



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

## **Kurzfassung**

In dieser Arbeit wird die Druckfarbenpenetration von High-Speed Inkjet (HSI) Tinten untersucht. Im HSI Druck ist die Penetrationsgeschwindigkeit und die Benetzung der Farben bis zu einer Sekunde nach dem Druck sehr wichtig. Es werden vier Messinstrumente evaluiert: Penetration Dynamics Analyser, die Kontaktwinkelmessung, die IGT-Penetrationsmessung und die Automatic Scanning Absorptometer (ASA) Messung. Die ASA Messung wird anhand von drei Flüssigkeiten speziell nur mit dem PDA verglichen. Die Messungen werden jeweils auf drei verschiedenen Papieren durchgeführt: AKD-geleimtes Standard Office Papier, ein ungeleimtes HSI -Papier und ein ungeleimtes, pigmentiertes HSI Papier.

Der PDA misst die Penetrationsgeschwindigkeit der Flüssigkeit ins Papier und die Zeit der Benetzung. Die Kontaktwinkelmessung gibt Aufschluss über die Kontaktwinkeländerung mit der Zeit. Die Steigung dieser Kurve ist ein Maß für die Benetzung einer Flüssigkeit. Die ASA Messung zeigt an wieviel Flüssigkeit vom Papier in einer bestimmten Kontaktzeit zwischen Papier und Tinte aufgenommen wird und die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit.

Für die verwendete Probengröße und die Anzahl der Proben besitzen alle Methoden eine gute Wiederholbarkeit.

Die PDA und ASA Messung weisen ähnliche Ergebnisse für die Penetrationsgeschwindigkeit auf. Die Modellflüssigkeiten haben am AKD geleimten Papier eine langsamere Penetration und für das pigmentierte und das geleimte Papier wurde das Gegenteil festgestellt. Der PDA und die Kontaktwinkelmessung stellen für die Tinten die schnellste Benetzung fest. Eine Einschränkung gibt es jedoch für den PDA, er ist für Tinten die Partikel enthalten und Papieren, die eine HSI Oberflächenbeschichtung haben, schlecht geeignet. Die IGT Ergebnisse waren nicht plausibel. Diese Methode ist nicht für die Messung von Penetrationsgeschwindigkeit und Benetzung von HSI Tinten brauchbar.

Die HSI Tinten sind komplex in ihrer Zusammensetzung und die vollständige Rezeptur ist nicht bekannt. Um die Druckfarbenpenetration besser erklären zu können, werden Modellflüssigkeiten eingeführt: 100% Wasser, 20% Glykol / 80% Wasser, 20% Glycerin / 80% Wasser und 50% Wasser / 40% Glycerin / 10% Hexandiol. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Modellflüssigkeit mit Hexandiol das Verhalten der HSI Farbstofftinte am besten nachstellt.

## **Abstract**

In this study High Speed Inkjet (HSI) ink penetration is investigated. In HSI printing the penetration speed and wetting of the ink is important, especially at short timescales. Four measurement techniques are evaluated: Penetration Dynamics Analyzer (PDA), Fibro – Contact angle measurement, IGT – Penetration Test and Automatic Scanning Absorptometer (ASA). The ASA is compared to the PDA with three liquids. The measurements were performed on 3 different papers. These papers are an unsized HSI paper grade, an unsized pigmented HSI paper and an AKD sized standard office paper.

From the measurements of the four instruments, we have defined parameters describing the wetting of the liquid (responsible for ink spreading) and the penetration speed of the liquid. For the PDA we use the slope of the curve as indicator for the penetration speed and the time at the highest signal intensity as an indicator for the wetting. For the contact angle measurement, the slope of the curve represents the wetting of the liquid. The ASA measures the transferred liquid volume and the slope of the result curve represents the penetration speed.

For the sample size and the number of samples investigated in this study all four instruments show good repeatability.

PDA and ASA measurement deliver similar results for the penetration speed. On the AKD sized paper the model liquids have slower penetration speed than the HSI inks. For the other 2 papers it is the opposite. For wetting (ink spreading) PDA and contact angle measurement showed similar results, the printing inks had strongest wetting. The IGT measurements gave implausible results, indicating that this technique is not suitable for measuring penetration speed or wetting of HSI inks.

HSI inks are complex mixtures containing different components influencing the behaviour of the ink. For better understanding of the effect of HSI printing ink composition on penetration and wetting, we have studied four model liquids: 100% water, 80% water/20% glycerol, 80% water/20% glycol and 50% water/40% glycerol/10% hexanediol. The mixture water/glycerine/hexanediol behaves very similar like the HSI dye inks and is an appropriate model liquid for simulating the penetration and wetting of these inks.

## Inhalt

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Physik von Flüssigkeiten in Kapillaren .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Benetzbarkeit.....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Oberflächenspannung.....	3
<b>2.2. Kontaktwinkel .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Kapillarität .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4. Porenstruktur .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Penetrationsmechanismen .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Lucas –Washburn Gleichung .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2. Bosanquet Gleichung .....</b>	<b>12</b>
<b>4. Druckverfahren .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1. Druckformgebundenen Druckverfahren.....</b>	<b>16</b>
4.1.1. Hochdruck .....	16
4.1.2. Tiefdruck .....	17
4.1.3. Flachdruck .....	17
4.1.4. Siebdruck.....	18
<b>4.2. Druckverfahren ohne Druckform.....</b>	<b>18</b>
4.2.1. Elektrofotografie.....	19
4.2.2. Ionengrafie .....	19
4.2.3. Magnetografie .....	19
4.2.4. Thermodruck .....	19
4.2.5. Inkjet .....	19
<b>5. Inkjet – Verfahren .....</b>	<b>20</b>
<b>5.1. Arten des Inkjet Verfahrens.....</b>	<b>20</b>
5.1.1. Kontinuierliches Verfahren (Continuous Inkjet) .....	20
5.1.2. Diskontinuierlich Verfahren (Drop on Demand) .....	21
5.1.3. Tropfenbildung, Auftreffen auf dem Papier und Trocknung der Tinte beim HSI Druck.....	23
<b>5.2. Inkjet Tinten.....</b>	<b>25</b>
5.2.1. Wasserbasierende Tinten .....	26
<b>6. Messverfahren.....</b>	<b>28</b>

<b>6.1. Penetration Dynamics Analyser (PDA)</b> .....	<b>28</b>
<b>6.2. Fibro – Kontaktwinkelmessung</b> .....	<b>30</b>
<b>6.3. IGT – Druckpenetration</b> .....	<b>31</b>
<b>6.4. Automatic Scanning Absorptometer (ASA)</b> .....	<b>33</b>
<b>7. Papiere und Flüssigkeiten</b> .....	<b>35</b>
<b>7.1. Grunddaten Papiere</b> .....	<b>35</b>
<b>7.2. Grunddaten Flüssigkeit</b> .....	<b>38</b>
<b>8. Evaluierung der Messmethoden</b> .....	<b>40</b>
<b>8.1. Penetration Dynamics Analyser (PDA)</b> .....	<b>40</b>
8.1.1. AKD geleimtes Papier .....	40
8.1.2. Ungeleimtes Papier .....	42
8.1.3. Pigmentiertes Papier .....	44
8.1.4. Zusammenfassung.....	46
<b>8.2. Kontaktwinkel – Messung</b> .....	<b>47</b>
8.2.1. AKD geleimtes Papier.....	47
8.2.2. Ungeleimtes Papier .....	49
8.2.3. Pigmentiertes Papier .....	51
8.2.4. Zusammenfassung.....	53
<b>8.3. IGT Messung</b> .....	<b>53</b>
8.3.1. AKD –Papier.....	53
8.3.2. Ungeleimtes Papier .....	58
8.3.3. Pigmentiertes Papier .....	62
8.3.4. Zusammenfassung.....	66
<b>8.4. Automatic Scanning Absorptometer (ASA)</b> .....	<b>66</b>
8.4.1. AKD geleimtes Papier.....	66
8.4.2. Ungeleimtes Papier .....	68
8.4.3. Pigmentiertes Papier .....	69
8.4.4. Zusammenfassung.....	69
<b>8.5. Vergleich der drei Papiere</b> .....	<b>71</b>
8.5.1. Benetzung .....	71
8.5.2. Penetrationsgeschwindigkeit .....	74
<b>9. Schlussfolgerung</b> .....	<b>76</b>

<b>10. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>78</b>
<b>11. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>82</b>
<b>12. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>86</b>

# 1. Einleitung

Die Druckfarbenpenetration von High Speed Inkjet (HSI) Tinte spielt eine wichtige Rolle im HSI Druck. Sie nimmt Einfluss auf die Farbdichte und die Druckgleichmäßigkeit des gedruckten Bildes [1]. Die HSI Tinte benötigt wenig Zeit um auf dem Papier zu trocknen, daher ist es wichtig die Aspekte der Druckfarbenpenetration bereits im Millisekunden Bereich nach dem Auftreffen der Flüssigkeit auf dem Papier zu messen. Es gibt einige Messmethoden, die die Druckfarbenpenetration in diesem kurzen Zeitintervall charakterisieren können. In dieser Diplomarbeit werden der Penetration Dynamics Analyser, die Kontaktwinkelmessung, die IGT-Penetrationsmessung und die Automatic Scanning Absorptometer (ASA) Messung verwendet. Diese Methoden messen jedoch unterschiedliche Aspekte der Druckfarbenpenetration. Ein Ziel der Arbeit ist es die verschiedenen Methoden miteinander zu vergleichen und zu verstehen welche Aspekte der Druckfarbenpenetration diese charakterisieren. Auch die Plausibilität der Ergebnisse wird überprüft.

HSI Tinten sind komplex in ihrer Zusammensetzung und die vollständige Rezeptur ist nicht bekannt. Jeder Bestandteil beeinflusst die Eigenschaften der Farbe. Daher ist es schwer das Verhalten am Papier zu erklären und den einzelnen Komponenten ihren Einfluss daran zu zuweisen. Um die Druckfarbenpenetration besser erklären zu können, werden Modellflüssigkeiten eingeführt. Durch Studium des Penetrationsverhaltens von diesen hoffen wir auch den Einfluss einzelner Komponenten der Tinte besser verstehen zu können.

Das Verhalten der Modellflüssigkeiten auf dem Papier soll möglichst ähnlich zu jenem von High Speed Inkjet (HSI) Tinten sein. Die Parameter mit denen die Modellflüssigkeiten an die Tinte angepasst wurden, sind: die Dichte, die Viskosität und die Oberflächenspannung.

In dieser Diplomarbeit werden, auf Rat der Firma Ocè, 4 Testflüssigkeiten getestet. Diese sind:

- 100% Wasser
- 20% Glykol / 80% Wasser
- 20% Glycerin / 80% Wasser,
- 50% Wasser / 40% Glycerin / 10% Hexandiol

Die Versuchsergebnisse der Modellflüssigkeiten werden anschließend mit den Resultaten aus den Messungen mit realen Tinten verglichen und evaluiert. Verwendet werden dazu sechs Tinten. Alle Tinten sind wasserbasierend, zwei davon haben Pigmente, zwei von ihnen Latex - Partikel und Pigmente und zwei davon Farbstoffe als farbgebende Komponente.

Die Messungen werden jeweils auf drei verschiedenen Papieren durchgeführt, die im Laufe des CD-Labors für Messungen und Versuchsreihen verwendet werden. Bei den Papieren handelt es sich um AKD-geleimtes Standard Office Papier, ein ungeleimtes Papier und ein ungeleimtes, pigmentiertes HSI Papier. Die HSI Papiere haben eine Oberflächenbehandlung mit Kalziumchlorid zur Farbfixierung.

## **2. Physik von Flüssigkeiten in Kapillaren**

Das Verstehen der physikalischen Eigenschaften des Papieres und der Flüssigkeit in Hinblick auf die Penetration ist Voraussetzung für eine korrekte Evaluierung der Messverfahren und der Modellflüssigkeiten. Im folgenden Kapitel werden die Grundbegriffe der physikalischen Eigenschaften genauer erklärt und mit Hilfe von Abbildungen veranschaulicht.

### **2.1. Benetzbarkeit**

Die Benetzbarkeit ist ein Maß für die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche. Diese physikalische Eigenschaft ist von der zu befeuchtenden Oberfläche und der benetzenden Flüssigkeit abhängig. Die Benetzbarkeit wird von der Wechselwirkung zwischen Adhäsions- und Kohäsionskraft beeinflusst. Kohäsionskraft wird die Anziehungskraft zwischen Molekülen gleichen Typs genannt (zum Beispiel zwischen den Flüssigkeits – Molekülen). Adhäsionskraft wird die Attraktionskraft zwischen Teilchen unterschiedlicher Art genannt. Diese herrscht zwischen den Molekülen von Feststoff und Fluid. Eine gute Benetzbarkeit ist vorhanden, wenn sich die Flüssigkeit auf der festen Oberfläche leicht ausbreitet und einen Film anstatt eines Tropfen bildet. Um die genauen Vorgänge der Benetzbarkeit zu verstehen, muss zuerst der Begriff der Oberflächenspannung erläutert werden.

#### **2.1.1. Oberflächenspannung**

Die Form eines Flüssigkeitstropfens ist durch die Oberflächenspannung des Fluides beeinflusst. In einer reinen Flüssigkeit haben die Moleküle, die sich im Inneren der Flüssigkeit befinden ein Kräftegleichgewicht. Jedes Molekül ist von anderen Molekülen gleicher Art umgeben. Moleküle vom gleichen Typ üben aufeinander dieselbe Anziehungs- und Abstoßungswirkung aus, deswegen sind sie im Gleichgewicht, siehe Abbildung 1 [2]. Moleküle, die sich an der Oberfläche eines Tropfens befinden, haben nur im Inneren Moleküle vom gleichen Typ, die resultierende Kraft ist daher nicht null. (Diese Moleküle haben nur auf einer Seite gleichwertige Partnermoleküle mit sich aufhebender Kräftewirkung) Stellt man eine Kräftebilanz über alle, sich im Fluid befindenden Moleküle auf, so ergibt sich daraus ein Kräfteungleichgewicht. Dieses Ungleichgewicht entsteht, weil auf die Teilchen an der Oberfläche eine Nettokraft wirkt. Diese steht senkrecht auf die Oberfläche des Fluidtropfens und zeigt zu dessen Mitte [2], [3]. Die Oberflächenspannung wird also durch die Moleküle an der Oberfläche hervorgerufen, die aufgrund des Ungleichgewichts eine Kraft nach innen erfahren. Diese Kraft versucht, die

Oberfläche des Fluides so klein wie möglich zu halten. Je kleiner die Oberfläche, desto kleiner die freie Oberflächenenergie, da sich weniger Moleküle, mit einer angreifenden Nettokraft, an der Oberfläche befinden. Dies ist der Grund warum Flüssigkeiten immer bestrebt sind, eine Kugelform anzunehmen. Diese hat bei gleichem Volumen die kleinste Oberfläche [1], [4].

In Abbildung 1 ist ein solcher Tropfen zu sehen. Die Zeichnung veranschaulicht die Moleküle im Kräftegleichgewicht (im Inneren) beziehungsweise das Kräfteungleichgewicht der Teilchen an der Oberfläche. Je stärker die nach innen gerichtete Kraft ist, desto runder wird der Tropfen und desto höher wird der Kontaktwinkel [4], [5]. Dieser Winkel wird im folgenden Unterkapitel näher erklärt.

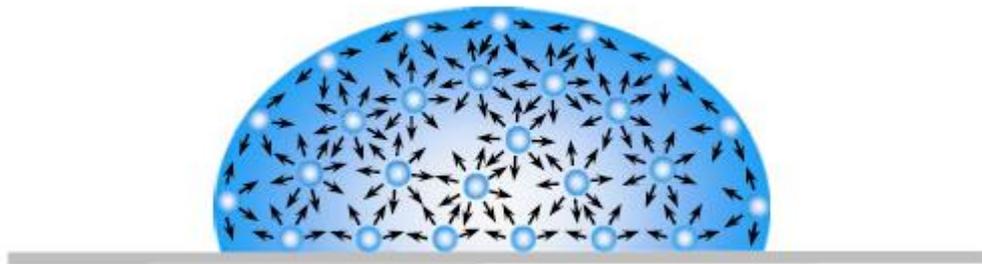


Abbildung 1: Fluidtropfen mit Molekülen im Kräftegleichgewicht im Inneren und Molekülen im Kräfteungleichgewicht an der Tropfenoberfläche [2].

## 2.2. Kontaktwinkel

In Abbildung 5 ist zu sehen, dass Wasser und Quecksilber und ihre Benetzungsfähigkeit mit Hilfe eines Winkels  $\theta$  verdeutlicht werden. Genau dieser Winkel wird als Kontaktwinkel bezeichnet und ist wichtig, wenn es um das Erfassen der Benetzungsfähigkeit geht. Er ist ein Maß für das Verhältnis der Kohäsions- und Adhäsionskräfte [5].

Erstmals wurde dieses Verhalten von dem Wissenschaftler Thomas Young zu Beginn des 19. Jahrhunderts festgehalten [6]. Young stellte ein Gleichgewicht zwischen einem Fluid und einer festen Oberfläche, die von jenem Fluid teilweise benetzt wird, fest. Er führte zur Charakterisierung dieses Verhaltens, den Kontaktwinkel ein. Der Kontaktwinkel ist jener Winkel  $\theta$ , der durch das Anlegen einer Tangente an die Flüssigkeitsoberfläche zwischen der Tangente und der Feststoffoberfläche entsteht. Dies ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

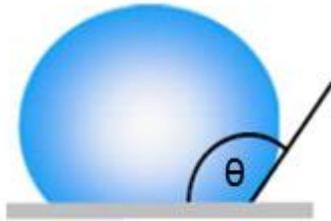


Abbildung 2: Kontaktwinkel zwischen Tangente an Tropfenoberfläche und Feststoffoberfläche [2].

Der Kontaktwinkel wird durch die Formel 1 beschrieben. Die Wirkung von drei Grenzflächenspannungen ( $\gamma_{lv}$ ,  $\gamma_{sv}$ , und  $\gamma$ ), die auf einen Tropfen, der sich auf einer festen Oberfläche befindet wirken, werden ins Gleichgewicht gesetzt [2], [7]. In Abbildung 3 sind die Grenzflächenspannungen um den Tropfen eingezeichnet. Hier wird verdeutlicht, dass das Verhalten bei der Benetzung ein Wechselspiel der Oberflächenspannungen ist [8].

Formel 1: Young'sche Gleichung [6]

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{f-g} - \gamma_{fl-g}}{\gamma}$$

$\theta =$  Kontaktwinkel nach Young [-]

$\gamma_{f-g} =$  Festkörper-Gas Oberflächenspannung der Grenzfläche [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]

$\gamma_{fl-g} =$  Flüssigkeit-Gas Oberflächenspannung der Grenzfläche [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]

$\gamma =$  Festkörper-Flüssigkeit Oberflächenspannung der Grenzflächen [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]

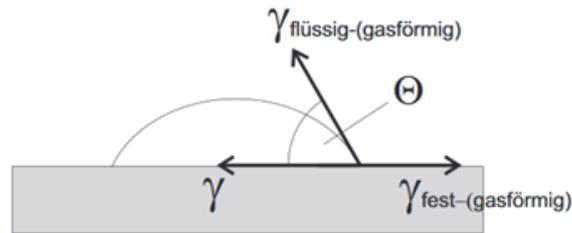


Abbildung 3:Oberfl\u00e4chenspannungen an einem Tropfen  
auf einer festen Oberfl\u00e4che [2]

In Abbildung 4 sind verschiedene Kontaktwinkel dargestellt. Auf dem ersten Bild von links sieht man einen resultierenden Winkel gleich Null. Die Fl\u00fcssigkeit bildet keinen Tropfen mehr, sondern einen d\u00fcnnen Film und bedeckt die gesamte Fl\u00e4che mit einer d\u00fcnnen Schicht. Adh\u00e4sionskr\u00e4ften ( $W_A$ ) entsprechen den Koh\u00e4sionskr\u00e4ften ( $W_K$ ). Auf dem zweiten Bild von links sieht man einen resultierenden Winkel  $\theta$  der unter 90 Grad betr\u00e4gt, daraus folgt, dass die Fl\u00fcssigkeit die Oberfl\u00e4che des Festk\u00f6rpers leicht benetzt. Die Koh\u00e4sionskr\u00e4fte ( $W_K$ ), die Kraft zwischen gleichen Molek\u00fclen wirkt st\u00e4rker als die Adh\u00e4sionskraft [5], [9]. Fl\u00fcssigkeiten mit einem Kontaktwinkel gr\u00f6\u00dfer  $90^\circ$  (in Abbildung 4, viertes Bild von links), haben eine schlechte Benetzbarkeit. Die Fl\u00fcssigkeit besitzt eine kleine Kontaktfl\u00e4che mit dem Substrat und bildet einen stehenden Tropfen. Die Koh\u00e4sionskr\u00e4fte, die Kr\u00e4fte zwischen Molek\u00fclen gleicher Art sind auch hier gr\u00f6\u00dfer als die Adh\u00e4sionskr\u00e4fte. Ein weiteres Extremum tritt bei \u00fcber 150 Grad auf. Ein Winkel  $\theta$  gr\u00f6\u00dfer als  $150^\circ$  weist auf eine super-hydrophobe Festk\u00f6rper-Oberfl\u00e4che hin und die Fl\u00fcssigkeit bildet nahezu einen kugelf\u00f6rmigen Tropfen. Dies wird zum Beispiel durch den Lotuseffekt hervorgerufen, der in der Natur bei der Lotusbl\u00fcte geschieht [9].

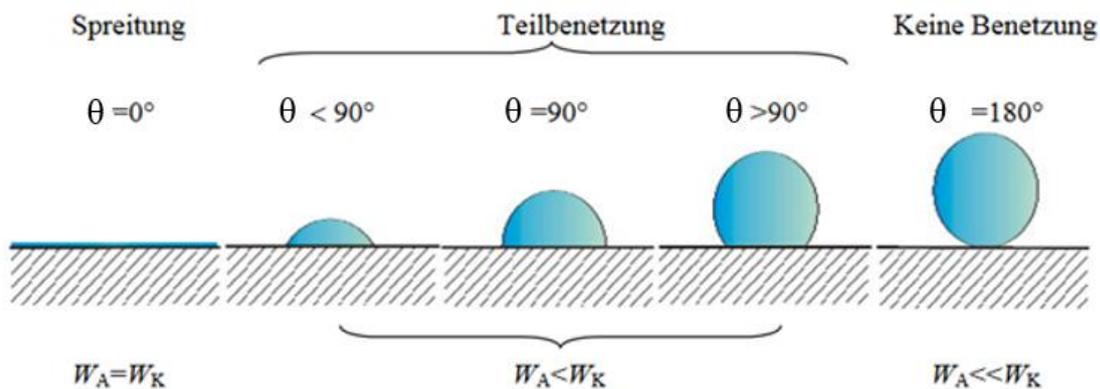


Abbildung 4: verschiedene Kontaktwinkel und ihre Folgen für die Benetzung [10]

### 2.3. Kapillarität

Die Oberflächenspannung und der Kontaktwinkel sind für die Kapillarität relevant. In Abbildung 5 ist zu sehen, dass Wasser die Glaswand emporsteigt ( $\theta < 90^\circ$ ) während das Quecksilber nach unten wandert ( $\theta > 90^\circ$ ), wenn es mit dem Glas in Kontakt kommt. Die Benetzbarkeit ist bei Wasser größer als bei Quecksilber. Dies liegt daran, dass die Kohäsionskräfte zwischen den Quecksilbermolekülen stärker sind als die Adhäsionskräfte zwischen Glasmolekülen und den Quecksilbermolekülen. Vice versa für das Verhalten von Wasser an einer Glasfläche [11]. Die Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche, die entsteht wenn man ein Fluid in Kontakt mit einem Behälter bringt, nennt man Meniskus, siehe Abbildung 5 [12].

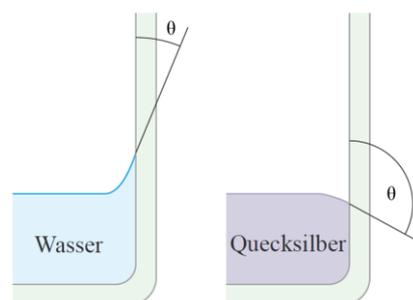


Abbildung 5: Wasser und Quecksilber und ihre Kontaktwinkel in einem Glasbehälter [11]

Ein Meniskus bildet sich auch in einem dünnen Rohr. Dieses wird als Kapillare bezeichnet [11]. In einer Kapillare bildet sich eine Druckdifferenz, der Kapillardruck. Der Druck wird durch die Young – Laplace Gleichung, Formel 2, ermittelt [12]. Der Kapillardruck (und damit die

Steighöhe einer Flüssigkeit in einer Kapillare) erhöht sich, wenn die Oberflächenspannung steigt, der Kontaktwinkel sinkt und der Radius der Pore abnimmt. Dies gilt für konvergierende Poren. Für divergente Poren kann es trotz sinkendem Kontaktwinkel zu einer Abnahme der Steighöhe kommen, wenn die Formel 3 nicht erfüllt wird. Je kleiner der Durchmesser des dünnen Rohres, desto höher die Steighöhe, siehe Abbildung 6. Die Druckdifferenz, oder der Kapillardruck, ist eine der wichtigsten Einflussgrößen der Penetrationslänge.

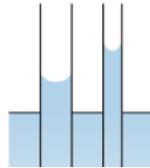


Abbildung 6: Steighöhe einer Flüssigkeit erhöht sich, wenn der Radius der Kapillare sinkt

Formel 2: vereinfachte Gleichung

$$\nabla P = \frac{2 * \gamma * \cos \theta}{R}$$

$\theta$  = Kontaktwinkel [°]

$\nabla P$  = Kapillardruck [N/m<sup>2</sup>]

$\gamma$  = Oberflächenspannung [N/m]

$R$  = Radius [m]

## 2.4. Porenstruktur

Die Poren des Papiers sind die Kapillaren, die für die Penetration ausschlaggebend sind. Die Porenstruktur des Papiers ist weder homogen, noch haben diese Poren immer die Form eines Zylinders, wie in den meisten Modellen angenommen wird. Diese inhomogene Struktur beeinflusst die reale Flüssigkeitspenetration sehr stark [13]. Es gibt verschiedene Fälle, wie eine Pore beziehungsweise die Porenstruktur vorliegen kann. Der einfachste und in den Modellen am häufigsten verwendete Aufbau einer Pore ist zylindrisch. In einer zylindrischen Pore findet die Benetzung bei einem Kontaktwinkel  $\theta$  kleiner 90 Grad statt. Der Meniskus der Flüssigkeit hat in diesem Fall eine konkave Form. Der Unterdruck, in der Kapillare ist dafür verantwortlich, dass die Flüssigkeit in die Kapillare gesaugt wird [13], [14].

Ein komplexerer Fall sind konvergierende oder divergierende Poren, wie in Abbildung 7 dargestellt. In konvergierenden Poren ist es möglich, dass ein Fluid mit einem Kontaktwinkel  $\theta$  größer als  $90^\circ$  die Oberfläche der Pore benetzt, da trotzdem eine konkave Oberflächenform entsteht. Im Gegensatz dazu kann es bei divergierenden Poren vorkommen, dass keine Benetzung stattfindet, obwohl der Kontaktwinkel  $\theta$  kleiner als  $90^\circ$  ist. Dies liegt am Winkel der Divergenz, dadurch bildet die Oberfläche eine konvexe Form und die Penetration findet nicht statt. Benetzung in einer divergenten oder konvergenten Kapillare findet also bei einem Winkel  $\theta$  statt, der die Formel 3 erfüllt. Der Kontaktwinkel  $\theta$  muss kleiner als  $90^\circ$  plus dem Öffnungswinkel  $\omega$  der Kapillare sein.

Formel 3: Kontaktwinkel für divergente und konvergente Poren

$$\Theta \leq 90^\circ + \omega$$

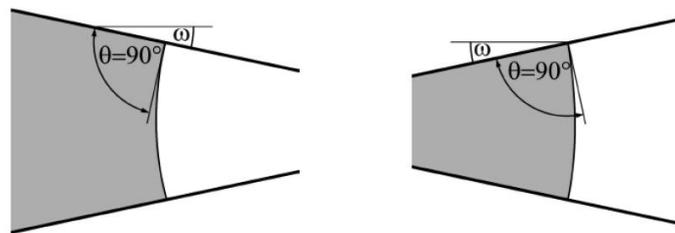


Abbildung 7: Konvergierenden und divergierenden Poren[13]

Das Papier besitzt Poren die konvergent und divergent sein können, siehe Abbildung 8. Die Penetration zu dieser Abbildung findet ohne externen Druck statt und startet stetig. Im Punkt C findet eine sprunghafte Beschleunigung der Flüssigkeit statt, da die Pore ab hier stärker konvergiert. Ab Punkt D wird die Penetration aufgrund des divergierenden Porenverlaufs verlangsamt. Es kann sogar zum völligen Stillstand kommen, falls der Öffnungswinkel der divergenten Pore plus 90 Grad größer als der Winkel  $\theta$  wird, siehe Formel 3.

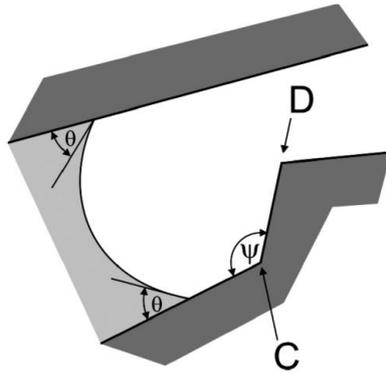


Abbildung 8:divergenter und konvergenter Formverlauf innerhalb einer Pore [14]

### 3. Penetrationsmechanismen

Die Penetrationsmechanismen werden von den physikalischen Eigenschaften des Papiers und der Flüssigkeit beeinflusst. Diese Eigenschaften wurden im letzten Kapitel näher erläutert, nun wird auf die mathematische Beschreibung der Penetrationslänge eingegangen.

#### 3.1. Lucas –Washburn Gleichung

Die Geschwindigkeit einer Flüssigkeit, die laminar in einen Zylinder, strömt und eine definierte Viskosität besitzt, wird mit dem Poiseuille Gesetz, Formel 4, bestimmt. Das bedeutet, je größer der Radius der Pore und je kleiner die Viskosität der Flüssigkeit ist, desto schneller schreitet die Penetration voran.

Formel 4: Poiseuille Gesetz [13]

$$\frac{dl}{dt} = \frac{P * R^2}{8 * l * \eta}$$

$P$	= Flüssigkeitsdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$\eta$	= Viskosität [Ns/m <sup>2</sup> ]
$R$	= Radius [m]	$l$	= Penetrationslänge[m]
$t$	= Zeit [s]		

Die Lucas – Washburn (LW) Gleichung erhält man, indem der Druck (P) im Poiseuille Gesetz mit der Formel 2 für den Kapillardruck ausgedrückt wird und anschließender Integration von dieser Gleichung. Die LW Gleichung ist in Formel 5 abgebildet und setzt die Druckkraft und die viskosen Kräfte ins Gleichgewicht.

