

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20893 BR/1

Thema

Zusammenhänge zwischen den Oberflächeneigenschaften von Tinte und Substrat und dem Benetzungsverhalten und dessen Auswirkung auf den Inkjet-Druckprozess

Berichtszeitraum

01.11.2019 - 31.10.2021

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt

Forschungseinrichtung(en)

Sächsisches Institut für die Druckindustrie GmbH, Mommsenstraße 2, 04329 Leipzig

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

Die Benetzbarkeit ist für das Bedrucken von unterschiedlichsten Materialien wie Glas, Holz, Kunststoff oder Metall von größter Bedeutung. Um diese zu verbessern, müssen die Oberflächen vorbehandelt werden. In der Regel wird dabei die Oberflächenspannung des Substrats erhöht. Allerdings zeigen die Erfahrungen, dass das häufig nicht zu den angestrebten Ergebnissen führt, weil die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung der beteiligten Materialien nicht aufeinander abgestimmt sind.

Ziel des Projekts war es deshalb zu untersuchen, wie sich die Oberflächeneigenschaften von Substrat und Tinte auf das Benetzungsverhalten und in Folge auf die erreichbare Druckqualität im Inkjet-Druck auswirken und eine neue Methode zur Bestimmung von Vorbehandlungsparametern zu entwickeln.

Die Untersuchungen wurden mit Substraten und Inkjet-Tinten durchgeführt, deren Oberflächeneigenschaften gezielt variiert wurden. Als Substrate wurden Kunststoffe, Metalle, Gläser sowie Papier untersucht. Deren Oberflächeneigenschaften wurden sowohl in ihrem Ausgangszustand als auch nach der Vorbehandlung mittels Atmosphären-Plasma und Beflammung (Kunststoffe und Metalle) bzw. nach Beschichtung mit geeigneten Primern (Gläser) charakterisiert.

Die beiden verwendeten UV-Inkjet-Tinten wurden durch Zugabe eines Additivs auf definiert abgestufte Oberflächenspannung eingestellt. Für die Papiersubstrate wurde zusätzlich eine wasserbasierte Inkjet-Tinte getestet.

Für die verschiedenen Kombinationen wurde die Benetzung mithilfe von Wetting Envelopes vorausberechnet und in Versuchen zur Tropfenbildung und -ausbreitung verifiziert. Dabei wurde zusätzlich der Einfluss von Einstellparametern am Druckkopf untersucht. Es wurde gezeigt, dass sowohl die Oberflächenspannung der Tinte als auch die Treiberspannung der Piezoelemente dem Tropfenausstoß und -flug beeinflussen. Insbesondere die Ausbildung des Tropfenschweifes und von Satelliten wird entscheidend durch die Piezospannung verursacht. Dagegen hat die Tintentemperatur – und damit die Viskosität in den geringen Grenzen, die überhaupt eine Tropfenbildung zulassen – nur einen minimalen Einfluss.

Mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde die Tropfenausbreitung untersucht. Bei den Betrachtungen wurden 2 Phasen, das Setzen und das Spreiten des Tropfens unterschieden. Die sich aus den Vorbehandlungen ergebenden unter-

schiedlichen Oberflächenspannungen der Substrate wirkten sich insbesondere bei den Kunststoffen und Gläsern wie erwartet auf das Spreiten aus. Gestört wird die Tropfenausbreitung dagegen durch kleinste Unebenheiten des Substrats oder das Verdunsten der Tinte am Tropfenrand. Bei den Papiersubstraten wird die Tropfenausbreitung durch die Penetration der Tinte in das Substrat dominiert.

Zur Bewertung der Farbwiedergabe und damit der Druckqualität wurde die Konturenschärfe von gedruckten Strukturen und die erreichte Farbintensität in der Fläche gemessen und den messbaren Oberflächeneigenschaften gegenübergestellt.

Dabei wurden als Einflussfaktoren sowohl die Additivkonzentration und damit die Oberflächenspannung der Tinten als auch die Vorbehandlungen und damit die Oberflächeneigenschaften der Substrate identifiziert.

Ein geeignetes Prozessfenster, in dem die optimale Benetzung eines nicht saugenden Substrats durch die Tinte erfolgt, wurde in einem Bereich ermittelt, der in dem eine möglichst geringe Differenz der polaren und dispersen Terme der Oberflächenspannungen der jeweils miteinander kombinierten Tinten und Substrate vorliegt.

Das stellt relativ hohe Anforderungen an die angewandte Messtechnik, da in der Praxis oft mit Tinten oder Stiften zur Bestimmung der Oberflächenspannung gearbeitet wird, bei denen der polare und disperse Anteil der Substrate nicht differenziert werden können. Die Ergebnisse zeigen aber, dass die getrennte Betrachtung der Terme unerlässlich ist, um eine sichere Vorhersage zur Benetzung durchführen zu können. Es ist bekannt, dass durch die üblichen Vorbehandlungsmethoden überwiegend der polare Anteil der Oberflächenspannung des Substrats erhöht wird. Dieses Vorgehen kann nur erfolgreich sein, wenn die Tinte ebenfalls einen hohen polaren Anteil der Oberflächenspannung aufweist. Ist die Oberflächenspannung der Tinte durch einen hohen dispersen Anteil charakterisiert, wird die Erhöhung des polaren Anteils der Oberflächenspannung des Substrats nicht zwingend zu einer Verbesserung der Benetzungseigenschaften führen.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis ist eine Vorhersage der Bedruckbarkeit nichtsaugender Substrate im Inkjet möglich, so dass damit eine effiziente Methode zur Bestimmung geeigneter Vorbehandlungsparameter zur Verfügung steht.

Potenzielle Anwender der Projektergebnisse sind die Hersteller von Drucksystemen und Tinten sowie die Anwender, die Druckereien, die nahezu ausschließlich KMUs sind. Die bessere Vorhersagbarkeit der Druckergebnisse führt bei diesen Unternehmen

zur Erhöhung der Produktionssicherheit, der Verringerung von Reklamationskosten und damit zur Effizienzsteigerung. Ebenso profitieren die Hersteller von Einrichtungen zur Vorbehandlung von Substraten von den Projektergebnissen.

Grundsätzlich wird so das Marktsegment des Inkjet-Drucks und damit die Position seiner Anwender gestärkt und dessen Einsatzbereiche insbesondere für industrielle Anwendungen erschlossen bzw. erweitert.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	II
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Stand der Forschung und Entwicklung	2
1.2.1. Oberflächeneigenschaften	2
1.2.2. Charakterisierungsmethoden	3
1.2.3 Beeinflussung der Oberflächenspannung durch Vorbehandlung	
1.3 Arbeitshypothesen	8
2 Forschungsziel und Lösungsweg	9
2.1 Forschungsziel	9
2.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	9
2.2.1 AP 1: Recherche Bedruckstoffe/Tinten	10
2.2.2 AP 2: Charakterisierung Substrate und Tinten	10
2.2.3 AP 3: Gezielte Vorbehandlung der Substrate	10
2.2.4 AP 4: Untersuchungen zur Benetzbarkeit	12
2.2.5 AP 5: Druckversuche Inkjet	13
2.2.6 AP 6: Bewertung Druckqualität	13
2.2.7 AP 7: Druckversuche mit optimierten Materialien	14
2.2.8 AP 8: Modellierung Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckergebnis	14
2.2.9. AP 9: Berichtslegung	14
2.3 Personaleinsatz	14
3 Durchführung, Ergebnisse und Bewertung	15
3.1 AP 1: Recherche	15
3.2 AP 2: Charakterisierung Substrate und Tinten	17
3.3 AP 3: Gezielte Vorbehandlung der Substrate	22
3.4 AP 4: Untersuchungen zur Benetzbarkeit	28
3.4.1. Tropfenbildung	29

3.4.2.	Tropfenausbreitung	35
3.4.3.	Zeitlicher Verlauf Kunststoffsubstrate	39
3.4.4.	Zeitlicher Verlauf Metallsubstrate	41
3.4.5.	Zeitlicher Verlauf Glassubstrate	43
3.4.6.	Zeitlicher Verlauf Papiersubstrate	45
3.5	AP 5: Druckversuche Inkjet	48
3.6	AP 6: Bewertung Druckqualität	50
3.6.1.	Auswertung Kunststoffsubstrate	52
3.6.2.	Auswertung Metallsubstrate	60
3.6.3.	Auswertung Glassubstrate	64
3.6.4.	Auswertung Papiersubstrate	67
3.7	AP 7: Druckversuche mit optimierten Materialien	69
3.8	AP 8: Modellierung Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckergebnis	70
3.8.1.	Ausbreitungsvorgänge	70
3.8.2.	Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Kunststoff-Substrate	75
3.8.3.	Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Metallsubstrate	78
3.8.4.	Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Glas-Substrate	80
3.8.5.	Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Papier-Substrate	83
3.8.6.	Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität – Zusammenfassung aller Substrate	85
3.9	AP 9: Berichtslegung	88
4	Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)	89
4.1	Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse	89
4.1.1	Innovationspotenzial für einen oder mehrere Wirtschaftszweige	89
4.1.2	Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe	89
4.1.3	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU	89

4.1.4	Beitrag zur Entstehung neuer bzw. deutlicher Erweiterung bestehender Geschäftsfelder	90
4.1.5	Beitrag des Vorhabens zur Entwicklung von Normen, Standards und Erfüllung gesetzlicher Auflagen	90
4.1.6	Beitrag zur Erreichung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ziele	90
4.2	Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse	91
5	Ergebnistransfer	94
6	Danksagung	98
	Literaturverzeichnis	99

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

1.1 Ausgangssituation

Ober- und Grenzflächenphänomene spielen bei vielen technischen Prozessen eine bedeutende Rolle, z.B. beim Verkleben, Lackieren, Bedrucken. Oberflächenspannungen bestimmen die adhäsive Haftung, die Benetzung und den Ausbreitungsdruck (Spreitungsdruck) zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern. Kommen zwei Medien in Kontakt, z.B. wenn ein Lack ein Substrat benetzt, bildet sich eine Grenzfläche anstelle der freien Oberflächen von Lack und Substrat.

Die Benetzbarkeit ist für den Inkjet-Druck auf unterschiedlichsten Materialien von größter Bedeutung. Dabei ist nicht nur an Folienverpackungen bzw. flexible Verpackungen und Etiketten zu denken, die zu ca. einem Viertel aus Kunststoffen bestehen, sondern auch an Druckanwendungen auf Glas, Holzflächen bis zu Gegenständen aus Kunststoff, Keramik oder Metall. Der Inkjet-Druck bietet als kontaktloses Druckverfahren dafür viele Vorteile, er ist auch für raue Oberflächen, 3-dimensionale Körper und für große Formate einsetzbar. /1/ Bei all diesen Anwendungen spielt die Haftung der Tinte und die Beständigkeit des Druckbildes auf dem Untergrund eine wichtige qualitätsbeeinflussende Rolle. Kunststoffoberflächen sind von Natur aus unpolar und schlecht benetzbar. Das kann zu schlechter Farbwiedergabe, unscharfen Druckbildern oder dem Absplittern der getrockneten Farbe führen. Um dies zu vermeiden, müssen die Oberflächen vor der Beschichtung vorbereitet werden. /2/ Durch verschiedene Vorbehandlungsverfahren (Corona, Plasma, Beflammung, Fluorierung, UV-Bestrahlung, Primer) kann die Oberflächenspannung eines Substrats erhöht und damit die Benetzung mit Flüssigkeiten höherer Oberflächenspannung ermöglicht werden. /1/ Zusätzlich müssen die Rauheit, Porosität sowie die physikalische und chemische Anbindung des flüssigen Mediums berücksichtigt werden, um eine haltbare Verankerung auf der Oberfläche zu erreichen.

In der Regel ist das Ziel der Vorbehandlung, dass die Oberflächenspannung des Substrats größer ist als die des aufzutragenden Mediums. Die Erfahrungen zeigen, dass das jedoch häufig nicht zu den angestrebten Ergebnissen führt. Ursachen liegen teilweise in unterschiedlichen dispersen und polaren Anteilen der Oberflächenspannung der beteiligten Materialien, die oft nicht getrennt voneinander betrachtet wurden. Hinzu kommt, dass sich mit den Vorbehandlungsmethoden überwiegend der polare Anteil beeinflussen lässt, nicht aber der disperse. Eine gute Benetzung kann aber auch zum ungewollten Verlaufen

der Tinte oder Druckfarbe auf dem Substrat führen, was sich negativ auf die Druckqualität auswirken kann.

Die Umstellung des Druckprozesses auf die Inkjet-Technologie wird meist von einer Trial-and-Error-Vorgehensweise und einem schrittweisen Herantasten hinsichtlich geeigneter Vorbehandlungsmethoden und der Auswahl der Tinten begleitet. Ziel des beantragten Projekts ist es deshalb zu untersuchen, wie sich die Oberflächeneigenschaften von Substrat und Tinte auf das Benetzungsverhalten und in Folge auf die erreichbare Druckqualität im Inkjet-Druck auswirken. Dabei soll explizit auf Einflussgrößen im Inkjet-Druckprozess wie Tropfenvolumen, -geschwindigkeit und Verlaufszeit der Tinte nach dem Auftreffen auf dem Substrat eingegangen werden.

1.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Industrielle Anwendungen im Inkjet sind von stark zunehmender Bedeutung /4/.

In der Literatur wird die Notwendigkeit einer optimalen Druckvorbereitung als Voraussetzung für ein qualitätsgerechtes Druckbild unter verschiedenen Herangehensweisen beschrieben. So wird beispielweise ein Primer auf zu bedruckende Bereiche aufgebracht, andererseits wird die Kompatibilität mit diversen Bedruckstoffen z.B. durch neue Tinten gelöst. /3/ Ein anderer Weg ist die Aktivierung der Oberflächen zur Vorbereitung der Beschichtung. /2/.

Eine mangelhafte Benetzung zeigt sich nach Hoath durch Breitlaufen, Bildung ringförmiger Tropfen, partiellem oder vollständigem Abstoßen der Tropfen. /4/

Die Druckqualität wird also maßgeblich von den Benetzungseigenschaften bestimmt. Man geht von einer guten Benetzung aus, wenn die Oberflächenspannung der Flüssigkeit kleiner als die Oberflächenenergie des Werkstoffes ist. In /1/ wird angegeben, dass eine optimale Benetzung erreicht wird, wenn die Oberflächenspannung der Tinte 10 mN/m kleiner ist als die des Substrats. Durch geeignete Vorbehandlungsmethoden des Werkstoffes lassen sich die Benetzungseigenschaften verbessern. /5/ Klare Handlungsvorschriften für die Vorbehandlung bzw. Vorbereitung von bestimmten Drucksubstraten existieren in der Literatur jedoch nicht.

1.2.1. Oberflächeneigenschaften

Die zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern wirkenden, molekularen Kohäsionskräfte erzeugen in den oberflächennahen Bereichen eine nach innen gerichtete Kraft. Zur Erzeugung der Flächeneinheit einer neuen Oberfläche muss daher eine potentielle Arbeit verrichtet werden. Das Verhältnis dieser Arbeit(dW) zur Oberflächenänderung(dA) wird als

Oberflächenspannung s bezeichnet und in mN/m angegeben. Da die zu leistende Arbeit einer Energie entspricht, spricht man auch von Oberflächenenergie.

Die Oberflächenspannung ist bis zur Einstellung eines Gleichgewichts zeitabhängig. Ist dieses Gleichgewicht eingetreten, wird von der statischen Oberflächenspannung gesprochen. Wird hingegen der zeitabhängige Wert erfasst, handelt es sich um die dynamische Oberflächenspannung. /6/ Die Tendenz eines Flüssigkeitsfilms, seine Oberflächenenergie durch Verkleinerung der Oberfläche zu verringern, ist Triebkraft des Verlaufs. Dies erfolgt umso langsamer, je höher die Viskosität ist. Die (dynamische) Viskosität beschreibt dabei die Zähigkeit einer Flüssigkeit. Ein rascher Viskositätsanstieg nach der Applikation durch z.B. schnelles Antrocknen kann eine Entnetzung gewissermaßen zeitlich überholen. /7/

Die aktuell diskutierte Forschung auf dem Gebiet der Grenzflächenspannung geht auf die Annahme von Fowkes (1962) zurück. /8/ Er nahm an, dass die Oberflächenenergie eines Feststoffs (und einer Flüssigkeit) eine Summe von unabhängigen Komponenten ist, die mit bestimmten Wechselwirkungen (dispers, polar, Wasserstoffbrücken, Induktion, Säure-Base-Komponenten) verbunden sind. /9/ Die Phänomene der Grenzflächeninteraktionen einschließlich ihrer mathematischen Beschreibung sind noch nicht vollständig bekannt. Das Verfahren nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) berechnet den dispersen und polaren Anteil der Oberflächenspannung einer Oberfläche /10, 11/. Dabei wird vorausgesetzt, dass nur gleichartige Wechselwirkungen zwischen den Phasen wirksam werden. Das heißt, wenn eine unpolare Flüssigkeit auf eine polare Oberfläche gesetzt wird, können nur die dispersen Anteile der Oberflächenspannungen miteinander wechselwirken. /12/ Die polaren Kräfte haben ihre Ursache in unterschiedlichen Elektronegativitäten der Atome eines Moleküls, woraus sich z.B. permanente Dipole ergeben. Dispersionskräfte entstehen durch temporär unsymmetrische Ladungsverteilungen und sind somit zwischen allen Molekülen vorhanden.

Die Benetzbarkeit bzw. Bedruckbarkeit und die Haftung eines Materials lässt sich durch Erhöhung seiner Oberflächenenergie - im Allgemeinen der Erhöhung des polaren Anteils - verbessern.

1.2.2. Charakterisierungsmethoden

Die Bestimmung der Oberflächenspannungen ist üblicherweise die Grundlage für die Vorhersage der Benetzbarkeit einer Oberfläche mit einem flüssigen Medium.

Die Oberflächenspannung von Festkörpern kann nicht direkt bestimmt werden. Sie wird durch die Messung des Kontaktwinkels der Tangente im Tripletpunkt an mindestens zwei

Testflüssigkeiten, deren Oberflächenspannung bekannt ist, ermittelt. Je kleiner der Rand- oder Kontaktwinkel θ ist, desto besser ist die Benetzung. Bei einem Kontaktwinkel von 0° kommt es zur Spreitung (vollkommene Benetzung) des aufgetragenen Mediums, in einem Bereich bis 30° wird eine ausreichende Benetzung erwartet. Bei $\theta = 180^\circ$ würde völlige Nichtbenetzbarkeit vorliegen; in der Praxis kommt dieser Extremfall allerdings nicht vor. /13/ Kleinere Kontaktwinkel, d.h. negative Werte sind physikalisch nicht möglich, d.h. der Tropfen spreitet, bis er am Rand verdunstet bzw. vom „Rauheitsgebirge“ des Untergrundes aufgehalten wird /14/. Der Oberflächenrauheit kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Die Methode des liegenden Tropfens ist eine weit verbreitete Methode, um Kontaktwinkel zu messen. Es wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Kontaktwinkel unterschieden. Der statische Kontaktwinkel ist der Kontaktwinkel, bei dem die Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Festkörper während der Messung nicht von außen verändert wird. Der dynamische Kontaktwinkel ist der im Zuge der Benetzung oder Entnetzung eines Festkörpers auftretende Kontaktwinkel. Ein Kriterium für die Entscheidung zwischen dynamischem und statischem Kontaktwinkel ist der betrachtete technische Benetzungsvorgang. /6/ Bei der Bestimmung des Kontaktwinkels wird ein Flüssigkeitstropfen mit einer Spritze auf der Oberfläche abgesetzt. Durch Sedimentation, Verdunstung, chemische Veränderung der Flüssigkeit oder der Festkörperoberfläche sowie Anlösen der Festkörperoberfläche ist der statische Kontaktwinkel zeitabhängig. Bei der Bestimmung des dynamischen Kontaktwinkels verbleibt die Spritze im Tropfen. Wird das Volumen nun langsam erhöht, schreitet der Tropfenrand über die noch unbenetzte Oberfläche fort. Den dann gemessenen Winkel nennt man Fortschreitewinkel. Er beschreibt die Vorgänge bei der Benetzung einer Oberfläche durch die Flüssigkeit und ist üblicherweise größer als der statische. Bei der Rückzugswinkelmessung wird nun das Tropfenvolumen wieder verringert. Der jetzt gemessene meist kleinere Randwinkel gibt Auskunft über die makroskopische Rauigkeit der untersuchten Oberfläche /12/. Die Differenz zwischen Fortschreite- und Rückzugswinkel (Hysterese) ist ein wichtiges Charakterisierungsmerkmal für die Wechselwirkung zwischen Substrat und Medium. /4/

Die Oberflächenspannung des Substrates, als Ergebnis der OWRK-Methode, ist durch die Verwendung von 2 Testlösungen eindeutig bestimmt, so dass die Oberflächenspannung mit den polaren und dispersen Anteilen berechnet werden kann. Aussagen zur Messgenauigkeit können unter Einbeziehung weiterer Testlösungen durch Ermittlung einer Regressionsgeraden getroffen werden.

Eine Darstellung zwischen polarem und dispersem Anteil der Oberflächenspannung, bietet ein 'Wetting Envelope'. Dabei werden in einem Diagramm die polaren und dispersen

Anteile der Oberflächenspannung so dargestellt, dass sich für konkrete Randwinkel bei einer Materialkombination eine Kurve in Form einer Umhüllungskurve (Envelope) ergibt. Anhand der 'Wetting Envelope' können Tinten in ihren Benetzungseigenschaften charakterisiert werden, ohne konkrete Messungen auf der Oberfläche. Die Methode bietet dem Anwender daher die Möglichkeit solche Untersuchungen mit bereits charakterisierten Oberflächen bzw. Flüssigkeiten schnell und damit kostengünstig durchzuführen /15/.

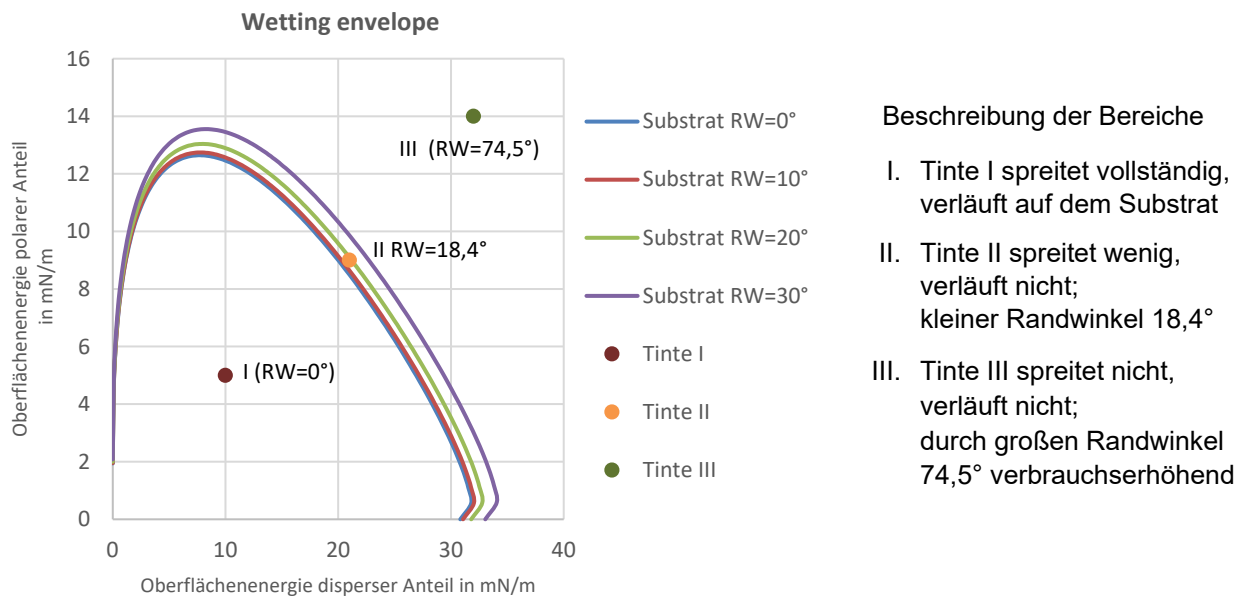


Abb. 01: Wetting Envelopes zum Erreichen verschiedener Randwinkel auf einer Oberfläche und 3 Beispiel-Tinten

1.2.3 Beeinflussung der Oberflächenspannung durch Vorbehandlung

Möglichkeiten die Oberflächeneigenschaften zu modifizieren, bieten unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden. Gängige Methoden sind Plasmabehandlungen, chemische Behandlungen (z.B. Fluorierung) sowie die Beschichtung mit einem Primer. Alle Methoden verhalten sich hinsichtlich ihres Einsatzbereiches sowie ihrer Effektivität und Langzeitstabilität unterschiedlich /16/. Ziel der im folgenden Abschnitt genannten Verfahren ist grundsätzlich die Erhöhung der Oberflächenenergie eines zu bedruckenden Werkstoffes.

Um eine ausreichende Benetzung zu erreichen, muss die Oberfläche modifiziert werden, indem funktionelle polare Gruppen erzeugt werden, welche die polare Oberflächenenergie erhöhen. Eine Behandlung mit Plasma kann die polare Oberflächenenergie erhöhen. Zu den bekannten Plasmabehandlungen zählen die Coronabehandlung (Atmosphärendruckplasma), die Plasmavorbehandlung (Niederdruckplasma) sowie das Beflammen.

Ein Plasma ist ein elektrisch leitendes Gas bzw. Gasmisch, das weitgehend aus Elektronen, Ionen, Neutralteilchen und Radikalen besteht. Diese sind aus chemischer Sicht

reaktiv und können Veränderungen an Kunststoffoberflächen hervorrufen /17/. Trifft ein solches Plasma auf die Oberfläche werden eine Reihe von physikalischen und chemischen Prozessen ausgelöst. Unter anderem werden Molekülbindungen aufgespalten und somit Möglichkeiten der direkten Anlagerungen von Bestandteilen des Plasmas geschaffen. Weiterhin kann mit Hilfe des Plasmas eine Reinigung und/oder Aufräuhung der Substratoberfläche erzielt werden. In der Praxis spiegelt sich die Plasmabehandlung vielfältig wider, sowohl als eigenständige Vorbehandlung oder auch als integrierter Bestandteil des Druckprozesses.

Von Atmosphären(druck)plasma bzw. Corona-Vorbehandlung spricht man, wenn das Plasma durch die Ionisierung von Luft bei Umgebungsdruck erzeugt wird. Dazu wird zwischen einer nadelförmigen Elektrode und einer geerdeten Gegenelektrode eine Hochspannung erzeugt und es kommt zu einer Entladung in Form eines Lichtbogens (Coronaentladung). Die Luft in der Umgebung des Lichtbogens wird dabei ionisiert; es entsteht ein Plasma. In den Vorbehandlungsanlagen ist die Gegenelektrode häufig als Walze ausgebildet, die den zu behandelnden Stoff (z.B. eine Folie) unter einer Reihe von Elektroden entlang befördert. Auf diese Weise kann eine Vorbehandlung in-line am Ende der Folienherstellung oder vor dem Bedrucken durchgeführt werden.

In Niederdruckplasmasystemen wird das Prozessgas unter Vakuumbedingungen mittels Hochfrequenz- oder Mikrowellengeneratoren ionisiert. Mit der Auswahl des Prozessgases können die in der Werkstoffoberfläche eingelagerten Moleküle und somit auch die Materialeigenschaften beeinflusst werden. Der Aktivierungsgrad und die Beständigkeit der Behandlung sind bei diesem Verfahren höher als bei Atmosphärendruckplasma-Anlagen /18/.

Beim Beflammen wird mit einer oxidierend eingestellten Propan- oder Acetylen-Flamme, die einen Sauerstoffüberschuss besitzt, die Werkstückoberfläche kurzzeitig erhitzt. Es entstehen dabei polare Gruppen, die die Benetzbarkeit und Haftung verbessern. Die erreichte Erhöhung der Oberflächenspannung klingt relativ schnell wieder ab, so dass eine sofortige Weiterverarbeitung notwendig ist. Eine Variante des Beflammens ist die Silanisierung. Dabei werden siliziumhaltige Substanzen dem Trägergas beim Beflammen beigefügt und so auf der behandelten Oberfläche eine wenige Nanometer dicke oberflächenaktive Beschichtung hinterlassen. /19/

Auch hochenergetische UV-Strahlung (Wellenlänge < 200nm) ist in der Lage, molekulare organische Bindungen an und auf Oberflächen aufzubrechen. An die geöffneten Bindungsstellen können dann Bestandteile aus der Umgebungsatmosphäre (Sauerstoff, oder

durch UV-Strahlung gebildetes Ozon) angelagert werden. Die Oberflächen erhalten dadurch einen höheren polaren Charakter.

Bei der Fluorierung wird die Oberfläche der zu behandelnden Kunststoffteile einem reaktiven Fluorgasgemisch ausgesetzt. Dabei läuft eine schrittweise Substitution der Wasserstoffatome an den polymeren Ketten durch Fluoratome ab. Es werden induzierte Dipole gebildet und die Kunststoffoberfläche wird polar. Die durch Fluorierung erzielte Aktivierung ist im Vergleich zur Plasmabehandlung oder dem Beflammen relativ langzeitstabil. /20/ Wichtig für alle Vorbehandlungsprozesse ist, dass die so aktivierte Oberfläche mit der Umgebung reagiert und sich ggf. sehr schnell verändern kann. Daher sollte die Vorbehandlung möglichst kurz vor dem Drucken stattfinden. /1/

Die Primer-Beschichtung unterscheidet sich nicht nur insofern von den übrigen Methoden, als dass zumeist eine andere Vorbehandlungsmethode vorausgesetzt wird, um den Primer ausreichend auf der Kunststoffoberfläche zu verankern. Vielmehr kann hierbei die Struktur der funktionellen Gruppen chemisch kontrolliert und somit an die Druckfarbe bzw. Tinte angepasst werden. Ein Primer bietet die Möglichkeit die aufgedruckte Schicht vom Obermaterial zu trennen, da nur dieser unmittelbar mit der Druckfarbe bzw. Tinte in Kontakt kommt /16/. In der Vorstudie "Methoden zur Bestimmung von Vorbehandlungsparametern..." /20/ wurde nachgewiesen, dass durch Behandlung unterschiedlicher Bedruckstoffe mit einem jetbaren UV-Primer die Oberflächeneigenschaften dieser Bedruckstoffe vereinheitlicht werden können. Bei nachfolgenden Untersuchungen wurde hier von einer eigenen Oberfläche ausgegangen.

Zusammenfassend hat die Vorstudie /20/ nachgewiesen, dass die Oberflächeneigenschaften von Tinte und Substrat die Bedruckbarkeit beeinflussen. Die untersuchten Vorbehandlungsmethoden haben unterschiedliche Auswirkung auf die Oberflächeneigenschaften der Substrate.

Es wurde eine Vielzahl von Materialien in unterschiedlicher Art behandelt, charakterisiert und bedruckt. Die dabei erzielten Ergebnisse geben analog zu den aufgeführten Veröffentlichungen Hinweise auf bestehende Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und dem Verhalten beim Bedrucken, aber noch kein Modell bzw. keine Methode, mit dem man die notwendige Vorbehandlung automatisch bestimmen könnte. Die im Projekt geplante, gezielte unabhängige Beeinflussung der polaren und dispersen Anteile der Oberflächen und die Betrachtung der Wechselwirkung mit definiert eingestellten Inkjet-Tinten wurde bisher nicht umgesetzt. Des Weiteren stehen in den aufgeführten Veröffentlichungen die Haftung und Benetzung im Vordergrund und nicht die Erreichung einer optimalen Druckqualität.

1.3 Arbeitshypothesen

Für die Erreichung der Projektziele wird von folgenden Arbeitshypothesen ausgegangen:

- H1: Die bekannten Vorbehandlungsmethoden beeinflussen die Oberflächeneigenschaften der Substrate in unterschiedlicher Weise.
- H2: Für die einzelnen Substrate lassen sich eine oder mehrere Vorbehandlungsmethoden als optimal für den Druckprozess bzw. die -qualität definieren.
- H3: Entscheidend für eine gute Benetzung ist die Anpassung der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat. Diese Anpassung lässt sich mithilfe von Wetting Envelopes beschreiben.
- H4: Für eine optimale Druckqualität ist eine gute Benetzung, aber kein Spreiten der Tinte auf dem Substrat Voraussetzung.
- H5: Die Stabilität der Tintentropfen bzw. ihre Neigung zum Verlaufen beeinflussen je nach der bis zum Aushärten/Trocknen zur Verfügung stehenden Zeit das Druckergebnis. Dieser Effekt lässt sich durch die Messung des dynamischen Kontaktwinkels charakterisieren.
- H6: Das Volumen der übertragenen Tintentropfen hat Einfluss auf das Benetzungsverhalten. Um gute Druckergebnisse zu erreichen, sind für unterschiedliche Oberflächen unterschiedliche Tropfenvolumen notwendig.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

2.1 Forschungsziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer neuen Methode zur Bestimmung von optimalen Vorbehandlungsparametern für im Inkjet zu bedruckende nichtsaugende Substrate. Dabei soll eine optimale Benetzung und Farbannahme zum Erreichen eines guten optischen Druckresultats erzeugt werden. Die Untersuchungen sollen mit Substraten und Inkjet-Tinten durchgeführt werden, deren Oberflächeneigenschaften gezielt eingestellt und variiert werden können. Im Ergebnis soll ein Zusammenhang zwischen den messbaren Oberflächeneigenschaften und der Benetzung bzw. Farbwiedergabe dargestellt werden, so dass ein Prozessfenster, in dem die Benetzung des Substrats durch die Tinte in geeigneter Weise erfolgt, beschrieben werden kann. Darauf aufbauend ist eine Vorhersage der Bedruckbarkeit mit Inkjet-Tinten auf definierten Substraten möglich, und damit steht eine effiziente Methode zur Bestimmung geeigneter Vorbehandlungsparameter zur Verfügung. Die Untersuchungen werden systematisch für UV-Tinten und nichtsaugende Bedruckstoffe durchgeführt.

2.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Dieses Forschungsvorhaben ist in insgesamt 8 Arbeitspakete (AP) unterteilt, die gemäß Abb. 2 miteinander verknüpft sind. Sie werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels hinsichtlich der geplanten Aktivitäten und des erforderlichen Personaleinsatzes ausführlich beschrieben.

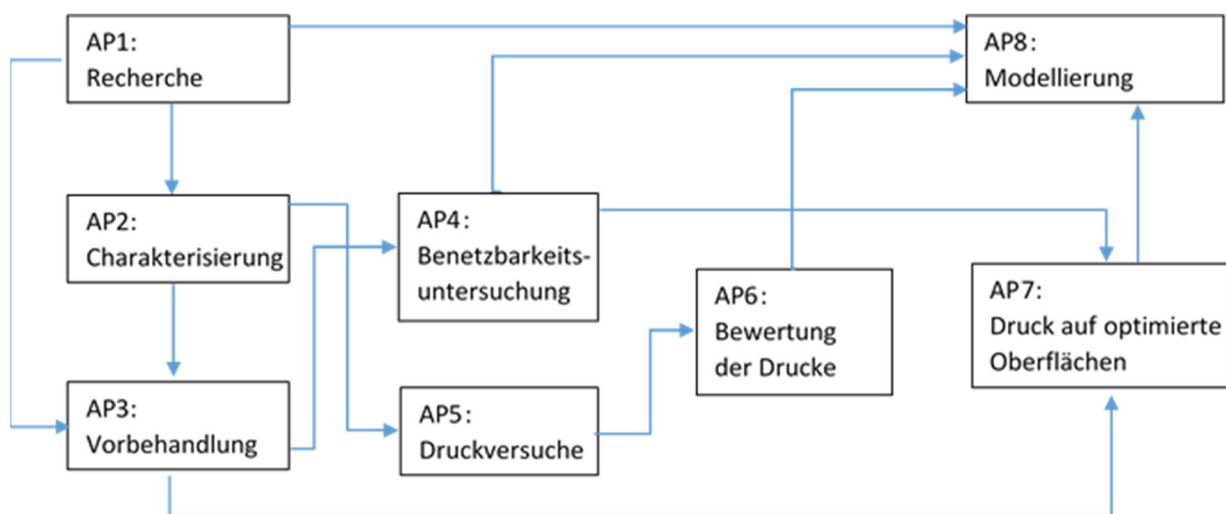


Abb. 02: Projektablauf und Verknüpfung der einzelnen Arbeitspakete

2.2.1 AP 1: Recherche Bedruckstoffe/Tinten

Im Rahmen des Forschungsprojekts soll die Übersicht über die am Markt eingesetzten Bedruckstoffe und Tinten aktualisiert und konkretisiert werden. Die dynamische Entwicklung im Bereich von Inkjet-Tinten und die Vielzahl der unterschiedlichen Bedruckstoffe erschweren die Vorhersagbarkeit, welche Bedruckstoff-Tinte-Kombinationen Erfolg versprechen und zu guten Bedruckbarkeitsergebnissen führen. Diese Informationen bilden die Grundlage für die Auswahl der Materialien für die im Projekt geplanten Untersuchungen sowie für die Modellierung von optimal angepassten Oberflächen in AP8.

2.2.2 AP 2: Charakterisierung Substrate und Tinten

Die ausgewählten Bedruckstoffe werden in diesem Arbeitspaket hinsichtlich ihrer Oberflächenenergie durch statische und dynamische Randwinkelmessungen charakterisiert und der polare und disperse Anteil der Oberflächenenergie bestimmt. Mit dem DSA25 des Herstellers Krüss steht dafür ein Gerät zur Verfügung, das diese Messung mit hohem Automatisierungsgrad durchführt und damit eine sehr gute Reproduzierbarkeit erreicht. Durch eine ausreichend große Anzahl von Messungen werden verlässliche Ergebnisse erzielt. Zur Beschreibung der Benetzbarkeit werden für die Oberflächen daraus Wetting Envelopes berechnet. Darüber hinaus wird die Rauigkeit der Substrate als wichtiger Einflussfaktor für die Benetzung mittels Profilmessung beurteilt. Diese Bewertung wird für die in AP3 vorbehandelten Substrate wiederholt, um die Wirkung der Vorbehandlung beurteilen zu können.

Von einem Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses werden, zusätzlich zu den aus AP 1 ausgewählten marktüblichen Tinten, Inkjet-Tinten mit definiert abgestuften rheologischen Eigenschaften zur Verfügung gestellt. Diese speziell für das Projekt hergestellten Inkjet-Tinten werden hinsichtlich Dichte, Viskosität, statischer und dynamischer Oberflächenspannung (Pendant Drop, Blasendruck) geprüft und verglichen, so dass eine systematische Variation der Parameter gewährleistet ist.

2.2.3 AP 3: Gezielte Vorbehandlung der Substrate

Unterschiedlichste Methoden bieten Möglichkeiten die Oberflächeneigenschaften der Substrate zu modifizieren. Plasmabehandlungen, chemische Behandlungen (wie Fluorierung) sowie die Beschichtung mit einem Primer stellen dabei gängige Methoden dar. Folgende Vorbehandlungsmethoden sind üblich:

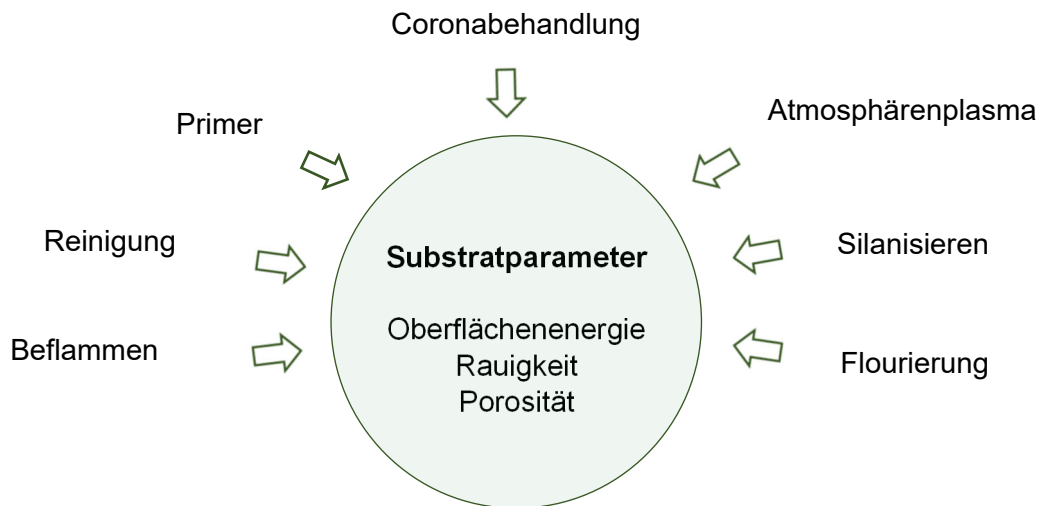


Abb. 03: Vorbehandlungsmethoden

Alle Methoden verhalten sich jedoch hinsichtlich ihres Einsatzbereiches sowie ihrer Effektivität und Langzeitstabilität unterschiedlich /16/.

Atmosphärendruck-Plasmajets und DBD (Dielectric Barrier Discharge)-basierte Plasmasysteme bieten die Möglichkeiten, lokale als auch flächige Vorbehandlungen oder Beschichtungen auf einer Vielzahl von Materialoberflächen z.B. Kunststoffen, Glas, Folien, Textilien zu erzeugen. Bei den Plasmajets wird die Gasentladung zumeist in einer rotationssymmetrischen Plasmadüse gezündet und durch die angelegte Druckluft herausgetrieben. Bei den DBD-Plasmen hingegen wird eine dielektrisch behinderte Hochfrequenzentladung gezündet. Zwischen den beiden zumeist Planarelektroden befindet sich ein Dielektrikum, welches als dielektrische Barriere dient. Auf diese Weise brennt das Plasma in Form vieler kleiner Funkenentladungen, die zur Oberflächenbehandlung eingesetzt werden können. /21/

Beflammen ist für Anwendungen im Bereich der Oberflächenmodifizierung von Glas, Kunststoffen, Metallen, Holz, Stein, Keramik und Textilien geeignet. Vorteil dieser Technologie ist es, große Oberflächen schnell und kostengünstig zu behandeln, wobei es hinsichtlich der Substrate nur wenige Einschränkungen gibt. Durch Schaffung funktioneller Gruppen werden die Substratoberflächen aktiviert und die Benetzbarkeit verbessert. In Abhängigkeit vom Substrat und dem Ziel der Oberflächenfunktionalisierung können Brenngasmischung und Bauart des Brenners sowie eine Reihe von Prozessparametern wie der Abstand zum Substrat und dessen Geschwindigkeit relativ zum Brenner sowie die Anzahl der Brennerdurchläufe verändert werden. /19/

Primer als Haftvermittler kommen in der Regel dann zum Einsatz, wenn schwer zu beschichtende Untergründe verklebt, lackiert, bedruckt oder in anderer Weise beschichtet

werden. Die Wirksamkeit des Haftvermittlers wird über seine Haftstärke bzw. Haftfestigkeit definiert, dem Maß für den Widerstand einer Beschichtung gegen ihre mechanische Trennung vom Untergrund und weniger von der Möglichkeit durch Modifizierung der Oberflächenspannung einen Stoff besser zu benetzen.

