% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 43,80 0,22	8,73 0,08
Kf-T 10% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	35,76 0,29	29,20 0,21	Kf-C 10% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 47,07 0,17	18,16 0,14
Kf-T 15% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	38,72 0,16	38,20 0,25	Kf-C 15% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 53,47 0,21	33,11 0,28
Kp-T 0% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	33,58 0,39	3,10 0,09	Kp-C 0% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 42,48 0,41	3,07 0,14
Kp-T 5% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	34,82 0,12	8,00 0,10	Kp-C 5% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 44,07 0,31	6,47 0,11
Kp-T 10% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	37,60 0,08	22,00 0,24	Kp-C 10% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 48,00 0,16	14,12 0,10
Kp-T 15% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$	40,69 0,16	40,10 0,42	Kp-C 15% PEG	$\bar{m}_s^{(3)}$ 54,93 0,21	27,66 0,36

Tab. B.24: Δ^{BA} B01 ... B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 0, 5, 10 und 15%

		Δ^{BA}						
		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Kf-T	0	-1,04	-0,59	-1,38	1,04	-0,54	-0,82	-0,44
Kp-T	0	0,40	0,41	0,10	0,45	0,18	0,25	0,15
Kf-C	0	0,08	-0,18	0,47	0,08	0,08	-0,05	0,08
Kp-C	0	0,54	0,62	0,89	0,53	1,01	1,22	0,96
<hr/>								
Kf-T	5	-0,77	-0,69	-0,57	0,30	-0,24	-0,66	-0,10
Kp-T	5	0,31	0,07	0,50	0,42	0,20	0,82	0,58
Kf-C	5	1,60	1,15	1,63	0,61	1,18	2,13	1,96
Kp-C	5	1,58	1,34	1,57	0,34	1,33	1,79	1,50
<hr/>								
Kf-T	10	0,08	-0,18	0,47	0,08	0,08	-0,05	0,08
Kp-T	10	0,36	0,20	0,49	0,42	0,64	0,77	0,94
Kf-C	10	1,11	0,78	1,35	0,54	1,18	1,78	1,71
Kp-C	10	1,40	1,01	1,38	0,20	2,31	1,93	1,31
<hr/>								
Kf-T	15	0,10	0,08	0,17	0,40	0,29	0,11	0,40
Kp-T	15	0,42	0,80	0,54	0,34	0,61	0,85	0,68
Kf-C	15	1,19	0,95	1,46	0,28	0,93	1,58	1,20
Kp-C	15	0,75	1,42	1,45	0,36	0,97	1,53	1,46

Tab. B.25: $\Delta\beta^A_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ | B01 .. B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 0, 5, 10 und 15% | Gruppe A

		$\Delta\beta^A_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$						
		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Kf-T	0	0,56	0,56	0,65	0,06	0,40	0,46	0,49
Kf-T	5	0,47	0,52	0,48	0,11	0,38	0,44	0,43
Kf-T	10	0,37	0,43	0,09	0,33	0,33	0,34	0,37
Kf-T	15	0,37	0,41	0,36	0,11	0,31	0,34	0,34
<hr/>								
Kp-T	0	0,30	0,25	0,23	0,06	0,21	0,20	0,20
Kp-T	5	0,33	0,31	0,30	0,06	0,29	0,27	0,26
Kp-T	10	0,35	0,30	0,32	0,08	0,26	0,11	0,27
Kp-T	15	0,34	0,26	0,32	0,11	0,28	0,27	0,29
<hr/>								
Kf-C	0	0,17	0,09	0,10	0,01	0,10	0,06	0,10
Kf-C	5	0,14	0,07	0,10	0,01	0,08	0,04	0,06
Kf-C	10	0,18	0,09	0,12	0,02	0,09	0,08	0,08
Kf-C	15	0,37	0,41	0,36	0,11	0,31	0,34	0,34
<hr/>								
Kp-C	0	0,13	0,06	0,07	0,00	0,07	0,02	0,07
Kp-C	5	0,12	0,06	0,06	0,00	0,07	0,02	0,06
Kp-C	10	0,17	0,09	0,11	0,01	0,08	0,07	0,10
Kp-C	15	0,16	0,10	0,15	0,05	0,13	0,13	0,15

Tab. B.26: $\Delta\beta^B_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$ | B01 .. B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C | PEG 0, 5, 10 und 15% | Gruppe B

		$\Delta\beta^B_{(t_{100} \rightarrow t_1)}$						
		B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Kf-T	0	0,18	0,30	0,29	0,17	0,18	0,21	0,26
Kf-T	5	0,33	0,39	0,30	0,14	0,31	0,31	0,30
Kf-T	10	0,29	0,37	0,16	0,28	0,28	0,29	0,29
Kf-T	15	0,34	0,37	0,31	0,18	0,28	0,32	0,33
<hr/>								
Kp-T	0	0,02	0,09	0,02	0,09	0,16	0,04	0,03
Kp-T	5	0,27	0,24	0,28	0,12	0,32	0,29	0,24
Kp-T	10	0,33	0,29	0,32	0,16	0,31	0,11	0,33
Kp-T	15	0,31	0,36	0,33	0,14	0,29	0,32	0,31
<hr/>								
Kf-C	0	0,16	0,22	0,22	0,02	0,09	0,14	0,08
Kf-C	5	0,25	0,17	0,18	0,02	0,18	0,21	0,20
Kf-C	10	0,25	0,17	0,21	0,08	0,19	0,24	0,22
Kf-C	15	0,34	0,28	0,30	0,11	0,31	0,30	0,31
<hr/>								
Kp-C	0	0,02	0,04	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03
Kp-C	5	0,20	0,12	0,12	0,03	0,14	0,10	0,12
Kp-C	10	0,25	0,21	0,20	0,04	0,24	0,23	0,18
Kp-C	15	0,29	0,25	0,26	0,12	0,22	0,27	0,25

Anhang C

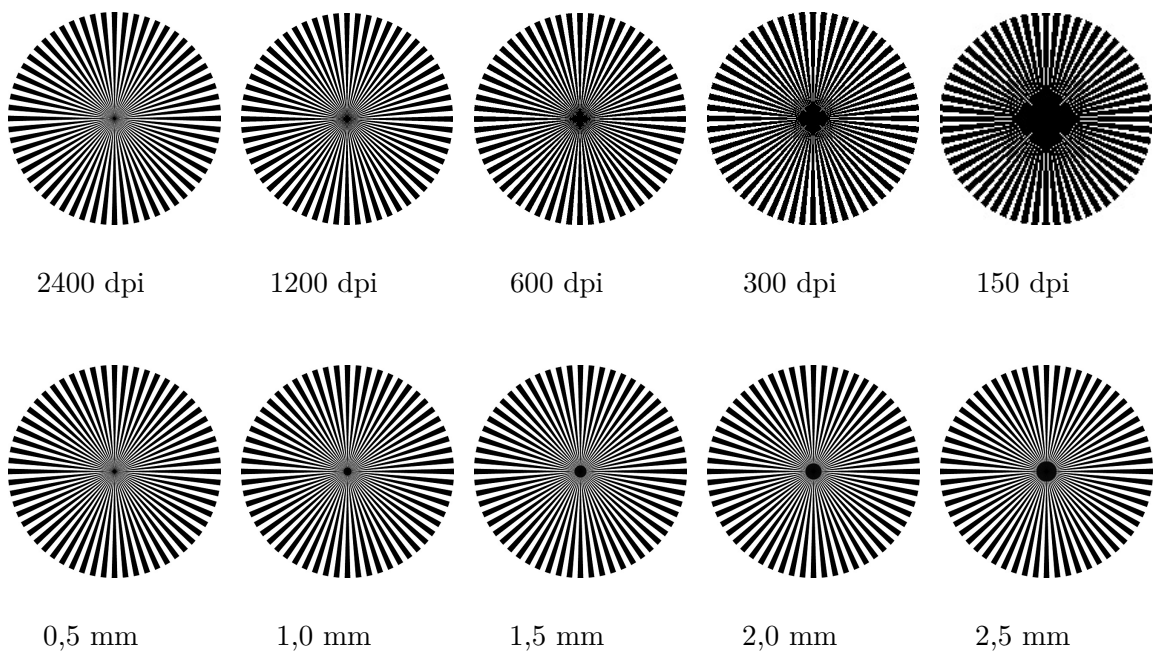
C. Validierung Matlab-Routine - Siemensstern

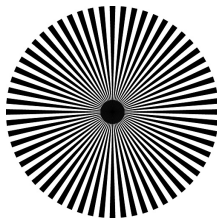
Siemenssterne werden üblicherweise als Testmuster zur Messung des Auflösungsvermögens von Geräten wie Kameras und Druckern verwendet. In dieser Arbeit wurde derselbe Drucker zum Bedrucken verschiedener Substrate mit unterschiedlichen Tinten verwendet. Ziel war es, das Auflösungsvermögen des Substrats indirekt zu messen. Je größer die Tintenausbreitung, desto geringer die Auflösung.

Zur Evaluierung der Matlab-Routine [116] bzw. der Gleichung 5.5 wurde ein Test zur Validierung durchgeführt. Siemenssterne mit demselben Durchmesser „R“=50 mm und derselben Anzahl von Sektoren „C“=60 wurden in Matlab entworfen in:

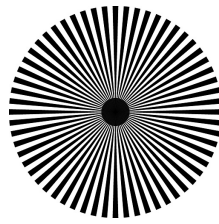
- 5 verschiedenen Auflösungen (150, 300, 600, 1200 und 2400 dpi)
- 8 verschiedenen Unschärfe-Simulationen (von 1 bis 8 Pixel)
- 15 verschiedenen Erweiterungen der Grauzone unter Verwendung von Artefakten (schwarzer Kreis) in der Mitte des Sterns, wobei die Fläche in Schritten von 0,5 mm erweitert wird.

In b) und c) blieb die Auflösung bei 2400 dpi. Die Abbildungen der Siemenssterne sind unten dargestellt und die Auswertung ist in Tab. C.1 dokumentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Routine die Auflösung misst, obwohl die Reduzierung der Auflösung, die Erhöhung der Unschärfe und die Erweiterung des Artefakts (Zentralkreis) die berechnete Auflösung nicht linear beeinflussen.