Formel 5: Lucas – Washburn Gleichung

$$l^2 = \frac{R * t * (2 * \gamma * \cos \theta_\gamma + P_e * R)}{4 * \eta}$$

$P_e$  = externer Druck (falls vorhanden) [N/m<sup>2</sup>]

$l$  = Penetrationslänge [m]

$R$  = Radius [m]

$\theta_\gamma$  = Kontaktwinkel [°]

$\gamma$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [N/m]

$\eta$  = Viskosität [Ns/m<sup>2</sup>]

$t$  = Zeit [s]

Diese Gleichung ist für ein sehr stark idealisiertes System gültig, in dem eine einzelne Kapillare betrachtet wird, die leer, gerade, nicht verformbar und zylindrisch ist und eine glatte Oberfläche hat. Weiteres ist sie nur für den stationären, stabilen Zustand einer Kapillarströmung gültig, die sich nach anfänglicher Beschleunigung der Flüssigkeit einstellt. Die Lucas -Washburn Gleichung wird für Flüssigkeiten mit hoher Viskosität und einem Substrat mit kleinen Poren angewendet. Der Übergang zwischen Bosanquet und Lucas-Washburn findet bei diesen Voraussetzungen bereits nach kurzer Zeit statt, siehe Kapitel 3.2.

### 3.2. Bosanquet Gleichung

Auch die Bosanquet Gleichung ist für ein sehr stark idealisiertes System gültig, in dem eine einzelne Kapillare betrachtet wird, die leer, gerade, nicht verformbar und zylindrisch ist und eine glatte Oberfläche hat. Die Lucas-Washburn Gleichung berücksichtigt nur die Reibungskräfte, die auf die Flüssigkeit beim Fluss in der Kapillare wirken. Ein weiterer wichtiger Part der Kräftebilanz, die Trägheitskräfte bei der anfänglichen Beschleunigung der Flüssigkeit, wird nicht beachtet. Diese wirken auf das Fluid beim Beginn der Penetration und nehmen mit der Zeit ab. Im Gegensatz dazu wird mit zunehmender Penetrationsdauer die Reibungskraft größer. Schlussendlich ist die Strömung stationär und laminar und erfüllt wieder die LW-Gleichung [15]. In Formel 7 ist die Bosanquet Formel dargestellt. Diese stellt eine Kräftebilanz dar, in der die Reibungskraft  $F_R$  und Trägheitskraft  $F_T$  mit der Druckkraft  $F_P$  und

Benetzungskraft  $F_B$  gleichgesetzt werden. Die Trägheitskraft  $F_T$  beschreibt die Kraft die am Beginn der Strömung gegen die Beschleunigung wirkt und die Reibungskraft  $F_R$  beschreibt den Reibungswiderstand gegen den Fluss des Fluids in der Kapillare. Durch einen möglichen externen Druck wird eine Druckkraft  $F_P$  auf das Fluid ausgeübt und die Benetzungskraft  $F_B$  wird direkt von dem Kontaktwinkel und der Oberflächenspannung beeinflusst.

Formel 6: Bosanquet –Formel [16]

$$\frac{d}{dt} \left( \pi R^2 \rho l \frac{dx}{dt} \right) + 8\pi\eta l \frac{dl}{dt} = P_e \pi R^2 + 2\pi R \gamma \cos \theta_\gamma$$

$P_e$  = externer Druck (falls vorhanden) [N/m<sup>2</sup>]

$l$  = Penetrationslänge [m]

$\rho$  = Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]

$t$  = Zeit [s]

$R$  = Radius der Pore [m]

$\theta_\gamma$  = Kontaktwinkel [°]

$\gamma$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [Ns/m<sup>2</sup>]

$\eta$  = Viskosität [Ns/m<sup>2</sup>]

Die Bosanquet – Gleichung gilt nicht nur für den speziellen Fall der LW Gleichung, sondern auch für mittelgroße bis große Poren und für Flüssigkeiten mit hohen Dichten. Hier nimmt die Masse der Flüssigkeit zu und der Einfluss der Trägheitskräfte am Beginn der Strömung vergrößert sich. Je kleiner die Poren und die Dichte werden, desto geringer der Einfluss durch die Trägheitskraft am Start der Strömung und desto früher entsprechen die Ergebnisse der Lucas Washburn Gleichung den tatsächlichen Werten [15].

Für den Beginn der Strömung kann die Bosanquet-Gleichung vereinfacht werden. Man erhält die Formel für den Inertial Flow, siehe Formel 7. Die Penetrationslänge ist direkt proportional zur Zeit. Im Gegensatz dazu ist bei der LW-Gleichung die Wurzel der Penetrationslänge  $x$  proportional zur Zeit [16], vergleichsweise Formel 5.

Formel 7: Inertial Flow [16]

$$l = t * \sqrt{\frac{2 * \gamma * \cos \theta_{\gamma}}{R * \rho}}$$

$\rho$  = Dichte des Fluides [kg/m<sup>3</sup>]

$t$  = Zeit [s]

$R$  = Radius [m]

$\theta_{\gamma}$  = Kontaktwinkel [°]

$\gamma$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [N/m]

$l$  = Penetrationslänge [m]

In Abbildung 9 sind die LW - Gleichung, die Bosanquet Formel und die Beschreibung des Inertial Flow zu sehen. Auf der Ordinate ist die Penetrationslänge aufgetragen und auf der Abszisse die Zeit. Die Ergebnisse der drei Formeln wurden für zwei verschiedene Porengrößen aufgetragen, für 1  $\mu$ m und 1 nm. Für die Resultate der kleineren Porengröße wird der Übergang (Changeover) zwischen Bosanquet und Lucas-Washburn bereits nach circa  $1 * 10^{-8}$  Sekunden erreicht. Im Gegensatz dazu wird bei einer Porengröße von 1 nm der Übergang um den Faktor  $10^5$  später erreicht. Das bedeutet, dass der Übergang von einer Trägheit - gesteuerten Strömung zu einer viskosen Strömung bei Poren mit großem Radius zu einem späteren Zeitpunkt passiert.

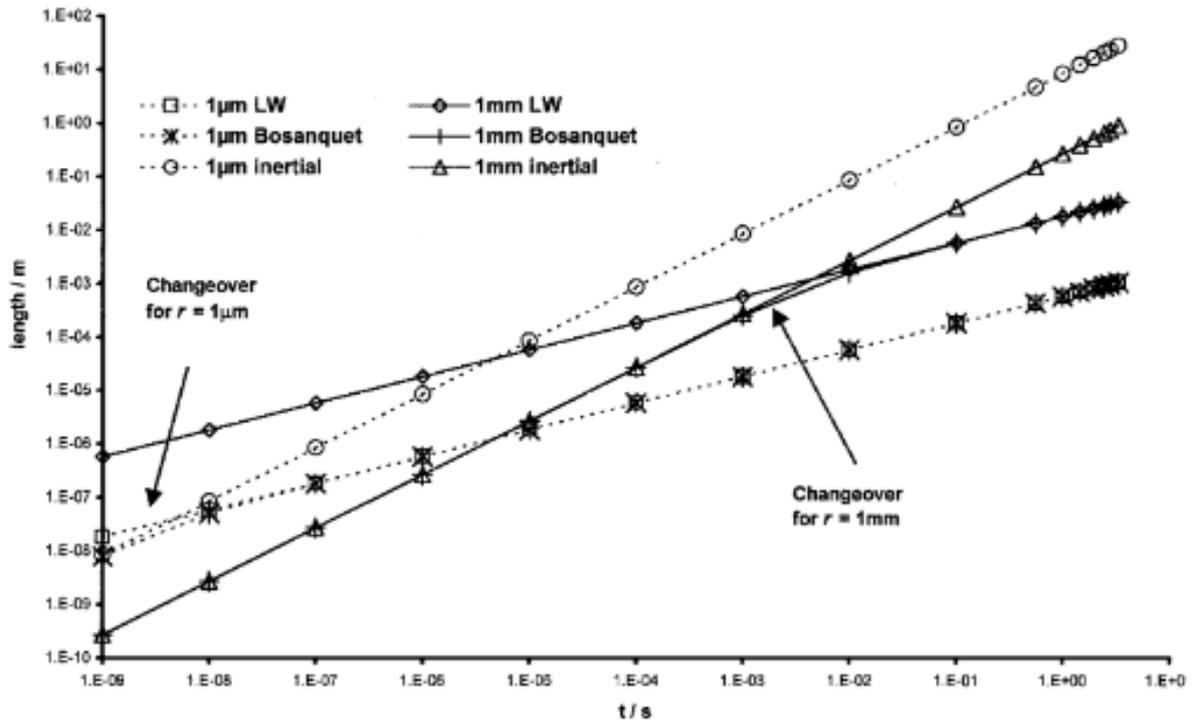


Abbildung 9: Penetration nach Lucas-Washburn, Bosanquet und inertial flow [16]

## **4. Druckverfahren**

Mit der Erfindung der Handpresse gelang Johann von Gutenberg ein Meilenstein in der Entwicklung der Drucktechniken. Diese Maschine läutete das Zeitalter der Massenfertigung von bedrucktem Papier ein. Erstmals konnten Mitteilungen ohne mühsames Abschreiben auf Papier gebracht werden. Die zweite Revolution gelang der Industrie um 1800. Das automatische Schnellpressen und der Rotationsdruck lösten die Handpresse allmählich ab. Der, bis jetzt, letzte Schritt in der Entwicklung der Druckverfahren ist das elektronische Verfahren oder auch Digitaldruck genannt und wird in den kommenden Jahren immer wichtiger werden [17].

Im folgenden Teil dieser Arbeit wird zwischen Druckformgebundenen Druckverfahren und Druckverfahren ohne Druckform unterschieden und die wichtigsten Verfahren von diesen, näher erläutert.

### **4.1. Druckformgebundenen Druckverfahren**

Konventionelle Druckverfahren sind an die Druckform gebunden. Der Schriftzug oder das Bild, das auf das Papier oder anderen Stoffen aufgebracht werden soll, wird als Druckvorlage auf eine feste Druckform abgebildet. Diese Druckform wird dann mehrere Male verwendet um viele Kopien der Vorlage zu produzieren [18]. Diese Kategorie der Druckverfahren kann in Hochdruck (inkl. Flexodruck), Tiefdruck, Flachdruck und Siebdruck unterteilt werden [17],[18].

#### **4.1.1. Hochdruck**

Der Hochdruck und in spezifischerem Sinne Flexodruck ist die Weiterentwicklung der Gutenberger Handpresse. Der Hochdruck war bis Mitte der 1970er die Drucktechnik schlecht hin. Danach wurde immer mehr mit Offset (siehe Kapitel 4.1.3) gedruckt. Der Unterschied zwischen dem Buchdruck (der herkömmlichen Hochdruckmethode) und dem Flexodruck ist lediglich die Beschaffenheit der Druckform. Diese ist bei letzterer Technik weich, elastisch und biegsam, also flexibel [19].

Beim Drucken selbst wird die Farbe auf die Erhöhungen der Druckvorlage (Formzylinder) aufgebracht und so auf den Bedruckstoff gebracht. Die erhöhten Stellen hinterlassen Tintenspuren auf dem Papier, während die niedrigen Stellen für Leerzeichen verwendet werden [17]. Dieses Schema ist in Abbildung 10 dargestellt.

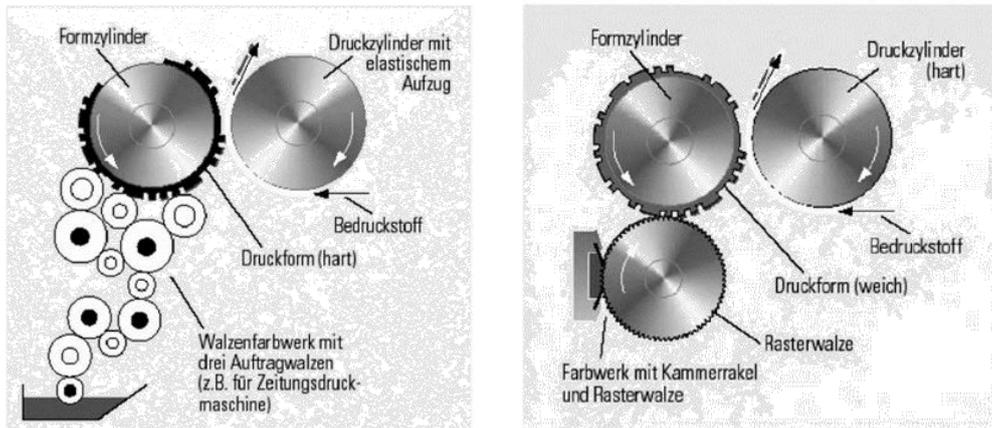


Abbildung 10: links: Buchdruck, rechts: Flexodruck. Der Bedruckstoff wird mit einer weichen Druckvorlage (Flexodruck) beziehungsweise mit einer harten Druckvorlage (Buchdruck) bedruckt. [19]

#### 4.1.2. Tiefdruck

Der Tiefdruck funktioniert gegengleich zum Hochdruckverfahren. Die Vertiefungen der Druckvorlage nehmen die Tinte auf und transportieren diese an das Papier. Dies bedeutet, dass nicht zu druckende Stellen erhöht sind. Die Farbe wird direkt von der Vorlage auf den Bedruckstoff aufgetragen, zu sehen in Abbildung 11 [19],[20].

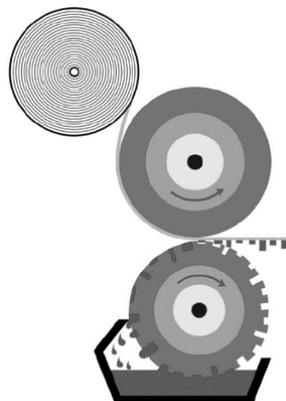


Abbildung 11: Schema des Tiefdrucks. Die Vertiefungen in der Walze transportieren die Tinte auf das Papier [19]

#### 4.1.3. Flachdruck

Das Flachdruckverfahren beziehungsweise im engeren Sinne, der Offsetdruck ist in der Industrie das am häufigsten verwendete Verfahren [20]. Dabei wird das Druckergebnis weder durch Erhöhungen noch durch Vertiefungen auf das Papier gebracht. Die farbübertragenden Stellen und nicht übertragenden Stellen liegen alle in einer Ebene und werden durch die

unterschiedliche physikalische Beschaffenheit der Druckplatte erzeugt. Die Stellen, die Farbe übertragen sollen sind farbanziehend also feuchtigkeitsabweisend und vice versa. Die Farbe enthält fetthaltige Bindemittel und setzt sich an den fettaufnehmenden Stellen der Druckplatte ab. Dies geschieht überall dort wo die Platte feuchtigkeits-abweisend ist, da sich dort keine Feuchtigkeit befindet [17]–[19]. Ein schematischer Aufbau des Offsetdrucks ist in Abbildung 12 zu sehen. Dabei wird die Farbe von der Druckvorlage zuerst auf ein Tuch aus Gummi und danach auch auf das Papier übertragen.

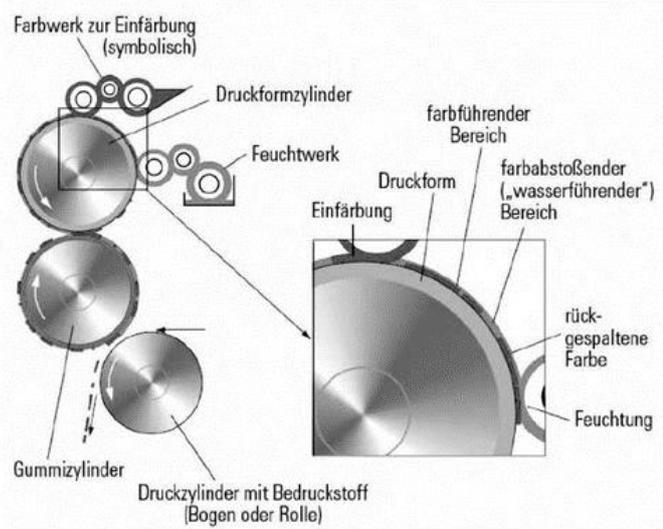


Abbildung 12: Schema des Offsetdrucks. Die Farbe wird von der Druckvorlage auf ein Gummi-Tuch und dann auf das Papier übertragen [20]

#### 4.1.4. Siebdruck

Bei diesem Verfahren wird die Farbe durch ein Sieb aufgebracht. An den Stellen die keine Tinte durchlassen, werden die Maschen undurchlässig für die Farbe gemacht. Durch die besonders großen Mengen an Tinte die verwendet werden können, ist dieses Verfahren speziell für Druckerzeugnisse geeignet, die ein hohe Farbdichte benötigen. Zum Beispiel für Druck auf Holz oder Keramik [19].

#### 4.2. Druckverfahren ohne Druckform

Den meisten digitalen Druckverfahren ist gemein, dass sie keine feste, physikalische Druckvorlage haben. Das heißt die Farbe wird nicht durch Druck übertragen. Die Wichtigsten Druckverfahren laut Blechschmidt sind [19]:

#### **4.2.1. Elektrofotografie**

Dabei wird mit der Halbleitern-beschichteten Trommel und durch teilweise Belichtung ein Bild erzeugt, dann mit der Tinte zusammen entwickelt und danach gleich auf das Papier übertragen.

#### **4.2.2. Ionengrafie**

Dieses Verfahren wird sehr selten benutzt und daher nur kurz erläutert. Hierbei wird die dielektrische Trommel durch Ionen - Beschuss verändert, dadurch ein Bild erzeugt und durch die Tinte entwickelt

#### **4.2.3. Magnetografie**

Diese Drucktechnik ist ebenfalls von keiner großen Bedeutung. Die magnetisierbare Trommel erzeugt ein latentes Bild, das durch unterschiedliche magnetische Zustände zustande kommt. Dieses Bild wird mit einer Spezialtinte entwickelt.

#### **4.2.4. Thermodruck**

Bei diesem Druckverfahren wird eine Trägerfolie verwendet die eine thermoplastische Beschichtung besitzt. In dieser oberen Lage befindet sich der farbgebende Stoff. Die Farbe wird durch thermische Aktivierung der Beschichtung erzeugt.

#### **4.2.5. Inkjet**

Allen Inkjet - Verfahren ist eines gemein, die Übertragung der Farbe geschieht mit Hilfe von kleinen Farbtröpfchen. [19] Die Tropfen können hierbei auf zwei unterschiedlichen Varianten erzeugt werden und auf das Papier aufgetragen werden.

## 5. Inkjet – Verfahren

Die Arten des Inkjet Verfahrens werden im nachfolgenden Teil der Arbeit näher erklärt, da dieses Verfahren für das CD-Labor in dessen Rahmen diese Diplomarbeit verfasst wird, eine große Rolle spielt.

### 5.1. Arten des Inkjet Verfahrens

Im Inkjet – Bereich gibt es zwei wichtige Verfahrensweisen, die nachfolgenden aufgezählt und beschrieben werden.

#### 5.1.1. Kontinuierliches Verfahren (Continuous Inkjet)

Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Tropfen durch das Schwingen eines Piezokristalls fortlaufend erzeugt. Durch die Ladeelektroden werden die einzelnen Tropfen aufgeladen und durch die Ablenkelektrode auf die richtige Stelle im Papier gelenkt. Soll eine Stelle auf dem Papier frei von Tinte bleiben, werden die Tropfen von den Ablenkelektroden so stark in ihrer Richtung beeinflusst, dass diese in die Tintenrückführung gelangen [21], [19]. Dies ist in der Abbildung 13 veranschaulicht. Die kontinuierliche Technik des Inkjet-Verfahrens wird in erster Linie für ein Druckresultat mit niedriger Auflösung verwendet, wobei hier eine hohe Drucker – Geschwindigkeit erzielt wird [21], [22].

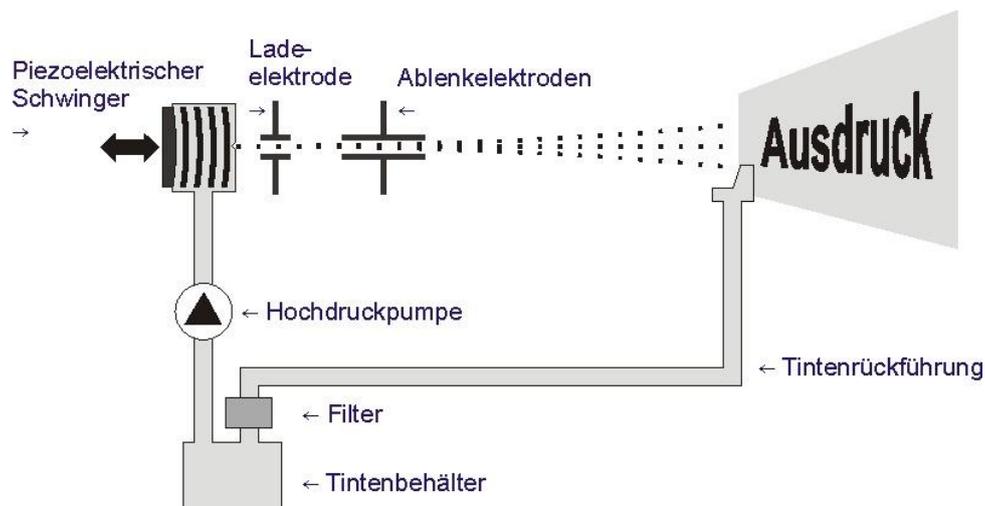


Abbildung 13: Aufbau eines kontinuierliches Inkjet Verfahren. Der Tropfen wird kontinuierlich durch einen Piezokristall erzeugt. Die Lade- und Ablenkelektrode beeinflussen die Flugbahn des Tropfens [49].

### **5.1.2. Diskontinuierlich Verfahren (Drop on Demand)**

Das diskontinuierliche Verfahren der Inkjet - Technik erzeugt den Tropfen erst zu jenem Zeitpunkt, zudem er benötigt wird. Der Tropfen wird durch Überdruck im Tintenbehälter erzeugt [19]. Dieser Druck wird auf drei verschiedene Arten erzeugt, die in der Abbildung 14 schematisch dargestellt sind. Bei Abbildung 14a wird durch das Erhitzen der Wärmequelle die Tinte direkt über dieser verdampft und es entsteht eine Gasblase, die bei der Düse einen Tintenausritt nach sich zieht [20]. In Abbildung 14b wird durch eine Ausdehnung beziehungsweise eine Verformung der Piezokeramik-Schicht die Flüssigkeit herausgedrückt. Und in Abbildung 14c wird der Tropfen durch die Veränderung des elektrischen Feldes, das sich zwischen Düse und Papier befindet und der dadurch hervorgerufenen Änderung des Oberflächenspannungsverhältnisses zwischen Düse und Tinte erzeugt [20]. Das diskontinuierliche Verfahren ist für jene Druckergebnisse geeignet, die eine hohe Auflösung benötigen.

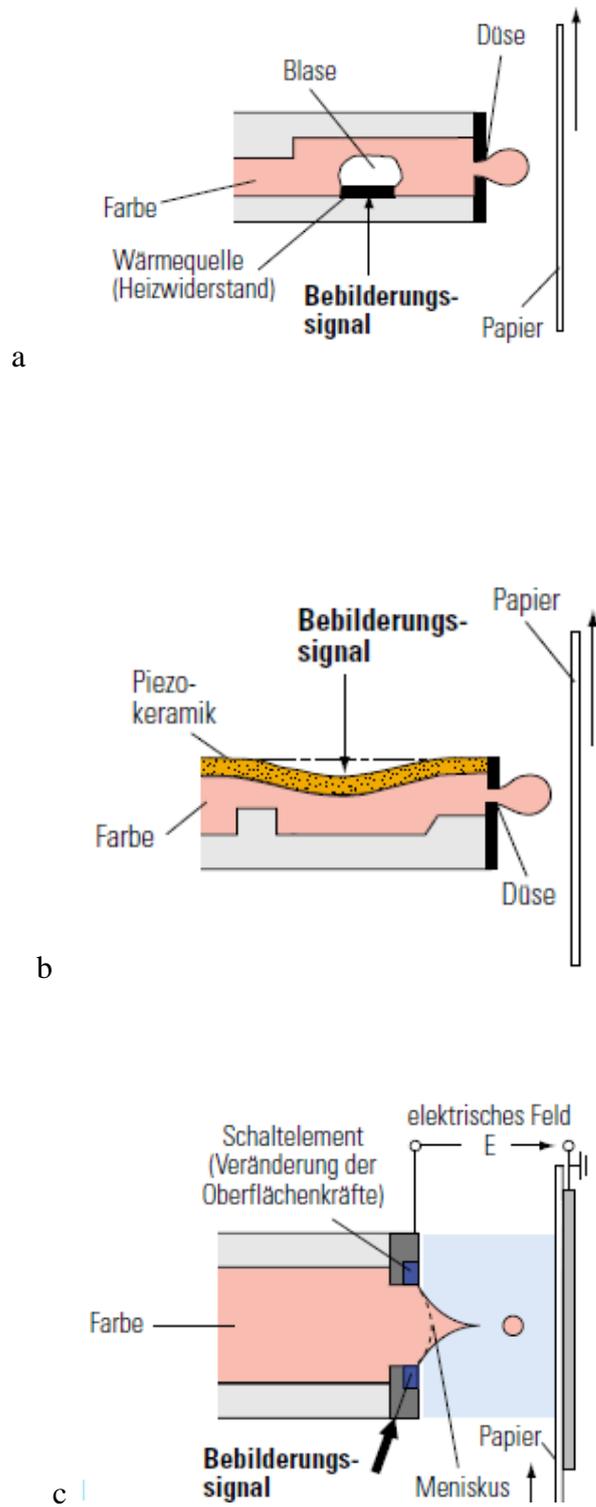


Abbildung 14: Diskontinuierliches Inkjet-Verfahren (a mit Wärmequelle, b mit Piezokeramik und c mit Schaltelement) [20]

### 5.1.3. Tropfenbildung, Auftreffen auf dem Papier und Trocknung der Tinte beim HSI Druck

Die Erzeugung von guten und reproduzierbaren Druckergebnissen geschieht in zwei Schritten [23]:

1.) Konstante und verlässliche Tropfenfreigabe vom Druckkopf auf das Papier

In Abbildung 15 ist das Schema der Tropfenbildung der kontinuierlichen Inkjet Technik zu sehen. Die Oberflächenspannung ( $\delta$ ) der Tinte wird von einem Signal mit gleichbleibender Wellenlänge ( $\lambda$ ) unterbrochen. Das Ergebnis ist die Erzeugung von gleichen Tropfen die mit konstanter Entfernung zu einander erzeugt werden. Der Abstand hat die gleichen Maße wie die Wellenlänge des Signals [20].

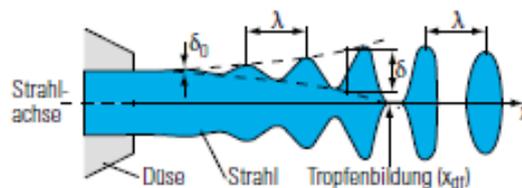


Abbildung 15: Tropfenbildung beim kontinuierlichen Inkjet Verfahren [20]

Abbildung 16 stellt die Tropfenbildung beim diskontinuierlichen Inkjet - Verfahren dar. Der Tropfen wird hier einfach aus der Öffnung gedrückt. Sobald der Tropfen zu groß wird, reißt er ab und der Kreislauf beginnt von vorne.

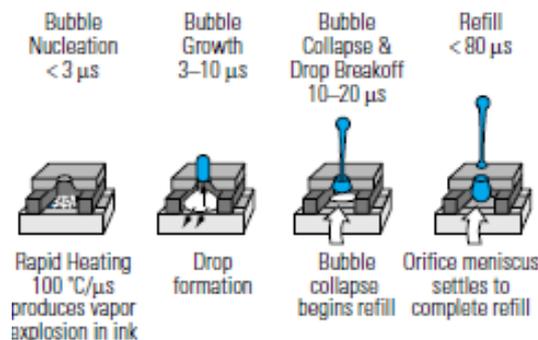


Abbildung 16: Die verschiedenen Stufen bei der Tropfenbildung beim diskontinuierlichen Inkjet- Verfahren[20]

Sowohl im diskontinuierlichen als auch im kontinuierlichen Verfahren ist der Tropfenaufbruch sehr wichtig. In Abbildung 17 ist ein typischer Aufbruch an einem Inkjet Druckkopf zu sehen. Nach circa 10-50  $\mu\text{sec}$  bricht der Tintenstrahl in eindeutig erkennbare Tropfen auf. Typisch ist

ein großer Tropfen der von mehreren kleineren Tropfen, so genannten Satelliten, verfolgt wird [24]. Das Problem bei diesen Satelliten ist, dass sie durch den Luftwiderstand stärker in ihrer Bahn abgelenkt werden und somit nicht an der gewünschten Stelle am Papier auftreffen. Ein weiterer Fehler des Druckergebnisses kann durch das sogenannte Puddling entstehen. Dabei sammelt sich immer mehr Tinte außen am Druckkopf an. Diese Ansammlung kann einen eigenen Tropfen erzeugen oder dafür verantwortlich sein, dass sich ein Tropfen früher als geplant vom Druckkopf löst, weil er durch die Tinte die sich schon dort befindet zu groß wird [23], [25].

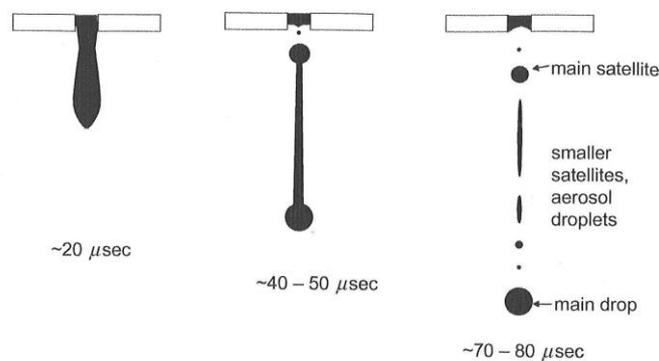


Abbildung 17: Typische Tropfenaufbruch bei einem Inkjet Druckkopf[23]

## 2.) Gewünschtes Verhalten der Tinte am Papier

Abbildung 18 zeigt das Geschehen, wenn der Tropfen auf dem Papier auftrifft. Nachdem der Tropfen auf der Oberfläche des Papiers aufgetroffen ist, benetzt er diese und spreitet. Zu diesem Zeitpunkt spielt die Trägheit des Mediums noch eine große Rolle, was auch in der Bosanquet Gleichung (Formel 6) beschrieben wird. Das Spreiten wird nach kurzer Zeit immer stärker von der kapillaren Penetration beeinflusst. Die Penetration beginnt circa 0,1 ms nach dem Tropfenaufprall und wird letztendlich zur dominierenden Kraft. Sie saugt den Trägerstoff und die mobilen Komponenten der Tinte in die Poren der Papieroberfläche. Danach folgt die Verdunstung der flüchtigen Stoffe [26], [27].