Floatglas hat ein sehr breites Spektrum von Oberflächenspannungen. Diese hängen z.B. davon ab, ob man die Zinnbad- oder die Luftseite verwendet. Die Oberflächenspannung ist umso geringer je älter ein Glas wird. Unreinheiten auf der Glasoberfläche, wie Staub, Fette, Öle oder ein Trennpuder, welches bei der Glasherstellung aufgebracht wird, damit die Glasscheiben, wenn sie beim Lagern oder Transportieren aneinander reiben, sich nicht gegenseitig die Oberfläche zerkratzen, können ebenfalls die Oberflächenspannung beeinflussen. Die Oxidation der im Glas enthaltenen Bestandteile wie Natrium, Kalium, Calcium, Barium oder Bor führt zu Korrosion, die an den betroffenen Stellen auch die physikalischen Eigenschaften des Materials verändern. Nicht zuletzt bestimmt die Bildung eines Wasserfilms das hydrophile (wasseranziehende) Verhalten des Glases und führt zur Verschlechterung der Adhäsion.

Bei der Vorbehandlung von Gläsern (Glasbeschichtung) kommen häufig funktionalisierte Silane oder andere metallorganische Verbindungen (Titanate oder Zirkonate) zum Einsatz, die mit dem Glas eine chemische Reaktion eingehen. /22, 23/

Es sollen Substrate mit definiert eingestellten Oberflächeneigenschaften verwendet werden. Zur Sicherung der Praxisnähe werden Kunststoffe (PET, OPP, LDPE) und Floatglas mit marktüblicher Vorbehandlung einbezogen. Darüber hinaus soll der polare Anteil der Oberflächenspannung durch Behandlung mit Atmosphärenplasma beeinflusst werden, wodurch eine Erhöhung der polaren Oberflächenspannung um bis zu 15 mN/m möglich ist. Für die definierte Vorbehandlung werden Leistungen Dritter (siehe Angebot Innovent Jena) in Anspruch genommen.

2.2.4 AP 4: Untersuchungen zur Benetzbarkeit

In diesem Arbeitspaket soll geprüft werden, bei welcher Kombination der Eigenschaften seitens Bedruckstoff und Tinte eine möglichst gute Benetzbarkeit gewährleistet ist.

Durch die gezielte Variation der Eigenschaften von Substrat und Tinte werden vielfältige Kombinationen untersucht und bewertet.

Um die Benetzbarkeit zu beurteilen, werden die Randwinkel der auf definierte Oberflächenspannungen eingestellten Tinten auf den unterschiedlichen Oberflächen sowie deren zeitlicher Verlauf über einen festgelegten Zeitabschnitt betrachtet. Darüber hinaus wird der

Spreitungsfaktor, also die Änderung des Durchmessers der Tropfengrundfläche in Abhängigkeit der Zeit bestimmt. Um Aussagen für unterschiedliche drucktechnologische Anforderungen zu erhalten, wird das Benetzungsverhalten für verschiedene Tropfengrößen betrachtet.

2.2.5 AP 5: Druckversuche Inkjet

Für die Druckversuche wird zunächst eine geeignete Druckform erarbeitet. Dabei sollen alle erforderlichen Bewertungskriterien zur Druckqualität im Layout berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Form sowohl Felder verschiedener Flächendeckung und Farbbelegungen enthält, die eine praxisnahe Bewertung der Druckqualität erlauben, aber auch feine Strukturen zur Beurteilung der Detailwiedergabe und Konturenschärfe. Dazu kommen Flächen, die die Charakterisierung von Haftung bzw. Beständigkeit ermöglichen. Mit den unterschiedlichen Tinten-Substrat-Kombinationen werden Druckversuche im SID an der Inkjet-Labordruckanlage Thieme Lab durchgeführt. In dieser Anlage werden Konica-Minolta-Piezo-Druckköpfe eingesetzt. Die Software bietet einen direkten Zugriff auf die für die Tropfenerzeugung relevanten Parameter wie Wellenform, Spannung der Piezo-Einheit, Tintentemperatur usw. Der Einfluss auf die Tropfengeschwindigkeit, das Benetzen des Substrats und das Druckergebnis soll ebenfalls untersucht werden. Die Druckversuche werden zunächst auf den in AP 1 und 2 ausgewählten und charakterisierten Substraten durchgeführt.

2.2.6 AP 6: Bewertung Druckqualität

Zur Bewertung des Druckergebnisses, insbesondere der Benetzbarkeit wird auf den Druckmustern das Verhältnis des wiedergegebenen Tropfendurchmessers zum aufgetragenen Tropfenvolumen betrachtet. Dies wird als praxisnahes Kriterium für die Auswirkung der Benetzung auf die Druckqualität angesehen. Außerdem ist eine Bewertung der Homogenität und Randschärfe der aufgetragenen Strukturen mittels Mikroskop bzw. Bildanalyseverfahren vorgesehen. Die Auswertung soll zeigen, wie eine Oberfläche beschaffen sein muss, um ein gewünschtes Tropfenbild auf dem Bedruckstoff zu erhalten.

Weiterhin ist zu untersuchen, wie die Farbannahme und damit verbunden auch die Farbwiedergabe der gedruckten Farbschichten beeinflusst werden.

Die Haftung und mechanische Beständigkeit der Tinten auf den unterschiedlichen Substraten ist ebenfalls Bestandteil der Untersuchungen und wird durchstichprobenartige Scheuertests und Kratzfestigkeitstests überprüft.

2.2.7 AP 7: Druckversuche mit optimierten Materialien

In diesem Arbeitspaket folgen die Druckversuche mit den in AP 3 angepassten Oberflächen und Tinten. Substrate mit optimierten Oberflächeneigenschaften werden mit Tinten bedruckt, von denen aufgrund der Benetzungsversuche in AP 4 erwartet wird, dass eine verbesserte Druckqualität erreicht wird. Die Ergebnisse werden analog zu den Prüfmethoden in AP 6 bewertet.

2.2.8 AP 8: Modellierung Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckergebnis

In diesem Arbeitspaket werden die vorangegangenen Untersuchungen, Druckversuche und Prüfungen ausgewertet und Zusammenhänge zwischen den im Labor bestimmten Materialeigenschaften von Substrat und Tinte, den Druckkopfeinstellungen und der bei den Druckversuchen erreichten Qualität ausgearbeitet. Die Modellierung bezieht Betrachtungen zur Benetzung auf der Basis der Fluideigenschaften und der Wechselwirkungen von Massekraft und viskosen Kräften im Fluid ein. Im Ergebnis soll eine Vorhersage zur Eignung bzw. der notwendigen Vorbehandlung zum Erreichen einer optimalen Druckqualität für verschiedene Substrate getroffen werden.

2.2.9. AP 9: Berichtslegung

Die in den Arbeitspaketen 1 bis 8 erhobenen Daten, erarbeiteten Untersuchungsergebnisse und durchgeführten Berechnungen sowie die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen werden in Zwischen- und Abschlussberichten nachvollziehbar und durch Dritte wiederholbar dokumentiert. Die in Kapitel 5 genannten Transfermaßnahmen wie z.B. Fachvorträge und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wurden und werden umgesetzt.

2.3 Personaleinsatz

Für die durchgeführten Arbeiten wurden mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter und technisches Personal in Teilzeit beschäftigt. Das Personal wurde wie geplant in den oben beschriebenen Arbeitspaketen eingesetzt. Insgesamt wurden 40,7 Personenmonate HPA A und 7,2 Personenmonate HPA E aufgewendet.

Es wurden keine Geräte angeschafft.

Als Leistung Dritter wurde die Vorbehandlung von Substraten durch Innovent e.V. Jena in Anspruch genommen. Dabei sind die Kosten wie geplant angefallen.

3 Durchführung, Ergebnisse und Bewertung

3.1 AP 1: Recherche

- **Durchgeführte Arbeiten**

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Übersicht über die am Markt eingesetzten Bedruckstoffe und Tinten aktualisiert und konkretisiert.

- **Erzielte Ergebnisse**

Die Übersicht wurde bis Ende Januar 2020 planmäßig fertiggestellt. Die Informationen bilden die Grundlage für die Auswahl der Materialien für die im Projekt geplanten Untersuchungen sowie für die Modellierung von optimal angepassten Oberflächen in AP8. Es wurden Substrat-Tinte-Kombinationen mit definiert eingestellten Oberflächeneigenschaften verwendet. Die dynamische Entwicklung im Bereich der Inkjet-Tinten und die Vielzahl der unterschiedlichen Bedruckstoffe erschwerten die Auswahl repräsentativer Materialien.

Bei den Substraten beschränkt sich das Projekt im Wesentlichen auf nichtsaugende Materialien. Die Benetzung bezieht sich hier ausschließlich auf die Substratoberfläche. Zur Sicherung der Praxisnähe wurden Kunststoffe (PET, OPP, LDPE) und Floatglas mit marktüblicher Vorbehandlung einbezogen. Von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden behandeltes Aluminium und Weißblech zur Verfügung gestellt. Projektferner standen aber auch verschiedene Papiere zur Verfügung, die in die Untersuchungen einbezogen wurden.

In Tabelle 1 werden alle Substrate zusammengefasst. Bei den Kunststoffen wurde Vorder- (VS) und Rückseite (RS) unterschieden. Die vorbehandelten Seiten wurden jeweils als Vorderseite festgelegt. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Papiere wurden ebenfalls auf Vorder- (VS) und Rückseite (RS) erfasst.

Material	Bezeichnung
Kunststoffe	
Polyethylenterephthalat, vorbehandelt	PET VS
Polyethylenterephthalat	PET RS
Biaxial Orientiertes Polypropylen, vorbehandelt	BOPP VS
Biaxial Orientiertes Polypropylen	BOPP RS
Low Density Polyethylen, vorbehandelt	LDPE VS
Low Density Polyethylen	LDPE RS

Metalle	
Aluminium (unbeschichtet)	Alu
Aluminium lackiert	Alu L
Weißblech lackiert	WB L
Gläser	
Floatglas (Luft- bzw. Feuerseite)	Glas L
Floatglas (Bad- bzw. Zinn-Seite)	Glas Sn
Papier	
J53362	J53362 VS
J53362	J53362 RS
P015	P015 VS
P015	P015 RS
P3	P3 VS
P3	P3 RS

Tab. 01: Substrate (Ausgangsmaterialien)

Andererseits sollten die Oberflächeneigenschaften der UV-Tinten angepasst werden können. Dabei standen Modelltinten (ohne Additiv für Benetzung und Verlauf) MT1 und MT2 zur Verfügung, deren Oberflächenspannung durch die Zugabe des Additivs BYK 3760 eingestellt werden konnte.

BYK 3760 ist ein silikonhaltiges Oberflächenadditiv für lösemittelhaltige, wässrige und UV-Lacksysteme sowie Druckfarben. Die Anwendung führt zur starken Reduzierung der Oberflächenspannung und Erhöhung der Oberflächenglätte bei geringer Schaumstabilisierung.

In Tabelle 2 wurden betrachtete Tinten und Additive zusammengefasst.

Material	Bezeichnung
Tinten	
Modelltinte MT1 (UV-basiert)	
+ 0Vol.-% BYK3760	MT1
+ 0,02 Vol.-% BYK3760	MT1 002
+ 0,5 Vol.-% BYK3760	MT1 05
Modelltinte MT2 (UV-basiert)	
+ 0 Vol.-% BYK3760	MT2
+ 0,02 Vol.-% BYK3760	MT2 002
+ 0,5 Vol.-% BYK3760	MT2 05
wasserbasiert Blau	wBlau
Additive	
Additiv BYK3760	

Tab. 02: Tinten und Additive

3.2 AP 2: Charakterisierung Substrate und Tinten

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die ausgewählten Bedruckstoffe

- BOPP (Vorderseite VS/Rückseite RS)
- LDPE (Vorderseite VS/Rückseite RS)
- PET (Vorderseite VS/Rückseite RS)
- Aluminium unveredelt
- Aluminium klar lackiert
- Aluminium weiß lackiert
- Weißblech weiß lackiert
- Floatglas (Zinnbadseite/Oberseite)

wurden im Lieferzustand sowie nach gezielter Vorbehandlung charakterisiert.

Für die Randwinkelmessung stand ein Drop Shape Analyser DSA25 der Krüss GmbH zur Verfügung. Dieses Messgerät ermöglichte die schnelle reproduzierbare Bestimmung des Rand- bzw. Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeit und Festkörper nach der Methode des liegenden Tropfens (sessile drop) sowie die Berechnung der freien Oberflächenenergie aus den Kontaktwinkeln mehrerer Testflüssigkeiten unter Berücksichtigung verschiedener gängiger Modelle (u.a. OWRK).

Neben dem statischen Kontaktwinkel kann auch der Fortschritt- und Rückzugswinkel dynamischer Messungen bestimmt werden. Der Drop Shape Analyser DSA 25 erlaubt ferner die Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten nach der Methode des hängenden Tropfens (pendant drop) sowie die Bestimmung der Grenzflächenspannung zwischen zwei Flüssigkeiten.

Auf Basis der ermittelten Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungsdaten wurden der polare und disperse Anteil der Oberflächenspannung ermittelt. Zur Erhöhung der Messsicherheit wurden automatisierte Mehrfachmessungen durchgeführt.

Die Rauheiten der Folien wurden im Bereich von 1 bis 20 μm spezifiziert. Die Gläser weisen laut Herstellerangaben Rauheiten von unter 1 nm auf.

Die bereitgestellten Modelltinten wurden mittels eines speziellen Additivs bezüglich ihrer Oberflächenspannung und Viskosität modifiziert, so dass von 2 Tintentypen unterschiedlicher Viskosität 7 bzw. 4 Tinten mit abgestufter Oberflächenspannung erzeugt wurden.

▪ **Erzielte Ergebnisse**

Im Ergebnis der Messungen liegen Daten für die Substrate in den verschiedensten Varianten und für die Tintenmodifikationen vor.

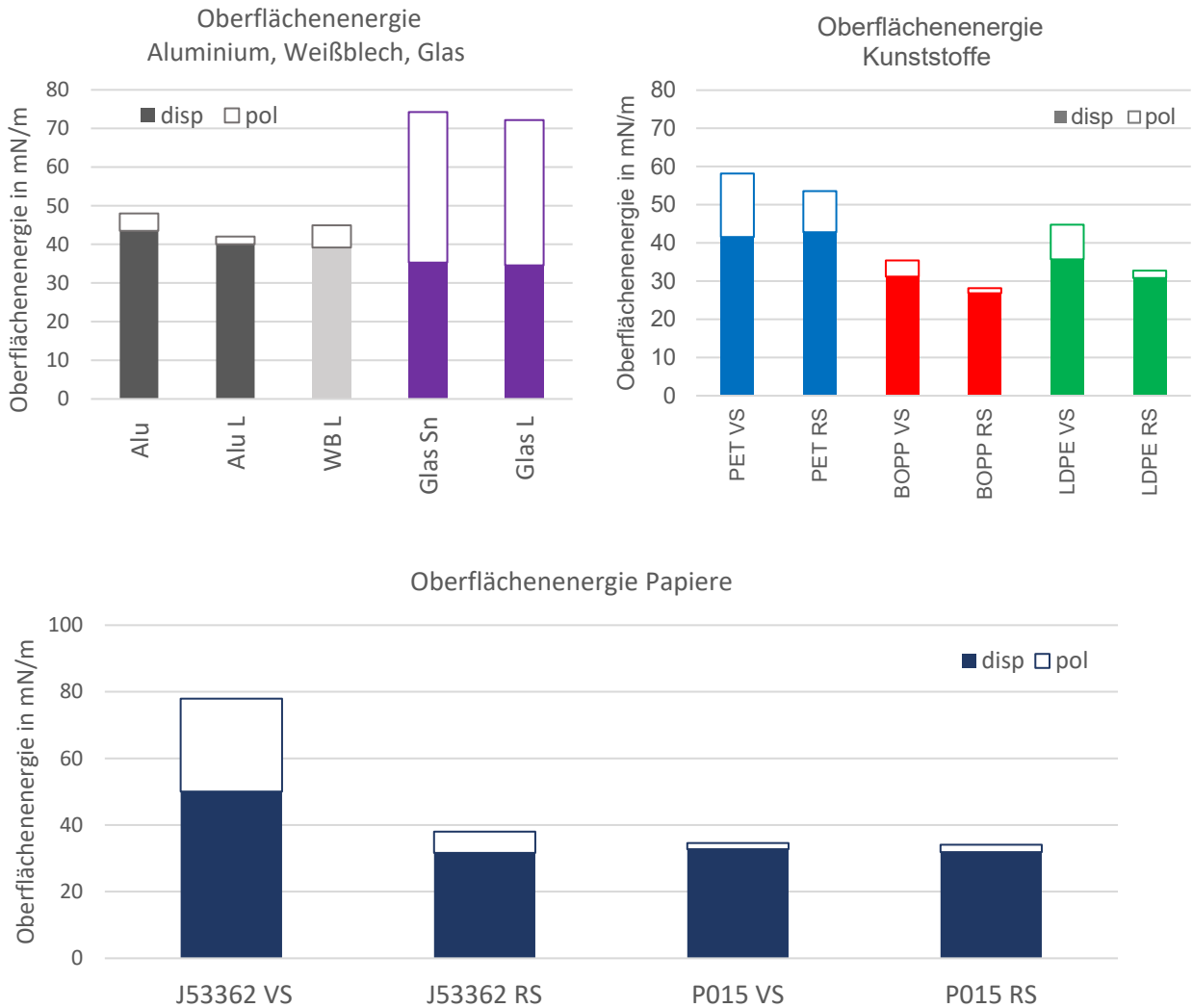


Abb. 04: Oberflächenenergien der Substrate im Lieferzustand

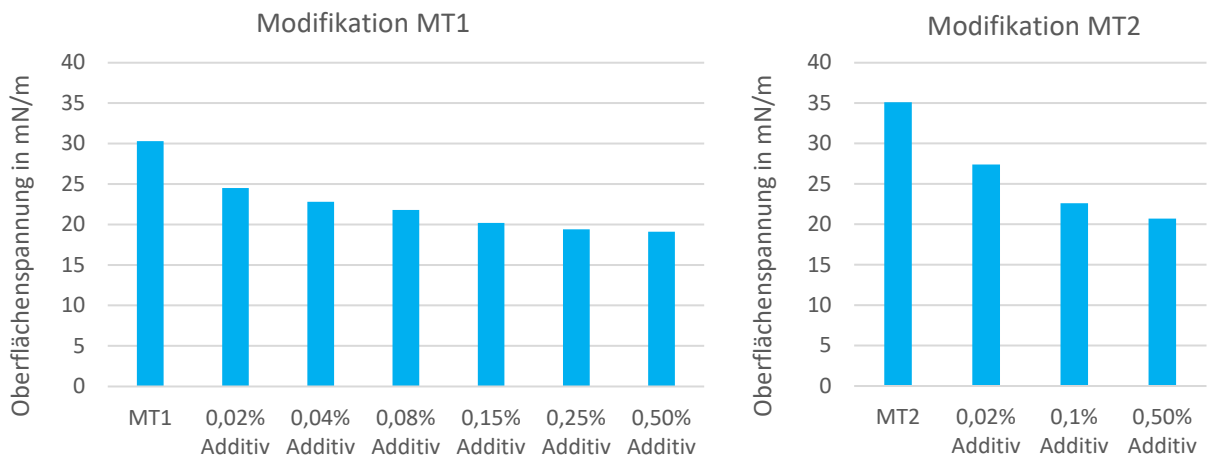


Abb. 05: Oberflächenspannungen der modifizierten Tinten

Durch Zugabe verschiedener Additivkonzentrationen BYK3760 ließ sich die Oberflächenspannung der Modelltinten: MT1 von 30,3 mN/m bis 19,1 mN/m bzw. MT2 von 35,1 mN/m bis 20,7 mN/m kontinuierlich einstellen.

Auf Basis der gemessenen Randwinkel und der daraus ermittelten Oberflächenenergien wurden Wetting Envelopes berechnet. Diesen wurden die Oberflächeneigenschaften der modifizierten Tinten gegenübergestellt. Anhand dieser Darstellung konnte gezeigt werden, dass für einige Bedruckstoffvarianten ein Spreiten der Tinten unvermeidlich war, während bei anderen Bedruckstoff-Tinten-Kombinationen eine gute Benetzung oder sogar ein Abstoßen der Tinten zu erwarten ist. Zu erkennen ist das daran, dass die Koordinaten für die Tinten innerhalb bzw. außerhalb oder nahe an der Begrenzungslinie des Envelopes liegen. Damit wurde das Ziel, einen möglichst großen Bereich verschiedener Oberflächeneigenschaften der Materialien abzudecken, erreicht.

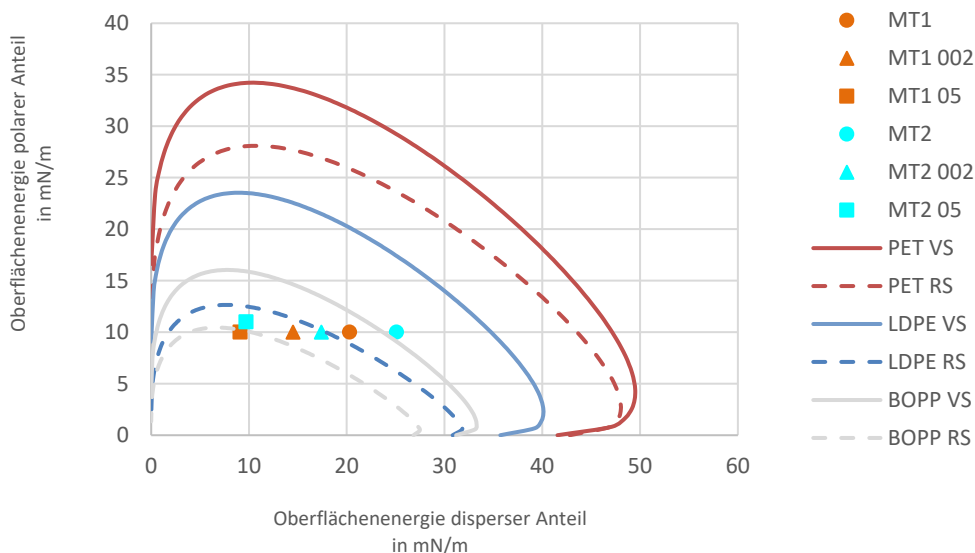


Abb. 06: Wetting Envelopes bei einem Randwinkel von 30° für die Kunststoff-Substrate im Lieferzustand (Vorder- und Rückseite) und je 3 Tintenvarianten MT1 und MT2

Die untersuchten Kunststoffe decken einen breiten, repräsentativen Wertebereich der Oberflächenenergie (28-58mN/m) mit unterschiedlichen dispersen und polaren Anteilen ab. Vorbehandelte Substrate (nach Festlegung VS (Vorderseite)) besitzen dabei stets die höheren Oberflächenenergien, wobei durch die Vorbehandlung insbesondere der polare Anteil deutlich erhöht wurde.

Mögliche Substrat-Tinte-Kombinationen der Kunststoffe lassen sowohl die Darstellung vollständigen Spreitens (PET und LDPE VS) als auch stehende Tropfen im statischen Gleichgewicht mit unterschiedlichen Kontaktwinkeln erwarten. Die Ergebnisse der Kontaktwinkelberechnung sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tinten	Substrate					
	PET VS	PET RS	LDPE VS	LDPE RS	BOPP RS	BOPP VS
MT1				27,8°	54,0°	
MT1 002					34,7°	
MT1 05						
MT2				46,8°	64,9°	21,5°
MT2 002					45,5°	
MT2 05					30,5°	

Tab. 03: Berechnete Kontaktwinkel für die Kunststoffsubstrate

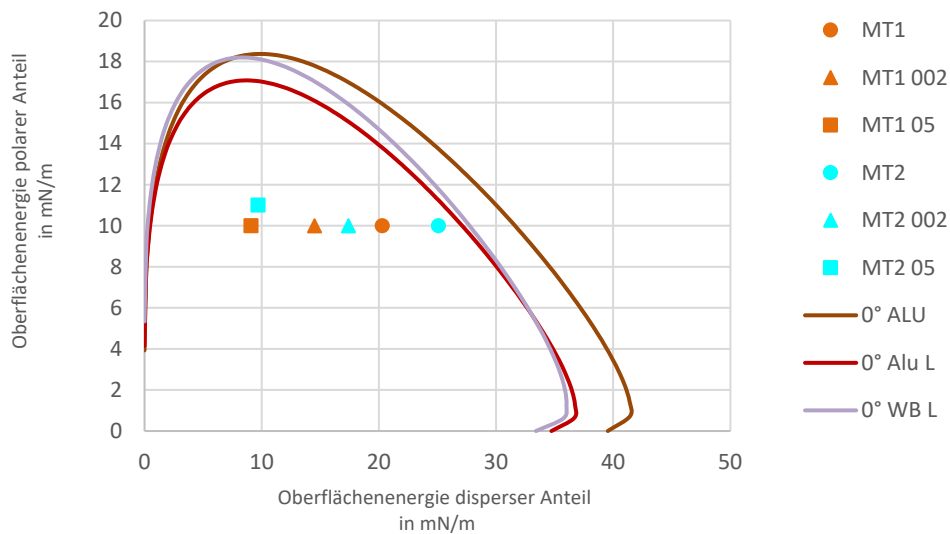


Abb. 07: Wetting Envelopes Metalle

Die Oberflächenenergie des unbehandelten Aluminiums unterscheidet sich deutlich von den lackierten Metallen. Die lackierten Metalle Alu L und WB L wiesen mit der Ähnlichkeit ihrer Oberflächenenergien auf vergleichbare Oberflächen der Lacksysteme mit einer geringeren Oberflächenenergie hin. Die Lage der Tinten innerhalb aller Wetting Envelopes lässt vollständiges Spreiten auf allen Metallen erwarten.

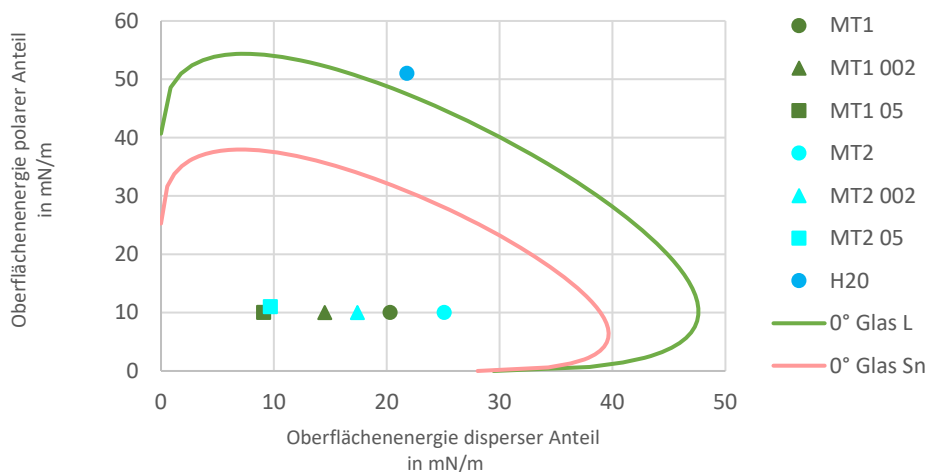


Abb. 08: Wetting Envelopes Floatglas

Das beidseitig untersuchte Floatglas besitzt unterschiedliche Oberflächenenergien, die im Wesentlichen vom polaren Anteil getragen werden.

Im Wetting Envelope lässt sich das zweiseitige Verhalten der Floatgläser gut erkennen. Für die eingeschlossenen UV-Tinten ist vollständiges Spreiten zu erwarten.

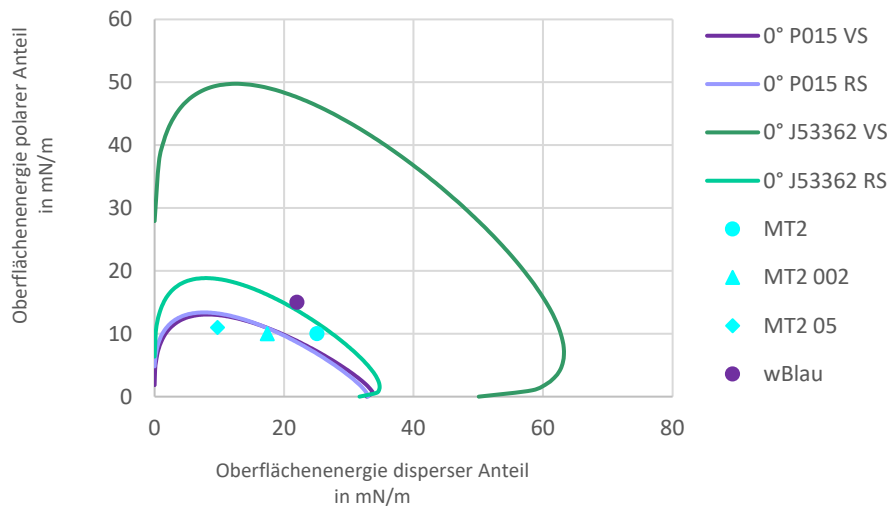


Abb. 09: Wetting Envelopes Papier

Das schnelle Eindringen der Testflüssigkeiten beeinflusste die Charakterisierung der Oberflächenenergien der Papiere.

J53362 wies mit 78 mN/m bzw. 38 mN/m starke Unterschiede auf Vorder- und Rückseite auf. P015 deckt mit beidseitig 34 mN/m den Bereich geringer Oberflächenenergie ab. P3 konnte aufgrund des schnellen Eindringens der Flüssigkeiten in das Papier keine Oberflächenenergie zugewiesen werden. Wir gehen auch hier von einem beidseitigen Papier aus.

Die Substrat-Tinte-Kombinationen mit den unterschiedlichen Oberflächenspannungen der modifizierten UV-Tinte MT2 lässt im Allgemeinen vollständiges Spreiten erwarten. Die Ausbildung stehenden Tropfen sollte mit der unverdünnten Modelltinte MT2 möglich sein. Auch die zu Vergleichszwecken herangezogene wasserbasierte Tinte wBlau sollte dieses Verhalten zeigen. Die berechneten Kontaktwinkel sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tinten	Substrate			
	P015 VS	P015 RS	J53362 VS	J53362 RS
MT2	40,4°	40,1°		
MT2 002				
MT2 05				
wBlau	59,8°	58,9°		

Tab. 04: Berechnete Kontaktwinkel für die Papiere

3.3 AP 3: Gezielte Vorbehandlung der Substrate

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Substrate wurden jeweils auf einer Seite in einem Panel Treater bzw. mit einem T-Spot für Alu blank (nicht mit Panel Treater möglich wegen Leitfähigkeit) mit Atmosphärendruckplasma behandelt. Die Intensität der Behandlung konnte durch Variation der Durchlaufgeschwindigkeit verändert werden. Prozessgas (Luft) und Behandlungsabstand wurden dabei konstant gehalten.

Behandlungsparameter Panel Treater:

- Leistung 1,2 kW
- Prozessgas Umgebungsluft
- Bandgeschwindigkeit 40 mm/s (Alu, Weißblech), 40 und 80 mm/s (Folien)
- Brennerhöhe 1-2 mm
- Einstellung Feingewinde 5,5 mm
- 1 Durchlauf

Behandlungsparameter T-Spot

- Leistung: 230 W
- Prozessgas Luft
- Verfahrgeschwindigkeit 200 mm/s
- Brennerabstand 10 mm
- Rasterabstand 3 mm
- 1 Durchlauf

Bei der Oberflächenbehandlung von Kunststoffen und Metallen durch Beflammen wurde ebenfalls die Durchlaufgeschwindigkeit variiert. Prozessgasgemisch (Luft/Propan), Brennerhöhe (Behandlungsabstand) und Substrattemperatur blieben konstant.

Dabei konnte jedoch bei den behandelten Substraten in der Wirkung kein Unterschied festgestellt werden, so dass nachfolgend keine Unterschiede in der Intensität beim Beflammen gemacht werden.

Parameter Beflammung:

- Brenner arcogas TP2 150mm
- Abstand Brenner zum Substrat: 10 mm
- Fahrweg: 700 mm

- Wartezeit: 5 s
- Luftzufuhr: 200 l/min
- Propangas: 11 l/min
- Precursor: ohne
- Geschwindigkeit: 500 mm/s (Folien) 200 mm/s (Alu), 250 mm/s (Weißblech)
- 2 Durchläufe

Zur Behandlung der betrachteten Floatgläser wurden im Sprühverfahren 3 verschiedene Beschichtungen (A, B, C) aufgetragen.

- A: SURALink 011 (Sura Instruments GmbH), Schichtdicke 50 nm
- B: HR06_1 (Sura Instruments GmbH), Schichtdicke ca. 50 nm
- C: MP94E (Eigenentwicklung Innovent), Schichtdicke 50 nm

Die Beschichtungen A und B wurden sowohl auf die Luftseite als auch auf die Zinnbadseite aufgetragen, die Beschichtung C nur auf die Luftseite.

▪ Erzielte Ergebnisse

Eine Übersicht der behandelten Substrate zeigt die Tabelle 5.

Gesteuert durch die Durchlaufgeschwindigkeit wurden bei Aktivierung im Atmosphären-druckplasma 3 Intensitätsstufen unterschieden.

Kunststoffe

Substrat	Vorbehandlung							Bezeichnung
	Plasma (P)			Beflammen (FI)	Primern			
	25%	50%	100%		A	B	C	
PET								PET P025
								PET P050
								PET P100
								PET FL
BOPP								BOPP P025
								BOPP P050
								BOPP P100
								BOPP FL
LDPE								LDPE P025
								LDPE P050
								LDPE P100
								LDPE FL

Metalle

Substrat	Vorbehandlung						Bezeichnung
	Plasma		Beflammen (FL)	Primern			
	P	T-Spot		A	B	C	
Alu							Alu T-Spot
							Alu FL
Alu L							Alu L P
Alu L							Alu L FL
WB L							WB L P
WB L							WB L FL

Gläser

Substrat	Vorbehandlung						Bezeichnung	
	Plasma (P)			Beflammen (FL)	Primern			
	25%	50%	100%		A	B		C
Glas L							Glas L A	
							Glas L B	
Glas Sn							Glas Sn A	
							Glas Sn B	
								Glas Sn C

Tab. 05: Übersicht der Substratbehandlungen

Die unbehandelten Substrate sind mit der Bezeichnung UB aufgeführt.

Die Papiere wurden keiner zusätzlichen Behandlung unterzogen.

Mit der Vorbehandlung konnte die Oberflächenspannung der Substrate modifiziert werden. Der polare Anteil der Oberflächenspannung wurde in den meisten Varianten erhöht. Die verschiedenen Behandlungsmethoden wirkten sich unterschiedlich auf die einzelnen Materialien aus:

Bei BOPP wurde der polare Anteil sowohl durch die Plasmabehandlung leicht und durch die Beflammung deutlich erhöht. Bei LDPE zeigt die Beflammung keine Wirkung, während die Plasmabehandlung sowohl den polaren als auch den dispersen Anteil der Oberflächenspannung erhöht. Bei PET hat die Beflammung ebenfalls wenig Einfluss, durch die Plasmabehandlung wird der polare Anteil erhöht. Auffällig war, dass die verschiedenen Behandlungsintensitäten beim Plasma bei den Kunststoffen zu ähnlichen Oberflächenspannungen führten.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die durch die Behandlung erzielten Eigenschaften der Kunststoffe über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen) stabil sind.

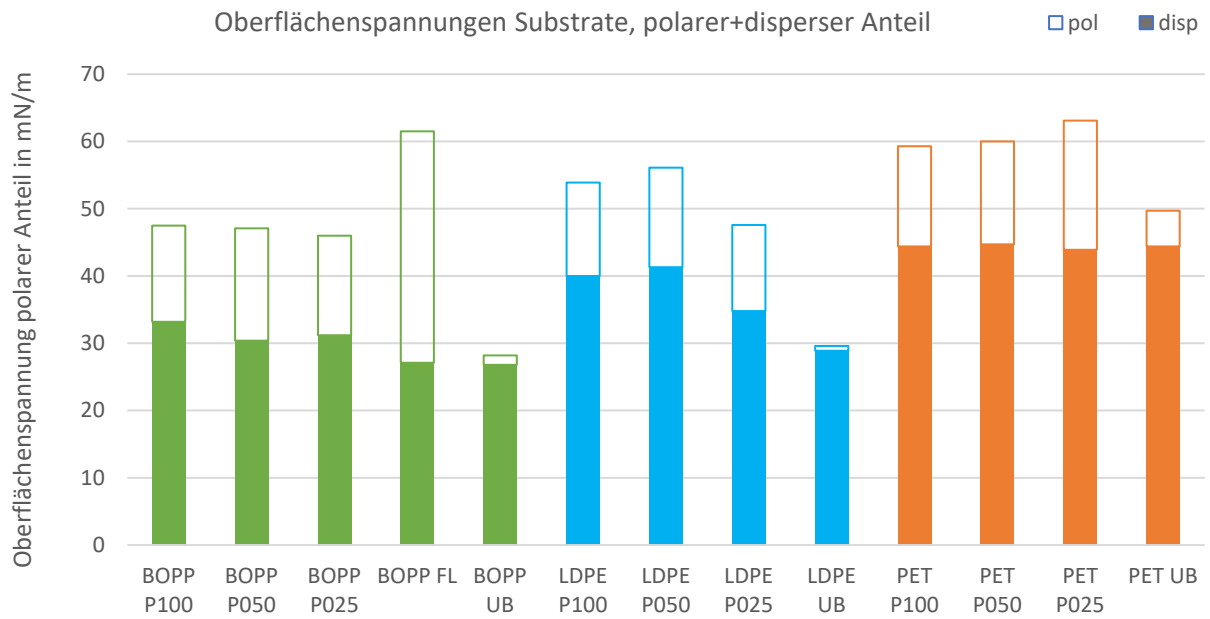


Abb. 10: Oberflächenspannungen Kunststoffe vor und nach Behandlung

Bei der Darstellung der Oberflächeneigenschaften der vorbehandelten Materialien als Wetting Envelope zeigt sich, dass die Modifizierungen überwiegend zu einer deutlichen Vergrößerung des benetzbaren Bereichs geführt haben.

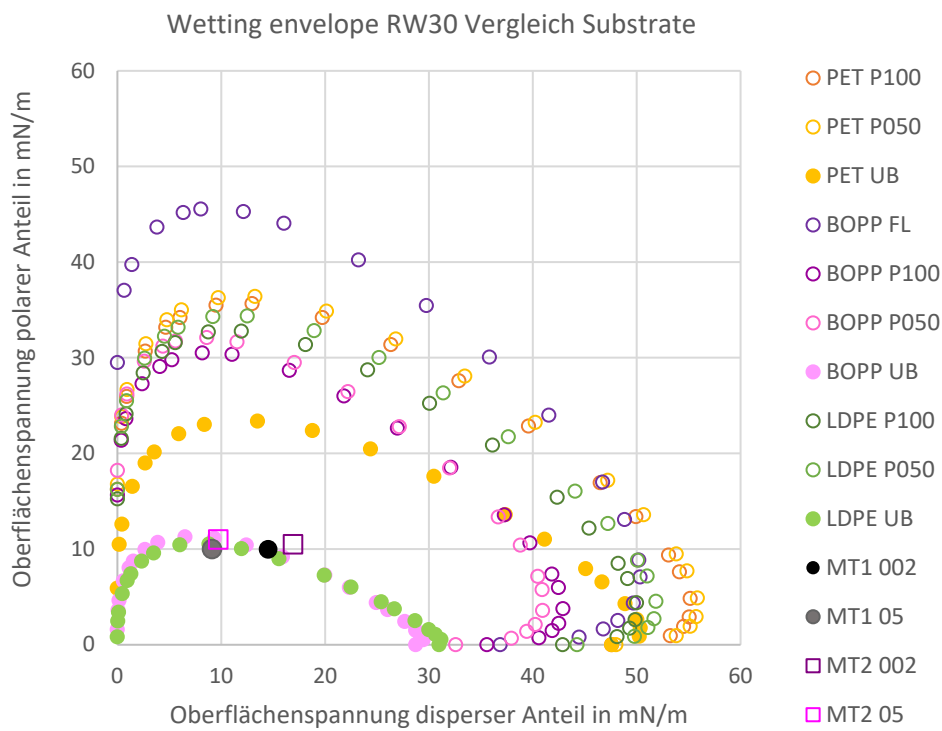


Abb. 11: Wetting Envelopes Kunststoffsubstrate vor und nach Plasmabehandlung

Bei den Metallsubstraten wurde durch Plasmabehandlung ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Oberflächenspannung, insbesondere des polaren Anteils erreicht. Die Beflammung wirkte sich nur gering auf die Oberflächenspannung aus. Bei allen Bedruckstoffen aus dieser Gruppe wurde festgestellt, dass die Änderung der Eigenschaften nicht zeitstabil war, so dass die Untersuchungen zur Benetzung und die Druckversuche unmittelbar nach der Behandlung erfolgen müssen, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu führen. Die Oberflächenspannungen der Glassubstrate wurden durch die aufgetragenen Beschichtungen verringert.