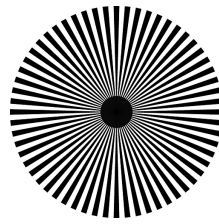




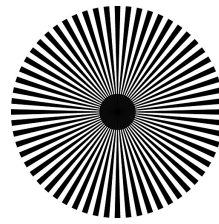
3,0 mm



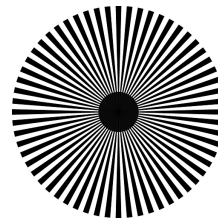
3,5 mm



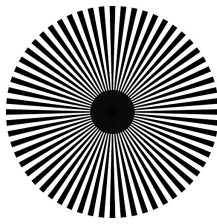
4,0 mm



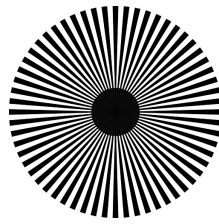
4,5 mm



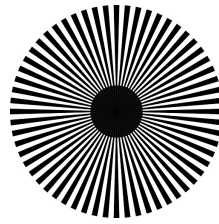
5,0 mm



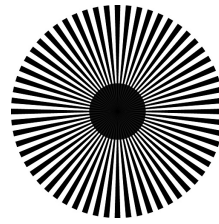
5,5 mm



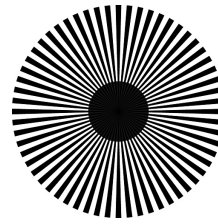
6,0 mm



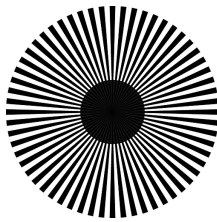
6,5 mm



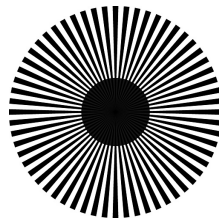
7,0 mm



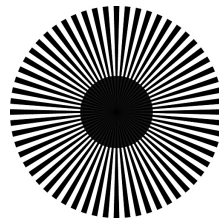
7,5 mm



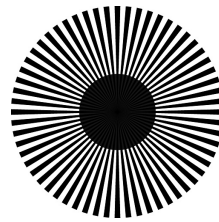
8,0 mm



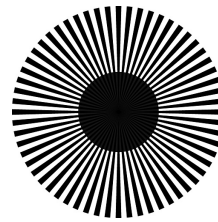
8,5 mm



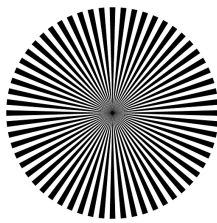
9,0 mm



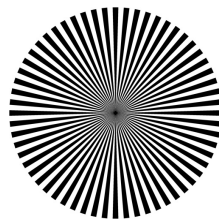
9,5 mm



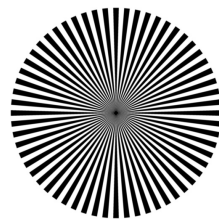
10,0 mm



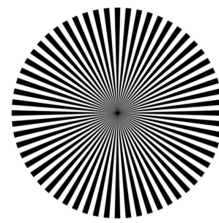
1 px



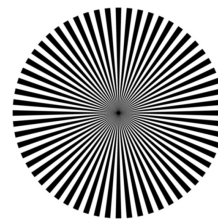
2 px



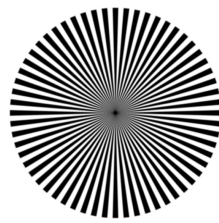
3 px



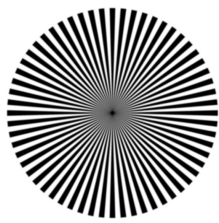
4 px



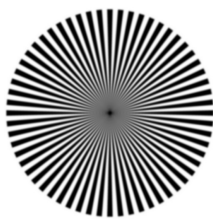
5 px



6 px



7 px



8 px

Tab. C.1: Messung des Auflösungsvermögens Siemensstern mit Matlab Routine

Veränderung	Testbild	Gemessene Auflösung	Differenz zum vorherigen Wert
Ausgangsauflösung	2400 dpi	2351	-
	1200 dpi	1698	653
	600 dpi	716	982
	300 dpi	458	258
	150 dpi	260	198
Unschärfe	2400 dpi / 1px	2083	-
	2400 dpi / 2px	1554	529
	2400 dpi / 3px	996	558
	2400 dpi / 4px	777	219
	2400 dpi / 5px	690	87
	2400 dpi / 6px	655	35
	2400 dpi / 7px	566	89
	2400 dpi / 8px	443	123
Erweiterung des Grauringes	2400 dpi / 0,5 mm	2183	-
	2400 dpi / 1,0 mm	2132	51
	2400 dpi / 1,5 mm	2115	17
	2400 dpi / 2,0 mm	2083	32
	2400 dpi / 2,5 mm	1348	735
	2400 dpi / 3,0 mm	1104	244
	2400 dpi / 3,5 mm	826	278
	2400 dpi / 4,0 mm	689	137
	2400 dpi / 4,5 mm	566	123
	2400 dpi / 5,0 mm	524	42
	2400 dpi / 5,5 mm	443	81
	2400 dpi / 6,0 mm	395	48
	2400 dpi / 6,5 mm	370	25
	2400 dpi / 7,0 mm	361	9
	2400 dpi / 7,5 mm	312	49
	2400 dpi / 8,0 mm	301	11
	2400 dpi / 8,5 mm	274	27
2400 dpi / 9,0 mm	251	23	
2400 dpi / 9,5 mm	240	11	
2400 dpi / 10,0 mm	227	13	

Anhang D

D. Validierung des Package Tools ISO/IEC 24790:2017

Zur Validierung des *Package Tools* (Linienwiedergabe-Messungen) wurden Linien in verschiedenen Breiten und mit Simulationen von Definitionsverlust (*blur*) und Konturverlust (*ragged*) in Corel Draw gezeichnet (Abb. D.1). Die Linien sind Vektoren, werden aber auf der Dokumentseite in einer Dotmatrix positioniert, die von der Auflösung der Datei abhängt. Wenn eine Linie von z. B. 2 Dots nicht mit dem Raster der Dotmatrix kongruent ist, wird sie bei der Umwandlung in eine Bilddatei (.tiff) häufig in der Breite reduziert. Bei den hier beschriebenen Messungen kann dieser Fehler das Endergebnis verändern. Die exportierten Bilder haben 1200 dpi.

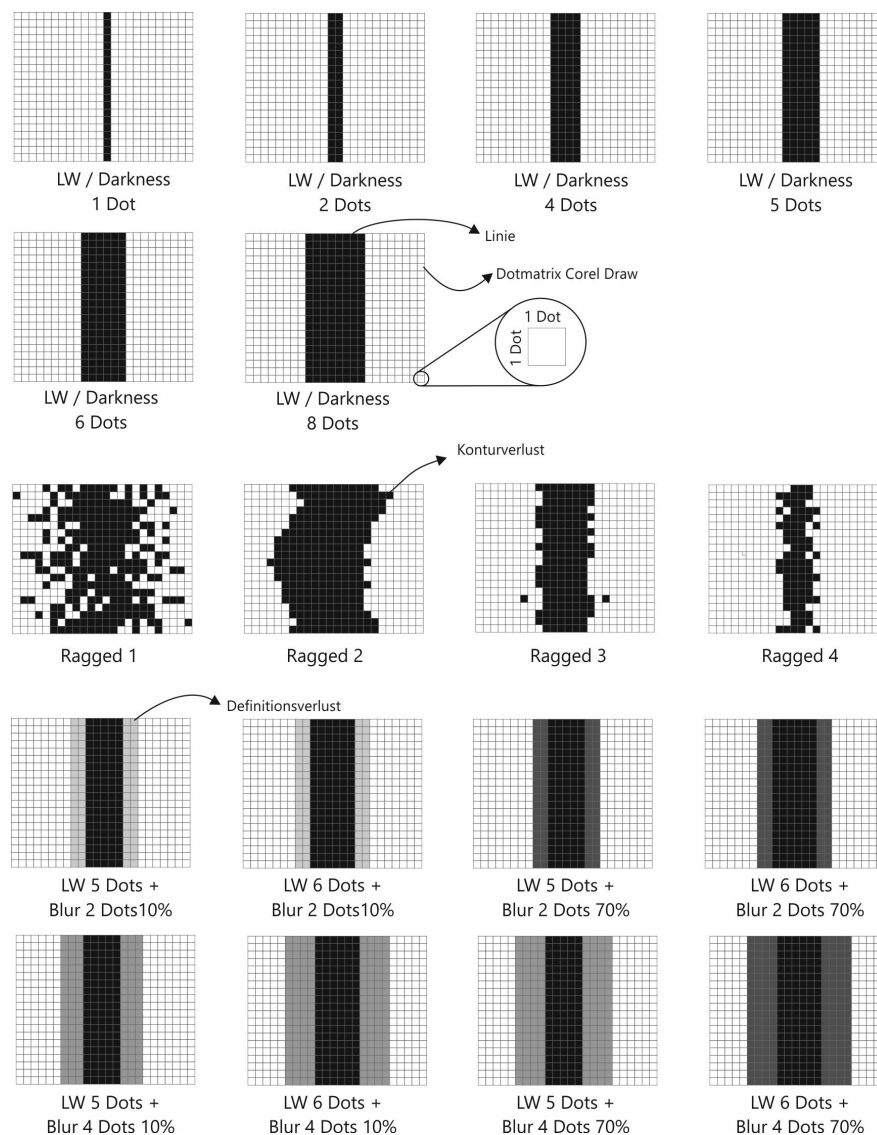


Abb. D.1: Objekte zur Validierung des *Package Tools*

Die Ergebnisse sind in der Tab. D.1 dargestellt. Die Messungen stimmen mit den er-

zeugten digitalen Bildern überein. Es ist möglich, die Korrelation zwischen Linienbreite und Liniendunkelheit (Gl. 3.27, S.63) und die Zunahme des Konturverlust (Kantengeradheit) in unterschiedlichen Mustern (ragged 1 = hohe Fehlerdispersion, ragged 2 = systemischer Fehler und ragged 3 und 4 = Punktpositionierungsfehler) zu beobachten. Bei den Definitionsverlustmessungen (Kantenglätte) wurden Linienränder mit 10 und 70 % Farbdeckung (K) verwendet, um die Reflexionsgrenzen ρ_{10} und ρ_{70} zu simulieren.

Die Vergrößerung des Unschärfebereichs (2 Dots und 4 Dots) bei 10% Farbdeckung hat keinen Einfluss auf das Ergebnis der Unschärfe, aber die Linien werden schmaler im Vergleich zu der ursprünglichen Liniebreite. Die Vergrößerung des Unschärfebereichs mit 70% Farbdeckung wirkt sich bei der Auswertung durch das *Package Tool* nicht nur auf den Unschärfewert aus, sondern erhöht die Linienbreite erheblich und damit die Linien-Dunkelheit. Für die Simulationen wurden Standarddateien des Systems von OECF und MTF verwendet (bei $R_{max} = 0,93$ und $R_{min} = 0,10$). Die Ergebnisse zeigen, dass die Unschärfe je nach der Reflexionsgrenze als Linienbreite interpretiert werden kann.