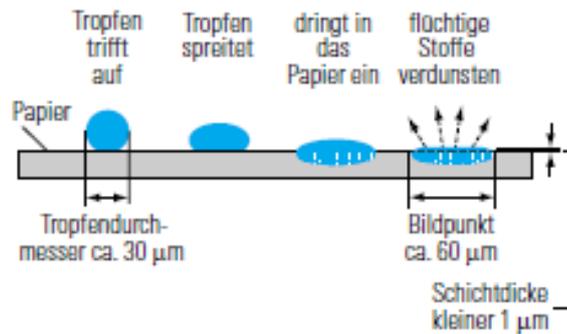


Abbildung 18: Schema des Tintenauftrages[17]

## 5.2. Inkjet Tinten

Im letzten Unterkapitel wurde auf die verschiedenen Verfahren der Inkjet-Technik näher eingegangen. Aufgrund der verschiedenen Anwendung muss die Tinte Anforderungen wie zum Beispiel: die Beständigkeit während des Erhitzens bei dem diskontinuierlichen Verfahren, erfüllen. Durch die verschiedenen Zusammensetzungen der Tinten wird auf die unterschiedlichen Ansprüche der Druckverfahren und der Tintenverwendung eingegangen. Die Hauptbestandteile sind immer dieselben: das Farbmittel, der Trägerstoff und die Additive [28],[29]. Das Farbmittel ist für die farblichen Eigenschaften verantwortlich und ist entweder ein Farbstoff oder ein Pigment. (Für genauere Erläuterung siehe Kapitel 5.2.1.1, 5.2.1.2 und 5.2.1.2) Sie haben einen Anteil zwischen 1% und 10% an der Tinte [30],[23]. Der Trägerstoff transportiert die farbgebenden Stoffe ans Papier [23] und macht mit 60% - 90% den größten Teil der Tinte aus. Die Träger sind in den meisten Fällen Wasser, Öl oder Lösungsmittel [23],[30]. Es gibt viele verschiedene Additive, wie zum Beispiel: Tenside, Befeuchtungsmittel oder Biozide. Tenside wirken als Benetzungsmittel, die Befeuchtungsmittel limitieren die Tropfenverdampfung und die Biozide verhindern das Schimmeln.

Inkjet Tinten, im Allgemeinen haben eine niedrige Viskosität um die Tropfenbildung zu garantieren, müssen aber trotzdem eine passende Spreitung und Penetration des Tropfens auf dem Substrat (also dem Papier) gewährleisten. Typische Werte für die Viskosität liegen zwischen 1 und 30 mPa\*s und die optimale Oberflächenspannung befindet sich zwischen 20 und 60 mN/m [30]. Dies ist vor allem wichtig für die Tropfenerzeugung. Der Tintentropfen sollte immer die gleiche Form und Größe besitzen. Wichtig ist auch noch, dass die Tinte eine gute Lagerstabilität hat. Dies äußert sich vor allem darin, dass es keine Entmischung oder Schimmelwachstum gibt. Sie sollte auch nicht entflammbar sein. Eine weitere wichtige

Eigenschaft ist die Material – Komptabilität, das bedeutet sie sollte die Lebensdauer des Druckers nicht durch hohe Korrosivität oder Abbrasiveität verkürzen [23], [31]. In Abbildung 19 sind den Ink Jet – Verfahren, die einzelnen Tinten zugeordnet. Hier werden die unterschiedlichen Eigenschaften der Tinten noch einmal verdeutlicht.

Verfahren	Tinten Type	Viskosität (mPa*s)	Schichtdicke ( $\mu\text{m}$ )	Tropfenvolumen (pl)	Trocknung
Thermal	Wasserbasis	1-5	<0.5	6-30	Absorption, Verdampfung
Piezoelektrisch	Wasser-, Öl-, Lösungsmittelbasis	5-20	<0.5	4-30	Absorption, Verdampfung
	Heiß schmelzend	10-30	12-18	20-30	Erstarrung durch Abkühlung Strahlung, Vernetzung
	UV trocknend	15-30	10-20	10-30	Erstarrung durch Abkühlung Strahlung, Vernetzung
Kontinuierlich (piezo)	Wasser-, Lösungsmittel-, MEK (methyl ethyl ketone)-basis	1-5	<0.5	5-100	Absorption, Verdampfung

Abbildung 19: Zusammenfassung der Inkjet Tinten und ihrer physikalischen Eigenschaften [26]

### 5.2.1. Wasserbasierende Tinten

In dieser Arbeit werden Wasser basierende Tinten getestet. Diese machen den größten Teil des HSI- Tinten-Marktes aus [30]. In dieser Arbeit werden wasserbasierende Tinten mit Farbstoffen, Pigmenten und Latexpartikel mit Pigmenten betrachtet.

#### 5.2.1.1. Farbstofftinten

Farbstoffe werden für die Färbung verwendet. Diese unterscheiden sich von den Pigmenten in ihrer Löslichkeit im Trägerstoff. Das heißt die Farbstoffe sind im Träger molekulardispers gelöst, wie sich zum Beispiel der Zucker im Wasser physikalisch auflöst. Dieses Auflösen wird durch Rühren erreicht. Die einfache Erzeugung ist ein großer Vorteil dieser Tinten-Art. Des Weiteren ist eine Sedimentation der Farbstoffe nicht möglich, da sie komplett im Trägerstoff aufgelöst sind. Ihr Nachteil ist jedoch geringer Lichtbeständigkeit und ihre geringe Beständigkeit gegenüber Chemikalien [23]. Lichteinheit (=Lichtbeständigkeit) ist die

Standhaftigkeit einer Farbe unter Einwirkung von Licht und UV-Strahlung. Je geringer die photochemische Veränderung der Farbe ist desto besser ist die Lichtechtheit. Allerdings hat die Farbstofftinte eine schlechte Beständigkeit gegenüber Wasser, der trockene Druck verschmiert in Kontakt mit diesem [30].

#### **5.2.1.2. Pigmenttinten**

In dieser Tinte sind die farbgebenden Elemente Pigmente. Sie lösen sich nicht im Lösungsmittel auf, sondern sind in diesem fein dispergiert. Diese Dispersion hat zum Nachteil dass die Pigmente besonders gut im Lösungsmittel stabilisiert werden müssen, da es sonst zur Absetzung oder einer Agglomeration der Pigmente kommt [23], [30].

Diese Tinten haben eine gute Licht- und Chemikalienbeständigkeit und sind zu dem noch in hohem Grad wasserresistent [25].

#### **5.2.1.3. Latex Tinte**

Latex –Tinten sind in jedem Fall Wasser basierend. Sie bestehen größten Teils aus Latex-Partikel, Pigmenten und Wasser. Nachdem Auftragen auf das Papier, werden diese Tinten durch Wärme und Luft, noch im Drucker, getrocknet. Durch die Wärme schmilzt der Latex und die Latexpartikel bilden einen Film, der das Pigment mit dem Substrat verbindet. Latex-Tinten sind flexibel und dehnbar und sind daher sehr gut für unregelmäßige Substrate geeignet [32].

## 6. Messverfahren

### 6.1. Penetration Dynamics Analyser (PDA)

Der Penetration Dynamics Analyser misst das Penetrationsverhalten von Flüssigkeiten in verschiedensten Medien. In Abbildung 20 (links) ist der Aufbau der Messkammer zu sehen. Der PDA besteht aus der Messkammer (1), die mit destilliertem Wasser gefüllt ist. Auf der linken Seite der Messkammer ist der Ultraschallemitter (2) und gegenüberliegend der Empfänger (3) positioniert. Der Eiseneinsatz (die Küvette) (4) ist mit der Testflüssigkeit gefüllt und hat links und rechts, je ein Fenster aus Plastik (5) um die Transmission des Ultraschalls zu gewährleisten. Der Probenhalter (6) wird mit einem zweiseitig-klebenden Klebeband (7) beklebt, auf dieses kommt wiederum die (Papier-) Probe (8). Der Motor (9) ist für die Bewegung des Probenhalters inklusive Probe verantwortlich. Der Wellensender und Empfänger haben eine große und kleine Messfläche ( $35\text{mm}^2$  und  $10\text{mm}^2$ ) [33], [34]. Für jedes Papier wurden je 8 Proben pro Seite und Flüssigkeit getestet. Die Abmaße einer solchen Papierprobe sind in Abbildung 20 zu sehen. Der Kreis repräsentiert die Messfläche von  $35\text{mm}^2$ .

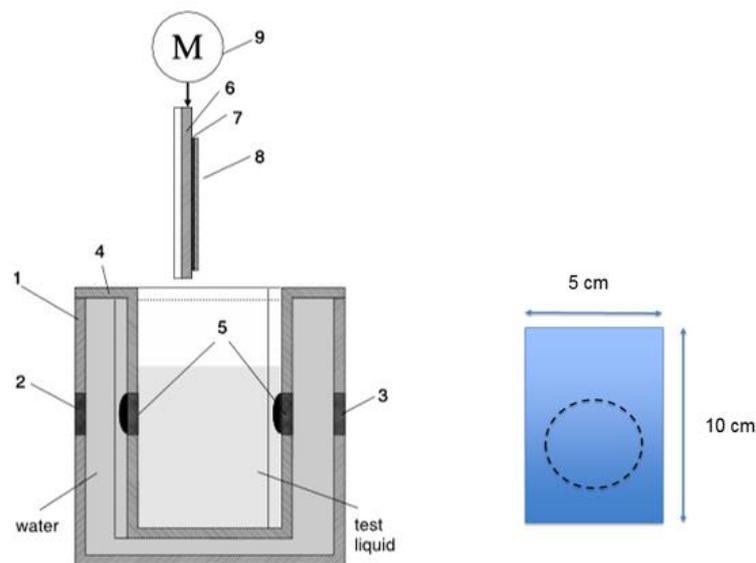


Abbildung 20: PDA Messblock [33] und Abmaße der PDA-Papier Probe. Der Kreis symbolisiert die Messfläche.

Die trockene Probe wird durch den Motor schlagartig in die Testflüssigkeit hinabgelassen. Der Ultraschalltransmitter beginnt mit der Aussendung von Ultraschallwellen sobald die Probe mit der Testflüssigkeit in Berührung kommt. Wichtig ist, dass die Papierprobe nur auf einer Seite mit der Testflüssigkeit in Kontakt kommt, die andere wird durch das Klebeband geschützt. Dies bedeutet, dass beide Seiten des Papiers unabhängig voneinander gemessen werden können. Durch die fortschreitende Penetration werden die Ultraschallwellen reflektiert, gestreut,

absorbiert und Folge dessen gedämpft. Während die Flüssigkeit weiter in die Probe penetriert, zeichnet der Empfänger die Intensität der ankommenden Wellen auf und zeigt diese in Form einer Kurve (Änderung des ankommenden Signals über die Zeit) an. Die Veränderung der Ultraschallwellen ist sehr kompliziert und wird durch die Interaktion zwischen der Flüssigkeit und dem Papier sowie durch Luftblasen hervorgerufen [33], [35]. Die Ultraschallwellen werden im hohen Frequenzbereich (2MHz) aber mit niedriger Energie, in Z-Richtung, durch die Probe geschickt [33]. In Abbildung 21 sieht man die Ergebnisse der PDA Messung für das AKD geleimte Papier und den vier Modellflüssigkeiten. Die Dauer des Anstieges der Kurven repräsentiert die Benetzung der Flüssigkeiten. Die Zeit zum Erreichen von 100% der Intensität ist als der Parameter Benetzungszeit definiert. Dies ist die Dauer, die die Flüssigkeit benötigt um die Oberfläche der Probe vollständig zu benetzen. Je mehr Zeit benötigt wird, desto schlechter ist die Benetzung. Nach diesem Vorgang beginnt die Penetration ins Papier. Der Parameter Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Je stärker der Abfall der Kurve desto schneller penetriert die Flüssigkeit in das Papier.

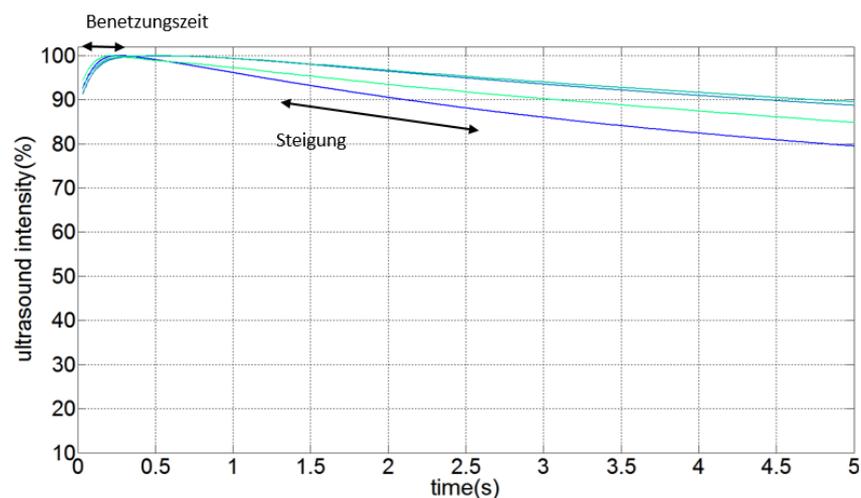


Abbildung 21: Die PDA-Ergebnisse zeigen die Änderung der Intensität über die Zeit. Der Parameter Benetzungszeit ist ein Maß für die Benetzungsfähigkeit und der Parameter der Steigung repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit

Zu erwähnen ist noch, dass es die Möglichkeit gibt verschiedene Analysemethoden, abhängig vom Papier zu wählen. Das heißt für ein AKD – geleimtes Papier wird der Testmodus: geleimtes Papier gewählt und für das ungeleimte und das pigmentierte Papier der Testmodus: ungeleimtes Papier. Wichtigster Parameter hierbei ist die Zeit, wird beim geleimten Papier eine Messdauer von einer Minute verwendet, misst das Instrument im „ungeleimten Modus“ nur circa 30 Sekunden.

## 6.2. Fibro – Kontaktwinkelmessung

Der Fibro misst den Randwinkel (=Kontaktwinkel) eines Tropfens. Die Messungen wurden nach dem TAPPI Standard T558 mit einem FIBRO DAT 1100 Instrument gemacht [36], [37]. Die Spritze wird per Hand mit der Testflüssigkeit gefüllt und in das Gerät vorschriftsmäßig eingebaut. Über den Stufenmotor wird das zuvor eingestellte Tropfenvolumen ( $4\mu\text{l}$ ) in die Kapillare gedrückt, dadurch bildet sich am Ende von dieser ein Tropfen. Durch einen Schlag (dieser wird mit Hilfe einer Metallfeder erzeugt) wird der Tropfen von dem Ende der Kapillare gelöst. Sobald dieser auf der Papierprobe auftrifft, startet die Hochgeschwindigkeitskamera Fotos zu machen [10]. Fotos zu verschiedenen Zeitpunkten der Messung sieht man in Abbildung 22. Zeitgleich beginnt das Programm mit Hilfe, der dafür vorgesehen Software den Tropfen zu analysieren, eine Tangente an den Tropfen zu legen und in weitere Folge den Kontaktwinkel zu messen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Oberfläche auf die der Tropfen auftrifft möglichst planar ist. Ansonsten kann das Programm keinen Winkel zwischen Oberfläche des Papiers und der Tangente legen. Es wurden für jede Papierseite 80-100 Tropfen pro Flüssigkeit, in der Größe von  $4\mu\text{l}$ , getestet.

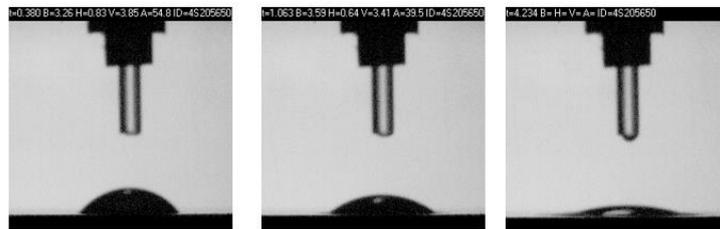


Abbildung 22: Tropfenverlauf während der Kontaktwinkelmessung

Ein typisches Ergebnis der Kontaktwinkelmessung ist in Abbildung 23 zu sehen. Die Kurven zeigen den Verlauf der Änderung des Kontaktwinkels über die Zeit. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Benetzung der Flüssigkeit. Je steiler die Kurve desto besser die Benetzung.

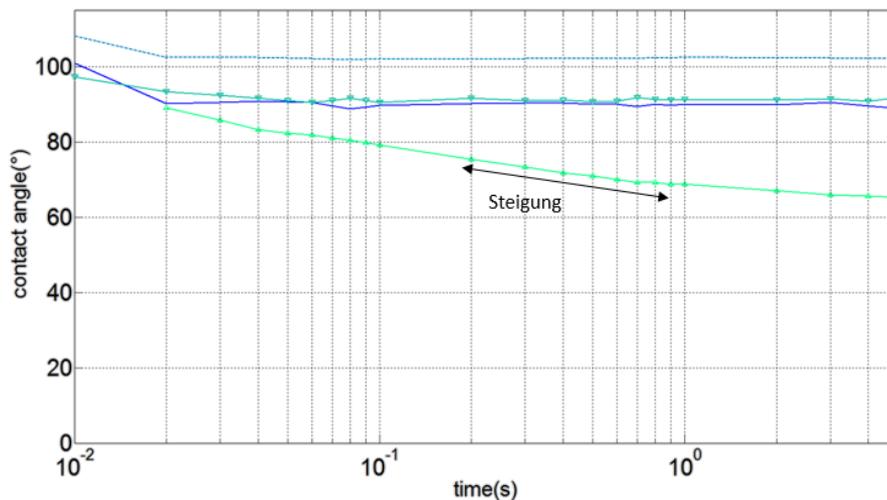


Abbildung 23: Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung zeigen die Änderung des Winkels über die Zeit. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Benetzung der Flüssigkeit

### 6.3. IGT – Druckpenetration

Der IGT Druckpenetrationstest wird zur Untersuchung der dynamischen Saugfähigkeit von Papieren verwendet. Die Versuche wurden nach dem Standard NEN 1836-1:2006 ausgeführt [38].

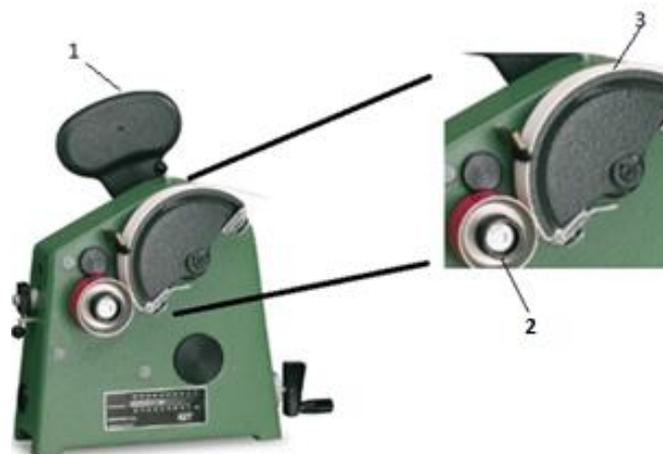


Abbildung 24: IGT-Tester [39]

Abbildung 24 zeigt das IGT – Druckpenetrationsmessgerät. Die Rollen (3) und (4) werden mit 70kg aneinandergesst. Dies wird zu Beginn der Messung eingestellt. Zu sehen ist das Schwunggewicht (1), das mit einer Rolle (3) verbunden ist. Auf dieser werden zuerst der Gummi und dann das Papier befestigt. Danach wird auf der Rolle (2) ein Flüssigkeitstropfen

aufgebracht. Der Auftrag der Messflüssigkeit geschieht mit einer Spritze und einer Nadel. Das Nadelende muss vollständig zylindrisch sein. Die Spritze hat auf der oberen Seite des Zylinders, in der sich der Bolzen zum Hinausdrücken der Flüssigkeit befindet, ein kleines Loch. Die Luft, die ständig durch das Loch eintritt vermeidet einen Unterdruck und die Flüssigkeit tropft von selbst auf die Rolle. Dadurch wird ein einheitlicher Tropfen erzeugt. Zur Sicherstellung eines konstanten Tropfenvolumens wurde regelmäßig (alle 5-10 Tropfen) eine Gewichtsbestimmung gemacht. So konnte überprüft werden, ob immer die gleiche Menge an Flüssigkeit auf die Rolle aufgebracht wurde. Durch Lösen des Schwunggewichts wird die Rolle mit der Papierprobe (3) in Rotation versetzt. Die Rolle (2) mit dem Tropfen wird dadurch auch in Bewegung versetzt. Die Geschwindigkeit dieser beiden erreicht bis zu 1,25m/s. Eine Skizze von Tropfen, Rolle und Papier am Beginn der Messung ist in Abbildung 25a zu sehen. Durch die gleichzeitige Bewegung der beiden Rollen wird die Flüssigkeit im Nip zwischen den Rollen vorwärtsbewegt und gleichzeitig vom Papier absorbiert. Dadurch entsteht eine Tropfenspur. In Abbildung 25b sind repräsentative Tropfenspuren von den Modellflüssigkeiten Wasser/Glycerin, Wasser/Glycerin/Hexandiol und von einer Tinte zu sehen. Es wurden zwischen 32 und 40 Papierproben mit den Maßen von 4cmx30cm für jede Flüssigkeit getestet.

Zur Bewertung der Druckfarbenpenetration wurden drei Parameter eingeführt. Die Länge des Tropfens (dargestellt in Abbildung 25c) ist ein Maß für die Penetrationsgeschwindigkeit. Je höher diese ist, desto kürzer ist die Tropfenspur, da mehr Flüssigkeit in gleicher Zeit absorbiert wird. Der zweite Parameter ist der Aspekt Ratio. Dieser ist durch die Division der Breite (siehe Abbildung 25c) durch die Länge definiert. Je größer dieser Wert ist desto besser die Benetzung der Flüssigkeit. Die Spur ist breiter und benetzt somit mehr Paperoberfläche. Der letzte Parameter ist die Fläche der Tropfenspur. Diese ist auch ein Maß für die Penetration. Mit starker Penetration nimmt die Fläche ab. Alle Parameter werden durch das Tropfenvolumen der jeweiligen Flüssigkeit dividiert, dadurch wird eine Normierung der Werte gewährleistet.

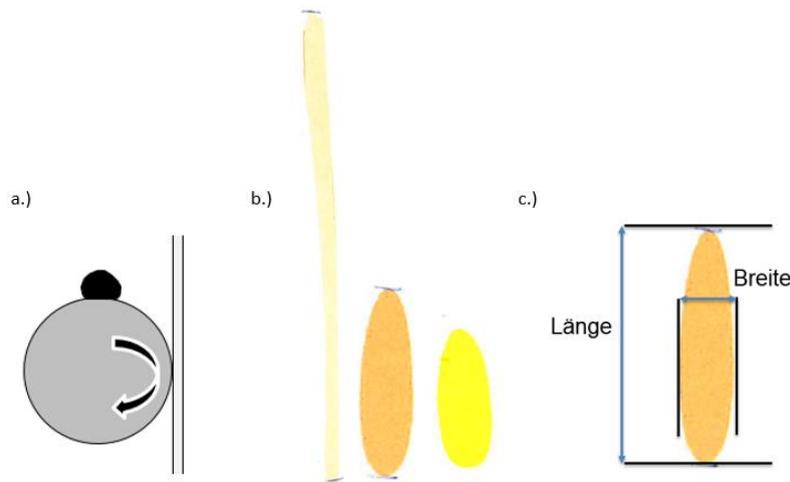


Abbildung 25: a.) Skizze des Tropfen-Auftrags bei der IGT Messung b.) verschiedene Tropfenspuren auf einer Papiersorte c.) Definition der Länge und der Breite am Beispiel eines Tropfens

#### 6.4. Automatic Scanning Absorptometer (ASA)

Der Automatic Scanning Absorptometer misst die Flüssigkeitsabsorption während einer genau definierten Kontaktzeit zwischen Papier und Flüssigkeit [40], [41]. Die Flüssigkeit wird über einen Messkopf der sich auf dem Papier bewegt aufgetragen, siehe Abbildung 26a. Der Tisch auf dem die Probe liegt bewegt sich und bestimmt über die Geschwindigkeit die Kontaktzeit zwischen Messkopf und Papier. Der Tisch bleibt dabei eine bestimmte Zeit bei gleicher Geschwindigkeit und beschleunigt dann auf die nächst höhere. Für unsere Messungen erhöht er von anfänglichen 0,0010m/s auf bis zu 0,10m/s. Die Absorption der Tinte hinterlässt eine spiralförmige Spur. Eine typische Spiralform inklusive der Geschwindigkeit am Beginn und Ende der Messung ist in Abbildung 26b zu sehen. Der Messkopf ist mit einem Glasrohr verbunden an dem ein Meniskussensor angebracht ist, zu sehen in Abbildung 26a. Je mehr Flüssigkeit absorbiert wird, desto schneller wandert der Meniskus. Der Sensor misst diese Meniskusänderung und errechnet dadurch das Flüssigkeitsvolumen, das vom Papier aufgenommen wurde. Es wurden 4 Proben, in der Größe DIN A5, pro Flüssigkeit getestet

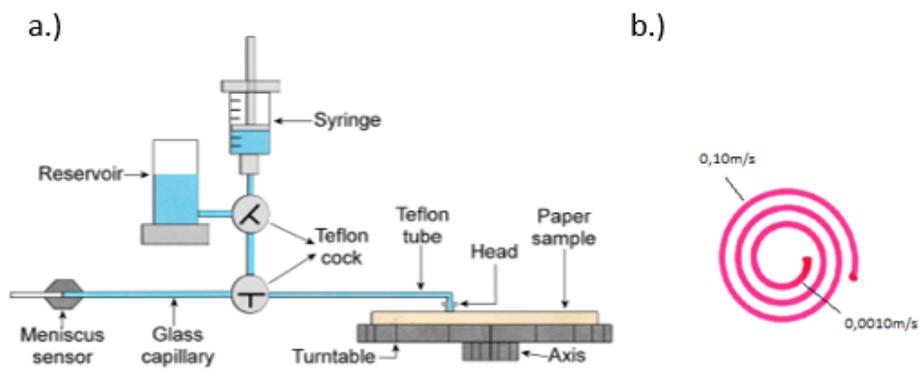


Abbildung 26: a.) Aufbau des Automatic Scanning Absorptometer [41] b.) Spiral- Spur der Tinte am Papier inklusive maximaler und minimaler Geschwindigkeit

Die ASA Ergebnisse werden in Abbildung 27 dargestellt. Das absorbierte Volumen über einer bestimmten Kontaktzeit wird dabei aufgetragen. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Je höher die Steigung desto größer die Penetrationsgeschwindigkeit.

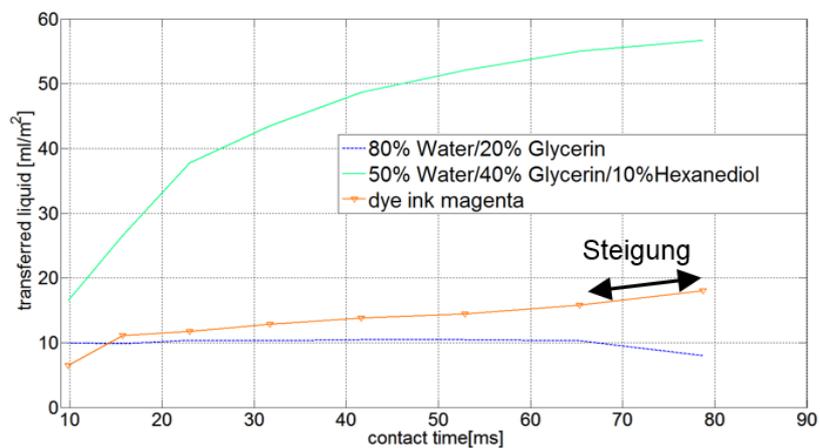


Abbildung 27: Die ASA Ergebnisse zeigen das absorbierte Volumen über die Zeit. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit

## 7. Papiere und Flüssigkeiten

### 7.1. Grunddaten Papiere

In dieser Diplomarbeit werden drei verschiedene Papiere getestet. Diese sind ein AKD-geleimtes Papier (1kgAKD/t Papier), ein ungeleimtes Papier und ein ungeleimtes, pigmentiertes Papier. Es wurden jeweils immer vier aufeinander folgende Blätter einer Sorte getestet. Das AKD geleimte Papier ist ein Standard Office Papier mit einem Füllstoffgehalt von 13,52%, siehe Tabelle 1. Das ungeleimte und das pigmentierte Papier haben einen deutlich höheren Füllstoffanteil und sind extra für HSI Druck geeignet, da sie eine spezielle Oberflächenbeschichtung haben. Diese Oberflächenbeschichtung besteht unter anderem hauptsächlich aus Kalziumchlorid und erhöht die Druckqualität für Tinten mit Pigmenten [42],[43]. Das Kalzium Ion reagiert mit den anionischen Pigmenten, erzeugt eine Farbschicht und hält so die Pigmente an der Oberfläche des Papiers [43]. Dadurch wird die optische Intensität erhöht und die Trocknungszeit wird deutlich verkürzt [42], [43] [44], [45]. Das pigmentierte Papier ist zusätzlich noch oberflächenpigmentiert, unter anderem mit Ground Calcium Carbonat (GCC). Das Flächengewicht der Papiere liegt bei circa  $78\text{g/m}^2$ , für genaue Werte siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Grunddaten der Papiere

	AKD geleimtes Papier	ungeleimtes Papier	pigmentiertes Papier
Flächengewicht [ $\text{g/m}^2$ ]	77,2	78,5	78,9
Füllstoffgehalt [%]	13,52	21,51	22,98
Oberflächenpigmentiert [ $\text{g/m}^2$ ]	0	0	4
Zusatzbemerkung	Standard Office Papier	HSI Papier	HSI Papier

Die Rauigkeit wurde mittels ParkerPrintSurf gemessen. Je höher der Messwert ist, desto ungleichmäßiger bzw. rauer ist das Papier [46]. Das AKD geleimte Papier besitzt die größte Rauigkeit, gefolgt vom pigmentierten Papier. Das ungeleimte Papier ist am glattesten.

Das Porenvolumen und die berechnete Porosität gehen aus der Quecksilber-Porosimetrie hervor, die für Papiere gemessen wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zu sehen. In Abbildung 28 sieht man die Porengrößenverteilung über das gesamte Papier, die auch mittels dieser Methode ermittelt wurde. Die Porenstruktur im Papier ist schwer zu messen und noch schwieriger zu definieren. Die herkömmlichen Tests, wie die Quecksilberporosimetrie können nur schwer aussagekräftige Ergebnisse liefern. Grund dafür ist, dass durch den großen Druck,

der aufgebracht werden muss damit das Quecksilber ins Papier penetriert, nicht nur die Penetration ermöglicht wird, sondern auch eine Deformation der Porenstruktur im Papier hervorruft. Diese Veränderung der Porenstruktur geht sogar so weit, dass das Porenvolumen auf ein Viertel der ursprünglichen Größe zusammengepresst wird. Ein weiterer Grund warum diese Messmethoden mit Vorsicht zu verwenden ist, ist, dass das Papier irreguläre und miteinander verbundene Poren hat. Daraus folgt, dass zuerst kleine Poren an der Oberfläche, die beispielsweise durch Kalandrieren oder Streichen erzeugt wurden, passiert werden müssen bevor die größeren Poren im Inneren erreicht werden. Dies führt ebenfalls zu einer Verfälschung des Ergebnisses [47].