Im folgenden Diagramm sind die Oberflächenspannungen der Metalle und Gläser nach der Behandlung dargestellt:

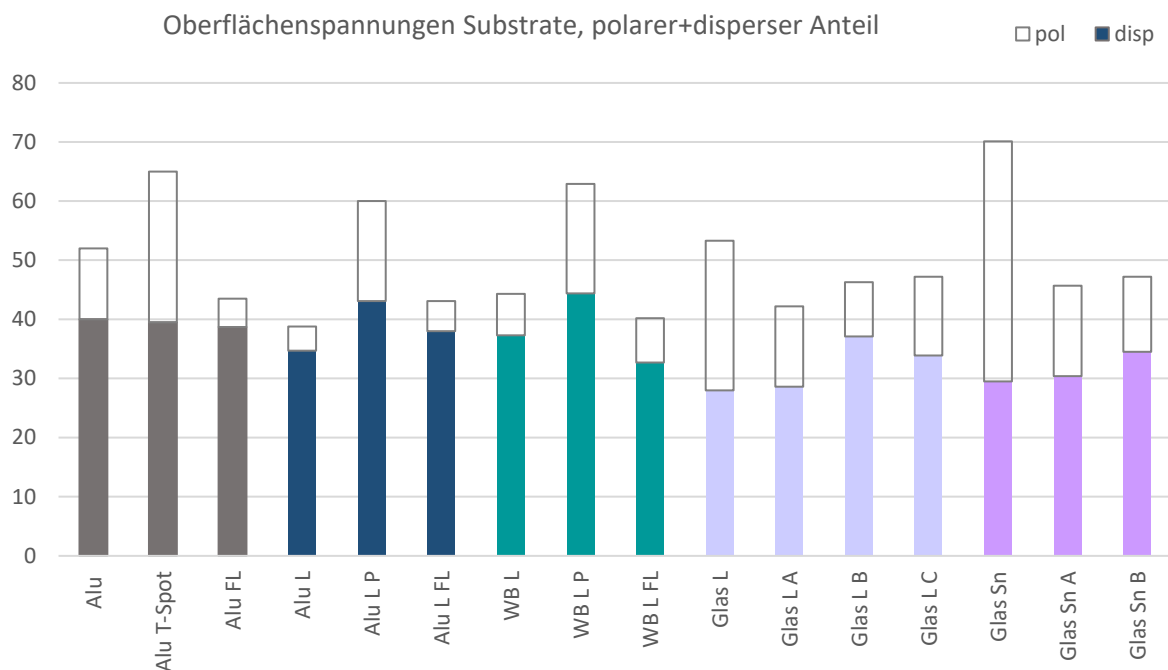


Abb. 12: Oberflächenspannungen der Metalle und Gläser nach der Vorbehandlung

Es wird deutlich, dass die Plasmabehandlung bei allen Metallen den polaren Anteil erhöht, während die Beflammung nur geringen Einfluss hat. Bei blankem Aluminium verringert die Beflammung sogar den polaren Anteil.

Beim Glas führt die Beschichtung auf beiden Seiten zu einer deutlichen Verringerung des polaren Anteils.

Die Darstellung der Charakterisierung in Wetting Envelopes ergibt folgendes Bild:

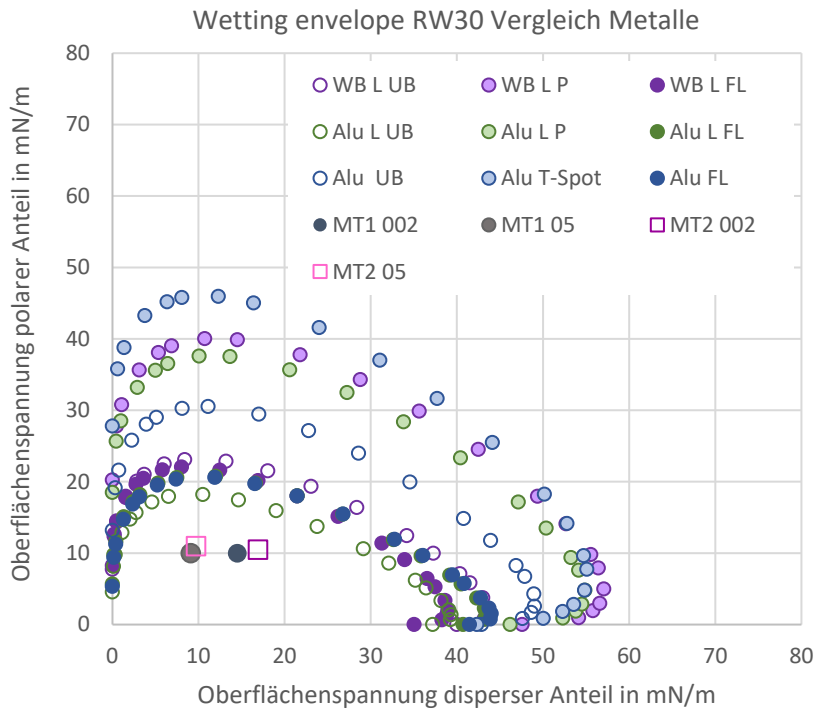


Abb. 13: Wetting Envelopes Metallsubstrate

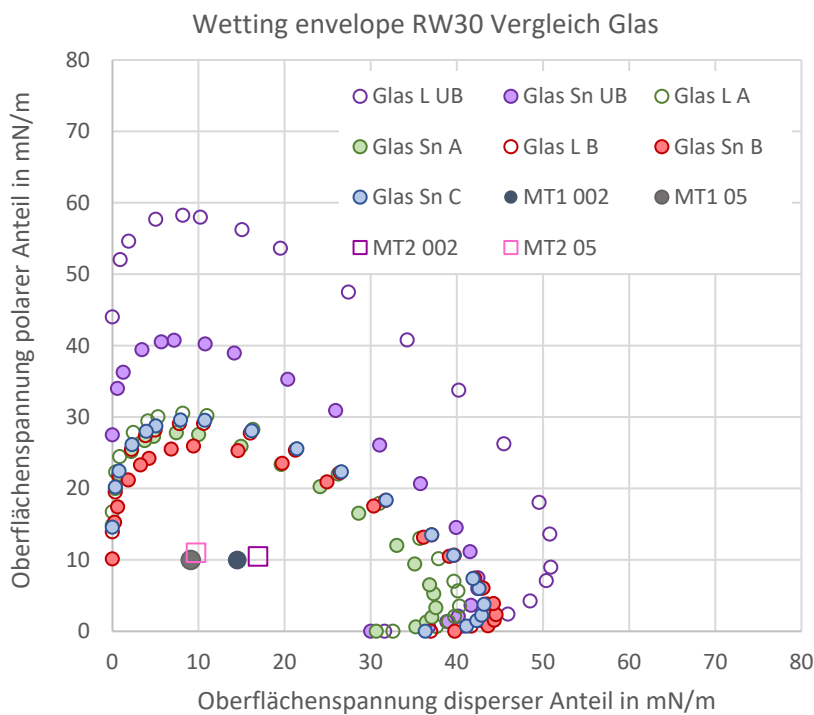


Abb. 14: Wetting Envelopes Glassubstrate

In den Wetting Envelopes lässt sich der Einfluss der Vorbehandlung deutlich erkennen. Allerdings wird auch deutlich, dass in viele Fällen die Vorbehandlung nicht zu einer besseren Benetzung führen wird, da die Kurven entweder weit außerhalb bezogen auf die

Koordinaten der Tinten liegen oder durch die Vorbehandlung der Wetting Envelope in einer Weise verändert wird, der für die Benetzung nicht relevant ist.

Zum Vergleich sind in der folgenden Abbildung die Wetting Envelopes für die Papiersubstrate dargestellt. Aus der Darstellung lässt sich eine gute Bedruckbarkeit dieser Substrate erwarten:

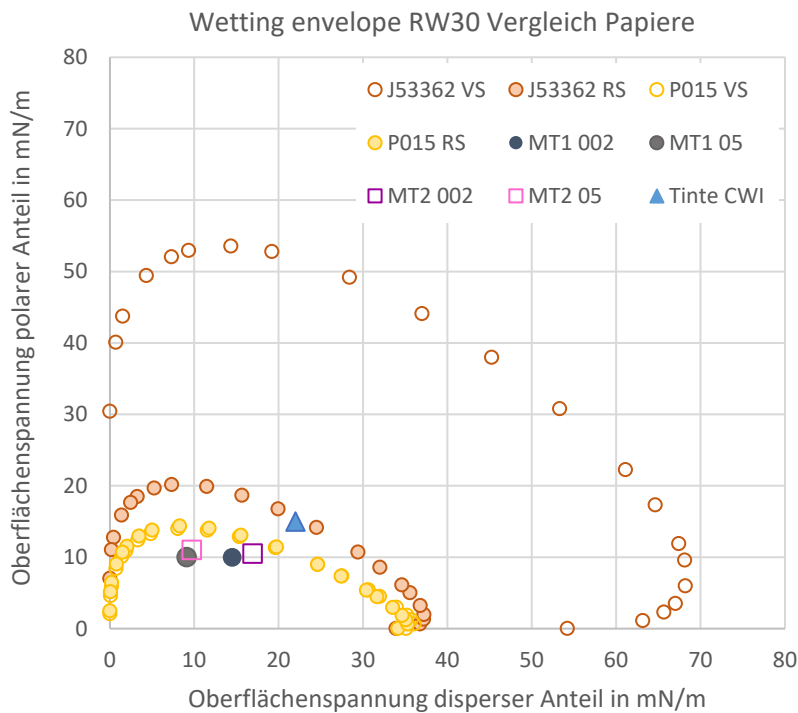


Abb. 15: Wetting Envelopes Papiersubstrate

3.4 AP 4: Untersuchungen zur Benetzbarkeit

▪ Durchgeführte Arbeiten

Es wurde geprüft, wie sich die Kombination der Eigenschaften seitens Bedruckstoff und Tinte auf die Benetzbarkeit auswirkt. Zu diesem Zweck wurden Aufnahmen mit einer HighSpeed-Kamera bei 100- bzw. 400-facher Vergrößerung durchgeführt. Die Bildaufnahme rate betrug 230.000, 150.000 bzw. 80.000 fps und es wurde mit einer Auflösung von 160x32, 160x48 bzw. 160x80 Pixeln gearbeitet.

Die zeitaufgelöste, visuelle und mikroskopische Betrachtung der unterschiedlichen Phasen des Druckprozesses ermöglichte die direkte Untersuchung der Tropfenbildung sowie des Aufpralls und der Ausbreitung des Tropfens auf dem Substrat. Tropfenvolumen und -geschwindigkeit bei den Druckversuchen wurden dabei nominal durch den Druckkopf bestimmt.

Die erzeugten Tropfen der Druckversuche werden als „mikroskopische Tropfen“ bezeichnet. Während der Druckversuche wurden kontinuierlich Tropfen erzeugt. Die minimale Tropfenrate ist 1 Tropfen/s und grenzte so den Beobachtungszeitraum für Aufprall und Ausbreitung eines einzelnen Tropfens ein.

Vergleichend wurden mit einer Spritze auch Einzeltropfen erzeugt, die aufgrund ihrer Dimension als „makroskopische Tropfen“ betrachtet wurden.

Es wurde der zeitliche Verlauf der Tropfenform über einen festgelegten Zeitabschnitt betrachtet und der Spreitungsfaktor, also die Änderung des Durchmessers der Tropfengrundfläche in Abhängigkeit der Zeit bestimmt.

▪ **Erzielte Ergebnisse**

3.4.1. Tropfenbildung

Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau der Aufnahmen zur Tropfenbildung am Druckkopf.

Unter einem Winkel von 45° wurden der Tropfenflug und das Schattenbild auf der Druckkopfoberfläche beobachtet. Glas- bzw. Plexiglasscheiben dienten dem Schutz von Kamera und Beleuchtung und sollte gleichzeitig UV-Anteil sowie die thermische Belastung der zur Bildaufnahme notwendigen Beleuchtung reduzieren.

Zur Erzeugung geeigneter Tropfen wurden die Druckkopfparameter variiert. Als geeignete Tropfen werden solche bezeichnet, bei denen es zu einer schnellen Tropfenausbildung nach Ausstoß der Tinte aus dem Druckkopf; ohne Bildung zusätzlicher kleinerer Tropfen (Satelliten) kommt.

Folgende Parameter wurden dabei am Druckkopf variiert:

Heater: off / 37°

Treiberspannung der Piezoelemente des Druckkopfes: 22V / 15V / 13,5V

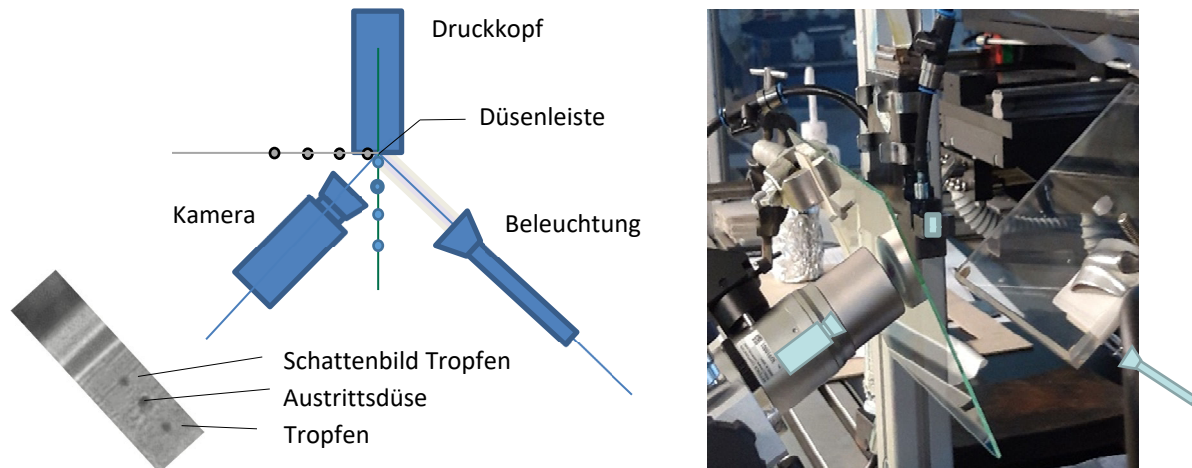
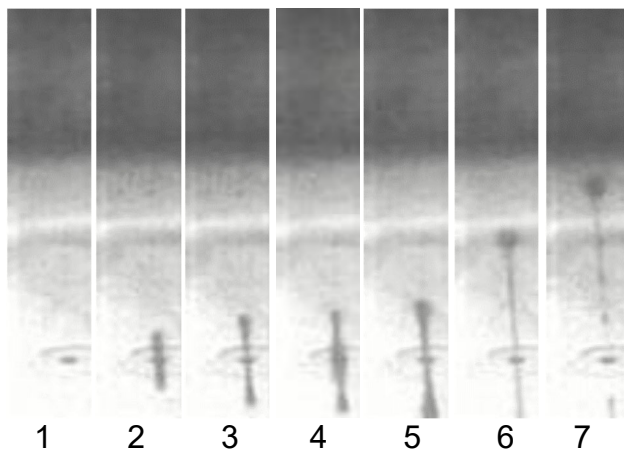


Abb. 16: Versuchsaufbau zur Aufnahme der Tropfenbildung

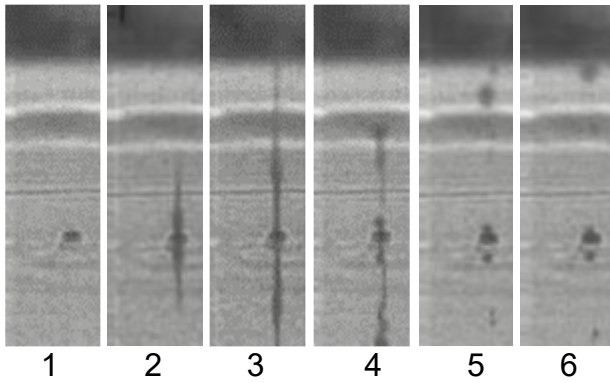
Die folgende Abbildung stellt die Tropfenbildung unter dem Einfluss der Druckkopfparameter und dem Anteil des Additivs zur Modelltinte MT1 dar. Ohne Additiv (MT1) konnte die Tinte aufgrund ihrer hohen Oberflächenspannung im Bereich der variierbaren Druckkopfparameter nicht verdruckt werden. Die Modelltinte MT2 führte unter den besonderen Einsatzbedingungen des Druckkopfes zu Verstopfung der Düsen und wurde hier nicht weiter betrachtet.

Fall a) Additiv: 0,5 Vol.-% (MT1 05)
 Druckkopf: 15 V; Heizer: off
 Kamera: Vergrößerung: 100-fach;
 Bildrate: 230.000 fps; Auflösung: 160x32



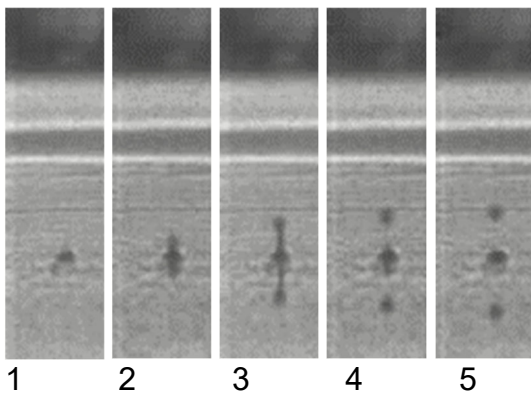
- 1 Düsenöffnung
- 2 Ausstoß der Tinte (t_0)
- 3 Tropfenbildung mit Schweif ($\Delta t=9\mu s$)
- 4 Ausstoß von Tinte am Düsenrand ($\Delta t=13\mu s$)
- 5 Tropfenbildung mit Schweif ($\Delta t=27\mu s$)
- 6 Schweifauflösung ($\Delta t=48\mu s$)
- 7 Bildung mehrerer Satelliten ($\Delta t=70\mu s$)

Fall b) Additiv: 0,02 Vol.-% (MT1 002)
 Druckkopf: 22 V; Heizer: off
 Kamera: Vergrößerung: 100-fach;
 Bildrate: 150.000 fps; Auflösung: 160x48



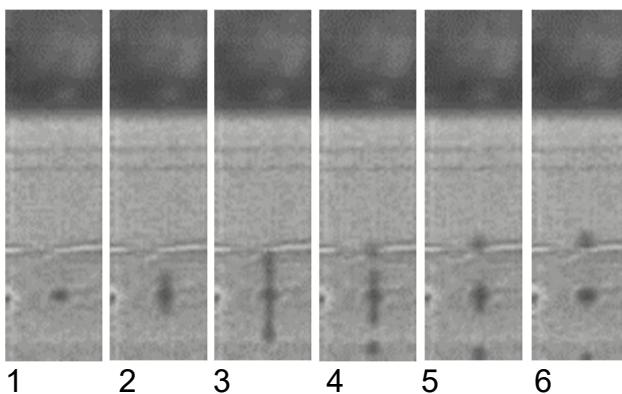
- 1 Düsenöffnung
- 2 Ausstoß der Tinte (t_0)
Tinte schießt dem „Tropfen“ voraus
- 3 Tropfenbildung mit Schweif ($\Delta t=26\mu s$)
- 4 Schweifauflösung ($\Delta t=46\mu s$)
- 5 Bildung mehrerer Satelliten ($\Delta t=59\mu s$)
- 6 Tropfen + freifliegende Satelliten ($\Delta t=72\mu s$)

Fall c) Additiv: 0,02 Vol.-% (MT1 002)
 Druckkopf: 15 V; Heizer: off
 Kamera: Vergrößerung: 100-fach;
 Bildrate: 150.000 fps; Auflösung: 160x48



- 1 Düsenöffnung
- 2 Ausstoß der Tinte (t_0)
- 3 Tropfenbildung mit Schweif ($\Delta t=33\mu s$)
- 4 Schweifrückzug in Düse ($\Delta t=53\mu s$)
- 5 Tropfen ($\Delta t=59\mu s$)

Fall d) Additiv: 0,02 Vol.-% (MT 002)
 Druckkopf: 15 V; Heizer: 37°C
 Kamera: Vergrößerung: 100-fach;
 Bildrate: 150.000 fps; Auflösung: 160x48



- 1 Düsenöffnung
- 2 Ausstoß der Tinte (t_0)
- 3 Tropfenbildung mit Schweif ($\Delta t=26\mu s$)
- 4 Schweifrückzug in Düse ($\Delta t=52\mu s$)
- 5 Schweifrückzug in die Düse ($\Delta t=65\mu s$)
- 6 Tropfen ($\Delta t=78\mu s$)

Abb. 17: Einfluss der Druckkopfparameter und des Anteils Additiv auf die Tropfenbildung

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Druckkopfeinstellungen als auch die Oberflächenspannung der Tinte Einfluss auf die Tropfenbildung haben. Es lassen sich bei den gewählten Parametern deutliche Unterschiede hinsichtlich Schweif- und Satellitenbildung beobachten.

Der Einfluss der Treiberspannung der Piezoelemente wird in der folgenden Abbildung verdeutlicht. Der Additivgehalt der Modelltinte MT1 von 0,02 Vol.-% (MT1 002) und die Einstellung der Druckkopfeheizung (off) wurden konstant gehalten.

Der lange Schweif der mit hoher Piezospansung (22V) schnell ausgestoßenen Tinte (ca. 3-fach höhere Ausstoßgeschwindigkeit im Vergleich zur Piezospansung 15V) zerfällt. Neben dem resultierenden kleineren Haupttropfen entstehen mehrere Satelliten. Der kurze Schweif des Tintenausstoßes mit einer Piezospansung von 15V löst sich schnell vom sich bildenden Tropfen und zieht sich ohne Satelliten zurück in den Druckkopf.

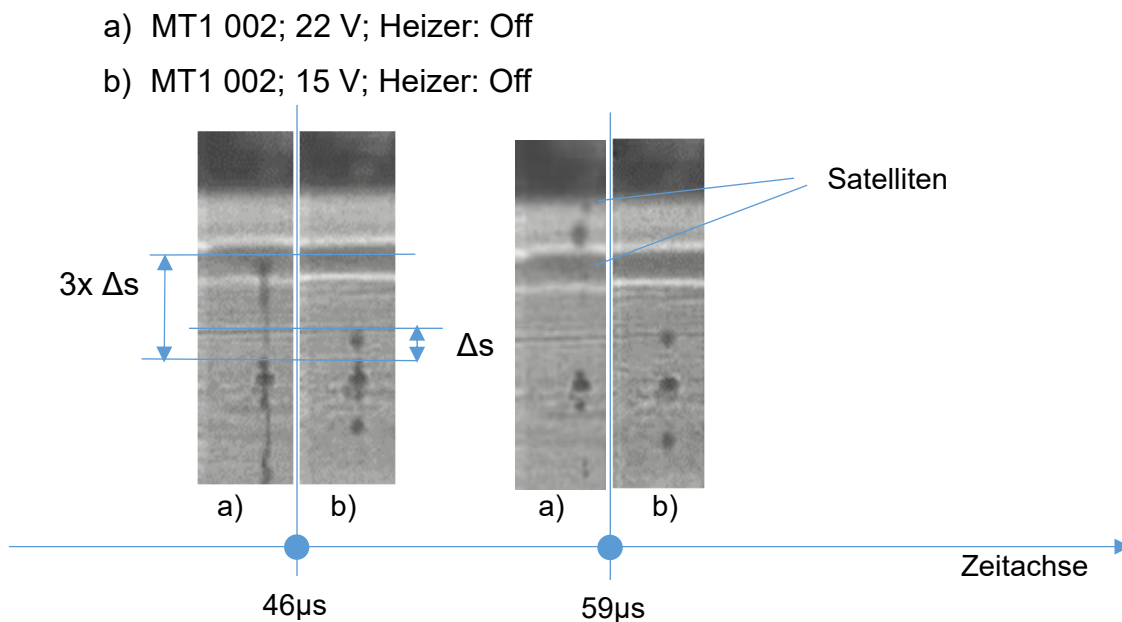


Abb. 18: Verlauf der Tropfenbildung unter dem Einfluss der Treiberspannung der Piezoelemente

In der folgenden Abbildung wird der Einfluss der Druckkopftemperatur verdeutlicht. Der Additivgehalt der Testtinte MT1 (0,02 Vol.-%) und die Treiberspannung der Piezoelemente (15V) wurden konstant gehalten.

Der erwartete Einfluss durch die temperaturbedingte Viskositätsverringerung auf Satellitenbildung, Tropfengröße und -geschwindigkeit stellt sich als gering heraus.

Unberücksichtigt bleibt hier die externe Erwärmung durch die notwendige intensive Beleuchtung auch unter den Bedingungen bei ausgeschaltetem Heater.

- a) MT1 002; 15 V; Heizer: Off
b) MT1 002; 15 V; Heizer: 37°C

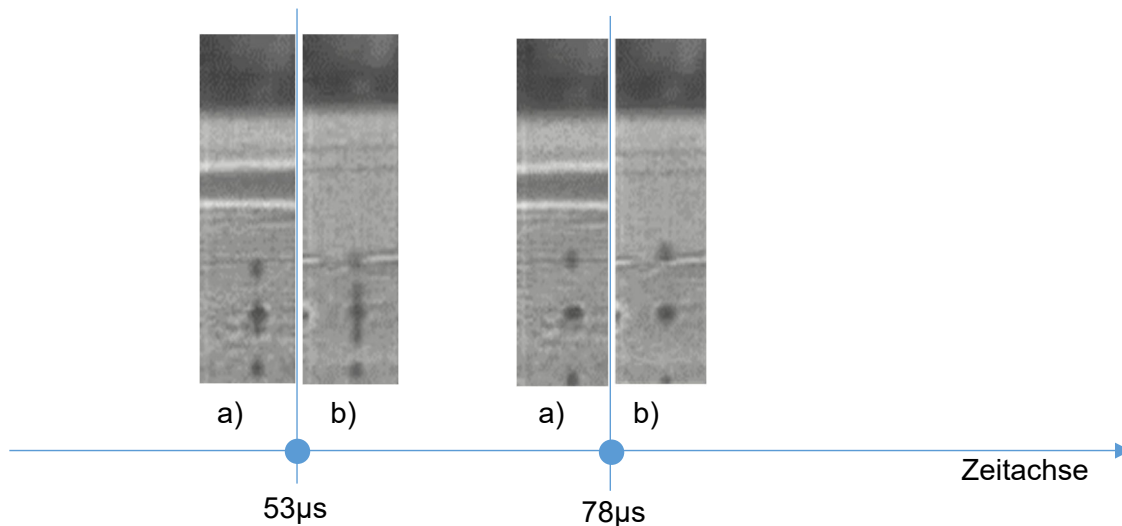


Abb. 19: Verlauf der Tropfenbildung unter dem Einfluss der Temperierung der Piezoelemente

Die folgende Abbildung zeigt die Tropfenbildung unter dem Einfluss der Oberflächenspannung der Tinte. Die Treiberspannung der Piezoelemente (15V) und die Einstellung der Druckkopfheizung (off) wurden hier konstant gehalten.

Die höhere Oberflächenspannung der Tinte MT1 mit einem Additivgehalt von 0,02 Vol.-% beschleunigte die Bildung eines Tropfens, verminderte jedoch die Ausstoßgeschwindigkeit der Tinte. Durch den schnellen Rückzug des Schweißs in den Druckkopf wird die Satellitenbildung reduziert. Man erkennt, dass mittlere Piezospannungen und höhere Oberflächenspannungen der Tinte eine schnelle Tropfenbildung befördern.

- a) MT1 05; 15 V; Heizer: Off
- b) MT1 002; 15 V; Heizer: Off

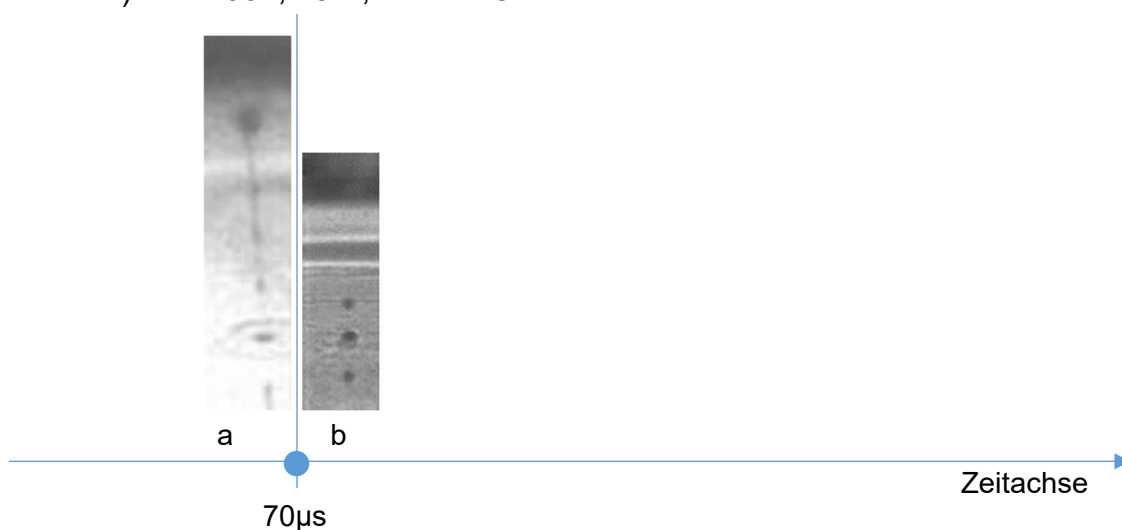


Abb. 20: Verlauf der Tropfenbildung unter dem Einfluss der Oberflächenspannung der Tinte

Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Versuchsaufbau für die horizontale Aufnahme. Die Aufnahmen entsprechen im Gleichgewicht den Betrachtungen am liegenden

Tropfen. Bei der Aufnahme makroskopischer Tropfen wurde der Druckkopf durch eine Spritze ersetzt. Darunter wird der Versuchsaufbau einer rückseitigen Aufnahme dargestellt. Diese Aufnahmetechnik war jedoch bei lichtundurchlässigen Substraten und den Druckversuchen innerhalb des Inkjetdrucksystems aus Platzgründen nicht möglich. Die ermittelten Druckkopfparameter mussten zur Erzeugung geeigneter Tropfen bei der Untersuchung von Tropfenaufprall und -ausbreitung den Bedingungen der veränderten Versuchsaufbauten (insbesondere unter den Bedingungen der Beleuchtung) geringfügig angepasst werden:

Heater: 30°C

Betriebsspannung der Piezoelemente: 12,4V

Tropfenrate: 1Tropfen/s

Diese Aufnahmen des High-Speed-Digitalmikroskops erfolgten mit 400-facher Vergrößerung bei Bildraten von 150.000fps bzw. 80.000fps mit einer Auflösung von 160x48 Pixel bzw. 160x80 Pixel.

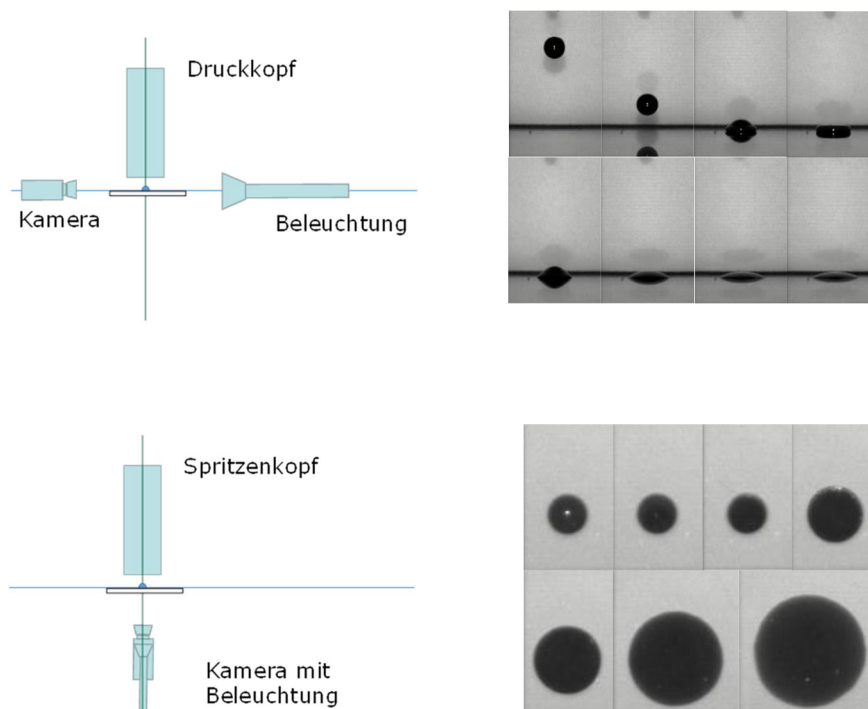


Abb. 21: Versuchsaufbau horizontale Aufnahme/ rückseitige Aufnahme

Die Ermittlung des Tropfenvolumens und der -geschwindigkeit erfolgte durch die Überlagerung einzelner Standbilder des Tropfenfluges, an denen die Tropfendurchmesser D , der Tropfenabstand Δs und das Bildintervall Δt ermittelt wurde.

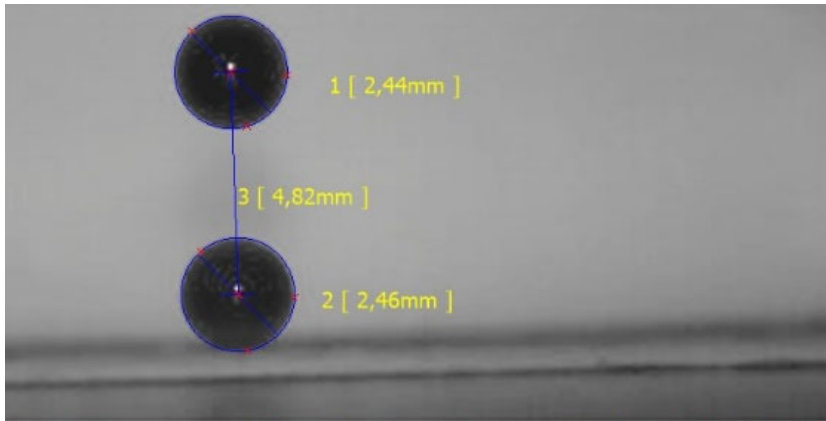


Abb. 22: Tropfenflug

Die folgende Abbildung stellt die Verteilungsfunktion der ermittelten Tropfenvolumen dar.

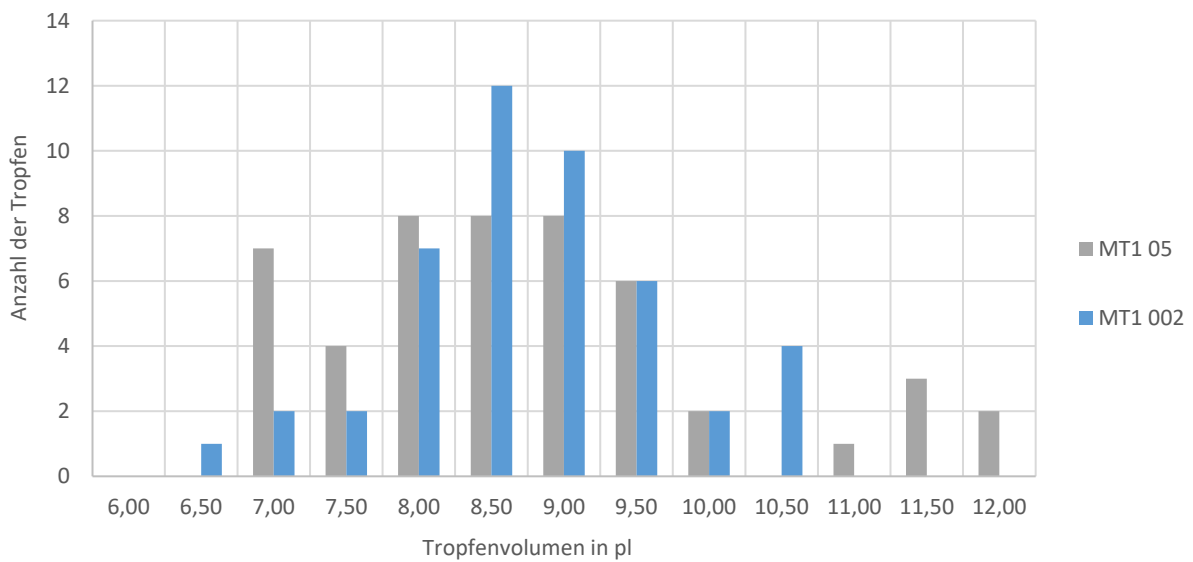


Abb. 23: Tropfenvolumen von Modelltinten

3.4.2. Tropfenausbreitung

Zur Charakterisierung der Benetzung wurden an Standbildern die Dimensionen (Tropfendurchmesser $D(t)$, Randwinkel $\theta(t)$) liegender Tropfen zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt.

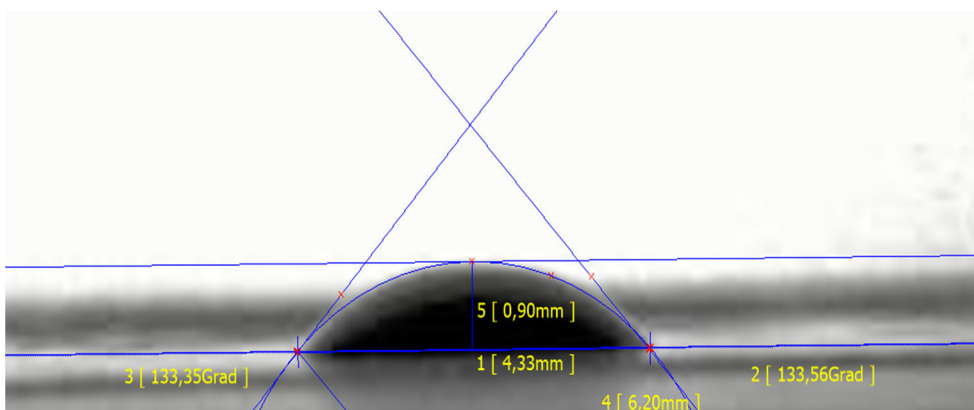


Abb. 24: Dimensionen der horizontalen Aufnahme

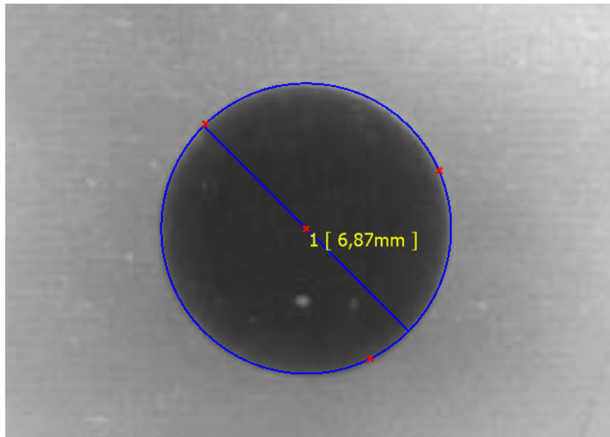


Abb. 25: Dimensionen der rückseitigen Aufnahme

Für die Volumenbestimmung des liegenden Tropfens und indirekten Randwinkelbestimmung wurden im Projektverlauf weitere Messgrößen (Durchmesser der scheinbaren Kugel des sichtbaren Segmentes $DS(t)$, Höhe $hS(t)$ des Kugelsegmentes) ergänzt:
Der typische Verlauf der Benetzung der Oberfläche durch einen Tropfen wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

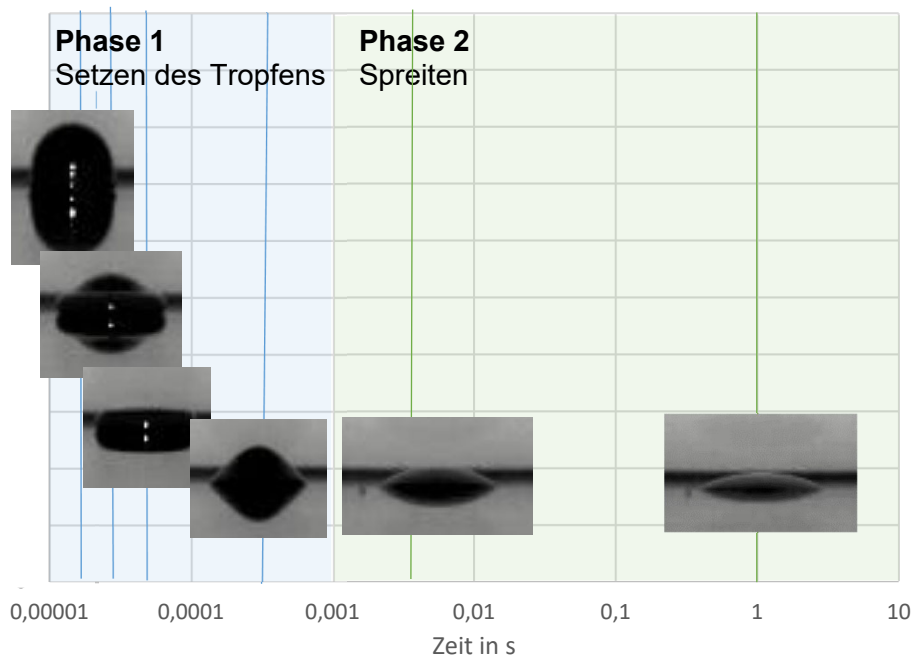


Abb. 26: Phaseneinteilung der Tropfenausbreitung

Es zeigte sich, dass die Benetzung der Substratoberfläche in 2 Phasen eingeteilt werden kann.

Phase 1 („Setzen des Tropfens“):

Die Geschwindigkeit der sich horizontal ausbreitenden Flüssigkeit überschreitet die Benetzungsgeschwindigkeit, es kommt zur Ausbildung einer dünnen Lamella. (Lamella-Phase)

Phase 2 (Spreiten des "liegenden" Tropfen)

Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit bestimmen die Ausbreitung. Die Ausbreitung hängt von der Benetzungsfähigkeit des Substrates ab. /24/

Der Tropfendurchmesser D_0 direkt nach dem „Setzen des Tropfens“ bildet den Startpunkt der viskositäts- und oberflächenspannungsgetriebenen Ausbreitung und wurde als Basis für eine Normierung gewählt. Diese Form der Betrachtung sollte es ermöglichen, den Ausbreitungsprozess auch unterschiedlich großer Tropfen und Auftreffgeschwindigkeiten vergleichen zu können. Da D_0 nicht direkt bestimmbar ist, wurde für die Prozesse ein Zeitpunkt zur Ermittlung D_0 festgelegt.

mikroskopischer Tropfen $D_0 = D(\text{ca. } 0,0001 \text{ s})$

makroskopischer Tropfen $D_0 = D(\text{ca. } 0,01 \text{ s})$

Die Bildrate begrenzte hier zusätzlich die erforderliche Zeitaufösung auf diskrete Zeiten.

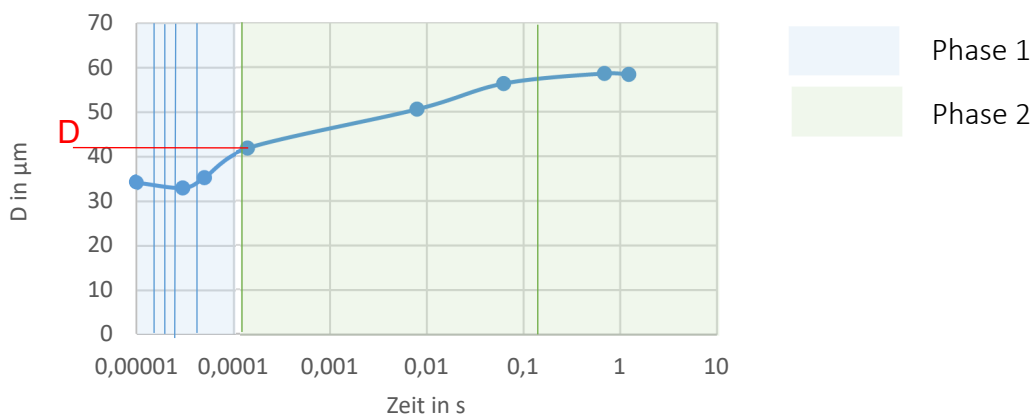


Abb. 27: Phasen der Ausbreitung des Tropfendurchmessers $D = f(t)$

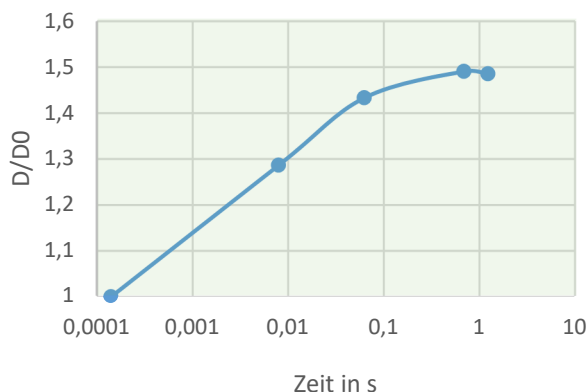


Abb. 28: Normierter Tropfendurchmesser $D/D_0 = f(t)$

Anmerkung: Die ermittelten Ausbreitungskurven sind Ansichten eines bestimmten Blickwinkels auf den Tropfen. Interpretation und Vergleich der Ausbreitungskurven bedürfen

der vollständigen Betrachtung des Gesamtprozesses. So kann eine geneigte Ausbreitungsebene ebenso wie eine gerichtete Oberflächenstruktur zu starken Abweichungen von der erwarteten kreisrunden Form des Tropfens führen.