Tab. D.1: Ergebnisse zur Validierung der *Package Tools* - Linienwiedergabe

Objekte	<i>Line width</i> [mm]	<i>Blurriness</i> [mm]	<i>Reggedness</i> [mm]	<i>Darkness</i> [-]
LW 1 Dot	0,035			0,300
LW 2 Dots	0,052			0,298
LW 4 Dots	0,089			0,446
LW 5 Dots	0,108			0,513
LW 6 Dots	0,127			0,579
LW 8 Dots	0,163			0,697
Ragged 1			0,069	
Ragged 2			0,064	
Ragged 3			0,034	
Ragged 4			0,036	
LW 5 Dots + Blur 2 Dots 10%	0,082	0,011		0,439
LW 6 Dots + Blur 2 Dots 10%	0,092	0,011		0,476
LW 5 Dots + Blur 2 Dots 70%	0,179	0,029		0,455
LW 6 Dots + Blur 2 Dots 70%	0,198	0,048		0,495
LW 5 Dots + Blur 4 Dots 10%	0,082	0,011		0,439
LW 6 Dots + Blur 4 Dots 10%	0,092	0,011		0,476
LW 5 Dots + Blur 4 Dots 70%	0,254	0,030		0,511
LW 6 Dots + Blur 4 Dots 70%	0,272	0,029		0,543

Anhang E

E. Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson

Wenn zwei Parameter, x und y , metrisch skalierbar und nicht abhängig von einander sind, ist die Stärke und Richtung der Korrelation zwischen ihnen kalkulierbar. Das bedeutet, zwei Variablen können assoziiert werden, wenn sie Ähnlichkeiten in der Verteilung ihrer Ergebnisse aufweisen. Genauer gesagt, sie können über die Häufigkeitsverteilung oder durch ihre Varianz assoziiert werden. Diese Assoziation zeigt, ob die Werte des Parameters x mit den Werten von y zunehmen (positive Korrelation, $r > 0$, so liegen die Beobachtungspaare tendenziell auf einer Geraden mit positiver Neigung) oder ob der Parameter x mit zunehmendem y abnimmt (negative Korrelation, $r < 0$, so liegen die Beobachtungspaare tendenziell auf einer Geraden mit negativer Neigung). Die Abb. E.1 veranschaulicht diese Erklärung. Die in den Quadranten I und III aufgetragenen Werte stehen in einer negativen Korrelation, und wenn sie zwischen den Quadranten II und IV aufgetragen werden, stehen sie in einer positiven Korrelation. Abb. E.2 (links) zeigt Ergebnisse mit einer positiven Korrelation und (rechts) ohne Korrelation. Die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen 2 Merkmale ist durch die empirische Kovarianz (Gl. E.1) gegeben [6, S.167] [6, S.161].

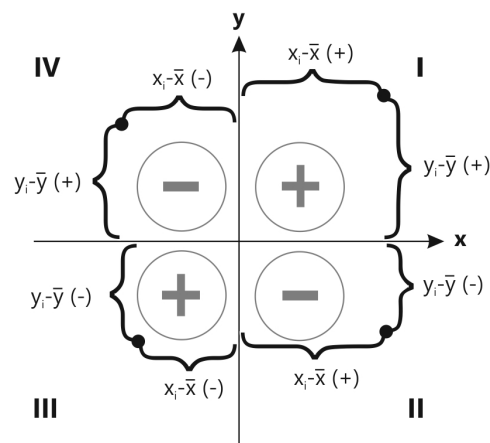
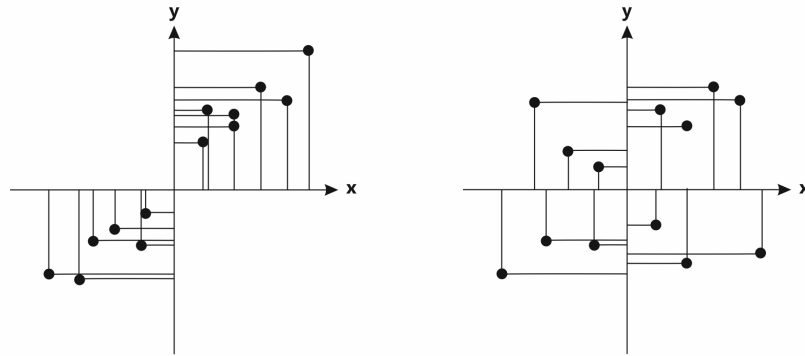


Abb. E.1: Darstellung der Kovarianzen - [114, S.75] - modifiziert

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (\text{E.1})$$

Abb. E.2: Beispiel einer positiven Korrelation (rechts) und ohne Korrelation (links) - [114, S.75] - *modifiziert*

Toutenburg erklärt, „Als Maß für den Zusammenhang zweier metrischer Merkmale dient der Korrelationskoeffizient von Bravais-Pearson (Gleichung E.2), der die Abstände zwischen den Beobachtungen der beiden Merkmale und deren arithmetischen Mitteln zueinander in Beziehung setzt. Der Korrelationskoeffizient ist definiert als $r(x, y) = r$ “ [139, S.131].

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{Var(x)Var(y)}} \quad (\text{E.2})$$

Die Auswertung der Korrelationsstärke ist in Tab. E.1 aufgeführt. Diese Werte können je nach Forschungsgebiet variieren. In der Sozialwissenschaft kann eine Korrelation von 0,4 aufgrund der großen Variabilität der Stichprobe als stark angesehen werden, ein solcher Wert wird jedoch in den Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften als schwache Korrelation interpretiert.

Tab. E.1: Auswertung der Korrelationsstärke [114, S.76]

Werte	Korrelationsstärke
$0,0 \leq r(x, y) \leq 0,2$	keine bis sehr schwach
$0,2 < r(x, y) \leq 0,5$	schwach
$0,5 < r(x, y) \leq 0,8$	mittelstark
$0,8 < r(x, y) \leq 1,0$	stark bis perfekt

Anhang F

F. Draufsicht Tintentropfen

Die Bilder in den Abbildungen F.2 bis F.8 wurden von einer Kamera (Abb. F.1) aufgenommen, die parallel zum Dosiersystem des optischen Kontaktwinkelmessgeräts (s. S. 93) und oberhalb des Probenstisches positioniert war. Die Kamera verfügt über ein ringförmiges Beleuchtungssystem. Es wurde auch eine spezielle L-förmige Kanüle verwendet. Die Tropfen hatten ein Volumen von $3 \mu\text{l}$ und die Videos wurden mit 25 fps (frames per second) aufgenommen.

Diese Art von Aufnahme bietet Informationen über die radiale Symmetrie des Tropfens als Ergänzung zu den Analysen, die anhand von seitlichen Bildern der Tropfen gemacht wurden. Von jedem Video wurden 4 Bilder für die Darstellung hier entnommen. Das erste Bild ist der Zeitpunkt, in dem der Tropfen gerade die Oberfläche des Substrats berührt, das zweite Bild erfolgt nach ca. 0,5 s, das dritte Bild nach 1 s und das vierte Bild nach 2 s.

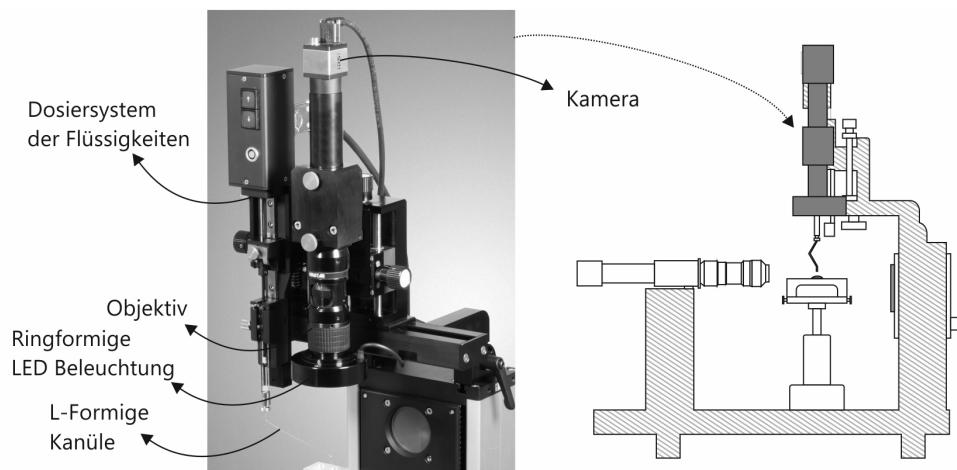


Abb. F.1: Draufsicht-Kamera (links) | Positionierung auf dem Kontaktwinkelmessgerät - Quelle Topview-System: <https://www.dataphysics-instruments.com/de/produkte/oca/zubehoer>

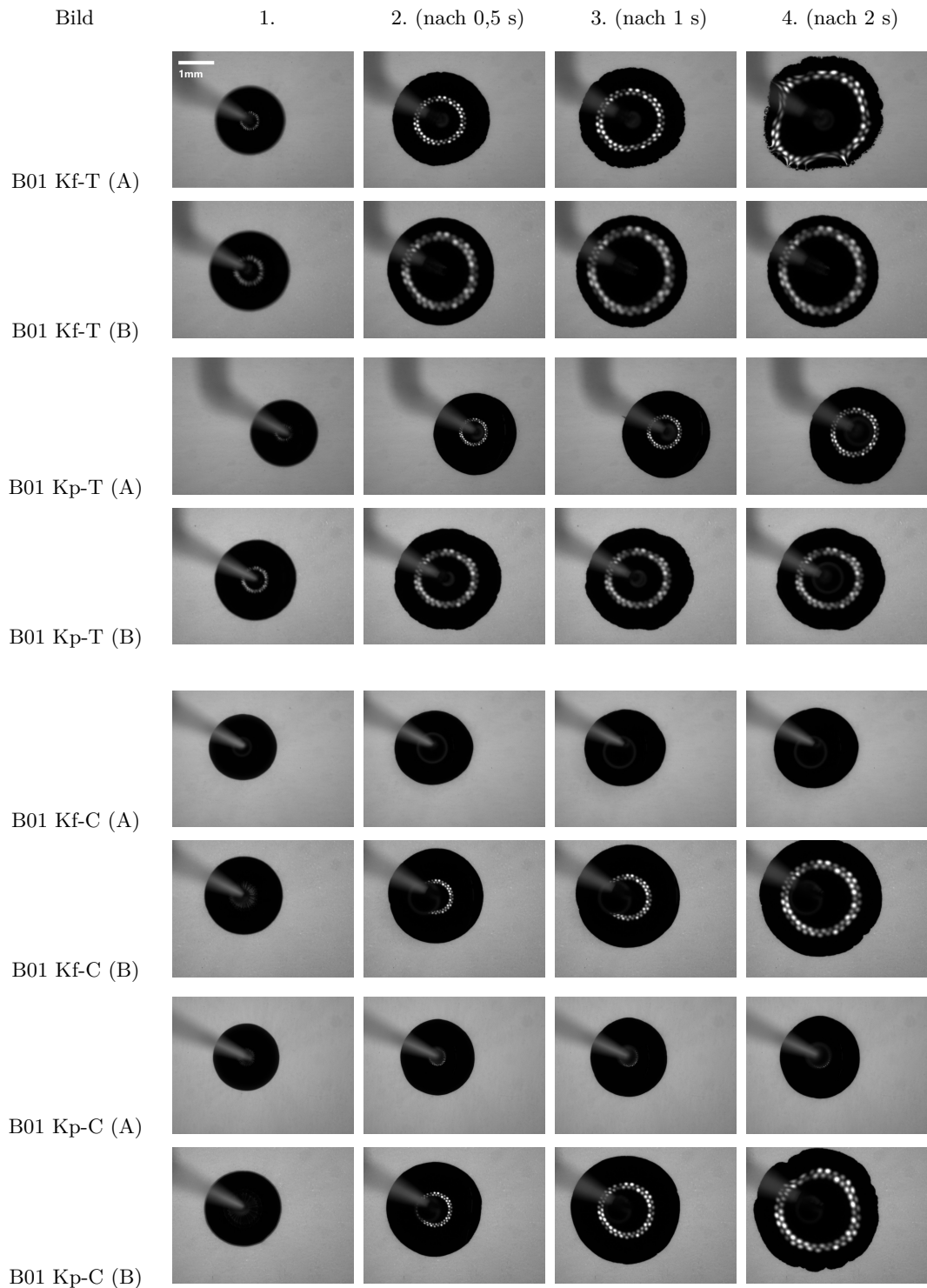


Abb. F.2: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B01 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