Die Porosität nach Bendtsen gibt Aufschluss über die Porengröße, in dem die Luftdurchlässigkeit gemessen wird. Sie gibt an wie viel ml Luft pro Minute durch das Papier fließen. Diese Werte sind in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Messergebnisse Papiere

	Rauigkeit (PPS) [ $\mu\text{m}$ ] (OS – SS)	Porenvolumen [ $\mu\text{l/g}$ ]	Berechnete Porosität [%]	Bendtsen Porosität [ml/min]
AKD geleimtes Papier	OS: 5,671 SS: 5,532	235,6	20,6	680
ungeleimtes Papier	OS: 3,341 SS: 3,224	366,7	38,8	269
pigmentiertes Papier	OS: 4,113 SS: 4,199	240,9	23,6	112

In Abbildung 28 ist die Porengrößenverteilung der verschiedenen Papiere dargestellt. Diese wurde durch die Quecksilberporosimetrie erhalten. Das ungeleimte Papier (rot) hat einen breiten Peak, dies bedeutet es hat viele Poren in unterschiedlicher Größe. Die Spitze des Peaks ist bei circa  $2,6\mu\text{m}$ , das heißt ein hoher Anteil der Poren besitzt diese Größe. Das AKD geleimte Papier (grün) hat einen deutlich dünneren Peak der sein Maximum bei einem Wert von  $4,9\mu\text{m}$  besitzt. Je enger der Peak desto enger die PGV und desto mehr Poren besitzen die gleiche Größe. Es bedeutet auch, dass die Porengröße in einem engeren Bereich variiert. Diese Porenverteilung ist deutlich enger als die des ungeleimten Papiers. Die meisten Poren besitzen eine Größe von ungefähr  $4,9\mu\text{m}$  und nur wenige weichen davon ab. Ähnlich ist es beim pigmentierten Papier (blau). Auch dieser Peak ist eng, die meisten Poren liegen in der Größenordnung von  $3,2\mu\text{m}$ .

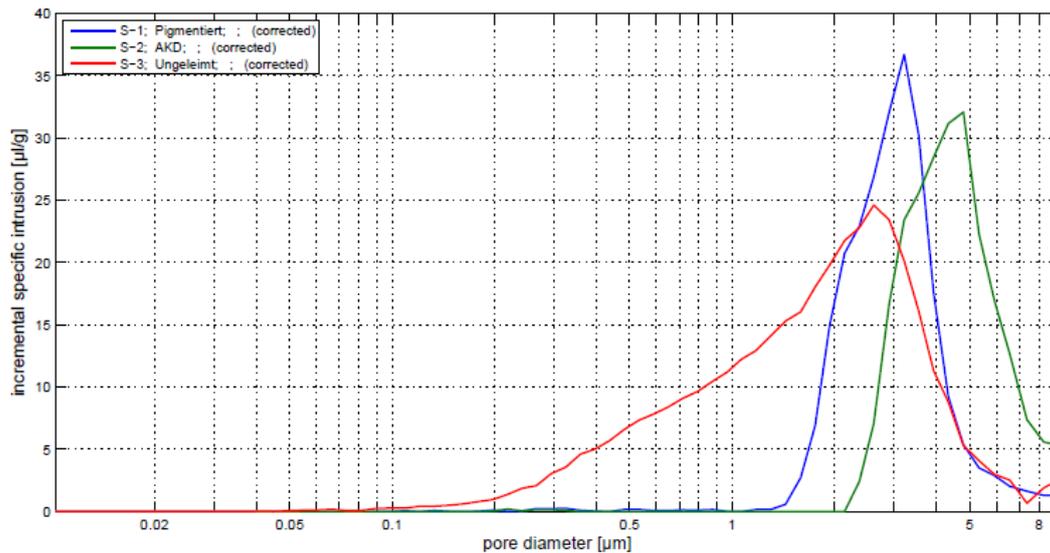


Abbildung 28: Porengrößenverteilung der verschiedenen Papiere

Die Porosität und das Porenvolumen beim ungeleimten Papier sind deutlich höher als bei den anderen Papieren. Die Werte für das AKD geleimte Papier und das pigmentierte Papier befinden sich für beide Parameter jeweils in der gleichen Größenordnung, siehe Tabelle 2. Auch die Peaks der PGV ähneln sich. Betrachtet man die Ergebnisse der Bendtsen Messung hat jedoch das AKD geleimte Papier den größten Wert für die Porosität. Die Luftdurchlässigkeit des Papiers wird durch die kleinsten Poren im Papier beschränkt. Das AKD geleimte Papier hat keine besondere Oberflächenbehandlung, das heißt die Poren haben über das gesamte Papier ungefähr die gleiche Größenordnung. Aufgrund der Größe dieser Poren, siehe Abbildung 28, ist die Luftdurchlässigkeit sehr groß. Das ungeleimte Papier besitzt zwar das größte Porenvolumen, aber die Poren sind auch deutlich kleiner als beim AKD geleimten Papier beispielsweise. Daher auch der geringere Wert der Bendtsen Porosität, mehr Poren die kleiner sind lassen weniger Luft durch das Papier. Das pigmentierte Papier hat zwar auch große Poren, aber durch das Aufbringen von  $4\text{g/m}^2$  eines Pigmentgemisches an der Oberfläche wurde die Luftdurchlässigkeit an dieser deutlich verringert. Diese Verringerung hat den niedrigeren Wert der Bendtsen Porosität für dieses Papier zur Folge.

## 7.2. Grunddaten Flüssigkeit

Alle Modellflüssigkeiten sind wasserbasierend. Angefangen bei 100% Wasser, danach wurden weitere Komponenten hinzugegeben um die Viskosität und die Oberflächenspannung zu beeinflussen. Die zweite Modellflüssigkeit wurde mit Glycerin und die dritte mit Glykol vermischt. Die vierte Modellflüssigkeit beinhaltet einen hohen Anteil an Glycerin für die Erhöhung der Viskosität und etwas Hexandiol um die Oberflächenspannung zu erniedrigen. Die genauen Zusammensetzungen der Flüssigkeiten die für diese Diplomarbeit verwendet wurden sind 100% Wasser, 20% Glykol / 80% Wasser, 20% Glycerin / 80% Wasser, und 40% Glycerin / 50% Wasser / 10% Hexandiol. Die Werte für Viskosität, Oberflächenspannung und Dichte sind in Tabelle 3 zu sehen. Die Modellflüssigkeiten bekommen in den Grafiken der Auswertung immer die gleichen Farben, die in Blautönen gehalten sind, wie auch in der Tabelle 3 zu sehen ist.

Weiteres wurden drei verschiedene Tinten- Sorten verwendet, insgesamt sechs (von jeder Sorte zwei Farben: Gelb und Magenta). Alle Tinten sind wasserbasierend, zwei davon haben Pigmente, zwei von ihnen Latex - Partikel und Pigmente und zwei davon Farbstoffe als farbgebende Komponente. Die Tinten haben gelb, orange und rot als durchgehende Farbcodierung erhalten. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4 zu sehen.

Die Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol besitzen eine deutlich höhere Oberflächenspannung, eine niedrigere Dichte und auch die Viskosität ist viel geringer als jene Werte der Tinten. Die Tinten ähneln sich in Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung, besonders gering ist der Unterschied zwischen den Tinten der gleichen Sorte. Aus den Ergebnissen in den folgenden Tabellen geht hervor, dass die Modellflüssigkeit mit Hexandiol den Tinten sowohl in Bezug auf Viskosität, als auch in Bezug auf Oberflächenspannung und Dichte am ähnlichsten ist.

Tabelle 3: Messwerte Modellflüssigkeiten

	Viskosität [mPa s]	Oberflächenspannung [mN/m]	Dichte [kg/l]
Wasser	1,004	72,4	0,998
80% Wasser / 20%Glycerin	1,6	65	1,0475
80% Wasser / 20%Glykol	1,7	71	1,0245
50% Wasser / 40% Glycerin/10%Hexandiol	6,2	27,3	1,0971

Tabelle 4: Messergebnisse Tinten

	Viskosität [mPa s]	Oberflächenspannung [mN/m]	Dichte [kg/l]
Dye Gelb (dye yellow)	6,3	37	1,13
Dye Magenta (dye magenta)	6,3	35	1,134
Pigment Gelb (pigment yellow)	6,3	36,9	1,113
Pigment Magenta (pigment magenta)	6,3	37,4	1,114
Vario gelb (vario yellow)	5	32,8	1,0697
Vario magenta (vario magenta)	5,3	33,4	1,07

## **8. Evaluierung der Messmethoden**

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Die verschiedenen Testflüssigkeiten und Tinten werden je für ein Papier zusammengefasst. Die Messung und Auswertung wurden bereits in Kapitel 6 erklärt.

### **8.1. Penetration Dynamics Analyser (PDA)**

Die Benetzungszeit bis zur Erreichung von 100% der Ultraschallintensität wird als Maß für die Benetzung definiert. Die Steigung der Kurven repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Beide Parameter werden in Kapitel 6.1 näher beschrieben. Tinten der gleichen Sorte haben ähnliche Werte und ihre Kurven überlappen sich fast, siehe Abbildung 29 bis Abbildung 34. Dies zeigt eine gute Wiederholbarkeit der PDA Messung.

#### **8.1.1. AKD geleimtes Papier**

In Abbildung 29 und Abbildung 30 sind die PDA-Messergebnisse der zehn Flüssigkeiten auf AKD-geleimtem Papier, Oberseite (=Top Side (TS), Abbildung 29) und Siebseite (=Bottom Side (BS), Abbildung 30) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die vier Testflüssigkeiten eine lange Benetzungszeit haben. Das bedeutet sie haben eine schlechte Benetzung auf diesem Papier, sowohl auf der Unterseite als auch auf der Oberseite. Die Tinten haben eine wesentlich bessere Benetzung, da die Benetzungszeit geringer ist. Dieses Ergebnis wird durch die Kontaktwinkelmessung bestätigt, denn auch hier haben die Modellflüssigkeiten eine schlechtere Benetzung als die Tinten, repräsentiert durch die geringe Steigung der Kurven. Die Penetrationsgeschwindigkeit der Tinten, gemessen durch den PDA, ist schneller als die der Modellflüssigkeiten, repräsentiert durch die größere Steigung. Ähnliches wurde von der ASA Messung festgestellt, hier hat die Kurve der Tinte in den letzten Messpunkten bei den betrachteten Zeiten die höhere Penetrationsgeschwindigkeit, die Aufnahme der Modellflüssigkeit mit Hexandiol war aber größer. Vergleicht man nun die Modellflüssigkeiten mit den Tinten erkennt man, dass keine Modellflüssigkeit die Tinten sehr gut repräsentiert. Die Benetzung dieser ist langsamer als die der Farbstofftinten. Besonders auf der Oberseite (TS) ist durch den langen Anstieg der Kurven der Modellflüssigkeiten eine langsame Benetzung zu sehen. Für alle Flüssigkeiten besitzt die Siebseite (BS) dieses Papiers einen stärkeren Abfall der Kurve, repräsentiert durch die stärkere Steigung. Dies weist auf eine schnellere Penetration hin.

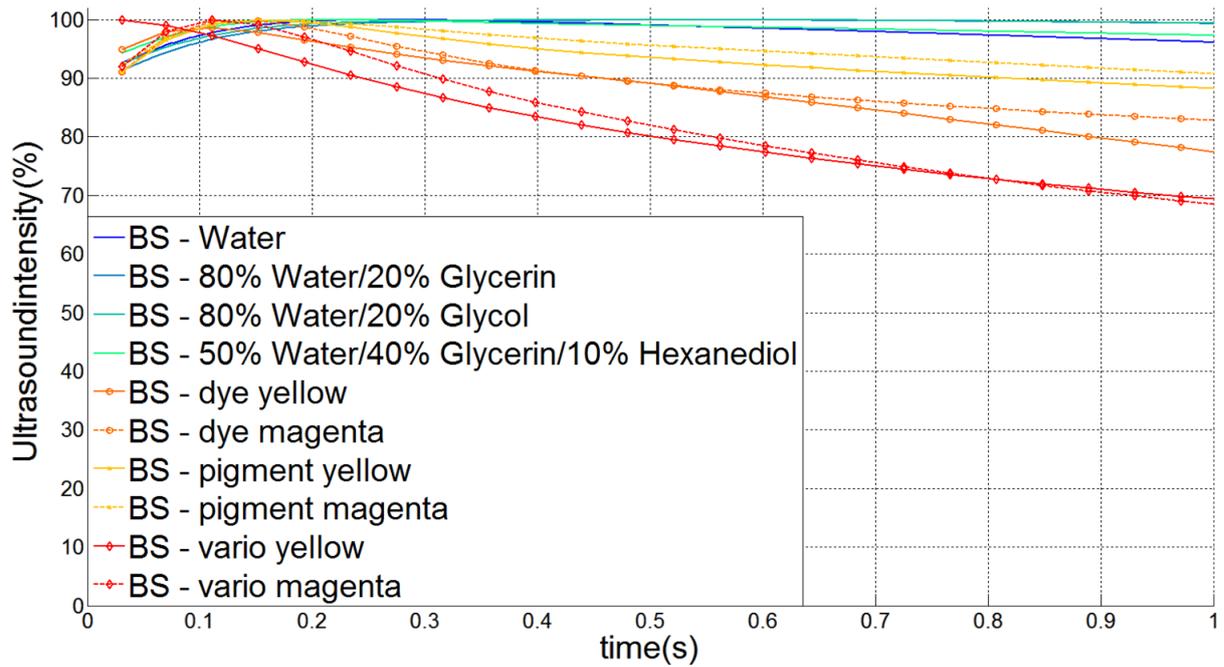


Abbildung 29:PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf AKD - Papier Siebseite

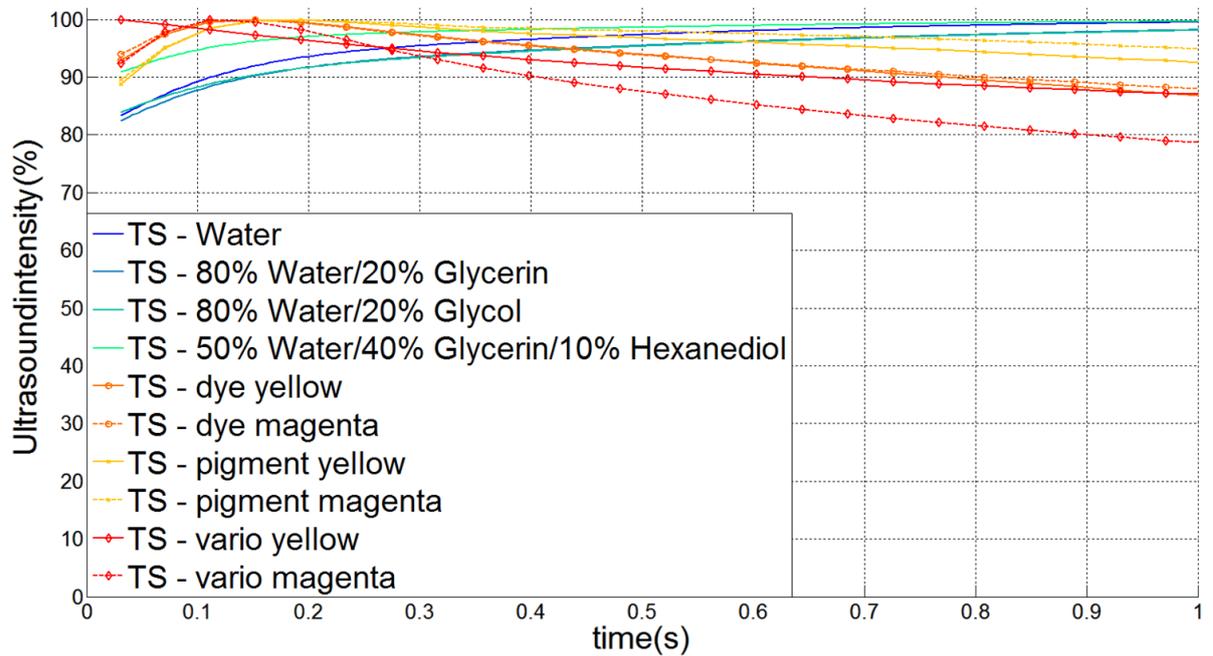


Abbildung 30:PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf AKD – Papier-Oberseite

### 8.1.2. Ungeleimtes Papier

Die erste Messung des PDA's erfolgt nach circa 0,03s nachdem die Probe in die Flüssigkeit getaucht worden ist. Bei dem ungeleimten Papier sieht man dass die Testflüssigkeiten und die Farbstofftinten eine besonders schnelle Benetzung haben. Der anfängliche Anstieg konnte nicht gemessen werden. Aufgrund dessen ist ein direkter Vergleich mit der Kontaktwinkelmessung nicht möglich. Durch den besonders starken Abfall der Kurven von den Testflüssigkeiten 100% Wasser, 20% Glykol / 80% Wasser und 20% Glycerin / 80% Wasser kann man die schnelle Penetration dieser Flüssigkeiten erkennen. Dies ist in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Reines Wasser hatte hierbei den stärksten Abfall der Kurve was auf die schnellste Penetrationsgeschwindigkeit hinweist. Gleich wie bei der ASA Messung werden die Unterschiede zwischen Wasser/Glycerin, der Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Farbstofftinte erst bei längerer Kontaktzeit zwischen Fluid und Papier größer. Auch die Penetrationsgeschwindigkeit der Tinte ist bei der ASA Messung die langsamste. Die Modelllösung mit 40% Glycerin / 50% Wasser / 10% Hexandiol penetriert etwas schneller als die Farbstofftinte in das Papier, was sich durch den steileren Kurvenverlauf der PDA Ergebnisse zeigt. Die Modellflüssigkeit mit Hexandiol ist der Farbstofftinte in nicht messbarer Benetzungszeit und Penetrationsgeschwindigkeitsverlauf sehr ähnlich und stellt das Verhalten der dieser auf dem Papier sehr gut nach. Sie ist als Modellflüssigkeit für die Farbstofftinte geeignet. Hier ist nur ein sehr geringer Unterschied zwischen den Kurvenverläufen zwischen Oberseite (TS) und Unterseite (BS) zu sehen, repräsentiert durch die ähnliche Benetzungszeit und Steigung der beiden Seiten.

Unerwartet sind die Ergebnisse der beiden anderen Tintensorten. Beide Farben der Pigment - Tinte (pigment yellow und pigment magenta) als auch der Latex -Tinten (vario yellow und vario magenta) haben zu Beginn der Messung einen leichten Abfall der Kurve, gefolgt von einem Anstieg. Dies würde bedeuten, dass bei diesen Tinten die Benetzung sehr lange dauert und es (fast) keine Penetration innerhalb der ersten Sekunde gibt. Das kann aber nicht sein, wie auch bei der IGT Messung durch den Parameter der Länge gezeigt wird. Das bedeutet, dass es zu einem abweichenden Messergebnis bei diesen Tinten kommt. In beiden Tinten - Sorten werden Farbpigmente benutzt um diesen ihre Farbe zu geben. Bei der Latex Tinte werden zusätzlich noch Latex Partikel zur Befestigung der farbgebenden Pigmente verwendet. Die Oberflächenbeschichtung dieses Papiers wurde mit Kalziumchlorid gemacht. Das Kalzium Ion fällt die Tinten, die Pigmente enthalten, zu einer Farbschicht aus, die das Messsignal des PDA beeinflusst.

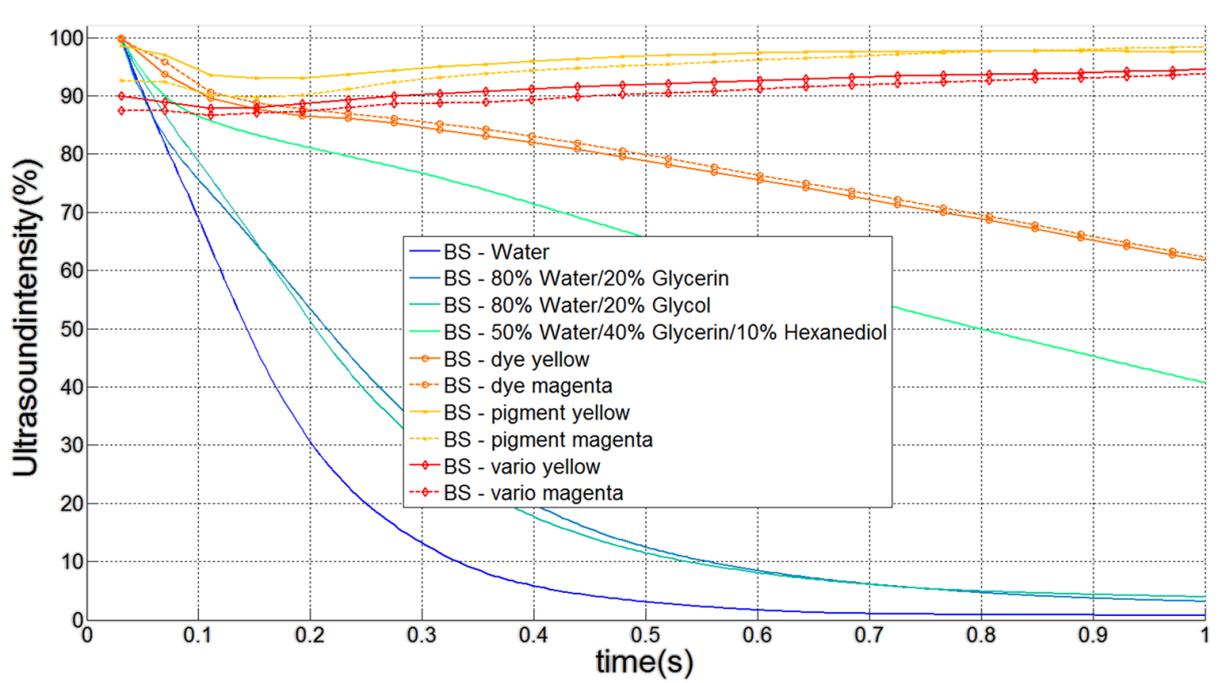


Abbildung 31: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf ungeleimten – Papier, Siebseite

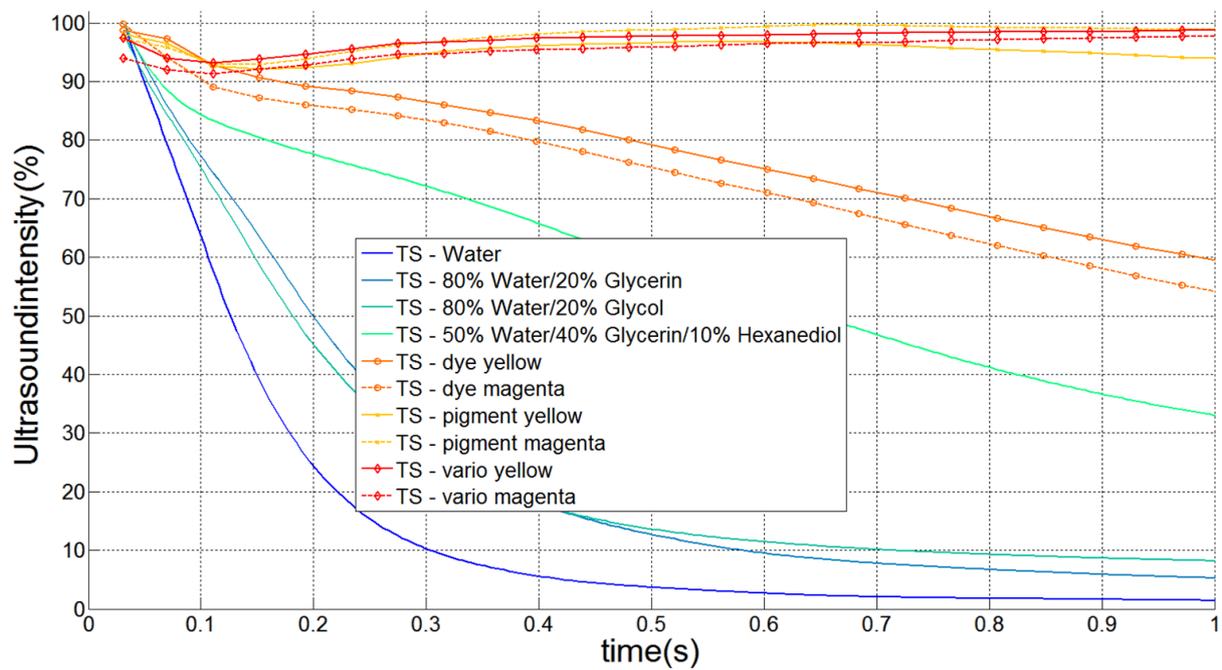


Abbildung 32: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf ungeleimten – Papier, Oberseite

### **8.1.3. Pigmentiertes Papier**

Das pigmentierte Papier besitzt eine so schnelle Benetzung, dass der PDA diese nicht messen konnte, ausgenommen die Modellflüssigkeit mit Hexandiol und die gelbe Farbstofftinte. Diese Flüssigkeiten besitzen eine etwas langsamere Benetzung. Bei der Kontaktwinkelmessung konnte dies nicht eindeutig erkannt werden. Die Steigung und somit die Penetrationsgeschwindigkeit ist bei Wasser/Glycerin größer als bei der Modellflüssigkeit mit Hexandiol. Dies gilt auch für die ASA Messung. Die Modelllösung mit 40% Glycerin / 50% Wasser / 10% Hexandiol penetriert langsamer in das Papier, was durch den flacheren Kurvenverlauf dargestellt wird. Jener ist ähnlich zu den Ergebnissen der Farbstoff Tinte (dye yellow und dye magenta), wie in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen ist. Diese Flüssigkeit repräsentiert das Verhalten der Farbstofftinten auf ungeleimten Papier sehr gut und ist als Modellflüssigkeit geeignet. Die Zweiseitigkeit bei diesem Papier ist höher als beim ungeleimten Papier. Die Benetzungszeit und die Steigung der Kurven auf den beiden Papierseiten unterscheiden sich bei dieser Sorte mehr als bei den anderen Papieren.

Wiederum haben hier beide Farben der Pigment -Tinte (pigment yellow und pigment magenta) als auch der Latex -Tinten (vario yellow und vario magenta) zu Beginn der Messung einen leichten Abfall der Kurve gefolgt von einem Anstieg. Dies würde wieder eine äußerst langsame Benetzung und (fast) keine Penetration bedeuten. Das ist aber nicht möglich, der IGT stellte mit dem Parameter der Länge eine Penetration fest. Auch dieses Papier besitzt wieder eine Oberflächenbeschichtung mit Kalziumchlorid für den HSI Druck die eine Farbschicht an der Oberfläche des Papiers erzeugt. Diese Schicht beeinflusst die Ultraschallwellen bei der PDA Messung, wie auch beim vorigen Papier.

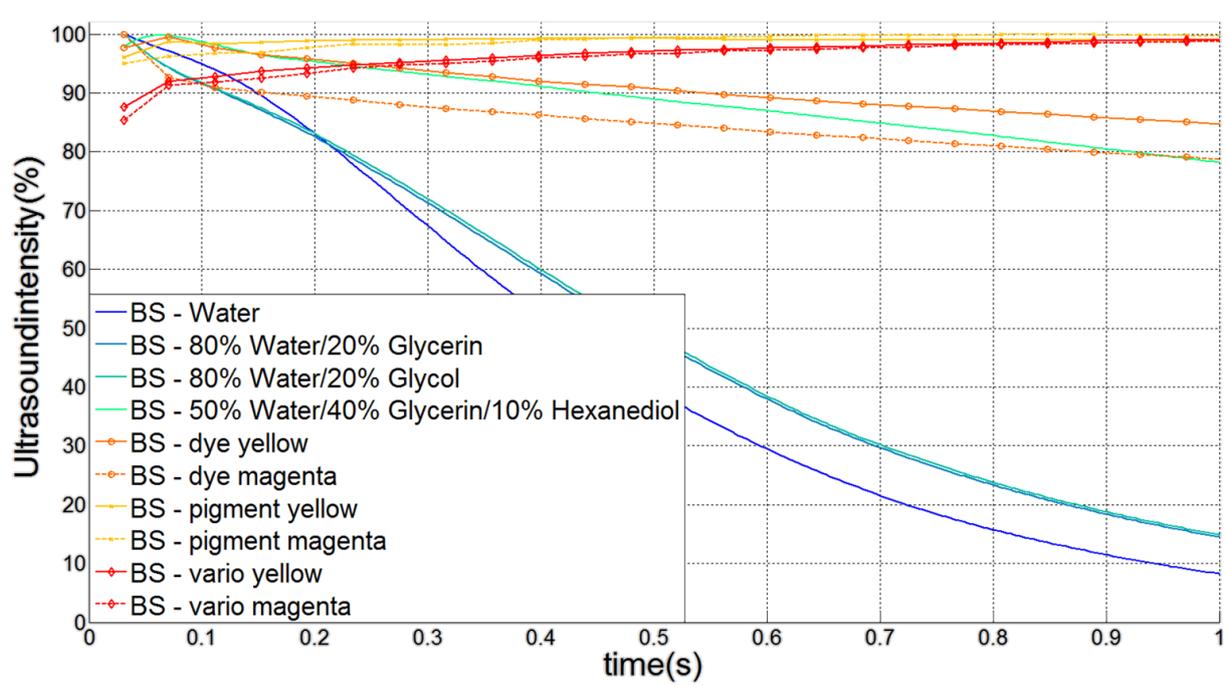


Abbildung 33: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf pigmentiertem – Papier, Siebseite

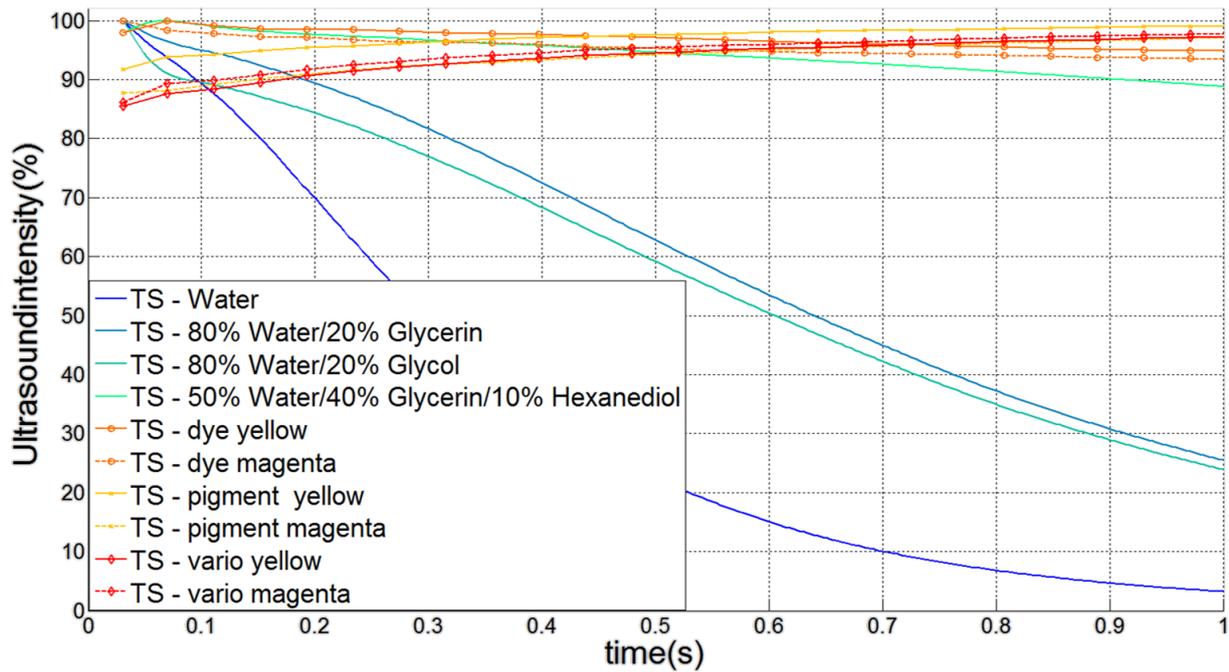


Abbildung 34: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf pigmentiertem – Papier, Oberseite

#### **8.1.4. Zusammenfassung**

Die PDA Messung besitzt eine gute Wiederholbarkeit. Sie detektiert Unterschiede zwischen dem geleimten Papier und den ungeleimten Papieren. Für das AKD geleimte Papier zeigt der PDA eine schlechte Benetzung und eine langsame Penetrationsgeschwindigkeit der Modellflüssigkeiten. Für die ungeleimten Papiere kann aufgrund der äußerst schnellen Benetzung diese nicht detektiert werden. Die Penetrationsgeschwindigkeit von Wasser ist am schnellsten gefolgt von den restlichen Modellflüssigkeiten und den Tinten bei den ungeleimten Papieren. Aufgrund der Oberflächenbeschichtung der HSI Papiere tritt durch die Farbschichtbildung eine Veränderung des Messsignals auf.