Zunehmend störend auf die Tropfenausbreitung wirkt sich bei vollständig spreitenden Tinten aber auch mit dem dünner werdenden Flüssigkeitsfilm die Rauigkeit des Substrates aus. Das Spreiten wird durch die Verdunstung der Flüssigkeit gestoppt oder durch Unebenheiten behindert. /14/.

In den nachfolgenden Abbildungen wurde der zeitliche Verlauf der Tropfendurchmesser und zugehörige Randwinkel verschiedener Modelltinten auf den **Ausgangsmaterialien** dargestellt. Die bisherige Einteilung der Materialklassen in Kunststoffe, Metalle, Glas und Papier wurde beibehalten.

3.4.3. Zeitlicher Verlauf Kunststoffsubstrate

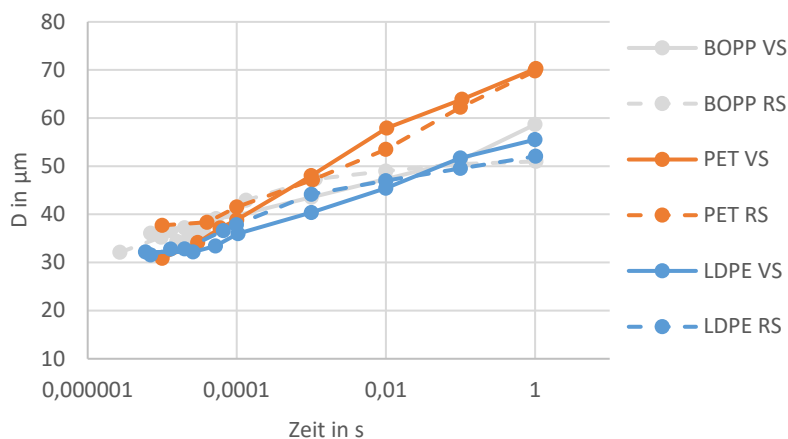


Abb. 29: Änderung des Tropfendurchmessers mikroskopischer Tropfen MT1 0,02 $D = f(t)$ auf Kunststoffen

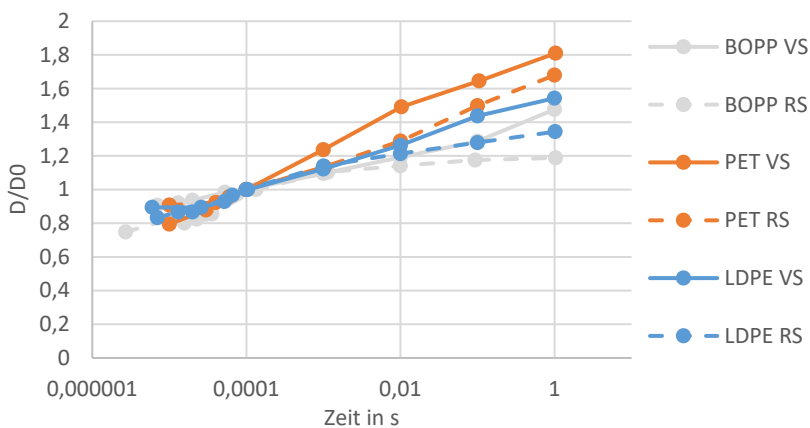


Abb. 30: Änderung des normierten Tropfendurchmesser mikroskopischer Tropfen MT1 0,02 $D/D_0 = f(t)$ auf Kunststoffen

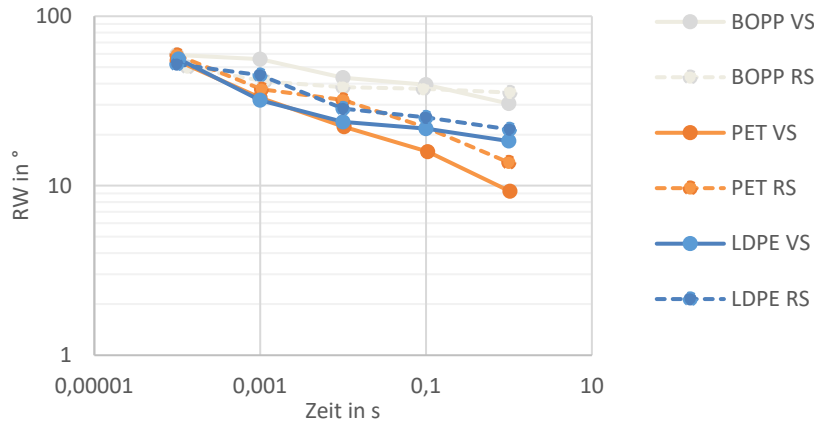


Abb. 31: Zeitabhängige Randwinkel mikroskopischer Tropfen MT1 0,02 RW = f(t) auf Kunststoffen

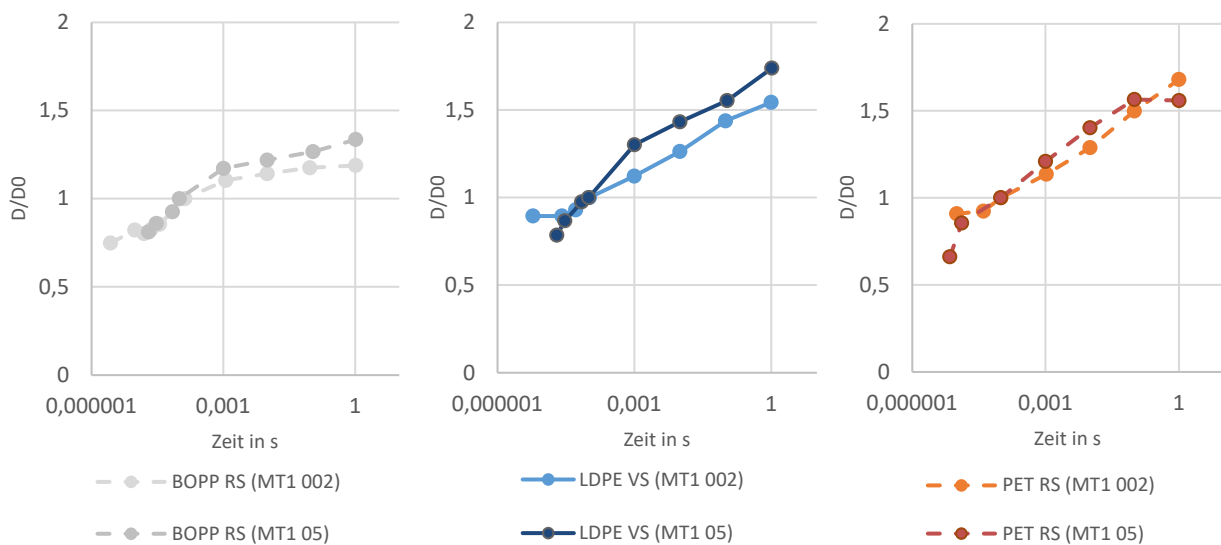


Abb. 32: Einfluss der Additivkonzentration auf den normierten Tropfendurchmesser mikroskopischer Tropfen MT1 $D/D_0 = f(t)$ auf BOPP, LDPE, PET

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Tinte MT1 05 auf den vorbehandelten Substraten ist beispielhaft für BOPP im folgenden Diagramm dargestellt.

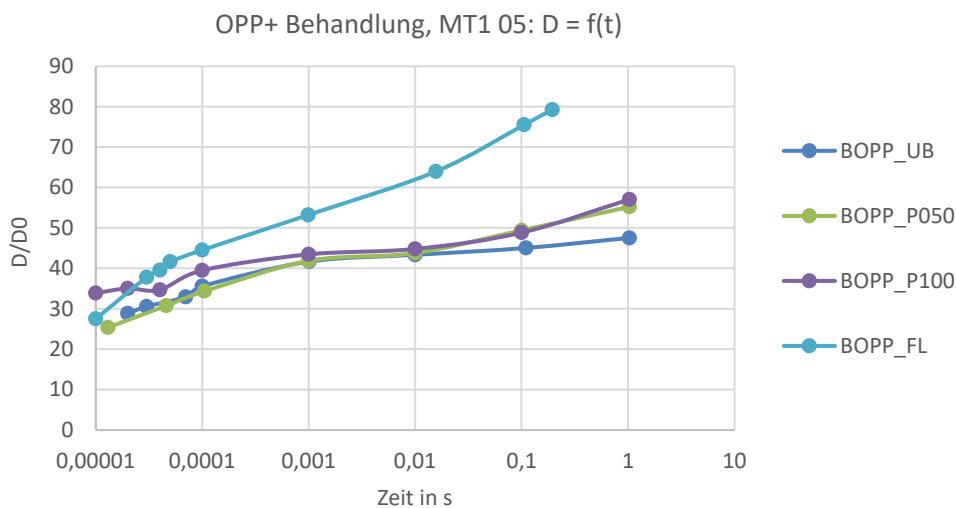


Abb. 33: Vergleich der Spreitungsphasen bei verschiedenen vorbehandelten BOPP-Substraten

Dabei wird deutlich, dass sich die unterschiedlichen Vorbehandlungen entsprechend der erzielten Oberflächenspannungen auf die Spreitungsphasen auswirken.

Bei PET zeigt sich ein ähnliches Ergebnis, alle Vorbehandlungen fördern das Spreiten der Tinte mit 0,5 % Additivgehalt auf dem Substrat. Bei beflamten PET zeigt sich allerdings nach 0,1 s ein Abflachen der Kurve, was auf das Erreichen eines Gleichgewichtszustands hinweist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Vorbehandlungen der Substrate und der Additivzusatz in der Tinte die erwarteten Auswirkungen zeigen. Dabei ist zu unterscheiden, dass durch Beflammen die Ausbreitungsneigung der Tinte auf allen Substraten erhöht wird, während Plasmabehandlungen nur bei LDPE und PET zu einem ausgeprägteren Spreiten führen. Unterschiedliche Intensitäten der Plasmabehandlung führten bei allen Substraten zu nahezu gleichen Ergebnissen. Dies wird durch die Messungen der Oberflächenspannungen in AP 3 bestätigt.

Eine verbesserte zeitliche und räumliche Auflösung versprach die Betrachtung makroskopischer Tropfen. Die folgenden Abbildungen stellen die Ergebnisse der Tropfenausbreitung vergleichend gegenüber.

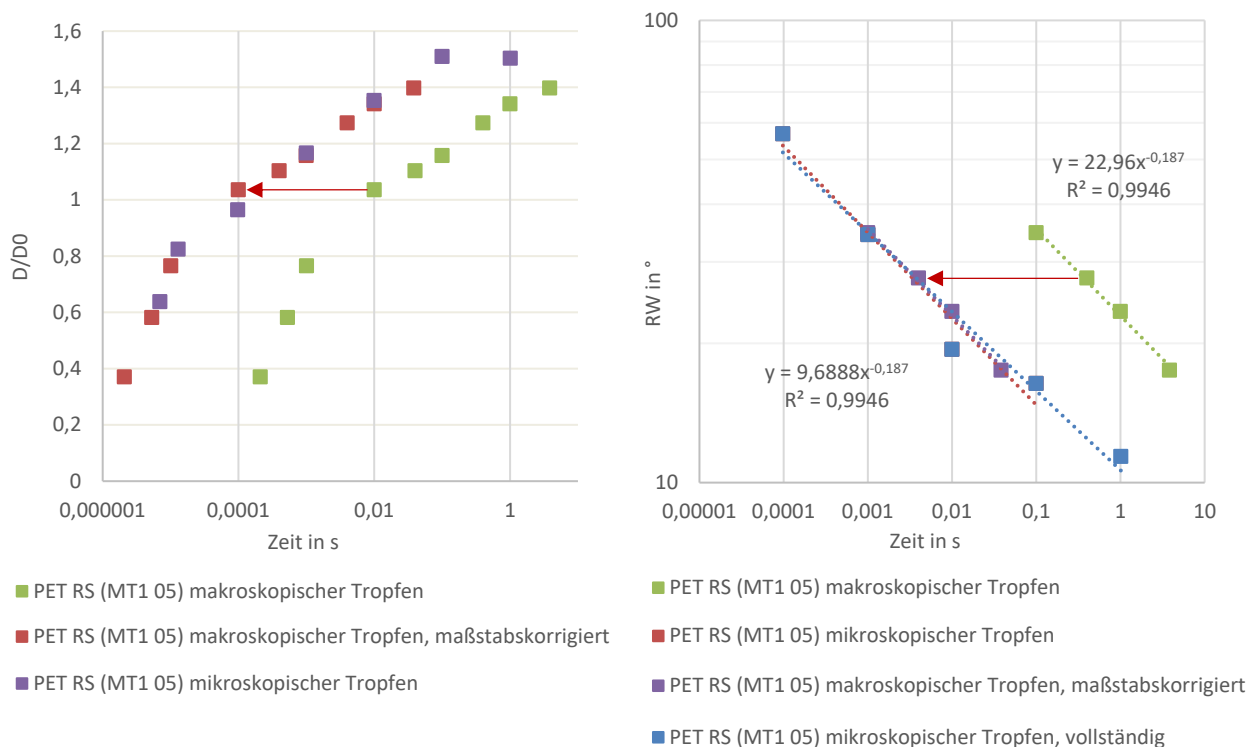


Abb. 34: Änderung des normierten Tropfendurchmesser und zeitabhängige Randwinkel des mikroskopischen und makroskopischen Tropfens MT1 05 $D = f(t)$ auf PET

Die Betrachtung realer Tropfendurchmesser lieferte für die Kunststoffe ein überlagertes, breiteres Spektrum von Messkurven, was eine vergleichende Interpretation mit Absolutwerten erschwert. Die Normierung D/D_0 schaffte diesbezüglich Abhilfe.

Die Ausbreitungskurven spiegeln im Beobachtungszeitraum bei vergleichbaren Verhältnissen einer Modelltinte (MT1 002) deutlich den erwarteten Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenenergie der Substrate (28-58 mN/m) wider. Ebenso wird der Oberflächenenergie erhöhende Einfluss der Vorbehandlung deutlich und führt stets zu schnellerem Spreiten.

Die Darstellung der Randwinkel $RW = f(t)$ in doppellogarithmischer Form führte bei erwartetem Spreiten der Tinte in guter Näherung zu linearen Verhältnissen, was wiederum mit einer Potenzfunktion gut angepasst werden konnte. Die deutliche Abweichung von einer Gerade bei BOPP RS weist darauf hin, dass es bei dieser Materialkombination nicht zum Spreiten kommt. Die Randwinkel BOPP RS streben einem Gleichgewichtswert zu. Nach 1,03s wird ein Randwinkel von ca. 35° erreicht, was gut den Erwartungen des Wetting Envelopes (berechneter $RW = 34,7^\circ$) entspricht.

Der Einfluss der Tinte auf das Spreiten stellt sich eindeutig dar, entsprechend der Variationsbreite (variierte Oberflächenspannung von 27,4 -20,7 mN/m) fällt dieser hier scheinbar geringer aus. Die geringere Oberflächenspannung der Tinte führt zu schnellerem Spreiten. Makroskopische Tropfen zeigen – wie am Beispiel PET RS (MT1 05) nachgewiesen – sehr ähnliches Verhalten. Aufgrund der besseren Auflösung der Tropfen und des vergrößerten Zeitmaßstabes konnten die Dimensionen der Tropfenausbreitung exakter ermittelt werden. Der mikroskopische Tropfen durchläuft im Zeitmaßstab eine längere Ausbreitung und unterliegt insbesondere bei kleinen Randwinkeln stärkeren Störungen, was auch zu Differenzen bei den Ergebnissen mikroskopischer und makroskopischer Betrachtung führen kann.

3.4.4. Zeitlicher Verlauf Metallsubstrate

Die folgenden Abbildungen zeigen die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen $D/D_0 = f(t)$ sowie zugehörige Randwinkel $RW = f(t)$ der Modelltinte 2 mit einer Additivkonzentration von 0,5 Vol.-%. (MT2 05) auf den metallischen Substraten.

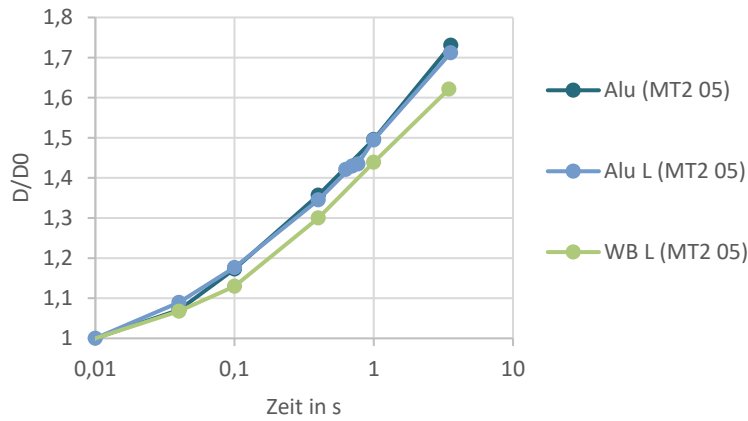


Abb. 35: Änderung des normierten Tropfendurchmesser makroskopischer Tropfen MT2 05 $D/D_0 = f(t)$ auf Metallen

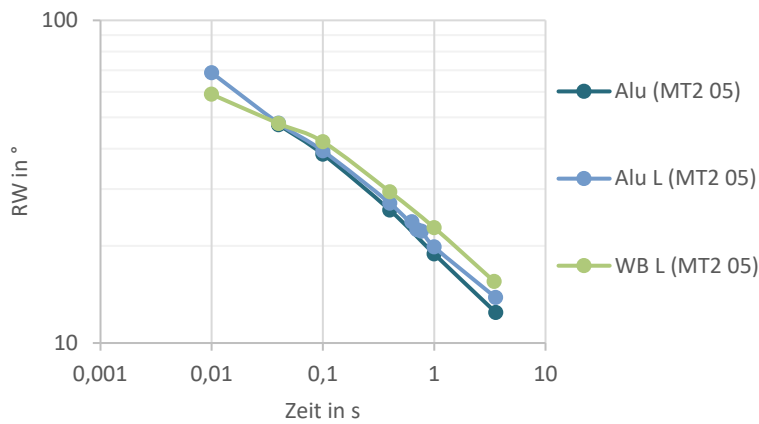


Abb. 36: Zeitabhängige Randwinkel makroskopischer Tropfen MT2 0,5 $RW = f(t)$ auf Metallen

Der Einfluss der Tinte wird am Beispiel des lackierten Aluminiums (Alu L) dargestellt:

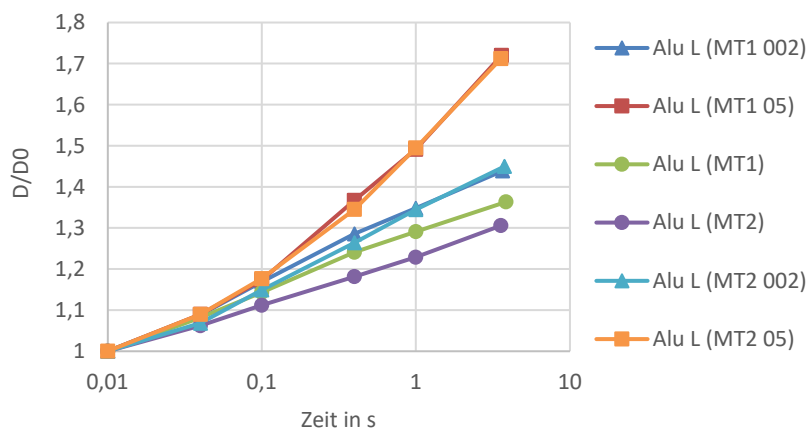


Abb. 37: Einfluss von Tinte und Additivkonzentration auf den normierten Tropfendurchmesser makroskopischer Tropfen $D/D_0 = f(t)$ auf Alu L

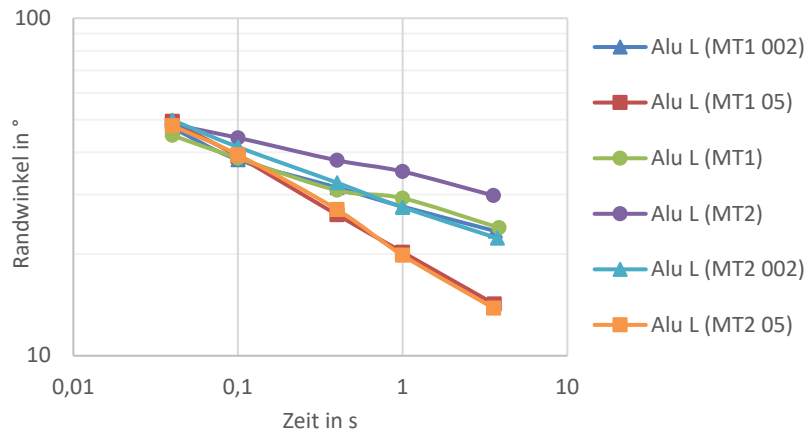


Abb. 38: Einfluss von Tinte und Additivkonzentration auf die zeitabhängigen Randwinkel makroskopischer Tropfen $RW = f(t)$ auf Alu L

Für die Metalle als Drucksubstrat lässt sich zusammenfassen, dass die Ausbreitungskurven im Beobachtungszeitraum Unterschiede hinsichtlich der Additivkonzentration der Tinte, aber nicht hinsichtlich der Oberflächenspannung der Substrate widerspiegeln.

3.4.5. Zeitlicher Verlauf Glassubstrate

Die folgenden Abbildungen zeigen die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen $D/D_0 = f(t)$ sowie zugehörige Randwinkel $RW = f(t)$ der Modelltinte MT1 mit einer Additivkonzentration von 0,5 Vol.-%. (MT1 05) auf beiden Seiten des Floatglases.

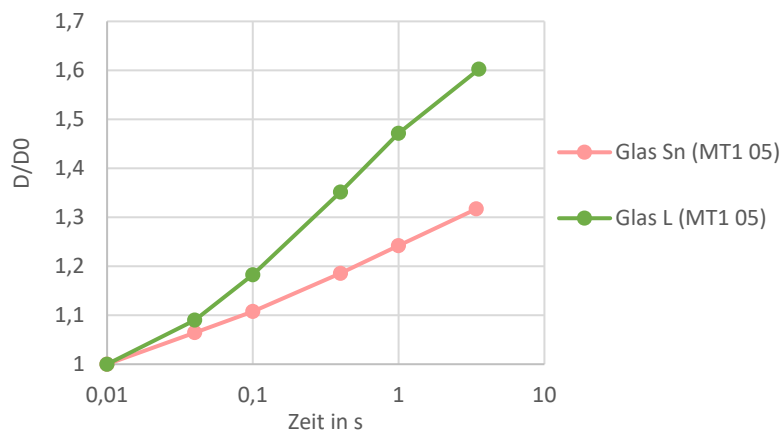


Abb. 39: Änderung des normierten Tropfendurchmesser makroskopischer Tropfen MT1 05 $D/D_0 = f(t)$ auf Floatglas

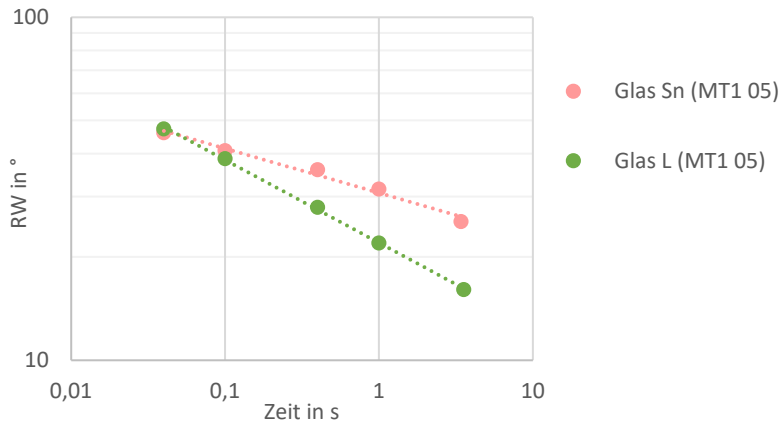


Abb. 40: Zeitabhängige Randwinkel makroskopischer Tropfen MT1 05 $RW = f(t)$ auf Floatglas

Der Einfluss unterschiedlicher Additivkonzentrationen wird am Beispiel Glas Luftseite dargestellt:

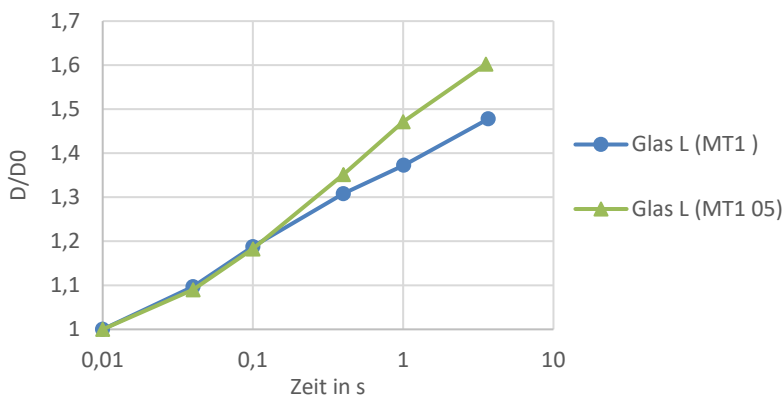


Abb. 41: Einfluss der Additivkonzentration auf den normierten Tropfendurchmesser makroskopischer Tropfen MT1 $D/D_0=f(t)$ auf Glas Luftseite

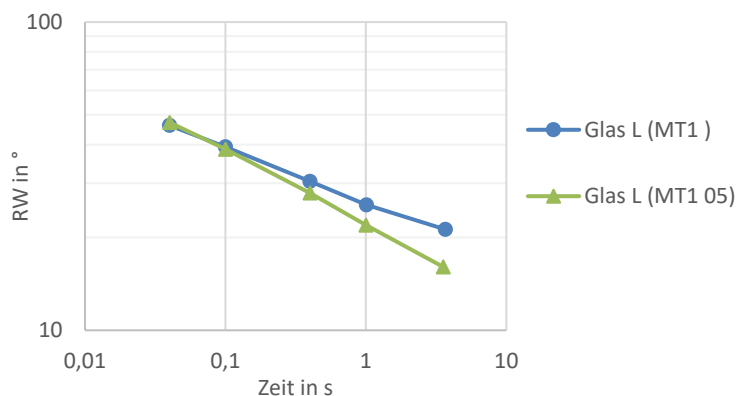


Abb. 42: Einfluss der Additivkonzentration auf die zeitabhängigen Randwinkel makroskopischer Tropfen MT1 $RW = f(t)$ auf Glas Luftseite

Bei Glas als Substrat zeigt sich ein deutlicher Einfluss sowohl hinsichtlich der Oberflächenspannung des Substrats als auch hinsichtlich der Additivkonzentration der Tinte auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Tropfen.

3.4.6. Zeitlicher Verlauf Papiersubstrate

Bei Charakterisierung der Papiere waren die Besonderheiten saugender Materialien zu berücksichtigen. Betrachtet man den liegenden Tropfen auf der Oberfläche gilt nun nicht $V = \text{konst.}$ sondern $V = f(t)$. Ein Teil des Tropfenvolumens dringt in das Substrat ein und trägt nicht zur Tropfenausbreitung auf der Oberfläche bei. Die Papiere wurden mit Modelltinte MT2 unterschiedlicher Additivkonzentrationen und vergleichend mit einer wasserbasierten Tinte wBlau untersucht.

Zur Bestimmung des Tropfenvolumens auf der Oberfläche wurden Verhältnisse ähnlich einem Kugelsegment angenommen. Die spätere Normierung erfolgte mit dem aus dem Tropfenflug ermittelten Volumen. Die folgenden Abbildungen zeigen die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen auf Papieren, die ermittelte Volumenänderung des Tropfens auf der Oberfläche und zugehörigen Randwinkel.

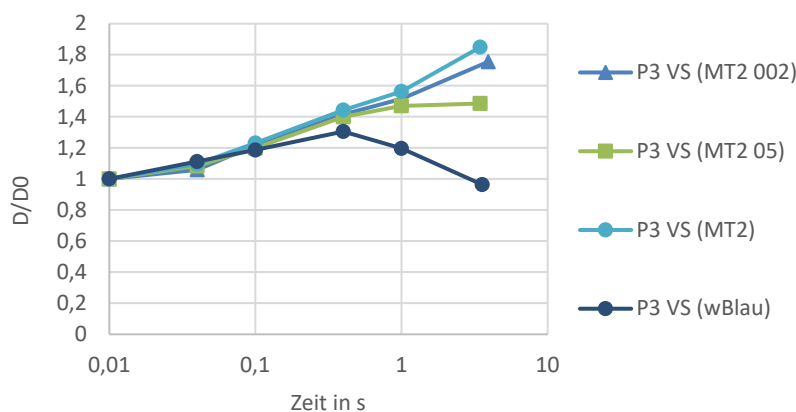


Abb. 43: Einfluss des Additivgehaltes auf die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen MT2 $D/D_0 = f(t)$ auf P03 VS

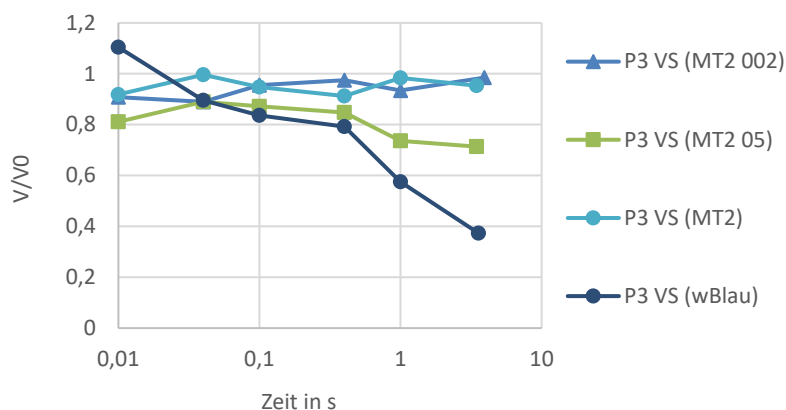


Abb. 44: Einfluss der Additivkonzentration auf das relative Tropfenvolumen makroskopischer Tropfen MT2 $V/V_0 = f(t)$ auf P03 VS

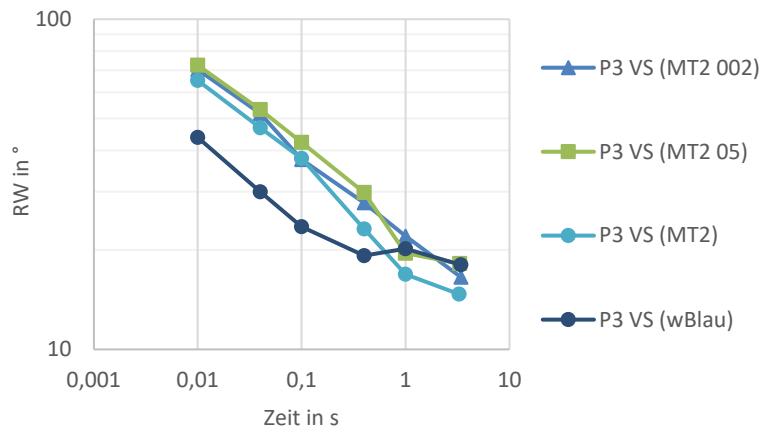


Abb. 45: Einfluss der Additivkonzentration auf die zeitabhängigen Randwinkel makroskopischer Tropfen $MT2RW = f(t)$ auf P03 VS

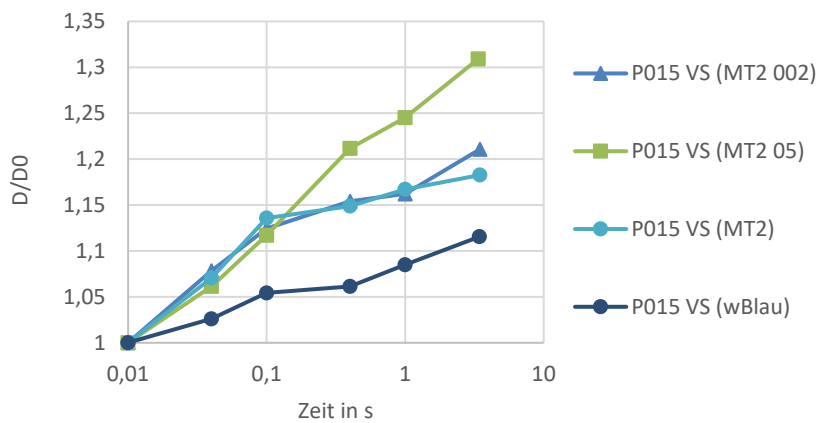


Abb. 46: Einfluss des Additivgehaltes auf die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen $MT2 D/D0 = f(t)$ auf P015 VS

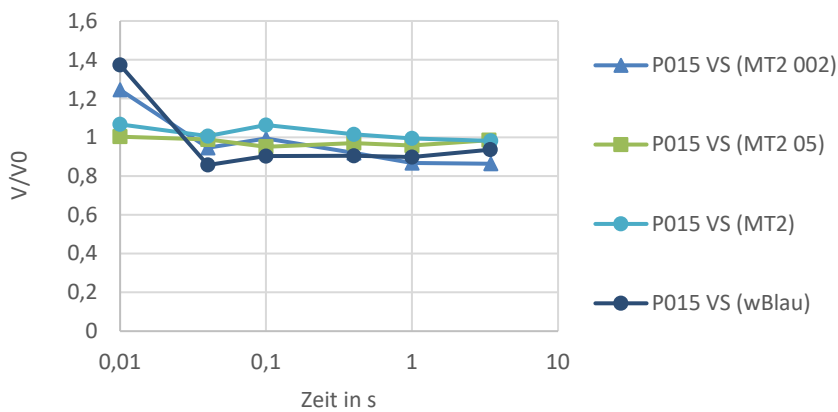


Abb. 47: Einfluss der Additivkonzentration auf das relative Tropfenvolumen makroskopischer Tropfen $MT2 V/V0 = f(t)$ auf P015 VS

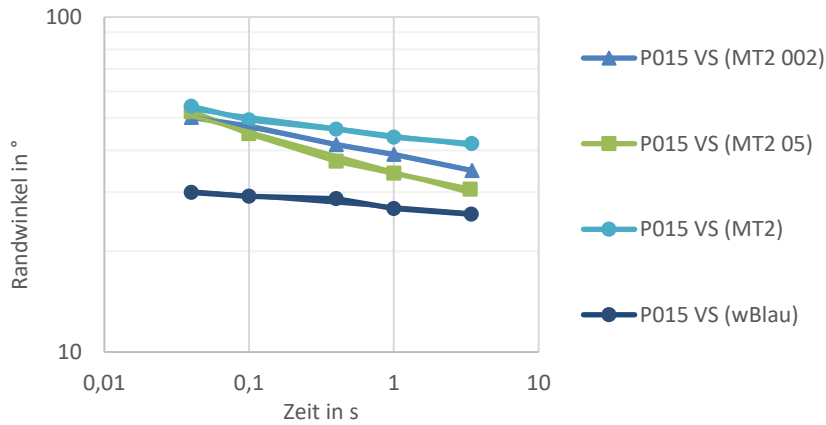


Abb. 48: Einfluss der Additivkonzentration auf die zeitabhängigen Randwinkel makroskopischer Tropfen MT2 RW = f(t) auf P015 VS

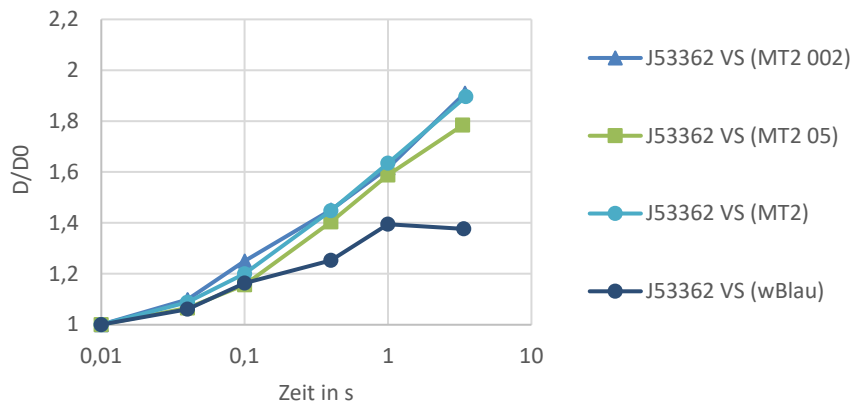


Abb. 49: Einfluss des Additivgehaltes auf die Änderung des normierten Tropfendurchmessers makroskopischer Tropfen MT2 D/D0 = f(t) auf J53362 VS

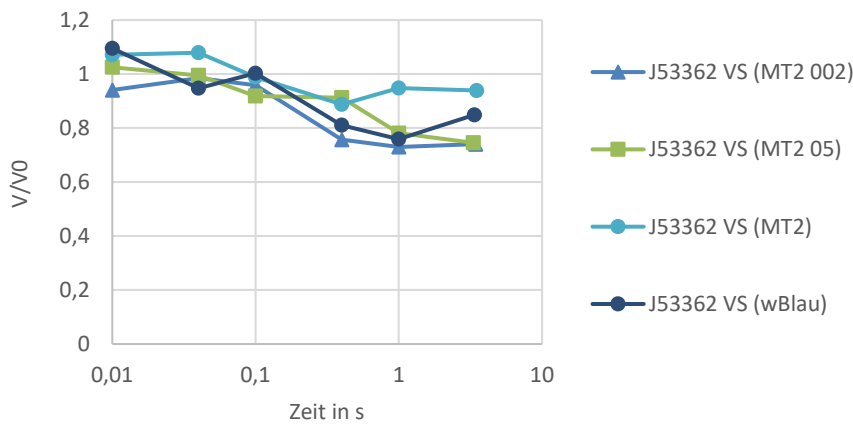


Abb. 50: Einfluss der Additivkonzentration auf das relative Tropfenvolumen makroskopischer Tropfen MT2 V/V0 = f(t) auf J53362 VS

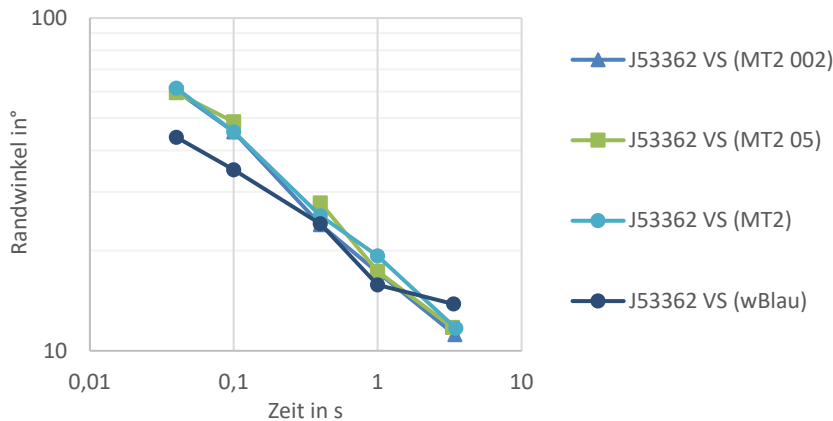


Abb. 51: Einfluss der Additivkonzentration auf die zeitabhängigen Randwinkel makroskopischer Tropfen MT2 RW = $f(t)$ auf J53362 VS

Die Ergebnisse für die Papiere zeigen, dass die Ausbreitungsverhältnisse der Tropfen stark durch die Flüssigkeitsaufnahme des Papiers dominiert werden. Die wasserbasierte Tinte (wBlau) dringt im Beobachtungszeitraum zu ca. 60% in das Papier ein. Der Resttropfen auf der Oberfläche zieht sich zum Zentrum des Tropfenaufpralls zurück. Der sich verringere, normierte Tropfendurchmesser (0,96) ist trotz der ursprünglichen oberflächlichen Benetzung nur an die orthogonal sichtbare Tropfengeometrie oberhalb des Papiers gebunden.

Auch die UV-Tinten dringen in das Papier P03 ein. Es zeigte sich jedoch, dass eine höhere Oberflächenspannung der Tinte das Eindringen ins Substratvolumen reduziert und das Spreiten auf der Oberfläche fördert.

3.5 AP 5: Druckversuche Inkjet

▪ Durchgeführte Arbeiten

Für die Druckversuche an der Inkjet-Labordruckanlage Thieme Lab Digital wurde eine Druckform erarbeitet, mit der alle erforderlichen Qualitätskriterien bewertet werden können. Mit den modifizierten Tinten wurde auf die gelieferten und vorbehandelten Substrate gedruckt. Dabei wurden die für die Tropfenerzeugung relevanten Parameter wie Wellenform, Spannung der Piezo-Einheit und Tintentemperatur variiert, um einen optimal ausgebildeten Tropfen zu erzeugen bzw. gezielt die Druckbedingungen zu variieren. Die Basiswerte für den Betrieb des Druckkopfes KM1024MHB waren eine Tropfengröße von 12 pl, eine Temperatur von 30 °C und eine Treiberspannung der Piezoelemente von 12,4V.

▪ Erzielte Ergebnisse

Es liegen Druckmuster für die ausgewählten Bedingungen vor, an denen die Qualitätsparameter bewertet werden können.