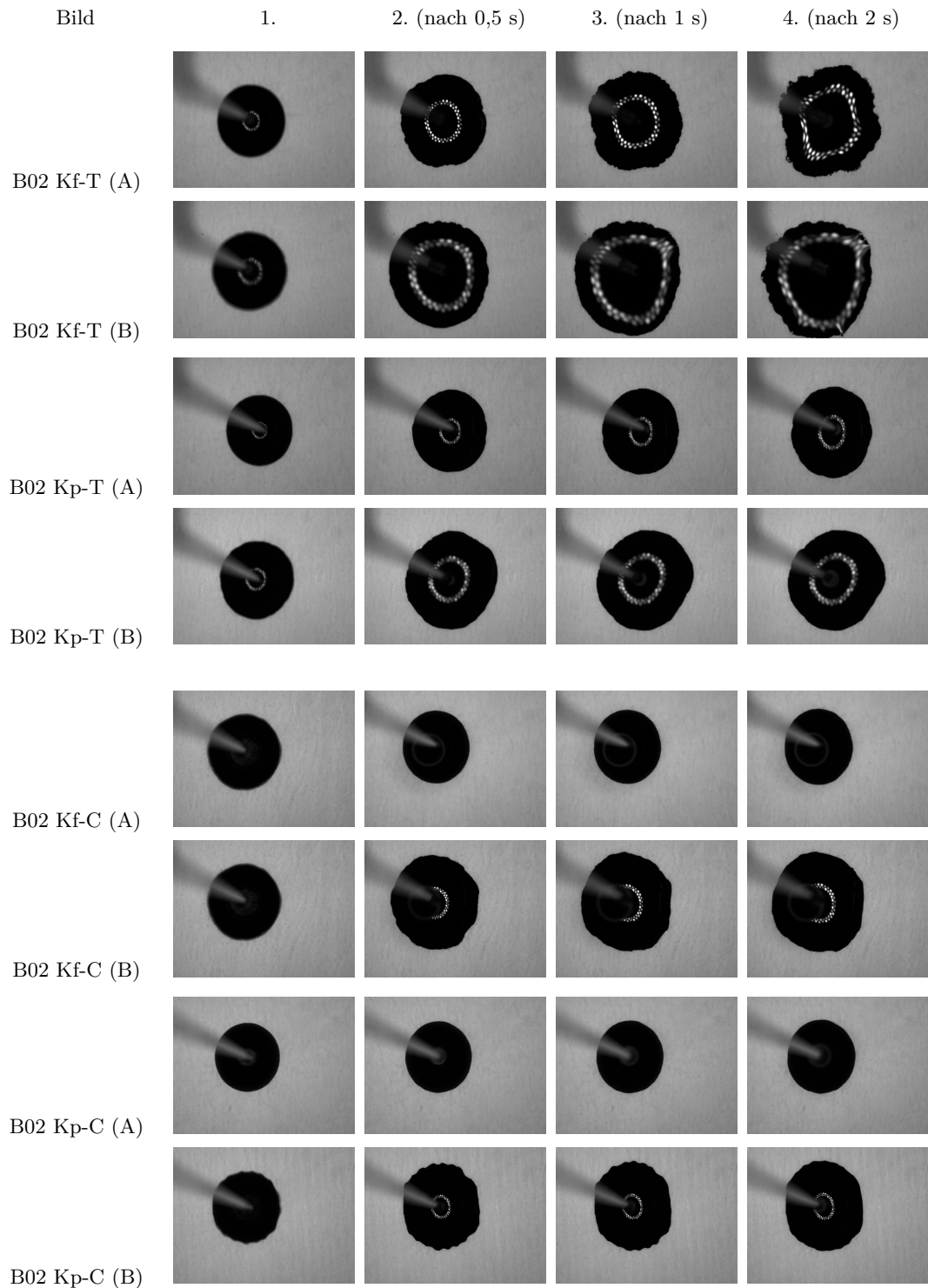


Abb. F.3: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B02 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

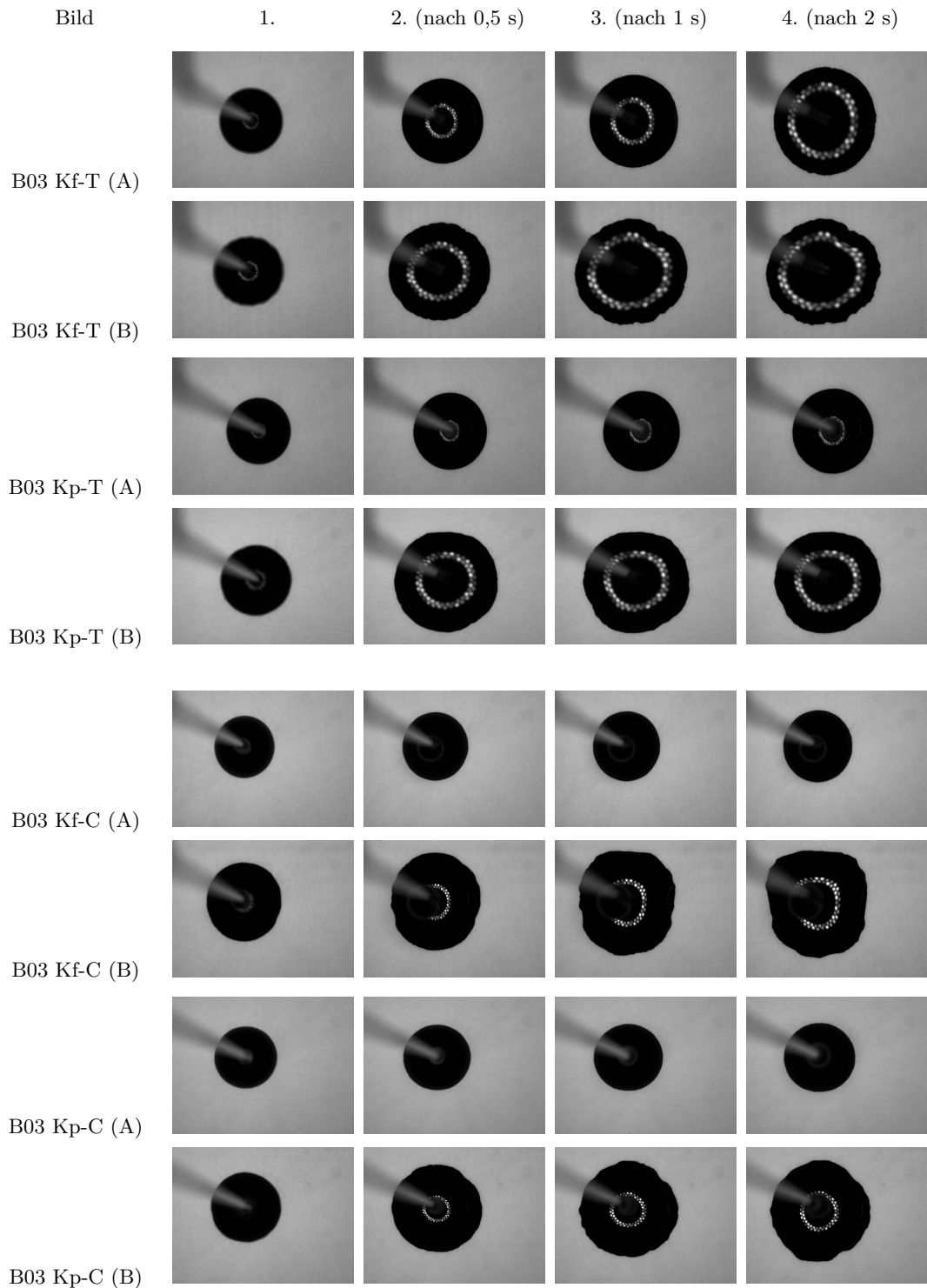


Abb. F.4: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B03 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

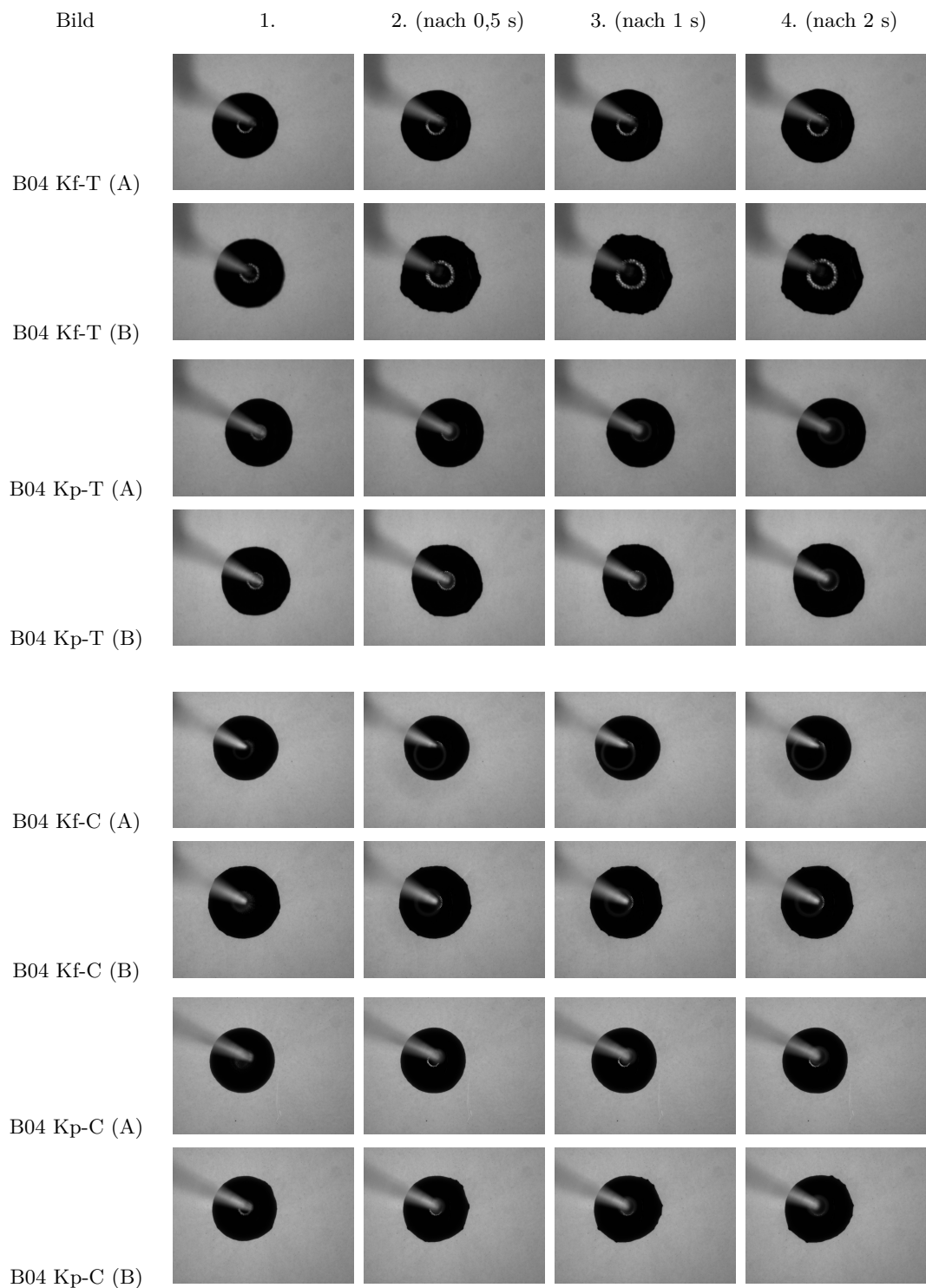


Abb. F.5: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B04 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