## **8.2. Kontaktwinkel – Messung**

Der Fibro – Dat misst den Kontaktwinkel der entsteht, wenn ein Flüssigkeitstropfen auf der Papieroberfläche auftrifft. Je stärker der Flüssigkeitstropfen benetzt desto stärker ist die Änderung des Kontaktwinkels und desto größer ist die Steigung der Kurven. Eine nähere Erklärung ist im Kapitel 6.2 zu finden. Ein typischer Kurvenverlauf der Kontaktwinkel Änderung ist in Abbildung 35 und Abbildung 36 zu sehen. Hier ist auch zu erkennen, dass die Tinten der gleichen Sorte einen ähnlichen Kurvenverlauf besitzen, dies repräsentiert eine gute Wiederholbarkeit.

### **8.2.1. AKD geleimtes Papier**

Das AKD geleimte Papier hat bei den Modellflüssigkeiten 100% Wasser, 20% Glykol / 80% Wasser und 20% Glycerin / 80% Wasser einen nahezu konstanten Kontaktwinkel, der auch noch deutlich höher ist als bei den anderen Papieren. Aufgrund der geringen Steigung ist eine schlechte Benetzbarkeit zu erkennen. Die gleichen Beobachtungen konnten bereits bei der PDA Messung festgestellt werden. Hier zeigte sich die schlechte Benetzung durch den langen Anstieg der Kurven dieser drei Testflüssigkeiten. Die Tinten weisen eine deutlich höhere Steigung der Kurven auf, das repräsentiert eine höhere Benetzung. Die Vario Tinte mit Latexpartikel benetzt hierbei am besten. Ihr Kontaktwinkelverlauf ist steiler und der anfängliche Kontaktwinkel ist deutlich niedriger als bei den restlichen Tinten. Die schnellere Benetzung konnte auch bei der PDA Messung festgestellt werden, hat diese hier die kürzeste Benetzungszeit. Die Flüssigkeit 40% Glycerin / 50% Wasser / 10% Hexandiol ist den Tinten im Kurvenverlauf am ähnlichsten und hat somit auch ein ähnliches Verhalten am Papier. Sie ist als Modellflüssigkeit gut geeignet. Auch bei der Kontaktwinkel - Messung ist eine leichte Zweiseitigkeit bei diesem Papier zu erkennen, repräsentiert durch die unterschiedlichen Werte der Messergebnisse auf beiden Papierseiten.

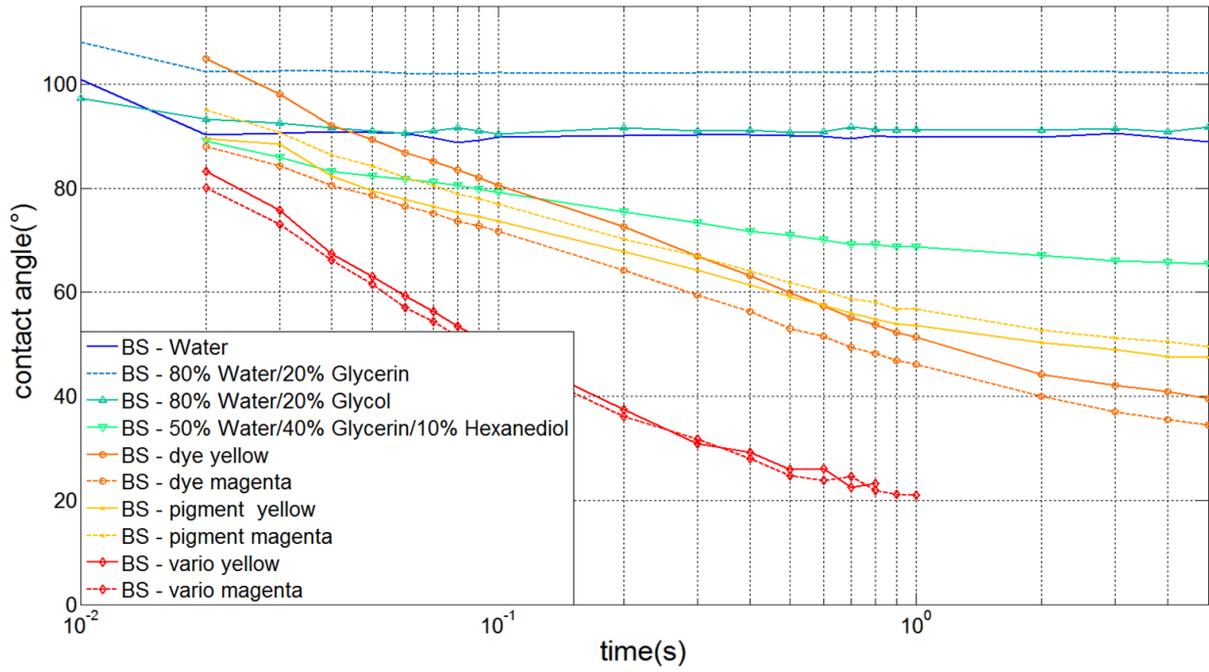


Abbildung 35: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf f AKD geleimten - Papier Siebseite

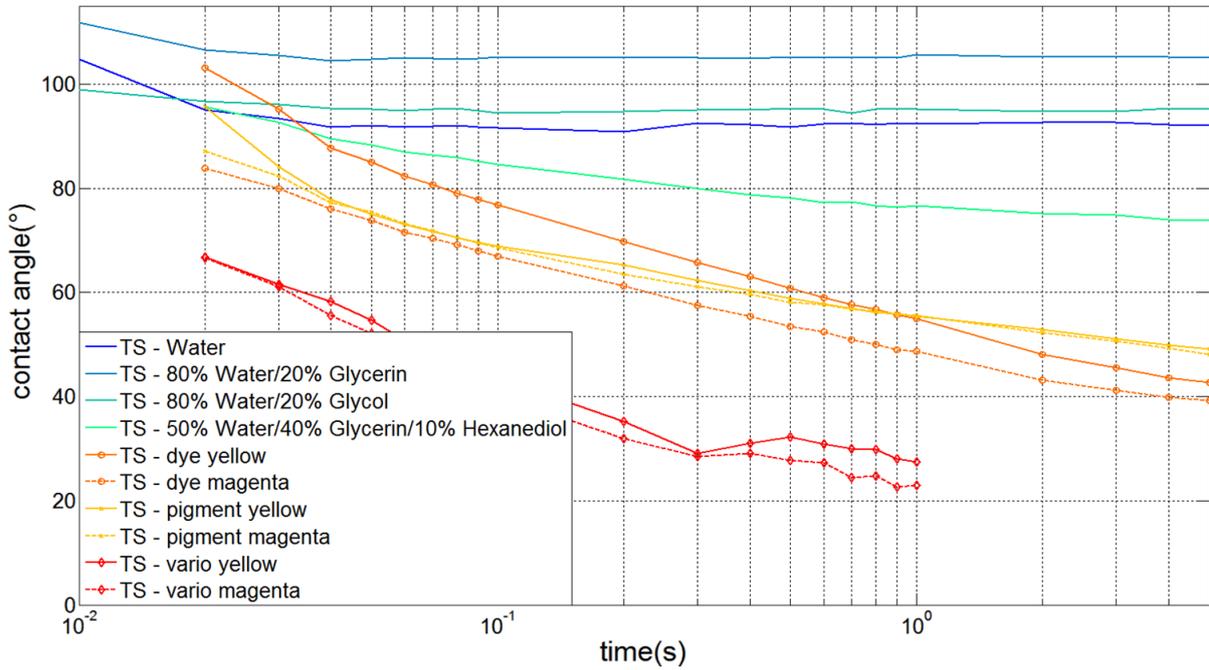


Abbildung 36: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf AKD geleimten - Papier Oberseite

### 8.2.2. Ungeleimtes Papier

Das ungeleimte Papier besitzt bei den Testlösungen 100% Wasser, 20% Glykol/ 80% Wasser und 20% Glycerin / 80% Wasser eine starke Änderung im Kontaktwinkel, dies wird durch die starke Neigung dieser Kurven verdeutlicht. Durch die nahezu konstante Neigung über den gesamten Verlauf dieser Kurven, erkennt man eine gleichmäßige Kontaktwinkeländerung über die Zeit. Diese drei Modellflüssigkeiten haben einen ähnlichen initialen Kontaktwinkel. Die Tinten und die Modellflüssigkeit mit Hexandiol haben eine stärkere Änderung im Kontaktwinkel verglichen zu den restlichen Flüssigkeiten, was durch eine stärkere Änderung des Verlaufs dieser zu erkennen ist. Das lässt auf eine stärkere Benetzung der Flüssigkeit auf dem Papier schließen. Dadurch wird der Unterschied der Winkel über die Zeit immer größer. Ein direkter Vergleich mit der PDA Messung ist bei diesem Papier leider nicht möglich, da die Benetzung beim PDA aufgrund der Schnelligkeit nicht gemessen werden konnte. Die Kurve der Flüssigkeit 10% Hexandiol / 40% Glycerin / 50% Wasser ähnelt sehr jener von der Farbstofftinte und stellt das Verhalten dieser sehr gut auf dem Papier nach. Deshalb ist diese als Modellflüssigkeit sehr gut geeignet. Bei diesem Papier zeigt die Kontaktwinkel – Messung ebenfalls wieder eine geringe Zweiseitigkeit, repräsentiert durch die kleine Differenz der Kurvenverläufe gleicher Flüssigkeiten auf den unterschiedlichen Papierseiten.

Sehr interessant ist hierbei, dass alle Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung und hoher Viskosität einen starken Abfall zwischen 0,09 Sekunden und 0,1 Sekunden besitzen. Dabei ändert sich der Kontaktwinkel innerhalb dieser Zeitspanne zwischen durchschnittlich 8°-15° davor war die Änderung deutlich geringer. Nach dieser sprunghaften Veränderung findet nur mehr eine geringe Änderung statt, dies spiegelt sich auch in der geringen Steigung bzw. Abfall dieser Kurven wieder. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte ein Wetting-Delay sein, wie er auch in [48] beschrieben wird. Dabei verzögert sich die Benetzung und findet dann sehr schnell statt.

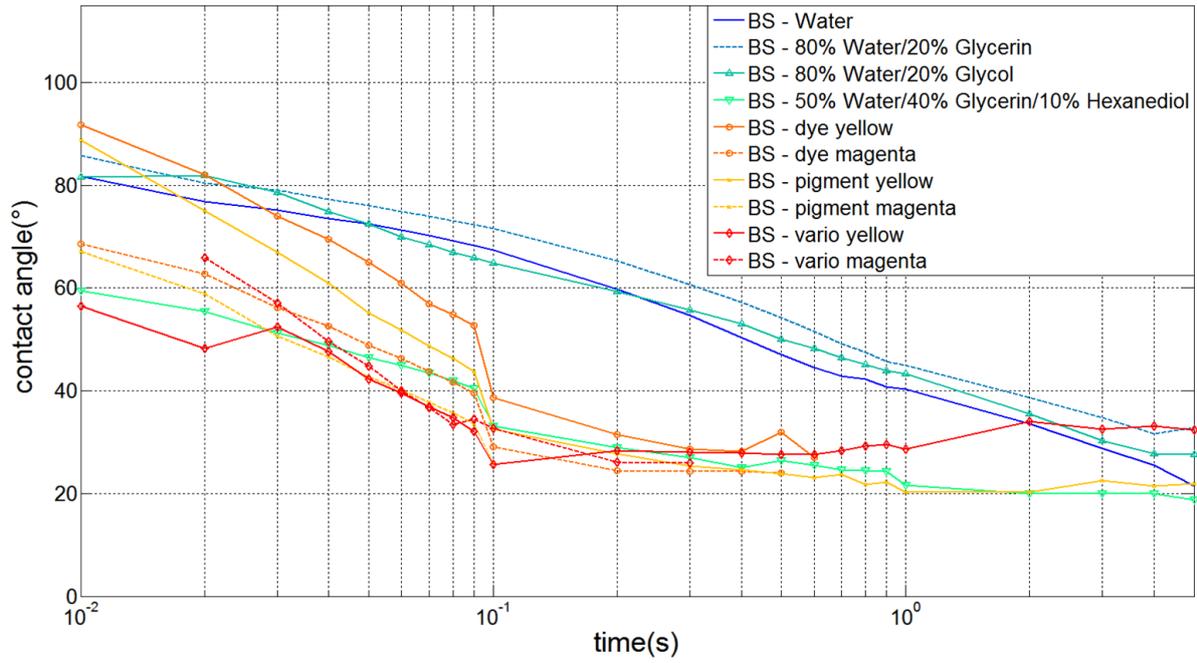


Abbildung 37: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf ungeleimten - Papier Siebseite

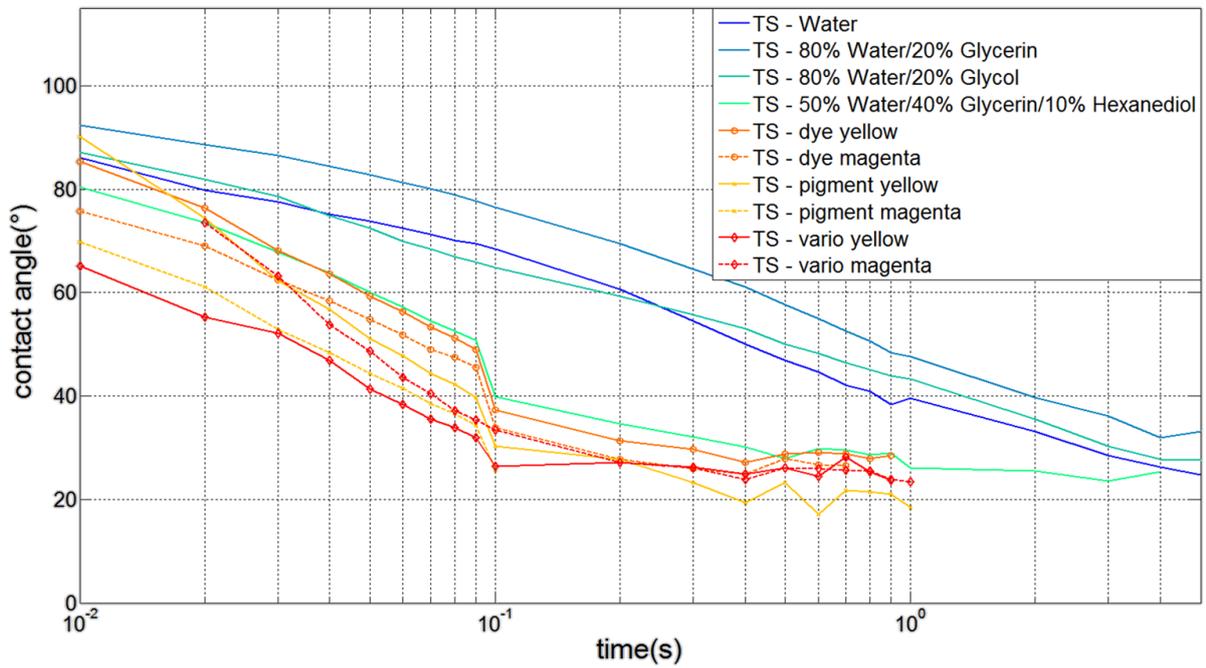


Abbildung 38: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf ungeleimten - Papier Oberseite

### **8.2.3. Pigmentiertes Papier**

Auffällig ist, dass bei diesem Papier alle Kurven sowohl einen ähnlichen initialen Kontaktwinkel haben als auch im gesamten Verlauf sehr nahe beieinanderliegen. Dies lässt auf ein ähnliches Verhalten aller Flüssigkeiten auf diesem Papier schließen. Ein direkter Vergleich mit der PDA Messung ist bei diesem Papier leider nicht möglich, da die Benetzung beim PDA aufgrund der Schnelligkeit nicht gemessen werden konnte (außer für Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Farbstofftinte). Auch für die Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Farbstofftinte kann keine klare Aussage getroffen werden, da keine deutlich langsamere Benetzung bei der Kontaktwinkelmessung festgestellt werden konnte. Die Flüssigkeiten Wasser/Glykol und Wasser/Glycerin/Hexandiol haben auf diesem Papier einen sehr ähnlichen Verlauf der Kurven verglichen mit den Tinten. Das bedeutet für dieses Papier und diese Messung könnten beide Modellflüssigkeiten als geeignet betrachtet werden. Die Zweiseitigkeit ist aufgrund der ähnlichen Werte der gleichen Flüssigkeit auf der Siebseite und Oberseite nicht ausgeprägt.

Ein besonderes Merkmal ist, dass ab etwa 0,1 Sekunden eine Abflachung der Kurven stattfindet, dies lässt ab diesem Zeitpunkt auf einen nahezu konstanten Kontaktwinkel schließen. Das Verhalten ist bei der Tinte mit Latex – Partikeln (vario yellow und vario magenta) besonders ausgeprägt, haben diese Kurven nach circa 0,1 Sekunden eine nahezu horizontale Ausrichtung. Bei diesem Papier ist eine besonders starke Benetzung vorhanden, die schnell abgeschlossen ist, repräsentiert durch den starken Abfall und anschließende Abflachung aller Kurven.

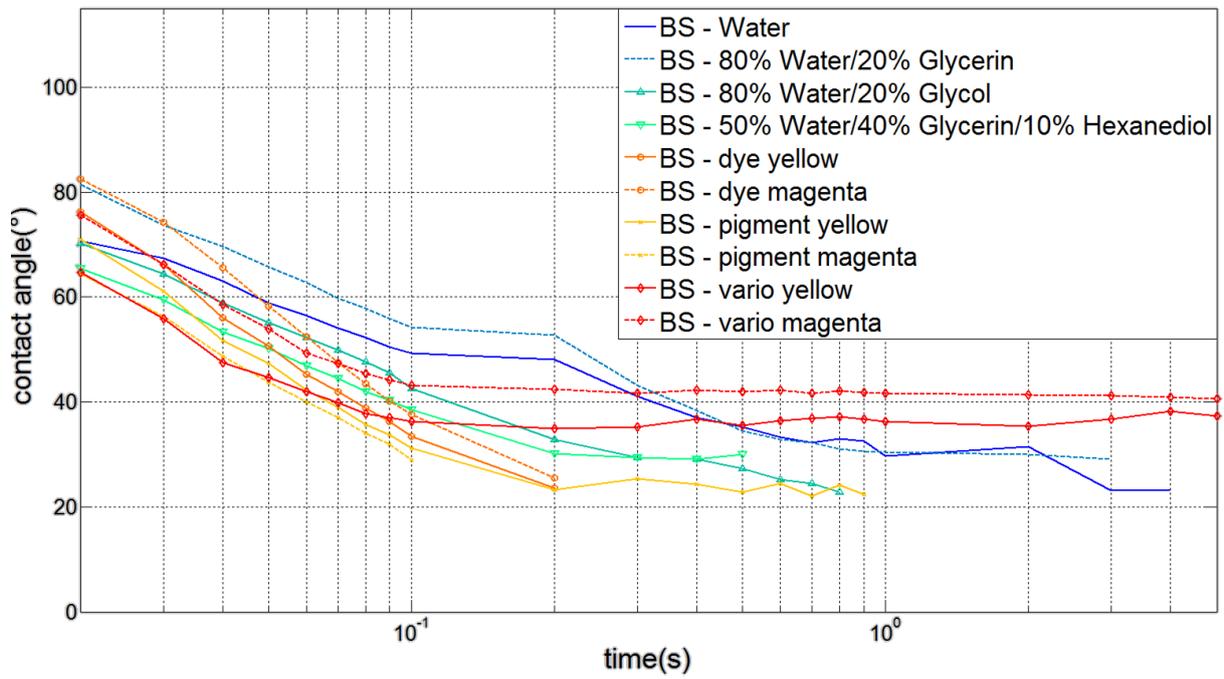


Abbildung 39: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf Pigmentiertes - Papier Siebseite

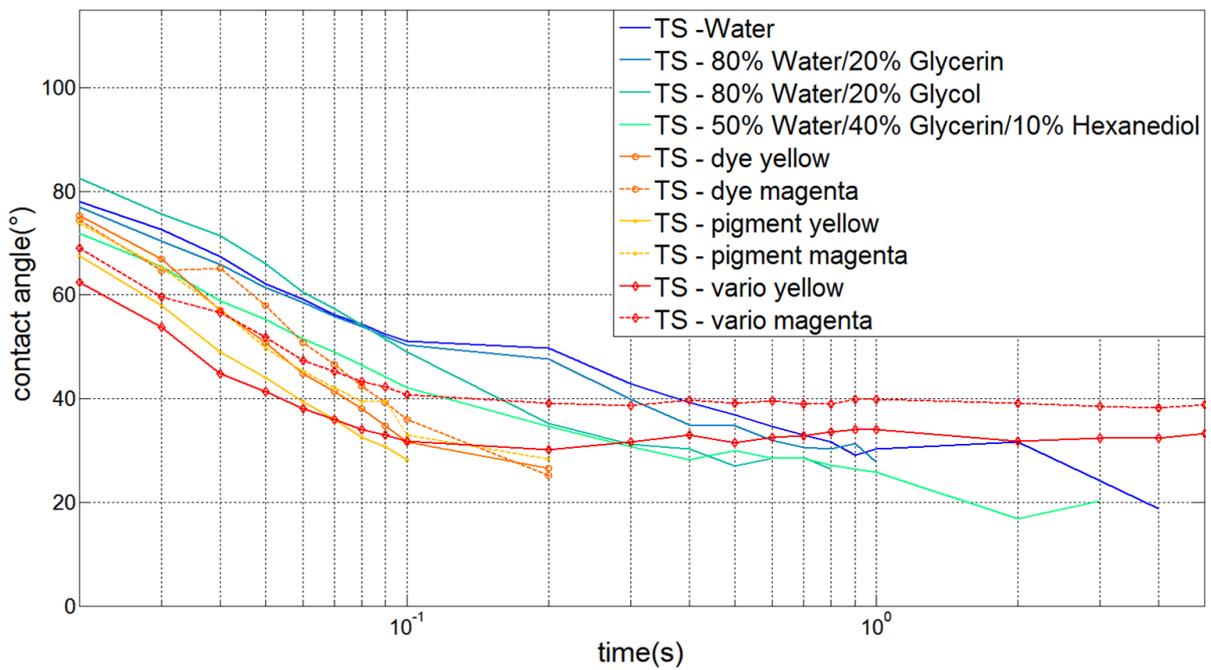


Abbildung 40: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf Pigmentiertes - Papier Oberseite

#### **8.2.4. Zusammenfassung**

Aufgrund der großen Probenmenge konnte eine gute Reproduzierbarkeit festgestellt werden. Auch die Kontaktwinkelmessung stellt deutliche Unterschiede zwischen dem geleimten Papier und den ungeleimten Papieren fest. Das AKD geleimte Papier besitzt für die Modellflüssigkeiten eine schlechtere Benetzung als für die Tinten. Bei den ungeleimten Papieren ist für alle Flüssigkeiten eine deutlich schnellere Benetzung zu sehen.

### **8.3. IGT Messung**

Die Auswertung der IGT Messung erfolgt durch drei Parameter, die Länge der Tropfenspur am Papier, der Fläche dieser und mittels Aspect Ratio (Breite durch Länge des Tropfens). Jeder Parameter wird durch das Volumen des Tropfens geteilt um somit eine Normierung durchzuführen. Nähere Erläuterungen hierzu im Kapitel 6.3. Aufgrund der Ähnlichkeit der Parameter bei Tinten der gleichen Sorte, siehe Abbildung 41-Abbildung 58, ist eine gute Wiederholbarkeit zu erkennen.

#### **8.3.1. AKD –Papier**

- Aspect Ratio (AR)

Zur besseren Vorstellung wurden in der Abbildung 41 beispielhafte Tropfenspuren zu den dazu passenden Aspect Ratios gezeichnet. Dies illustriert, dass eine lange und dünne Tropfenspur einen kleinen Aspect Ratio besitzt und eine kurze, breite Tropfenspur einen großen Wert für diesen Parameter aufweist.

Die Modellflüssigkeiten mit 100% Wasser, 20% Glykol / 80% Wasser und 20% Glycerin / 80% Wasser haben einen niedrigen AR, benetzen dieses Papier also nur sehr schlecht, weil die Breite des Tropfens sehr gering ist. Alle Tinten haben einen hohen AR und benetzen die Oberfläche des Papiers im Vergleich zu den Modellflüssigkeiten deutlich besser. Ähnliches konnte auch bei der PDA und der Kontaktwinkelmessung beobachtet werden. Die Ergebnisse sind plausibel. Die Modellflüssigkeit die Hexandiol enthält hat eine bessere Benetzung als die restlichen Modellflüssigkeiten aber eine schlechtere als die der Tinten. Dies ist auf Grund des Aspect Ratio Wertes zu erkennen, der sich in der Mitte der Werte von Tinte und restlichen Modellflüssigkeiten befindet. Die Modellflüssigkeit mit Hexandiol repräsentiert die Tinte am

besten. Es ist eine leichte Zweiseitigkeit bei diesem Parameter zuerkennen, die Siebseite (BS) hat einen leicht anderen normierten Aspect Ratio als die Oberseite (TS).

- Fleche

Betrachtet man den Parameter der normierten Fläche der Flüssigkeiten, sieht man keinen wesentlichen Unterschied zwischen den Flüssigkeiten, alle Werte sind ähnlich zueinander. Daraus würde man schließen, dass alle Flüssigkeit ungefähr gleich schnell ins Papier penetrieren. Bei der PDA und ASA Messung wurde ein deutlich größerer Unterschied zwischen den Modellflüssigkeiten und den Tinten festgestellt. Dieser Parameter liefert daher keine plausiblen und vergleichbaren Ergebnisse.

- Länge

Die Länge der Tropfenspur weist wieder deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Werten der Flüssigkeiten auf. Die Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol haben eine lange Tropfenspur, dies repräsentiert eine langsame Penetrationsgeschwindigkeit. Die Tinten haben eine deutlich kürzere Länge, sie penetrieren schneller. Mehr Flüssigkeit wird dadurch während der gleichen Zeitspanne vom Papier aufgenommen und die Spur wird kürzer. Ähnliche Ergebnisse werden auch von der PDA - und ASA Messung (abgesehen von den Pigment- und Latex Tinten bezüglich der Penetration Dynamics Analyser Messung) festgehalten. Diese Messmethode liefert plausible Ergebnisse. Im Allgemeinen ähnelt der Wert der Modellflüssigkeit mit Hexandiol den Werten der Tinten am meisten und ist somit als Modellflüssigkeit sehr gut geeignet. Auch bei diesem Parameter gibt es eine deutliche Zweiseitigkeit, gezeigt durch die unterschiedlichen Werte für dieselbe Flüssigkeit der beiden Papierseiten.