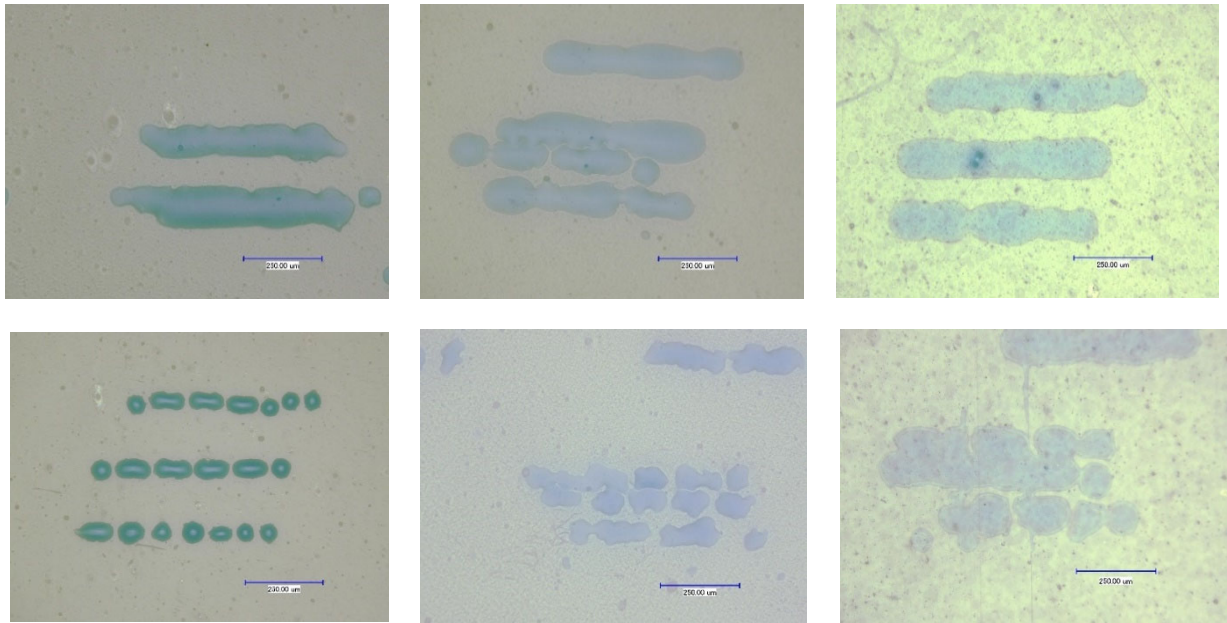


Abb. 52: Linienstrukturen im Druckbild auf verschiedenen Kunststoffmaterialien

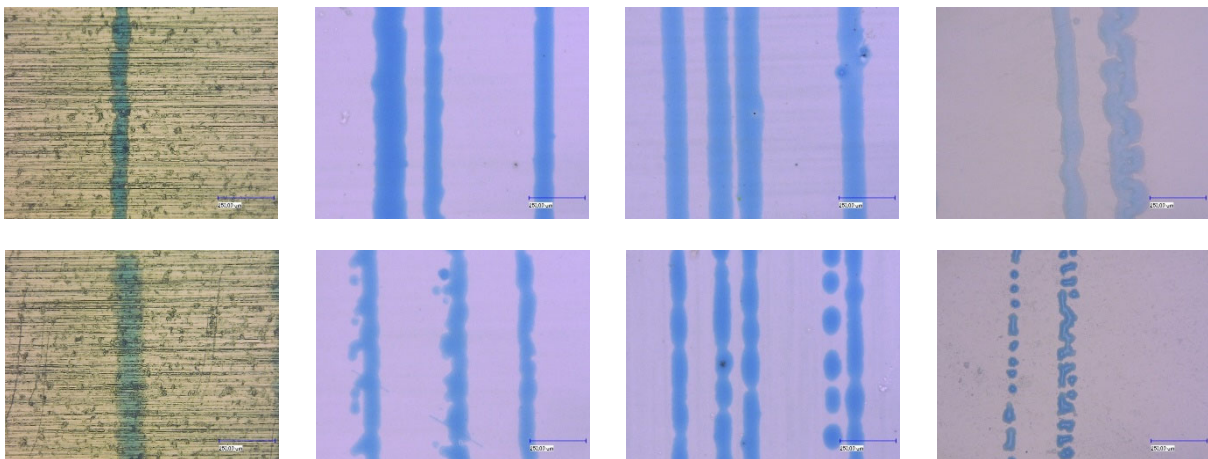


Abb. 53: Linienstrukturen im Druckbild auf Metall- und Glassubstraten

3.6 AP 6: Bewertung Druckqualität

▪ Durchgeführte Arbeiten

Zur Bewertung des Druckergebnisses, insbesondere der Benetzbarkeit wurde auf den Druckmustern das Verhältnis des wiedergegebenen Tropfendurchmessers zum Tropfenvolumen betrachtet. Außerdem wurde die Homogenität und Randschärfe der aufgetragenen Strukturen mittels Mikroskop bzw. Bildanalyseverfahren bewertet.

An den gedruckten Strukturen wurde die Farbwiedergabe und die Kantenschärfe beurteilt. Die Messung der Kantenschärfe erfolgte entsprechend der ISO/TS29120. Dabei wird die Flankenbreite mit bildanalytischen Methoden bestimmt. Die Flankenbreite ist der Bereich, in dem die Remission von 90% auf 30% des Wertes der bedruckten Fläche abfällt.

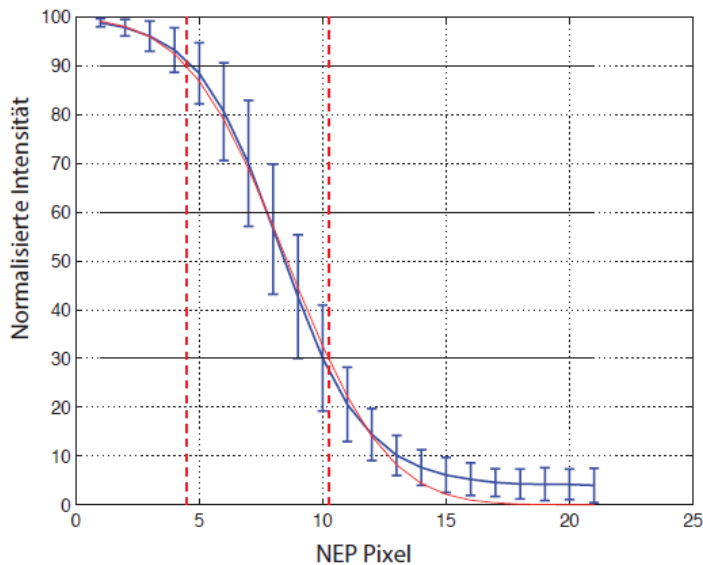


Abb. 54: Bestimmung der Kantenschärfe/Flankenbreite

▪ Erzielte Ergebnisse

Die Auswertung der Tropfendurchmesser zeigt deutliche Unterschiede für die Materialkombinationen. In der folgenden Abbildung sind beispielhaft unterschiedliche Punktformen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Tropfen auf PET größer sind als die auf BOPP und LDPE.

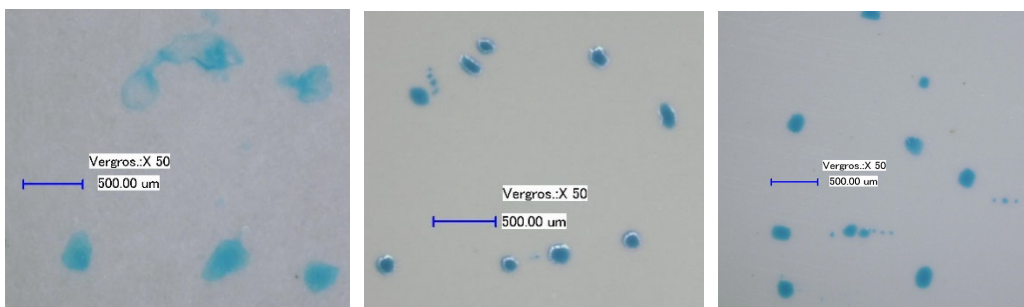


Abb. 55: Tropfenbild zur Bewertung des Punktdurchmesser bei Aufbringung von 10 Tropfen, v.l.n.r. PET, BOPP, LDPE

Stellt man die ermittelten Punktdurchmesser im Druck den Oberflächeneigenschaften gegenüber, so ergibt sich folgendes Bild:

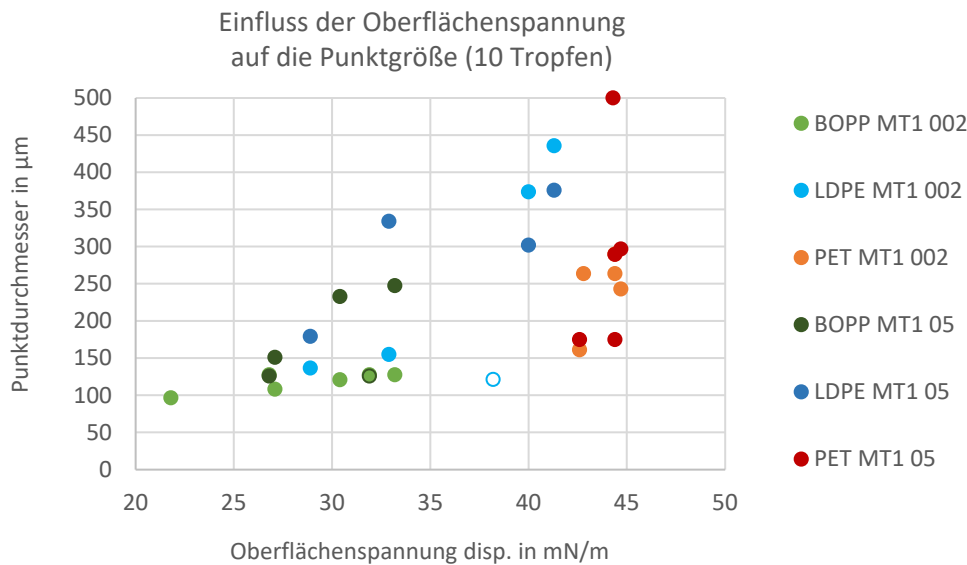


Abb. 56: Einfluss des dispersen Anteils auf die Punktgröße im Druckbild für die Kunststoffsubstrate und 2 Tintenmodifikationen MT1

Für BOPP und LDPE lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem dispersen Anteil der Oberflächenspannung und der Punktgröße erkennen. Ein größerer Punktdurchmesser ist ein Zeichen für eine großflächigere Benetzung, die dann erwartet wird, wenn die Oberflächenspannung des Substrats höher ist als die Oberflächenspannung der Tinte (bzw. die jeweiligen Anteile). Es wird deutlich, dass bei BOPP für die Tinte mit der geringeren Additivkonzentration (0,02%) der Punktdurchmesser mit dem dispersen Anteil der Oberflächenspannung nur langsam ansteigt. Für die Tinte mit der hohen Additivkonzentration, die damit selbst eine geringere Oberflächenspannung aufweist, steigt der Punktdurchmesser mit zunehmendem dispersen Anteil der Oberflächenspannung des Substrats stark an. Bei LDPE ist dieser Effekt für beide Tintenvarianten zu erkennen. Für dieses Substrat ist dieser Zusammenhang sowohl für den dispersen als auch für den polaren Anteil gegeben. Bei PET dagegen lässt sich kein Einfluss der Oberflächenspannung auf die Punktgröße ablesen, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass der polare Anteil durch die Behandlung nur geringfügig erhöht wird.

An den definiert vorbehandelten Substraten wurden Farbintensitäten und Kantenschärfen bestimmt. Dazu wurden Querschnitte von geeigneten Bildelementen mikroskopisch erfasst und ausgewertet. Dabei lassen sich große Unterschiede in den Helligkeitsverläufen feststellen.

Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen einige Linienquerschnitte dargestellt:

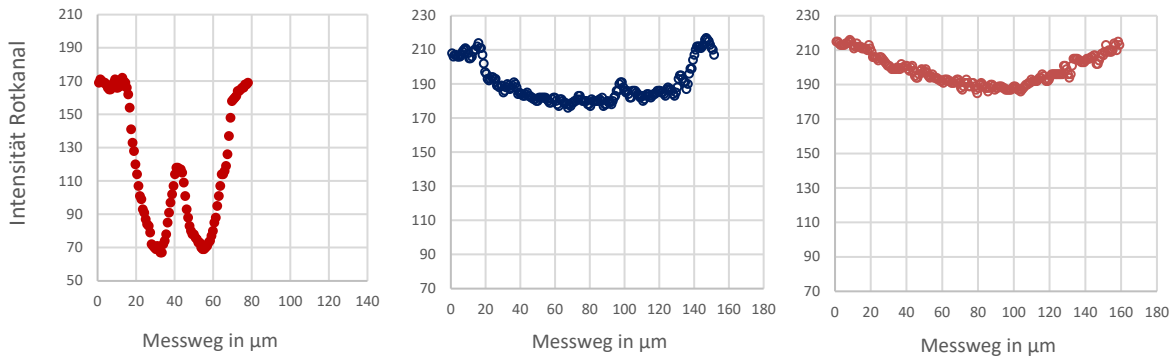


Abb. 57: Beispiele für Linienquerschnitte auf Kunststoffsubstraten

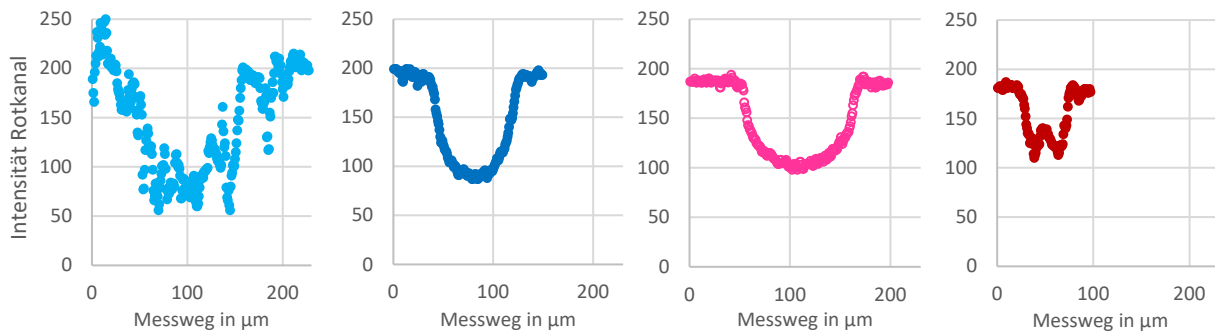
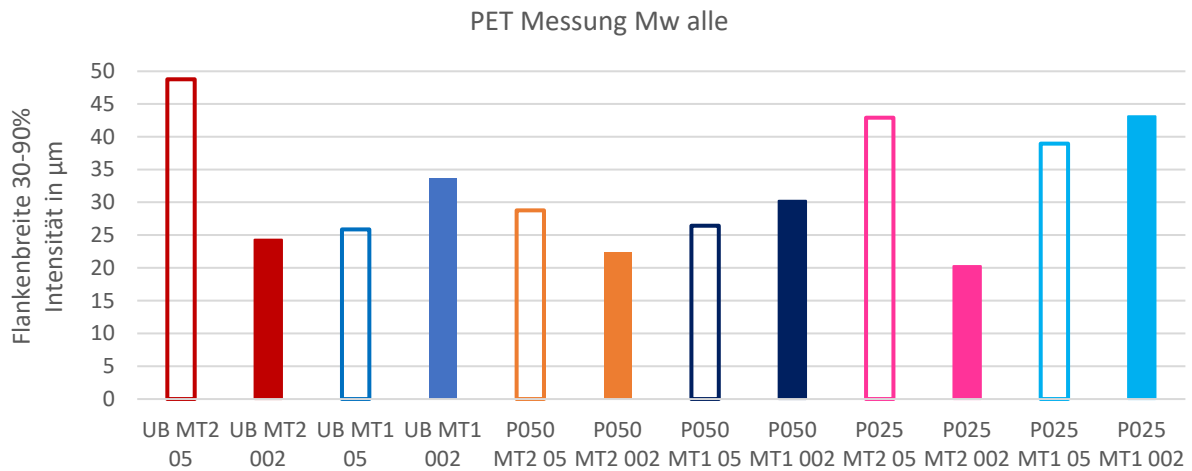


Abb. 58: Beispiele für Linienquerschnitte auf Metall- und Glassubstraten

3.6.1. Auswertung Kunststoffsubstrate

Stellt man die Flankenbreiten für alle Kunststoffsubstrate und Vorbehandlungsvarianten dar, so ergeben sich teilweise große Unterschiede:



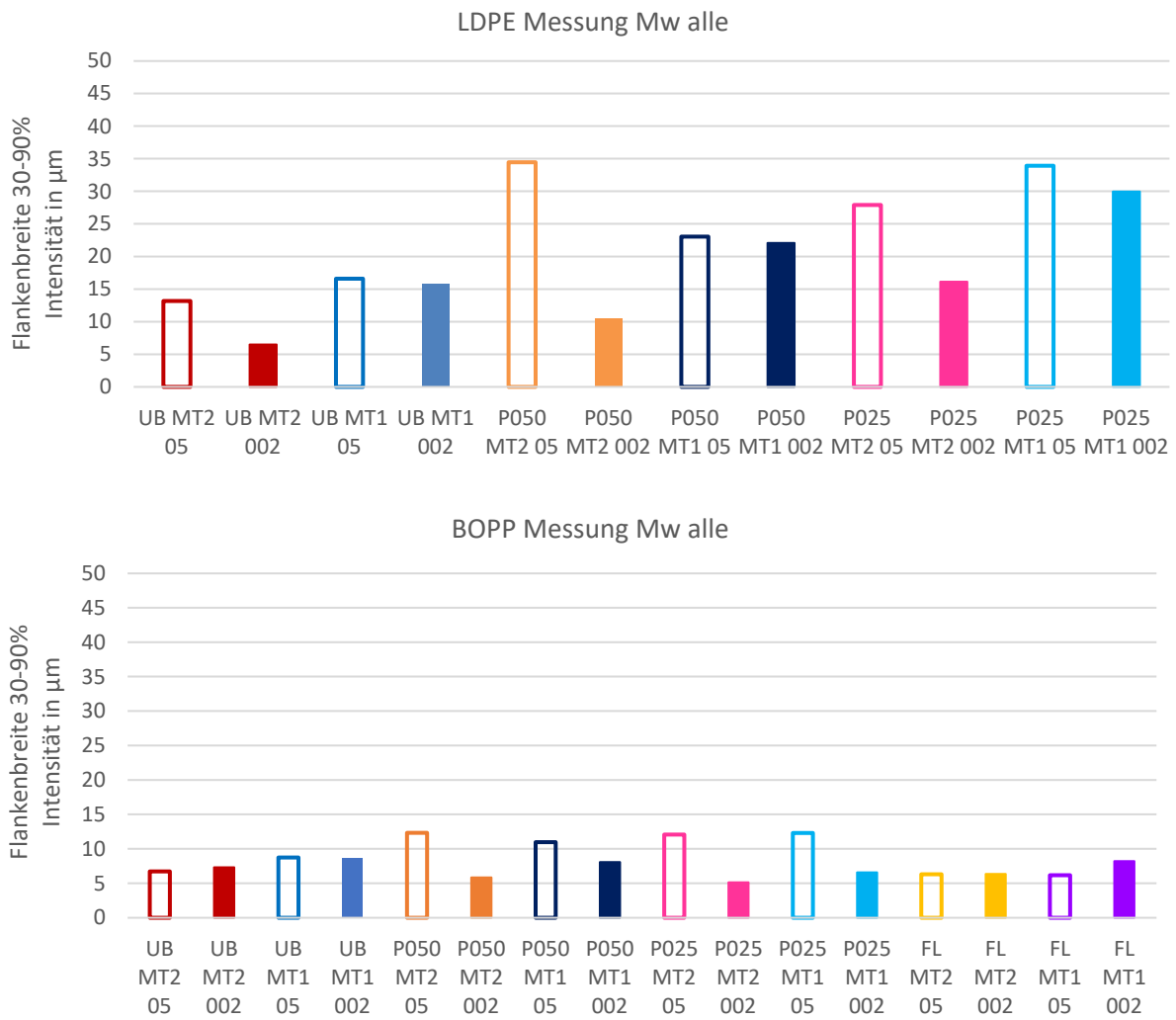


Abb. 59: Flankenbreiten behandelte Kunststoffsubstrate

Um die Einflussfaktoren zu differenzieren wurden die Ergebnisse nach verschiedenen Kriterien gegenübergestellt:

Fasst man die Ergebnisse für die Bedruckstoffe zusammen, erhält man folgende Darstellung:

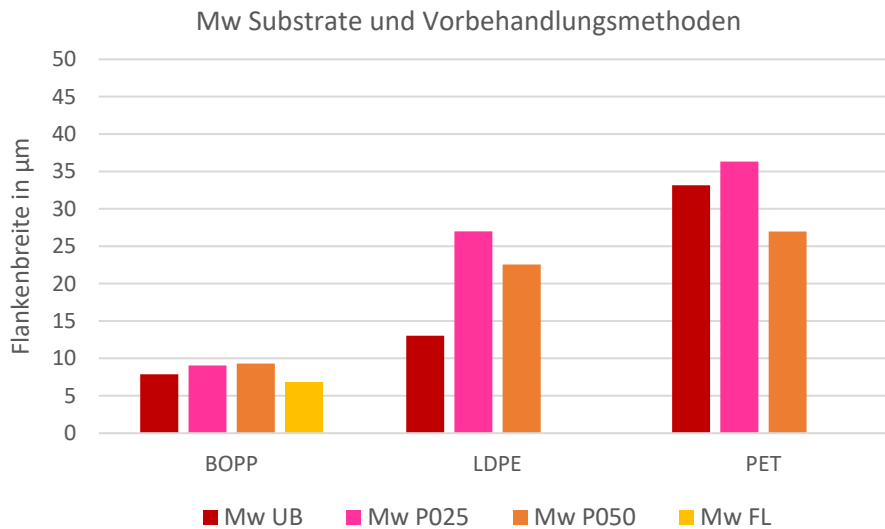


Abb. 60: Flankenbreiten für die einzelnen Kunststoffsubstrate nach Vorbehandlungsmethoden

Es lässt sich erkennen, dass die Flankenbreite bei BOPP immer am geringsten ist, dort also die schärfsten Kanten erreicht werden. Der Unterschied zwischen den Vorbehandlungsmethoden bei BOPP ist relativ gering. Nur durch die Beflammung wird eine Verringerung der Flankenbreite erzielt. Bei unbehandeltem LDPE wird ebenfalls eine geringe Flankenbreite erreicht, diese Ergebnisse weisen auf eine schlechte Benetzung bzw. ein Abstoßen der Tinte hin. Bei LDPE und PET zeigen die Varianten mit der geringsten Plasmatintensität die größten Flankenbreiten.

Das Zusammenwirken der Substrate mit den Tinten ist im folgenden Diagramm dargestellt:

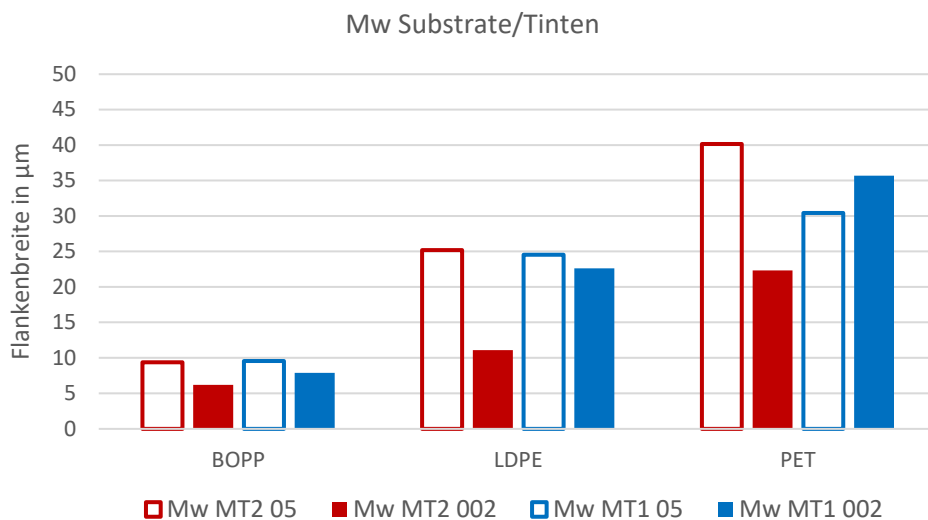


Abb. 61: Flankenbreiten Kunststoffsubstrate nach Tinten

Dabei wird deutlich, dass die Tinten mit 0,5% Additiv nahezu immer zu einer größeren Flankenbreite führen als die Tinten mit 0,02% Additiv. Die Unterschiede zwischen den

Tintenmodifikationen sind bei MT2 größer als bei der MT1. Das korreliert mit den Oberflächenspannungsmessungen, die bei MT2 eine deutlichere Verringerung durch den Additivzusatz aufzeigen. Die Tinten mit 0,5% Additiv weisen eine kleinere Oberflächenspannung auf und neigen daher stärker zum Verlaufen, was zu breiten Flanken führt. Bei den Varianten mit 0,02% Additiv zeigt MT1 immer größere Flankenbreiten als MT2 beim Zusatz von 0,5% Additiv ist der Unterschied gering bzw. (bei PET) umgekehrt. Betrachtet man den Einfluss der Vorbehandlungsmethoden über alle Substrate, ergibt sich folgendes Bild:

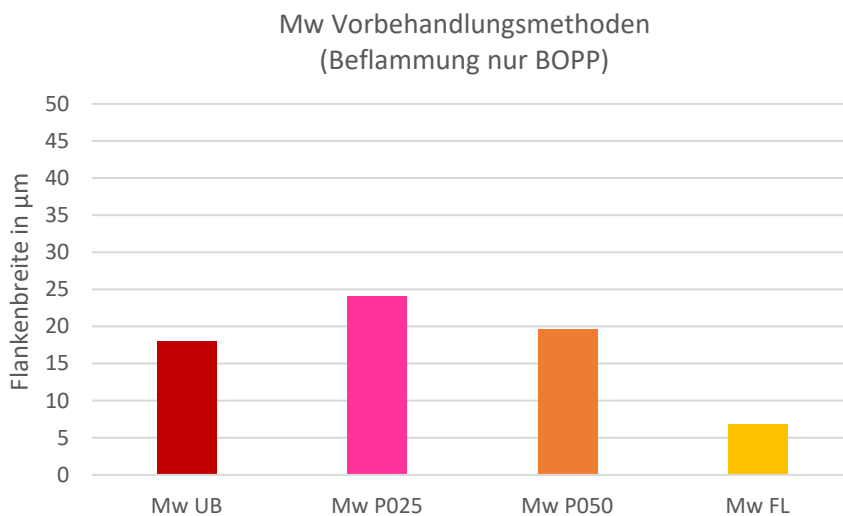


Abb. 62: Flankenbreiten Mittelwerte nach Vorbehandlungsmethoden

Die Vorbehandlung mit der geringen Plasmaintensität (25%) erzeugt die größten Flankenbreiten. Das könnte daran liegen, dass bei den unbehandelten Substraten eine schlechte Benetzung vorliegt, was zu steilen Flanken führt.

Die geringen Flankenbreiten bei der Beflammung sind nicht vergleichbar, da die Beflammung nur bei BOPP durchgeführt wurde, wobei immer relativ geringe Flankenbreiten erzeugt wurden.

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse detailliert für die Vorbehandlungsmethoden und die einzelnen Substrate dargestellt:

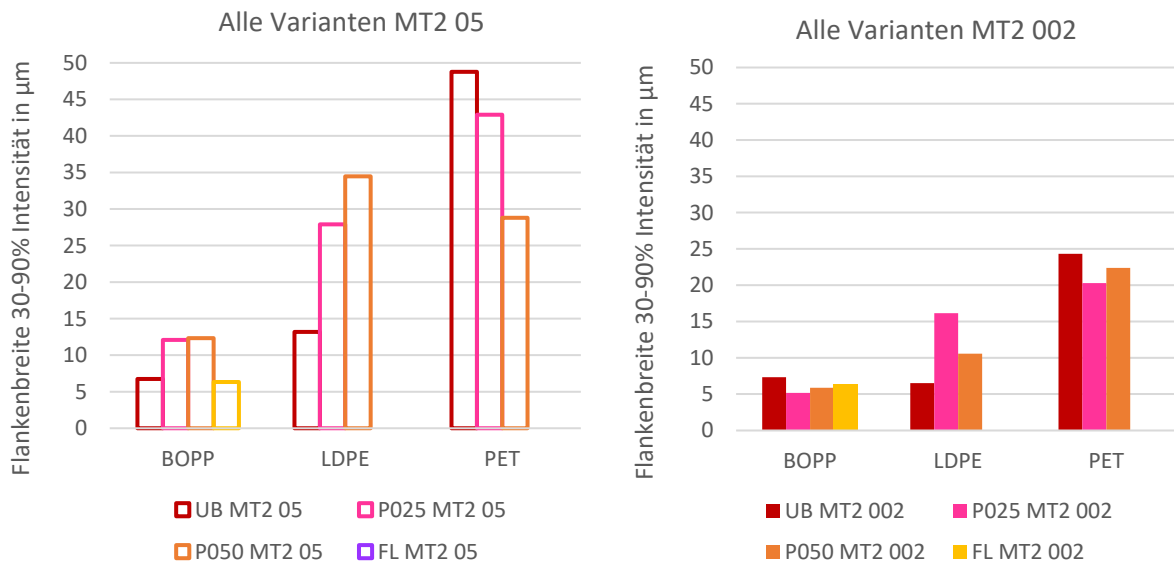


Abb. 63: Flankenbreiten Kunststoffsubstrate für einzelne Tintenrezepturen

Bei MT2 mit 0,5% Additiv (Bild links) sieht man auf BOPP eine leichte Zunahme der Flankenbreite mit der Plasmavorbehandlung und nahezu keine Auswirkung der Beflammung. Bei LDPE nimmt die Flankenbreite mit der Plasmabehandlung deutlich zu, hier kommt es beim unbehandelten Substrat zur Abstoßung der Tinte, was eine geringe Flankenbreite bewirkt. Bei PET verringert sich die Flankenbreite durch die Plasmavorbehandlung. Bei MT2 mit 0,02% Additiv (Bild rechts) wird durch alle Vorbehandlungen bei BOPP eine leichte Verringerung der Flankenbreite erreicht. Bei LDPE steigt die Flankenbreite mit der Plasmabehandlung geringer Intensität zunächst an (Tinte wird nicht mehr abgestoßen) und wird bei höherer Intensität wieder geringer. Bei PET wird mit der Plasmabehandlung eine Verringerung der Flankenbreite erreicht.

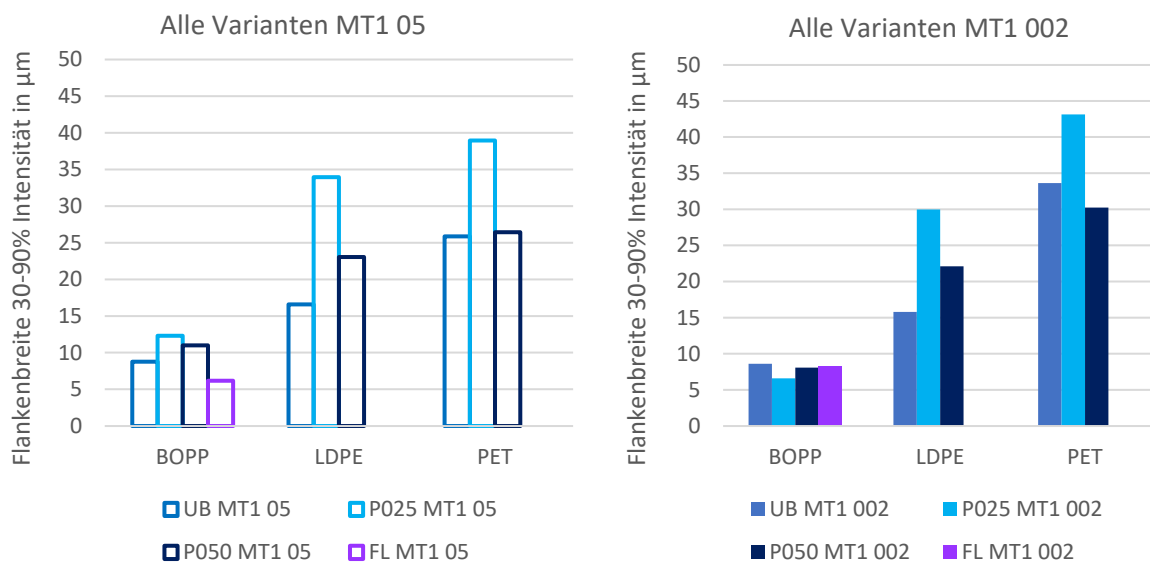


Abb. 64: Flankenbreiten Kunststoffsubstrate für einzelne Tintenrezepturen

Für MT1 wird mit 0,05% Additiv auf BOPP der gleiche Effekt erzeugt wie mit MT2. Auf LDPE und PET kommt es zu einer Erhöhung der Flankenbreite bei Plasmavorbehandlung geringerer Intensität und dann wieder zu einer Verringerung der Flankenbreite bei höherer Intensität. Hier ist der Unterschied zur Tinte mit 0,02% Additiv gering, nur bei BOPP kommt es durch alle Vorbehandlungsmethoden zu einer geringen Abnahme der Flankenbreiten.

Das folgende Diagramm zeigt die Mittelwerte aller 3 Substrate für die Kombinationen aus Vorbehandlung und Tintenmodifikation:

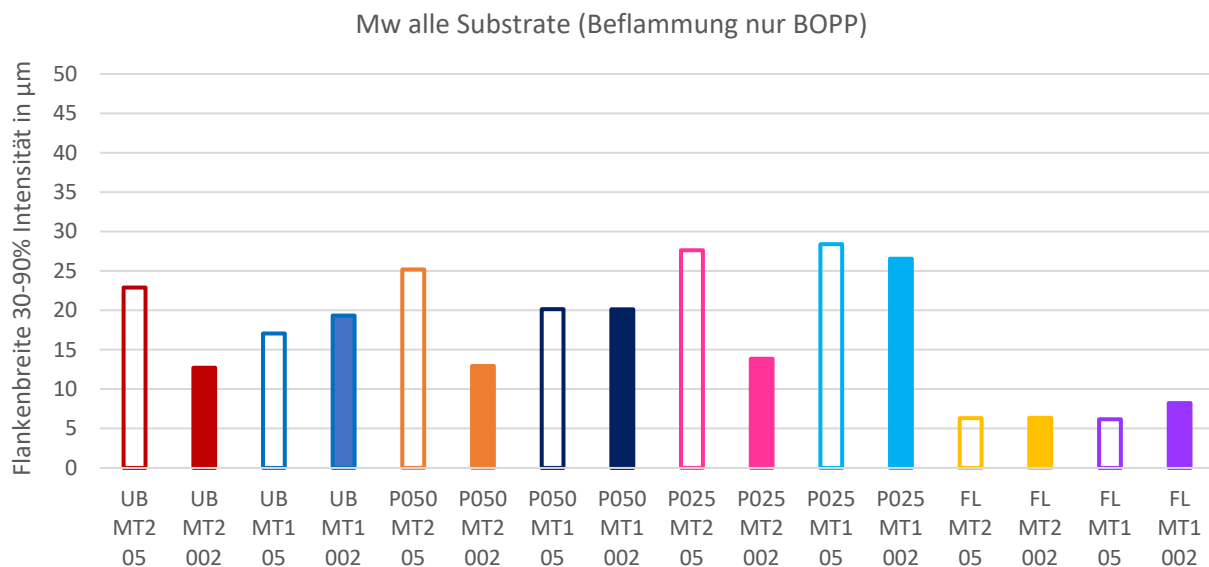


Abb. 65: Flankenbreiten Mittelwerte für alle Kunststoffsubstrate

Es zeigt sich, dass mit MT2 mit 0,5% Additiv überall die größten Flankenbreiten erzeugt werden, und mit MT2 mit 0,02% Additiv überall die kleinsten Flankenbreiten. Die Modifikationen der MT1 liegen bezüglich der Flankenbreiten dazwischen und unterscheiden sich nicht deutlich voneinander. Die geringen Werte für die Beflammung sind wieder darin begründet, dass die Beflammung nur auf BOPP durchgeführt wurde, wo stets kleine Flankenbreiten gemessen wurden.

Fasst man die Ergebnisse für die Farbintensität bei den Kunststoffsubstraten nach verschiedenen Kriterien zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

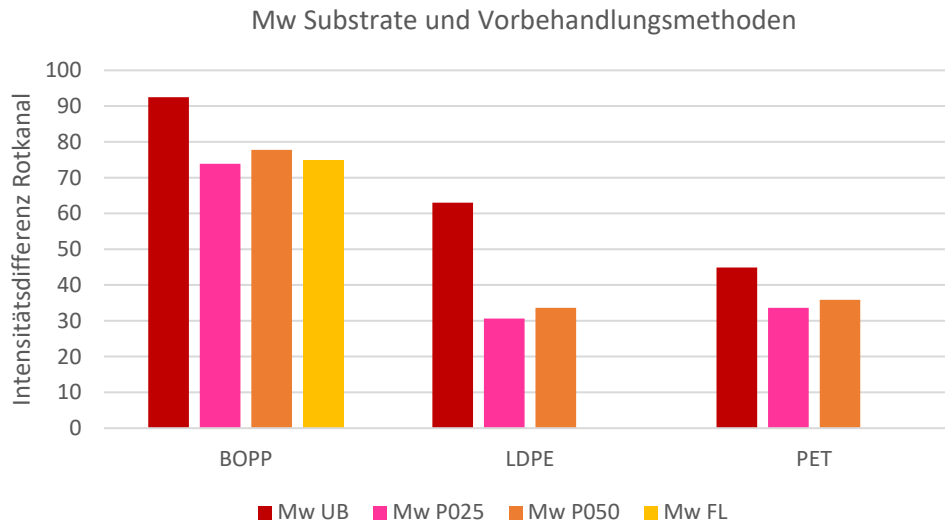


Abb. 66: Farbintensität Kunststoffsubstrate für einzelne Substrate und Vorbehandlungen

Der größte Kontrast wird auf BOPP erreicht, auf LDPE und PET werden geringere Werte gemessen. Der Kontrast nimmt mit allen Vorbehandlungsmethoden auf allen Bedruckstoffen ab.

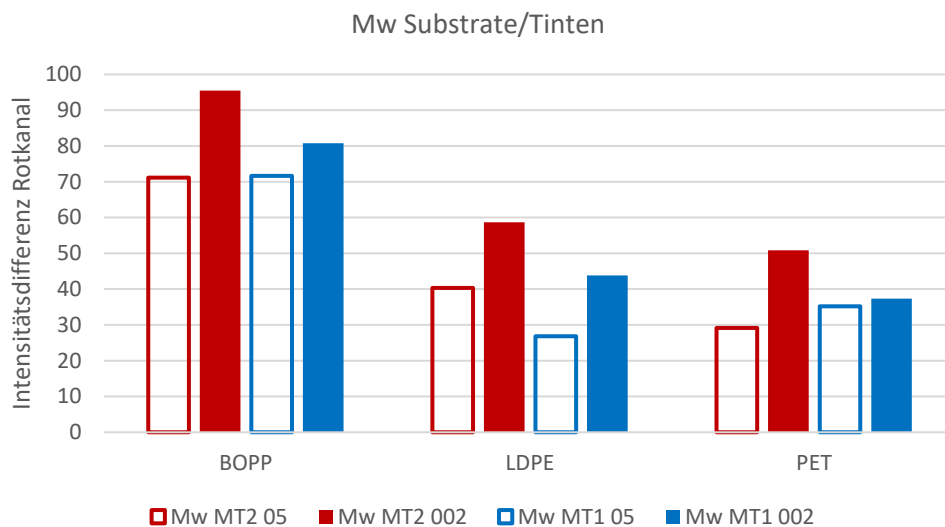


Abb. 67: Farbintensität Kunststoffsubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Vergleicht man die Ergebnisse für die Tintenvarianten, so zeigen die Modifikationen mit 0,02% Additiv immer den größeren Kontrast, dabei MT2 immer einen größeren Wert als MT1. Bei den Modifikationen mit 0,5% Additiv sind die Unterschiede zwischen den Tinten geringer und nicht einheitlich.

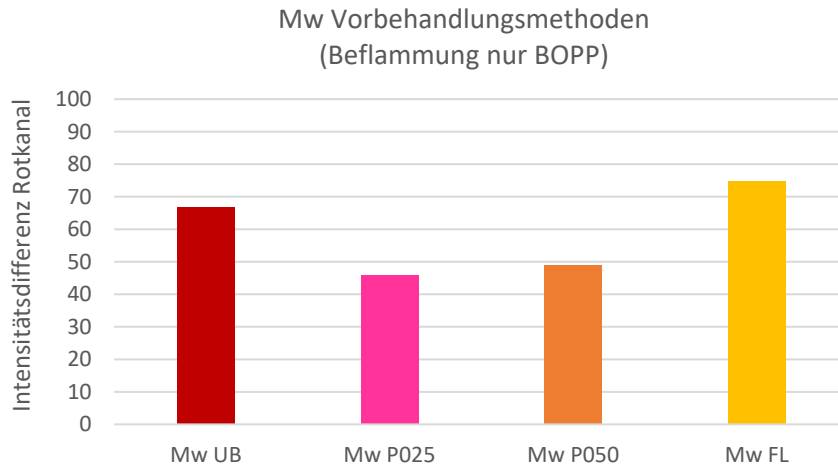


Abb. 68: Farbintensität Kunststoffsubstrate, Mittelwert für die Vorbehandlungsmethoden

Fasst man die Vorbehandlungsmethoden über alle Substrate zusammen, so zeigt sich ebenfalls, dass der Kontrast bei den unbehandelten Substraten am größten war. Das Ergebnis für die Beflammung ist wieder nicht mit den anderen vergleichbar, da nur das BOPP beflammt wurde, auf dem immer die größten Kontraste erreicht wurden.