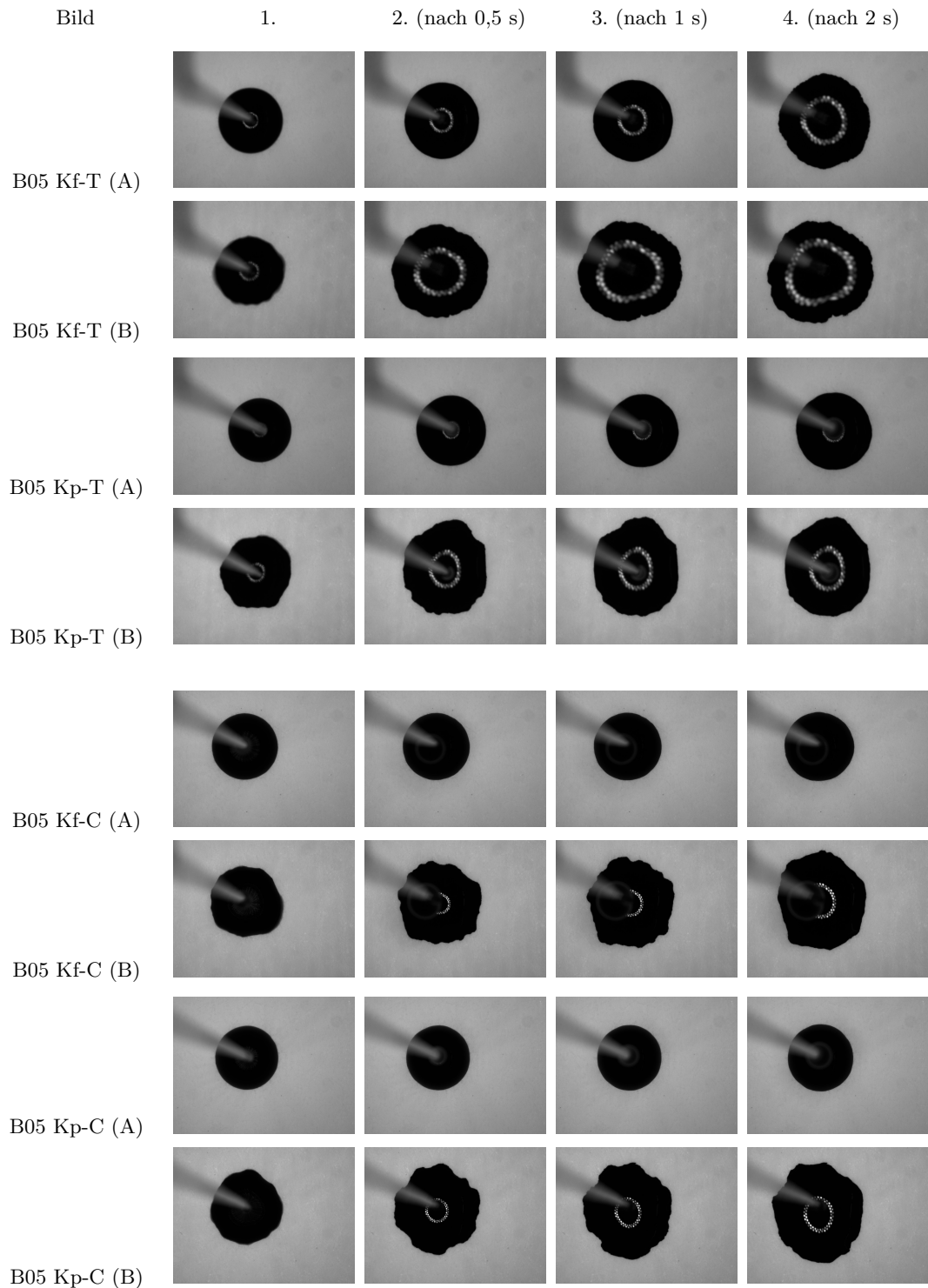


Abb. F.6: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B05 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

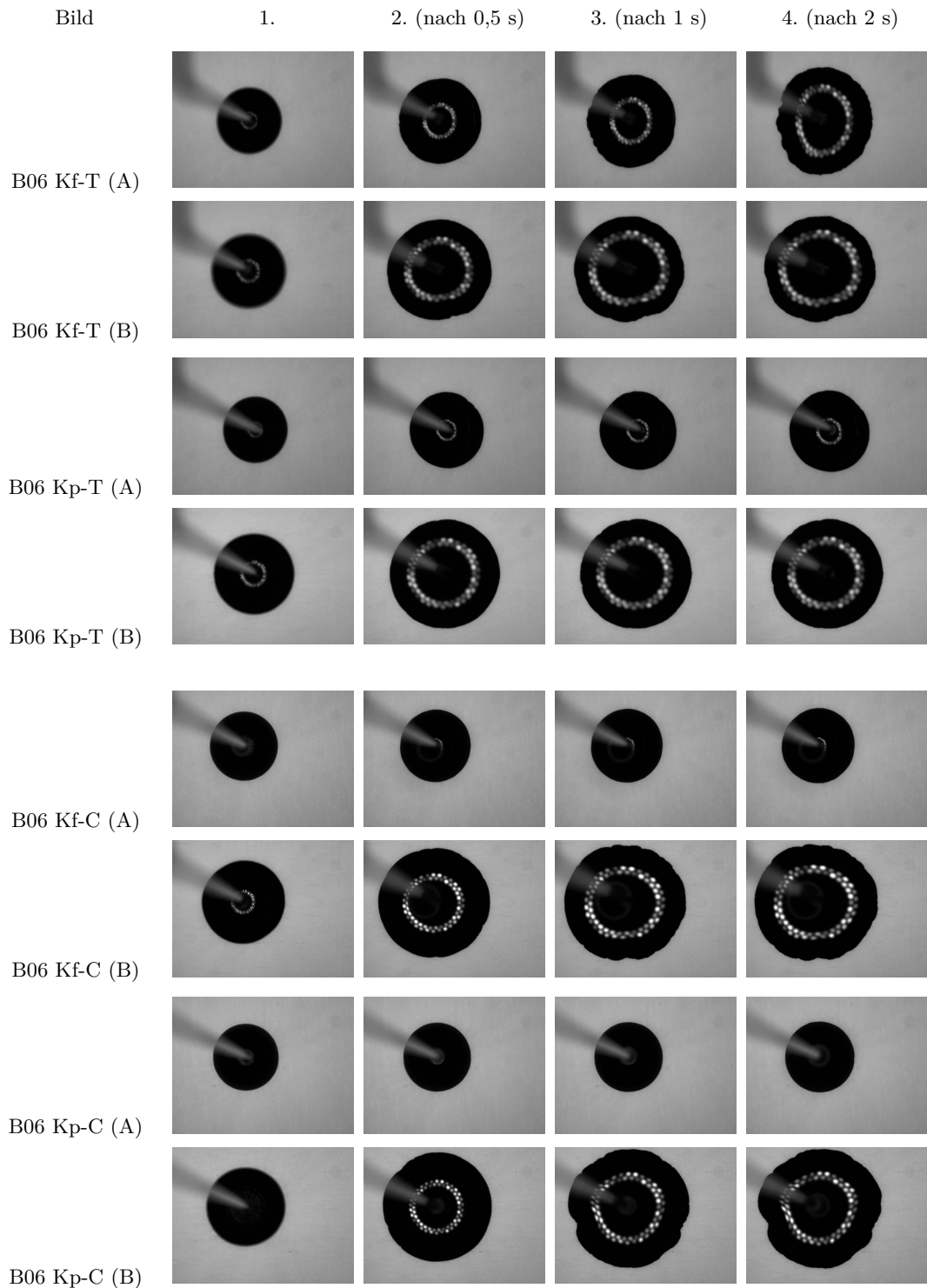


Abb. F.7: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B06 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