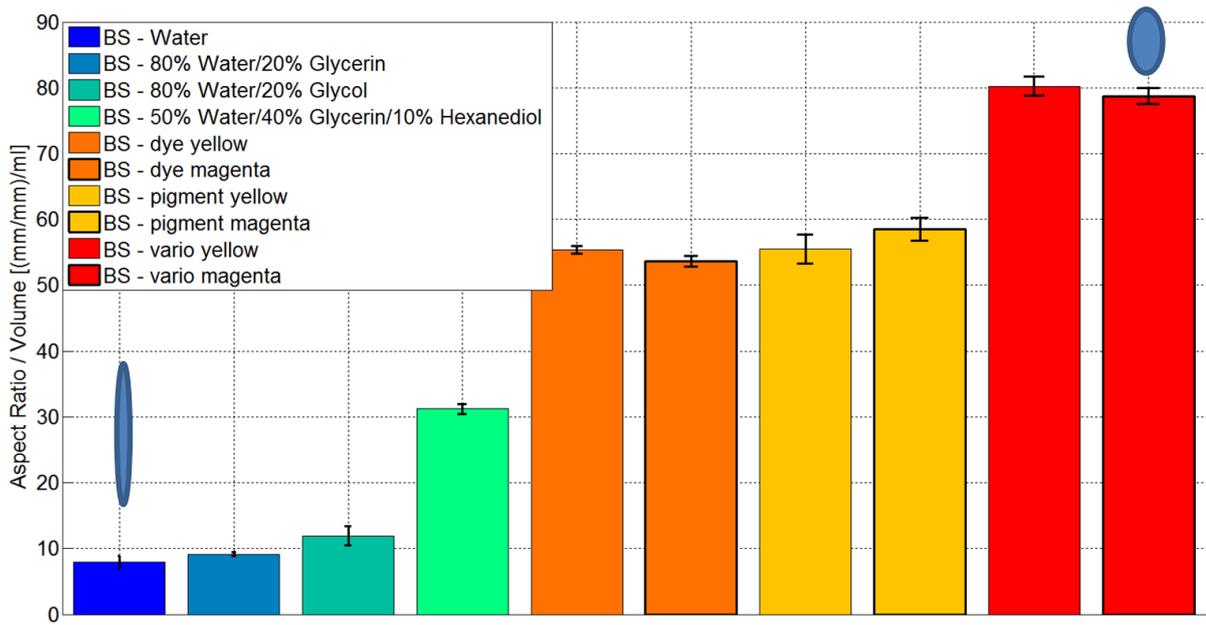


Abbildung 41: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geimten Papier – Aspect Ratio - Siebseite

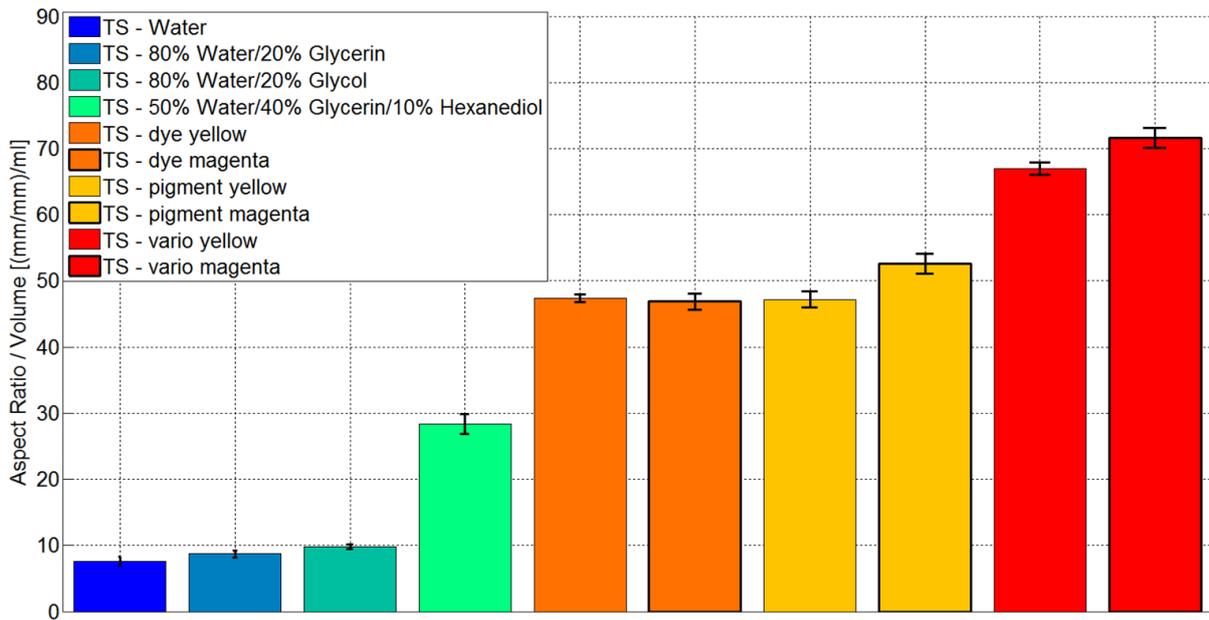


Abbildung 42: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geimten Papier –Aspect Ratio- Oberseite

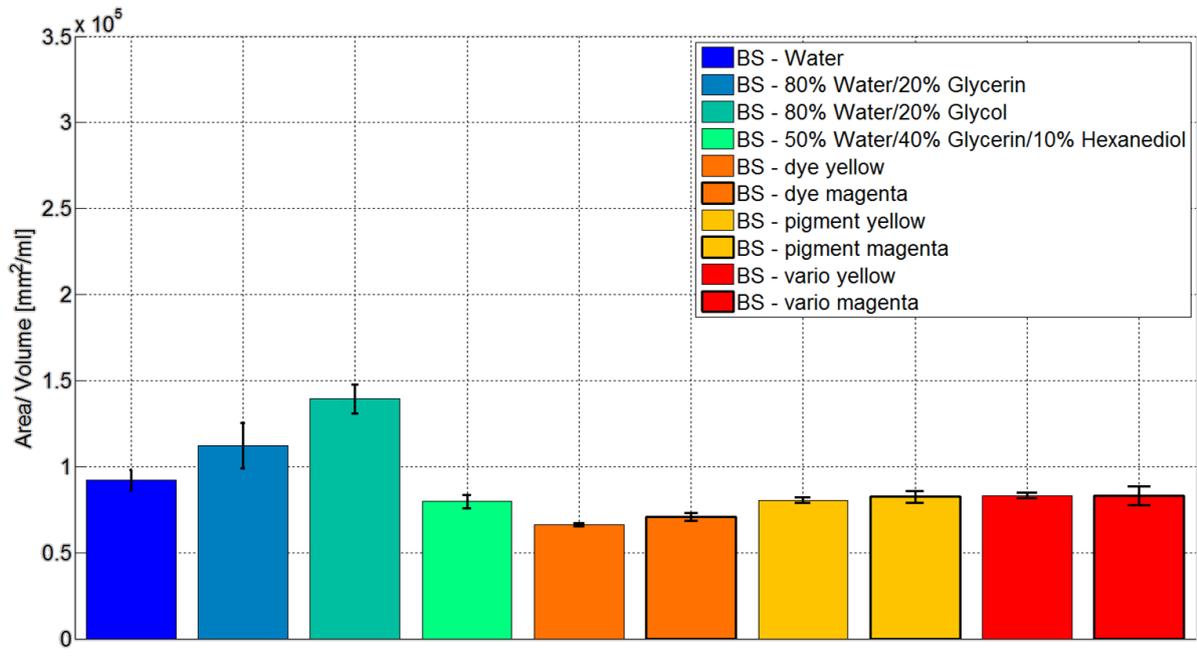


Abbildung 43: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleimtes Papier – Fläche- Siebseite

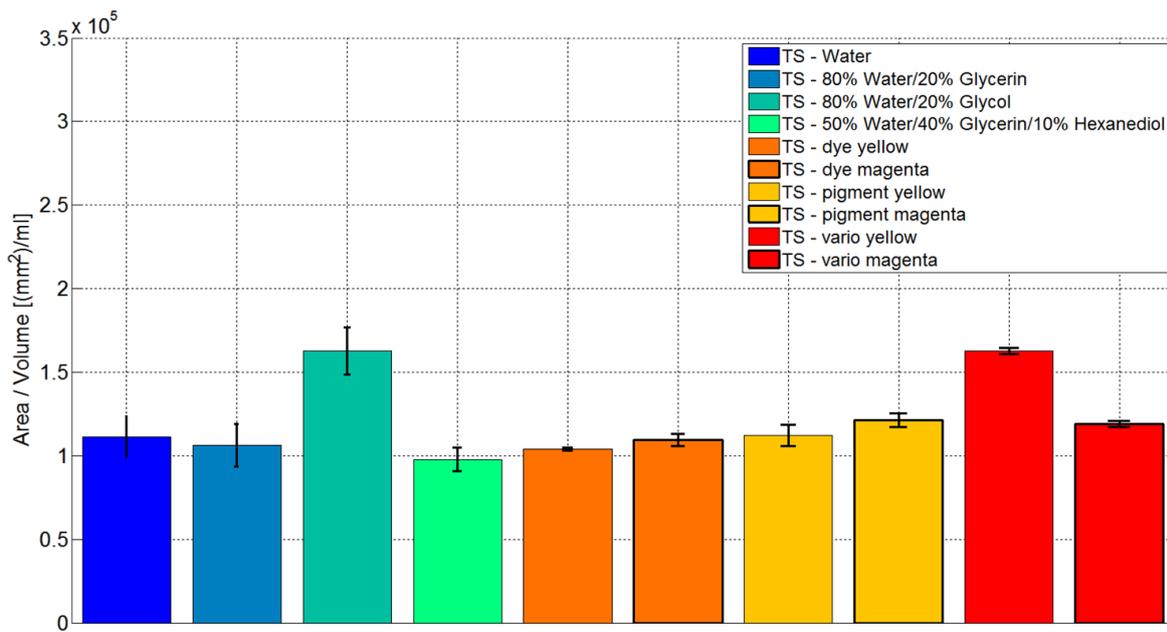


Abbildung 44: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleimtes Papier - Fläche- Oberseite

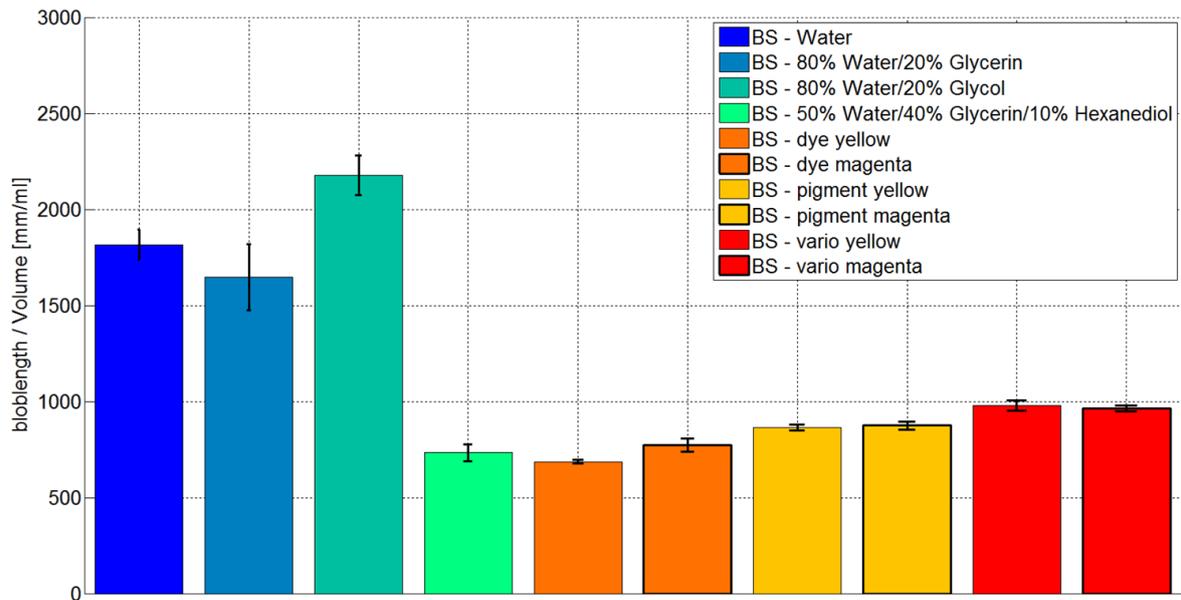


Abbildung 45: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geimtes Papier - Länge - Siebseite

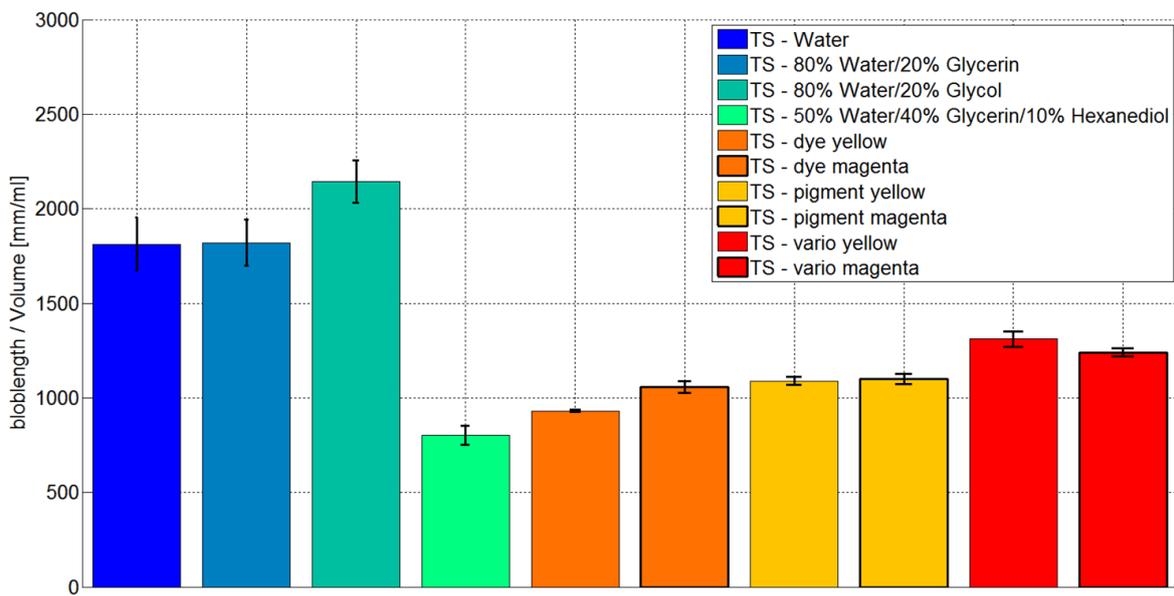


Abbildung 46: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geimtes Papier - Länge - Oberseite

### 8.3.2. Ungeleimtes Papier

- Aspect Ratio

Die Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol haben einen niedrigen Aspect Ratio, sie benetzen schlecht. Im Gegensatz dazu haben die Tinten einen hohen Wert was bedeutet, dass sie gut benetzen. Die Vario Tinte, die Latex Partikel enthält, hat hier den größten Wert und benetzt am besten. Das korreliert sehr gut mit der Kontaktwinkelmessung, bei der diese Tinten ebenfalls die größte Änderung im Winkel (=größte Benetzung) hatten. Die Modellflüssigkeit mit Hexandiol weist wieder den ähnlichsten Wert aller Testflüssigkeiten im Vergleich zu den Tinten auf und stellt das Verhalten jener am besten nach. Sie ist als Modellflüssigkeit gut geeignet. Die Zweiseitigkeit ist bei diesem Parameter nur leicht vorhanden. Es tritt nur eine kleine Differenz zwischen den Werten der gleichen Flüssigkeit auf den verschiedenen Papierseiten auf.

- Fläche

Die Fläche der Tropfen ist auch beim ungeleimten Papier für alle Flüssigkeiten ähnlich, was auf eine ähnliche Penetrationsgeschwindigkeit der Fluide schließen lässt. Bei der PDA und ASA Messung wurde ein deutlich größerer Unterschied zwischen den Modellflüssigkeiten und der Tinte festgestellt. Dieser Parameter liefert daher keine plausiblen und vergleichbaren Ergebnisse.

- Länge

Die Tropfenlänge bei den Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol ist deutlich länger als bei den Tinten. Dies würde bedeuten, dass diese langsamer penetrieren. Die PDA Messung zeigt jedoch für diese Flüssigkeiten eine schnellere Penetration. Auch die ASA Messung zeigt für die Modellflüssigkeit Wasser/Glycerin eine schnellere Flüssigkeitsaufnahme als bei der Tinte. Dieser Parameter ist daher weder vergleichbar noch plausibel bei diesem Papier.

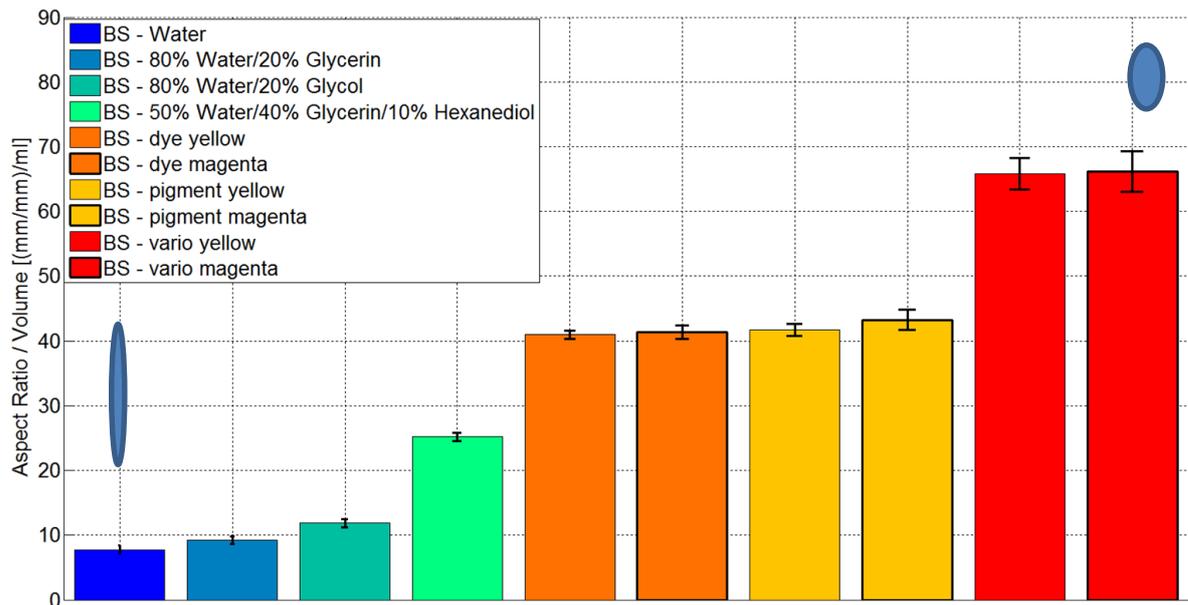


Abbildung 47: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf ungeleimten Papier – Aspect Ratio - Siebseite

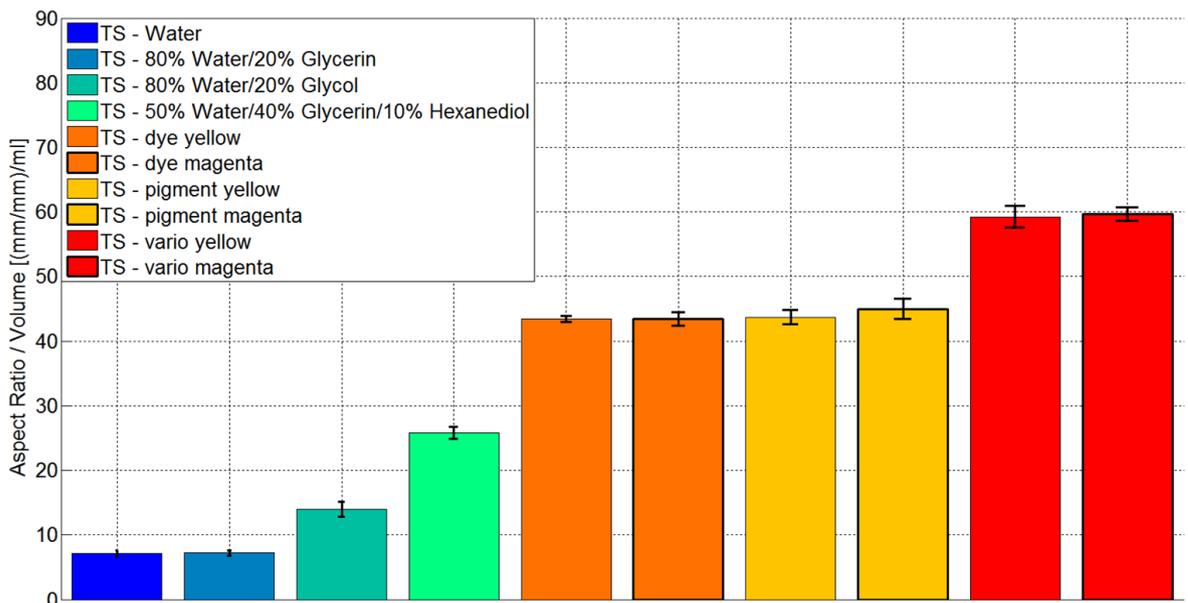


Abbildung 48: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf ungeleimten Papier – Aspect Ratio- Oberseite

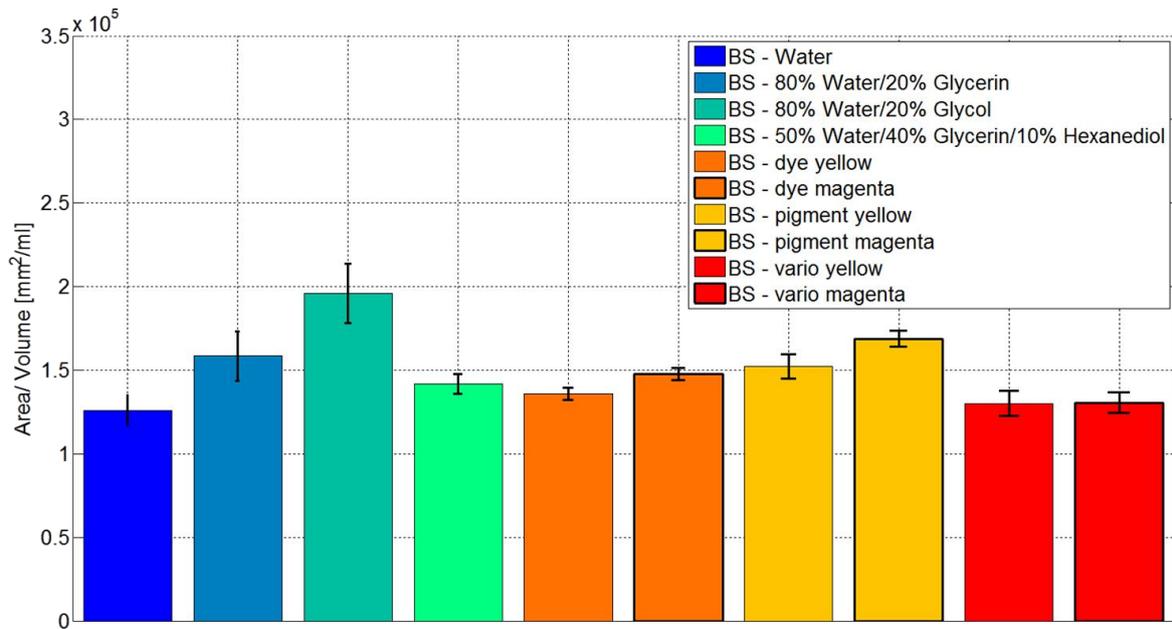


Abbildung 49: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Siebseite

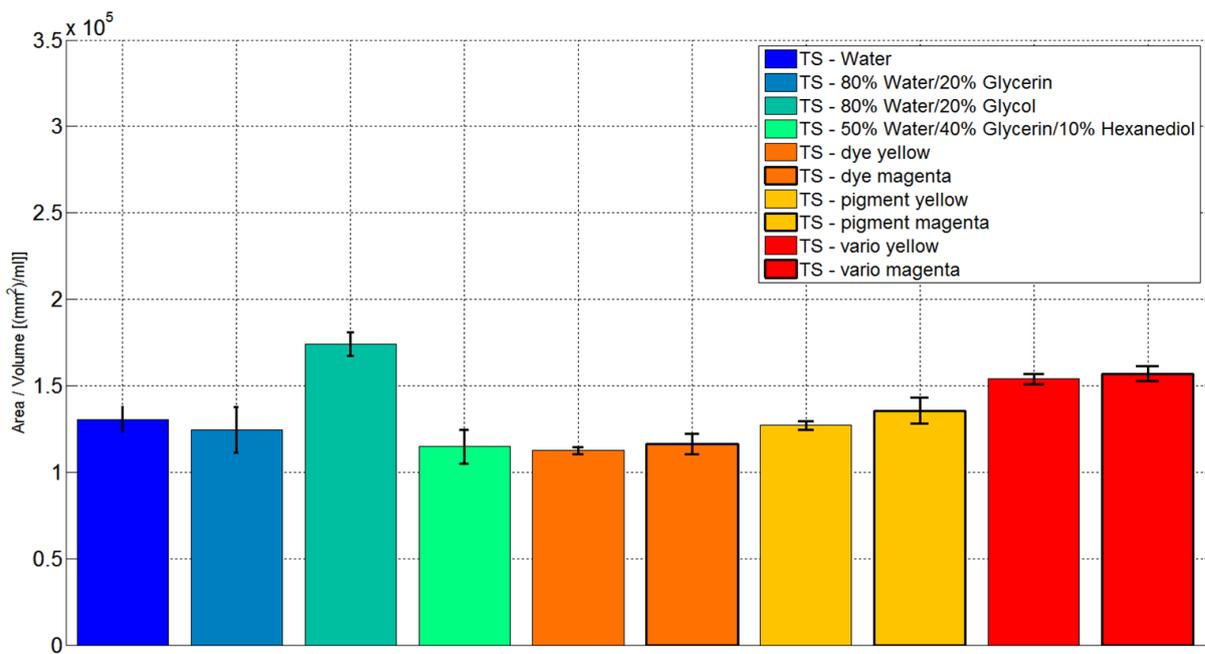


Abbildung 50: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Oberseite

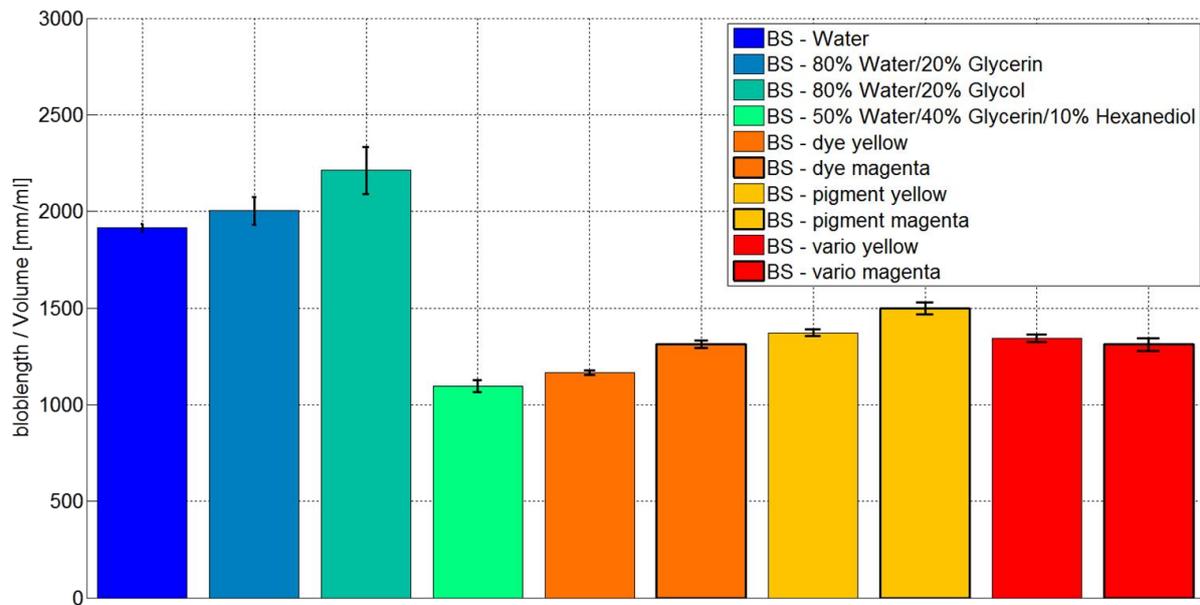


Abbildung 51: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Länge - Siebseite

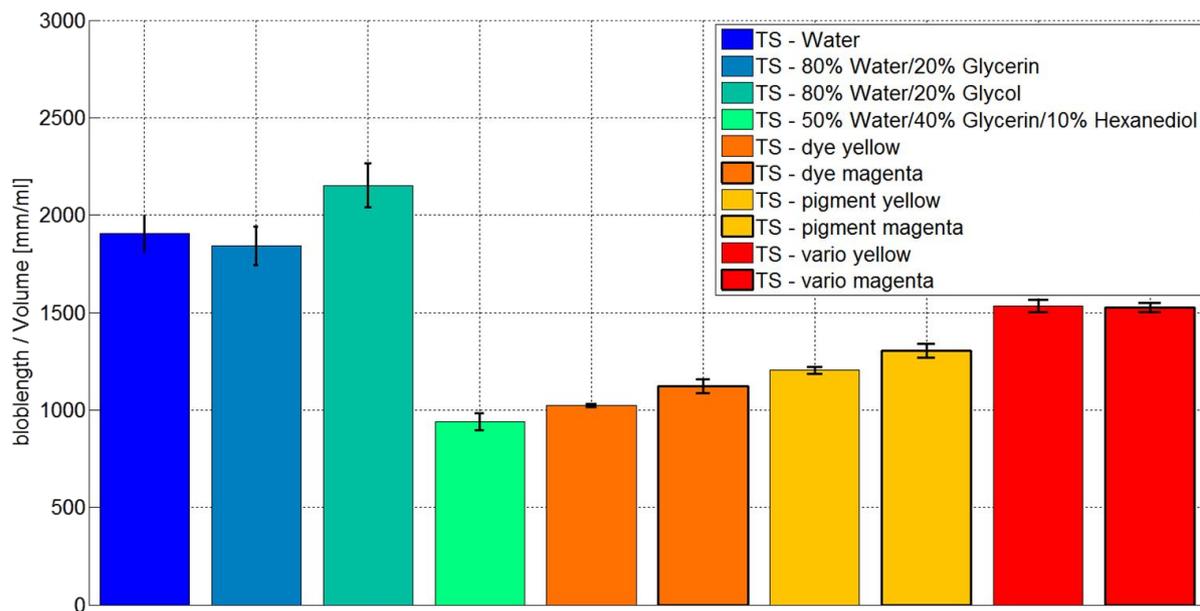


Abbildung 52: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Oberseite

### 8.3.3. Pigmentiertes Papier

- Aspect Ratio

Auch in der Abbildung 53 sind zur leichteren Vorstellung zwei beispielhafte Tropfen zu sehen. Die deutlich unterschiedlichen Werte von Modellflüssigkeiten und Tinten würden darauf schließen lassen dass die Modellflüssigkeiten sehr schlecht und die Tinten sehr gut benetzen. Dies ist in der Abbildung 53 und der Abbildung 54 zu erkennen. Diese Beobachtungen stimmen nicht mit der Kontaktwinkel – Messung überein. Die Benetzung auf diesem Papier findet für alle Flüssigkeiten ungefähr gleich schnell statt. Auch der PDA konnte keine deutlichen Unterschiede bei der Benetzung feststellen. Der AR liefert daher keine plausiblen und vergleichbaren Ergebnisse für dieses Papier.

- Fläche

Aufgrund der sehr ähnlichen Werte der Fläche, die in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt sind, können keine genauen Aussagen über die unterschiedliche Penetrationsgeschwindigkeit zwischen den zehn Flüssigkeiten auf diesem Papier getroffen werden. Das würde wieder bedeuten dass alle Flüssigkeiten ungefähr gleich schnell ins Papier penetrieren. Bei der PDA und ASA Messung wurden deutliche Unterschiede zwischen den Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol bzw. Wasser/Glycerin und Tinten festgestellt. Dieser Parameter liefert daher keine plausiblen und vergleichbaren Ergebnisse.

- Länge

Die Länge ist am größten für die Modellflüssigkeiten Wasser/Glycol und Wasser/Glycerin. Gefolgt von der Vario Tinte. Am kürzesten ist die Länge der Modellflüssigkeit mit Hexandiol gefolgt von den restlichen Tinten. Das würde bedeuten dass die Flüssigkeiten Wasser/Glycerin und Wasser/Glykol langsamer penetrieren als die Tinten. Die PDA Messung zeigt jedoch für diese eine schnellere Penetration. Auch die ASA Messung stellt eine höhere Penetrationsgeschwindigkeit für Glycerin/Wasser im Vergleich zur Tinte fest. Die Ergebnisse der Länge sind daher nicht plausibel und vergleichbar.