Im folgenden Diagramm sind die Ergebnisse detailliert für die Vorbehandlungsmethoden und die einzelnen Substrate dargestellt:

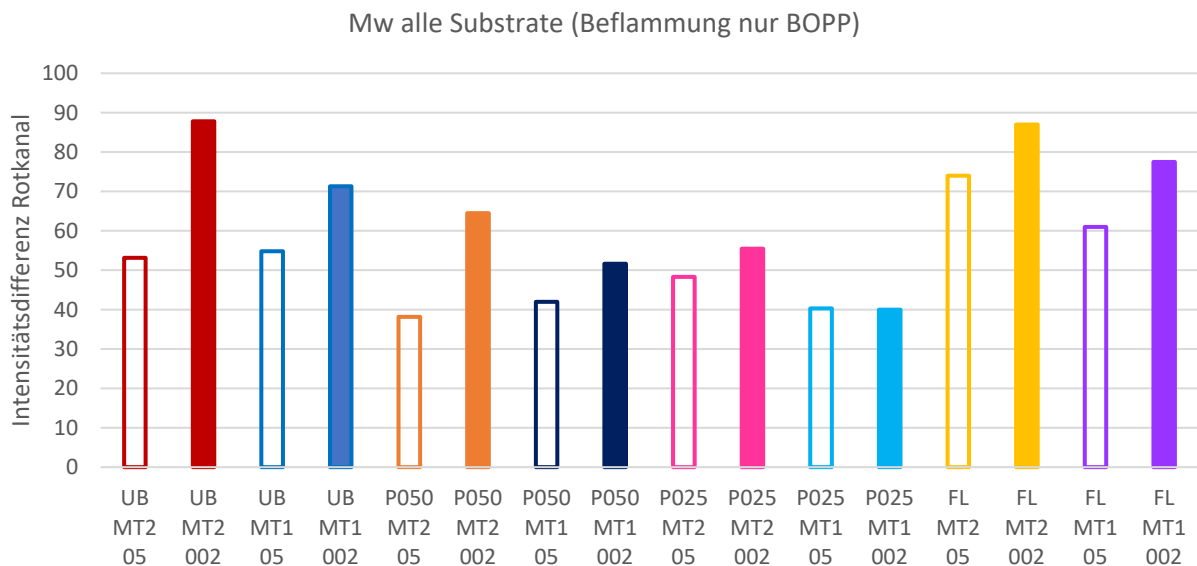


Abb. 69: Farbintensität Kunststoffsubstrate, Mittelwerte für Vorbehandlungen und Tinten

Es lässt sich erkennen, dass die höheren Kontraste immer mit der Tinte mit 0,02% Additiv erzielt werden, und dass die höchsten Werte dabei immer für MT2 gemessen wurden. Die Tinten mit 0,5% Additiv zeigen einen geringeren Kontrast, die Unterschiede zwischen den beiden Varianten dafür waren gering.

3.6.2. Auswertung Metallsubstrate

Stellt man die Flankenbreiten für alle Metall-Substrate und Vorbehandlungsvarianten dar, so ergeben sich teilweise große Unterschiede:

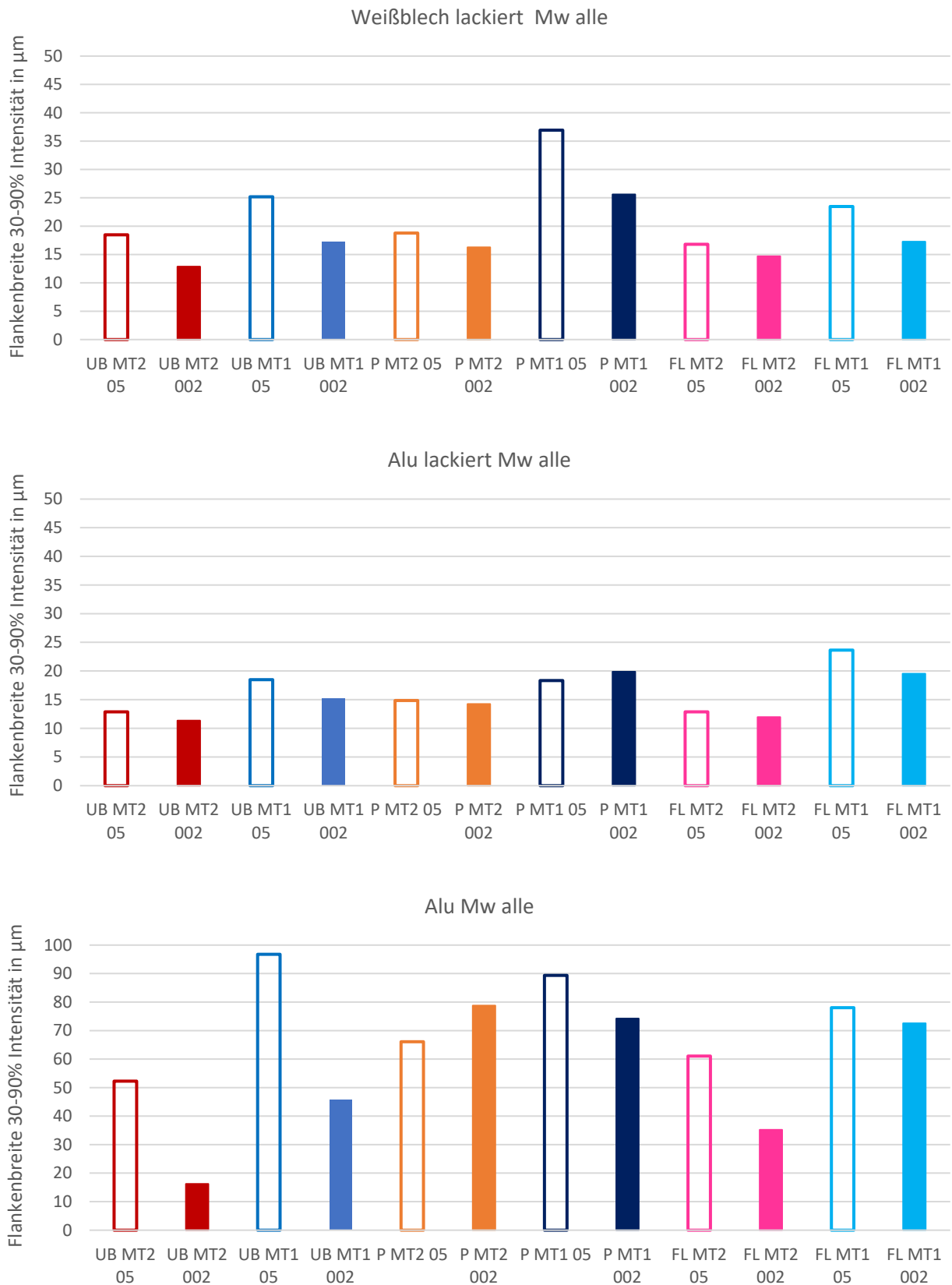


Abb. 70: Flankenbreite Metallsubstrate für einzelne Substrate und Vorbehandlungen

Um die Einflussfaktoren zu differenzieren wurden die Ergebnisse nach verschiedenen Kriterien gegenübergestellt. Fasst man die Ergebnisse für die Bedruckstoffe zusammen, erhält man folgende Darstellung:

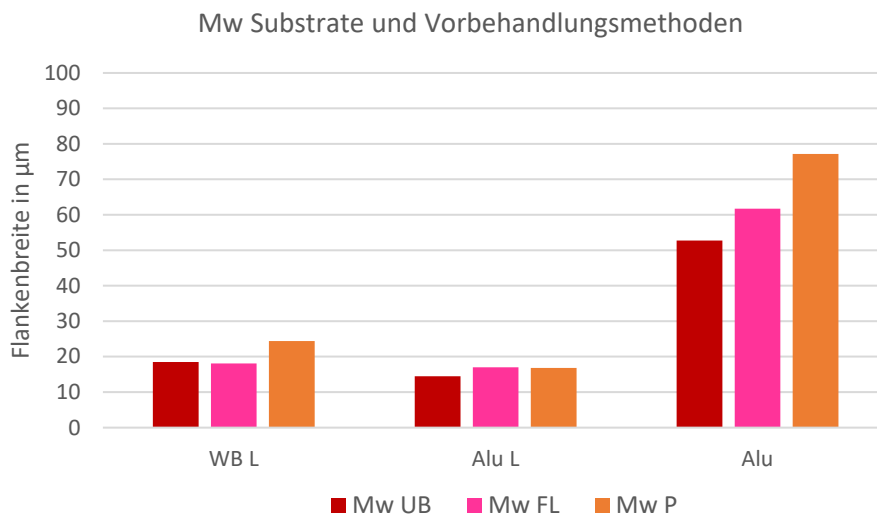


Abb. 71: Flankenbreite Metallsubstrate, Mittelwert Substrate und Vorbehandlungen

Es lässt sich erkennen, dass die Flankenbreite bei den lackierten Metallen (Weißblech und Alu) immer am geringsten ist, dort also die schärfsten Kanten erreicht werden. Der Unterschied zwischen den Vorbehandlungsmethoden für die lackierten Metalle ist relativ gering, bei Weißblech zeigen die plasmabehandelten Muster eine etwas größere Flankenbreite. Die Flankenbreiten auf dem blanken Alu sind immer deutlich größer, was auch auf die Strukturierung der Oberfläche zurückzuführen ist. Die behandelten Varianten weisen noch breitere Flanken auf, am stärksten ausgeprägt bei der Plasmabehandlung.

Das Zusammenwirken der Substrate mit den Tinten ist im folgenden Diagramm dargestellt:

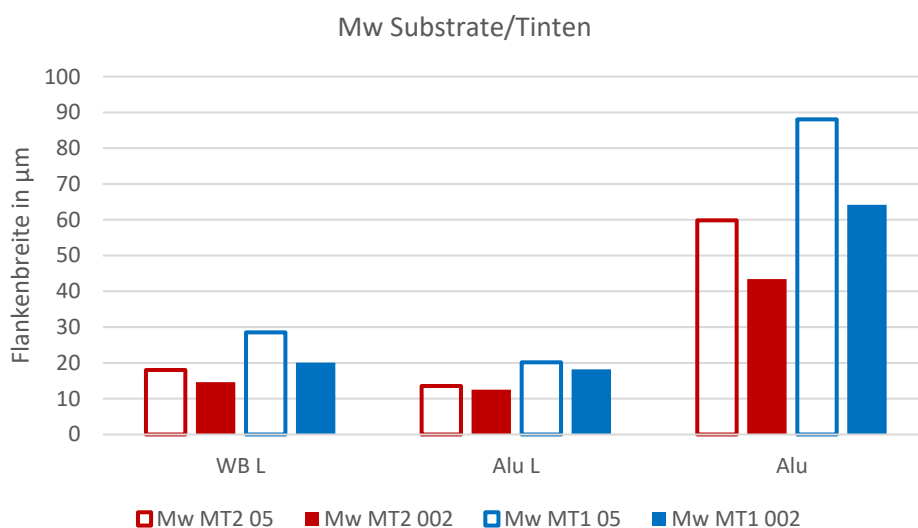


Abb. 72: Flankenbreite Metallsubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Dabei wird deutlich, dass die Tinten mit 0,5% Additiv immer zu einer größeren Flankenbreite führen als die Tinten mit 0,02% Additiv. Die Tinten mit 0,5% Additiv weisen eine kleinere Oberflächenspannung auf und neigen daher stärker zum Verlaufen, was zu breiten Flanken führt. In allen Fällen zeigt MT1 breitere Flanken als MT2.

Betrachtet man den Einfluss der Vorbehandlungsmethoden über alle Substrate, ergibt sich folgendes Bild:

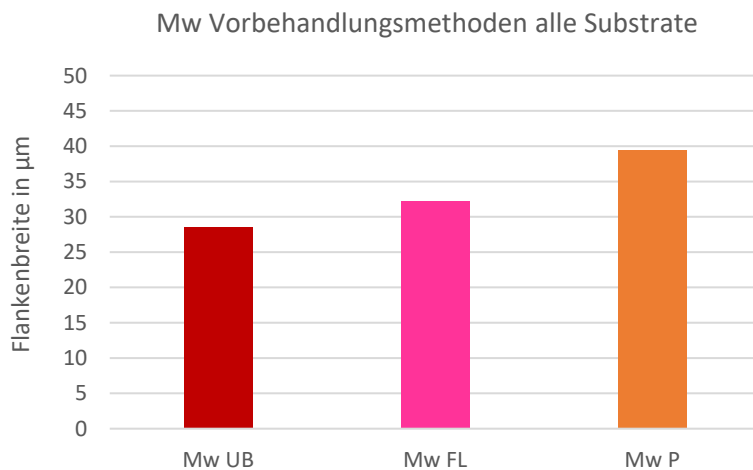


Abb. 73: Flankenbreite Metallsubstrate, Mittelwerte Vorbehandlungen

Durch die Vorbehandlungen werden die Flankenbreiten größer, besonders bei der Plasmavorbehandlung. Das lässt sich durch die starke Erhöhung der Oberflächenspannung durch das Plasma begründen.

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse detailliert für die Vorbehandlungsmethoden und die einzelnen Substrate dargestellt:

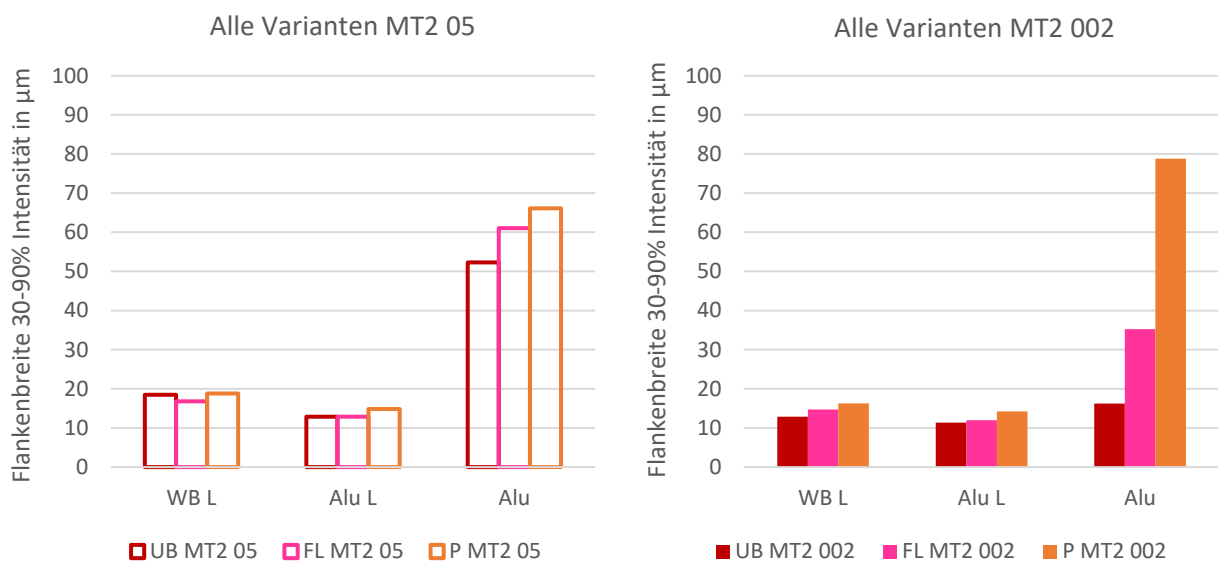


Abb. 74: Flankenbreite Metallsubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Bei MT2 mit 0,5% Additiv (Bild links) sieht man für die lackierten Metallsubstrate nahezu keine Auswirkung der Vorbehandlung. Bei dem blanken Alu nimmt die Flankenbreite mit der beiden Vorbehandlungsmethoden deutlich zu, am stärksten bei der Plasmabehandlung.

Bei MT2 mit 0,02% Additiv (Bild rechts) sind die Ergebnisse ähnlich. Die lackierten Metallsubstrate reagieren nur geringfügig auf die Vorbehandlungen, das blanke Aluminium sehr deutlich.

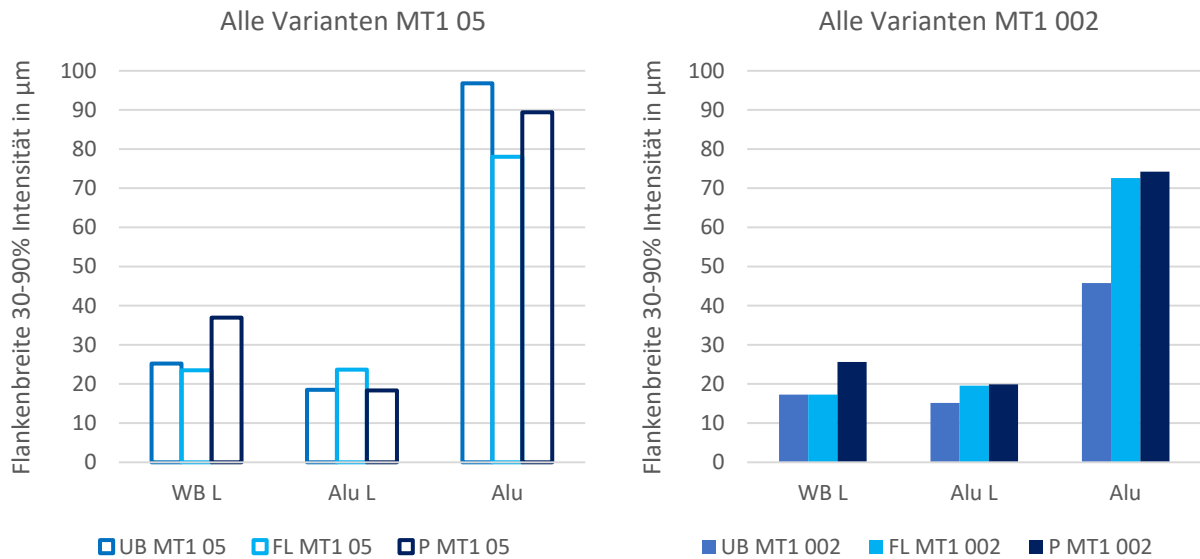


Abb. 75: Flankenbreite Metallsubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Für MT1 mit 0,05% Additiv zeigt sich auf Weißblech nur ein Einfluss der Plasmabehandlung, der zu einer größeren Flankenbreite führt. Auf lackiertem Aluminium zeigen beide Vorbehandlungsmethoden keinen wesentlichen Einfluss. Die Flankenbreiten auf dem blanken Aluminium sind alle sehr groß, unbehandelt am größten, durch die Vorbehandlungen wird eine Verringerung der Flankenbreite erreicht, durch Beflammung stärker als durch Plasmavorbehandlung.

Bei MT1 mit 0,02% Additiv bewirkt die Vorbehandlung auf den lackierten Metallsubstraten fast keine Veränderung der Flanken, bei Weißblech wird eine geringfügige Verbreiterung festgestellt. Auf dem blanken Aluminium ist dagegen - im Unterschied zu MT1 mit 0,5% Additiv und ähnlich MT2 - eine deutliche Erhöhung der Flankenbreite durch beide Vorbehandlungsmethoden zu sehen.

Das folgende Diagramm zeigt die Mittelwerte aller 3 Metallsubstrate für die Kombinationen aus Vorbehandlung und Tintenmodifikation:

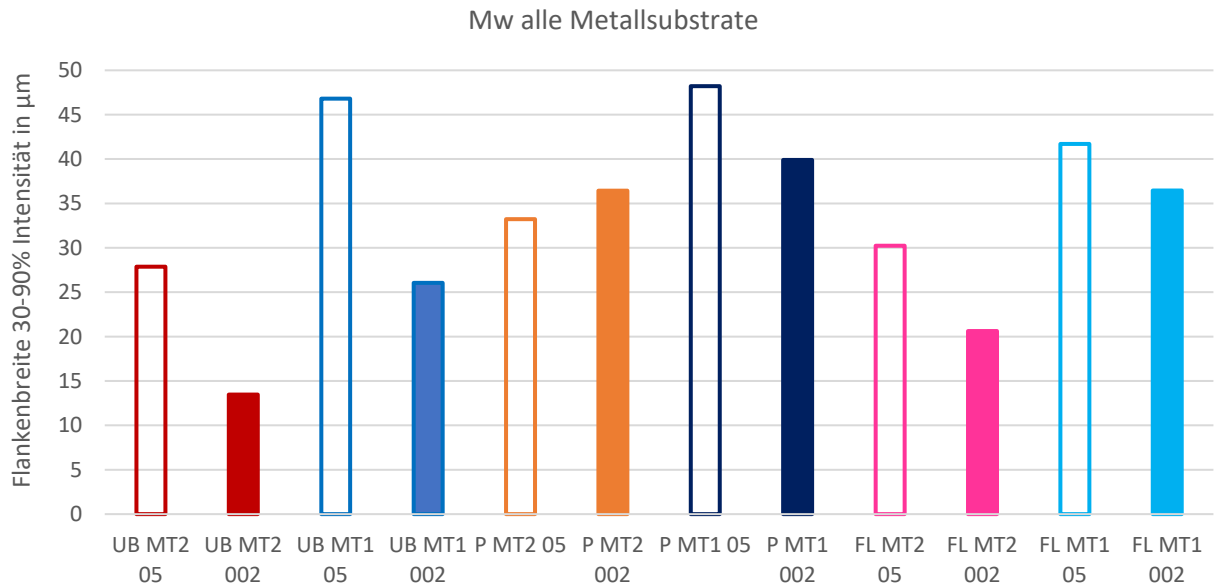


Abb. 76: Flankenbreite Metallsubstrate, Mittelwerte Vorbehandlungen

Es zeigt sich, dass mit MT1 mit 0,5% Additiv überall die größten Flankenbreiten erzeugt werden. Die Ergebnisse für MT1 mit 0,02% Additiv liegen alle im Bereich der Ergebnisse für MT2 mit 0,5% Additiv. Bis auf die Kombination der Plasmavorbehandlung und dem Druck von MT2 mit 0,02% Additiv werden die schmalsten Flanken und damit der konturschärfste Druck immer mit dieser Tinte erreicht.

3.6.3. Auswertung Glassubstrate

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Glassubstrate und die Beschichtungen A, B, C (C nur Luftseite) dargestellt:

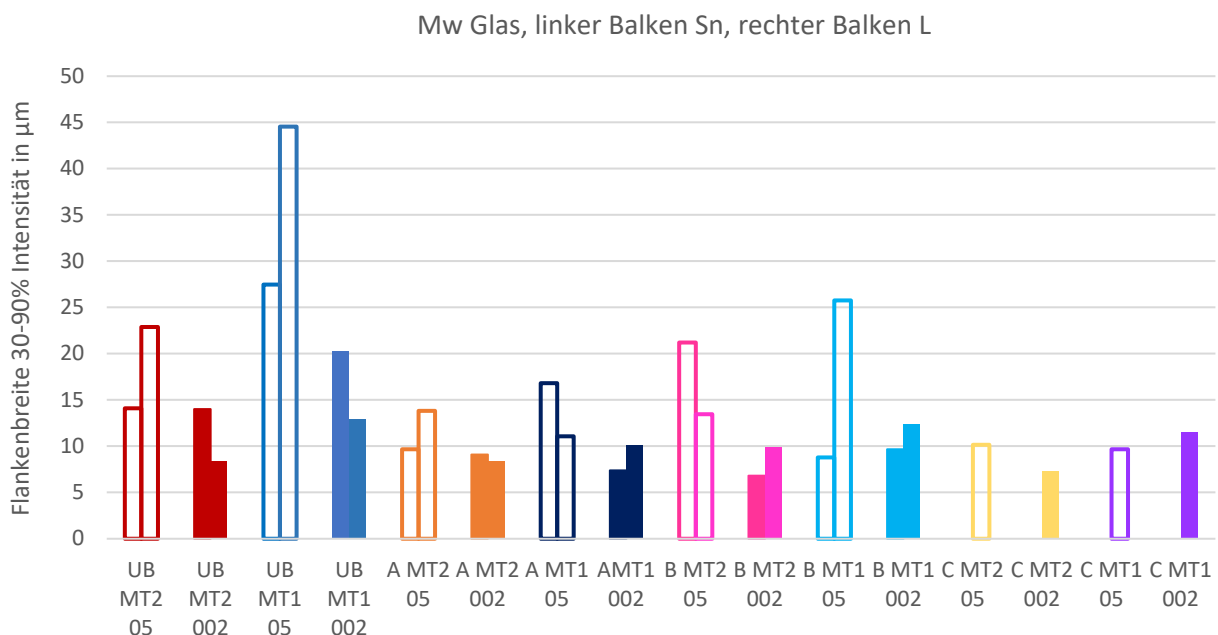


Abb. 77: Flankenbreite Glassubstrate für die einzelnen Vorbehandlungen

Bei den unbehandelten Mustern zeigen die Luftseiten eine größere Flankenbreite mit beiden Tinten mit 0,02% Additiv und die Zinnbadseiten mit beiden Tinten mit 0,5% Additiv. Die Unterschiede der Seiten sind im unbehandelten Zustand erwartungsgemäß größer, da diese durch die Beschichtungen überdeckt werden. Obwohl bei den Oberflächenspannungsmessungen mit dem Primer A etwas größere Unterschiede zwischen beiden Seiten gemessen wurden, zeigen die Flankenmessungen mit Primer B und den Tinten mit 0,5% Additiv die größten Differenzen. Ursache dafür könnte sein, dass die ursprünglichen Eigenschaften Auswirkungen auf den Beschichtungsvorgang selbst und damit auf die Eigenschaften der Schicht hat. Es ist auch möglich, dass neben der Oberflächenspannung andere Eigenschaften (Glätte/Strukturierung, Wegschlagverhalten, ...) den Druck beeinflussen.

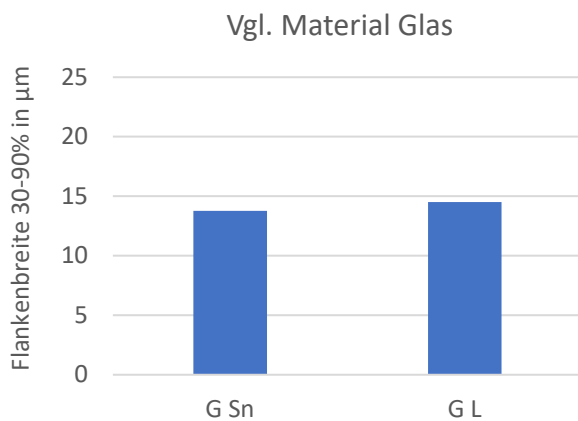


Abb. 78: Flankenbreite Glassubstrate, Mittelwert Luftseite/Zinnbadseite

Im Mittelwert über alle Versuche werden auf der Luftseite kleinere Flankenbreiten erreicht.

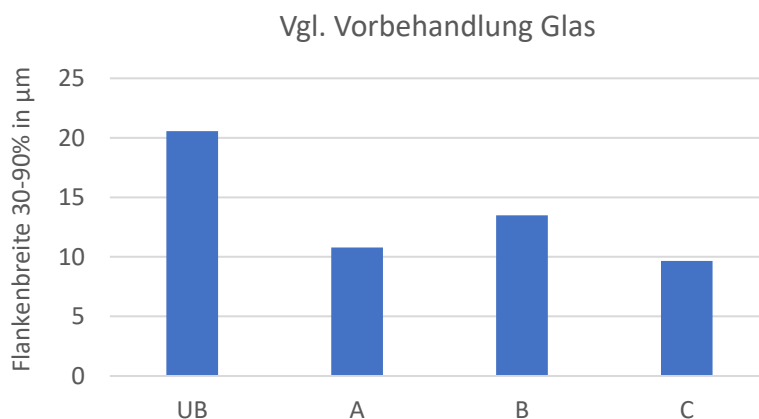


Abb. 79: Flankenbreite Glassubstrate, Mittelwert Vorbehandlungen

Vergleicht man die Beschichtungen untereinander, so zeigt sich, dass durch alle Beschichtungen die Flankenbreite verringert wird. Das korreliert mit den Ergebnissen der

Oberflächenspannungsmessung, die für alle Beschichtungen eine Verringerung der Oberflächenspannung, insbesondere des polaren Terms ergeben hat.

Mit der Beschichtung B wurden etwas breitere Flanken erreicht als mit den anderen beiden Beschichtungen.

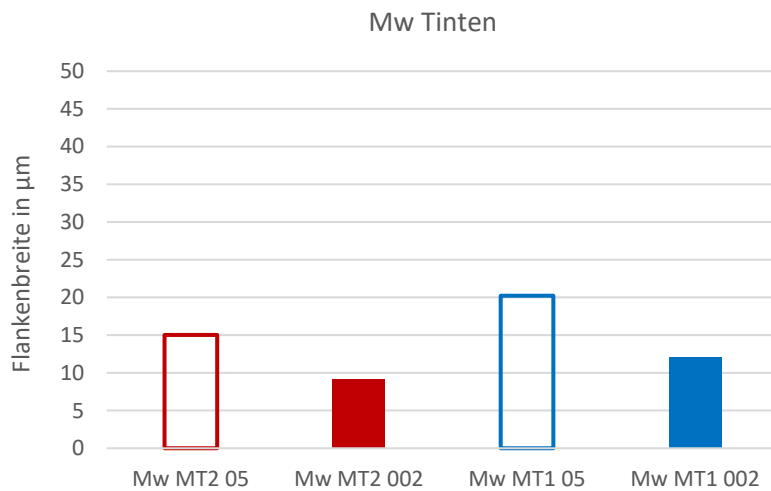


Abb. 80: Flankenbreite Glassubstrate, Mittelwerte Tinten

Vergleicht man die Ergebnisse für die unterschiedlichen Tinten auf den Glassubstraten, so wird deutlich, dass mit den Tinten mit 0,5% Additiv stets breitere Flanken gedruckt wurden als mit den Tinten mit 0,02% Additiv. Mit MT1 waren die Flanken noch etwas breiter als mit MT2.

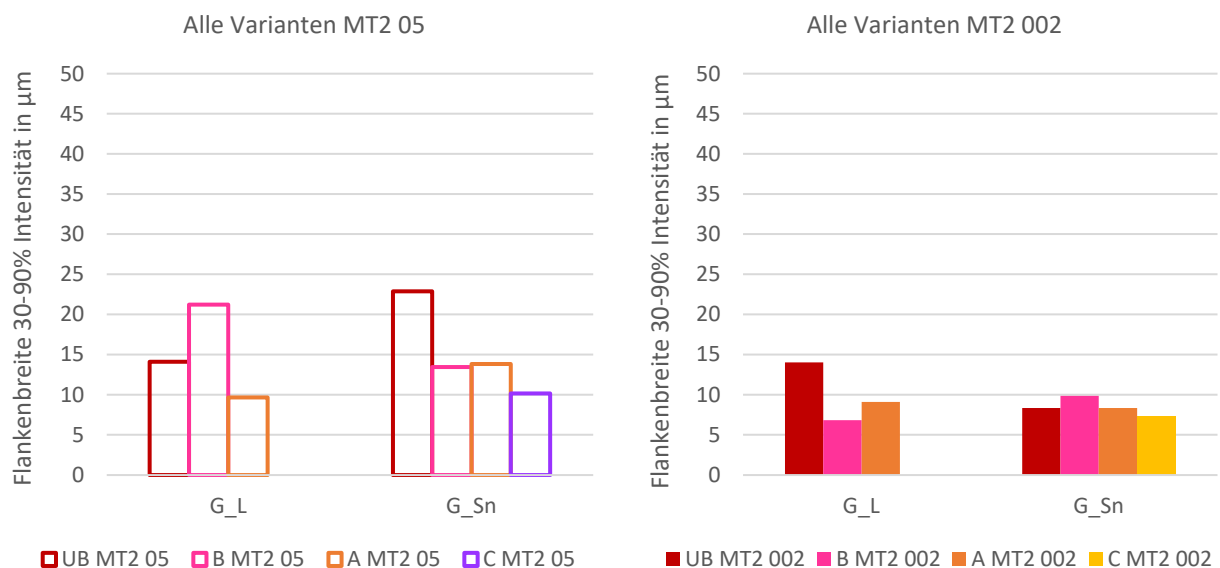


Abb. 81: Flankenbreite Glassubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Betrachtet man alle Varianten, die mit MT2 bedruckt wurden, so zeigen sich für die Tinte mit 0,02% kaum Unterschiede, nur die Flanken auf der unbehandelten Luftseite sind breiter.

Mit der Tinte mit 0,5% Additiv sind größere Unterschiede erkennbar, auf der Zinnbadseite wird durch alle Beschichtungen eine deutliche Verringerung der Flankenbreite erreicht, auf der Luftseite bewirkt Beschichtung B eine Vergrößerung der Flankenbreite.

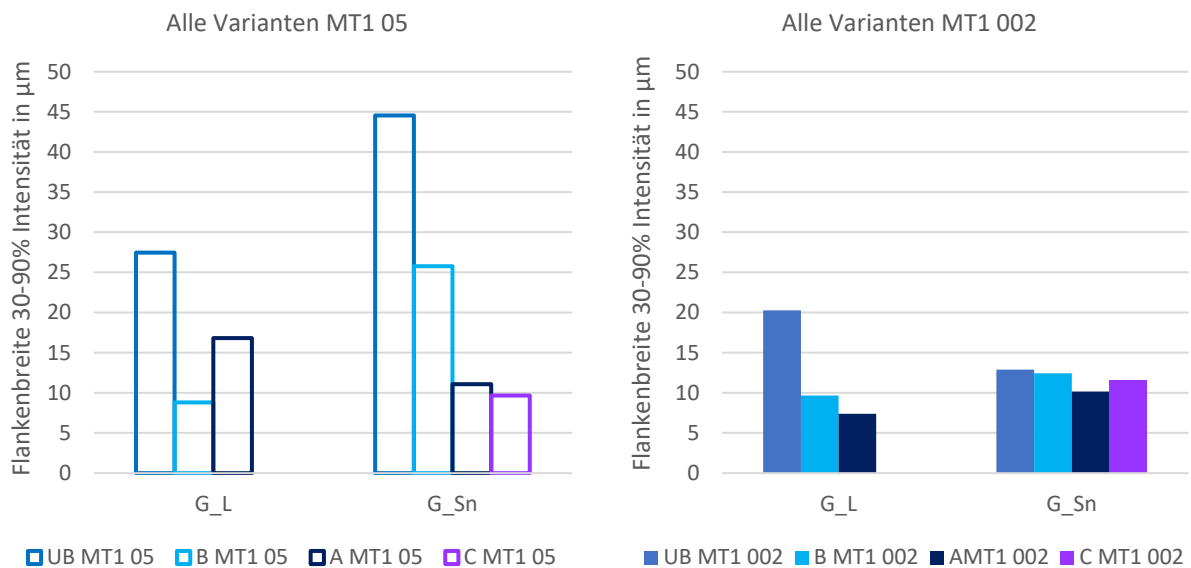


Abb. 82: Flankenbreite Glassubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Bei MT1 mit 0,5% Additiv führen alle Beschichtungen zu einer Verringerung der Flankenbreite, wobei die Beschichtung B auf der Luftseite zu einer besonders starken Verringerung führt und auf der Zinnbadseite zu einer geringeren.

Für MT1 mit 0,02% Additiv sind auf der Zinnbadseite kaum Effekte der Beschichtung zu erkennen, auf der Luftseite ist die Verringerung der Flankenbreite durch die Beschichtungen deutlich.

3.6.4. Auswertung Papiersubstrate

Bei Papier J53362 (J) liegt ein großer Unterschied zwischen beiden Seiten vor. Die Vorderseite weist einen höheren dispersen und einen sehr hohen polaren Anteil der Oberflächenspannung auf. Die Rückseite liegt im Bereich beider Seiten des Papiers P015, mit einem dispersen Anteil im Bereich von 30 mN/m und einem geringen polaren Anteil.

Die Flankenbreiten auf den Papiersubstraten stellten sich wie folgt dar:

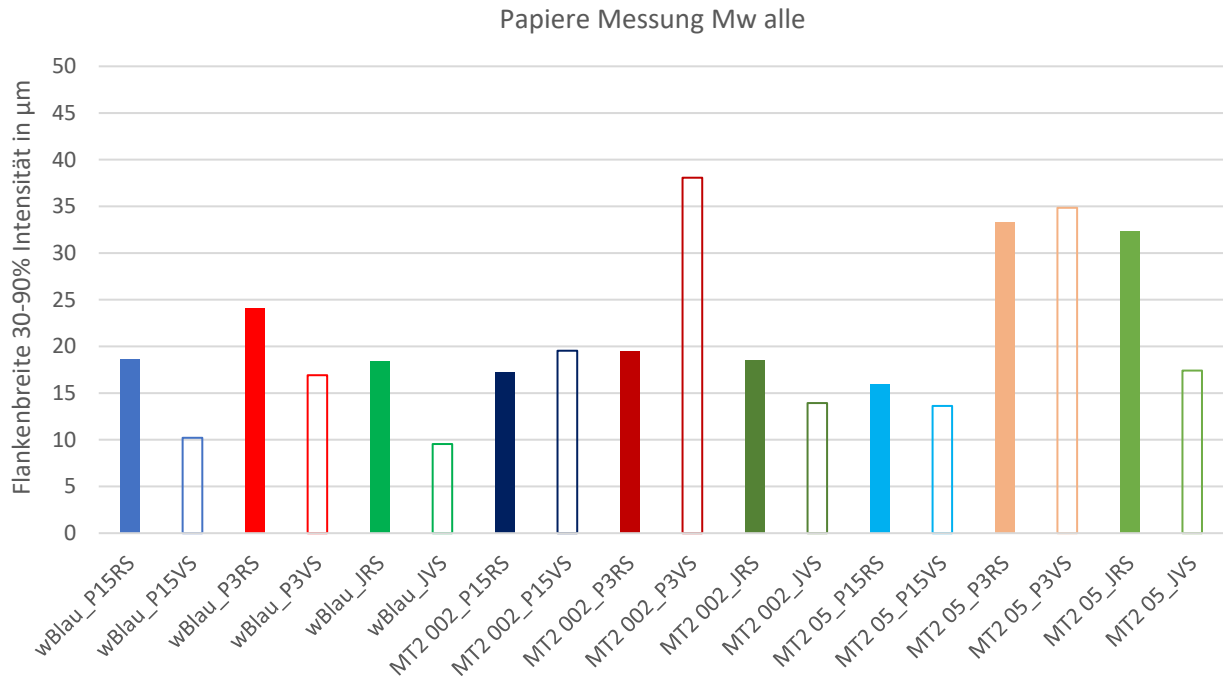


Abb. 83: Flankenbreite Papiersubstrate für einzelne Substrate und Tinten

Es lassen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien feststellen.

Um die Einflussfaktoren zu differenzieren wurden die Ergebnisse nach verschiedenen Kriterien gegenübergestellt:

Fasst man die Ergebnisse für die Bedruckstoffe zusammen, erhält man folgende Darstellung:

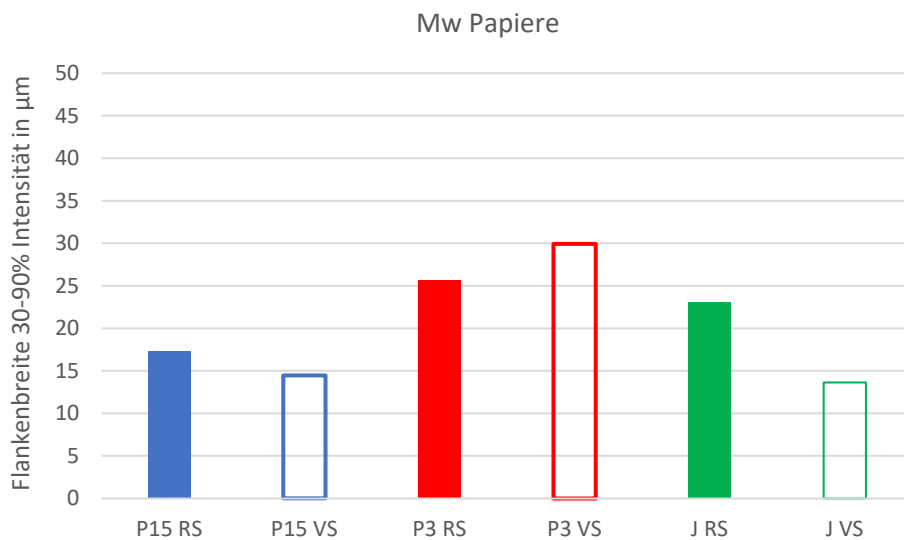


Abb. 84: Flankenbreite Papiersubstrate, Mittelwert einzelne Papiere

Es lässt sich erkennen, dass die Flankenbreiten bei den Papieren unterschiedlich sind. Bei P015 und J sind die Flanken auf der Rückseite breiter als auf der Vorderseite, bei P03 ist es andersherum. Auf P03 sind die Flanken immer am breitesten und bei J ist der

Unterschied zwischen den Seiten am größten. Bei diesem Papier ist auch der Unterschied zwischen den Oberflächenspannungen am größten.

Das Zusammenwirken der Substrate mit den Tinten ist im folgenden Diagramm dargestellt:

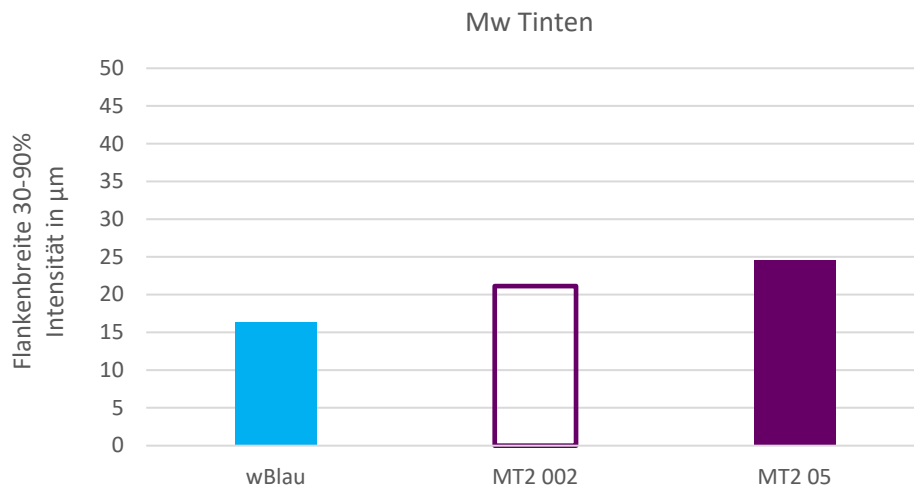


Abb. 85: Flankenbreite Papiersubstrate, Mittelwert Tinten

Dabei wird deutlich, dass die schmalsten Flanken mit der wässrigen Tinte erreicht werden. Die Flanken mit der UV-Tinte sind immer breiter, mit der Variante mit 0,5% Additiv breiter als bei der Variante mit 0,02% Additiv.

Die Drucke mit den UV-Tinten weisen immer breitere Flanken auf als die mit der wasserbasierten Tinte. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die Substrate für den Druck mit wässrigen Tinten vorgesehen und ausgerüstet sind.

3.7 AP 7 Druckversuche mit optimierten Materialien

▪ Durchgeführte Arbeiten:

Für die weiteren Druckversuche wurde die bekannte Druckform zur Bewertung der erforderlichen Qualitätskriterien verwendet.

Mit den modifizierten Tinten wurde auf die gezielt vorbehandelten Substrate an der Inkjet-Labordruckanlage Thieme Lab gedruckt. Dabei wurden die für die Tropfenerzeugung relevanten Parameter wie Wellenform, Spannung der Piezo-Einheit, Tintentemperatur optimal eingestellt.

▪ Erzielte Ergebnisse

Es liegen Druckmuster für die ausgewählten Bedingungen vor, an denen die Qualitätsparameter bewertet wurde. Die Auswertung für diese Muster wurde in die Ergebnisdarstellung unter AP 4 und 6 einbezogen.