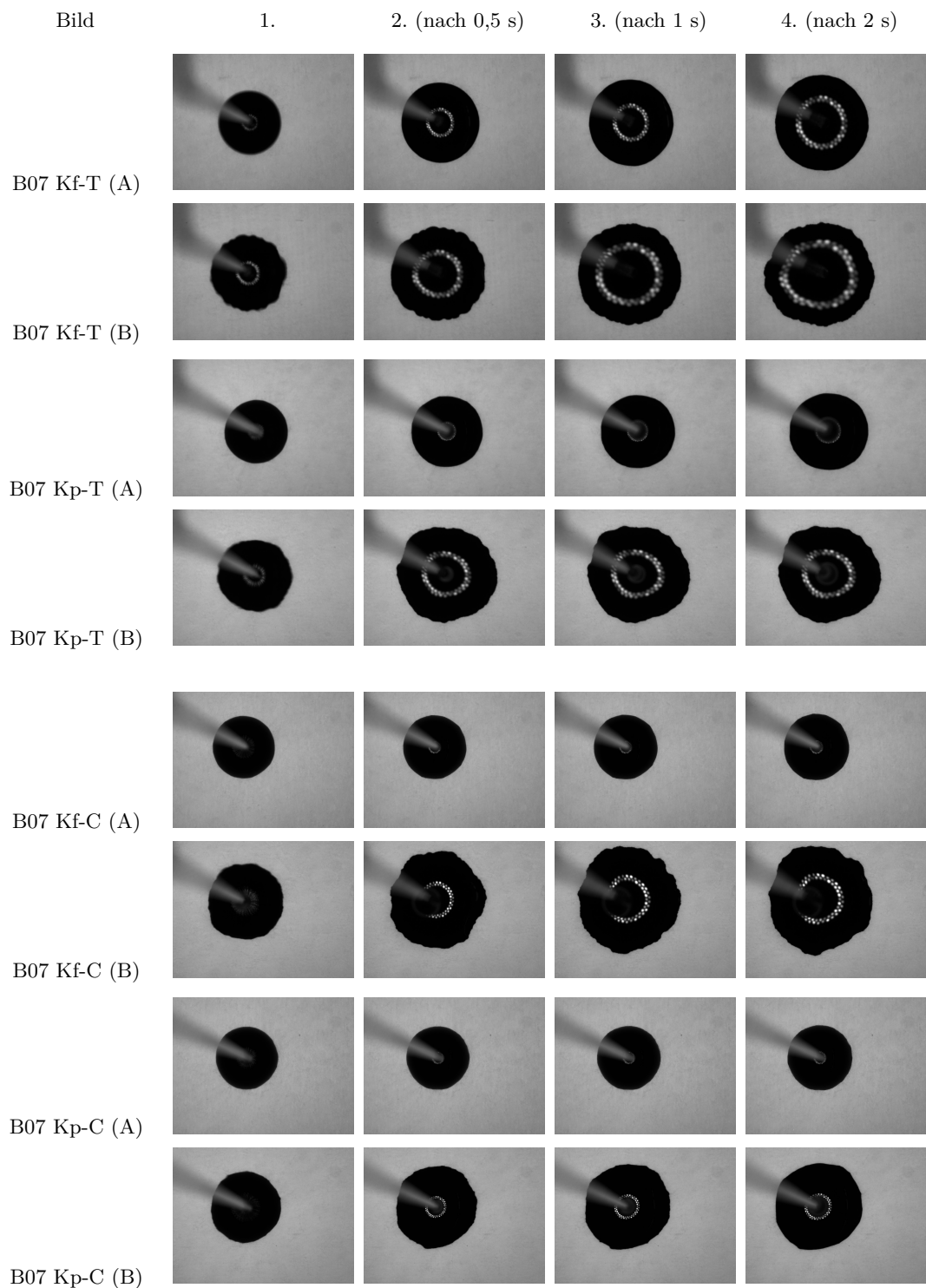


Abb. F.8: Draufsicht 1., 12., 25., und 50. Frame | B07 | Kf-T, Kp-T, Kf-C und Kp-C (Gruppe A und B)

Literatur

- [1] ALAVA, Mikko ; NISKANEN, Kaarlo: The physics of paper. In: Reports on Progress in Physics 69 (2006), Nr. 3, S. 669–723
- [2] ANDERSON, Daniel M.: Imbibition of a liquid droplet on a deformable porous substrate. In: Physics of Fluids 17 (2005), Nr. 8, S. 087104–1 – 087104–22. – ISSN 1070–6631
- [3] APEL-PAZ, Meirav ; MARMUR, Abraham: Spreading of liquids on rough surfaces. In: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 146 (1999), Nr. 1-3, S. 273–279. – ISSN 09277757
- [4] ASLANNEJAD, H. ; FATHI, H. ; HASSANIZADEH, S. M. ; RAOOF, A. ; TOMOZEIU, N.: Movement of a liquid droplet within a fibrous layer: Direct pore-scale modeling and experimental observations. In: Chemical Engineering Science 191 (2018), S. 78–86. – ISSN 00092509
- [5] ASLANNEJAD, H. ; HASSANIZADEH, S. M. ; CELIA, M. A.: Characterization of the Interface Between Coating and Fibrous Layers of Paper. In: Transport in porous media 127 (2019), Nr. 1, S. 143–155. – ISSN 0169–3913
- [6] ASSENMACHER, Walter: Deskriptive Statistik. 3. Berlin, Heidelberg and s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2003
- [7] ATANGANA, Abdon: Fractional Operators with Constant and Variable Order with Application to Geo-hydrology. Saint Louis : Elsevier Science, 2017
- [8] BATZ-SOHN, Christoph ; LEMBACH, Andreas ; NELLI, Leo ; MÜLLER, Astrid ; ROISMAN, Ilia ; TROPEA, Cam: Speed of Ink Absorption on Modified Paper Surfaces. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2015, S. 503–506
- [9] BEAR, Jacob: Dynamics of Fluids in Porous Media. New York : Dover Publications, 2013
- [10] BERTHIER, Jean: Micro-Drops and Digital Microfluidics: Processing, Development and Applications. William Andrew, 2008
- [11] BOHN, Daniel: Entwicklung einer lichtartunabhängigen Weißpunktanpassung für Proof-Prozesse auf Basis des Verdrückens von optischen Aufhellern unter spezieller Berücksichtigung von chemischen und farbmtrischen Effekten. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2018
- [12] BORCH, Jens: Handbook of physical testing of paper. 2. ed. New York, NY : Dekker, 2002
- [13] BUNDESVERBAND DRUCK UND MEDIEN E. V.: MedienStandard Druck 2018: Technische Richtlinien für Daten, Prüfdruck und Auflagendruck (PDF). Berlin, 2018

- [14] BYRNES, Jim: Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. Dordrecht : Springer Netherlands, 2009
- [15] CANON: Sicherheitsdatenblatt Canon Ink Tank CLI-551 BK: SDB-nr : ICW 0599 R - 02 EU DE - Version : 03
- [16] CANON: Sicherheitsdatenblatt Canon Ink Tank CLI-551 C: SDB-nr : ICW 0600 R - 02 EU DE - Version : 03
- [17] CANON: Sicherheitsdatenblatt Canon Ink Tank CLI-551 M: SDB-nr : ICW 0601 R - 02 EU DE - Version : 03
- [18] CANON: Sicherheitsdatenblatt Canon Ink Tank CLI-551 Y -: SDB-nr : ICW 0602 R - 02 EU DE - Version : 03
- [19] CANON: Sicherheitsdatenblatt Canon Ink Tank PGI-550 PGBK: SDB-nr : ICW 0598 R - 02 EU DE - Version : 03
- [20] CASSIE, A. B. D.: Contact angles. In: Discussions of the Faraday Society 3 (1948), S. 11
- [21] CASSIE, A. B. D. ; BAXTER, S.: Wettability of porous surfaces. In: Transactions of the Faraday Society 40 (1944), S. 546
- [22] CLARKE, A. ; BLAKE, T. D. ; CARRUTHERS, K. ; WOODWARD, A.: Spreading and Imbibition of Liquid Droplets on Porous Surfaces. In: Langmuir 18 (2002), Nr. 8, S. 2980–2984
- [23] DANIEL, Richard C. ; BERG, John C.: Spreading on and penetration into thin, permeable print media: application to ink-jet printing. In: Advances in colloid and interface science 123-126 (2006), S. 439–469. – ISSN 0001–8686
- [24] DATA PHYSICS INSTRUMENTS GMBH: Picolitre and nanolitre dosing systems. <https://bit.ly/39ZCyyf>. Version: 2002
- [25] DATA PHYSICS INSTRUMENTS GMBH: Disperse & polare Anteile der Oberflächenenergie und Oberflächenspannung. <https://bit.ly/3241M9f>. Version: 2020
- [26] DATA PHYSICS INSTRUMENTS GMBH: Die OCA-Modelle. <https://bit.ly/3sSyua2>. Version: 2020
- [27] DESIE, G. ; DEROOVER, G. ; VOECHT, F. D. ; CLAES, R.: Fundamental Mechanisms in Ink Media Interactions for Aqueous, UV-Curing and Solvent Based Inks. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2004, S. 774–779
- [28] DESIE, G. ; PASCUAL, O. ; PATAKI, T ; DE ALMEIDA, P. ; MERTENS, P. ; ALLAMAN, S. ; SOUCEMARIANADIN, A.: Imbibition of Dye and Pigment-Based Aqueous Inks into Porous Substrates. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2003, S. 209–214

- [29] DIAMOND, Arthur S. (Hrsg.) ; WEISS, David S. (Hrsg.): Optical engineering. Bd. 74: Handbook of imaging materials. 2nd ed., rev. and expanded. New York : Marcel Dekker, 2002
- [30] DIJKSMAN, J. F.: Design of Piezo Inkjet Print Heads: From Acoustics to Applications. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2018
- [31] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Papier, Pappe und Karton: Bestimmung der Rauheit/Glätte (Luftstromverfahren) – Teil 4: Print-Surf-Verfahren (DIN ISO 8791-4:2008). Berlin, 2008
- [32] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Prüfung von Papier – Inkjet-Medien: Teil 3: Druckbildqualität – optische Auflösung, optische Dichte (DIN 53131-3:2010). Berlin, 2010
- [33] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Karton – Begriffe und Sorteneinteilungen (DIN 19303:2011). 2011. Berlin, 2011
- [34] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Prüfung von Papier und Pappe: Bestimmung der Glätte nach Bekk (DIN 53107:2016). Berlin, 2016
- [35] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Prüfung von Papier und Pappe: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit - Teil 1: Mittlere Luftdurchlässigkeit nach Bendtsen (DIN 53120-1:2018). 2018
- [36] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Beschichtungsstoffe – Benetzbarkeit: Teil 2: Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen (DIN EN ISO 19403-2:2020). Berlin, 2020
- [37] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: Beschichtungsstoffe – Benetzbarkeit: Teil 4: Bestimmung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten aus einer Grenzflächenspannung (DIN EN ISO 19403-4:2020). Berlin, 2020
- [38] DMITRY, Ivutin: Ink Dot Formation in Coating Layer of Ink-Jet Paper with Modified Calcium Carbonate. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2005, S. 448–452
- [39] DRAGOLJUB, Novaković ; MLADEN, Stančić ; IGOR, Karlović ; NEMANJA, Kašiković ; VALENTINA, Vukmirović ; RASTKO, Milošević: Influence of surface roughness on print quality on digitally printed self adhesive foils. In: Journal of Print and Media Technology Research (2013), Nr. 2, S. 67–76
- [40] EK, Monica (Hrsg.) ; GELLERSTEDT, Göran (Hrsg.) ; HENRIKSSON, Gunnar (Hrsg.): Pulp and paper chemistry and technology. Bd. Vol. 4: Paper products physics and technology. Berlin : De Gruyter, 2009. – ISBN 978-3-11-021345-4
- [41] ELLIS, Bryan (Hrsg.) ; SMITH, Ray (Hrsg.): Polymers: A property database. Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – ISBN 978-0-8493-3940-0