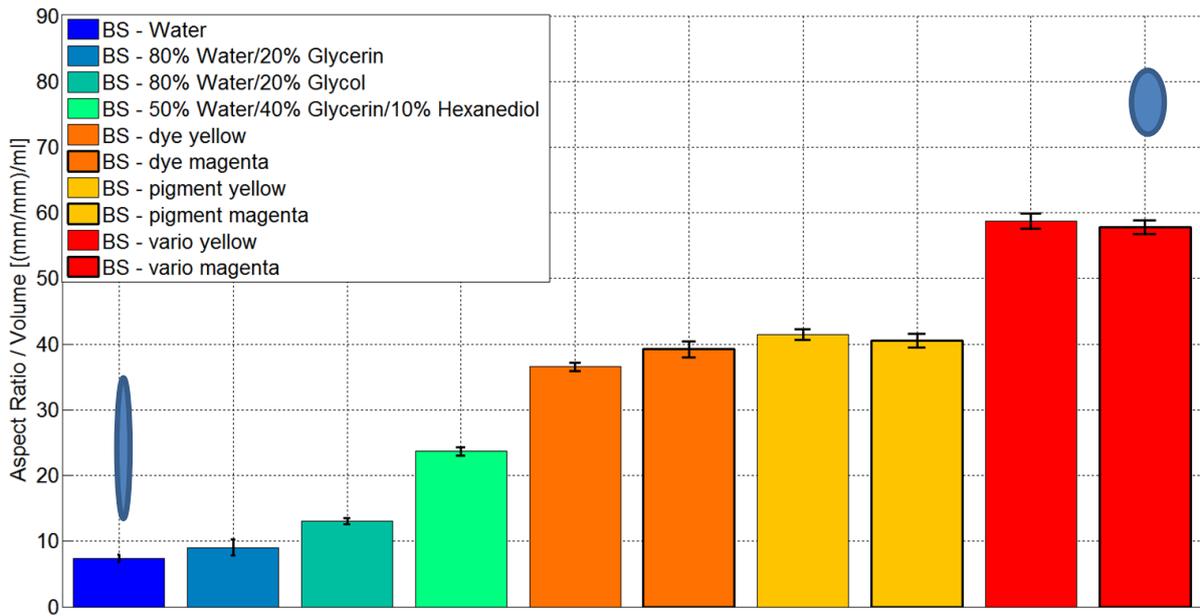


Abbildung 53: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier –Aspect Ratio - Siebseite

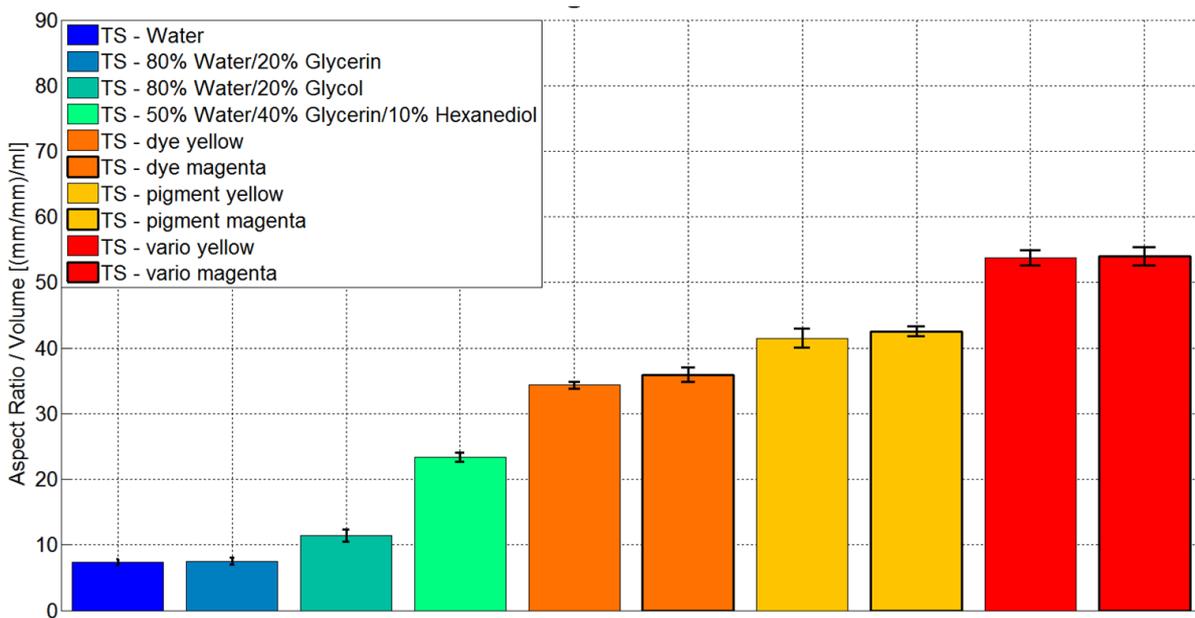


Abbildung 54: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Aspect Ratio – Oberseite

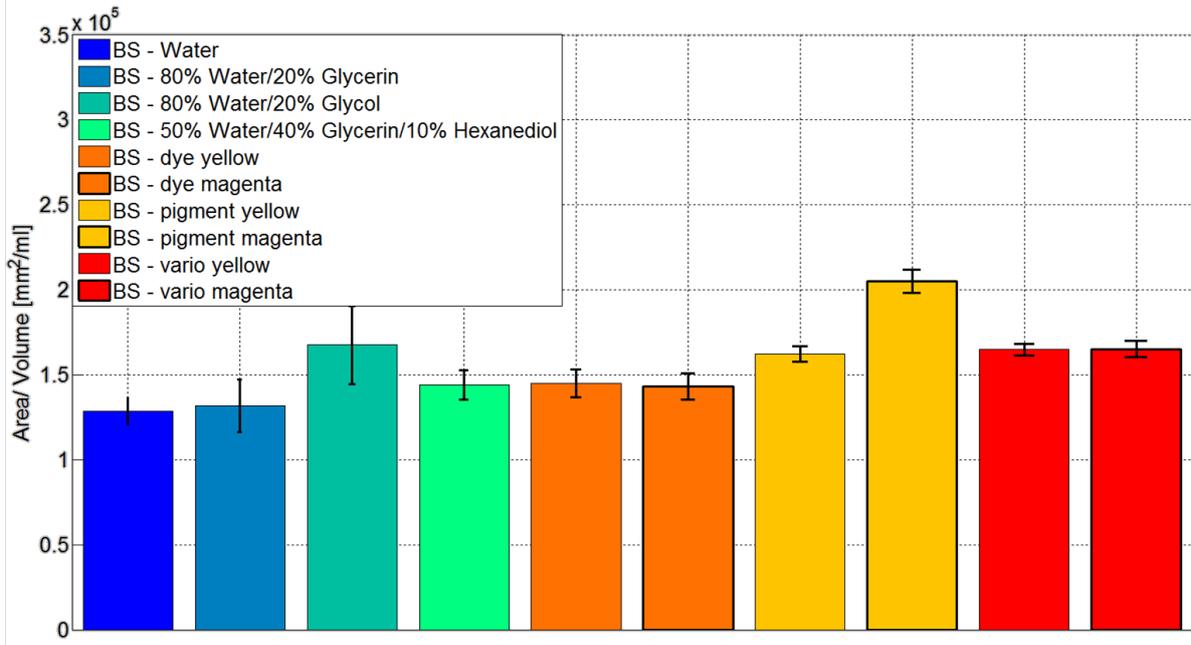


Abbildung 55: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Fläche- Siebseite

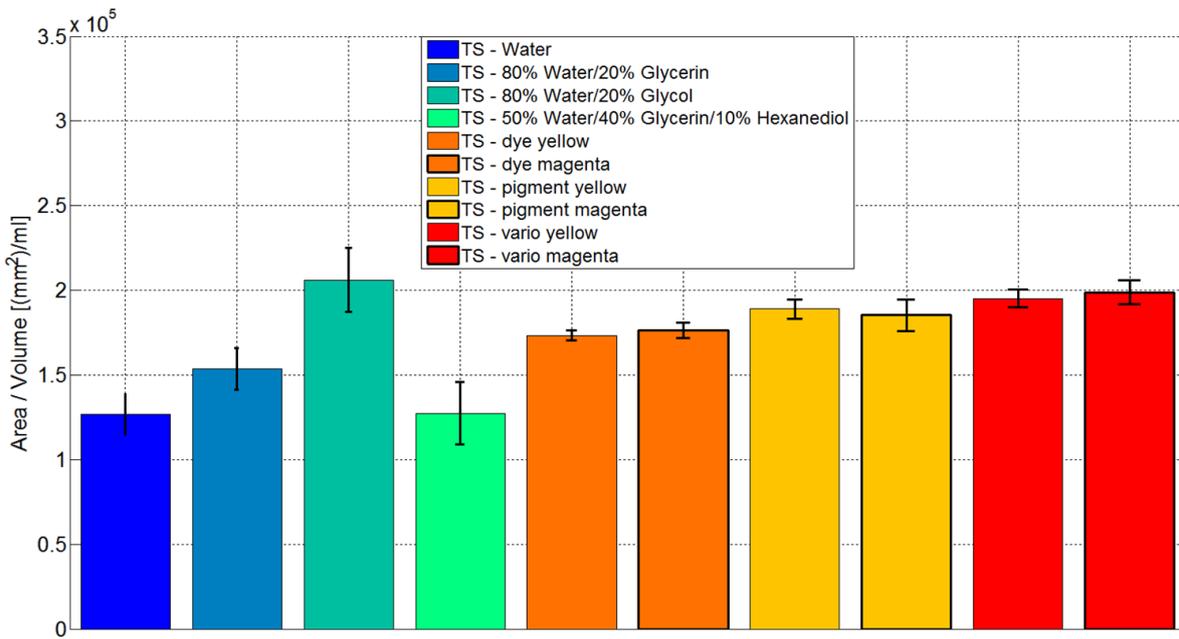


Abbildung 56: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Fläche- Oberseite

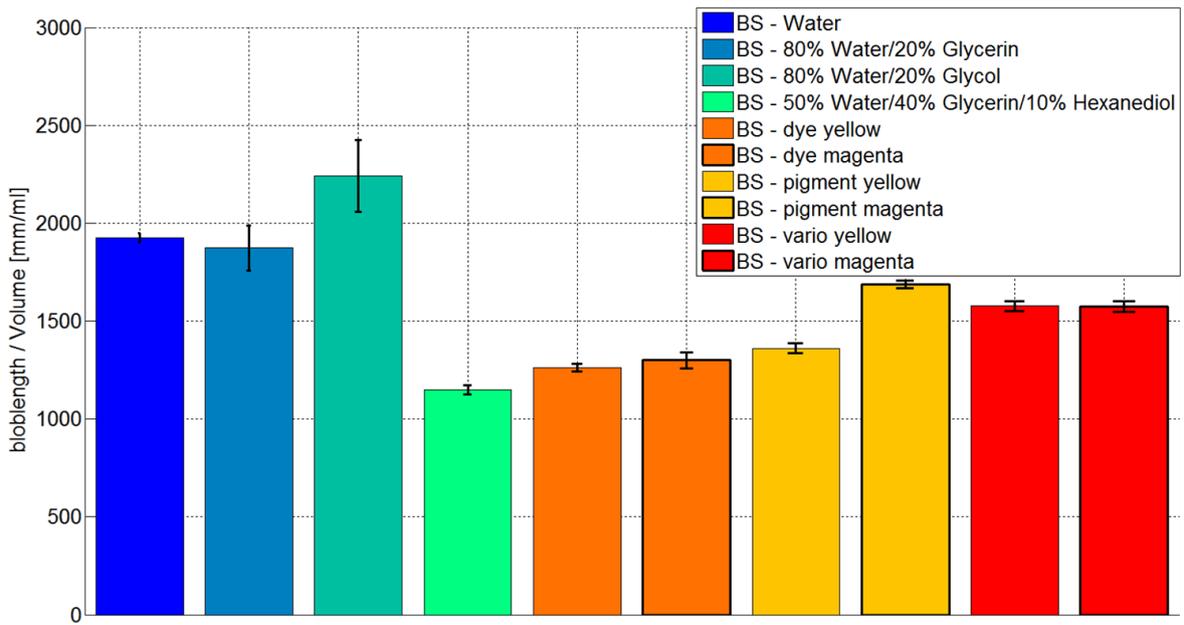


Abbildung 57: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Länge – Siebseite

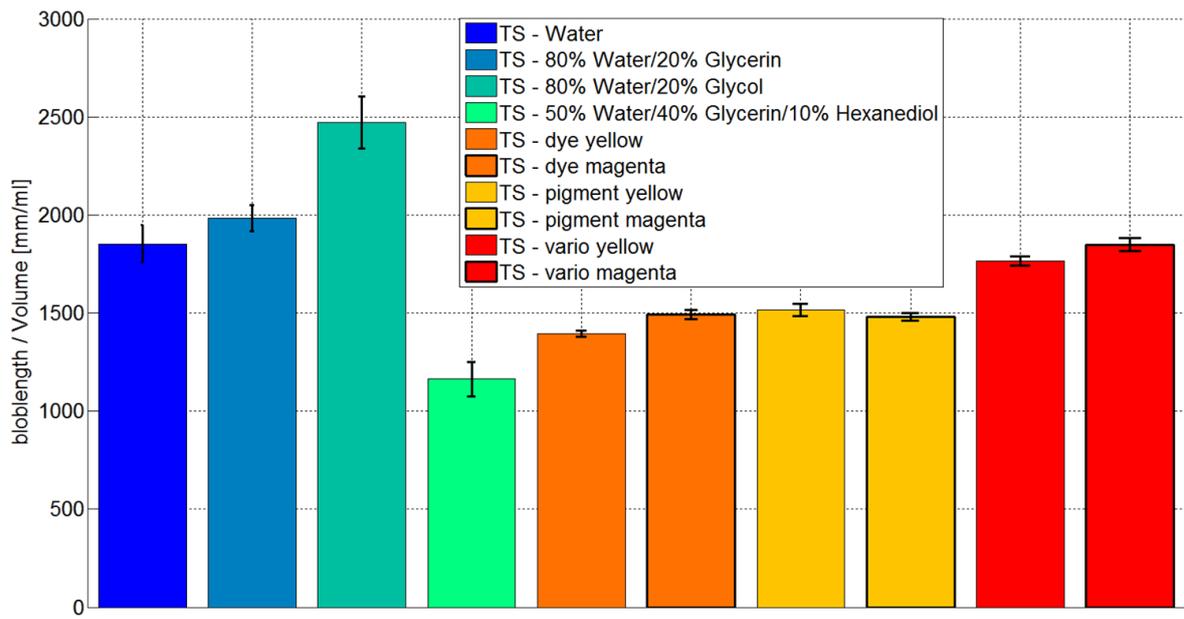


Abbildung 58: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Länge – Oberseite

### **8.3.4. Zusammenfassung**

Der Aspect Ratio liefert nicht für alle Papiere plausible Ergebnisse. Beim pigmentierten Papier würde man aufgrund der Ergebnisse auf eine deutlich bessere Benetzung der Tinten schließen. Alle Flüssigkeiten benetzen auf diesem Papier aber ähnlich. Der Parameter der Fläche lässt bei allen Papieren eine ähnliche Penetrationsgeschwindigkeit vermuten. Dies ist nicht der Fall. Der Parameter der Länge stellte bei den Modellflüssigkeiten bei allen Papieren eine langsamere Penetration fest, das ist aber tatsächlich nur beim AKD geleimten Papier der Fall. Die Ergebnisse des Aspect Ratios und der Länge stimmen teilweise mit den Ergebnissen der anderen Messmethoden überein. Die Ergebnisse der Fläche lassen bei allen Papieren auf falsche Tatsachen schließen. Der IGT liefert nur teilweise plausible Ergebnisse.

## **8.4. Automatic Scanning Absorptometer (ASA)**

Aufgrund der vorangegangenen Testergebnisse wurde die ASA – Messung nur für die Flüssigkeiten durchgeführt, bei denen die beste Korrelation der anderen Messungen zu erkennen war. Dies war die Modellflüssigkeit mit 80% Wasser und 20% Glycerin, 10% Hexandiol / 40% Glycerin / 50% Wasser und die Farbstofftinte Magenta.

Die ASA - Kurven geben Auskunft über die Kontaktzeit und das dazugehörige, aufgenommene Flüssigkeitsvolumen. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Nähere Beschreibungen hierzu sind dem Kapitel 6.4 zu entnehmen.

### **8.4.1. AKD geleimtes Papier**

Die ASA Messung misst hier die Penetrationsgeschwindigkeit im Bereich unter 100ms. Der PDA misst in diesem Zeitintervall beim AKD geleimten Papier noch die Benetzung. Ein zeitgenauer Vergleich ist daher nicht möglich. Für den Parameter der ASA Messung wird die Steigung der Kurve zwischen den letzten Messpunkten zwischen 70ms und 80ms verwendet um den Unterschied der Zeit so gering wie möglich zu halten.

Die ASA Messung zeigt eine besonders hohe Aufnahme von der Modellflüssigkeit mit Hexandiol und eine ähnliche Aufnahme der Flüssigkeit Wasser/Glycerin und der Tinte. Dieser

große Unterschied der Flüssigkeit mit Hexandiol und dem Rest der Fluide kann noch nicht erklärt werden. Der Grund für die negative Steigung der Wasser/Glycerin Kurve könnte auf die Rauigkeit des Papiers zurück zu führen sein, siehe Abbildung 59. Diese Beobachtungen korrelieren in Bezug auf die Flüssigkeitsaufnahme nicht mit der PDA Messung. Dieser misst eine deutlich langsamere Penetration von Wasser/Glycerin im Vergleich zur Farbstofftinte. Bezüglich der Penetrationsgeschwindigkeit zwischen den letzten Messpunkten ist die Modellflüssigkeit mit Hexandiol der Tinte am ähnlichsten. Bezüglich der Flüssigkeitsaufnahme unterscheiden sich diese sehr. Das bedeutet diese Modellflüssigkeit ist für die ASA Messung auf dem AKD geleimten Papier, nach jetzigem Standpunkt, nicht geeignet. Es ist eine deutliche Zweiseitigkeit für die Tinte und die Modellflüssigkeit mit Hexandiol zu erkennen, gezeigt durch den Unterschied der Kurven der verschiedenen Papierseiten.

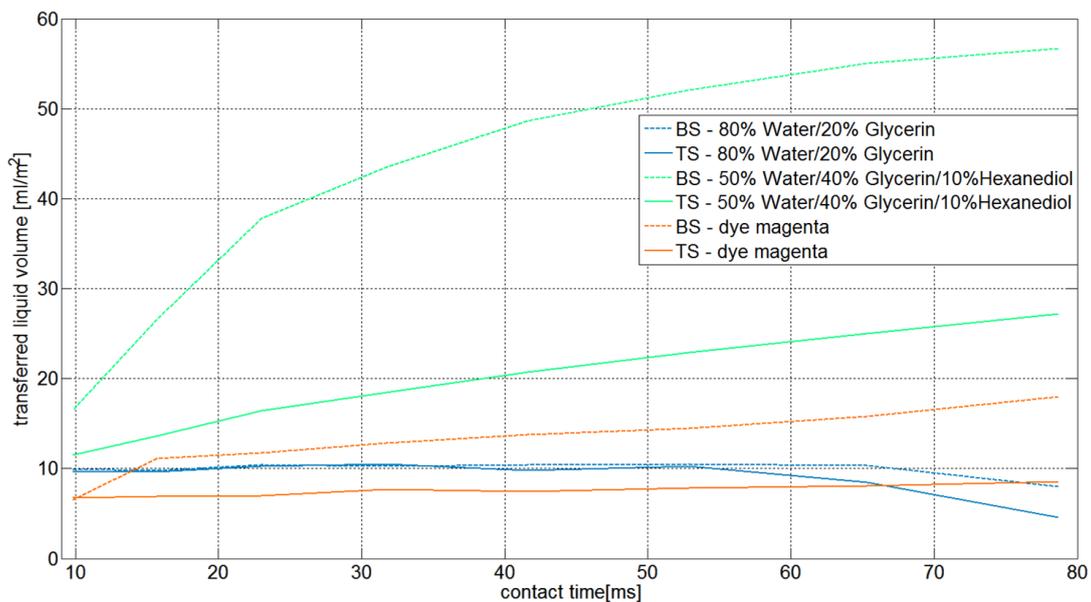


Abbildung 59: ASA Messung: AKD geleimten Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehen gezeichnet

### 8.4.2. Ungeleimtes Papier

Die Modellflüssigkeit Wasser/Glycerin hat die höchste Flüssigkeitsaufnahme, gefolgt von der Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Farbstofftinte. Der Parameter der Steigung ist für Wasser/Glycerin am höchsten und für die Tinte am flachsten, dies repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Diese zeigt bei der PDA Messung die gleichen Ergebnisse für diese Fluide. Die Modellflüssigkeit mit Hexandiol ähnelt der Tinte sowohl in Flüssigkeitsaufnahme als auch in der Steigung und ist daher als Flüssigkeit zum Nachstellen des Verhaltens der Tinte für dieses Papier geeignet. Es ist keine eindeutige Zweiseitigkeit zu erkennen. Die Siebseite nimmt bei der Tinte mehr Flüssigkeit auf als auf der Oberseite. Für die anderen Flüssigkeiten wurde gegenteiliges festgestellt.

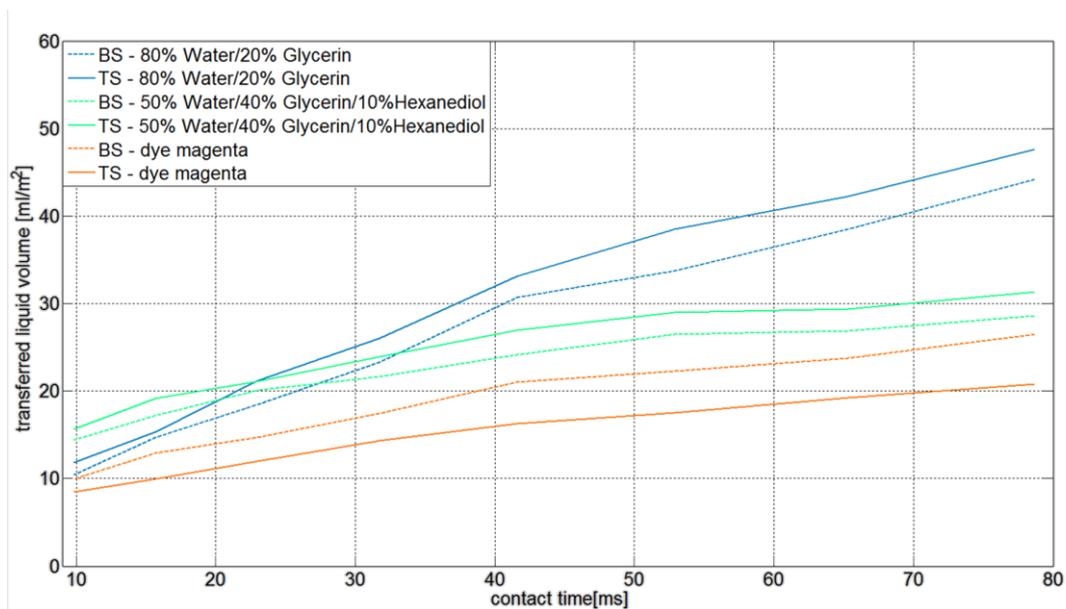


Abbildung 60: ASA Messung - ungeleimtes Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehende gezeichnet

### 8.4.3. Pigmentiertes Papier

Das Fluid Wasser/Glycerin hat die höchste Flüssigkeitsaufnahme von allen getesteten Flüssigkeiten. Auch die Steigung hat den größten Wert (ausgenommen für die Siebseite), was die größte Penetrationsgeschwindigkeit repräsentiert. Die Absorption von der Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Tinte liegt sehr nahe beieinander gezeigt durch den ähnlichen Kurvenverlauf. Gleiches gilt für die Penetrationsgeschwindigkeit aufgrund der ähnlichen Steigung. Diese Beobachtungen konnten auch bei der PDA Messung gemacht werden. Hier hatte das Fluid Wasser/Glycerin ebenfalls die schnellste Penetrationsgeschwindigkeit von diesen drei Flüssigkeiten. Beim pigmentierten Papier wurde durch die ASA Messung gezeigt, dass die Modellflüssigkeit mit Hexandiol für das Nachahmen des Verhaltens der Tinte geeignet ist und zwar auf Grund des ähnlichen Kurvenverlaufs der Tinte und der Modellflüssigkeit mit Hexandiol. Wiederum ist eine geringe Zweiseitigkeit zu sehen, repräsentiert durch die verschiedenen Kurvenverläufe der gleichen Flüssigkeiten auf den verschiedenen Papierseiten.

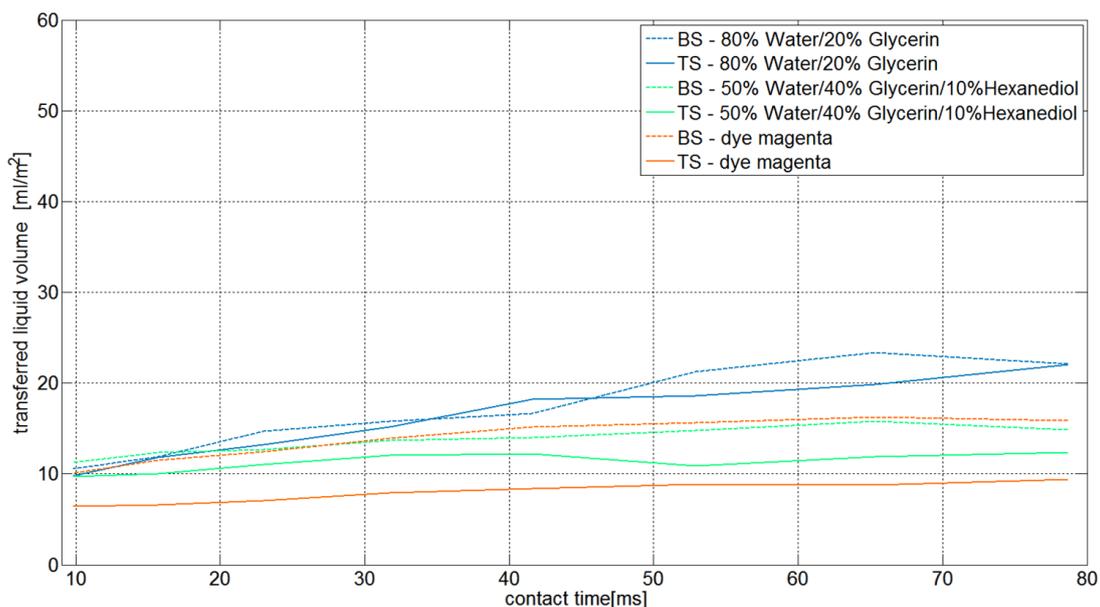


Abbildung 61: ASA Messung - pigmentiertes Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehende gezeichnet

### 8.4.4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse des AKD geleeimten Papiers sind in Bezug auf die erhöhte Flüssigkeitsaufnahme der Modellflüssigkeit mit Hexandiol nicht erklärbar. Dies könnte aufgrund eines Messfehlers der Fall sein, daher sollten noch weitere Messungen gemacht werden um dieses Verhalten zu bestätigen. Für das ungeleeimte Papier wurde

wieder festgestellt, dass die Flüssigkeit Wasser/Glycerin die höchste Flüssigkeitsaufnahme/Penetrationsgeschwindigkeit besitzt, gefolgt von der Modellflüssigkeit mit Hexandiol und der Tinte. Für das pigmentierte Papier zeigte die Messung, dass sich alle Flüssigkeiten ähnlich zueinander verhalten.

## **8.5. Vergleich der drei Papiere**

Im folgenden Teil der Arbeit wird auf die Differenz der Papiere untereinander eingegangen. Die Daten, die in den folgenden Diagrammen verwendet werden, sind gemittelte Werte der Siebseite und Oberseite der Papiere. Das erleichtert die Evaluierung der Ergebnisse. In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt darauf, zu evaluieren ob die Ergebnisse zwischen den Papieren (AKD geleimt, ungeleimt und ungeleimt, pigmentiert) der PDA, Kontaktwinkelmessung und der IGT Messung plausibel sind.

Aufgrund der Resultate bei der Evaluierung der Messmethoden, wird bei der PDA Messung beim ungeleimten und pigmentierten Papier auf die Interpretation des Verhaltens der Feststofftinten (Pigmenttinte und Tinte mit Pigmenten und Latexpartikel) auf dem ungeleimten und dem pigmentierten Papier verzichtet. Die vorangegangene Auswertung zeigte, dass die PDA – Messung für Papiere mit HSI Oberflächenbeschichtung und Tinten, die Partikel enthalten, nicht verwendet werden kann. Die Parameter für diese Tinten und Papiere wurden daher nur zur Vollständigkeit der Ergebnisse dargestellt.

Des weiteren wurde festgestellt, dass der Parameter der Fläche bei der IGT Messung nicht dafür geeignet ist um die Penetrationsgeschwindigkeit zu erfassen, bei keinem der Papiere. Daher wurde auf die Interpretation dieses Parameters verzichtet.

### **8.5.1. Benetzung**

Die Überprüfung der Plausibilität der Messergebnisse bezüglich der unterschiedlichen Papiere wird durch eine Gegenüberstellung des Parameters der Benetzbarkeit (PDA), der Steigung der Kontaktwinkelkurve (FIBRO) und des Aspect Ratios (IGT) gemacht.

Die Benetzungsdauer von dem ungeleimten Papier und dem pigmentierten Papier bei den betrachteten Flüssigkeiten (water bis dye magenta) konnte nicht gemessen werden da die Benetzung zu schnell stattfand. Ausgenommen für Wasser/Hexandiol/Glycerin und der gelben Farbstofftinte bei denen die Benetzungsdauer um wenige Millisekunden länger dauerte. Aufgrund des äußerst geringen Unterschiedes kann diese Benetzung auch hier als äußerst schnell betrachtet werden und ist im gleichen Zeit - Bereich wie der Rest der Flüssigkeiten.

In Abbildung 62 sieht man, dass das AKD geleimte Papier bei den drei Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol eine sehr hohe Benetzungsdauer im Vergleich zu den anderen beiden Papieren aufweist. Dies wurde auch bei der Kontaktwinkelmessung festgestellt. Die Steigung der Kontaktwinkelkurve repräsentiert die Benetzung des Tropfens am Papier. Die Steigung beim

AKD geleimten Papier für Wasser, Wasser/Glycerin und Wasser/Glykol ist immer am geringsten, siehe Abbildung 63. Das bedeutet, beide Messmethoden stellen fest, dass die Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol das AKD geleimte Papier besonders schlecht benetzen. Die Kontaktwinkelmessung zeigt, dass das ungeleimte Papier bei diesen Fluiden immer die zweit-schnellste Benetzung hat, gefolgt vom pigmentierten Papier. Beim Aspect Ratio (IGT Messung) konnte bei den Modellflüssigkeiten ohne Hexandiol hingegen kein Unterschied der Benetzung auf den drei Papieren festgestellt werden, wie in Abbildung 64 zu sehen ist. Dies würde bedeuten, dass die Modellflüssigkeiten das AKD geleimte Papier gleich schnell benetzten wie die beiden anderen Papiere. Das AKD geleimte Papier sollte aber eine deutlich schlechtere Benetzung haben. Auch die PDA und Kontaktwinkelmessung detektieren eine schlechtere Benetzung des geleimten Papiers. Der IGT liefert diesbezüglich keine plausiblen Ergebnisse.

Für die Farbstofftinten reduzieren sich die Benetzungszeit des PDA und auch die Steigung der Kontaktwinkelkurve wesentlich. Das bedeutet von beiden Messinstrumenten wird eine deutlich bessere Benetzung des AKD Papiers festgestellt. Diese ist aber immer noch schlechter als bei den beiden anderen Papieren. Der IGT liefert hier keine plausiblen Ergebnisse. Der IGT stellt zwar durch diese Tinten eine bessere Benetzung aller Papiere fest, aber die beste ist für das AKD geleimte Paper zu sehen. Dies ist aber nicht plausibel. Die ungeleimten Papiere müssen schneller Benetzen als das geleimte.

Bis auf die Pigmenttinte Gelb und die Latex Tinte Magenta besitzen alle Flüssigkeiten beim pigmentierten Papier die stärkste Benetzung, repräsentiert durch die größte Steigung der Kontaktwinkelkurve. Auffällig ist, dass die Benetzung der Tinten insbesondere der Latextinten am AKD geleimten Papier viel besser ist als der Modellflüssigkeiten. Auch beim PDA besitzen alle Tinten eine sehr hohe Benetzung für das AKD geleimte Papier, repräsentiert durch die geringe Benetzungszeit. Gegenteiliges wurde durch den IGT festgestellt. Das AKD geleimte Papier besitzt für alle Fluide den größten AR und würde somit die beste Benetzung ergeben, daher sind die IGT Ergebnisse nicht plausibel.