3.8 AP 8 Modellierung Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckergebnis

▪ Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurden die vorangegangenen Untersuchungen, Druckversuche und Prüfungen ausgewertet und Zusammenhänge zwischen den im Labor bestimmten Materialeigenschaften von Substrat und Tinte, den Druckkopfeinstellungen und der bei den Druckversuchen erreichten Qualität ausgearbeitet. Die Modellierung bezieht Betrachtungen zur Benetzung auf der Basis der Fluideigenschaften ein. Im Ergebnis soll eine Vorhersage zur Eignung bzw. der notwendigen Vorbehandlung zum Erreichen einer optimalen Druckqualität für verschiedene Substrate getroffen werden.

▪ Erzielte Ergebnisse

3.8.1. Ausbreitungsvorgänge

Zur Modellierung und Vorhersage von Ausbreitungsvorgängen beim Druck reichen die Betrachtungen von Oberflächenspannungen/-energien und Wetting Envelopes allein nicht aus. Diese geben zwar Auskunft zu statischen Gleichgewichtslagen der Tinte-Substrat-Kombinationen, können jedoch nichts zur Zeitabhängigkeit des Erreichens des Gleichgewichts aussagen. Ergänzenden Aussagen verspricht die Betrachtung der zeitabhängigen Tropfenausbreitung.

Für die Betrachtungen dazu soll ausschließlich von UV-Tinten auf nichtsaugenden Substraten ausgegangen werden, so dass der liegende Tropfen den Modellvorstellungen des Kugelsegmentes genügt.

Die Betrachtung des spreitenden Tropfens als Kugelsegment vernachlässigt im Wesentlichen den Einfluss der Schwerkraft auf die Tropfenform. Es erlaubt jedoch für *kleine* Tropfen aus den ermittelbaren Parametern (h_s : Höhe des Segments und D : Tropfendurchmesser (auch Durchmesser des Basiskreises des Kugelsegmentes) und/oder DS : Durchmesser der Kugel) in guter Annäherung Aussagen über das tatsächliche Volumen auf der Substratoberfläche.

Stärkere Abweichungen vom Kugelsegment zeigen spreitende Tropfen längerer Prozesszeiten und/oder Tropfen auf Substraten mit stark inhomogenen Oberflächeneigenschaften. Die Betrachtung kurzer Prozesszeiten und der gezielt homogen vorbehandelten Oberflächen der tatsächlichen Untersuchungen wirken diesen Einschränkungen entgegen.

So gilt:

$$V = \pi/6 \cdot h_s \cdot (3(D/2)^2 + h_s^2) \quad \text{bzw.}$$

$$V = \pi/3 \cdot h_s^2 \cdot (3(DS/2) - h_s)$$

Nichtsaugende Materialien (mit unveränderlichem Volumen ($V = \text{konst.}$)) ermöglichen ihrerseits aus der Kenntnis des aufgetragenen Tropfenvolumens Rückschlüsse auf die Tropfengeometrie. (Randwinkel θ oder Tropfendurchmesser D)

$$\Theta = \arccos \left(\frac{(DS/2 - h_s)}{(DS/2)} \right)$$

$$D = DS \cdot \sin(\theta)$$

Durch die bestätigende Berechnung des Randwinkels unter Berücksichtigung des konstanten Tropfenvolumens konnten subjektive Einflüsse bei der Randwinkelmessung deutlich verringert werden. Die Einbeziehung der sichtbaren Randkurve der Kugel zur Bestimmung des Durchmessers DS verringerte die Messunsicherheit bei der Bestimmung dieser Parameter (Tropfendurchmesser oder Randwinkel).

Eine Vorhersage des Druckergebnisses mit UV-Tinten hängt insbesondere vom Zeitpunkt der Fixierung der Tinte (durch UV-Bestrahlung) ab. Zur Festlegung des Zeitpunktes sind die gewählten Maschinenparameter und reale Maschinendimensionen zu berücksichtigen.

Die gewählte Geschwindigkeit des Transportschlittens des verwendeten Thieme LAB Digital Inkjetdrucksystems beträgt 571,5 mm/s. Für die Entfernung der UV-Lampe von der Druckposition wurde eine Distanz von 360 mm ermittelt. Die anlagenbedingte Fixierung des Tropfens und damit das Ende (ein „Einfrieren“) des Ausbreitungsprozesses erfolgt zum Zeitpunkt $t_{\text{Fix}} = 630 \text{ ms}$.

Beispielhaft ist in der folgenden Abbildung nochmal die Tropfenausbreitung eines mikroskopischen Tropfens der Tinte MT1 05 auf PET dargestellt:

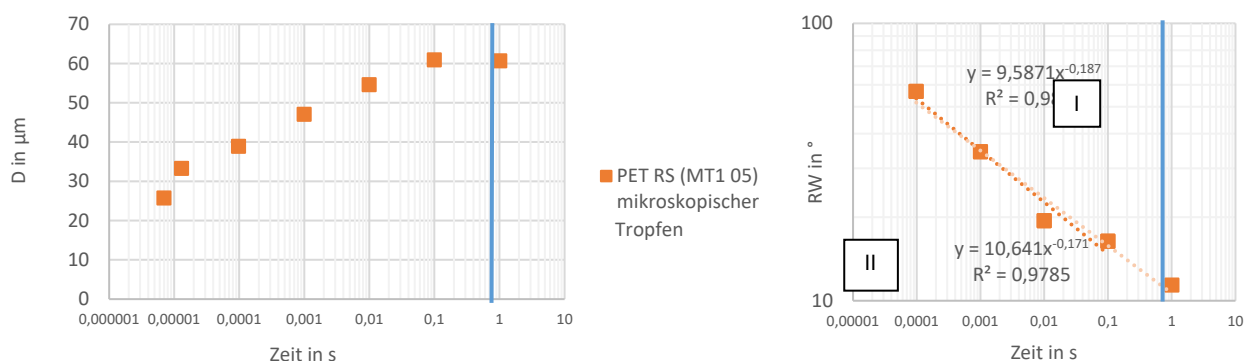


Abb. 86: Ausbreitung eines Tropfens MT1 05 auf PET

Zum Zeitpunkt t_{Fix} wurde für den beobachteten Druckversuch ein Randwinkel RW ($t_{\text{Fix}} = 630\text{ms}$) = $10,45^\circ$ ermittelt. Der zugehörige Tropfendurchmesser des angenommenen Kugelsegmentes errechnet sich für den ungestört gleichmäßig spreitenden Tropfen mit D (630ms) = $72\ \mu\text{m}$.

Ähnliche Aussagen ermöglichen auch makroskopische Tropfen unter Berücksichtigung von Maßstabsbetrachtungen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mikroskopischer und makroskopischer Tropfen wurde zur normierten Darstellung der Tropfendurchmesser gewechselt. Die realen Tropfendurchmesser sind in dieser Diagrammform nicht direkt ablesbar.

Die folgende Abbildung stellt der Tropfenausbreitung PET RS eines mikroskopischen Tropfen MT1 05 einen makroskopischen Tropfen MT1 05 gegenüber. Dargestellt sind die normierten Tropfendurchmesser und Randwinkel.

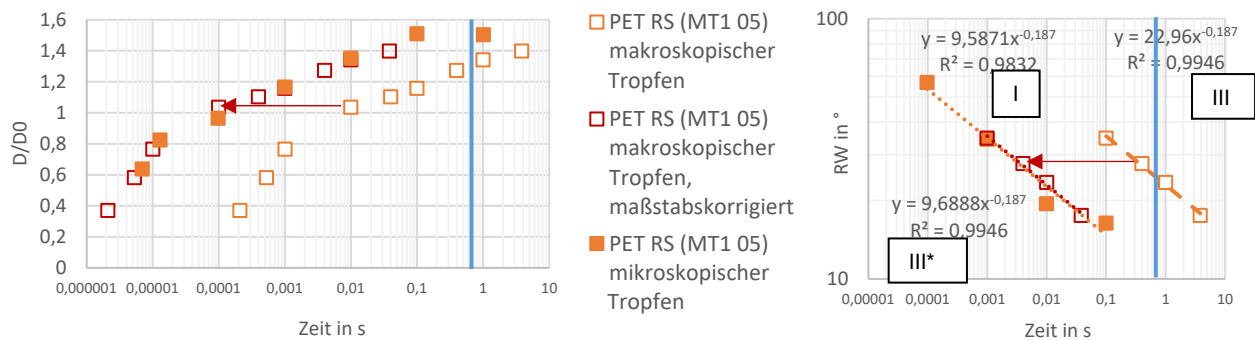


Abb. 87: Gegenüberstellung der Tropfenausbreitung von mikroskopischen und makroskopischen Tropfen

Der aus den Betrachtungen des makroskopischen Tropfen ermittelte Randwinkel eines „Druckversuches“ beträgt zum Zeitpunkt der Fixierung unter Berücksichtigung der Maßstabsbetrachtung RW ($t_{\text{Fix}} = 630\text{ms}$) = $10,56^\circ$; mit einem Tropfendurchmesser von D (630ms) = $72\ \mu\text{m}$.

Die Ursachen möglicher Abweichungen makroskopischer und mikroskopischer Werte sind in der Ermittlung der Koeffizienten der Potenzfunktion und der exakten Bestimmung des Ausgangsvolumens (Festlegung des Maßstabsfaktors) zu suchen. Der mikroskopische Tropfen durchläuft bezüglich seiner kleineren Dimension scheinbar eine längere Alterung (4 Dekaden) und unterliegt so in seiner weiteren Ausbreitung zunehmend bereits benannten Störungen. Zu große Randwinkel und daraus resultierend eine scheinbare Abflachung der Randwinkelkurve ist die Folge.

Betrachtet man nun noch die Auflösung des Ausbreitungsprozesses makroskopischer Tropfen, erscheinen deren Ergebnisse (siehe Unterschiede mikroskopischer und makroskopischer Tropfen) für eine Vorhersage realer Druckbedingungen durchaus geeignet.

Die Verwendung des Druckkopfs KM1024MHB mit dem nominalen Volumen von 12pl und einer Tropfengeschwindigkeit von 6m/s schränkte die Variationsmöglichkeit dieser Parameter stark ein. Eine Veränderung der Druckkopfparameter wirkte sich zudem zusätzlich auf die Tropfenbildung aus. Eine deutliche Variation des Tropfenvolumens erlaubte die Verwendung einer Spritze unter den Bedingungen des hängenden Tropfens. Der fallende Tropfen besitzt hier keine Anfangsgeschwindigkeit und wurde unter betrachteten Versuchsbedingungen nur im Schwerfeld der Erde beschleunigt. Das Tropfenvolumen ist dabei jedoch von den Eigenschaften der Tinte abhängig.

Für die Vorgänge des Tropfenaufpralls und der Tropfenausbreitung ergeben sich unterschiedliche Größen- und Zeitmaßstäbe. Die Zeit des Tropfenaufpralls wird im Wesentlichen vom Quotienten des Tropfendurchmessers und der Geschwindigkeit bestimmt. In der Tabelle „Zeit- und Größenmaßstab des Tropfenaufpralls“ wurden die Kenngrößen der unterschiedlichen Tropfen gegenübergestellt.

	mikroskopischer Tropfen	makroskopischer Tropfen	Massstabsfaktor
Erzeugung	Druckkopf KM1024MHB	Spritze	
Tropfendurchmesser	ca. 28,4µm	ca. 2,5mm	89
Tropfenvolumen	12pl	8,5µl	
Tropfengeschwindigkeit	6m/s	0,7m/s	
Zeit des Tropfenaufpralls	4,73µs	3,57ms	750

Tab. 06: Zeit- und Größenmaßstabs des Tropfenaufpralls

Es zeigte sich, dass die Erfassung des Tropfenaufpralls, der mit dem Druckkopf erzeugten mikroskopischen Tropfen, durch die technischen Möglichkeiten limitiert wird und hier keine weitere direkte Aussage zur Vergleichbarkeit erlaubt.

In Phase 2 (Spreiten des „liegenden“ Tropfens) wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tropfens nach dem Abbremsen der Lamella-Bewegung durch die Wechselwirkung zwischen Oberflächenspannung und Viskosität der Tinte und den Substrateigenschaften bestimmt.

Vergleicht man die Höhe des mikroskopischen Tropfens (ca. $5-15 \times 10^{-6}$ m) und typische Größen atomarer Lagen und deren Wechselwirkungen (ca. 10^{-10} m), kann man auch bei den mikroskopischen Tropfen von deutlich dominierenden Volumeneffekten (mit ca. 10^4 Atomlagen) ähnlich wie bei einem makroskopischen Tropfen ausgehen.

Unter Annahme gleicher Wechselwirkungen innerhalb der Tinte und gleicher Substrate sollte der Zeitverlauf der Tropfenausbreitung unterschiedlicher Volumina nur durch ihre

Größenverhältnisse bestimmt werden, die sich in der doppeltlogarithmischen Darstellung nun als Verschiebung darstellen.

Sowohl die Maschinenparameter als auch die Tinten und Substratparameter können zur Optimierung herangezogen werden.

Mit der Geschwindigkeit des Transportschlittens und der Entfernung der UV-Lampe von der Druckposition, also der Position der UV-Belichtung, stehen zwei mehr oder weniger variable Maschinenparameter zur Verfügung. Weniger variabel erscheint dabei die Position der UV-Belichtung, deren Verschiebung stets konstruktive Veränderungen nach sich zieht und deshalb hier nicht weiter diskutiert werden soll.

Auch der Geschwindigkeit des Transportschlittens sind Grenzen gesetzt.

In der folgenden Tabelle wurden modellhaft Randwinkel und Tropfendurchmesser für die Verdopplung, Verdreifachung und Vervierfachung der Geschwindigkeit des Transportschlittens obigen Beispiels PET RS (MT1 05) berechnet. Dabei wurden die übertragenen (maßstabskorrigierten) Parameter der Ausbreitung des makroskopischen Tropfens für die Vorhersage des Druckes benutzt.

Druckergebnis	Geschwindigkeit des Transportschlittens			
	1-fach ($t_{\text{Fix}}=630\text{ms}$)	2-fach ($t_{\text{Fix}}=315\text{ms}$)	3-fach ($t_{\text{Fix}}=210\text{ms}$)	4-fach ($t_{\text{Fix}}=157\text{ms}$)
Randwinkel RW in °	10,56	12,02	12,97	13,68
Tropfendurchmesser D in μm	72,4	69,3	67,6	66,4

Tab. 07: Einfluss der Geschwindigkeit des Transportschlittens auf Randwinkel RW und Tropfendurchmesser D

Es zeigt sich, dass mit der Änderung der Transportschlittengeschwindigkeit keine signifikante Randwinkeländerung auf 25-30° erreicht werden kann.

Ähnlich den Maschinenparametern ist bei Verwendung eines definierten Druckkopfes, hier der Druckkopf KM1024MHB mit dem nominalen Volumen von 12pl, die Variation der Tropfengröße nicht oder nur in engen Grenzen möglich. Zur Einschätzung eines möglichen Einflusses der Tropfengröße auf optimierte Druckbedingungen sollen hier modellhaft mikroskopische und makroskopische Tropfen unter Vernachlässigung realen Drucks betrachtet werden. Auch hier dient PET RS (MT1 05) als Beispiel.

In der folgenden Tabelle wurden der Randwinkel und der Tropfendurchmesser zum Zeitpunkt der Fixierung ($t_{\text{Fix}}=630\text{ms}$) für den mikroskopischen Tropfen $V=6,9\text{pl}$ und makroskopischen Tropfen $V=4,88\mu\text{l}$ berechnet.

Druckergebnis	Volumen	
	Mikroskopischer Tropfen (V=6,9pl)	Makroskopischer Tropfen (V=4,9 μ l)
Randwinkel RW in °	10,45	25,03
Tropfendurchmesser D in μ m	72	4794

Tab. 08: Einfluss des Tropfenvolumens auf Randwinkel RW und Tropfendurchmesser D

Es zeigt sich, dass mit der Dimension des makroskopischen Tropfens durch Verlangsamung der Ausbreitungsvorgänge zum Zeitpunkt der Fixierung ein deutlicher Randwinkel eingestellt werden könnte, was sich aber auch signifikant in der Vergrößerung des Tropfendurchmessers widerspiegelt. Die Tropfengröße stellt so kein Instrument der Druckoptimierung dar.

3.8.2. Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Kunststoffsubstrate

Damit sind zur Optimierung des Druckergebnisses die Eigenschaften der eingesetzten Materialien entscheidend. Im Folgenden sind auf Basis der Druckqualitätsbewertungen die entsprechenden Zusammenhänge für die unterschiedlichen Materialkombinationen aufgezeigt.

Betrachtet man den Zusammenhang der Eigenschaften von Tinte und Substrat mit den Flankenbreiten für die Kunststoffsubstrate, so ergeben sich folgende Aussagen:

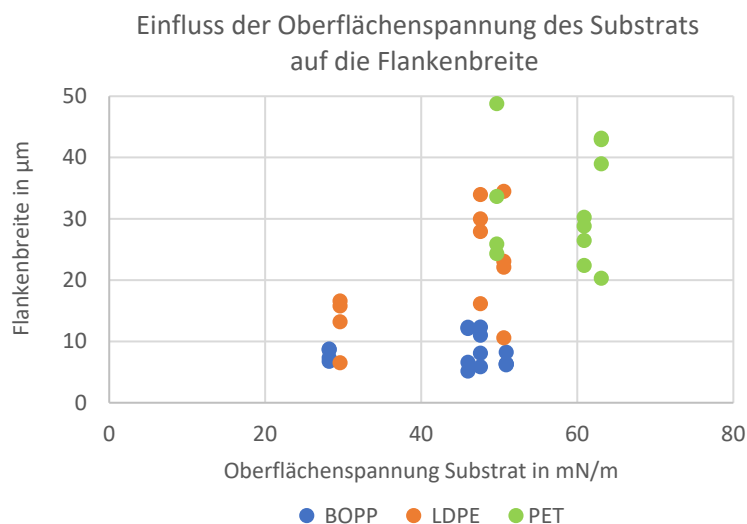


Abb. 88: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung des Substrats

Es zeigt sich ein Trend zu größeren Flankenbreiten mit zunehmender Oberflächenspannung des Substrats. Vergleicht man allerdings nur die Substrate untereinander, so ergibt sich für BOPP und PET kaum ein Einfluss der Oberflächenspannung und für LDPE eine

sehr große Streuung der Flankenbreiten im Bereich der Oberflächenspannung von ca. 50 mN/m.

Betrachtet man nur die Oberflächenspannungen der Tinten, zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Substraten größer sind als die Unterschiede, die durch die Modifikation der Tinten erreicht werden:

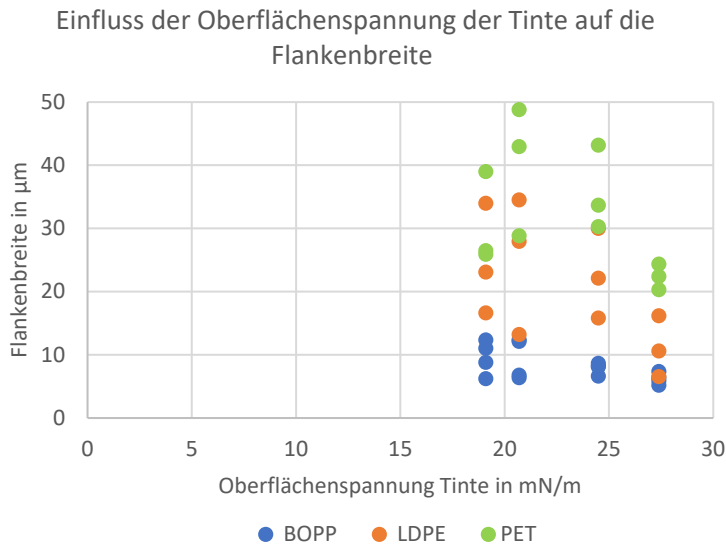


Abb. 89: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung der Tinte

Bezieht man Tinte und Substrat in die Betrachtung ein, erhält man folgende Darstellung:

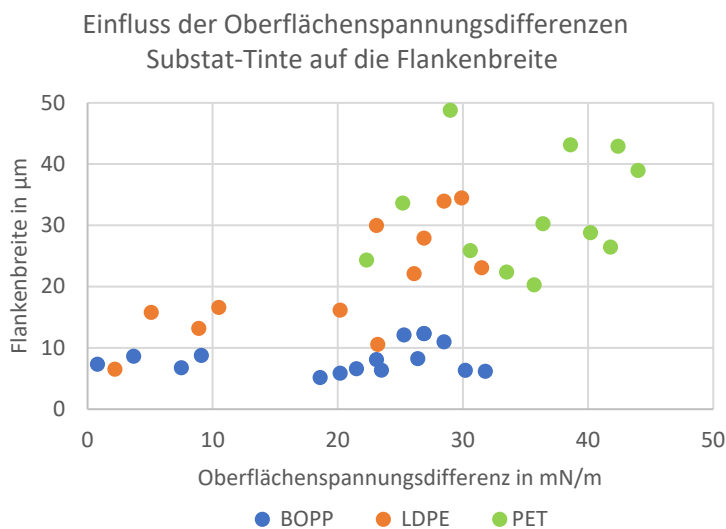


Abb. 90: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Die Differenzen der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte zeigen mit großer Streuung einen Trend zur Erhöhung der Flankenbreite.

Deutlicher wird das, wenn nur die dispersen Anteile in die Auswertung einbezogen werden:

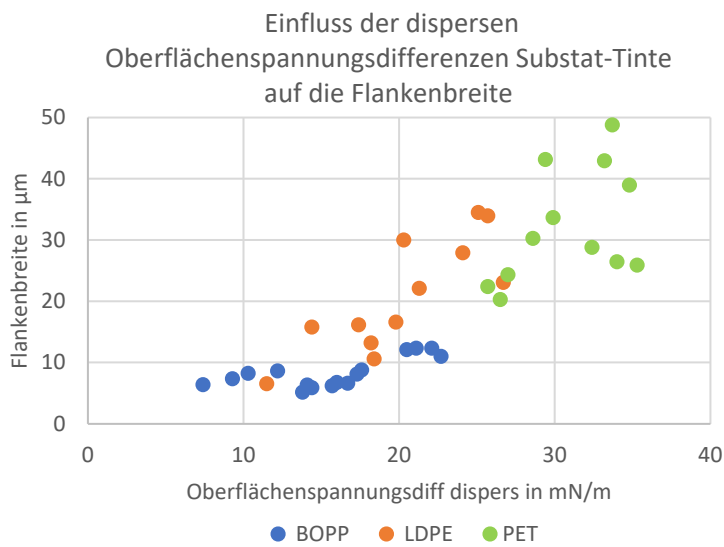


Abb. 91: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Dabei ist für alle Substrate eine Erhöhung der Flankenbreite mit zunehmender Differenz der dispersen Anteile der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte feststellbar. Dies stimmt überein mit dem Ansatz des Wetting Envelopes, bei dem eine vorteilhafte Benetzung bei optimaler Abstimmung der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannungen vorhergesagt wird.

Diese Betrachtung lässt sich auch für die für die jeweilige Substrat-Tinten-Kombination erreichbare Färbung anwenden. Dabei wurde die gemessene Intensitätsdifferenz zwischen bedruckten und unbedruckten Bereichen als Maß für die Färbung bzw. den Kontrast genutzt.

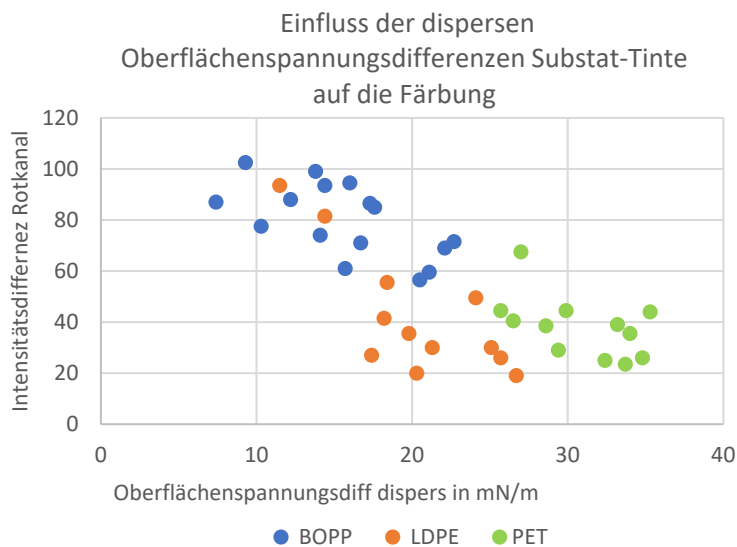


Abb. 92: Färbung in Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Auch hierfür ist die Oberflächenspannungsdifferenz die geeignete Bezugsgröße. Je höher die Oberflächenspannungsdifferenz, desto geringer die Farbintensität bezogen auf den jeweiligen Bedruckstoff. Das lässt sich dadurch erklären, dass es, wenn die Oberflächenspannung des Substrats (bzw. der disperse Term) wesentlich größer ist als die der Tinte zur Spreitung kommt und ein geringerer Kontrast zwischen druckenden und nicht druckenden Elementen entsteht.

3.8.3. Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Metallsubstrate

Betrachtet man den Zusammenhang der Eigenschaften von Tinte und Substrat mit den Flankenbreiten für die Metallsubstrate, so ergeben sich folgende Aussagen:

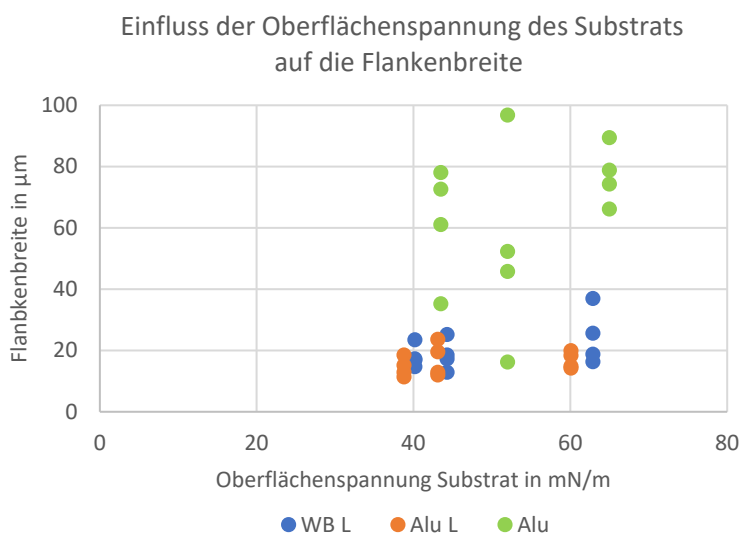


Abb. 93: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung des Substrats

Es zeigt sich ein Trend zu größeren Flankenbreiten mit zunehmender Oberflächenspannung des Substrats, allerdings sind bei dem blanken Aluminium stets hohe Flankenbreiten zu beobachten.

Betrachtet man nur die Oberflächenspannungen der Tinten, zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Substraten größer sind als die Unterschiede, die durch die Modifikation der Tinten erreicht werden:

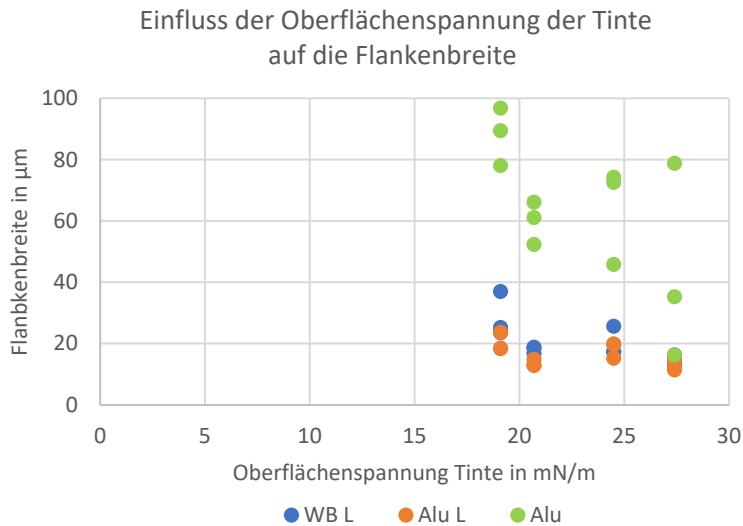


Abb. 94: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung der Tinte

Bezieht man Tinte und Substrat in die Betrachtung ein, erhält man folgende Darstellung:

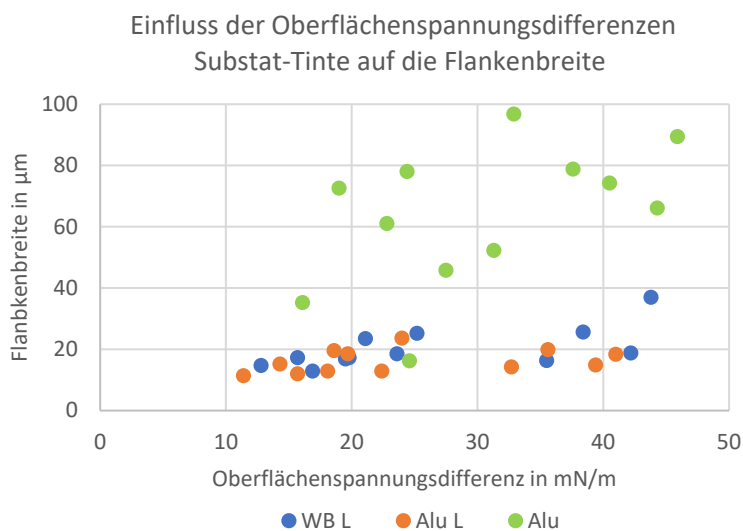


Abb. 95: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Die Differenzen der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte zeigen mit großer Streuung einen Trend zur Erhöhung der Flankenbreite, wobei auch hier der Einfluss der Substrate deutlich wird. Würde man nur die Ergebnisse für die lackierten Metalle darstellen, ließe sich der Trend etwas deutlicher erkennen.

Wenn nur die dispersen Anteile in die Auswertung einbezogen werden, zeigt sich folgendes Bild:

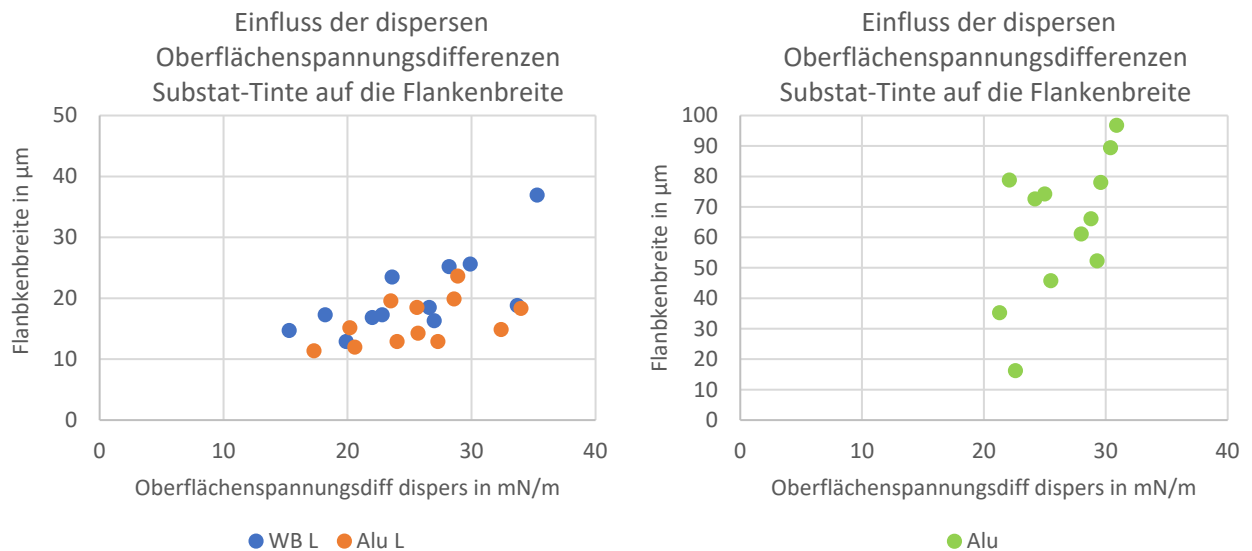


Abb. 96: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Es ist für alle Substrate eine unterschiedlich ausgeprägte Erhöhung der Flankenbreite mit zunehmender Differenz der dispersen Anteile der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte feststellbar. Dies stimmt wie bei den Kunststoffsubstraten überein mit dem Ansatz des Wetting Envelopes, bei dem eine vorteilhafte Benetzung bei optimaler Abstimmung der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannungen vorhergesagt wird.

3.8.4. Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Glassubstrate

Betrachtet man den Zusammenhang der Eigenschaften von Tinte und Substrat für die Glassubstrate mit den Flankenbreiten, so ergeben sich folgende Aussagen:

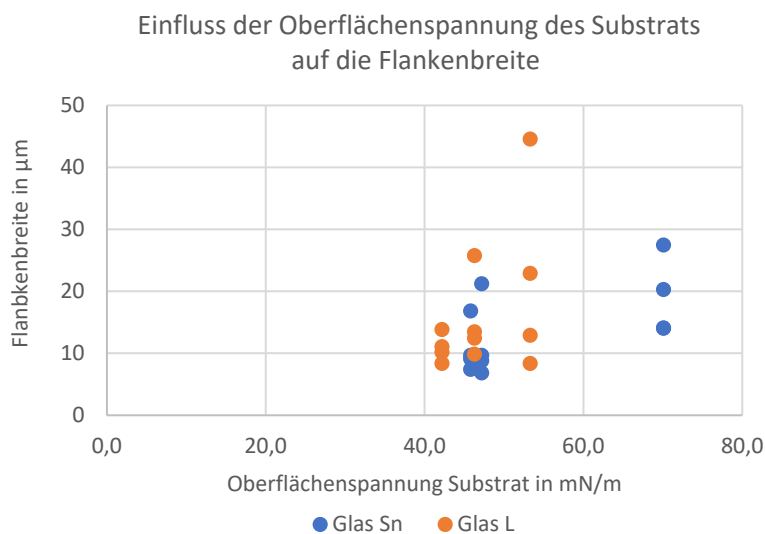


Abb. 97: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung des Substrats

Es zeigt sich ein Trend zu größeren Flankenbreiten mit zunehmender Oberflächenspannung des Substrats, allerdings mit relativ hohen Schwankungen.

Betrachtet man nur die Oberflächenspannungen der Tinten, zeigt sich eher ein Trend zu schmaleren Flanken mit zunehmender Oberflächenspannung der Tinte:

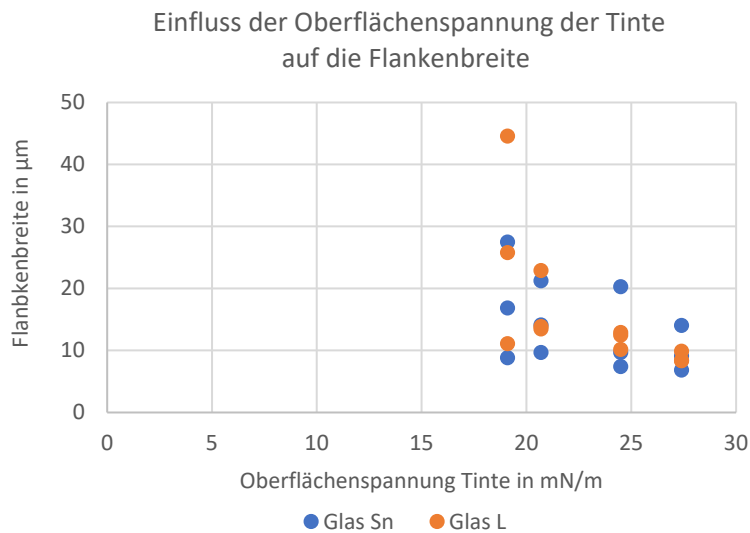


Abb. 98: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung der Tinte

Bezieht man Tinte und Substrat in die Betrachtung ein, erhält man folgende Darstellung:

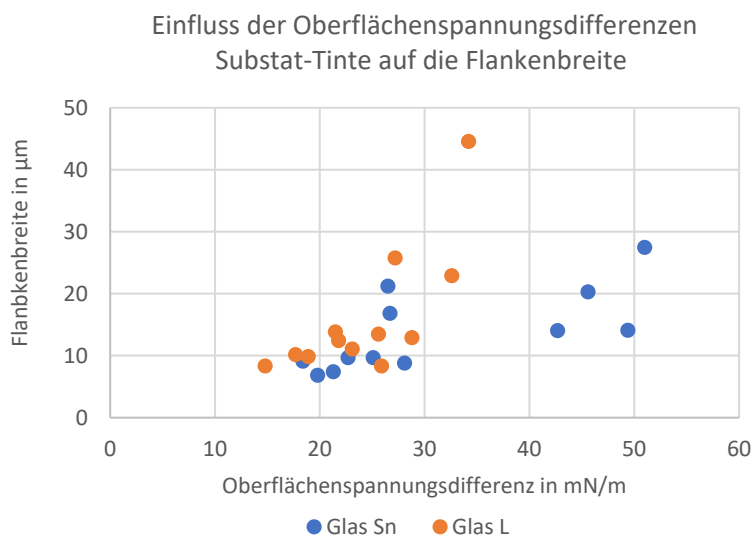


Abb. 99: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Die Differenzen der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte zeigen einen Trend zur Erhöhung der Flankenbreite.

Wenn nur die dispersen Anteile in die Auswertung einbezogen werden, zeigt sich folgendes Bild:

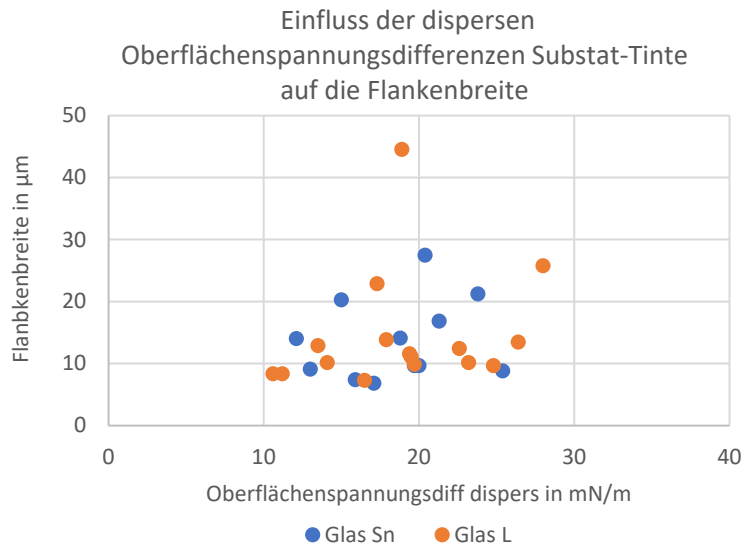


Abb. 100: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Es ist ein leichter Trend zur Erhöhung der Flankenbreite mit zunehmender Differenz der dispersen Anteile der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte feststellbar, allerdings ist dieser Zusammenhang im Gegensatz zu den anderen Substraten nicht deutlicher ausgeprägt als die Abhängigkeit von der Differenz der Gesamtoberflächenspannung. Ursache ist möglicherweise, dass durch die hohen Oberflächenspannungen der Gläser durch die Beschichtung ein Spreiten verhindert und nicht wie bei anderen Substraten durch die Vorbehandlung eine bessere Benetzung erreicht wird. Außerdem sind wie vorn erläutert möglicherweise weitere Eigenschaften der Beschichtung ausschlaggebend für die Flankenbreite.

3.8.5. Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität Papiersubstrate

Betrachtet man den Zusammenhang der Eigenschaften von Tinte und Substrat für die Papiersubstrate mit den Flankenbreiten, so ergeben sich folgende Aussagen:

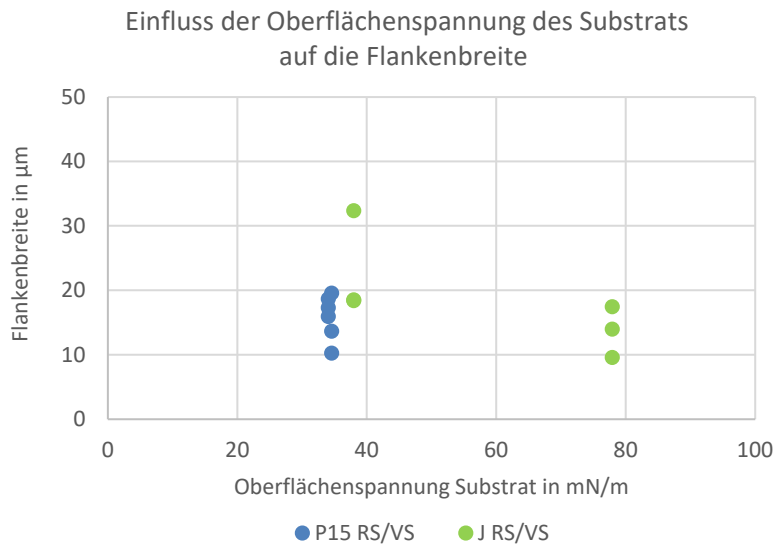


Abb. 101: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung des Substrats

Die Auswertung ist schwierig, da nur Daten von 4 verschiedenen Oberflächen zur Verfügung standen, von denen 3 sehr ähnliche Oberflächenspannungen aufwiesen. Aus dieser Darstellung lässt sich kein Zusammenhang zwischen Flankenbreite und Substrateigenschaften ableiten.