- [42] ELSTEIN-WERK M. STEINMETZ GMBH & CO. KG: Keramische Infrarotstrahler: Produktübersicht
- [43] FOGDEN, Andrew ; NILSSON, Helena: Inkjet print quality on model paper coatings. In: Appita Journal 61 (2008), Nr. 2, S. 120–127
- [44] FOGRA FORSCHUNGSGESELLSCHAFT DRUCK E.V.: Modellierung des drucktechnischen Verhaltens im Bogenoffsetdruck auf Basis der messbaren Papiereigenschaften: Fogra-Nr. 42.028. In: P3 Paper Print Packaging Bd. 3/2.2020, S. 24–29
- [45] GANE, P. A. C.: Absorption Properties of Coatings: A Selected Overview of Absorption Criteria Derived from Recent Pore Network Modelling. In: Journal of Dispersion Science and Technology 25 (2005), Nr. 4, S. 389–408. – ISSN 0193–2691
- [46] GENNES, Pierre-Gilles de ; BROCHARD-WYART, Françoise ; QUÉRÉ, David: Capillarity and wetting phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves. New York, NY : Springer, 2004
- [47] GIGAC, Juraj ; STANKOVSKÁ, Monika ; LETKO, Michal ; OPÁLENÁ, Elena: The effect of base paper properties on inkjet print quality. In: Wood Research 59 (2014), Nr. 5, S. 717–730
- [48] GIGAC, Juraj ; STANKOVSKÁ, Monika ; PAŽITNÝ, Andrej: Influence of the coating formulations and base papers on inkjet printability. In: Wood Research 61 (2016), Nr. 6, S. 915–926
- [49] HABENICHT, Gerd: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin : Springer, 2006
- [50] HAMRAOUI, Ahmed ; NYLANDER, Tommy: Analytical approach for the Lucas-Washburn equation. In: Journal of colloid and interface science 250 (2002), Nr. 2, S. 415–421. – ISSN 0021–9797
- [51] HASEBE, Satoshi ; UESAKA, Tomozumi ; TANAKA, Kumiko ; SEKIMOTO, Masahiko ; NAKAO, Motoharu ; HAMAZAKI, Toshinobu ; KURIHARA, Eizo: Effects of Ink-Paper Interaction and System Parameters on Drying Quality in High-Speed Color Inkjet with Infrared Ray Heater. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2015, S. 46–51
- [52] HEILMANN, Jali ; LINDQVIST, Ulf: Effect of Drop Size on the Print Quality in Continuous Ink Jet Printing. In: Journal of Imaging Science and Technology 44 (2000), Nr. 6, S. 491–494
- [53] HOATH, Stephen D. (Hrsg.): Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016. – ISBN 978–3–527–68473–1
- [54] HOLIK, Herbert (Hrsg.): Handbook of Paper and Board. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2010. – ISBN 978–3–527–65252–5

- [55] HUE, Le P.: Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology. In: Journal of Imaging Science and Technology (1998), Nr. 42, S. 49–62
- [56] HUTCHINGS, Ian M. (Hrsg.) ; MARTIN, Graham D. (Hrsg.): Inkjet technology for digital fabrication. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2013. – ISBN 978-0-470-68198-5
- [57] IGGESUND PAPERBOARD: Invercote G: Technische Spezifikation - Produktkatalog 2015–2016 (PC2015DEICGI) (Deutsch)
- [58] INTERNATIONAL PAPER: Arktika: Technische Spezifikation - Stand: 21.03 2016 (Englisch)
- [59] ISO: Graphic technology - Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images (ISO 13655:2017). 3. 2017
- [60] ISO: Graphic Technology – Print quality requirements for printed matter: Part 2: Commercial print applications utilizing digital printing (ISO/TS 15311-2:2018). Genf, 2018
- [61] ISO: Graphic technology — Print quality requirements for printed matter: Part 1: Measurement methods and reporting schema (ISO/TS 15311-1:2019). 2. Genf, 2019
- [62] ISO/IEC: Information technology — Office equipment: Test charts and methods for measuring monochrome printer resolution (ISO/IEC 29112:2012). 1. Genf, 2012
- [63] ISO/IEC: Information technology — Office equipment: Measurement of image quality attributes for hardcopy output — Monochrome text and graphic images (ISO/IEC 24790:2017). 1. Genf, 2017
- [64] IVANA, Jurič ; DANIJELA, Randelović ; IGOR, Karlović ; IVANA, Tomić: Influence of the surface roughness of coated and uncoated papers on the digital print mottle. In: Journal of Graphic Engineering and Design 5 (2014), Nr. 1, S. 17–23
- [65] JOHNSON, Harald: Mastering digital printing. 2nd ed. Boston, Mass. : Thomson Course Technology PTR, 2005
- [66] JOHNSON, Harald ; TOBIE, C. D.: Digital Printing Start-up Guide (Digital process and print series). Thomson Course Technology PTR, 2005
- [67] JUNG, Ulrich: Skript Funktionales Drucken: Sommersemester 2019
- [68] KANZAMAR, Miklos: Simulation der Trocknung gestrichener Papiere. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2004
- [69] KASSMANN, Monika (Hrsg.): Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung. 2. Aufl. s.l. : Beuth Verlag GmbH, 2014 (Beuth Studium). – ISBN 3410241922

- [70] KETTLE, John ; LAMMINMÄKI, Taina ; GANE, Patrick: A review of modified surfaces for high speed inkjet coating. In: Surface and Coatings Technology 204 (2010), Nr. 12-13, S. 2103–2109. – ISSN 02578972
- [71] KEYENCE: Reference Manual Laser Scanning Microscope: VK-X150K/X160K / VK-H1XME
- [72] KIPPAN, Helmut (Hrsg.): Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2000. – ISBN 3–540–66941–8
- [73] KIRWAN., Mark J. (Hrsg.): Paper and Paperboard Packaging Technology. Oxford : Blackwell Publishing Ltd, 2005. – ISBN 978–1–4051–2503–1
- [74] KLEIN, R. ; PAPIERTECHNISCHE STIFTUNG (Hrsg.): Ermittlung der tonwertrelevanten Papierkennwerte und Erarbeitung von Methoden zur Vorhersage der Tonwertzunahme (TWZ) im Bogenoffsetdruck: PTS-Forschungsbericht 31/14. München,,
- [75] KLÖCKL, Ingo: Chemie der Farbmittel: In der Malerei. Berlin/Boston : De Gruyter, 2015
- [76] KORVINK, Jan G. ; SMITH, Patrick J. ; SHIN, Dong-Youn: Inkjet-Based Micromanufacturing. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012
- [77] KRAINER, Sarah ; SAES, Louis ; HIRN, Ulrich: Predicting inkjet dot spreading and print through from liquid penetration- and picoliter contact angle measurement. In: Nordic Pulp & Paper Research Journal 35 (2020), Nr. 1, S. 124–136. – ISSN 0283–2631
- [78] KRAINER, Sarah ; SMIT, Chris ; HIRN, Ulrich: The effect of viscosity and surface tension on inkjet printed picoliter dots. In: RSC Advances - Royal Society of Chemistry 9 (2019), Nr. 54, S. 31708–31719
- [79] KRAUSHAAR, Andreas: PSD Process Standard Digital: Handbook 2018 - Step by Step toward Printing the Expected. Aschheim (Munich) : Fogra Research Institute for Media Technologies, 2018
- [80] KRAUSHAAR, Andreas ; OBERHOLLENZER, Berthold ; KARP, Peter ; FOGRA FORSCHUNGSGESELLSCHAFT DRUCK E.V. (Hrsg.): Grundlagen zur Etablierung der Normung für den Toner und Inkjet-basierten Digitaldruck: Fogra-Forschungsbericht Nr. 35.003. München,,
- [81] KREMER, Georg: Datenblatt Kremer Pigmente: 67700 - 67790 Polyvinylalkohol (PVA). <https://bit.ly/31tWN1J>
- [82] KRZYMINSKI, Harald ; TECHKON GMBH (Hrsg.): Densitometrie: Verfahren, Kontrollelemente, Messgeräte, Software. Königstein/Ts.,

- [83] KURARAY: KURARAY Technical Information: Molecular Weight and Degree of Polymerization - Stand: 2016
- [84] KURARAY Co., Ltd: Basic Physical Properties of PVOH Resin - Stand: 2019. Tokyo,
- [85] KURARAY EUROPE GMBH: Technisches Datenblatt Kuraray Poval. Hattersheim am Main,
- [86] LAMMINMÄKI, T. ; KETTLE, J. ; PUUKKO, P. ; RIDGWAY, C. J. ; GANE, P.A.C.: The role of ink component diffusion during absorption into inkjet coatings. In: TAPPI 11th Advanced Coating Fundamentals Symposium (2010), S. 195–214
- [87] LAMMINMÄKI, T. T. ; KETTLE, J. P. ; PUUKKO, P. J. T. ; GANE, P. A. C.: Absorption Capability and Inkjet Ink Colorant Penetration into Binders Commonly Used in Pigmented Paper Coatings. In: Industrial & Engineering Chemistry Research 50 (2011), Nr. 6, S. 3287–3294
- [88] LAMMINMÄKI, Taina: The comparative dynamics of bulk liquid flow and interpolymer diffusion during inkjet ink imbibition in porous coating structures. VTT Science 2, 2012
- [89] LARSSON, Mikael ; VIDAL, David ; ENGSTRÖM, Gunnar ; ZOU, Xuejun: Compression of coating structures during calendaring. In: 9th TAPPI Advanced Coating Fundamentals Symposium Bd. 2006
- [90] LEE, Eric R.: Microdrop generation. Boca Raton : CRC Press, 2003
- [91] LEE, Hyunkook: Fumed Metallic Oxides and Conventional Pigments for Glossy Inkjet Paper, Western Michigan University, Dissertation, 2004
- [92] LI, Xingxun ; FAN, Xianfeng ; ASKOUNIS, Alexandros ; WU, Kejian ; SEFIANE, Khellil ; KOUTSOS, Vasileios: An experimental study on dynamic pore wettability. In: Chemical Engineering Science 104 (2013), S. 988–997. – ISSN 00092509
- [93] LIM, Taewoong ; HAN, Sewoon ; CHUNG, Jaewon ; CHUNG, Jin T. ; KO, Seunghwan ; GRIGOROPOULOS, Costas P.: Experimental study on spreading and evaporation of inkjet printed pico-liter droplet on a heated substrate. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009), Nr. 1-2, S. 431–441. – ISSN 00179310
- [94] LOPES DE SOUSA, Sónia C.: Estudo da interação tinta/papel na impressão inkjet, Universidade da Beira Interior, Dissertation, 2012
- [95] LUCAS, Richard: Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten. In: Kolloid-Zeitschrift 23 (1918), Nr. 1, S. 15–22. – ISSN 0303–402X
- [96] LUNDBERG, Anna: Ink-Paper interactions and effect of print quality in inkjet printing. Sundsvall, Mid Sweden University, Masterarbeit, 2011

- [97] LUNDBERG, Anna ; ÖRTEGREN, Jonas ; ALFTHAN, Elisabeth ; STRÖM, Göran: Paper-ink interactions: Microscale droplet absorption into paper for inkjet printing. In: Nordic Pulp & Paper Research Journal 26 (2011), Nr. 1, S. 142–150. – ISSN 0283–2631
- [98] MAGDASSI, Shlomo (Hrsg.): The Chemistry of Inkjet Inks. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010
- [99] MARMUR, Abraham: The radial capillary. In: Journal of colloid and interface science 124 (1988), Nr. 1, S. 301–308. – ISSN 0021–9797
- [100] MARMUR, Abraham: Kinetics of Penetration into Uniform Porous Media: Testing the Equivalent-Capillary Concept. In: Langmuir 19 (2003), Nr. 14, S. 5956–5959
- [101] MARTIC, G. ; CONINCK, J. de ; BLAKE, T.D: Influence of the dynamic contact angle on the characterization of porous media. In: Journal of colloid and interface science 263 (2003), Nr. 1, S. 213–216. – ISSN 0021–9797
- [102] MASOODI, Reza ; PILLAI, Krishna M.: Darcy’s law-based model for wicking in paper-like swelling porous media. In: AIChE Journal (2010), S. 2257–2267
- [103] MASOODI, Reza ; PILLAI, Krishna M.: Wicking in Porous Materials: Traditional and Modern Modeling Approaches. Hoboken : CRC Press, 2012
- [104] METSA BOARD: Carta Solida: Technische Spezifikation - Stand: 01.03.2016 (Englisch)
- [105] MEZGER, Thomas: Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. 2016
- [106] MICHEL, Samuel: PVOH and special PVOH 2017 - Stand: 09.02.2017
- [107] MODARESSI, Hedieh ; GARNIER, Gil: Mechanism of Wetting and Absorption of Water Droplets on Sized Paper: Effects of Chemical and Physical Heterogeneity. In: Langmuir 18 (2002), Nr. 3, S. 642–649
- [108] MORRIN, Aoife (Hrsg.) ; SMITH, Patrick J. (Hrsg.): Smart materials. Bd. no. 32: Reactive inkjet printing: A chemical synthesis tool. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2018. <http://dx.doi.org/10.1039/9781788010511>. <http://dx.doi.org/10.1039/9781788010511>. – ISBN 9781782627678
- [109] MOUTINHO, Isabel Maria T.: Physical & Chemical Interactions on Paper Surface: - Impact on the Printability of Papers Produced with E. globulus Kraft Pulps, Coimbra University, Dissertation, 2009
- [110] NAMEDANIAN, Mahzian ; GOORAN, Sasan: High-Resolution Analysis of Optical and Physical Dot Gain. In: Proc. TAGA (Technical Association of the Graphic Arts) (2010), S. 399–408