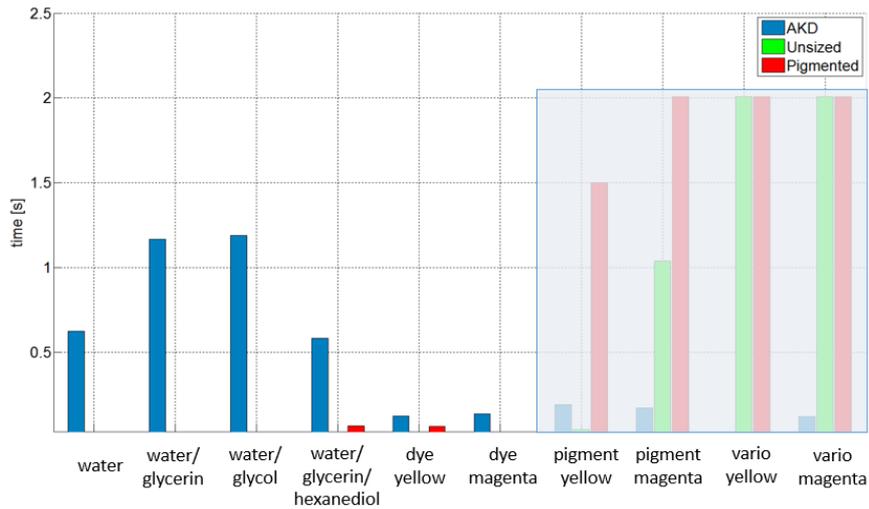


Abbildung 62: PDA - Benetzungszeit der Flüssigkeiten für alle 3 Papiere

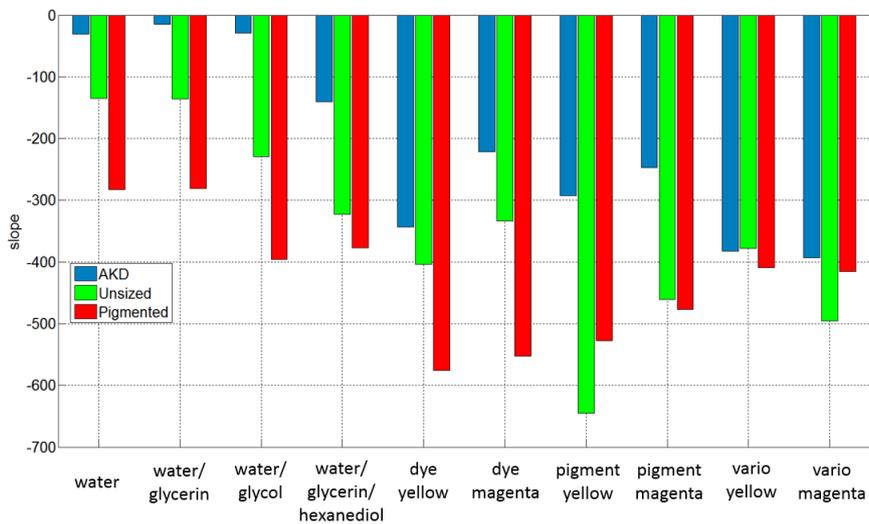


Abbildung 63: Steigung der Kontaktwinkelkurve der Flüssigkeiten auf allen 3 Papieren

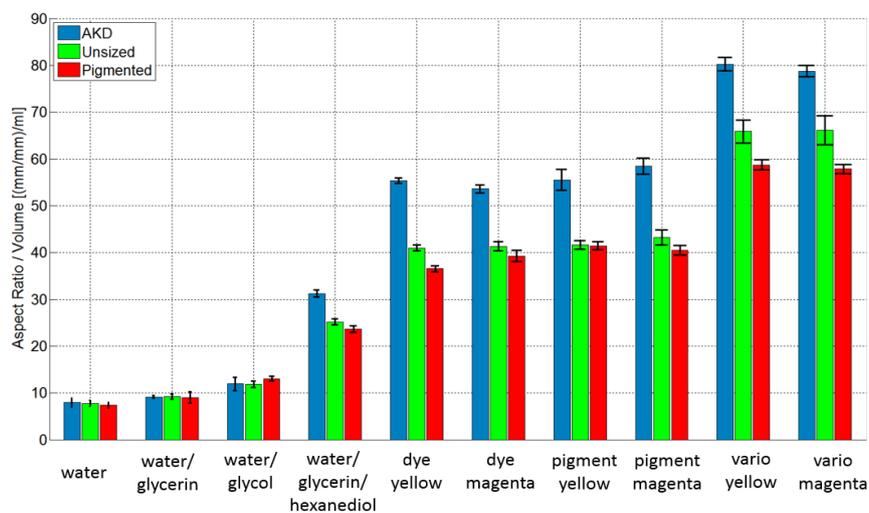


Abbildung 64: Vergleich des Aspect Ratios der IGT Messung aller Flüssigkeiten auf 3 Papieren

### **8.5.2. Penetrationsgeschwindigkeit**

In Abbildung 65 ist zu erkennen, dass das AKD geleimte Papier bei den Modellflüssigkeiten nahezu keine Steigung besitzt, was auf eine äußerst langsame Penetration schließen lässt. Dies korreliert nicht mit der IGT Messung, die Länge der Flüssigkeitstropfen ist für dieses Papier am kürzesten, was auf die schnellste Penetration hinweisen würde (siehe Abbildung 66). Dies ist aber aufgrund der Leimung nicht möglich. Der IGT liefert keine plausiblen Ergebnisse bezüglich dieser Flüssigkeiten.

Die Penetration beim pigmentierten Papier findet bei allen Flüssigkeiten deutlich langsamer statt als bei dem ungeleimten Papier, jedoch schneller als bei dem AKD geleimtem Papier. Die Werte der Steigung vom ungeleimten Papier liegen zwischen denen der anderen Papiere, wie in Abbildung 65 zu sehen ist. Hiervon ausgenommen ist Farbstofftinte Magenta, diese besitzt beim AKD geleimten Papier eine etwas höhere Geschwindigkeit als beim pigmentierten Papier. Das ungeleimte Papier hat eine deutlich größere Steigung der PDA – Kurve als die anderen beiden Papiere, für alle Flüssigkeiten. Das heißt dieses Papier besitzt die schnellste Penetrationsgeschwindigkeit. Aus den IGT Messungen würde man schließen, dass das AKD geleimte Papier die schnellste Penetration besitzt, repräsentiert durch die kürzesten Tropfen. Des Weiteren stellt er für das ungeleimte und pigmentierte Papier eine langsamere Penetration für die Modellflüssigkeiten als für die Tinten fest, was nicht der Fall ist. Der IGT liefert keine plausiblen Ergebnisse.

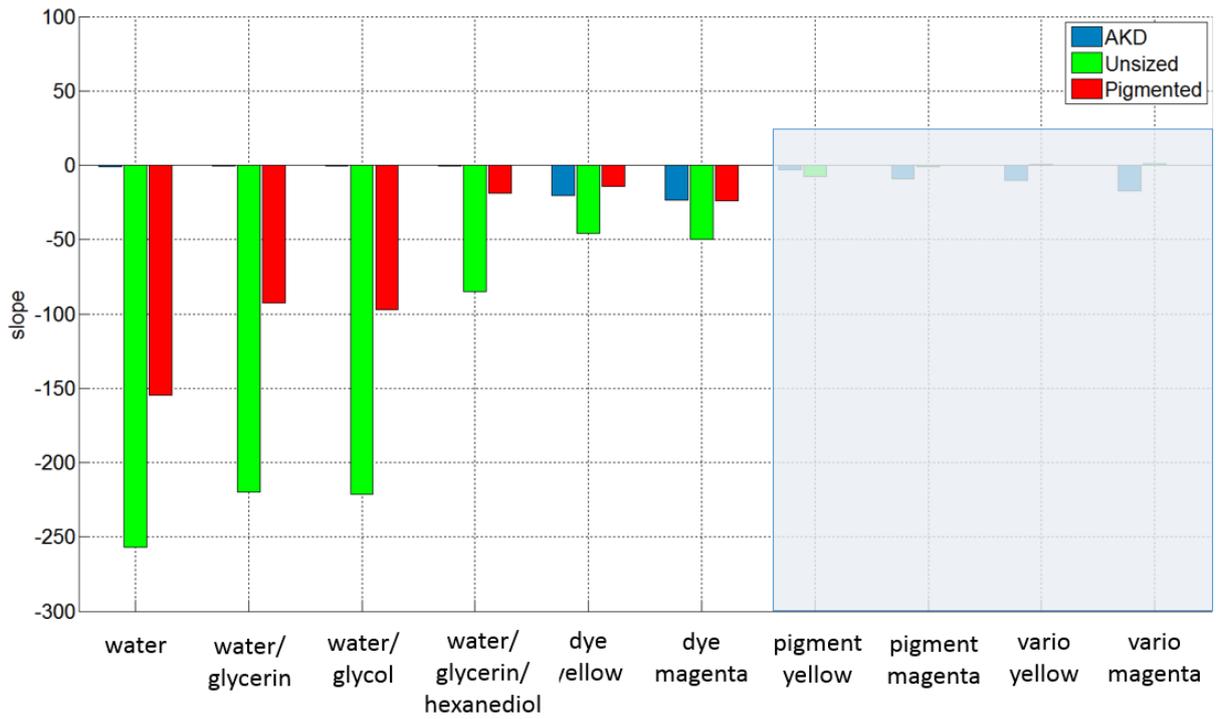


Abbildung 65: Steigung der PDA - Kurve der Flüssigkeiten für alle 3 Papiere

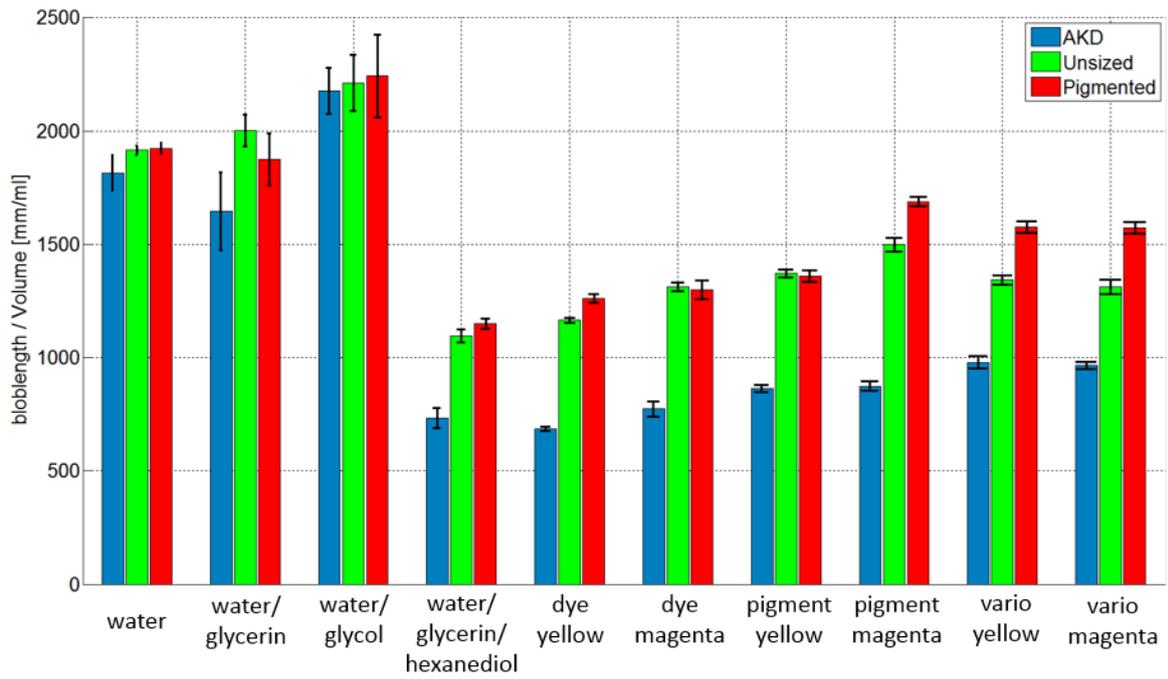


Abbildung 66: Vergleich der Tropfenlänge der IGT Messung aller Flüssigkeiten auf allen 3 Papieren

## 9. Schlussfolgerung

Der PDA misst die Penetrationsgeschwindigkeit der Flüssigkeit ins Papier (je steiler die Steigung der Kurve desto schneller die Penetration) und die Zeit der Benetzung, ist die Benetzungszeit groß findet eine schlechte Benetzung statt. Die Kontaktwinkel – Messung gibt Aufschluss über die Kontaktwinkeländerung mit der Zeit. Die Steigung der Kurve ist ein Maß für die Benetzung einer Flüssigkeit. Eine gute Benetzung wird durch eine starke Steigung repräsentiert. Die ASA Messung zeigt an wieviel Flüssigkeit vom Papier in einer bestimmten Kontaktzeit zwischen Papier und Fluid aufgenommen wird und die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit. Je steiler die Neigung ist desto schneller ist die Absorption.

Für die verwendete Probengröße und die Anzahl der Proben besitzen alle Methoden eine gute Wiederholbarkeit.

Bei der Kontaktwinkel-Messung konnte nur durch die hohe Anzahl der vermessenen Tropfen eine sehr gute Reproduzierbarkeit festgestellt werden.

Die PDA und ASA Messung zeigen ähnliche Ergebnisse für die Penetrationsgeschwindigkeit (ausgenommen der Modellflüssigkeit mit Hexandiol am AKD geleiteten Papier). Die Modellflüssigkeiten haben am AKD geleiteten Papier eine langsamere Penetration und für die anderen Papiere (pigmentiert und ungeleimt) gilt gegenteiliges. Für die Benetzung können bei der PDA und Kontaktwinkelmessung die gleichen Beobachtungen gemacht werden, die Tinten benetzen am besten. Die IGT Ergebnisse waren nicht plausibel und zeigten, dass diese Methode nicht für die Messung von Penetrationsgeschwindigkeit und Benetzung von HSI Tinten geeignet ist. Wichtig ist aber hierbei zu erwähnen, dass die PDA Messung für Tinten die Partikel enthalten in Kombination mit Papieren, die eine HSI Oberflächenbeschichtung besitzen, schlecht geeignet ist. Diese reagiert mit den Pigmenten zu einer Farbschicht und beeinflusst das Messsignal des PDAs. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der PDA, die Kontaktwinkelmessung und der Automatic Scanning Absorptometer miteinander korrelieren und ähnliche Beobachtungen von den Flüssigkeiten auf den drei verschiedenen Papieren feststellen.

Für die Modellflüssigkeiten zeigen die Resultate, dass sich Wasser/Glycerin und Wasser/Glykol ähnlich zu Wasser verhalten. Die Lösung 50% Wasser/ 40% Glycerin/ 10% Hexandiol hat ein sehr ähnliches Verhalten zur Farbstofftinte. Diese Modellflüssigkeit weist mehr Ähnlichkeit mit den Feststofftinten auf als die anderen Modellflüssigkeiten, ist für diese

aber nicht so passend wie für die Farbstofftinte. Dadurch ist die Modellflüssigkeit 50% Wasser/ 40% Glycerin/10% Hexandiol sehr gut geeignet um das Verhalten der Farbstofftinte am Papier nach zu stellen.

## 10. Literaturverzeichnis

- [1] G. Keller and D. Weinzierl, "Penetration von Fluiden in die Paperoberfläche," *Wochenblatt für Pap.*, vol. 8, pp. 490–499, 2014.
- [2] Y. Yuan and T. R. Lee, "Contact Angle and Wetting Properties," in *Springer Series in Surface Sciences*, vol. 51, no. 1, G. Bracco and B. Holst, Eds. 2013.
- [3] G. Bracco and B. Holst, "Surface science techniques," in *Springer Series in Surface Sciences*, vol. 51, no. 1, G. Bracco and B. Holst, Eds. Springer, 2013, p. 3 ff.
- [4] G. Habenicht, *KlebenGrundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer, 2009.
- [5] M. Stange, *Dynamik von Kapillarströmungen in zylindrischen Rohren*. Cuvillier Verlag Göttingen, 2004.
- [6] T. Young, "An Essay on the Cohesion of Fluids," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 95, no. 65, 1805.
- [7] J. H. Snoeijer and B. Andreotti, "A microscopic view on contact angle selection," *Phys. Fluids*, vol. 20, no. 5, pp. 1–11, 2008.
- [8] M. Rasche, *Handbuch Klebtechnik*. Hanser, 2012.
- [9] Q. Zheng and C. Lü, "Size Effects of Surface Roughness to Superhydrophobicity," *Procedia IUTAM*, vol. 10, pp. 462–475, 2014.
- [10] R. Prístavok, "Analyse und Modellierung der Haftungsmechanismen bei der Beschichtung und Verklebung von Papierwerkstoffen," Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2006.
- [11] Douglas C. Giancoli, *Physik*, 3. Auflage. Pearson Studium, 2006.
- [12] L. Neimo and S. Yhdistys, "Papermaking Chemistry," in *Papermaking Science and Technology*, vol. 4, Finnish Paper Engineers' Association, 1999, pp. 134–136.
- [13] C. Voura, "Untersuchung des Penetrationsverhaltens von niedrigviskosen Druckfarben in CaCO<sub>3</sub>-hältige Papierstrukturen," Dissertation, Technical University of Graz, 2012.
- [14] H. J. Kent and M. B. Lyne, "On the Penetration of Printing Ink into Paper," *Nord*.

- Pulp Pap. Res. J.*, vol. 2, pp. 141–145, 1989.
- [15] R. Trinker, “Evaluierung einer Methode zur Beurteilung der lokalen Druckfarbenpenetration im Tiefdruck,” Masterarbeit, Technical University of Graz, 2006.
- [16] J. Schoelkopf, C. Ridgway, P. Gane, G. Matthews, and D. Spielmann, “Measurement and Network Modeling of Liquid Permeation into Compacted Mineral Blocks.,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 227, no. 1, pp. 119–131, 2000.
- [17] H. Kipphan, *Heidelberger Handbuch der Printmedien*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [18] A. Köhn, “VOM MASSENPRODUKT ZUM LUXUSOBJEKT,” in *Praxishandbuch Corporate Magazines*, W. Freese, M. Höflich, and R. Scholz, Eds. Springer Gabler, 2012, p. 159 ff.
- [19] J. Blechschmidt, *Taschenbuch der Papiertechnik*. Carl Hanser Verlag München, 2013.
- [20] H. Kipphan, *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*. .
- [21] D. Mandlez, “Grundlagen des Inkjet Drucks und die Inbetriebnahme eines Inkjet Druckers,” Bachelorarbeit, Technical University of Graz, 2015.
- [22] U. Lindqvist, L. Hakola, J. Heilmann, B. Zhmud, and E. Wallström, “Interaction Characteristics in Different Applications of Ink- Jet Printing,” *TAGA J.*, vol. 2, p. 99 ff, 2006.
- [23] C. Schmid, “Formulation and Properties of Waterborne Inkjet Inks,” in *The Chemistry of Inkjet Inks*, S. Magdassi, Ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010, pp. 123–140.
- [24] H. Dong, W. W. Carr, and J. F. Morris, “An experimental study of drop-on-demand drop formation,” *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 7, 2006.
- [25] K. Courian and A. Agarwal, “US patent 6527370,” 2003.
- [26] J. Kettle, T. Lamminmki, and P. Gane, “A review of modified surfaces for high speed inkjet coating,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 204, no. 12–13, pp. 2103–2109, 2010.

- [27] G. J. Merchant and J. B. Keller, "Contact angles," *Phys. Fluids Fluids A*, vol. 4, no. 3, pp. 477–485, 1992.
- [28] V. Coman and F. Copaciu, "Chapter 20 - Analysis of Dyes and Inks," in *Instrumental Thin-Layer Chromatography*, C. Poole, Ed. Elsevier, 2015, pp. 555–588.
- [29] K. Hunger, Ed., *Industrial Dyes*, vol. 125, no. 33. Wiley-VCH, 2003.
- [30] H. Saarelma and P. Oittinen, Eds., "Print Media - principles, processes and quality," in *Papermaking Science and Technology*, Paper Engineers' Association, 2009, p. 157 ff.
- [31] M. A. Andreottola, "Ink Jet Formulation-The Art of color Chemistry," in *World Expo - American Inkjet Corporation*, 2005.
- [32] J. Zhang, X. Li, X. Shi, M. Hua, X. Zhou, and X. Wang, "Synthesis of core–shell acrylic–polyurethane hybrid latex as binder of aqueous pigment inks for digital inkjet printing," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 22, no. 1, pp. 71–78, 2012.
- [33] M. Daun, "Model for the dynamics of liquid penetration into porous structures and its detection with the help of changes in ultrasonic attenuation," Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [34] Y. J. Lee, J. J. Pawlak, O. Rojas, and J. Skowronski, "Paper and paper machine variables affecting the attenuation of ultrasonic signals during wetting," in *Int. Paper Physics Conference*, 2007, pp. 143–148.
- [35] I. VertMarkets, "Penetration Dynamics Analyzer," *Pulp and Paper online*. [Online]. Available: <http://www.pulpandpaperonline.com/doc/penetration-dynamics-analyzer-0001>. [Accessed: 07-May-2016].
- [36] The TMI Group of Companies, "DAT Dynamic Absorption Tester Model 68-96 DAT Dynamic Absorption Tester Model 68-96," 2015.
- [37] A. Hladnik, "Dynamic wetting and liquid sorption in paper - FIBRO 1100 DAT measuring," *Papier*, vol. 25, no. (3-4), pp. 44–48, 1997.
- [38] NN, "IGT Information Leaflet W24 'Print Penetration'. IGT Testing Systems," *IGT Testing Systems*, 2006. [Online]. Available: [http://www.igt.nl/EN\\_bestanden/W\\_information\\_leaflets/W24.pdf](http://www.igt.nl/EN_bestanden/W_information_leaflets/W24.pdf), retrieved Oct

7th 2016.

- [39] IGT, "IGT - Testing Systems." [Online]. Available: [http://www.igt.nl/GB/product\\_details.asp?product=12](http://www.igt.nl/GB/product_details.asp?product=12). [Accessed: 05-Jun-2016].
- [40] T. Enomae, H. Kataoka, F. Onabe, D. Papier, and J. Robertson, "In-Plane Distribution of Paper Absorbency Measured by Liquid Absorption Profilometer.," *Sen'i Gakkaishi*, vol. 55, no. 2, pp. 265–291, 2004.
- [41] T. A. P. Van Stiphout, "Liquid Absorption in porous Media studied by Automatic Scanning Absorptometer," Masterarbeit, Eindhoven University of Technology, 2016.
- [42] M. P. Wild, "Surface additives for whiteness improvements to reverse whiteness loss due to calcium chloride," US 13/146,573, 2010.
- [43] A. WINGKONO, L. STOFFEL and X. ZHOU, "PAPER ENHANCEMENT TREATMENT WITH DECREASED CALCIUM CHLORIDE - HEWLETT-PACKARD DEVELOPMENT COMPANY, L.P.," WO/2012/057790 A1.
- [44] NN, "Paper round," *Digit. Print.*, vol. 80, p. 52, 2016.
- [45] J. Steele, "What's read and green all over? Inkjet papers," *Quick Print.*, vol. 38, no. 4, pp. 24–25, 2015.
- [46] "ISO 8791-4."
- [47] H. J. Kent and M. B. Lyne, "On the Penetration of Printing Ink into Paper," *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, vol. 2, no. 211989, pp. 141–145, 1989.
- [48] A. Bristow, "Pulp and Paper Chemistry and Technology," in *Paper Products Physics and Technology*, vol. 4, M. Ek, G. Gellerstedt, and G. Henriksson, Eds. .
- [49] M. Druck, "Tintenstrahldrucker," 2016. [Online]. Available: <http://drucker.berufschule.com/?p=2697>. [Accessed: 05-May-2016].

## 11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fluidtropfen mit Molekülen im Kräftegleichgewicht im Inneren und Molekülen im Kräfteungleichgewicht an der Tropfenoberfläche [2].	4
Abbildung 2: Kontaktwinkel zwischen Tangente an Tropfenoberfläche und Feststoffoberfläche [2].	5
Abbildung 3: Oberflächenspannungen an einem Tropfen auf einer festen Oberfläche [2]	6
Abbildung 4: verschiedene Kontaktwinkel und ihre Folgen für die Benetzung [10]	7
Abbildung 5: Wasser und Quecksilber und ihre Kontaktwinkel in einem Glasbehälter [11]	7
Abbildung 6: Steighöhe einer Flüssigkeit erhöht sich wenn der Radius der Kapillare sinkt	8
Abbildung 7: Konvergierenden und divergierenden Poren[13]	9
Abbildung 8: divergenter und konvergenter Formverlauf innerhalb einer Pore [14]	10
Abbildung 9: Penetration nach Lucas-Washburn, Bosanquet und inertial flow [16]	15
Abbildung 10: links: Buchdruck, rechts: Flexodruck. Der Bedruckstoff wird mit einer weichen Druckvorlage (Flexodruck) beziehungsweise mit einer harten Druckvorlage (Buchdruck) bedruckt. [19]	17
Abbildung 11: Schema des Tiefdrucks. Die Vertiefungen in der Walze transportieren die Tinte auf das Papier [19]	17
Abbildung 12: Schema des Offsetdrucks. Die Farbe wird von der Druckvorlage auf ein Gummi-Tuch und dann auf das Papier übertragen [20]	18
Abbildung 13: Aufbau eines kontinuierlichen Inkjet Verfahrens. Der Tropfen wird kontinuierlich durch einen Piezokristall erzeugt. Die Lade- und Ablenkelektrode beeinflussen die Flugbahn des Tropfens [49].	20
Abbildung 14: Diskontinuierliches Inkjet-Verfahren (a mit Wärmequelle, b mit Piezokeramik und c mit Schaltelement) [20]	22
Abbildung 15: Tropfenbildung beim kontinuierlichen Inkjet Verfahren [20]	23

Abbildung 16: Die verschiedenen Stufen bei der Tropfenbildung beim diskontinuierlichen Inkjet- Verfahren[20]	23
Abbildung 17: Typische Tropfenaufbruch bei einem Inkjet Druckkopf[23]	24
Abbildung 18: Schema des Tintenauftrages[17]	25
Abbildung 19: Zusammenfassung der Inkjet Tinten und ihrer physikalischen Eigenschaften [26]	26
Abbildung 20: PDA Messblock [33] und Abmaße der PDA-Papier Probe. Der Kreis symbolisiert die Messfläche.	28
Abbildung 21:Die PDA-Ergebnisse zeigen die Änderung der Intensität über die Zeit. Der Parameter Benetzungszeit ist ein Maß für die Benetzungsfähigkeit und der Parameter der Steigung repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit	29
Abbildung 22: Tropfenverlauf während der Kontaktwinkelmessung	30
Abbildung 23: Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung zeigen die Änderung des Winkels über die Zeit. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Benetzung der Flüssigkeit	31
Abbildung 24: IGT-Tester [39]	31
Abbildung 25: a.) Skizze des Tropfen-Auftrags bei der IGT Messung b.) verschiedene Tropfenspuren auf einer Papiersorte c.) Definition der Länge und der Breite am Beispiel eines Tropfens	33
Abbildung 26: a.) Aufbau des Automatic Scanning Absorptometer [41] b.) Spiral- Spur der Tinte am Papier inklusive maximaler und minimaler Geschwindigkeit	34
Abbildung 27: Die ASA Ergebnisse zeigen das absorbierte Volumen über die Zeit. Die Steigung der Kurve repräsentiert die Penetrationsgeschwindigkeit	34
Abbildung 28: Porengrößenverteilung der verschiedenen Papiere	37
Abbildung 29:PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf AKD - Papier Siebseite	41
Abbildung 30:PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf AKD – Papier-Oberseite	41
Abbildung 31: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf ungeleimten – Papier, Siebseite	43
Abbildung 32:PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf ungeleimten – Papier, Oberseite	43
Abbildung 33: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf pigmentiertem – Papier, Siebseite	45
	83

Abbildung 34: PDA Ergebnis - Flüssigkeiten auf pigmentiertem – Papier, Oberseite	45
Abbildung 35: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf AKD geleinnten - Papier Siebseite	48
Abbildung 36: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf AKD geleinnten - Papier Oberseite	48
Abbildung 37: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf ungeleinnten - Papier Siebseite	50
Abbildung 38: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf ungeleinnten - Papier Oberseite	50
Abbildung 39: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf Pigmentiertes - Papier Siebseite	52
Abbildung 40: Kontaktwinkelmessung: alle Flüssigkeiten auf Pigmentiertes - Papier Oberseite	52
Abbildung 41: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinnten Papier – Aspect Ratio - Siebseite	55
Abbildung 42: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinnten Papier –Aspect Ratio- Oberseite	55
Abbildung 43: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinntes Papier – Fläche- Siebseite	56
Abbildung 44. IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinntes Papier - Fläche- Oberseite	56
Abbildung 45: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinntes Papier - Länge – Siebseite	57
Abbildung 46: IGT Messung - alle Flüssigkeiten auf AKD - geleinntes Papier - Länge - Oberseite	57
Abbildung 47: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf ungeleinnten Papier – Aspect Ratio - Siebseite	59
Abbildung 48: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf ungeleinnten Papier – Aspect Ratio- Oberseite	59
	84

Abbildung 49: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Siebseite	60
Abbildung 50: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Oberseite	60
Abbildung 51: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Länge - Siebseite	61
Abbildung 52: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf Ungeleimten Papier – Fläche - Oberseite	61
Abbildung 53: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier –Aspect Ratio - Siebseite	63
Abbildung 54: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Aspect Ratio – Oberseite	63
Abbildung 55: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Fläche– Siebseite	64
Abbildung 56: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Fläche– Oberseite	64
Abbildung 57: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Länge – Siebseite	65
Abbildung 58: IGT Messung: alle Flüssigkeiten auf pigmentiertes Papier - Länge – Oberseite	65
Abbildung 59: ASA Messung : AKD geleimten Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehen gezeichnet	67
Abbildung 60: ASA Messung - ungeleimtes Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehen gezeichnet	68
Abbildung 61: ASA Messung - pigmentiertes Papier. Siebseite strichliert, Oberseite durchgehen gezeichnet	69
Abbildung 62: Benetzungszeit der Flüssigkeiten für alle 3 Papiere	73
Abbildung 63: Steigung der Kontaktwinkelkurve der Flüssigkeiten auf allen 3 Papieren	73
	85

Abbildung 64: Vergleich des Aspect Ratios der IGT Messung aller Flüssigkeiten auf 3 Papieren	73
Abbildung 65: Steigung der PDA - Kurve der Flüssigkeiten für alle 3 Papiere	75
Abbildung 66: Vergleich der Tropfenlänge der IGT Messung aller Flüssigkeiten auf allen 3 Papieren	75

## **12. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Grunddaten der Papiere	35
Tabelle 2: Messergebnisse Papiere	36
Tabelle 3: Messwerte Modellflüssigkeiten	38
Tabelle 4: Messergebnisse Tinten	39