Betrachtet man nur die Oberflächenspannungen der Tinten, zeigt sich ebenfalls kein Zusammenhang zur Flankenbreite:

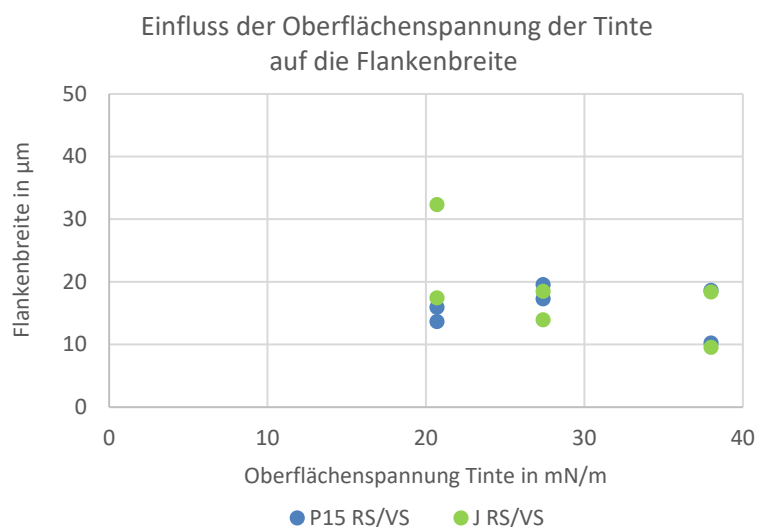


Abb. 102: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung der Tinte

Bezieht man Tinte und Substrat in die Betrachtung ein, erhält man folgende Darstellung:

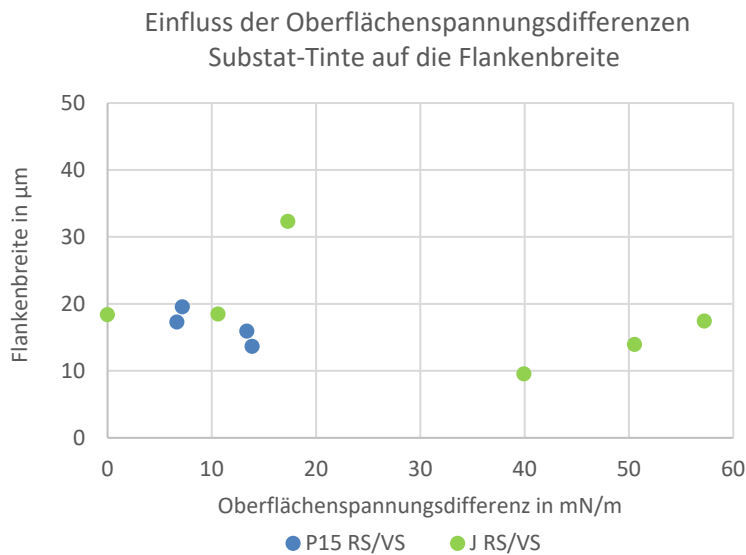


Abb. 103: Flankenbreite in Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Die Differenzen der Oberflächenspannungen von Substrat und Tinte weisen für das Papier P015 keinen Zusammenhang mit der Flankenbreite aus. Betrachtet man nur das Substrat J, und dabei die Vorder- und Rückseite einzeln, zeigt sich ein Trend zur Erhöhung der Flankenbreite bei größerer Differenz der Oberflächenspannungen.

Wenn nur die dispersen Anteile in die Auswertung einbezogen werden, zeigt sich folgendes Bild:

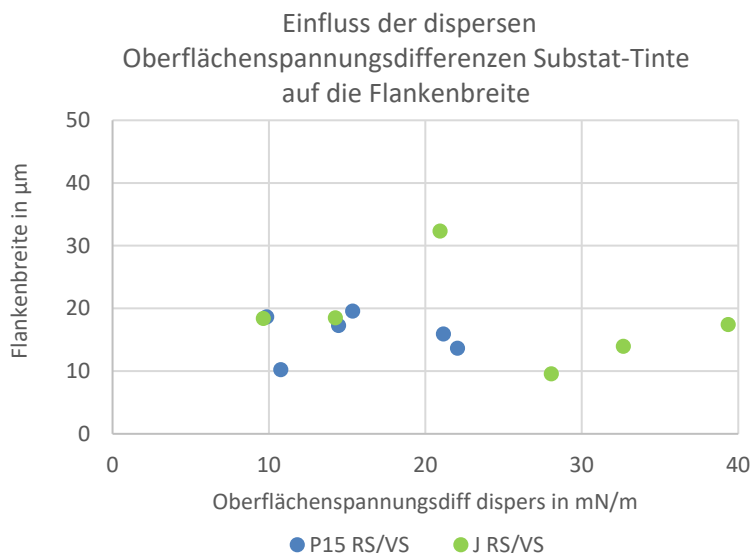


Abb. 104: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Auch hier lässt sich ein Trend nur erkennen, wenn man die Substrate und die Vorder- und Rückseiten einzeln betrachtet. Grund dafür ist einmal, dass nur relativ wenige Varianten untersucht wurden, und dass für die Druckqualität auf Papier neben der Oberflächenspannung das Wegschlagverhalten eine große Rolle spielt. Dieses unterscheidet sich für

die eingesetzten Tinten, aber wird auch durch andere Eigenschaften des Bedruckstoffes wie Saugfähigkeit, Porosität, Rauheit usw. bestimmt. Daher ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannungsdifferenz und der Flankenbreite zu erwarten.

3.8.6. Zusammenhang Materialeigenschaften und Druckqualität – Zusammenfassung aller Substrate

Im folgenden Diagramm ist die Flankenbreite über der Differenz der dispersen Anteile der Oberflächenspannungen für alle untersuchten Substrate zusammengefasst:

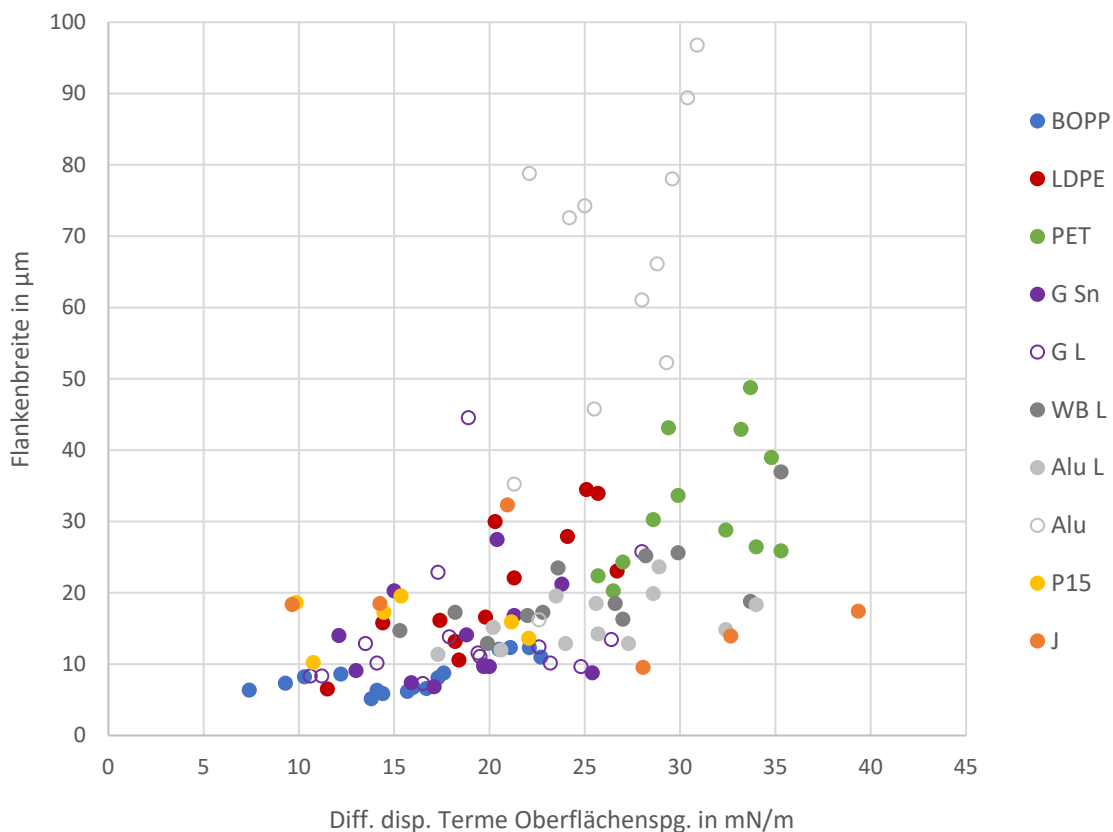


Abb. 105: Flankenbreite in Abhängigkeit des dispersen Anteils der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Man sieht, dass der ermittelte Zusammenhang auch substratübergreifend gilt, mit Ausnahme der Papiere, was an den bereits dargestellten Faktoren liegt.

Um eine noch bessere Korrelation zu finden wurden verschiedene Kenngrößen aus den Oberflächenspannungsmesswerten berechnet:

Diff disp * Diff pol

Diff disp / Diff pol

Diff disp / Diff ges

Diff disp + Diff pol

Abs(Diff disp) + Abs(Diff pol)

Die letzte Variante ergibt noch etwas bessere Korrelationskoeffizienten bei linearer oder exponentieller Regression:

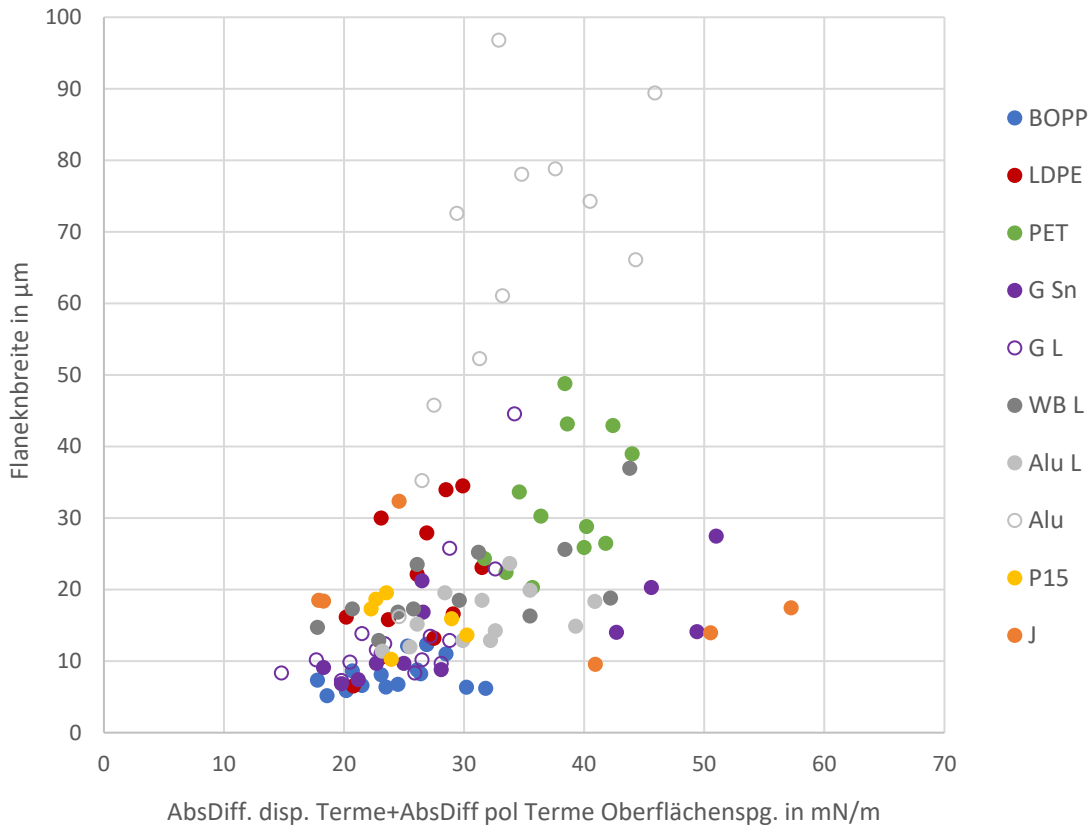
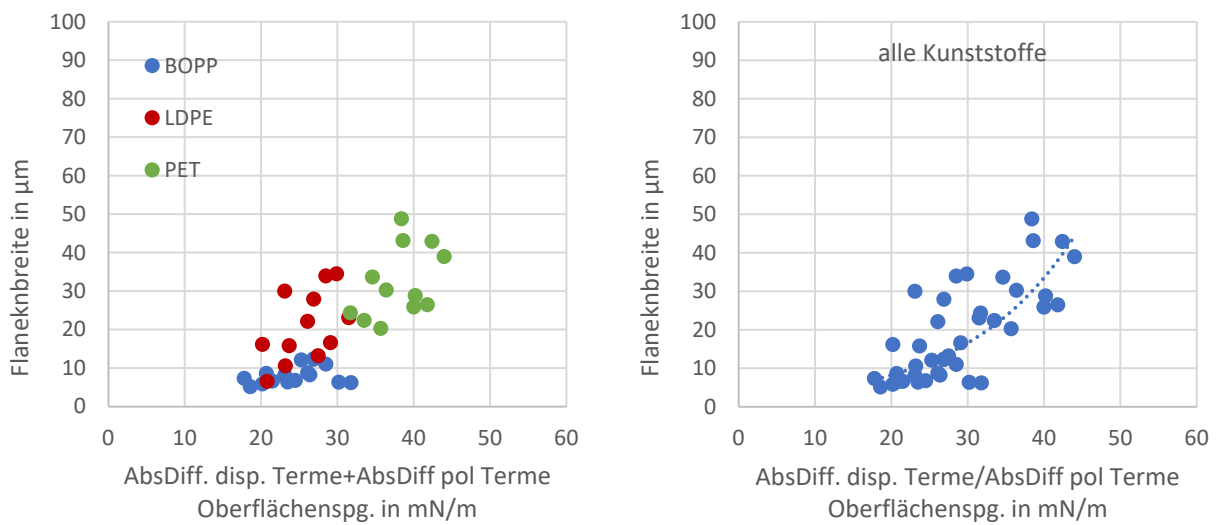


Abb. 106: Flankenbreite in Abhängigkeit der Summe aus den Differenzen der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Stellt man hier die Substratgruppen einzeln dar, zeigen sich deutliche Abhängigkeiten:



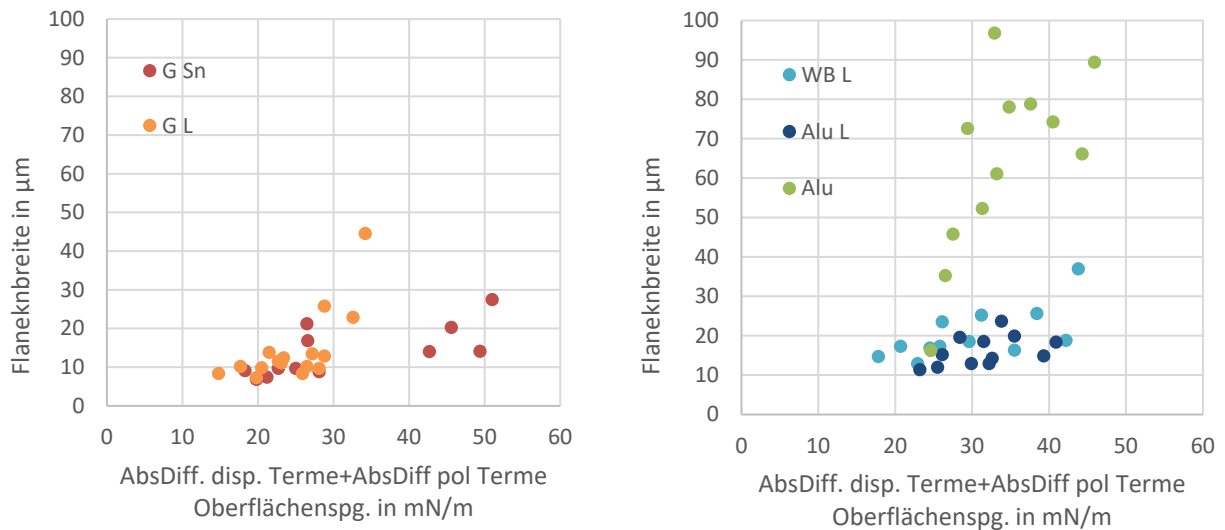


Abb. 107: Flankenbreite in Abhängigkeit der Quotienten aus den Differenzen der dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung von Tinte und Substrat

Diese Auswertung verwendet die gleichen Eingangsgrößen, die auch bei der Betrachtung der Wetting Envelopes herangezogen werden. Mit der Betrachtung der Wetting Envelopes ist allerdings nur eine reine Ja-Nein-Entscheidung möglich, die Analyse der Oberflächenspannungsdifferenzen nach Termen getrennt ermöglicht eine differenziertere Aussage. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass für eine optimale Benetzung eine möglichst geringe Differenz der polaren und dispersen Terme der Oberflächenspannungen der eingesetzten Tinten und Substrate erforderlich ist.

Das stellt relativ hohe Anforderungen an die angewandte Messtechnik, da in der Praxis oft mit Tinten oder Stiften zur Bestimmung der Oberflächenspannung gearbeitet wird, bei denen der polare und disperse Anteil der Substrate nicht differenziert werden kann. Die Ergebnisse zeigen aber, dass die getrennte Betrachtung der Terme unerlässlich ist, um eine sichere Vorhersage zur Benetzung durchführen zu können. Es ist bekannt, dass durch die üblichen Vorbehandlungsmethoden im Wesentlichen der polare Anteil der Oberflächenspannung des Substrats erhöht wird. Dieses Vorgehen kann nur erfolgreich sein, wenn die Tinte ebenfalls einen hohen polaren Anteil hat. Ist die Oberflächenspannung der Tinte durch einen hohen dispersen Anteil charakterisiert, wird die Erhöhung des polaren Anteils der Oberflächenspannung des Substrats nicht zu einer Verbesserung der Benetzungseigenschaften führen.

3.9 Berichtslegung

- **Durchgeführte Arbeiten**

Die in den Arbeitspakten 1 bis 8 erhobenen Daten, erarbeiteten Untersuchungsergebnisse und durchgeführte Berechnungen sowie die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen wurden in Zwischen- und Abschlussberichten nachvollziehbar und durch Dritte wiederholbar dokumentiert. Die in Kapitel 5 genannten Transfermaßnahmen wie z.B. Fachvorträge und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wurden umgesetzt.

- **Erzielte Ergebnisse**

Der Abschlussbericht liegt termingerecht vor, die Transfermaßnahmen, die nach Beendigung des Projekts geplant waren, werden schrittweise umgesetzt.

4 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

4.1 Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse

4.1.1 Innovationspotenzial für einen oder mehrere Wirtschaftszweige

Entwicklungschancen für die Inkjettechnologie bestehen vor allem im Bereich des sogenannten „Industriellen Drucks“. Unter diesem Begriff wird das Bedrucken verschiedenartiger Gegenstände und Oberflächen zusammengefasst, das in den Herstellungsprozess industrieller Produkte integriert ist. Dabei werden als Substrat für den Druck in der Regel kein saugfähiges Material, sondern Kunststoffe, Glas, Metalle usw. verwendet. Um eine reibungslose Integration des Druckvorgangs zu ermöglichen, ist eine gute Benetzung und Verankerung des Druckbildes auf dem Untergrund erforderlich. Im Ergebnis des Projekts steht zur notwendigen Anpassung der Oberflächeneigenschaften der Materialien Know-how für die Praxisanwender bereit, das den Anpassungsprozess deutlich verkürzt und damit Material und Kosten reduziert.

4.1.2 Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe

Potenzielle Anwender der Projektergebnisse sind die Hersteller und Zulieferer von Drucksystemen und deren Anwender, die im Weiteren verallgemeinernd als Druckereien bezeichnet werden sollen. Druckereien sind überwiegend kleine und mittelständische Unternehmen. Im Jahr 2020 beschäftigte die Branche in 7.258 Unternehmen 120.445 Mitarbeiter und erreichte einen Umsatz von 12.1 Mrd. € /25/

Daneben profitieren die Hersteller von Substraten und Zusatzaggregaten zur Substratvorbehandlung sowie die Lack- und Tintenhersteller. Auch unter diesen sind KMUs vertreten, die neben Inkjet-Tinten auch Primer für die Vorbehandlung von Substraten zur besseren Bedruckbarkeit liefern.

4.1.3 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Für die Druckereien bedeutet die Möglichkeit, Substrate über Papier hinaus zu bedrucken, eine erhebliche Erweiterung des Produktportfolios. Dazu kommt, dass das Bedrucken von Folien oder Gegenständen die Basis für eine weit höhere Wertschöpfung darstellt und sich die Druckerei mit derartigen Angeboten von den Konkurrenzbetrieben abheben kann. Die Ergebnisse des beantragten Projektes tragen dazu bei, dass für diese Druckereien die Prozesssicherheit gesteigert und das Risiko von Fehldrucken und Reklamationen minimiert wird.

Für die Tinten- und Lackhersteller bieten die Projektergebnisse die Chance, Produkte am Markt anzubieten, die speziell auf die zu bedruckenden Materialien angepasst sind und so dem Drucker einen deutlichen Vorteil bieten.

4.1.4 Beitrag zur Entstehung neuer bzw. deutlicher Erweiterung bestehender Geschäftsfelder

Eine gezielte Materialauswahl und -vorbehandlung und darauf aufbauend eine sichere Prozessführung kann die Entscheidung für die Installation von Inkjet-Drucksystemen zum Bedrucken von nicht saugfähigen Substraten oder Gegenständen beschleunigen und vor allem in den Druckereien als KMU zu einer Erweiterung der bestehenden Geschäftsfelder führen.

4.1.5 Beitrag des Vorhabens zur Entwicklung von Normen, Standards und Erfüllung gesetzlicher Auflagen

Bislang werden die Standardisierungsgrundlagen im Bereich des Digitaldrucks nahezu ausschließlich für Drucke auf Papier und überwiegend für elektrofotografische Druckverfahren angewandt. Die Ergebnisse des Projektes tragen dazu bei, die Druckqualität im Inkjet-Druck insbesondere mit UV-Tinten auf nicht saugenden Materialien vorhersagbar und reproduzierbar zu machen. Das stellt einen wichtigen Schritt zur Standardisierung des Inkjet-Drucks dar.

4.1.6 Beitrag zur Erreichung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ziele

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen dienten vor allem der Optimierung des Inkjet-Direktdrucks auf nichtsaugfähige Materialien und Gegenstände. Direktdruck bedeutet, dass nicht mit einem Transfermedium oder einem Folienetikett gearbeitet werden muss, um schwierig zu bedruckende Oberflächen farbig zu gestalten bzw. zu beschriften. Allein diese Möglichkeit bietet ein enormes Einsparungspotenzial, da Zwischenträger nicht benötigt werden bzw. nach Übertragung der Farbe entsorgt werden müssen. Wenn Materialvorbehandlungsparameter definiert sind, mit denen eine gute Druckqualität und Beständigkeit erreicht werden kann, führt das zu Kosten-, Material- und Energieeinsparung beim Drucken, da deutlich weniger Fehldrucke erzeugt werden, bevor verkaufbare Exemplare hergestellt werden können. Um die entsprechende Prozesssicherheit zu erreichen, wird bislang häufig vor dem Druck in einem zusätzlichen Arbeitsgang ein Primer

auf das Substrat aufgetragen, wodurch zusätzlicher Aufwand und Kosten verursacht werden. Das ist nicht unbedingt notwendig, wenn Bedruckstoff und Tinte gezielt aufeinander abgestimmt sind.

4.2 Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse

Die wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse dieses Projektes erstreckt sich über die gesamte Herstellungskette von im UV-Inkjet-Druckverfahren hergestellten Produkten auf nichtsaugenden Substraten. Von den Ergebnissen profitieren Lack- und Tintenhersteller, die Hersteller von Substraten sowie die Hersteller und Zulieferer von Drucksystemen und deren Anwender, die Druckereien selbst. Besonders letztere sind überwiegend kleine und mittelständische Unternehmen, in über 5.000 der 7.258 Druckunternehmen arbeiten jeweils weniger als 10 Mitarbeiter /25/. Auch unter den Lack- und Tintenherstellern sind KMUs vertreten.

Die Entwicklung des Marktes für Druckprodukte unterliegt seit einigen Jahren einem starken Wandel. Die Druckindustrie muss immer schneller auf veränderte Anforderungen seitens der Verbraucher reagieren. Das betrifft die stärkere Personalisierung und Versionierung der Produkte sowie eine gesteigerte Formatflexibilität. Hinzu kommen, speziell im Verpackungsbereich, die verkleinerten Losgrößen der Auftraggeber, die Lagerkosten vermeiden wollen. Auch hier besteht zudem die Herausforderungen des immer schneller werdenden Wechsels der Motive der Verpackungen und Veränderungen in der Rezeptur der verpackten Güter aufgrund immer kürzerer Marketingzyklen. Verpackungen aus festen oder flexiblen Kunststoffen, ob bedruckt oder unbedruckt, werden als umweltfreundlich angesehen, da nur wenig Abfall entsteht und damit auch bei der Herstellung ein geringer Ressourcenverbrauch stattfindet. Es wird eingeschätzt, dass diese Materialien davon profitieren werden, dass die Recyclinganstrengungen (chemisch und mechanisch) immer intensiver betrieben werden.

Im Jahr 2020 umfasste der europäische Markt für flexible Verpackungen die Summe von rund 52,6 Milliarden US-Dollar. Eine Studie des Beratungsunternehmens Smithers, aus der auch die genannte Zahl stammt, geht davon aus, dass bis 2026 ein jährliches Wachstum von ca. 3% in diesem Markt stattfinden wird. Das hat auch Auswirkungen auf die im Inkjet bedruckte Materialmenge. Verstärkt wird der Effekt von den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Tendenzen sowie dem allgemeinen Trend, immer mehr Waren in abgepackter Form zu erwerben.

Die Ergebnisse des Projektes erlauben den Druckereien eine bessere Vorhersagbarkeit der Ergebnisse und damit die Möglichkeit zur Verringerung der Reklamationskosten und

zur Effizienzsteigerung. Hinzu kommt eine Vermeidung von Makulatur, also Material, das zwar bedruckt jedoch nicht verkaufsfähig ist und entsorgt werden muss.

Besonders im Bereich des industriellen Drucks ergeben sich vielfältige neue Inkjet-Anwendungen, um Glas, Keramik oder andere nichtsaugende Werkstoffe wie Kunststoff zu bedrucken. So wird bereits eine große Menge Fliesen digital im Inkjet-Verfahren bedruckt. Weitere Anwendungen sind auch im Dekorbereich zu sehen, wie für Lamine. Funktionale Beschichtungen auf Kunststoff oder Glas werden ebenfalls im Inkjet-Verfahren aufgebracht. Auf diese Weise lässt sich z.B. ein besseres Abperlen der Flüssigkeit realisieren oder eine sehr dünn aufgetragene Anti-Beschlagschicht auf Glas für Fenster oder Duschtrennungen.

Die Lieferanten von Zusatzaggregaten für die Vorbehandlung von Substraten sind zum Teil auch KMU. Zusätzlich ergibt sich eine Ausweitung der Geschäftstätigkeit verschiedener Labore und Forschungseinrichtungen durch die Vorprüfung von Substraten und Tinten.

Einschätzung der Finanzierbarkeit einer anschließenden industriellen Umsetzung

Für die Anwendung der Ergebnisse sind keine prinzipiellen Hürden vorhanden. Die industrielle Umsetzung kann unverzüglich nach dem Projektende beginnen, da die Drucksysteme überwiegend bereits mit Vorbehandlungseinrichtungen ausgestattet sind bzw. sich die eventuell notwendigen Investitionen durch Kosteneinsparungen und Effizienzsteigerung schnell amortisieren.

Konkreter Nutzen – unmittelbar oder mittelbar – der Unternehmen

Eine Steigerung der Druckqualität und somit der Bedruckbarkeit im Inkjetverfahren führt zu einer generellen Stärkung des Inkjetdrucks gegenüber den konventionellen Druckverfahren. Im Jahr 2020 betrug der Gesamtumsatz in der grafischen und der Verpackungsmittelindustrie mit Druckerzeugnissen, die mit dem Inkjet-Verfahren erzeugt wurden 80,4 Mrd. US\$ /26/. Das entspricht dem Äquivalent von 923 Mrd. gedruckter A4-Seiten. Dabei wurden insgesamt 124.000 Tonnen Material bedruckt. Die Studie geht davon aus, dass die jährliche Steigerungsrate im Durchschnitt 11,4 % beträgt und der Umsatz im Jahr 118,2 Mrd. US\$ beträgt, was ca. 1,4 Billionen A4-Seiten entspricht.

Zusätzlich zu diesem Umsatz bzw. Materialverbrauch in grafischer und Verpackungsmittelindustrie wird das Inkjet-Verfahren für den industriellen und funktionellen Druck genutzt. Dieser Bereich umfasst die Segmente für Dekore und Lamine, Keramiken wie z.B. Fliesen, Glas und Elektronik. Dazu zählen auch Anwendungen in der Raumfahrt-

und Automobilindustrie und für das Bedrucken in der Werbemittelbranche (Tassen, Kugelschreiber, USB-Sticks usw.). Im Jahr 2018 betrug der Umsatz in diesem Markt weltweit 90 Mrd. US\$. Es wird erwartet, dass dieser bis auf 137 Mrd. US\$ im Jahr 2024 steigen wird. /27/

Wenn man bezogen auf das Marktvolumen des industriellen Digitaldrucks, der überwiegend im Inkjetverfahren realisiert wird, eine Reduzierung der Produktions- bzw. Reklamationskosten durch integrierte Qualitätssicherung von 1 % ansetzt, so handelt es sich um ein monetäres Volumen im Bereich von 150 - 200 Mio. US\$ jährlich. Mit einer verbesserten Aussage zur Benetzung und Haftung von Inkjet-Tinten auf unterschiedlichen Substraten sowie der dabei erreichbaren verbesserten Druckqualität sind kurzfristig Erfolge zu erreichen, da sie unmittelbare Auswirkungen auf die Produktionssicherheit versprechen und helfen, hohe Produktionskosten und aufwändige Reklamationen zu vermeiden.

Der mittelbare Nutzen für Unternehmen ergibt sich hauptsächlich durch die Stärkung und daraus ableitend auch durch die Erweiterung der Einsatzbereiche der Inkjet-Technologie, insbesondere für industrielle Anwendungen. Durch die kontaktlose Farbübertragung können auch nichtplane Oberflächen (Bälle, Dosen etc.) bedruckt werden. Durch diese Applikationen können weitere bzw. andere Geschäftsfelder, die bisher noch nicht im Fokus der Betriebe waren, erschlossen werden. Hinzu kommen die Möglichkeiten für diese Unternehmen, die sich aus dem Aufbringen von funktionalen Schichten ergeben. Damit kann dieser Teil des Produktportfolios entsprechend ausgedehnt werden. Eine weitere Einsatzmöglichkeit für das Inkjetverfahren eröffnet sich in der Verpackungsherstellung. Gerade in diesem Bereich ergeben sich verschiedene Vorteile, da die Auftraggeber bestrebt sind, sich durch Individualisierungen (wechselnde Motive, Codierung etc.) von ihren Wettbewerbern abzuheben, um den Endverbraucher am PoS für eine Kaufentscheidung für ihr Produkt zu gewinnen. Für die dabei oft eingesetzten Kunststoffmaterialien ist eine Aussage über die Farbhaftung vor dem Produktionsbeginn von großer Bedeutung, um Stillstandszeiten oder nachfolgende Reklamationen zu vermeiden.

5 Ergebnistransfer

Die im Projektantrag dargestellten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden planmäßig durchgeführt. Bereits während der Projektlaufzeit wurde das Thema bei verschiedenen Fachveranstaltungen und in diversen Vorträgen vorgestellt. Eine Auflistung der während der Projektlaufzeit durchgeführten Transfermaßnahmen ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
Gremienarbeit	Feedback aus der Industrie; Aufgreifen von Anregungen zur industriellen Umsetzbarkeit und Rahmenbeding.	Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e. V. (FGD), Technischer Beirat	2x jährlich, jeweils II. u. IV. Quartal
Fachveranstaltungen	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse vor Fachleuten im Rahmen von Symposien und Seminaren	Fachsymposium im Rahmen der Jahreshauptversammlung des Vereins Polygraph im SID	11/2019, 11/2021
		Treffpunkt Innovation des bvdm	10/2019
		Treffen der Mitglieder Packnet Dresden	August 2020/ mehrfach 2021
		Virtuelle Informationsveranstaltung der Sächs. Industrieforschungsgemeinschaft (SIG Science Talk)	4 x 2021
		Messestand auf virtual.drupa	04/2021
Einbeziehung Multiplikatoren	Ergebnistransfer an Fachverbände sowie in die Industrie und Wirtschaft durch Berichte und Vorträge	Treffen mit DLH in Halle	11/2019
		Abstimmung mit W&H, telefonisch	11/2019
		Abstimmung mit Heidelberger Druckmaschinen	05/2020
		Abstimmung mit Koenig&Bauer	09/2020
		Abstimmung mit Sun Chemical	04/2020
		Abstimmung mit BYK	01/2020
PbA	Projekt- und Ergebnisdarstellung im projektbegleitenden Ausschuss	Arbeitstreffen des PbA (Vortrag, Fortschrittsbericht und Diskussion, persönliche Kommunikation); Klärung von Fragen und weiterem Vorgehen	13.11.2019, 20.05.2020, 19.11.2020, 14.04.2021, 04.11.2021
Akademische Lehre	Ausbildung von Studierenden, Vermitteln wiss. Erkenntnisse und Methoden	Vorlesungen, Tutorien, Praktika	Sommersemester 2021
	Einbeziehung der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen der HTWK Leipzig	Anleitung von Studenten zur Anwendung der Ergebnisse in der Praxis; Weitergabe des Wissens an Professoren und Dozenten	Wintersemester 2020
Medien	Sicherung der allgemeinen Zugänglichkeit von Projektinformationen und -ergebnissen, Information des breiten Fachpublikums	Veröffentlichung der Zwischenstände auf der Website des Instituts und der beteiligten Industriepartner	Mit Projektbeginn

Tabelle 09: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Durch die Veröffentlichungen, Vorträge und Treffen des projektbegleitenden Ausschusses war ein Ergebnistransfer zu KMU bereits während der Projektlaufzeit gewährleistet. Ziel der Projekttreffen war die kontinuierliche Information der beteiligten Unternehmen sowie die Diskussion der Vorgehensweise und erzielten Ergebnisse. Dies diente einerseits zur Absicherung der Praxisrelevanz der durchgeführten Arbeiten und ermöglichte den Unternehmen andererseits die direkte und zeitnahe Nutzung der Forschungsergebnisse.

Durch die Vorstellung des Projektes auf der Internetseite der Forschungsstelle wurde die Öffentlichkeit über die Forschungstätigkeit informiert. Die Vorstellung der Forschungsarbeiten sowie detaillierter Forschungsergebnisse auf Fachtagungen und Gremien stellte die Bekanntmachung des Forschungsvorhabens und den Wissenstransfer gegenüber dem Fachpublikum sicher.

Darüber hinaus wurde das Forschungsvorhaben Interessenten aus Industrie und Forschung auch außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses in persönlichen Gesprächen vorgestellt und dessen Inhalte diskutiert.

Weiterhin sind die in der folgenden Tabelle aufgeführten Transfermaßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit geplant.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum
Gremienarbeit	Feedback aus der Industrie; Aufgreifen von Anregungen zur industriellen Umsetzbarkeit und Rahmenbeding. Finale Berichterstattung der Ergebnisse des Projektes	VDMA, Arbeitskreis Forschung Printing and Paper Technology	1. Quartal 2022
Fachveranstaltungen	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse vor Fachleuten im Rahmen von Symposien und Seminaren	Fachsymposium Druck und Verarbeitung PTS/HTWK/SID	Nov. 2022
		Treffpunkt Innovation des bvdm	Okt. 2022
		Treffen der Mitglieder Packnet Dresden	mehrfach 2022
		Sächsischer Innovationstag der Sächs. Industrieforschungsgemeinschaft	2022
		InnoPrint-Symposium von SID, HTWK Leipzig und vdm	21.05.2022
Einbeziehung Multiplikatoren	Ergebnistransfer an Fachverbände sowie in die Industrie und Wirtschaft durch Berichte und Vorträge	Beratung von Herstellern von Farben/Lacken bei Entwicklung neuer Materialien	Ab 2022
		Beratung von Substratherstellern	Ab 2022
		Beratung von Maschinenbauern hinsichtlich der Beeinflussung der erreichbaren Qualität	Ab 2022
Akademische Lehre	Ausbildung von Studierenden, Vermitteln wiss. Erkenntnisse und Methoden	Vorlesungen, Tutorien, Praktika	Ab 2022
	Einbeziehung der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen der HTWK Leipzig	Anleitung von Studenten zur Anwendung der Ergebnisse in der Praxis; Weitergabe des Wissens an Professoren und Dozenten	Ab 2022

Medien	Sicherung der allgemeinen Zugänglichkeit von Projektinformationen und -ergebnissen	Veröffentlichung der Ergebnisse auf der Website des Instituts und der beteiligten Industriepartner	Ab 2022
		Veröffentlichung der wichtigsten Ergebnisse als Kurzmeldungen in Fachzeitschriften (z. B. Deutscher Drucker, Verpackungsrundschau)	Ab 2022
Veröffentlichungen	Bericht über Projektergebnisse in Fachzeitschriften und auf Websites, Information eines breiten Fachpublikums	Schriftliche Zusammenfassung in Fachzeitschriften, z.B. „Deutschem Drucker“, „Labels and Labeling“, „Etiketten Labels“, „SIP“ (Fachmagazin für Digitaldruck)	2022
		Veröffentlichung des Abschlussberichts auf Homepage des SID	1.Quartal 2022

Tabelle 10: Geplante Maßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit

Die im Forschungsbericht dargestellten Ergebnisse bieten für interessierte Unternehmen einen umfassenden Einblick in die Forschungsarbeiten. Eine entsprechende Kurzzusammenfassung der Forschungsergebnisse ist auf der Homepage des SID zu finden. Darüber hinaus wird der ausführliche Schlussbericht nach Akzeptanz durch den Fördermittelgeber publiziert und ist somit für alle Interessierten zugänglich. Weiterhin werden die Forschungsergebnisse durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften verbreitet und insbesondere an das Fachpublikum der oben genannten Tagungen und Gremien herangetragen. Insgesamt sind somit zahlreiche Möglichkeiten gegeben, um die Ergebnisse des Forschungsvorhabens KMUs erfolgreich verfügbar zu machen sowie den Ergebnistransfer in die Wirtschaft sicherzustellen.

Die Forschungsstelle wurde bei der Durchführung des Vorhabens durch einen projektbegleitenden Ausschuss aus Experten des Druckmaschinenbaus sowie Mitgliedern der Digitaldruckbranche und Verbänden unterstützt. Durch regelmäßige Sitzungen konnte der Kenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Praxis gewährleistet und damit eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis sichergestellt werden. Während der gesamten Projektphase erfolgte ein intensiver Informationsaustausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und mit Vertretern weiterer interessierter KMU. Des Weiteren wurden die Ergebnisse in der direkten Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen und dem VDMA, Arbeitskreis Forschung Printing and Paper Technology genutzt.

Als langjähriger Forschungspartner und Dienstleister der Druckindustrie mit einem akkreditierten Prüflabor verfügt das SID über vielfältige Kontakte zu Branchenunternehmen, insbesondere zu kleinen und mittelständischen Druckereien.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse anderen Unternehmen der Branche zugänglich gemacht. Das geschieht durch Veröffentlichungen in der Fachpresse, auf der Internetseite des Instituts und auf Fachveranstaltungen. Das SID kann für die Jahre 2020 und 2021 auf mehr als 40 eigene Veröffentlichungen in der Fachpresse verweisen und präsentiert sein Leistungsspektrum regelmäßig auf Fachmessen. Durch die aktive Mitarbeit im Arbeitskreis Digitaldruck der dfta werden Erkenntnisse den Vertretern aus dem Bereich der Verpackungsproduktion zugänglich gemacht und die Lehrtätigkeit von Mitarbeitern des SID an der HTWK werden die Forschungsergebnisse an die Studierenden und damit an die zukünftige Generation von Experten weitergegeben.

6 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20893 BR/1 der Forschungsvereinigung „Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.“, Frankfurt wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Unser Dank gilt weiterhin den Projektbegleitern aus der Industrie für deren Unterstützung.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literaturverzeichnis

- /1/ Werner Zapka: Handbook of Industrial Inkjet Printing, A Full System Approach, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2018
- /2/ M. Lake, Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: Vorbehandeln, Beschichten, Bedrucken, Funktionalisieren, Prüfen, Carl Hanser Verlag, ISBN: 978-3446446755, 2. Auflage (2016)
- /3/ High speed Inkjet-Druck – Verdrängt die neueste Generation den Offsetdruck?; <https://www.brainprint.ch/news-ratgeber/news/detail/highspeed-inkjet-druck-verdraengt-die-neuste-generation-den-offsetdruck/>, news-ratgeber (2018)
- /4/ Stephen D. Hoath: Fundamentals of Inkjet Printing, The Science of Inkjet and Droplets, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016
- /5/ G. Habenicht, Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-85266-7, 6. Auflage (2009)
- /6/ Krüss GmbH Deutschland; <https://www.kruss-scientific.com/de/service/schulung-theorie/glossar/oberflaechenspannung/>; 2019
- /7/ Dr. Roland Sombom, Wenn es nicht optimal läuft, Farbe und Lack eJournal, Hannover (2006)
- /8/ Universität Kassel, Makromolekulare Chemie und Molekulare Materialien; Kontaktwinkel; Praktikumsanleitung WS 2009/10
- /9/ Zenkiewicz: Methods for the calculation of surface free energy of solids; Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering; Vol. 24 ;2007
- /10/ D.K. Owens and R.C. Wendt. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. J. Appl. Polym. Sci., 13:1741–1747, 1969.
- /11/ W. Rabel. Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. Farbe und Lacke, 77(10):997–1005, 1971.
- /12/ Gregor Hlawacek; Kontaktwinkelmessung; Universität Leoben (2005)
- /13/ Kopczyńska, A.; Ehrenstein, G. W.; Oberflächenspannung von Kunststoffen; Messmethoden am LKT; Friedrich-Alexander-Universität, Lehrstuhl für Kunststofftechnik Erlangen; Skript
- /14/ DataPhysics Instruments GmbH; Anwendung der 'Wetting Envelope'; Applikationsbericht 13, Filderstadt <http://www.dataphysics.de/startseite/applikationszentrum/applikationsberichte/> (2018)

- /15/ Dr. Hauke Nicken; Prozessstabilität durch Oberflächenbehandlung; Deutscher Drucker, Nr.2, (2017);
- /16/ Manfred Rasche; Oberflächenbehandlung von Kunststoffen (1988);
- /17/ Henning Gleich; Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie; Dissertation; Universität Duisburg-Essen (2004)
- /18/ Fluor Technik System GmbH, Kleine Fluor Fibel, www.fts-de.com
- /19/ <https://www.innovent-jena.de/oft/ccvd-combustion-chemical-vapour-deposition>
- /20/ Entwicklung einer Methode zur automatischen Bestimmung von Vorbehandlungsparametern für ein mit Inkjet zu bedruckendes Substrat; Sächsisches Institut für die Druckindustrie; Abschlussbericht P-27-18 (2018)
- /21/ <https://www.innovent-jena.de/oft/dbd>
- /22/ <https://www.tramaco.de/produkte/primerhaftvermittler.html>
- /23/ <https://www.flamprico.de/haftvermittler-primer/glasprimer-primer-f%C3%BCr-glas/>
- /24/ P.E. Frommhold, Erzeugung und Untersuchung von schnellen Mikrotropfen für Reinigungsanwendungen, Dissertation Georg August Universität Göttingen, 2015
- /25/ Die deutsche Druckindustrie 2020/2021 – Ein Überblick in Bildern und Zahlen“, Herausgeber: Bundesverband Druck und Medien e.V., Berlin, 2020
- /26/ The Future of Inkjet Printing to 2025“, Smithers, 2020
- /27/ The Future of Functional & Industrial Printing to 2024“, Smithers, 2019