- [111] OLABISI, Olagoke ; ADEWALE, Kolapo: Handbook of Thermoplastics. Bd. v.41. 2nd ed. Baton Rouge : CRC Press, 1997
- [112] OLIVER, J. F. ; AGBEZUGE, L. ; WOODCOCK, K.: A diffusion approach for modelling penetration of aqueous liquids into paper. In: Colloids and Surfaces A 89 (1994), Nr. 2-3, S. 213–226
- [113] PANFILOV, Mikhail B.: Physicochemical fluid dynamics in porous media: Applications in geosciences and petroleum engineering. Weinheim : Wiley-VCH, 2019
- [114] PIGORSCH, Uta: Skriptum Statistik I: Lehrstuhl für Wirtschaftsstatistik & Ökonometrie: Sommersemester 2019. Wuppertal,
- [115] POND, Stephen F.: Inkjet technology and product development strategies. Carlsbad : Torrey Pines, 2000
- [116] PRINZMEIER, M.: Siemenssteranalyse zur Ermittlung des Auflösungsvermögens eines Druckers, Bergische Universität Wuppertal, Thesis-Arbeit, 2009
- [117] RESCH, Peter ; BAUER, Wolfgang ; HIRM, Ulrich: Pore structure change due to calendaring and its effect on ink setting behaviour - Review and novel findings. In: Advanced Coating Fundamentals Symposium. 2008, S. 58–72
- [118] ROSALEN, Sandra ; BACKHAUS, Johannes: Mottle evaluation of coated cardboards printed in inkjet. In: NIP & Digital Fabrication Conference 2019, S. 65–68
- [119] ROSALEN, Sandra ; BACKHAUS, Johannes: Cardboards printed with water based inkjet inks. In: Advances in Printing and Media Technology. 2017, S. 115–124
- [120] ROSALEN, Sandra ; BACKHAUS, Johannes: Influences on spreading of Inkjet inks on coated cardboards. In: NIP & Digital Fabrication Conference, 2020 International Conference on Digital Printing Technologies (2020)
- [121] RUIJTER, Michel J. ; CHARLOT, Magali ; VOUÉ, Michel ; CONINCK, Joël de: Experimental Evidence of Several Time Scales in Drop Spreading. In: Langmuir 16 (2000), Nr. 5, S. 2363–2368
- [122] SAPPI - PAPIER UNION: Algro Desing Duo: Technische Spezifikation - Formblattnummer: AA-PQM-029-01/A 09/2015 - Revision: E 01/2016 (Deutsch)
- [123] SCHÄFFLER, Michael: Rheologie von Beschichtungen. In: KUMPUGDEE-VOLLRATH, Mont (Hrsg.) ; KRAUSE, Jens-Peter (Hrsg.): Easy Coating. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011. – ISBN 978-3-8348-0964-3, S. 227–247
- [124] SCHOELKOPF, J. ; GANE, P.A.C. ; RIDGWAY, C. J.: A comparison of the various liquid interaction radii derived from experiment and network modelling of porous pigmented structures. In: Colloids and Surfaces A 251 (2004), Nr. 1-3, S. 149–159

- [125] SCHOELKOPF, Joachim: Observation and modelling of fluid transport into porous paper coating structures, Department of Environmental Sciences Faculty of Science, Dissertation, 2002
- [126] SCHOELKOPF, Joachim ; GANE, Patrick A. ; RIDGWAY, Cathy J. ; MATTHEWS, G.Peter: Practical observation of deviation from Lucas–Washburn scaling in porous media. In: Colloids and Surfaces A 206 (2002), Nr. 1-3, S. 445–454
- [127] SEMAL, S. ; BLAKE, T. D. ; GESKIN, V. ; RUIJTER, M. J. ; CASTELEIN, G. ; CONINCK, J. de: Influence of Surface Roughness on Wetting Dynamics. In: Langmuir 15 (1999), Nr. 25, S. 8765–8770
- [128] SHEN-YU, Chang: A Dot-gain Analysis of Inkjet Printing. In: DPP2001: International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications (2001), S. 364–368
- [129] SHUN, Jiang ; GUANGXUE, Chen ; XIAOMENG, Cui: Effects of Paper on Color Reproduction Quality in Ink-Jet Printing. In: Applied Mechanics and Materials (2014), Nr. 469, S. 336–339
- [130] SIHL: Problemlösungskatalog Inkjet
- [131] SITA PROCESS SOLUTIONS: SITA pro line t15 - measuring principle. <https://bit.ly/3wvja1Z>. Version: 2019
- [132] SOLEIMANI-GORGANI, A. ; JALILI, M.: Effect of Ink Formulation and Paper Surface Morphology on Ink-jet Printing Properties. In: Progress in Color, Colorants and Coating (2014), Nr. 7, S. 295–304
- [133] STORA ENSO: CKB: Technische Spezifikation - Multilayer kraft back board - Stand: 10.2017 (Englisch)
- [134] STORA ENSO: Ensocoat: Produktdaten - Stand: 05.2015 (Englisch)
- [135] STORA ENSO: Performa Bright: Technische Spezifikation - Stand: 09.2013
- [136] SVANHOLM, E. ; WEDIN, Pär ; STRÖM, G. ; FOGDEN, Andrew: Colorant Migration in Mesoporous Inkjet Receptive Coatings. In: 9th TAPPI Advanced Coating Fundamentals Symposium. 2006, S. 221–228
- [137] SVANHOLM, Erik: Printability and Ink-Coating Interactions in Inkjet Printing. Sweden, Karlstad University Studies - Faculty of Technology and Science Chemical Engineering -, Dissertation, 2007
- [138] TAN, Hua: Absorption of picoliter droplets by thin porous substrates. In: AIChE Journal 63 (2017), Nr. 5, S. 1690–1703
- [139] TOUTENBURG, Helge ; HEUMANN, Christian: Deskriptive Statistik: Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS. 6. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008

- [140] WASHBURN, Edward W.: The Dynamics of Capillary Flow. In: Physical Review 17 (1921), Nr. 3, S. 273–283
- [141] WEI RIOUX, Ran: The Rate of fluid absorption in porous media, The University of Maine, Master Thesis, 2003
- [142] WENZEL, Robert N.: Resistane of solid surfaces to wetting by water. In: Industrial & Engineering Chemistry 28 (1936), Nr. 8, S. 988–994
- [143] WENZEL, Robert N.: Surface Roughness and Contact Angle. In: The Journal of Physical and Colloid Chemistry 53 (1949), Nr. 9, S. 1466–1467
- [144] YANG, Li: Ink-paper interaction: A study in ink-jet color reproduction. Linköping, Linköping University, Disseration, 2003
- [145] YANG, Li ; LIU, Jianghao ; LI, Xin: Dynamics of ink absorption of packaging paper. In: Journal of Print and Media Technology Research (2014), Nr. 4, S. 269–275
- [146] YASUMURA, Patricia K.: Caracterização de propriedades de papel para impressão por jato de tinta. Sao Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertation, 2012
- [147] YEKTA-FARD, M. ; PONTER, A. B.: Factors affecting the wettability of polymer surfaces. In: Journal of Adhesion Science and Technology 6 (1992), Nr. 2, S. 253–277. – ISSN 0169–4243
- [148] YINGMEI, Zhou ; JIANG, Zhongmin ; JIN, Zhangying: Analysis of Area field quality based on ISO 19751 and ISO 13660. In: Applied Mechanics and Materials (2013), Nr. 262, S. 129–133
- [149] YIP, Kwok L. ; LUBINSKY, Anthony R. ; PERCHAK, Dennis R. ; NG, Kam C.: Measurement and Modeling of Drop Absorption Time for Various Ink-Receiver Systems. In: Journal of Imaging Science and Technology 6 (2003), S. 388–393
- [150] ZANDERS GMBH: Chromolux 700: Technische Spezifikation - Stand: 05/2015 (Deutsch). Bergische Gladbach,
- [151] ZAPKA, Werner (Hrsg.): Handbook of Industrial Inkjet Printing: A Full System Approach: Volume 1 & 2. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2018. – ISBN 978–3–527–68720–6
- [152] ZHANG, Jie: Auswertung der Farbproduktion von wasserbasierten Inkjet Tinten auf Faltschachtelkarton, Bergische Universität Wuppertal, Master-Thesis, 2019
- [153] ZHANG, Yan ; LIU, Zhulan ; CAO, Yunfeng ; LI, Ren'ai ; JING, Yi: Impact of binder composition on Inkjet printing Paper. In: BioResources 10 (2014), Nr. 1, S. 1462–1476

- [154] ZHENCAI, Qu ; GUANGXUE, Chen ; BAOLING, Tang ; SHUANGSHUANG, Wen: Effect of Paper Surface Characteristics on Dot Gain in Ink-jet Printing. In: Advanced Materials Research (2011), Nr. 174, S. 227–230

Eidesstattliche Erklärung

gem. § 7 Abs. 2 Promotionsordnung vom 29. Januar 2001 (Amtliche Mitteilungen Nr. 1 Jahrgang 30 vom 05.02.2001)

Rosalen, Sandra

Hiermit erkläre ich durch meine Unterschrift an Eides statt: Die eingereichte Dissertation habe ich selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe verfasst. Hierbei habe ich weder Textstellen von Dritten oder aus eigenen Prüfungsarbeiten, noch Grafiken oder sonstige Materialien ohne Kennzeichnung übernommen. Es sind ausschließlich die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet worden. Sämtliche wörtliche und nicht wörtliche Zitate aus anderen Werken sind gemäß den wissenschaftlichen Zitierregeln kenntlich gemacht. Die von mir vorgelegte Arbeit ist bisher noch in keiner Form als Bestandteil einer Prüfungs-/Qualifikationsleistung vorgelegt worden und wurde unter Beachtung der Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis erstellt.

Ich erkläre an Eides statt, dass meine Angaben der Wahrheit entsprechen und ich diese nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe.



08.04.2021, Bochum

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.